

УДК 621.31

**Кириленко Александр Васильевич**, акад. НАН Украины, проф., директор,  
Институт электродинамики НАН Украины, 03057, Украина, м. Київ, пр-т Перемоги, 56, тел. +380 44 456-01-51;  
e-mail: kyrylenko@ied.org.ua

**Денисюк Сергей Петрович**, д-р техн. наук, проф., директор  
Институт энергосбережения та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», 03056, Украина, м. Київ, вул. Борщагівська, 115/3, тел. +380 44 454-93-77;  
e-mail: spdens@ukr.net

### СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ПОБУДОВИ ТА КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖ

*В статті розглянуто особливості модернізації та побудови в інтелектуальних електричних мережах згідно концепції Smart Grid, а також перспективні напрямки керування режимами в цих мережах. Наведені складові еталонної архітектури та значимі процеси для інтелектуальних електричних мереж, дана характеристика активних споживачів, віртуальних електричних станцій та мікромереж, як елементів, що суттєво впливають на режими функціонування електричних мереж. Представлено особливості реалізації систем керування режимами електричних мереж з використанням ієрархії рівнів керування та процесів і технологій для керування електромагнітними процесами в режимі реального часу. Дана характеристика мультиагентних систем керування з використанням архітектури на принципах штучного інтелекту, реактивної та гібридної архітектур. Визначено сфери та технологічні напрямки оптимізації електропостачання із застосуванням пристроїв силової електроніки у виділених мережах.*

**Ключові слова:** електроенергетичні мережі, концепція Smart Grid, базова архітектура, активний споживач, віртуальна електростанція, мікромережа, мультиагентне керування, силова електроніка.

**Кириленко Александр Васильевич**, акад. НАН Украины, проф., директор  
Институт электродинамики НАН Украины, 03057, Украина, г. Киев, пр-т Победы, 56, тел. +380 44 456-01-51;  
e-mail: kyrylenko@ied.org.ua

**Денисюк Сергей Петрович**, д-р техн. наук, проф., директор  
Институт энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университет Украины «Киевский политехнический институт», 03056, Украина, г. Киев, ул. Борщаговская, 115/3, тел. +380 44 454-93-77; e-mail: spdens@ukr.net

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПОСТРОЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

*В статье рассмотрены особенности модернизации и построения в интеллектуальных электрических сетях согласно концепции Smart Grid, а также перспективные направления управления режимами в этих сетях. Приведены составляющие эталонной архитектуры и значимые процессы для интеллектуальных электрических сетей, дана характеристика активных потребителей, виртуальных электрических станций и микросетей, как элементов, которые существенно влияют на режимы функционирования электрических сетей. Представлены особенности реализации систем управления режимами электрических сетей с использованием иерархии уровней управления и процессов и технологий для управления электромагнитными процессами в режиме реального времени. Дана характеристика мультиагентных систем управления с использованием архитектуры на принципах искусственного интеллекта, реактивной и гибридной архитектур. Определены сферы и технологические направления оптимизации электроснабжения с применением устройств силовой электроники в выделенных сетях.*

**Ключевые слова:** электроэнергетические сети, концепция Smart Grid, базовая архитектура, активный потребитель, виртуальная электростанция, микросети, мультиагентное управление, силовая электроника.

**Kirilenko Aleksandr Vasilevich**, Mem. NASU, Prof., director, Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 03057, Ukraina, Kyiv, av. Pobedy, 56, tel. +380 44 456-01-51; e-mail: kyrylenko@ied.org.ua

**Denisyuk Sergey Petrovich**, Dr. Eng. Sc., Prof., director, Institut of energy saving and of energymanagement (NEE) National Technical University «Kyiv Polytechnic Institute», 03056, Ukraina, Kyiv, st. Borshshagivskaya, 115/3, tel. +380 44 454-93-77; e-mail: spdens@ukr.net

### MODERN TENDENCIES OF CONSTRUCTION AND MANAGEMENT MODES OF ELECTROENERGY NETWORKS

*In the article the features of the modernization and construction of smart grids under the concept of Smart Grid, and promising areas of management regimes in these networks. These components of the reference architecture*

*and important processes for smart grids, given the characteristics of active users, virtual power plants and Microgrid as elements that significantly affect the modes of operation of electrical networks. Presented by the peculiarities of systems management regimes of electrical networks using a hierarchy of levels and control processes and technologies to control electromagnetic processes in real time. The characteristic multi-agent control systems using the architecture on the principles of artificial intelligence, reactive and hybrid architectures. Defined scope and technological optimize power using power electronics devices in the selected network.*

**Keywords:** *electricity network, the concept of Smart Grid, basic architecture, prosumer, virtual power plant, Microgrid, multi-agent control, power electronics.*

## Вступ

Стратегічною метою розвитку електроенергетичного комплексу України є побудова інтелектуальних електричних мереж (ІЕМ) – Smart Grid як платформи для ринкових, управлінських та технологічних інновацій, що забезпечить перехід до нового рівня розвитку української електроенергетики [5, 7, 8]. Створення інтелектуальної системи – це формування нової інформаційно-енергетичної структури, основу якої складають сучасні силові та інформаційні технології, система ефективних ринків електроенергії та супутніх послуг (системних, інформаційних та інших) [8–11].

