

# SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ SMART GRID SYSTEM AND TECHNOLOGY

УДК 621.31

С.П. Денисюк, д-р техн. наук, проф. ORCID 0000-0002-6299-3680

В.А. Таргонський, магістр ORCID 0000-0003-3801-8284

М.В. Артем'єв, аспірант ORCID 0000-0002-1373-4105

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ЛОКАЛЬНІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ З АКТИВНИМ СПОЖИВАЧЕМ: МЕТОДИ ПОБУДОВИ ТА АЛГОРИТМИ ЇХ ФУНКЦІОНУВАННЯ

*На основі аналізу зарубіжних літературних джерел виконано їх класифікація за основними задачами модернізації локальних енергосистем згідно положень концепції Smart Grid. Дана коротка характеристика розвитку локальних електроенергетичних систем з наявністю розосередженої генерації та активних споживачів, а також наслідків їх взаємодії з центральною енергосистемою. Розглянуто роль активного споживача як суб'єкта електроенергетичної системи, який спроможний своїми діями суттєво впливати на її стан. Досліджено методи побудови локальних електроенергетичних систем та особливості їх функціонування. Проаналізовано можливості впровадження результатів розвитку локальних електроенергетичних систем з точки зору їх керування, схемних рішень, оптимізації енергетичних процесів та взаємовпливу елементів електричних мереж в умовах України. Наведено моделі ринкових процесів на локальних лібералізованих ринках електроенергії та механізм проведення аукціону на ринку електроенергії. Розкрито роль агрегатора як суб'єкта локального енергетичного ринку та його можливостей в керуванні попитом на енергоресурси та запропоновано оптимальні рішення з модернізації енергетичних процесів на різних ієрархічних рівнях електричної системи. З точки зору керування кінцевим споживачем розглянуто чотирьохшарову структуру взаємодії споживачів електроенергії з елементами електромережі на соціальному, інформаційному та технологічному рівнях. Наведено принципи компенсації реактивної потужності з метою підвищення надійності мережі та показників якості електроенергії. Розглянуто принципи побудови мультиагентних систем керування, її переваги порівняно з іншими системами інтелектуального керування енергетичними процесами, можливості та архітектуру побудови.*

**Ключові слова:** локальні системи електропостачання, електрична мережа, агрегатор, мультиагентна система, активний споживач, оптимізація, Smart Grid, Microgrid.

### Вступ

Розвиток електроенергетики України згідно положень концепції Smart Grid обумовив появу низки проблем та викликів, які потребують детального їх аналізу та вирішення задля можливого подальшого розвитку національної електроенергетичної галузі в даному напрямку, що має пришвидшити інтеграцію України в Європейський енергетичний простір [44,45,46]. Найбільш доцільним варіантом для вирішення даного питання є використання передового світового досвіду, зокрема, останніх наукових досягнень країн, що досягли найкращих результатів у розвитку електроенергетичної сфери.

Вище означене потребує переосмислення принципів керування електроенергетичними процесами в електроенергетичних системах, вдосконалення процесу компенсації реактивної потужності та посиленні ролі інформаційної складової в електричних мережах, оптимізації ринкових процесів та керування взаємодією кінцевого споживача з елементами системи. Разом з тим відбувається перехід від традиційної енергетики, до системи із клієнто-орієнтованими потоками енергії від джерел електроенергії до кінцевих споживачів, тобто до децентралізованої, з джерелами розосередженої генерації (ДРГ) та активними споживачами, що суттєво впливають на стан електроенергетичних систем та змінюють принципи керування потоками електроенергії системи.

Якщо відносно всієї електроенергетичної системи глобальні зміни реалізувати досить складно, то відносно окремих її складових, даний процес є більш простішим. Суттєвий потенціал до впровадження інноваційних технологій та принципів мають локальні енергетичні системи, зокрема Microgrid, при впровадженні яких в області електроенергетики можливе значне підвищення енергоефективності та

© С.П. Денисюк, В.А. Таргонський, М.В. Артем'єв, 2018

надійності систем електропостачання.

#### Загальна характеристика

Енергосистеми еволюціонували з недостатньо розвинених розрізнених систем в централізовану енергосистему, що працює на викопному паливі, потім в централізовану систему з використанням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), наближаючись до останнього етапу, – до розосередженої енергосистеми з використанням VPP (Virtual Power Plant) [40].

Під локальною енергосистемою (ЛЕС) передбачається локальна розподільна мережа низької напруги, яка об'єднує, наприклад, один або кілька розосереджених енергетичних об'єктів, найчастіше використовуючи VPP, накопичувачі енергії, паливні елементи, когенерацію, електромобілі, систему керування попитом, яка може працювати ізольовано або підключаючись до центральної енергосистеми. Спрощена схема ЛЕС представлена на рис.1. Саме розосереджена енергетика та її самоорганізація в ЛЕС з використанням ефективних технологічних рішень інтелектуального керування, на думку експертів, є енергетикою майбутнього [40].

Мікромережі спочатку створювалися для забезпечення безперебійного енергопостачання об'єктів, віддалених від центральної мережі, або таких, що мають стратегічне значення. У даний час ЛЕС сприймається як перший крок на шляху до інноваційного та ефективного використання енергоресурсів на локальному рівні для отримання комерційної вигоди. У США вони отримали назву розвинених локальних енергосистем (advanced microgrid).

Важливим елементом «активного» енергокомплексу майбутнього є так званий «prosumer» (producer + consumer) – активні споживачі, що з'явилися за рахунок розвитку технологій побутових генераторів енергії (сонячних батарей) і «розумних» лічильників, енергоефективних рішень і керування попитом, і які, з часом, можуть стати повноцінними учасниками ринку. Європейський Парламент відніс до категорії prosumer широке коло суб'єктів: «побутовий prosumer» (громадяни з власної мікрогенерацією), «колективний prosumer» (об'єднання некомерційного характеру), «комерційний prosumer» (торгові центри, офісні будівлі), «громадський prosumer» (школа, лікарня) [41].

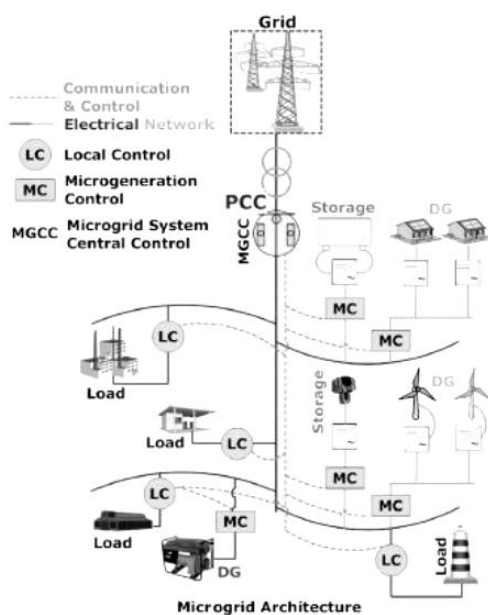


Рисунок 1 – Спрощена схема ЛЕС.

Структура ЛЕС і системи керування нею залежить від кількості, потужності і роду розосереджених енергоресурсів, які входять в неї. Функції керування розосередженими енергоресурсами можуть виконувати локальні системи керування кожного агрегату. Однак зі зростанням кількості об'єктів керування в ЛЕС неможливо обійтися без автоматизованої інформаційно-керуючої системи, яка повинна здійснювати координоване і оптимальне керування всіма розосередженими енергоресурсами, мінімізуючи витрати на паливо, закупівлю енергії на ринках і технічне обслуговування обладнання, підвищуючи доходи від продажу енергії та надання системних послуг (цінозалежне споживання, регулювання частоти і напруги) [42]. Такі системи керування отримали загальну назву DERMS (Distributed Energy Resource Management System).

Саме DERMS відповідає за взаємодію з «великою» енергосистемою, яку, в свою чергу, відображає DMS (Distributed Management System) енергетичної компанії. DMS встановлює «межі» і норми, щоб при

приєднанні мікромережі, вона не завдала шкоди мережі через можливі замикання, порушення напруги, неправильну топологію [43].

Вченими провідних країн світу досліджено особливості сучасних технологічних та енергетичних процесів в електричних мережах, запропоновано схемо-технічні рішення реалізації електромереж згідно з останніми досягненнями науковців [2,14]. Нижче наведено методи та засоби керування локальними системами електропостачання, викладено нові принципи організації бізнес-процесів згідно з концепцією Smart Grid.

Поява відновлюваних та розосереджених джерел енергії призвело до значних змін у роботі та плануванні систем розподілу. При підключенні розподілених джерел енергії, шини навантаження стають так званими шиною активних споживачів. Активний споживач або prosumer визначається як споживач електроенергії з можливістю місцевого виробництва енергії. Оскільки енергія виробляється і споживається локально, поява активних споживачів призводить до зміни потоків активної потужності в розподільних мережах, включаючи можливу появу протилежних потоків активної енергії від активних споживачів до електростанції. Крім локального виробництва активної потужності, активні споживачі також дозволяють місцеве виробництво реактивної потужності за допомогою силових електронних пристроїв. При місцевому виробництві реактивної потужності можна контролювати потоки реактивної потужності в розподільній мережі, що дозволяє безпосередньо контролювати втрати активної потужності в системі розподілу. Розвиток питання керування діяльністю активного споживача представлена в роботах [2,6].

