

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АРХІТЕКТУР ТА МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ РОЗУМНИХ ЕНЕРГОМЕРЕЖ

С. Ю. Коротунов¹, Г. В. Табунщик¹, К. Вольф²

¹Запорізький національний технічний університет

²Дортмундський університет прикладних наук

Анотація. Авторами розглянуто визначення та основні характеристики кіберфізичних систем та розумних енергомереж. У роботі виконаний детальний огляд актуальності даної тематики та основні напрямки розвитку у даній сфері. Авторами здійснено огляд та аналіз методів моделювання кіберфізичних систем з фокусом на фізичні та кібернетичні підсистеми. У рамках статті запропоновано та доведено актуальність впровадження розумної енергомережі у Запорізькій області.

Ключові слова: кіберфізичні системи, розумні енергомережі, оптимізація, моделювання.

Вступ

Напевно найважливішою подією ХІХ століття можна по праву вважати відкриття електроенергії, яка призвела до революційного прогресу в усіх сферах нашого суспільства та економіки. Значення електрики для розвитку соціальної та економічної діяльності людства важко недооцінити. Електричні мережі, які по своїй суті є масивними взаємопов'язаними фізичними мережами, являються основною інфраструктурою для енергопостачання та сьогодні є надзвичайно важливі для кожної країни світу [1].

Останніми роками зростає стурбованість у зв'язку з нанесенням шкоди навколишньому середовищу, а отже зростають вимоги до екологічно чистої генерації енергії та більш ефективного використання енергії через використання невідновлюваних джерел енергії, таких як вугілля, газ та нафта. Звіт про світове енергозбереження за 2017 рік [2] прогнозує, що глобальний попит на енергію буде збільшуватися на 30% до 2040 року, а отже, енергоефективність має вирішальне значення для зменшення тиску на енергопостачання. На міжнародному рівні уряди багатьох країн ухвалюють нову енергетичну політику. Так, Сполучені Штати планують досягти 20% використання відновлюваних джерел енергії до 2020 року [3]. Європейська Комісія також встановила 20-відсоткову цільову ставку до 2020 року [4]. Китай планує досягти 15% до 2020 року [5].

Досягнення таких результатів вимагає революційного переосмислення того, як постачати та використовувати електричну енергію більш ефективним, економічним та екологічно стабільним

способом.

Розумна енергомережа [6,7] – це нова концепція, спрямована на забезпечення електроенергетичної мережі наступного покоління, яка відзначається високою конфігурованістю, реактивністю та здатністю до самоконтролю. Це складна інфраструктура, що характеризується системою показників [8], таких як:

- міждисциплінарний характер,
- оперативна та управлінська незалежність її елементів,
- географічний розподіл,
- висока неоднорідність мережевих систем,
- виконання еволюційного розвитку.

Очікується, що вона буде ключовою частиною глобальної екосистеми взаємодіючих суб'єктів, що, у свою чергу, призведе до підвищення енергоефективності та покращенню управління наявними ресурсами. Для досягнення цієї мети необхідний точний моніторинг та управління [9].

Використання нової технологічної платформи, що називається кіберфізичною системою дозволить вирішити проблеми інтеграції розумних електромереж і зосередитися на ефективній взаємодії та інтеграції фізичних та кібернетичних систем.

Кіберфізичні системи – це системи, які пропонують тісну взаємодію між кібернетичними та фізичними компонентами. Сучасні тенденції підвищення продуктивності та ускладнення вимог до схем використання систем вимагають принципово нові проєктувальні підходи, в яких кібернетичні та фізичні компоненти інтегровані на всіх рівнях [10]. Кіберфізичні системи визначаються як системи, що пропонують інтеграцію обчислень, мереж та фізичних процесів [11-13], або, іншими словами, як системи, де фізичні та програмні компоненти тісно переплітаються,

кожен з яких працює в різних просторових і часових вимірах, демонструючи багаторазові та чіткі поведінкові модальності, та взаємодіють один з одним у безлічі способів, які змінюються з контекстом [14].

До визначальних характеристик кіберфізичних систем відносять [15]:

- реорганізація / реконфігурація динаміки,
- кібернетичні можливості у кожному фізичному компоненті,
- висока ступінь автоматизації,
- інтеграція в різних часових та просторових масштабах,
- здатність мережі працювати в декількох масштабах.

1. Постановка задачі

Термін розумної енергомережі визначається насамперед здатністю до інтеграції інформаційно-комунікаційних технологій із великомасштабними енергомережами задля підвищення ефективності, економічності та екологічності генерації, передачі та розподілу електроенергії. Національний інститут стандартів і технологій США впровадив концептуальну модель, яка визначає сім важливих складових розумних енергомереж:

- масове виробництво,
- передача,
- розподіл,
- споживачі,
- постачальник послуг,
- операції
- ринки.

Структура розумної енергомережі, яка зображена на рис. 1, дає зрозуміти що такі мережі мають багато учасників так зацікавлених сторін.



Рис. 1. Структура розумної електромережі [16]

Вимоги до більшої гнучкості, мобільності, безпеки та надійності енергопостачання, що висуваються до розумних енергомереж, призводять до необхідності переосмислення того, як взаємодіють між собою фізичні та кібернетичні системи, користувачі та постачальники енергоресурсів. Технічні проблеми, які необхідно вирішити, включають у себе:

- змінність джерел відновлюваної енергії, що впливає на якість електроенергії;
- складність налаштування взаємодії великих мереж невеликих розподілених механізмів генерації, таких як фотоелектричні панелі та батареї, вітряки, гібридні електричні транспортні засоби, тощо;
- невизначеність механізмів енергетичного ринку [17].