Зупинимось на загальних положеннях, які визначили як ключові при формуванні ІЕМ. Сорок четверта Сесія СІГРЕ (26–31 серпня 2012 р.) виділила 10 ключових технічних питань, які є предметом основної уваги в розвитку електричних мереж [5]:

- поява активних розподільних мереж з двонаправленими потоками на рівні розподілу, а також з мережами більш високого рівня;
- застосування розвиненої системи вимірювань та забезпечення зростаючої потреби в обміні інформацією;
- зростаюче застосування високовольтних ЛЕП постійного струму, а також пристроїв силової електроніки (СЕ) на всіх рівнях напруги; їх вплив на якість електроенергії, керування і надійність системи; стандартизація;
- необхідність розвитку та масового впровадження систем накопичення електроенергії; оцінка їх впливу на розвиток і функціонування енергетичних систем;
- нові концепції побудови систем керування з урахуванням активної взаємодії споживачів і різних типів електростанцій;
- нові концепції захисту, що враховують розвиток мереж і різні характеристики електростанцій;
- нові концепції планування з урахуванням зростаючих екологічних обмежень, нових технологічних рішень для керування потоками активної та реактивної потужності;
- нові інструменти технічної оцінки функціонування електричних мереж, обумовлені новими характеристиками споживача, виробника та мережі;
- зростання пропускних потужностей і використання повітряних, підземних та підводних інфраструктур, вплив їх використання на технічну роботоспроможність і надійність мережі;
- зростаюча необхідність інформування зацікавлених сторін про технічні та комерційні наслідки.

При реалізації інтелектуальних мереж на європейському ринку були визнані основні 10 кроків, які підлягають реалізації та багато з яких тісно пов'язані між собою [14]:

- забезпечення нормативних стимулів для інноваційних інвестицій в мережі (2011–2020 р.р.);
- розробка моделей ринку (2011–2020 рр.);
- встановлення стандартів та забезпечення захисту даних і конфіденційності (2011–2014 р.р.);
- тестування з використанням демонстраційних проектів та обмін знаннями (2011–2018 рр.);
- розгортання інтелектуальних вимірювань – поінформовані клієнти (2012–2020 р.р.);
- моніторинг та керування мережами із розосередженою генерацією (2012–2020 р.р.);
- рух до інтеграції місцевого і центрального балансування для всіх типів генерації (2015–2021 р.р. та далі);

- агрегація розосереджених джерел енергії (2015–2021 р.р. та далі);
- інтеграція у великих масштабах е-мобілів, опалення, охолодження та зберігання (2015–2021 р.р. та далі);
- рух до реальної участі споживачів в енергоринку (2015–2021 рр. та далі).

На сьогодні виділяється три покоління Smart Grid, що дозволяє послідовно рухатися до цільової моделі [12, 13, 15, 16]:

- Smart Grid 1.0 – стан електроенергетичної інфраструктури, при якому окремі пристрої та об'єкти системи можуть підключатися до мережі без використання єдиних цифрових стандартів;
- Smart Grid 2.0 – стан електроенергетичної інфраструктури, при якому підключення будь-яких вузлів системи можливо тільки при умові переходу на єдиний IP-протокол та включених в єдину інтегровану IP-мережу;
- Smart Grid 3.0 – гнучка енергетична система, яка базується на принципах децентралізованого керування та рівноправності споживача і постачальника.

В процесі розвитку ІЕМ велика увага приділяється розробці базових архітектур [10, 12–15]. Архітектура ІЕМ – концептуальна модель і загальна організація ІЕС з точки зору її використання або розробки. Архітектура включає в себе технічні та ділові (бізнес) моделі і технічні вимоги, які разом передають загальне уявлення про ІЕМ. Архітектура втілює на високому рівні принципи та вимоги, яким розроблювані програми та системи повинні задовольняти. Еталонна архітектура – набір уявлень (схем) і описів, які служать основою для обговорення характеристик, варіантів використання, поведінки, інтерфейсів, вимог і стандартів ІЕМ. Еталонна архітектура не є остаточною архітектурою конкретної системи, а, скоріше, є інструментом для опису, обговорення та розробки цієї архітектури.

Загальна модель Smart Grid (Smart Grid Architecture Model – SGAM), розроблена корпорацією CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid - Coordination Group (рис. 1) [11–14].