Якщо електроенергетика розвивається в напрямку побудови місцевих центрів обміну електроенергією, то їх географічне розташування та розподіл генераторів дуже важливі з точки зору ефективності торгівлі та стійкості місцевих енергетичних ринків. Зокрема, кластеризація розосереджених генераторів на локальних енергетичних ринках є дуже важливою через зростання споживання електроенергії в залежності від відстані між продавцями та покупцями. Крім того, локальний енергетичний ринок стає “несправедливим”, якщо розподілені генератори енергії зосереджені на певному локальному енергетичному ринку [6].

Проведений аналіз показав, що для вирішення задач, пов’язаних з аналізом структури, параметрів, режимів та процесів на енергетичних ринках в ЛЕС, взаємодії елементів електричної системи та створенням систем контролю енергетичними процесами доцільно розглянути наступні питання: аналіз моделей ринкових процесів; прийняття оптимальних рішень на рівні незалежного системного оператора та оператора системи розподілу; аналіз моделей керування кінцевим споживачем; оптимізація взаємодії джерел розосередженої генерації і електромережі та інші.

Компаративний аналіз літературних джерел проведено за запропонованими критеріями розподілу наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Розподіл літературних джерел за критеріями.

Проблеми, що вирішуються	Рівень дослідження та впровадження результатів		
	Кінцевий споживач	Локальна енергосистема	Енергопостачальна організація
1. Керування попитом на енергоресурси	4,7,8,11,12,13,15,18,19,21,22,23,25,26,27,31,32,35,36,39	4,5,7,8,9,11,12,13,15,18,19,21,22,23,25,27,31,32,33,34,35,39	8,9,31,32,33,34
2. Взаємодія з активним споживачем	1,10,11,22,23,24,29,39	1,6,10,11,22,23,24,29,38,39	1,6,10,24
3. Моделі та ринкові процеси в енергетиці	10,22,23,24,27,31,32,39	6,10,22,23,24,27,30,31,32,34,38,39	6,10,24,30,31,32,34
4. Інтелектуальні системи керування енергетичними об’єктами та процесами	4,8,16,17,19,21,29,36	3,4,8,16,17,19,21,28,29,33,36	3,8,17,28,33,36
5. Компенсація реактивної потужності	14,16,19,21	5,14,16,19,21	
6. Мультиагентні системи керування в енергетиці	17,18,19,20,21,37	17,18,19,20,21	17
7. Моделювання та реконфігурація систем електропостачання	14,15,16,19,20,21,25,26,27	2,9,14,15,16,19,20,21,25,27,28,33	2,28,33
8. Дія джерел розосередженої генерації	11,13,20,21,25,27,29,31,32	5,11,13,20,21,25,27,29,31,32,34	31,32,34

З точки зору масштабу дослідження:

- А. рівень кінцевого споживача;
- В. локальної енергосистеми;
- С. енергопостачальної організації.

Відносно проблем, що вирішуються в літературних джерелах, запропоновані наступні критерії:

- 1) керування попитом на енергоресурси;
- 2) взаємодія з активним споживачем;
- 3) моделі та ринкові процеси в енергетиці;
- 4) інтелектуальні системи керування енергетичними об'єктами та процесами;
- 5) компенсація реактивної потужності з метою підвищення енергоефективності та надійності електричних мереж;
- 6) мультиагентні системи керування в енергетиці;
- 7) моделювання та реконфігурація систем електропостачання;
- 8) дія джерел розосередженої генерації.

Розглянемо перспективні, найбільш розвинуті досягнення вчених провідних країн світу, що доцільно використати в умовах України задля розвитку національної енергетичної сфери згідно положень концепції Smart Grid.

## 1. Керування попитом на енергоресурси

### 1.1 Модель оптимізації на ринку DRX

1) Стратегія ISO (Independent System Operator): На ринку DRX (Demand Response Exchange – обмін у відповідь на попит), ISO першим запускає модель IHED (інтегрованої диспетчеризації тепла та електроенергії) для визначення планування генераторних блоків і агрегаторів будівель протягом наступних кількох інтервалів часу [12]. Відомі методи комбінованої оптимізації електроенергії та теплової енергії можна знайти в роботах [20, 21]. Метою диспетчерської моделі є максимізація соціального добробуту, як показано в (1). Крім виходів генерації в реальному часі ( $P_{E,P}^{gen1}$ ,  $P_{H,\phi}^{gen1}$ ,  $P_{E,\phi}^{gen1}$ ), змінні, які повинні бути оптимізовані, є бажаною силою балансування ( $\Delta P_{E,i}^{req}$ ,  $\Delta P_{H,i}^{req}$ ) як різниця між потребами енергії до DR ( $P_{E,i}^{dem0}$ ,  $P_{H,i}^{dem0}$ ) і потребує енергії в реальному часі та після DR ( $P_{E,i}^{dem1}$ ,  $P_{H,i}^{dem1}$ ). Слід зазначити, що індекси “ $t$ ” для всіх змінних пропущені для простоти. Формулювання моделі IHED має вигляд (1, 2), показаний нижче.

У співвідношенні (1) перша частина позначає загальну користь споживачів, тоді як друга і третя складові позначають собівартість генеруючих енергоблоків тільки для виробництва електроенергії та вартість генерації когенераційних установок відповідно. Слід зазначити, що вартість генерації енергії з ВДЕ тут дорівнює нулю.

$$\max F = \sum_{t=1}^{NT_H} \left( \sum_{i=1}^{N_A} R_i (P_{E,i}^{dem0} + \Delta P_{E,i}^{req}, P_{H,i}^{dem0} + \Delta P_{H,i}^{req}) - \sum_{\phi=1}^{N_\phi} C_\phi^{gen} (P_{E,\phi}^{gen1}, P_{H,\phi}^{gen1}) - \sum_{\phi=1}^{N_\phi} C_\phi^{gen} (P_{E,\phi}^{gen1}) \right) \quad (1)$$

Обмеження балансу електроенергії та теплової енергії виражаються наступним чином:

$$\begin{aligned} \sum_{\phi \in \Psi_n} P_{E,\phi}^{gen1} + \sum_{\phi \in \Psi_n} P_{E,\phi}^{gen1} + \sum_{\omega \in \Psi_n} P_{E,\omega}^{gen1} - \sum_{i \in \Psi_n} (P_{E,i}^{dem0} + \Delta P_{E,i}^{req}) = \\ = \sum_{p \in \theta_n} V_n V_p [G_{np} \cos(\delta_n - \delta_p) + B_{np} \sin(\delta_n - \delta_p)] \\ \sum_{\phi \in \Psi_n} P_{E,\phi}^{gen1} + \sum_{\phi \in \Psi_n} P_{E,\phi}^{gen1} - \sum_{i \in \Psi_n} (P_{H,i}^{dem0} + \Delta P_{H,i}^{req}) = \sum_{p \in \Psi_n} P_{H,np}^{line}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\phi \in \Psi_n$  ідентифікує теплогенеруючий блок, розташований на шині  $n$ ;  $p \in \theta_n$  ідентифікує шину  $p$ , сполучену з шиною  $n$ .

### 1.2 Стратегія балансування потужності оператора розподільної системи

Передбачається, що при наявності інформації про величину необхідної балансувальної потужності DSO (Distribution System Operator) буде заохочувати агрегаторів реагувати на вимогу балансування потужності шляхом коригування поведінки споживачів електроенергії [12]. З точки зору DSO, кожен агрегатор може розглядатися як прибутковий і незалежний агент; тому агрегатори можуть надати відповідну кількість балансувальної сили, якщо їм запропонують належні стимулюючі ціни. Стратегія DSO моделюється як оптимізаційна задача, яка мінімізує відхилення між бажаною потужністю балансування та фактичною балансувальною потужністю, що надається ДРГ. Задача формулюється як дворівнева, де задача нижнього рівня відображає оптимальну стратегію агрегатора, а задача на вищому

рівні сприяє мінімізації відхилення між бажаною ( $\Delta P_{E,n}^{req}$ ,  $\Delta P_{H,n}^{req}$ ) балансуною потужністю і фактичною балансуною потужністю, що забезпечується DRX ( $\Delta P_{E,n}^{avi}$ ,  $\Delta P_{H,n}^{avi}$ ).