Енергоефективність є ключовим фактором, що характеризує електромережі. Є декілька способів її підвищення, наприклад зменшення пікового використання енергії. Це дозволить збільшити потужність постачання енергії з більшою маржею, щоб задовольнити потреби в енергії, не будуючи нові електростанції. Інший спосіб полягає в скороченні витрат, наприклад, на передачу електроенергії на велику відстань, яка становить значну долю енергії, що генерується. Досягти цього можна розміщенням генераторів, близьких до точки споживання (підхід, що має назву «розподіленої генерації»).

Вирішення зазначених проблем потребує реалізації кількох ключових технологічних підходів [16].

1. Механізми управління повинні бути розподілені, забезпечуючи можливість локального управління елементами енергомережі, або давати можливість таким елементам приймати деякі рішення самостійно.

2. Повинно виконуватися досить точне прогнозування попиту енергії для будь-якого елемента мережі на кілька годин або днів.

3. Повинно також виконуватися досить точне прогнозування виробництва енергії з поновлюваних джерел, а отже потрібна інтеграція з досить точним прогнозом погоди.

4. Для досягнення вищої ефективності мережі, піковий попит повинен бути зменшений за допомогою таких методів як:

- скидання навантаження,
- інтелектуальне управління навантаженням,
- динамічне формування цін на енергію для споживачів.

5. Необхідна технологія накопичення енергії, яка допоможе зменшити флуктуації енергети-

чних потреб.

Зазначені вище проблеми та виклики пропонується вирішувати за допомогою використання кіберфізичних систем, які надають парадигму, здатну на реалізацію цих завдань.

Термін кіберфізичної системи, структура якої наведена на рис. 2, був впроваджений у 2006 році Національним науковим фондом США.

Він описує широкий спектр складних, багатопрофільних інженерних систем наступного покоління, які інтегрують вбудовані обчислювальні технології (кібернетичну частину) в фізичну систему. Поєднання комп'ютерних наук та інженерії для реалізації кіберфізичних систем викликає значні технологічні проблеми, які можна підсумувати наступними ключовими аспектами [18], [19].

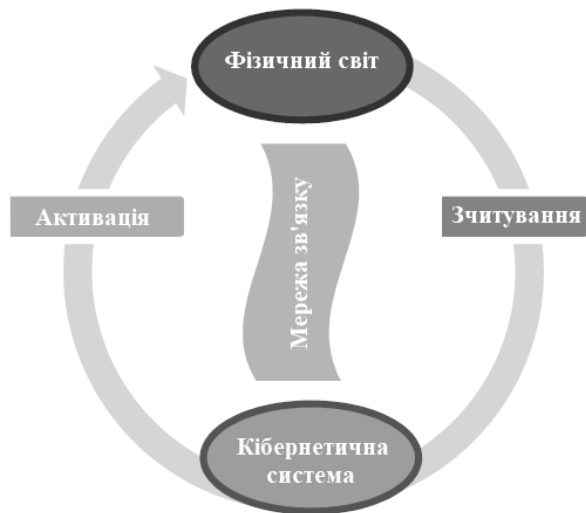


Рис. 2. Структура розумної електромережі [17]

1. Інформатика та інженерія. Високоякісна інтеграція та взаємодія кібернетичних та фізичних систем вимагають виконання вимірювань, контролю та обробки інформації в режимі реального часу. Поширення економічно ефективних датчиків, таких як, наприклад, розумні лічильники, призводить до зростання обсягів даних, які необхідно швидко та ефективно оброблювати, особливо для перехідних процесів в розумних енергомережах. Традиційні централізовані парадигми для обчислення та управління не підходять для швидкого реагування в режимі реального часу. Тому для прийняття рішень необхідно використовувати розподілені обчислення та механізми керування, що є особливо важливим для проектування розумних енергомереж.

2. Архітектура та проектування. Інтеграція керування, зв'язку та обчислень у кіберфізичних системах вимагає детального проектування та новітніх підходів до моделювання та архітектури

таких систем. Кіберфізичні системи повинні надавати комунікаційні інтерфейси між енергетичними мережами та кібернетичними системами, що дозволить створити гетерогенні системи у режимі «підключення та відтворення» та буде сприяти масовому поширенню таких технологій. Якнайскоріше потрібні стандартизовані абстракції та архітектури, що дозволять модульну розробку нових кіберфізичних систем. Крім того, необхідні методологія проектування та інструментарій для підтримки системних та мережевих специфікацій, сумісності, гібридних та неоднорідних моделей та аналізу. Кібербезпека – ще один важливий аспект кіберфізичних систем, враховуючи тісну інтеграцію кібернетичних та фізичних систем, коли процеси та механізми для обчислювальних пристроїв, таких як комп'ютери, смартфони, комп'ютерні мережі та розумні лічильники, вимагають захисту від несанкціонованого доступу та змін. Нові архітектури та методи необхідні для забезпечення конфіденційності, цілісності та доступності даних, а також захисту цінностей та людей.

Таким чином, роботу кіберфізичних систем необхідно координувати між різномірними системами, які складаються з обчислювальних пристроїв, розподілених датчиків та виконавчих механізмів. Датчики та виконавчі елементи повинні забезпечувати інтерфейс між фізичним та кібернетичним рівнями та адаптуються до часу, що змінюється в фізичному та кібернетичному контексті.