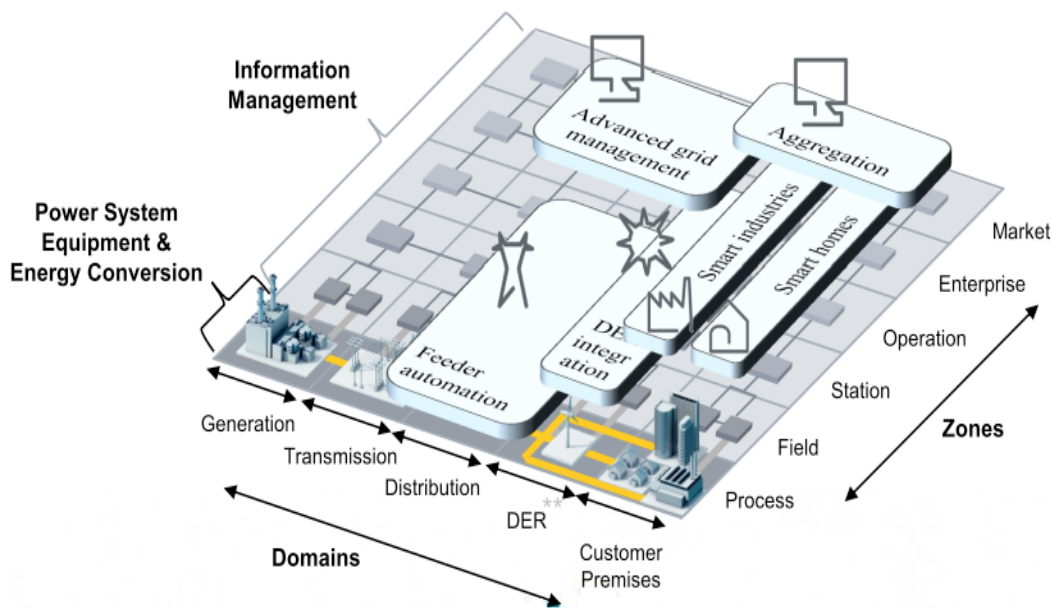


Рис. 1. Загальна модель Smart Grid Architecture Model – SGAM

При створенні еталонних архітектур враховується, що інтелектуальна електроенергетична мережа являє собою мережу нового покоління, яка створена з застосуванням мультиагентного принципу організації та керування її функціонування і розвитком і орієнтована на забезпечення ефективного використання всіх ресурсів (природних, соціально-виробничих та людських), для надійного, якісного та ефективного енергопостачання споживачів, за рахунок гнучкої взаємодії всіх її суб'єктів (всіх видів

генерації, електричних мереж і споживачів), на основі сучасних технологічних засобів і єдиної інтелектуальною ієрархічною системи керування.

Низкою провідних компаній (EPRI, NIST, IBM, Cisco та інших) здійснено виділення значущих процесів для IEM з розділенням їх за визначеною множиною доменів [6, 12, 13, 16]. Зупинимось на цьому більш детально.

#### **Енергетичні ринки і регулювання**

1. Організація торгівлі на регіональному конкурентному електроенергетичному ринку.

#### **Керування та функціонування енергосистем.**

2. Автоматична актуалізація параметрів загальної та локалізованих цифрових моделей енергосистеми (енергокластера).

3. Оцінювання стану енергосистеми за даними телевимірювань.

4. Автоматичне керування напругою і реактивною потужністю в енергокластері.

#### **Магістральні та розподільні мережі**

5. Самовідновлення мережі в аварійному режимі з використанням удосконаленої системи автоматики.

6. Автоматичне керування мережею в нормальному режимі.

7. Керування активами на основі інтеграції інтелектуального діагностичного обладнання з системою керування основними фондами підприємства (EAM-система).

#### **Генерація та великі споживачі**

8. Автоматизований розрахунок і керування уставками пристроїв РЗіА генеруючих об'єктів і промислових споживачів в режимі реального часу.

9. Моніторинг якості електроенергії для промислових споживачів.

10. Технологічне приєднання промислових споживачів до електричних мереж.

#### **Малі та середні споживачі, енергозбутові компанії і сервіс-провайдери**

11. Надання послуг на основі on-line моніторингу споживання енергоресурсів.

12. Інформування споживачів про фактичні та прогнозовані тарифи, споживанні енергоресурсів в режимі реального часу.

13. Зміна споживачем навантаження у певні періоди часу на основі керуючих сигналів (керування попитом).

14. Біллінг (з функцією предбіллінга) в on-line режимі.

#### **Мала енергетика: НВДЕ, розподілена генерація, накопичувачі енергії**

15. Керування в режимі реального часу об'єктами розосередженої генерації (РГ), підключеними до мережі.

16. Робота вдосконаленої системи автоматики розподільної мережі з об'єктами РГ.

17. Планування підключення об'єкта розосередженої генерації до мережі.

Були проаналізовані та опрацьовані ще цілий ряд процесів, які є менш актуальними, але досить значимими для побудови архітектури:

#### **Керування та функціонування енергосистем**

1. Протиаварійне автоматичне керування.

2. Системи моніторингу режиму, реєстрації аварійних подій та діагностики обладнання.

3. Технологічні об'єктові автоматики.

4. Функціонування релейного захисту та мережевої автоматики.

5. Автоматика керування режимом і станом обладнання.

6. Технології оперативного персоналу.

#### **Малі та середні споживачі, енергозбутові компанії і сервіс-провайдери**

7. Ціноутворення (розрахунок нерегульованих цін).

8. Формування обсягів покупної енергії та формування заявки на закупку на Ринку.