Задача верхнього рівня:

$$\min \sum_{t=1}^{NT_H} (\varepsilon_{E,n} |\Delta P_{E,n}^{avi} - \Delta P_{E,n}^{req}| + \varepsilon_{H,n} |\Delta P_{H,n}^{avi} - \Delta P_{H,n}^{req}|), \quad (3)$$

за обмежень:

$$\begin{aligned} \Delta P_{E,n}^{avi} &= \sum_{i \in \Psi_n} \Delta P_{E,i}^{avi} = \sum_{i \in \Psi_n} P_{E,i}^{dem} - P_{E,i}^{dem0}; \\ \Delta P_{H,n}^{avi} &= \sum_{i \in \Psi_n} \Delta P_{H,i}^{avi} = \sum_{i \in \Psi_n} P_{H,i}^{dem} - P_{H,i}^{dem0}; \\ P_{E,i}^{dem}, P_{H,i}^{dem} &\in LP. \end{aligned} \quad (4)$$

Задача нижнього рівня:

$$\max \sum_{t=1}^{NT} (R_i(P_{E,i}^{dem}, P_{H,i}^{dem}) - p_e P_{E,i}^{dem} - p_h P_{H,i}^{dem}), \quad (5)$$

за обмежень:

$$P_{E,i}^{dem} = \sum_{j \in \Xi_t} L_{E,IMP,j}^{bui};$$

$$P_{H,i}^{dem} = m_j C_w (T_{s,i} - T_{r,i}) = \frac{L_{H,IMP,j}^{bui}}{1 - v_{loss}};$$

$$m_i = \sum_{j \in \Xi_t} m_j;$$

$$L_{E,IMP,j}^{bui} = L_{E,ES,j}^{bui} + L_{E,E0,j}^{bui}, L_{H,ALL,j}^{bui} = L_{H,ES,j}^{bui} + L_{H,IMP,j}^{bui}; \quad (6)$$

$$\left( \begin{aligned} \tau_a^{t+1} - \tau_a^t &= \frac{\Delta t}{c_a} (-u_{a-h}(\tau_a - \tau_h) - u_{a-0}(\tau_a - \tau_0) - L_{H,ALL}^{bui}) \\ \tau_h^{t+1} - \tau_h^t &= \frac{\Delta t}{c_h} (u_{a-h}(\tau_a - \tau_h) - u_{h-0}(\tau_h - \tau_0)) \quad \forall j \\ \tau_a^{min} &\leq \tau_a^t \leq \tau_a^{max} \end{aligned} \right). \quad (8)$$

У виразі (3)  $\varepsilon_{E,n}$  та  $\varepsilon_{H,n}$  – зважені коефіцієнти, які позитивно корелюють з абсолютним значенням  $\Delta P_{E,n}^{req}$  і  $\Delta P_{H,n}^{req}$ . Рівняння (3 – 8) відображають стратегію агрегатора для максимізації його переваги шляхом контролю поведінки енергоспоживання у відповідь на поточні ціни на електричну та теплову енергію. Рівняння (6) позначає взаємозв'язок між енергетичними потребами агрегатора та вимогами кінцевих споживачів. Рівняння (7) відображає баланс потужності в будівлі.

Задача дворівневої оптимізації може бути перетворена в стандартну задачу оптимізації шляхом заміни задач низького рівня їх умовою оптимальності Караша-Куна-Таккера, тоді задача може бути вирішена за допомогою методу первинно-подвійних точок внутрішньої точки [15].

## 2. Взаємодія з активним споживачем

Поява активних споживачів змінює ролі кінцевих споживачів у системі розподілу енергії від пасивного придбання електроенергії, до активного планування попиту та генерації відповідно до індивідуальних потреб. Це також робить можливим вивчення місцевих ВДЕ, а також переваги як гравців, так і системи. Однак новий сценарій приносить надзвичайну складність вивчення та керування. Виникає необхідність розробки нових підходів та інструментів для розуміння системи розподілу енергії, особливо для тих, хто приймає політичні рішення. Запропонована чотирьохшарова структура може вивчати інтерактивну поведінку активних споживачів під керівництвом мікро-гравців. Нова інтелектуальна мережа може відкрити нове бачення функціонування енергосистем і дозволить створити самоорганізовану спільноту активних споживачів з абсолютно новим підходом. Важливе значення в рамках злиття мають соціальні та технічні взаємодії, які впливають на глобальну продуктивність та потреби прагнути до макроконтролю власних зацікавлених мікро-гравців, які взаємодіють на соціальному та мережевому рівнях. Регулювання може бути здійснене за допомогою зовнішнього стимулювання як з точки зору цінових, так і соціальних цінностей. Іноді соціальні цінності можуть бути більш ефективними, ніж цінові сигнали. Результати показують, що для максимізації ефективності політики слід ретельно розвивати відповідну соціальну культуру [1].

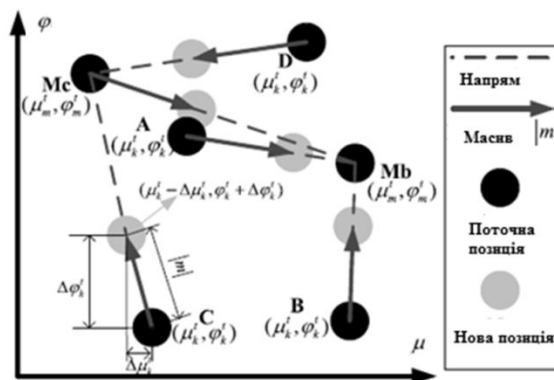


Рисунок 2 – Процедура адаптації стану активного споживача

$$E_k^t = g_k^t - d_k^t; \quad (9)$$

$$g_k^t = g_{nk}^t [1 - \mu_k^t (1 - \varphi_k^t) \bar{v}_k^t \vartheta_{k,g}]; \quad (10)$$

$$d_k^t = d [1 - \mu_k^t (1 - \varphi_k^t) \bar{\rho}_k^t \vartheta_{k,d}]; \quad (11)$$

$$\Delta \mu_k^t = |m| (\mu_m^t - \mu_k^t) / \sqrt{(\mu_m^t - \mu_k^t)^2 + (\varphi_m^t - \varphi_k^t)^2}; \quad (12)$$

$$\Delta \varphi_k^t = |m| (\varphi_m^t - \varphi_k^t) / \sqrt{(\mu_m^t - \mu_k^t)^2 + (\varphi_m^t - \varphi_k^t)^2}; \quad (13)$$

Чотирьохшарова структура об'єднує соціальну мережу, передові інформаційні та комунікаційні технології, енергосистеми, в тому числі середні та низькі рівні напруги, а також рішення різноманітних гравців у різних масштабах:

1. У соціальному шарі активний споживач вирішує свої соціальні уподобання на кожному соціальному інтервалі часу: керований вигодами чи керований комфортом. Потім він знаходить у своєму суспільному колі модель активного споживача з тими ж вигодами, який отримав максимальну користь або комфорт від останнього інтервалу часу керування. Після цього він налаштовує свій стан до моделей «активного» споживача;

2. Інформаційно-комунікаційний технологічний шар надає засоби комунікації для збору та передачі даних щодо оперативних станів, самоорганізованих торгів, результатів ринку місцевих громад та поточного режиму регулювання;

3. На фізичному рівні, користувачі можуть генерувати і споживати з електромережі електроенергію. Крім того, традиційні генератори і навантаження також під'єднанні до цього шару. Експлуатаційна безпека цього шару покладається на місцевого координатора електроенергії;

4. Рівень прийняття рішень є віртуальним і приватним місцем для гравців, який аналізує та уточнює інформацію з рівня інформаційно-комунікаційних технологій, а потім реагує на основі індивідуальні цілі та обмеження.

Структура моделювання містить найбільш типові характеристики та взаємодії кожного гравця, абстраговані від кожного шару на рис. 3. Таким чином, гравці можуть бути розділені на дві загальні групи: мікро-гравці, тобто активні споживачі, і макро-гравці, включаючи агрегатор навантаження, локальний координатор електроенергії та регулятор. Макро-гравці встановлюють правила, контролюють всю систему, збирають інформацію та видають необхідні сигнали.

Активні споживачі надають інформацію про останній комфорт і користь та ставлення до них в кожному соціальному інтервалі часу в тому ж контрольному інтервалі часу в однаковому колі суспільства. В кожному контрольному інтервалі часу активні споживачі аналізують історичні ціни, щоб передбачити можливі коливання цін на споживання та генерацію. На основі нещодавно оновленої соціальної інформації та економічних сигналів від макро-гравців активні споживачі розраховують власну генерацію та попит, враховуючи ліміти генерації та попиту на наступний контрольний інтервал часу. Після самозабезпечення роль активного споживача визначається як продавець (генерація в надлишку) або покупець (дефіцит покоління). Під час участі в торгівлі в кожному контрольному інтервалі часу, споживач використовує стратегію, що не зменшує прибуток, щоб сформувати кінцеву цінову пропозицію. У кожному контрольному інтервалі часу самоорганізовані переговори щодо цін і кількості серед активних споживачів в межах одного кола комунікації або на одній шині розглядають також балансувальні премії і циклічний заряд.

Агрегатор навантаження надає послуги від імені активних споживачів, бере участь у ринку місцевих громад на основі модифікованих вузлових цін, а також збирає інформацію про самоорганізовані крос-шинні угоди та їхні відповідні коригувальні ставки для подання до ринку місцевих громад. Після

отримання уточнених обсягів споживання та генерації та вузлових цін від ринку місцевих громад, агрегатор навантаження перераховує ціни на споживання та генерацію, щоб отримати плату за послугу. Потім уточнені обсяги та змінені ціни відправляються назад до відповідних посередників.