2. Аналіз існуючих методів моделювання кіберфізичних систем

Кіберфізична система являє собою «систему систем», де складні та гетерогенні системи взаємодіють безперервно, а отже, загальна архітектура такої системи вимагає ретельного проектування. Моделі забезпечують розробників корисними абстракціями фізичної реальності з формальними властивостями. Основні виклики в моделюванні кіберфізичних систем виникають через різномірну природу системи, паралельність різних фізичних процесів та чутливість до часу. Абстракції фізичних та обчислювальних компонентів відрізняються за рахунок фізичної суті цих компонентів, гранулярності та необхідного рівня деталізації. Це робить наявні підходи до моделювання недостатніми для моделювання кіберфізичних систем. Моделювання кіберфізичної системи на обох рівнях (кібернетичному та фізичному) одночасно викликає труднощі, оскільки ці рівні оперують різними абстракціями, виконуючи комунікації через інтерфейси мережі. Таким чином, значно доцільніше розглядати мо-

делі, що фокусуються на фізичних та кібернетичних системах окремо.

2.1 Аналіз методів моделювання з фокусом на фізичних підсистемах

В останні роки виникають нові підходи до моделювання, які пропонують позначення та концепції моделювання, що є специфічними для певних предметних областей, для яких і застосовується система. Серед таких підходів до моделювання основними є [20]:

- формальні семантичні підходи (денотаційні, аксіоматичні, операційні, гібридні);
- семантичні моделі, засновані на подіях;
- мультиагентні семантичні моделі;
- методи мета-моделювання та мета-програмувальні інструменти;
- актор-орієнтоване моделювання.

Існує декілька моделей обчислень для моделювання взаємодії акторів. Це моделі дискретних подій [21], машини кінцевих [22], моделі безперервного часу [23], технологічні мережі [24] та ін.

Моделі обчислення допомагають визначати чи виконуються компоненти в моделі одночасно, чи поділяють вони поняття часу, чи вони обмінюються даними з використанням протоколів публікація-підписка, за допомогою синхронної або асинхронної передачі повідомлень, тощо. Інший підхід називається «абстрактна семантика», де абстрактна алгебра визначає взаємодію між несумісними моделями [25].

Розглянемо далі деякі дослідницькі роботи, присвячені таким моделям.

Лі [26] обговорює два взаємопов'язані підходи до побудови кіберфізичних систем. Перший підхід, який називається «кібернетизація фізичного», стосується узагальнення програмних абстракцій навколо фізичних підсистем. Другий підхід, що має назву «фізикалізація кібернетичного», стосується надання програмним та мережевим компонентам абстракцій, які підходять для фізичних підсистем. Оскільки складність кіберфізичних систем збільшується, також збільшуються і труднощі у моделюванні взаємодії кібернетичних та фізичних підсистем. Використання запропонованих підходів допомагає усунути відмінності підсистем для досягнення більш реалістичного моделювання. Однак, запропоновані підходи виявляються незадовільними через недетермінізм у реалізаціях. Так, при використанні того самого програмного забезпечення у різних середовищах виконання, користувач може отримувати різні форми поведінки системи.

Тан та співавтори [27] представляють архі-

тектуру кіберфізичних систем, засновану на тимчасових та просторових властивостях подій. Автори пропонують представляти подію як функцію атрибутівних, просторових та часових умов. Крім того, використовуючи логічні оператори, різні типи умов об'єднуються для представлення складних подій, які дозволяють представляти складні відносини кіберфізичних систем. Таким чином, їх структура дозволяє проводити формальний просторовий та часовий аналіз кіберфізичної системи. Проте, запропонована архітектура пропонує представлення у вигляді подій тільки окремих частин системи, в той час як моделювання всієї кіберфізичної системи тільки належить впровадити у подальших дослідженнях.

Джа та співавтори [28] обговорюють підхід до моделювання кіберфізичних систем, які використовують мультимодальну динаміку. Такі системи працюють в різних режимах, де динаміка кожного режиму добре відома. Для забезпечення безпеки важливо правильно переключатися між різними режимами. Автори пропонують метод синтезу логіки перемикавання для заданої внутрішньої динаміки. Оператор може сприяти процесу синтезу, надаючи початкові наближення перемикачів. У якості недоліків запропонованого підходу можна зазначити по-перше використання у роботі оператора-людини, а по-друге відсутність формального доведення оптимальності запропонованого алгоритму.

Юе та співавтори [29] пропонують власний метод моделювання кіберфізичних систем. Їх метод використовує адаптивні дискретні події, які використовуються разом з дискретним численням подій. Використання дискретного числення подій дозволяє обробляти події навколишнього середовища, уникаючи невідповідностей у специфікаціях правил предметної області. Крім того, для покращення пристосованості системи, автори вводять нестандартний набір підстав, який дозволяє системі виконувати непередбачені події та демонструють актуальність їх модельного підходу за допомогою кіберфізичної системи, яка виконує відстеження об'єктів, що рухаються. Однак, у роботі відсутнє формальне формулювання набору правил моделювання, а отже розроблений авторами метод не може бути використана для моделювання довільної кіберфізичної системи.

Як можна бачити, існує досить велика кількість досліджень, присвячених моделюванню кіберфізичних систем з акцентом на фізичній підсистемі. Однак, наявні на сьогодні моделі вкрай специфічні для предметної області, а тому розробка універсальної моделі кіберфізичної системи є вкрай важливою задачею.

2.2 Моделювання самовідновлення кіберфізичних систем

При виникненні несправності в розумній енергомережі дуже важливо швидко діагностувати проблему та вжити коригувальних заходів. Здатність до самовідновлення – одна з характеристик розумної енергомережі. Вона характеризується можливістю мережі вживати заходи у режимі реального часу, що призведуть до перерозподілу навантаження та мінімізації відключень. Реалізація здатності до самовідновлення у розумній енергомережі – вкрай важливе та достатньо складне завдання. Для вирішення цього завдання пропонується використовувати набір моделей лінійного програмування [30].