Питання застосування нових технологій в секторі магістральних та розподільних мереж [9–16] є одним із ключових. При цьому мова йде про:

- інноваційні компоненти та технології (акумулявання електроенергії; надпровідність; струмообмежувальні пристрої; цифрові підстанції; передача енергії постійним струмом; керовані електропередачі змінного струму);

- нові технології для систем моніторингу та захисту від зовнішніх впливів (контролю та захист від зовнішніх впливів; моніторинг та діагностика електричних мереж);

- системи керування з новими технологічними рішеннями (адаптивне автоматизоване і автоматичне керування; інтелектуальне керування).

В інтелектуальних мережах, на відміну від традиційних, широко використовуються нові технологічні рішення при реалізації цілого ряду систем:

**Міжсистемні міждержавні мережі:**

- оцінка поточного стану (режиму) передачі;

- автоматичний контроль завантаження передачі та видача керуючих впливів на розвантаження при виникненні перевантаження.

**Системоутворюючі мережі енергетичних систем:**

- автоматичний контроль повузлового балансу активної та реактивної потужності, оцінка втрат електричної енергії;

- контроль напруги в базисних точках мережі;

- оцінка поточного стану (режиму) мережі;

- мережеві елементи, які змінюють топологію мережі згідно керуючих впливів;

- автоматичний контроль завантаження критичних перерізів з видачею

керуючих впливів на розвантаження;

- регулювання частоти і підтримки балансу активної потужності у відокремлених енергорайонах в аварійних ситуаціях;

- автоматизована реконфігурація електричних мереж;

- моніторинг перехідних процесів з використанням синхронізованих векторних вимірювань.

**Розподільні мережі загального користування:**

- автоматичний контроль повузлового балансу активної та реактивної потужності;

- контроль якості електроенергії у вузлах мережі;

- централізоване автоматичне керування навантаженням споживачів;

- керовані мережеві елементи, які змінюють параметри мережі;

- управління для підтримки балансу при виділенні вузлів на ізольовану роботу;

- контроль та керування надійністю електропостачання.

В результаті розвитку систем інтелектуальних електромереж і створення систем третього покоління Smart Grid 3.0 з'явиться ціла низка нових властивостей інтелектуальних систем:

- розвиток систем розосередженої генерації та доступ усіх видів генерації і споживачів до ринку електроенергії та послуг електромережевої інфраструктури;

- активізація споживачів електроенергії за рахунок їх оснащення «інтелектуальними» системами обліку з можливістю оперативного ситуаційного керування складом і потужністю підключених електроустановок;

- оптимізація вироблення і споживання електроенергії за рахунок регулювання навантаження з максимальним урахуванням вимог споживачів, а також підвищення пропускної спроможності ліній електропередачі;

- максимальна самодіагностика, попередження системних збоїв, розвиток технологій самовідновлення схем електропостачання;

- використання оптимальних інструментів і технологій експлуатації та обслуговування;

- підвищення рівня моніторингу стану електромереж та її елементів з огляду на зниження впливу на навколишнє середовище, з обробленням інформації в режимі реального часу.

При побудов сучасних ІЕМ та реалізації сучасних програмних та апаратних засобів систем керування для ІЕМ необхідно враховувати появу в електроенергетичних системах активних споживачів, віртуальних електростанцій (VPP) та мікромереж – Microgrid [5, 7–10].

#### **Активні споживачі**

Однією з ключових функціональних характеристик сучасних ІЕМ згідно концепції Smart Grid є мотивація активної поведінки кінцевого споживача, під якою розуміється забезпечення можливості самостійної зміни споживачами обсягів і функціональних властивостей (рівня надійності, якості тощо) одержуваної електроенергії на підставі балансу своїх потреб і можливостей електроенергетичної системи з використанням інформації про характеристики цін, обсяги поставок електроенергії, надійності, якості та інш. Активний споживач – це учасник споживчого ринку електроенергії, який має можливість виходячи зі своїх потреб оптимізувати графік завантаження своїх потужностей як з метою мінімізації витрат на електроенергію, так і з метою отримання доходу від продажу електроенергії та потужності.

Застосування ідеології активного споживача призвело до появи цілого ряду позитивних ефектів в мережі та енергосистемі [4, 5, 9–12]:

- зниження капітальних і операційних витрат на магістральні мережі при підвищенні системної надійності та надійності електропостачання великих споживачів, підключених до енергосистем;
- зниження потреби в резерві мережевих потужностей в енергосистемі, пристроях компенсації реактивної потужності та витрат на їх експлуатації;
- оптимізація режимів завантаження енергосистемі та зниження витрат на компенсацію втрат потужності та електроенергії в енергосистемі;
- зниження витрат на компенсацію збитків від аварійних обмежень в подачі потужності та енергії у вузли живлення розподільних мереж (мереж споживачів) і на аварійні ремонти в енергосистемі;
- зниження пікових навантажень і потреби в генеруючих потужностях для їх забезпечення і підтримки нормативних резервів;
- вирівнювання графіка навантаження енергосистемі, зниження потреби в маневрених потужностях, зниження вимог до обов'язкового внутрішньодобового навантаження обладнання електростанцій;
- нові можливості для підтримки системної надійності за рахунок оперативного керування режимами, власними генеруючими і акумулюючими потужностями великого споживача.