Локальний координатор електроенергії керує ринком місцевих громад, використовуючи котирування з агрегатора навантаження, малих традиційних генераторів і навантажень в одній громаді, спрямовану на забезпечення найбільш ефективних стимулів, щоб спонукати поведінку учасників ринку до бажаного результату (наприклад, максимізацію соціального надлишку, мінімізація загальних збитків тощо) при дотриманні оперативних обмежень. Обмін енергією з іншими громадами також розглядається як одне з завдань локального координатора електроенергії. Оскільки локальний координатор електроенергії не може безпосередньо керувати попитом і генерацією активних споживачів, він використовує вузлові ціни як економічні стимули для прийняття рішень активних споживачів щодо їхнього попиту та генерації, що приводить всю систему до бажаного стану.

Регулятор, як єдиний макро-гравець, що робить політику в системі, відповідає за моніторинг функціонування ринку та ефективність всієї системи. «Загальний контроль» системи може виконуватися регулятором лише за допомогою правил.

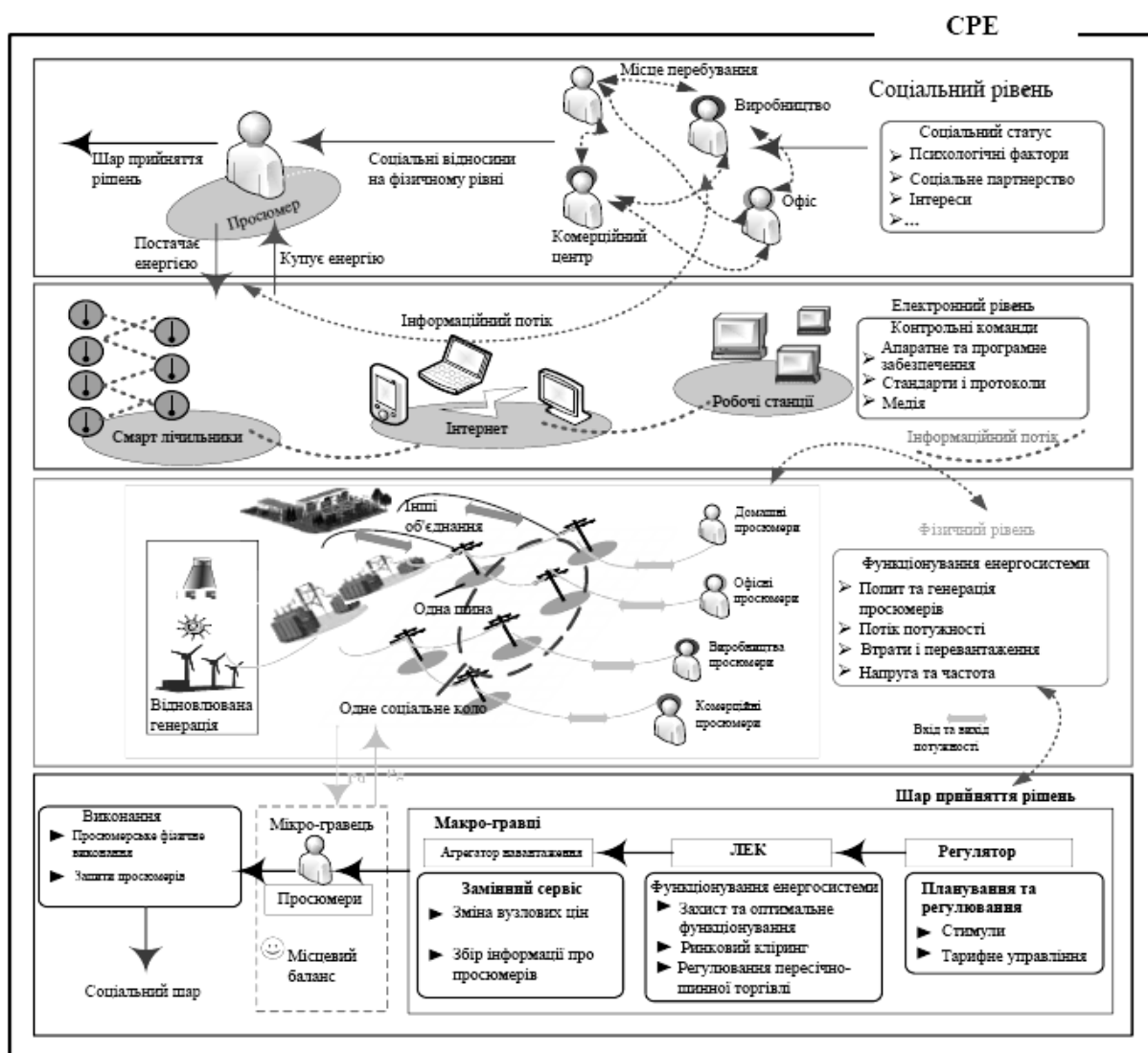


Рисунок 3 – Багатошарова структура симулювання для систем розподілу електроенергії

### 3. Моделі та ринкові процеси в енергетиці

#### 3.1 Модель справедливої аукціону на локальних енергетичних ринках

Для геометричної кластеризації та справедливої аукціону на місцевих енергетичних ринках запропоновано формулювання оптимізації та відповідні алгоритми поліноміального часу. На локальному енергетичному ринку задача оптимізації розглядає точність розосередженого генератора електроенергії

для геометричної кластеризації. Для розв'язання задачі оптимізації кластерів запропоновано алгоритм геометричного неконтрольованого навчання на основі очікування та максимізації [6]. Завдяки інтенсивному моделюванню кластеризації за допомогою програмного засобу MOSEK, було показано, що запропонований алгоритм може достатньо кластеризувати локальний енергетичний ринок. Крім того, запропоновано справедливий механізм, заснований на аукціоні Vickrey-Clarke-Groves (VCG), для розрахунку ціни, яка ефективно гарантує найнижчі витрати на локальному енергетичному ринку. Додаткова інтенсивна оцінка ефективності механізму аукціону показала, що запропонований алгоритм є оптимальним з точки зору стабільності мережі, коли всі розгорнуті елементи були правдивими.

Для проведення аукціону запропоновано справедливую схему торгівлі електроенергією на основі аукціону VCG. Аукціон VCG складається з аукціонів із закритими заявками для забезпечення справедливих дій у торгівлі електроенергією. Аукціон VCG – це особливий випадок аукціону Vickrey, де кожна ставка повинна бути справжньою цінністю для збереження корисності. Передбачається, що учасники аукціону складаються з продавця, який є «активним» споживачем з надлишком електроенергії, покупця, який є активним споживачем з дефіцитом електроенергії, та аукціонером, який є місцевим центром обміну електроенергії. На аукціоні покупці звертаються із запитом на електроенергію до аукціонера, а попит буде предметом аукціону. Потім кожен продавець подає заявку на позицію, а ставки відображають фактичну вартість, на яку можуть впливати геометричні відносини з продавцем, а також функція витрат. Запропонована схема запобігає монополії на електроенергію та забезпечує ефективність ринку і сприяє наступному:

1. Справедливість кластеризації: запропонований алгоритм кластеризації базується на геометричній інформації про «активних» споживачів і знаходить відповідні місця для локальних центрів обміну електроенергією. На додаток до інформації про розташування, операція кластеризації функціонує з урахуванням справедливості розподілених генераторів енергії;

2) Механізм справедливого аукціону: запропонований механізм аукціону побудований на аукціоні VCG, який добре відомий своєю правдивістю. За допомогою інтенсивних оцінок було показано, що при оцінці правдивої поведінки максимізується споживання кожного споживача; таким чином, запропонована схема виявилася правдивою;

3) Обчислювальна ефективність: запропонована задача оптимізації для геометричної кластеризації є NP-складною (NP – non-deterministic polynomial). Тому запропоновано схему, основу за алгоритмом навчання на основі очікування та максимізації, який вирішує проблему в поліноміальний час. Крім того, запропонований аукціонний контроль також є NP-складним.

Запропонована архітектура мережі складається з активних споживачів і розосереджених генераторів. Кожен споживач може генерувати та споживати електроенергію, наприклад, розумні будинки або житлові будинки з використанням ВДЕ. З іншого боку, розосереджені генератори виробляють енергію лише через невеликі генератори. Тому запропонована оптимізаційна задача спрямована на збалансування геометричного розподілу локальних енергетичних ринків та забезпечення справедливості розподілу енергетичних генераторів. Для того, щоб сформулювати моделі кластеризації, запропонована схема визначає позначення для набору активних споживачів  $P$ , тобто:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\} \quad (14)$$

де  $N$  – загальна кількість активних споживачів у системі. Передбачається, що кожен активний споживач  $p_N$  має геометричний вектор розташування  $L_{pn}$ . Подібно до (14), набір розподілених генераторів  $D$  визначається як:

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_M\} \quad (15)$$

де  $M$  – загальна кількість генераторів розподіленої енергії; а кожен генератор  $d_m$  має геометричні вектори розташування  $L_{dm}$ . Якщо електроенергетика вирішить побудувати  $K$  місцевих енергетичних ринків, потрібно  $K$  місцевих центрів обміну енергією [6].