Такі моделі призначені для ідентифікації оптимальних комбінацій джерел постачання, попиту на поставку, а також шляхів, по яких повинна бути перерозподілена потужність розумних енергомереж. Моделі лінійного програмування доцільно використовувати для реалізації здатності до самовідновлення розумних енергомереж насамперед через те, що вони явно підтримують невизначеність, що пов'язана з використанням альтернативних джерел енергії, наприклад енергії вітру або енергії сонця. Ця невизначеність є наслідком природи сонця та вітру, так, кількість сонячної радіації коливається в залежності від положення сонця у небі та від погодних умов, сила вітру також змінюється в залежності від погодних умов.

Основною метою такого моделювання є збалансованість потоку енергії по всій системі, щоб переконатись, що жоден споживач не зазнає збоїв, одночасно збільшуючи загальну ефективність, економічність та надійність системи.

Можна зробити логічне припущення, що перебої з наявною енергією виникають через несправність пристроїв, неефективні лінії електропередачі або через невизначеність альтернативних джерел енергії. Ці перебої впливають на здатність окремих джерел постачання задовольняти енергетичні потреби на певних об'єктах. У відповідь на потребу розподілити електричну енергію альтернативними способами, реалізуються моделі лінійного програмування. Більш конкретно, вважається що є j різних споживачів енергії, для кожного з яких існує обмежений набір доступних джерел постачання i , які можуть бути виділені для задоволення потреб. Рис. 3 показує двосторонній графік, де джерелами постачання є вузли в лівому наборі, а споживачами – вузли в правому.

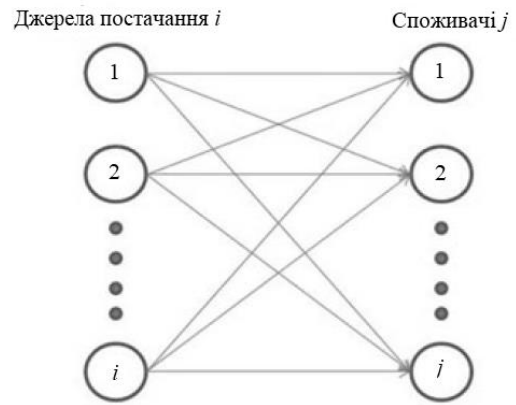


Рис. 3. Граф постачальників та споживачів [30]

За c_{ij} приймається вартість постачання енергії від постачальника до споживача, за s_i та d_j – доступна постачальнику, та необхідна споживачу, енергія відповідно, за x_{ij} – потік енергії від постачальника до споживача, за u_{ij} – підвищений рівень навантаження (ємність), яку можливо розподілити на доступний шлях, що з'єднує вузли i та j , а за b_i – попит до постачальника i . Направлений граф розумної енергомережі має наступний вигляд:

$$A = N \times N$$

Отже, i належить N , та (i, j) належить до множини A . Ще однією важливою характеристикою запропонованої моделі є тип постачальника енергії, що позначається як p та визначається:

$$p = 1, 2, \dots, P$$

Наприклад, коли постачальним джерелом енергії є вітряна станція, інформація про тип такої енергії може бути критичним для прийняття рішення з огляду на флуктації в природі такого джерела енергії.

Отже, проблема полягає в тому, щоб знайти набір потоків, що мінімізує загальну вартість, її формулювання виглядає наступним чином:

$$\text{Max}(z) = \sum_{(i, j) \in A} \sum_{p \in P} c_{ijp} x_{ijp}$$

За умови, що:

$$\sum_{i: (i, j) \in A} x_{ijp} - \sum_{j: (i, j) \in A} x_{jip} = b_{ip}$$

$$\sum_{p=1}^P x_{ijp} \leq u_{ij}$$

$$x_{ijp} \geq 0$$

Розглядаючи поновлювані джерела енергії, наприклад вітер та сонце, важливо мати можливість враховувати флуктуації таких типів енергії. Тому вірогідносте обмеження для даної моделі приймає вигляд:

$$\Pr \left[\left[\frac{\sum_{i:(i,j) \in A} x_{ijp} - E\{b_{ip}\}}{\sqrt{\text{Var}\{b_{ip}\}}} \right] = \left[\frac{b_{ip} - E\{b_{ip}\}}{\sqrt{\text{Var}\{b_{ip}\}}} \right] \right] \geq 1 - \alpha_{ip}$$

Де, $1 - \alpha_{ip}$ – задана найменша можлива вірогідність того, що постачальник i задовільнить попит споживача j у розмірі b_{ip} . Таким чином, α_{ip} – ризик не отримати необхідну енергію. Попит можна представити у вигляді випадкової змінної, що відповідає статистичному розподілу. Φ приймається як кумулятивна функція розподілу для стандартного нормального розподілу, а $K_{\alpha_{ip}}$ – стандартне нормальне значення. Отже:

$$\Phi(K_{\alpha_{ip}}) = 1 - \alpha_{ip}$$

Отже модель встановлює вимогу щодо мінімального рівня потужності, що доставляється з встановленою ймовірністю:

$$\sum_{i:(i,j) \in A} x_{ijp} \leq E\{b_{ip}\} - K_{\alpha_{ip}} \sqrt{\text{Var}\{b_{ip}\}}$$

Моделі оптимізації включають об'єктивні функції, що забезпечують доцільність розподілу ресурсів. Стохастична інформація може бути безпосередньо включена з обмеженнями для моделювання ситуацій невизначеності.

Таким чином, моделі лінійного програмування доцільно використовувати у якості математичного апарату для вирішення проблеми реалізації здатності розумних енергомереж до самовідновлення.