Активний споживач має право вибирати: режим свого електроспоживання у відповідності з необхідністю виконання своїх виробничих планів по випуску продукції або забезпечення енергією домогосподарства, оптимізуючи свої витрати на покупку електроенергії із зовнішніх ринків; ступінь своєї участі у наданні додаткових послуг, що полягають у наданні керованих активних і реактивних навантажень (потужностей) для керування з боку системного оператора; умови завантаження власної потужності (за її наявності), для формування заявки на участь у купівлі / продажу електроенергії на оптовому та роздрібному ринках.

#### **Віртуальні електростанції (Virtual Power Plan – VPP)**

Використання VPP пов'язано з можливістю централізованого агрегування енергії, що виробляється розосередженою генерацією, за допомогою технологій Smart Grid з подальшою гармонізацією цієї генерації з графіками навантаження індивідуальних споживачів [9–14]. Функціонування VPP пов'язано з можливістю комерційних споживачів купувати потужність на оптовому ринку за допомогою аукціону об'єктів розосередженої генерації в короткі проміжки часу (пікове споживання). Віртуальна електростанція – це структура, що об'єднує в собі елементи трьох видів:

- розподілені генератори (вітроустановки, фотоелектричні станції, міні-та мікроТЕЦ та ін.);

– споживачі-регулятори навантаження – побутові та промислові. Побутові споживачі є найбільш легко керованими навантаженнями. Керованість навантаження промислових споживачів в основному залежить від гнучкості їх технологічних процесів. Для деяких процесів гнучкість підвищують за рахунок систем акумуляування енергії;

– системи акумуляування енергії. Ці системи можуть накопичувати енергію в різних формах (теплової, електричної, механічної та хімічної). Для побутових споживачів найбільш підходящим варіантом є акумуляування тепла (по режимах роботи теплоакуючі системи добре координуються з мікроТЕЦ). Система акумуляування енергії вибирається виходячи з області застосування та вартості накопичувачів з урахуванням, при необхідності, географічного чинника.

Зазвичай віртуальні електростанції приєднуються до мережі середнього або низької напруги. Елементи віртуальної електростанції можуть розташовуватися на значних відстанях один від одного. Керування VPP здійснюється дистанційно через систему EMS (Energy Management System), яка приймає інформацію про поточний стан кожної енергоустановки і передає на них керуючі сигнали. У EMS використовуються глобальна супутникова система навігації (GPS), за допомогою якої здійснюється синхронізація вимірювань комплексних значень струму та / або напруги на всіх енергоустановках віртуальної електростанції. Пристрої для таких вимірювань називають PMU (Phasor Measurement Units).

Вимоги до VPP-рішень: надійність, енергоефективність, низькі експлуатаційні витрати, низькі викиди, екологічність, зручність експлуатації, мала потреба в обслуговуванні та ремонті, хороший клімат у приміщенні з VPP, низька капіталомісткість.

Віртуальна електростанція може мати як комерційне призначення (продаж електроенергії на оптовий ринок), так і технічне призначення (системні послуги - такі як регулювання частоти і активної потужності, підтримка якості електроенергії тощо) або ж об'єднувати обидві ці функції.

### **Мікромережі – Microgrid**

Сьогодні знаходять широке застосування локальні системи Microgrid [9, 11–13]. Проблема оптимізації підключення малих виробників енергії до загальної мережі – це проблема відсутності ефективних технологій. Дослідження в цій області розпочав Роберт Х. Лассетер (Robert H. Lasseter), професор електротехніки Вісконтського університету в Медісоні (США). Переваги мікромережових технологій – зниження втрат енергії, зростання ефективності та доступності надійного високоякісного енергопостачання.

Локальна система Microgrid включає, як правило, кілька джерел генерації та розподільних підстанцій, комплекси збереження енергії, регулятори потоків електроенергії, що дозволяє Microgrid функціонувати як в автономному режимі, так і бути зв'язаною із зовнішньої енергосистемою. Microgrid забезпечує підвищення надійності енергопостачання за рахунок оперативного переключення споживачів між загальною енергосистемою і місцевими джерелами енергії у випадку перевантажень та стрибків напруги. Перевагами мікромережових технологій є їхня легка та швидка адаптація до споживачів на протигагу централізованим системам енергопостачання.

Координація систем Microgrid в інтелектуальній мережі здійснюється на різних рівнях напруги за допомогою [10–12]:

- Центру керування групою Microgrid (висока напруга розподільної мережі);
- Microgrid координатора (Smart концентратор) (середня та низька напруга);
- Головної системи керування Microgrid (середня та низька напруга).

Фактично системи Microgrid вимагають створення «центральної нервової системи» для керування операціями розподілу ресурсів у своїй зоні: розосереджені ресурси повинні бути об'єднані та оптимізовані; ресурси повинні з'явитися у системних операторів як «віртуальні генератори», що є інтегровані в систему постачання. Наприклад, Головна система керування Microgrid включає розосереджену генерацію, керовані навантаження, розосереджене акумуляування енергії.