Запропонована оптимізаційна постановка спрямована на збалансування геометричного розподілу енергетичних генераторів на локальних енергетичних ринках. Тому справедливість розподілу енергії генераторів можна сформулювати наступним чином:

$$\sum_{m=1}^M r_{m,k}^d \leq \left\lceil \frac{M \cdot \omega}{K} \right\rceil \forall x_k, \quad (16)$$

де  $\omega$  – коефіцієнт балансу для справедливості в кластеризації, і  $1 \leq \omega \leq K$ .

Оскільки  $\omega$  стає меншим, можна досягти більшої справедливості, тобто розподілені генератори енергії рівномірно розподілені між кластерами при  $\omega = 1$ , тоді як всі розподілені генератори енергії належать до одного кластеру, коли  $\omega = M$ . На підставі цього обґрунтування проекту оптимізації, функція

вимірювання спотворень DMF (англ. – distortion measure function), яка є сумою геометричних відстаней між локальними енергетичними ринковими суб'єктами (активними споживачами або розосередженими генераторами енергії) і локальними центрами обміну енергії визначаються наступним чином:

$$DMF \triangleq \sum_{k=1}^K \left( \sum_{n=1}^N r_{n,k}^p \|L_n^p - L_k^x\|^2 + \sum_{m=1}^M r_{m,k}^d \|L_m^d - L_k^x\|^2 \right). \quad (17)$$

Тому завдання оптимізації передбачає в мінімізацію DMF при обмеженнях системної моделі:

$$\min_{r_{n,k}^p, r_{m,k}^d, L_k^x} DMF; \quad (18)$$

за умови:

$$\sum_{k=1}^K r_{n,k}^p = 1 \quad \forall p_n; \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^K r_{m,k}^d = 1 \quad \forall d_m; \quad (20)$$

$$\sum_{m=1}^M r_{m,k}^d \leq \left\lfloor \frac{M \cdot \omega}{K} \right\rfloor \quad \forall x_k; \quad (21)$$

$$1 \leq \omega \leq K. \quad (22)$$

### 3.2. Модель локального енергетичного ринку

Нижче наведено модель локального енергетичного ринку (ЛЕР), що керується подіями, для сприяння торгівлі енергією на рівні розподілу [10]. Споживач електроенергії обирає свої місцеві стратегії торгівлі енергією, враховуючи наявні енергетичні ресурси. Задача побудована як Марковський процес прийняття рішень, а її розв'язок визначається за допомогою нових досягнень в технології підкріплення, а саме глибоке навчання. Цей інноваційний ЛЕР не має на меті замінити будь-які існуючі енергетичні послуги, а також не запропоновано як кращу ринкову парадигму. Натомість він намагається переважно диверсифікувати енергетичну екосистему на межі розподільних мереж і кінцевих користувачів.

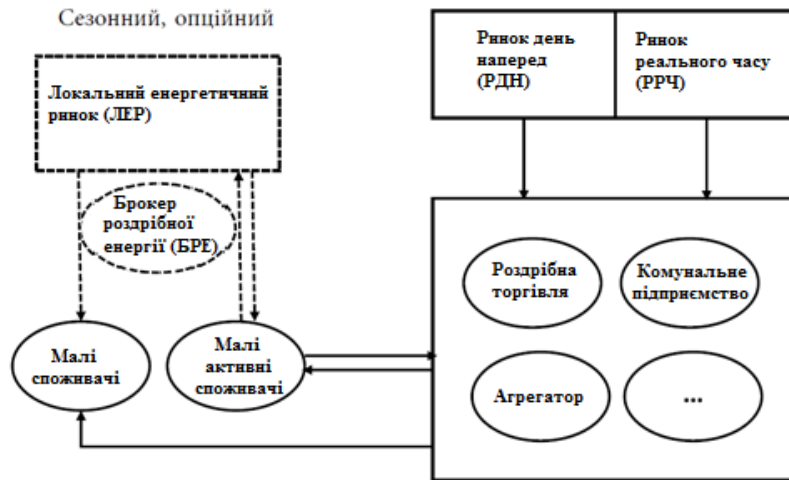


Рисунок 4 – Локальний енергетичний ринок за участі активних споживачів

Для того, щоб порівняти економічну вигоду покупців від торгівлі ЛЕР з торгівлею безпосередньо з комунальною компанією і повністю врахувати стохастичність попиту на ВДЕ та навантаження, а також невизначені ринкові умови, за різних сценаріїв, середньорічну економічну вигоду для кожного споживача можна обчислити наступним чином:

$$\overline{R_{year}} = 365 \cdot r_0 \cdot \frac{1}{N_d N_s} \sum_{k=1}^{N_d} \sum_{i=1}^{N_s} R_{day}(i, k). \quad (23)$$

де  $R_{year}$  і  $R_{day}$  вказують середню щорічну вигоду та щоденну вигоду, досягнуту від торгівлі на локальному енергетичному ринку, відповідно;  $r_0$  означає випадкову ринкову відкриту частку, що визначається керованим подіями на ЛЕР. Як згадувалося раніше, оскільки стратегія інтелектуальної торгівлі перевершує інші за допомогою невизначеного способу, моделювання буде виконуватися для  $N_d = 20,999/24 = 874$  дні (епізоди) для різних сценаріїв генерації вітру та вихідної потужності (низький, середній та високий), з  $N_s = 3$ .



Рисунок 5 – Модель цілісного ринку електроенергії.

#### 4. Інтелектуальні системи керування енергетичними об'єктами та процесами

Нижче представлено модель інтелектуального симулятора навантаження на житло (Smart Residential Load Simulator). Це новий симулятор на базі MATLAB, який представляє більшість важливих житлових навантажень та джерел живлення. Панель інструментів забезпечена повним графічним інтерфейсом. Такі фактори, як температура навколишнього середовища, відіграють важливу роль в енергоспоживанні домогосподарства, розглядаються як входи споживачів для Smart-симулятора житлового навантаження. Іншими входами є ставки за електроенергію в часі (непікову, середню і на піку), що відображають тарифи часу використання; користувач також може визначати ціни в реальному часі. Всі прилади моделюються в інтелектуальному симуляторі навантаження на житло і можуть бути змодельовані окремо або як група. Симулятор дозволяє визначити характеристики сім'ї, тобто кількість та вік людей у домогосподарстві, так що рівні активності мешканців можуть бути представлені у відповідних моделях пристроїв, таких як водонагрівачі і домашня теплова модель [4]. Підхід до моделювання керованих розумних навантажень для їх інтеграції в систему розподілу оптимального потоку потужності на основі Smart Residential Load Simulator показаний на рис. 6.

Моделювання Peaksaver Plus: Інтелектуальні навантаження включають в себе різні прилади, керовані системами енергоменеджменту, інтелектуальні лічильники та двосторонні комунікаційні зв'язки між приладами, локальною дистриб'юторською компанією та/або зовнішніми джерелами даних (наприклад, метеостанції та ціни на енергію) [37]. Оскільки поведінка клієнта може змінюватися залежно від місцеположення, уподобань та часу використання, важливою є інформація про переваги клієнта та рівень активності їхніх пристроїв. Проте, єдиним вимірюванням, доступним для місцевих дистриб'юторських компаній з більшості житлових будинків, є дані про споживання енергії, отримані з їхніх інтелектуальних лічильників. Ці вимірювання широко варіюються в різних домогосподарствах; однак, оскільки профілі навантаження агреговані, вони стають більш гладкими, з меншими варіаціями, що дозволяє краще моделювати навантаження на рівні фідера. Для того, щоб зменшити пікове навантаження на рівні фідера, локальна енергокомпанія може надіслати сигнали пікового попиту або заданих значень температури на системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря для зміни профілів навантаження та зменшення пікового попиту споживачів, як у випадок програми пікового заощадження (Peaksaver Plus) [38].

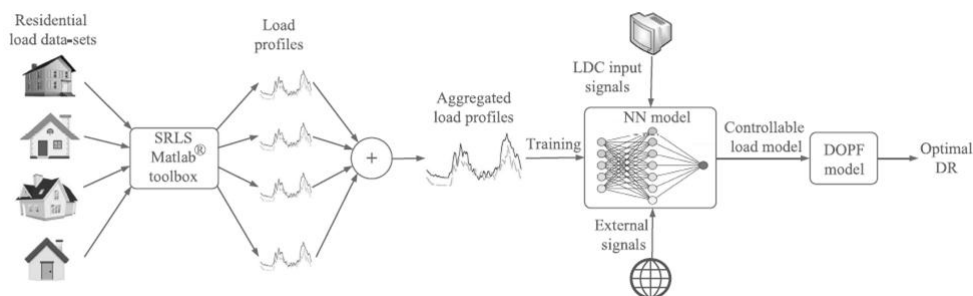


Рисунок 6 – підхід до моделювання керованих розумних навантажень

Для вивчення впливу керованих інтелектуальних житлових навантажень на оптимальне функціонування розподільчого фідера, споживання енергії різними будинками з реалістичними даними для всіх приладів було змодельовано в інтелектуальному симуляторі навантаження. Для кожного будинку, кожен прилад був визначений в інтелектуальному симуляторі навантаження на житло з урахуванням їх використання; у симуляторі також були введені температури навколишнього середовища в побуті та відображені тарифи часу використання. Профілі споживання та генерації кожного приладу та джерела енергії для кожного домогосподарства були отримані за допомогою інтелектуального симулятора навантаження разом із витратами енергії в різні періоди дня [4].