3. Рекомендації для Запорізького регіону

Для того щоб оцінити актуальність використання та дослідження розумних енергомереж та кіберфізичних систем для Запорізького регіону можна використати прогнози лідерів галузі. Очікування надзвичайно великі. Так, у сфері мобільних технологій, генеральний директор відділу телекомунікації компанії Intel Джон Вудгет оцінює кількість підключених мобільних пристроїв для використання кіберфізичними системами у діапазоні близько 20 мільярдів до 2020 [31]. Розглядаючи розумні енергомережі, Марі Хаттар,

віце-прем'єр з маркетингу компанії Cisco, оцінила що розумні енергомережі будуть у «100 або 1000 разів більші, ніж Інтернет» [32]. Аналогічним чином, технічний директор SAP Вішал Сікка заявив що «наступний мільярд користувачів SAP буде розумними лічильниками» [33].

Типовим прикладом кіберфізичних систем розумних енергомереж є розумні лічильники, і лише на встановлення у будинках, відповідно до ABI Research, буде витрачено близько 4,8 мільярдів доларів [34]. За даними Pike Research, ринок енергетичного менеджменту (включаючи бездротові сенсорні мережі, управління освітленням, управління опаленням та охолодженням у будівлях) буде зростати до 6,8 мільярдів доларів на рік до 2020 року, і за період з 2010 по 2020 рік згенерує інвестицій на більш ніж 67,6 мільярдів доларів [35]. Вони також зазначають, що у 2015 році на послуги з установки, обслуговування та управління розумними енергомережами витрачено 4,3 мільярда доларів [36]. Ринок розумних домів, що є складовою одиницею розумної енергомережі (застосовується моніторинг та управління енергією), згідно з electronics.ca становив 2,8 мільярда доларів у 2012 році, збільшившись з 470 мільйонів доларів у 2007 році.

Це лише деякі ринкові оцінки, що вказують на те, що ми входимо у нову епоху, епоху домінування кіберфізичних систем. Вже сьогодні багатомільйонні проекти досліджень ведуться по всьому світу, вивчаючи аспекти розумних енергомереж, а також їх кіберфізичну природу.

Однак, потрібно визнати, що якщо у світі кіберфізичні системи та розумні енергомережі перебувають на початковій стадії свого розвитку, у Запорізькому регіоні вони ще не розвивалися зовсім. І це, безумовно є унікальним шансом збудувати систему, що буде відповідати всім найновітнішим стандартам розумних енергомереж. Стає очевидно, що часи централізованих енергомереж відходять у минуле і чим швидше перейти до впровадження сучасних технологій – тим більшої ефективності та економічності можна досягти. Так, згідно до нещодавно прийнятої енергетичної стратегії України до 2035 року [37], розвиток розподіленої генерації та розвиток розумних мереж є одними з найбільш пріоритетних напрямків розвитку галузі України.

Запорізький регіон у цьому розумінні є ідеальним регіоном для впровадження розумних енергомереж. Українська національна енергетична компанія опублікувала звіт, карта з якого наведена на рис. 4, а умовні позначення на рис. 5.

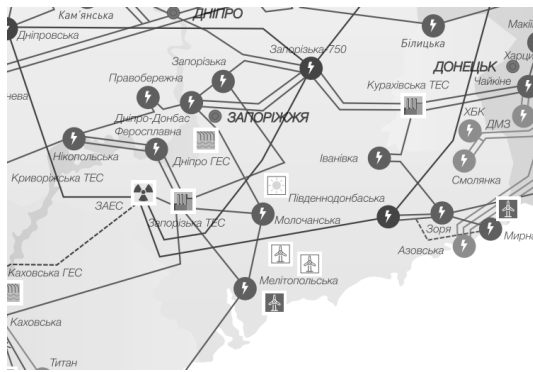


Рис. 4. Карта енергетичних ресурсів України [38]

Електростанції		Лінії електропередавання та підстанції	
двочі	що будується	двочі	перспективні
	АЕС		• ± 400 кВ
	ТЕС		• 750 кВ
	ГЕС, ГАЕС		• 400-500 кВ
	ВЕС		• 330 кВ
	СЕС		• 220 кВ
			• лінії, що демонтуються
			• підстанції, що будується

Рис. 5. Умовні позначення карти [38]

Як можна бачити, Запорізький регіон посідає лідируючі позиції у генерації енергії, у ньому, згідно рис. 4, знаходяться майже усі види енергетичних станцій, а саме – атомна, теплові, гідро, вітрові та сонячні. Не зважаючи на наявність АЕС, ГЕС та ТЕС, можна бачити, що поява та збільшення існуючих ВЕС та СЕС відбувається вкрай швидкими темпами. Розвиток станцій альтернативних джерел енергії робить ще більш актуальною задачу когнітивного розподілу енергоресурсів. А отже, впровадження розумної енергомережі, яка і вирішує дану проблему, у Запорізькому регіоні є надзвичайно актуальною та важливою проблемою.

Висновки

Проведене дослідження існуючих архітектур та методів моделювання кіберфізичних систем для розумних енергомереж показало наявність досить високої кількості досліджень у області, однак відсутність стандартизованих підходів до архітектури та моделювання таких систем. Всі наявні на сьогодні методи моделювання та підходи до проектування кіберфізичних систем є специфічними для певних предметних областей. Таким чином, наявні підходи до моделювання є недостатніми для точного моделювання кіберфізичних систем, тому розробка стандартизованого методу моделювання кіберфізичних систем є надзвичайно актуальною.