### Керування режимами ІЕМ

Вимоги до сучасних систем керування ІЕМ [1–3, 5, 7, 10–12]:

- підвищення ступеня автоматизації керування в поєднанні з ефективними системами для прийняття рішень оперативним персоналом;
- узгодження балансу інтересів суб'єктів електроенергетики та споживачів електроенергії за умови мінімізації витрат на енергопостачання та послуги;
- максимальне використання можливостей технологічної бази енергетики при мінімізації різного роду обмежень;
- залучення споживачів до керування електроенергетичною системою в аварійних ситуаціях з урахуванням їх економічних інтересів;
- максимально можлива швидкість прийняття рішень щодо зміни умов використання електроенергії, в першу чергу, у непередбачуваних ситуаціях;
- моніторинг стійкості системи в реальному часі, динамічне прогнозування та превентивна реакція на зміну умов зовнішнього середовища;
- можливості реконфігурації частин системи при аварійних ситуаціях з відновленням нормального режиму;
- захист систем керування та інформаційного простору від цілеспрямованих електромагнітних впливів і кібератак.

Ієрархія рівнів керування в ІЕМ розкриває поняття «інтелектуальні мережі» як сукупність електроенергетичних та інформаційно-комунікаційних технологій, що представляють можливість більш ефективного керування ЕЕС за рахунок обміну та керування технологічною та маркетинговою інформацією. Наведемо ієрархія рівнів («якості») керування в ІЕМ [1–3, 5]:

6. Інтелектуальне керування – система керування з вбудованими функціями штучного інтелекту, що здійснюють функції визначення мети.

5. Інтелектуальне керування – система керування з вбудованими функціями штучного інтелекту без функції визначення мети.

4. Адаптивне керування – зміни параметрів регулятора або структури регулятора в залежності від зміни параметрів об'єкта керування або зовнішніх збурень, що діють на об'єкт керування.

3. Робастне керування – стійке керування при існуючих змінах параметрів об'єкта керування або зовнішніх обурення, що діють на об'єкт керування.

2. Позиційне керування – керування заданим станом об'єкта керування.

1. Програмне керування – керування заданою траєкторією руху об'єкта.

На нижчих рівнях 1 та 2 задіяно лише об'єкт керування, тоді як виконання 5 та 6 рівнів потребує використання хмарних технологій.

Як приклад наведемо перелік процесів і технологій при керуванні в реальному часі згідно домену «Керування та функціонування енергосистем» [5, 12, 13, 16]:

- оцінка стану поточного режиму;
- дозвіл оперативних заявок, перевірка технологічної допустимості та можливості проведення поставок енергії за прямими договорами;
- керування перемикальними мережевого обладнання (ЛЕП, трансформаторів) і включенням / відключенням генеруючого обладнання;
- проведення процедур ринків електроенергії;
- on-line керування енергосистемою в нормальному режимі (автоматичне і диспетчерське режимне керування; централізоване керування та само диспетчеризація;
- централізоване протиаварійне керування режимами на великих територіях (ОЕС, облэнерго, енергокластери, Microgrid) (WAMPAC);
- локальне, у тому числі, адаптивне (мультиагентний принцип) протиаварійне керування режимами;
- керування електроспоживанням (у тому числі, реверсивним) на основі ринкової ціни;



- протиаварійне та режимне керування електроспоживанням на основі участі споживачів у ринках системних послуг;
- обмеження електроспоживання у відповідності з договірними обсягами постачання і оплати;
- on-line діагностика мережевого та генеруючого обладнання.

Основні технології інтелектуального керування в ІЕМ [2, 3, 5]:

1. Мультиагентні системи керування – координація систем керування з використанням системи моніторингу перехідних режимів і пристроїв FACTS, самовідновлення районних електроенергетичних систем, керування попитом на місцевих торгових майданчиках.

2. Штучні нейронні мережі і нейромережеві системи керування, асоціативний пошук для ідентифікації та керування, експертні системи – раннє виявлення і локалізація передаварійних режимів, віртуальне моделювання і зниження порядку моделей, порадики оператора, тренажери.

3. Технологія адаптивного векторного керування гнучкими системами змінного струму – первинне і вторинне автоматичне керування напругою і реактивною потужністю, дооптимізація режимів по реактивній потужності в межах графіка навантаження, встановленого системним оператором.

4. Адаптивні моделюючі платформи реального часу – моделювання та оптимізація режимів за реактивною потужністю, моніторинг топології мереж і адаптація моделей, пілотні проекти для відпрацювання систем керування та моніторингу.

5. Технологія проектування, створення і підтримки в працездатному стані великомасштабних систем передачі інформації в ІЕМ – системний аналіз, верифікація та валідація системи, моделювання та моніторинг параметрів інформаційної мережі для своєчасного визначення проблемних ділянок в інформаційній структурі ІЕМ.

6. Технологія адаптивного автоматичного керування для відновлюваних джерел енергії, у тому числі вітрових, приливних, сонячних, у т.ч. в перспективі космічних сонячних електростанцій.

7. Технології створення сучасних людино-машинних інтерфейсів на основі застосування персональних мобільних інтелектуальних пристроїв введення / виведення інформації, для забезпечення гнучкого керування в розподіленій структурі «ресурс – користувач».