Основна задача запропонованого симулятора полягає в тому, щоб дозволити вивчення, демонстрації та викладання енергетичного менеджменту житлових будинків, і цей інструмент може бути корисним для дослідників для перевірки їх моделей для управління енергією та оптимізації, а також може бути використаний клієнтами та педагогами. розуміти та пояснити попит та пропозицію житлової енергії. Симулятор є відкритим вихідним кодом, який доступний для зацікавленого читача.

## 5. Компенсація реактивної потужності для підвищення енергоефективності та надійності електричних мереж

Була поставлена задача мінімізувати загальну вартість ЛЕС, що підключається до електромережі, яка містить фотоелектричні модулі, акумуляторні системи зберігання енергії та електростанції з електричною зарядкою з можливістю генерування реактивної потужності.

Аналітичний метод до постачання реактивної потужності та енергетичного арбітражу, включаючи витрати реактивної потужності та втрати в лініях, що дозволяє ефективно обробляти велику кількість змінних, даючи майже оптимальне рішення в 100 разів швидше порівняно з існуючими методами [5].

Даний метод підходить як для постачання електроенергії на день наперед, так і в режимі реального часу у великих системах. Також може бути використаний для загальної диспетчеризації енергії з різними параметрами та різними функціями витрат.

Передбачається, що ISO має контроль над системами акумуляції електроенергії і має право залучати невикористану потужність інверторів фотоелектричних систем і електричних бортових зарядних пристроїв, що належать третій стороні, для забезпечення реактивною енергією. Вартість активної потужності з електромережі вже включає в себе чисту вартість зарядки акумуляторних систем зберігання енергії та електромобіля. Останній вираховується з цільової функції, оскільки вартість зарядки електричного транспортного засобу оплачується приватними власниками. Фотоелектричні системи оплачуються за потужністю, яку вони виробляють для покриття основних інвестицій. Кожен розподілений енергетичний ресурс компенсується за виробництво реактивної потужності. Як наслідок, цільова функція виражається як:

$$Obj = \sum_{t=1}^T [c_t^{Pgrid} P_t^{grid} + c_t^{Qgrid} Q_t^{grid} + c^{PPV} \sum_{x=1}^M P_{x,t}^{PV} + \sum_{x=1}^M c_{x,t}^{QPV} Q_{x,t}^{PV} + \sum_{x=1}^B c_{x,t}^{QBESS} Q_{x,t}^{BESS} + \sum_{x=1}^B c_{x,t}^{BESS,deg} - c_t^{Pgrid} \sum_{x=1}^E P_{x,t}^{EV} + \sum_{x=1}^E c_{x,t}^{QEV} Q_{x,t}^{EV}] H \quad (24)$$

де  $c_t^{Pgrid}$  і  $c_t^{PPV}$  – є відповідно ціною активної потужності з мережі і від PV;  $c_t^{Qgrid}$  і  $c_{x,t}^{QX}$  – відповідно витрати реактивної потужності з мережі і з розосереджених джерел енергії (де індекс  $x$  і верхній індекс  $X$  можуть бути PV / BESS / EV). Активна і реактивна потужність, придбана в мережі, мають символ  $P_t^{grid}$  і  $Q_t^{grid}$ , відповідно.  $P_{x,t}^{PV}$  представляє активну потужність, вироблену певною фотовольтаїчною установкою. Позитивні  $Q_{x,t}^{BESS}$  і  $P_{x,t}^{EV}$  являють собою зарядку BESS і EV відповідно, і розглядаються як навантаження, в той час як позитивний  $Q_{x,t}^X$  являє собою генерацію реактивної потужності з розосереджених джерел енергії. Індекс  $t$  показує значення змінних у момент часу  $t$ ;  $H$  – тривалість періоду часу.

## 6. Мультиагентні системи керування в енергетиці

Агентно-орієнтовані системи впроваджені в області електротехніки; були прийняті як нові концепції систем управління протягом останніх десятиліть. Ця концепція впливає з інформатики. Широке використання технології агента в електричній області призвело до неоднозначного використання та інтерпретації понять «агент» і «мультиагентні системи»; це особливо очевидно в дослідних роботах з інтелектуальних мереж. Загальне розуміння терміну інтелектуальна мережа в науково-дослідних роботах охоплює розробку нових стратегій управління потужністю та систем зв'язку для вирішення цієї проблеми. Це пов'язано з розширенням використання відновлюваних джерел енергії (наприклад, фотоелектричних систем, вітрових турбін, систем комбінованого теплопостачання) та нових електричних навантажень (наприклад, теплових насосів та електричних транспортних засобів) [20].

Мультиагентні системи керування (МАСК) є одним з новітніх підходів керування для розробки програмних додатків у галузі штучного інтелекту. МАСК складається з ряду окремих суб'єктів, званих

агентами, де агенти взаємодіють між собою. Кожна структура може бути агентом. Наприклад, агент може бути пристроєм, комп'ютерною системою, програмним забезпеченням або організацією, що їх володіє. Кожен агент може як самостійно працювати для досягнення певної особистої мети, так і взаємодіяти з іншим агентом, щоб вирішити спільну мету [9]. Використання МАС в інжинірингу енергосистем стає досить поширеним явищем і представлене в літературі різними застосуваннями в різних архітектурах. Агенти - розсіяні компоненти розрахунку в енергосистемі. Вони здатні отримувати дані про напругу, струм та стан системи і діяти на приводи, щоб змінити стан енергосистеми. Як правило, три типи стратегій контролю використовуються для контролю агентів у МАСК. Це централізовані, децентралізовані та гібридні стратегії координації [17].

До переваг МАСК відносять [44]:

- розвиток засобів адаптації до змін середовища, можливість модифікації її структури і параметрів безпосередньо в процесі функціонування;
- застосування динамічного моделювання в реальному часі з прогнозуванням стану енергосистеми;
- організація розподіленого інформаційно-технологічного простору, синхронізованого обміном і оптимізацією взаємодії між різними підсистемами, можливість інформаційного обміну не тільки даними, але й знаннями;
- застосування паралельних обчислень, які дозволяють різко підвищити швидкість та на порядок економити обчислювальні ресурси;
- здатність здійснювати керування станом технічних комплексів і систем на основі розподілених мережових інформаційних мереж і гнучкої інфраструктури обчислювальних компонентів.

Можливості МАСК: модифікація структури і параметрів безпосередньо в процесі функціонування; застосування динамічного моделювання в реальному часі з прогнозуванням стану; організація розподіленого керування з оптимізацією взаємодії між підсистемами; можливість обміну як даними, так і знаннями; паралельні обчислення, що підвищують швидкість обчислень при економії обчислювальних ресурсів; керування станом технічних комплексів і систем на основі розподілених мережових інформаційних мереж і гнучкою інфраструктури обчислювальних компонентів.

Набули поширення три типи архітектури МАСК. Архітектура МАСК на принципах **штучного інтелекту** використовує методи і засоби символічного представлення знань. Обмеженість архітектури – відсутність підсистеми моделювання для прогнозування своєї поведінки, поведінки інших агентів і зовнішнього середовища. Забезпечується створення точної і повної моделі складного багаторівневого та багатозв'язного динамічного об'єкта, репрезентованої спільною взаємодіючих агентів, а також системи керування таким об'єктом у даній архітектурі неможливо.

**Реактивна архітектура** використовує методи і засоби символічного представлення знань. Обмеженість архітектури – відсутність підсистеми моделювання для прогнозування своєї поведінки, поведінки інших агентів і зовнішнього середовища. Створення точної і повної моделі складного багаторівневого та багатозв'язного динамічного об'єкта, репрезентованої спільною взаємодіючих агентів, а також системи керування таким об'єктом у даній архітектурі неможливо.

**Гібридна архітектура** реалізує динамічну організаційну модель МАСК ІЕМ і містить ментальну та реактивну підсистеми з доповненням її системою моделювання. Дана модель дозволяє забезпечити агенту можливість вибору стратегії досягнення цілей і певних дій у рамках обраної стратегії, а також забезпечити можливість гнучкої коригування ієрархій в структурі системи інтелектуального керування.