Аналіз наявних методів моделювання показав існування розділення методів із фокусом на

фізичні та кібернетичні підсистеми, а також допоміг виявити переваги та недоліки розглянутих методів.

Крім цього, проведено дослідження актуальності впровадження розумної енергомережі у Запорізькому регіоні з оглядом на його позицію одного з лідерів енергетичної промисловості України. А отже, практичне значення роботи полягає в проведенні підготовчої роботи, що дозволить розпочати створення моделі кіберфізичної системи для впровадження розумної енергомережі у регіоні.

Дана робота виконана на кафедрі програмних засобів Запорізького національного технічного університету за пріоритетним напрямом «Перспективні засоби переробки інформації та кібернетичні системи», в рамках теми № 0117U000615 «Інформаційна система діагностування розподілених міні-комп'ютерних систем в багатокомпонентному зовнішньому середовищі», та в рамках двостороннього договору творчої співпраці між Запорізьким національним технічним університетом та Дортмундським університетом прикладних наук.

Список використаної літератури

1. Yu, X. The New Frontier of Smart Grids [Text] / [X. Yu, C. Cecati, T. Dillon et al.] // IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2011. – 5(3) – pp.49-63. DOI: 10.1109/MIE.2011.942176.
2. World Energy Outlook 2017. [Electronic Resource]. – Access Mode: <https://www.iea.org/weo2017/>.
3. The All-of-the-Above Energy Strategy as a Path to Sustainable Economic Growth. [Electronic Resource]. – Access Mode: <https://obamawhitehouse.archives.gov/blog/2014/05/29/new-report-all-above-energy-strategy-path-sustainable-economic-growth/>.
4. Renewable Energy Target Setting. [Electronic Resource]. – Access Mode: <http://www.irena.org/publications/2015/Jun/Renewable-Energy-Target-Setting>.
5. Degree of reliance on imported energy. [Electronic Resource]. – Access Mode: <https://www.reeep.org/china-2014>.
6. Internet of Energy: ICT for energy markets of the future. [Electronic Resource]. – Access Mode: https://www.iese.fraunhofer.de/content/dam/iese/en/mediacenter/documents/BDI_initiative_IoE_us-IdE-Broschuere_tcm27-45653.pdf.
7. Smartgrids: Strategic deployment document for europe's electricity networks of the future. [Electronic Resource]. – Access Mode: https://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf.

8. Maier, M. Architecting principles for systems-of-systems [Text] / M. Maier // *Systems Engineering*. – 1998. – 1(4). – pp. 267-284. DOI: 10.1002/(SICI)1520-6858(1998)1:4<267::AID-SYS3>3.0.CO;2-D.
9. Karnouskos, S. Cyber-Physical Systems in the SmartGrid [Text] / S. Karnouskos // 2011 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics. – 2011. – pp. 20–23. DOI: 10.1109/INDIN.2011.6034829.
10. Giese, H. Science and Engineering of Cyber-Physical Systems (Dagstuhl Seminar 11441) [Text] / H. Giese, B. Rumpe, B. Schatz, J. Sztipanovits // *Dagstuhl Reports*. – vol. 1, no. 11. – pp. 1–22. DOI: 10.4230/DagRep.1.11.1.
11. Conti, M. Looking ahead in pervasive computing: challenges and opportunities in the era of cyber-physical convergence [Text] / [M. Conti et al.] // *Pervasive and Mobile Computing*. – 2012. – vol. 8, no. 1. – pp. 2–21. DOI: 10.1016/j.pmcj.2011.10.001.
12. Horváth Cyber-physical systems: Concepts, technologies and implementation principles [Text] / Horváth, B. Gerritsen // *Tools and Methods of Competitive Engineering Symposium (TMCE)*. – 2012. – pp. 19-36.
13. Lee, E. Computing needs time [Text] / [E. Lee] // *Communications of the ACM*. – 2009. – vol. 52, no. 5. – pp. 70–79. DOI: 10.1145/1506409.1506426.
14. NSF, Cyber physical systems nsf10515 [Electronic Resource]. – Access Mode: <http://www.nsf.gov/pubs/2010/nsf10515/nsf10515.htm>.
15. Miclea, L. About dependability in cyber-physical systems [Text] / [L. Miclea and other] // *EWDTs*. – 2011. – pp. 17–21. DOI: 10.1109/EWDTs.2011.6116428.
16. Yu, X. Smart Grids: A Cyber-Physical Systems Perspective [Text] / X. Yu, Y. Xue // *Proceedings of the IEEE*. – 2016. – vol. 104, no. 5. – pp. 1058-1070. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2503119.
17. Consumer Energy Report. [Electronic Resource]. – Access Mode: http://www.sspcr.eurac.edu/wp-content/uploads/2017/04/SSPCR_2017_SERGI_ROSASCO_BIANCHI.pdf.
18. Baheti, R. Cyber-physical systems [Text] / R. Baheti, H. Gill // *The Impact of Control Technology* / T. Samad and A. M. Annaswamy, Eds. – New York, NY, USA: IEEE Control System Society. – 2011. – pp. 161–166.
19. Cyber-Physical Systems – A Concept Map. [Electronic Resource]. – Access Mode: <http://cyberphysicalsystems.org/>.
20. Lee, E. A. Actor-oriented design of embedded hardware and software systems [Text] / [E. A. Lee et al.] // *JCSC*. – 2003. – vol. 12, no. 03. – pp. 231–260. DOI: 10.1142/S0218126603000751.
21. Lee, E. A. Modeling concurrent real-time processes using discrete events [Text] / E. A. Lee // *Annals of Software Engineering*. – 1999. – vol. 7, no. 1-4. – pp. 25–45. DOI: 10.1023/A:1018998524196.
22. Lee, E. A. Finite state machines and modal models in ptolemy ii [Text] / E. A. Lee // *DTIC Document, Tech. Rep.* – 2009. – 40 p.
23. Lee, E. A. «Operational semantics of hybrid systems [Text] / [E. A. Lee et al.] // *Hybrid Systems: Computation and Control, Springer*. – 2005. – pp. 25–53.
24. Lee, E. A. Dataflow process networks [Text] / E. A. Lee, T. M. Parks // *Proceedings of the IEEE*. – 1995. – vol. 83, no. 5. – pp. 773–801. DOI: 10.1109/5.381846.
25. Lee, E. Overview of the ptolemy project [Text] / E. Lee, I. John // 1999. – 29 p.
26. Lee, E. A. CPS foundations [Text] / E. A. Lee, T. M. Parks // *Design Automation Conference (DAC)*. – 2010. – pp. 737–742. DOI: 10.1145/1837274.1837462.
27. Tan, Y. Spatio-temporal event model for cyber-physical systems [Text] / Y. Tan, M. Vuran, S. Goddard // *ICDCS Workshops*. – 2009. – pp. 44-50. DOI: 10.1109/ICDCSW.2009.82.
28. Jha, S. Synthesizing switching logic for safety and dwell-time requirements [Text] / [S. Jha et al.] // *ICCPs*. – 2010. – pp. 22–31. DOI: 10.1145/1795194.1795198.
29. Yue, K. An adaptive discrete event model for cyber-physical system [Text] / [K. Yue et al.] // *Analytic Virtual Integration of Cyber-Physical Systems Workshop*. – 2010. – pp. 9–15.
30. Ranganathan, P. Distributed Linear Programming Models in a Smart Grid [Text] / P. Ranganathan, K. Nygard // *Power Electronics and Power Systems*. – 2017. – 213 p. DOI: 10.1007/978-3-319-52617-1.
31. Lomas, N. Online gizmos could top 50 billion in 2020 [Electronic Resource]. – Access Mode: http://www.businessweek.com/globalbiz/content/jun2009/gb20090629_492027.htm.
32. LaMonica, M. Cisco: Smart grid will eclipse size of Internet. – Interview, May 2009. [Electronic Resource]. – Access Mode: <https://www.cnet.com/news/cisco-smart-grid-will-eclipse-size-of-internet/>.
33. Mirchandani, V. The next billion SAP users will be smart meters – Interview online, Jul. 2009. [Electronic Resource]. – Access Mode: http://dealarchitect.typepad.com/deal_architect/2009