На сьогодні збільшуються обсяги інформації для прийняття обґрунтованих рішень, що вимагає значного часу на її передачу в центр і відповідну обробку. Підвищуються вимоги до комплексності вирішення завдань забезпечення надійності та якості, підвищення економічності, як при поточному функціонуванні, так і при розвитку енергосистеми. Тому в основу системи керування інтелектуальною системою у більшості випадків має бути покладено мультиагентний підхід, в рамках якої формується розподілена автоматизована система реального часу, що забезпечує взаємодію персоналу інтелектуальної електроенергетичної системи з автоматизованими і автоматичними комплексами керування [2, 3, 5, 10–14].

Переваги мультиагентних систем керування (МАСК):

- 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 швидкодію та на порядок економити обчислювальні ресурси;
- здатність здійснювати керування станом технічних комплексів і систем на основі

розподілених мережевих 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 мережевих 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 спільнотою 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 спільнотою 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.

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.

Побудову сучасних ІЕМ, зокрема, з використанням МАСК, та забезпечення ефективного керування електроенергетичними процесами дозволяє застосування різних типів пристроїв СЕ (рис. 2 та табл. 1). Зазначимо, що комплексний підхід до оцінки та подальшої оптимізації електромагнітних процесів в ІЕМ включає наступні складові: аналіз обмінних процесів; аналіз складових втрат електроенергії; аналіз ЕМС та якості електроенергії. Власне задачі та критерії оптимізації електропостачання в ІЕМ наведено в табл. 2.

За результатами проведеного аналізу можна сформулювати наступні напрямки розвитку інтелектуальних електромереж ОЕС України:

- реалізація державної політики при побудові концепції Smart Grid;
- запровадження та реалізації Smart Grid в рамках положень відповідної «дорожньої карти»;
- нарощування потужностей і ефективності експлуатації мереж;
- створення стимулюючих економічних і законодавчих механізмів, які дозволятимуть на державному рівні прискорити впровадження передових концепцій, ініціатив та рішень;
- інтеграція телекомунікаційної та енергетичної інфраструктури країни;
- взаємодія розподільних і транспортних систем;
- доставка і реалізація ресурсів кінцевому споживачеві;
- автоматизовані системи вимірювань, збору даних та обліку;
- технології обробки значних масивів даних у мережах Smart Grid;
- забезпечення конфіденційності та безпеки даних у мережах Smart Grid;
- розподілені та віддалені системи збору даних і керування пристроями;
- роль телекомунікаційних операторів і операторів машинно-машинної взаємодії M2M при побудові та керування мережами Smart Grid;
- розробка стандартів для ІЕМ України;
- Data-центри для електроенергетики;
- альтернативна енергетика, VPP і Microgrid;
- мультиагентні системи керування;
- забезпечення ефективної роботи активних споживачів.



ВЕС – віртуальна електростанція

Рис. 2. Основні сфери застосування пристроїв CE

Таблиця 1

№ з/п	Тип CE	CE1	CE2	CE3	CE4	CE5	CE6
1	Стандартна передача енергії постійним струмом (ПЕПС)	+	+	+			+
2	ПЕПС на основі інвертора напруги	+	+			+	
3	FACTS та FACDS, у т.ч. СТАКОМ (статичний компенсатор)	+	+			+	

Продовження таблиці 1							
4	Статичні тиристорні компенсатори	+	+	+	+	+	
5	Уніфіковані контролери потоку енергії	+	+	+		+	+
6	Інвертори напруги та струму, в т.ч. багаторівневі	+	+			+	+
7	Потужні випрямлячі з регулюванням вихідного сигналу	+	+		+	+	
8	Перетворювачі частоти, електропривід	+	+		+	+	+
9	Реакторні групи, комутовані вимикачами	+		+			+
10	Керовані шунтуючі реактори з підмагнічуванням постійним струмом	+					
11	Напівпровідникові ізолюючі пристрої	+	+			+	+
12	Комутатори та переривачі	+	+	+		+	+
13	Вставки постійного струму	+	+				
14	Активні фільтри (компенсатори) спотворень			+	+	+	+

Таблиця 2

Оптимізаційна задача	Критерії оптимізації
Мінімізація амплітуди $I_A$ та діючого значення $I_D$ струму, що відбирається від генератора	$I_A \rightarrow I_{A,MIN};$ $I_D \rightarrow I_{D,MIN}$
Мінімізація встановленої потужності обладнання $S$	$S \rightarrow S_{MIN}$
Аналіз нерівномірності генерації / споживання електроенергії $p(t)$ за активною потужністю $P$	$ p(t) - P  \rightarrow P_{MIN}$
Аналіз сумарної активної $P$ та реактивної $Q$ потужностей, одночасно приєднаних до мережі джерел РГ	$P_{РГ} < P_{РГ,ГР};$ $Q_{РГ} < Q_{РГ,ГР}$
Мінімізація обмінних процесів (обмінної потужності $Q_{ОБ}$ )	$Q_{ОБ} \rightarrow Q_{ОБ,MIN}$
Мінімізація додаткових втрат електроенергії (потужності Фризе $Q_{Ф}$ )	$Q_{Ф} \rightarrow Q_{Ф,MIN}$
Аналіз стійкості та надійності роботи системи за струмом та/чи напругою	$\Delta U/\Delta I < \delta U;$ $\Delta I/\Delta I < \delta I$
Мінімізація заданого рівня електромагнітної сумісності за обмінною потужністю $Q_{ОБ,\infty}$ вищих гармонік	$Q_{ОБ,\infty} \rightarrow Q_{ОБ,\infty,MIN}$