Організаційна модель МАСК описується багатофакторним вектором стану всієї сукупності агентів МАСК, тому доцільно використовувати гібридну архітектуру МАСК, доповнену системою моделювання, що дозволяє агенту забезпечити вибір стратегії і виконати дії для досягнення цілей обраної стратегії і гнучку коригування ієрархій в структурі системи інтелектуального керування [44].

Архітектура МАСК має містити:

- спеціалізовані бази знань (онтологій) для подання інформаційних потреб функціонування різних агентів;
- моделі процесів функціонально повної підсистеми спеціалізованих агентів, забезпечують пошук, уявлення, обробку та розподілення інформації;
- підсистему прогнозуючого моделювання;
- підсистему формування критеріїв і обмежень;
- підсистему моделювання та координації взаємодії між агентами, організації кооперативного поведінки, забезпечення інформаційно-технологічної взаємодії і сумісності агентів;
- підсистему формування керуючих впливів і реалізації керування;
- підсистему аналізу і планування.

**7. Моделювання та реконфігурація систем електропостачання**

Реконфігурація є одним з основних засобів для зменшення втрат потужності в системі розподілу. Визначаючи оптимальну топологію розподільчої мережі, можна забезпечити електроенергією всіх споживачів з мінімальними втратами електроенергії. З появою розосереджених і відновлюваних джерел енергії, крім місцевого виробництва активної потужності, можна отримати місцеве виробництво реактивної потужності за допомогою силових електронних пристроїв. Такі вузли називаються вузлами активних споживачів. Контролюючи потік реактивної потужності в розподільній мережі, можна додатково зменшити втрати активної потужності. Дослідження показують, що при визначенні оптимальної реконфігурації розподільної мережі, а також при оптимізації значення генеруючих реактивну потужність вузлів активних споживачів можливо значно зменшити втрати в розподільній мережі [2]. Втрати активної потужності в розподільній мережі можуть бути зменшені при реконфігурації розподільної мережі або з компенсацією і регулюванням потоку реактивної потужності.

Задача оптимізації може бути математично записана у такому вигляді:

$$\min f(x); \quad (25)$$

$$g(x) = 0; \quad (26)$$

$$h(x) \leq 0; \quad (27)$$

Обмеження нерівності визначаються за співвідношенням (27). До них відносяться допустимі напруги у всіх шинах розподільної мережі, а також мінімальна та максимальна реактивна потужність.

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}; \quad (28)$$

$$Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max}. \quad (29)$$

Генетичний алгоритм (ГА) використовує основні принципи теорії еволюції.[14]. Для його реалізації в задачі оптимізації значення генеруючих реактивну потужність вузлів активних споживачів необхідно визначити контрольні змінні. У цьому випадку вони є відкритими гілками в кожній фундаментальній петлі і вводяться реактивної потужності в кожному вузлі. Під час формування початкової популяції, можливо, що отримана мережа не є радіальною (мережа або зв'язана, або незв'язана). Тому необхідно під час ініціалізації кожної хромосоми перевірити, чи є мережа радіальною чи ні. У випадку не радіальної мережі хромосома повинна бути вилучена з популяції і сформуватися нова. Це перевіряється шляхом визначення визначника матриці з'єднання, яка повинна бути або 1, або -1 для радіальної перевірки, оскільки ГА може генерувати тільки реактивні потужності між мінімальним і максимальним значенням. Після визначення початкової популяції обчислюються цільові функції.

**Висновки**

1) Визначено фактори і чинники впливу на роботу локальних електроенергетичних. Розглянуто принципи побудови локальних систем електропостачання згідно з концепцією Smart Grid. Досліджено питання створення та організації локальних ринків електричної енергії з формалізацією учасників ринку та правил його функціонування.

2) Проведено огляд та класифіковано літературні джерела за основними проблемами, що були порушені в дослідженнях зарубіжних вчених. Було розглянуто передові технології реалізації концепції Smart Grid в енергетичних системах інших країн.

3) Виділено перспективні напрямки застосування передових технологій в енергетичній галузі України згідно з її розвитком у рамках концепції Smart Grid. Для ефективного функціонування Microgrid наведено проблеми, які необхідно вирішити, та їх вирішення, що оптимізують енергетичні процеси в локальних електромережах. До питань, що підлягали вирішенню відносились: оптимальна реконфігурація електричних мереж, генерація та компенсація реактивної потужності та балансування потужності в мережі. З точки зору керування активними споживачами була наведена стратегія на основі чотирьохшарової структури системи розподілу, що включає технологічні, інформаційні, організаційні та соціальні процеси під час керування активними споживачами. Також було запропоновано процедуру адаптації стану активного споживача, відповідно до власних вигод, до стандартних визначених моделей поведінки активних споживачів.

**Список використаної літератури**

1. Ye Cai, Tao Huang, Ettore Bompard, Yijia Cao, Yong Li, "Self-Sustainable Community of Electricity Prosumers in the Emerging Distribution System," *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, Vol.: 8, Issue: 5, pp. 2207 – 2216, September 2017, DOI: [10.1109/TSG.2016.2518241](https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2518241).

2. Dimitrije Kotur, Nikola Rajakovic, "Optimal reconfiguration of distribution network with participation of distributed electricity prosumers," Power Systems Department, University of Belgrade, School of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia, 2016.
3. Zhenyu Zhou, Chuntian Zhang, Chen Xu, Fei Xiong, Yan Zhang, Tariq Umer, "Energy-Efficient Industrial Internet of UAVs for Power Line Inspection in Smart Grid," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*, № 6. June 2018.
4. Juan Miguel Gonzalez L'opez, Edris Pouresmaeil, Claudio A. Cañizares, Kankar Bhattacharya, Abolfazl Mosaddegh, Bharatkumar V. Solanki "Smart Residential Load Simulator for Energy Management in Smart Grids," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, № 2, February 2019.
5. Oktoviano Gandhi, Wenjie Zhang, Carlos D. Rodríguez-Gallegos, Monika Bieri, Thomas Reindl, Dipti Srinivasan. "Analytical Approach to Reactive Power Dispatch and Energy Arbitrage in Distribution Systems With DERs" // *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, № 6. November 2018.
6. Laihyuk Park, Seohyeon Jeong, Joongheon Kim, Sungrae Cho "Joint Geometric Unsupervised Learning and Truthful Auction for Local Energy Market," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 66, NO. 2, February 2019.
7. Luigi Martirano, Giuseppe Parise, Giacomo Greco, Matteo Manganelli, Ferdinando Massarella, Marta Cianfrini, Luigi Parise, Paolo di Laura Frattura, Emanuele Habib "Aggregation of users in a residential/commercial building managed by a building energy management system (BEMS)," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Rome, Italy, Feb. 2019.
8. Chandrasekhar Yammani, Pankaj Prab "Collaborative demand response in smart electric grid with virtual system operator," *IET Smart Grid*, pp.76 – 84, October 2018.
9. Yongli Wang, Yujing Huang, Yudong Wang, Haiyang Yu, Ruiting Du, Fuli Zhang, Fuwei Zhang "Optimal Scheduling of the Regional Integrated Energy System considering economy and environment," *IEEE Transactions on Industry Applications*, September 2018.
10. Tao Chen, Wencong Su "Local Energy Trading Behavior Modeling With Deep Reinforcement Learning," *IEEE Access*, pp 62806 – 6281418, October 2018.
11. Fotis D. Kanellos, "Real-Time Control Based on Multi-Agent Systems for the Operation of Large Ports as Prosumer Microgrids," *IEEE Access*, pp. 9439 – 9452, 19 May 2017.
12. Changzheng Shao, Yi Ding, Pierluigi Siano, Zhenzhi Lin "A Framework for Incorporating Demand Response of Smart Buildings Into the Integrated Heat and Electricity Energy System," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, № 2. February 2019.
13. Mengmeng Yu, Seung Ho Hong, Yuemin Ding, Xun Ye, "An Incentive-Based Demand Response (DR) Model Considering Composited DR Resources," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, № 2. February 2019.
14. Gen M., Cheng R., "Genetic Algorithms and Engineering Design," *John Wiley & Sons*, №1, 1997.
15. D. T. Nguyen, M. Negnevitsky, M. D. Groot, "Pool-based demand response exchange—Concept and modeling," *IEEE Trans. Power Syst.*, № 3, pp. 1677-1685, Aug. 2011.
16. Sara Yahia Altahir, Xiangwu Yan, Abuzaid Saeed Gadalla, "Active and reactive power sharing control strategy for VSGs in microgrid considering the different capacities of distributed energy resources," *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*, vol.: 3 ,№: 3, pp. 167 - 173, 12th July 2018.
17. Gorkem Sen, Mustafa Baysal, "Multi Agent-Based Decentralized Control for Improving the Efficiency and Voltage Regulation in Smart Microgrid," presented at 2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST). Sevilla, Spain, 18 October 2018.
18. Tiago Pinto, Ricardo Faia, Maria Navarro-Caceres, Gabriel Santos, Juan Manuel Corchado, Zita Vale, "Multi-Agent-Based CBR Recommender System for Intelligent Energy Management in Buildings," *IEEE Systems Journal*, Volume: 13, Issue: 1, pp. 1084 - 1095, November 2018, DOI: [10.1109/JSYST.2018.2876933](https://doi.org/10.1109/JSYST.2018.2876933).
19. Jingang Lai, Xiaoqing Lu, Xin Li, Ruoli Tang, "Distributed Multiagent-Oriented Average Control for Voltage Restoration and Reactive PowerSharing of Autonomous Microgrids," *IEEE Access*, Vol.: 6, pp. 25551 – 25561, 25 April 2018.
20. Arvind Kumar, Lokesh Tiwari, Devendra Somwanshi, "Design Architecture and Optimization of Multi Agent based Smart Grid," presented at 2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT), New Delhi, India, 14 June 2018, DOI: [10.1109/ETECHNXT.2018.8385289](https://doi.org/10.1109/ETECHNXT.2018.8385289).
21. Thomas Morstyn, , Branislav Hredzak, Vassilios G. Agelidis, "Network Topology Independent Multi-Agent Dynamic Optimal Power Flow for Microgrids With Distributed Energy Storage Systems," *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, Vol. 9, No. 4, July 2018.
22. Nian Liu, Xinghuo Yu, Cheng Wang, Chaojie Li, Li Ma, Jinyong Lei "Energy-Sharing Model With Price-Based Demand Response for Microgrids of Peer-to-Peer Prosumers," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, Vol. 32, No. 5, September 2017.