/07/the-next-billion-sap-users-will-be-smart-meters.html.

34. ABI Research, Smart grid spending will top \$4.5 billion by 2015 [Electronic Resource]. – Access Mode: <https://www.abiresearch.com/press/abi-research-forecasts-45-billion-global-smart-hom/>.

35. Pike Research, Energy management systems for commercial buildings will garner \$67 billion in investment by 2020 [Text]. – Press Release, Nov. 2009.

36. Smart grid managed services market to grow 75% year-over-year between 2010 and 2011 [Text]. – Press Release, Sep. 2010.

37. Презентація оновленої Енергетичної стратегії України до 2035 – [Electronic Resource]. – Access Mode: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245214948>.

38. Ukrainian energy map – [Electronic Resource]. – Access Mode: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/02/125-KARTA-26-01.pdf>.

References

1. Yu, X., Cecati, C., Dillon, T. and Simões, M. (2011). The New Frontier of Smart Grids. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 5(3), pp.49-63. DOI: 10.1109/MIE.2011.942176.

2. World Energy Outlook 2017. [online] Available at: <https://www.iea.org/weo2017/> [Accessed 9 Mar. 2018].

3. The All-of-the-Above Energy Strategy as a Path to Sustainable Economic Growth. [online] Available at: <https://obamawhitehouse.archives.gov/blog/2014/05/29/new-report-all-above-energy-strategy-path-sustainable-economic-growth> [Accessed 9 Mar. 2018].

4. Renewable Energy Target Setting. [online] Available at: <http://www.irena.org/publications/2015/Jun/Renewable-Energy-Target-Setting> [Accessed 9 Mar. 2018].

5. Degree of reliance on imported energy. [online] Available at: <https://www.reeep.org/china-2014> [Accessed 9 Mar. 2018].

6. Internet of Energy: ICT for energy markets of the future. [online] Available at: https://www.iese.fraunhofer.de/content/dam/iese/en/mediacenter/documents/BDI_initiative_IoE_us-IdE-Broschuere_tcm27-45653.pdf [Accessed 9 Mar. 2018].

7. Smartgrids: Strategic deployment document for europe's electricity networks of the future. [online] Available at: https://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf [Accessed 9 Mar. 2018].

8. Maier, M. (1998). Architecting principles

for systems-of-systems. *Systems Engineering*, 1(4), pp.267-284. DOI: 10.1002/(SICI)1520-6858(1998)1:4<267::AID-SYS3>3.0.CO;2-D.

9. Karnouskos, S. (2011). Cyber-Physical Systems in the SmartGrid. 2011 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics. DOI: 10.1109/INDIN.2011.6034829.

10. Giese, H., Das, S., Bisdikian, C., Kumar, M., Ni, L., Passarella, A., Roussos, G., Tröster, G., Tsudik, G. and Zambonelli, F. Science and Engineering of Cyber-Physical Systems (Dagstuhl Seminar 11441), 11(1), pp.1–22. DOI: 10.4230/DagRep.1.11.1.