**Перелік використаної літератури**

- Бахтадзе Н. Н., Ядыкин И. Б., Максимов Е. М., Максимова Н. Е. Мультиагентный подход к разработке систем управления интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. [Электронный ресурс] – <http://расо2012.ipu.ru/procdngs/C205.pdf>
- Булатов Б. Г., Тарасенко В. В. Алгоритмы интеллектуального управления режимом распределительной сети // Вестник ЮУрГУ. – 2012. – № 37. – С. 18–22.
- Вариводов В. Н., Коваленко Ю. А. Интеллектуальные электроэнергетические системы // Электричество. – 2011. – № 9. – С. 4–9.
- Волкова И. О., Губко М. В., Сальникова Е. А. Активный потребитель: задача оптимизации потребления электроэнергии и собственной генерации // Проблемы управления. – 2013. – № 6. – С. 53–61.
- Интеллектуальные электроэнергетические семьи: элементы и режимы / Под общ. ред. А.В. Кириленка. – К.: ИЭД НАН Украины, 2014. – 408 с.
- Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью (Концепция рассмотрена и одобрена на совместном заседании НТС ОАО «ФСК ЕЭС» и Российской академии наук в октябре 2011г.). – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2012. – 51 с.
- Стогній Б. С., Кириленко О. В., Денисюк С. П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 6. –

С. 44–50.

8. Стогній Б. С., Кириленко О. В., Денисюк С. П. Розвиток інтелектуальних електричних мереж України на основі положень концепції Smart Grid // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. Спец. вип. – К.: ІЕД НАН України, 2012. – С. 5–13.

9. Grid 2030: A national version for electricity's second 100 years. – Office of Electric Transmission and Distribution, United States Department of Energy. – July 2003. – 89 p.

10. Strategic Research Agenda Update of the Smart Grids. SRA 2007 for the needs by the year 2035. – 2012. 72 p. [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.smartgrids.eu/documents/sra2035.pdf>

11. EPRI's IntelliGridSM initiative. [Electronic resource] – Mode of access: <http://intelligrid.epri.com>

12. [www.smartgrids.eu](http://www.smartgrids.eu)

13. [www.oe.energy.gov/smartgrid.htm](http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm)

14. 10 steps to Smart Grids // Union of the Electricity Industry. – EURELECTRIC, 2011.

15. Technology Roadmap Smart Grids. – Paris: OECD/IEA, 2011. – 52 p.

16. [www.gridology.ru](http://www.gridology.ru)

#### Referenses:

1. Бахтадзе Н. Н., Ядыкин И. Б., Максимов Е. М., Максимова Н. Е. Мультиагентный подход к разработке систем управления интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. [Электронный ресурс] – <http://расо2012.ipu.ru/procdngs/C205.pdf>

2. Булатов Б. Г., Тарасенко В. В. Алгоритмы интеллектуального управления режимом распределительной сети // Вестник ЮУрГУ. – 2012. – № 37. – С. 18–22.

3. Вариводов В. Н., Коваленко Ю. А. Интеллектуальные электроэнергетические системы // Электричество. – 2011. – № 9. – С. 4–9.

4. Волкова И. О., Губко М. В., Сальникова Е. А. Активный потребитель: задача оптимизации потребления электроэнергии и собственной генерации // Проблемы управления. – 2013. – № 6. – С. 53–61.

5. Интеллектуальные электроэнергетические семьи: элементы и режимы / Под общ. ред. А.В. Кириленка. – К.: ІЕД НАН України, 2014. – 408 с.

6. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью (Концепция рассмотрена и одобрена на совместном заседании НТС ОАО «ФСК ЕЭС» и Российской академии наук в октябре 2011г.). – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2012. – 51 с.

7. Стогній Б. С., Кириленко О. В., Денисюк С. П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 44–50.

8. Стогній Б. С., Кириленко О. В., Денисюк С. П. Розвиток інтелектуальних електричних мереж України на основі положень концепції Smart Grid // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. Спец. вип. – К.: ІЕД НАН України, 2012. – С. 5–13.

9. Grid 2030: A national version for electricity's second 100 years. – Office of Electric Transmission and Distribution, United States Department of Energy. – July 2003. – 89 p.

10. Strategic Research Agenda Update of the Smart Grids. SRA 2007 for the needs by the year 2035. – 2012. 72 p. [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.smartgrids.eu/documents/sra2035.pdf>

11. EPRI's IntelliGridSM initiative. [Electronic resource] – Mode of access: <http://intelligrid.epri.com>

12. [www.smartgrids.eu](http://www.smartgrids.eu)

13. [www.oe.energy.gov/smartgrid.htm](http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm)

14. 10 steps to Smart Grids // Union of the Electricity Industry. – EURELECTRIC, 2011.

15. Technology Roadmap Smart Grids. – Paris: OECD/IEA, 2011. – 52 p.

16. [www.gridology.ru](http://www.gridology.ru)

Поступила в редакцию 20.02.2016 г.