23. Shichang Cui, Yan-Wu Wang, Nian Liu "Distributed game-based pricing strategy for energy sharing in microgrid with PV prosumers," *IET Renewable Power Generation*, 18th December 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2017.0570
24. Jung-Sung Park, Hak-Ju Lee, Dae-Young Kim, "Challenges for utility with energy prosumer in Korea," *IET Renewable Power Generation*, 12-15 June 2017.
25. Maxwell L. Little, S. F. Rabbi, Kevin Pope, John E. Quaicoe, "Unified Probabilistic Modeling of Wind Reserves for Demand Response and Frequency Regulation in Islanded Microgrids," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, Vol. 54, No. 6, December 2018.
26. Jeong-Won Kang, Le Xie, Dae-Hyun Choi, "Impact of Data Quality in Home Energy Management System on Distribution System State Estimation," *IEEE Access*, 9<sup>th</sup> February 2018.
27. Nur Mohammad, Yateendra Mishra, "Coordination of wind generation and demand response to minimise operation cost in dayahead electricity markets using bi-level optimisation framework," *IET Generation, Transmission & Distribution*, 5th July 2018.
28. Peng-Yong Kong, "A Distributed Management Scheme for Energy Storage in a Smart Grid With Communication Impairments," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*, Vol. 14, No. 4, April 2018.
29. S. Rasoul Etesami, Walid Saad, Narayan B. Mandayam, H. Vincent Poor, "Stochastic Games for the Smart Grid Energy Management With Prospect Prosumers," *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL*, Vol. 63, No. 8, August 2018.
30. Xiaohu Yan, Chenghong Gu, Heather Wyman-Pain, Furong Li, "Capacity Share Optimization for Multiservice Energy Storage Management Under Portfolio Theory," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, Vol. 66, No. 2, February 2019.
31. Xuanyu Cao, Junshan Zhang, H. Vincent Poor, "Joint Energy Procurement and Demand Response Towards Optimal Deployment of Renewables," *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN SIGNAL PROCESSING*, Vol. 12, No. 4, August 2018.
32. Torsten Broecker, Francis K. Tuffner, Anaissia Franca, Nedjib Djilali, "A Demand Response System for Wind Power Integration: Greenhouse Gas Mitigation and Reduction of Generator Cycling," *CSEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS*, Vol. 4, No. 2, June 2018.
33. Dan Wang, Liu Liu, Hongjie Jia, Weiliang Wang, Yunqiang Zhi, Zhengji Meng, Bingyu Zhou, "Review of Key Problems Related to Integrated Energy Distribution Systems," *CSEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS*, Vol. 4, No. 2, June 2018.
34. Wayes Tushar, Chau Yuen, Hamed Mohsenian-Rad, Tapan Saha, H. Vincent Poor, Kristin L. Wood, "Transforming Energy Networks via Peer-to-Peer Energy Trading," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 35, Issue: 4, pp. 90 – 111, July 2018, DOI: [10.1109/MSP.2018.2818327](https://doi.org/10.1109/MSP.2018.2818327).
35. Majid Majidi, Kazem Zare, "Integration of Smart Energy Hubs in Distribution Networks under Uncertainties and Demand Response Concept," *IEEE Transactions on Power Systems*.
36. Kai Ma, Pei Liu, Jie Yang, Xiaomin Wei, Chunxia Dou, "Spectrum Allocation and Power Optimization for Demand-Side Cooperative and Cognitive Communications in Smart Grid," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Volume: 15, Issue: 3, pp. 1830 – 1839, March 2019, DOI: [10.1109/TII.2018.2868868](https://doi.org/10.1109/TII.2018.2868868)
37. Ghezlane Halhouli Merabet, Mohamed Essaidi, Mohamed El Brak, Driss Benhaddou, "Agent Based for Comfort Control in Smart Building," *IEEE Transactions on Power Systems*.
38. Irena Dukovska, Nikolaos G. Paterakis, Han Sloopweg, "Local Energy Exchange Considering Heterogeneous Prosumer Preferences," published at 2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), 18 October 2018, DOI: [10.1109/SEST.2018.8495865](https://doi.org/10.1109/SEST.2018.8495865).
39. Li Ma, Nian Liu, Jianhua Zhang, Lingfeng Wang, "Real-time Rolling Horizon Energy Management for the Energy-Hub-Coordinated Prosumer Community from a Cooperative Perspective," *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume: 34, Issue: 2, pp. 1227 – 1242, March 2019, DOI: [10.1109/TPWRS.2018.2877236](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2877236).
40. Shaun Howell, Yacine Rezgui, Jean-Laurent Hippolyte, Bejay Jayan, Haijiang Li, "Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 77, Pages 193-214, September 2017, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117304392>
41. "Electricity «Prosumers»," Brief of the European Parliament, November 2016 [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/593518/EPRS\\_BRI\(2016\)593518\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/593518/EPRS_BRI(2016)593518_EN.pdf)
42. "Operational, short-term and long-term optimization of the schedules of distributed energy in a locally regionalized power system," *Automation and IT in power engineering*, №11, 2016 <http://www.rtsoft.ru/press/articles/detail.php?ID=2929>
43. "Grid Interactive Microgrid Controllers and the Management of Aggregated Distributed Energy Resources (DER)" . EPRI 2015.
44. Aleksandr Kirilenko, Serhii Denysiuk, "Modern Tendencies of Conclusion and Management modes of Electroenergy Networks," *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, №9, vol.2, September 2018.

45. Serhii Denysiuk, "Guidelines of technological concepts of smart grid in power system," *POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology*, №1, 2014.

46. B. Stognii, O. Kyrylenko, O. Prahovnyk, S. Denysiuk, "The Evolution of Intelligent Electrical Networks and Their Prospects in Ukraine," *Technical Electrodynamics*, №5, 2012.

**S. Denysiuk**, Dr. Sc. Sciences., Prof. **ORCID** 0000-0002-6299-3680

**V. Tarhonskyi**, Msc. **ORCID** 0000-0003-3801-8284

**M. Artemiev**, PhD student, **ORCID** 0000-0002-1373-4105

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

## **LOCAL ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS WITH ACTIVE CONSUMER: METHODS OF CONSTRUCTION AND ALGORITHM OF THEIR FUNCTIONING**

*On the basis of the analysis of foreign literary sources, their classification according to the main tasks of modernization of local power systems according to the provisions of the concept of Smart Grid has been performed. A brief description of the development of local power systems with the presence of dispersed generation and active consumers as well as the consequences of their interaction with the central grid system is given. The role of the active consumer as an entity of the electric power system, which is capable by its actions to significantly affect its state, is considered. The methods of construction of local electric power systems and features of their functioning are investigated. The possibilities of introduction of the results of development of local electric power systems from the point of view of their management, circuit decisions, optimization of energy processes and mutual influence of elements of electric networks in the conditions of Ukraine are analyzed. The models of market processes in the local liberalized electricity markets and the mechanism of auctioning in the electricity market are presented. The role of the aggregator as the subject of the local energy market and its possibilities in managing the demand for energy resources is disclosed, and optimal solutions are proposed for the modernization of energy processes at various hierarchical levels of the electric system. From the point of view of end user management, the four-layer structure of interaction of electricity consumers with elements of the power grid at social, information and technological levels is considered. The principle of reactive power compensation is presented in order to increase the reliability of the network and indicators of electric power quality. The principles of construction of multi-agent control systems, its advantages in comparison with other systems of intellectual control of power processes, possibilities and architecture of construction are considered.*

**Key words:** local power supply systems, electric network, aggregator, multiagent system, active consumer, optimization, Smart Grid, Microgrid.

Надійшла 07.12.2018

Received 07.12.2018