11. Conti, M., Das, S., Bisdikian, C., Kumar, M., Ni, L., Passarella, A., Roussos, G., Tröster, G., Tsudik, G. and Zambonelli, F. (2012). Looking ahead in pervasive computing: Challenges and opportunities in the era of cyber-physical convergence. *Pervasive and Mobile Computing*, 8(1), pp.2–21. DOI: 10.1016/j.pmcj.2011.10.001.

12. Horv'ath, Gerritsen B. (2012). Cyber-physical systems: Concepts, technologies and implementation principle. *Tools and Methods of Competitive Engineering Symposium (TMCE)*, 8(1), pp.19–36.

13. Lee, E. (2009). Computing needs time. *Communications of the ACM*, 52(5), p.70. DOI: 10.1145/1506409.1506426.

14. Cyber-Physical Systems (CPS) (nsf10515). [online] Available at: <https://www.nsf.gov/pubs/2010/nsf10515/nsf10515.htm> [Accessed 9 Mar. 2018].

15. Miclea, L. and Sanislav, T. (2011). About dependability in cyber-physical systems. 2011 9th East-West Design & Test Symposium (EWDTS). DOI: 10.1109/EWDTS.2011.6116428.

16. Yu, X. and Xue, Y. (2016). Smart Grids: A Cyber-Physical Systems Perspective. *Proceedings of the IEEE*, 104(5), pp.1058–1070. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2503119.

17. Consumer Energy Report. [online] Available at: http://www.sspcr.eurac.edu/wp-content/uploads/2017/04/SSPCR_2017_SERGI_RO_SASCO_BIANCHI.pdf [Accessed 9 Mar. 2018].

18. Baheti, R. (2011). Cyber-physical systems: The Impact of Control Technology. *IEEE Control System Society*, pp.161–166.

19. Cyber-Physical Systems - a Concept Map. [online] Available at: <http://cyberphysicalsystems.org/> [Accessed 9 Mar. 2018].

20. Lee, E., Neuendorffer, S. and Wirthlin, M. (2003). Actor-Oriented Design of Embedded Hardware and Software Systems. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 12(03), pp.231–260. DOI: 10.1142/S0218126603000751.

- 21.Lee, E. (1999). Modeling concurrent real-time processes using discrete events, 7(1/4), pp.25–45. DOI: 10.1023/A:1018998524196.
- 22.Lee, E. (2009). Finite state machines and modal models in ptolemy ii, Tech. Rep, 40 p.
- 23.Lee, E. and Zheng, H. (2005). Operational Semantics of Hybrid Systems. Hybrid Systems: Computation and Control, pp.25–53.
- 24.Lee, E. and Parks, T. (1995). Dataflow process networks. Proceedings of the IEEE, 83(5), pp.773–801. DOI: 10.1109/5.381846.
- 25.Lee, E. (1999). Overview of the ptolemy project, 29 p.
- 26.Lee, E. (2010). CPS foundations. Proceedings of the 47th Design Automation Conference on - DAC '10. DOI: 10.1145/1837274.1837462.
- 27.Tan, Y., Vuran, M. and Goddard, S. (2009). Spatio-Temporal Event Model for Cyber-Physical Systems. 2009 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. DOI: 10.1109/ICDCSW.2009.82.
- 28.Jha, S., Gulwani, S., Seshia, S. and Tiwari, A. (2010). Synthesizing switching logic for safety and dwell-time requirements. Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems - ICCPS '10. DOI: 10.1145/1795194.1795198.
- 29.Yue, K. (2010). An adaptive discrete event model for cyber-physicalsystem. Analytic Virtual Integration of Cyber-Physical Systems Workshopm, pp. 9–15.
- 30.Ranganathan, P. and Nygard, K. (2017). Distributed Linear Programming Models in a Smart Grid. Power Electronics and Power Systems. DOI: 10.1007/978-3-319-52617-1.
- 31.Lomas, N. Online gizmos could top 50 billion in 2020 [online] Available at: http://www.businessweek.com/globalbiz/content/jun2009/gb20090629_492027.htm. [Accessed 9 Mar. 2018].
- 32.LaMonica, M. Cisco: Smart grid will eclipse size of Internet. – Interview. [online] Available at: <https://www.cnet.com/news/cisco-smart-grid-will-eclipse-size-of-internet/> [Accessed 9 Mar. 2018].
- 33.The next billion SAP users will be smart meters. [online] Available at: http://dealarchitect.typepad.com/deal_architect/2009/07/the-next-billion-sap-users-will-be-smart-meters.html [Accessed 9 Mar. 2018].
- 34.ABI Research Forecasts 4.5 Billion Global Smart Home Sensor Installations by 2022. [online] Available at: <https://www.abiresearch.com/press/abi-research-forecasts-45-billion-global-smart-hom/> [Accessed 9 Mar. 2018].
- 35.Pike Research, Energy management systems for commercial buildings will garner \$67 billion in investment by 2020 [online]. – Press Release, Nov. 2009.
- 36.Smart grid managed services market to grow 75% year-over-year between 2010 and 2011. – Press Release, Sep. 2010.
- 37.Presentation of the updated Energy Strategy of Ukraine until 2035. [online] Available at: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245214948>.
- 38.Ukrainian energy map. [online] Available at: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/02/125-KARTA-26-01.pdf> [Accessed 9 Mar. 2018].

ANALYSIS OF THE EXISTING ARCHITECTURES AND MODELING METHODS OF THE CYBER-PHYSICAL SYSTEMS FOR SMART GRIDS

S. Korotunov¹, G. Tabunshchyk¹, C. Wolff²

¹Zaporizhzhya National Technical University

²Dortmund University of Applied Sciences and Arts

Abstract. The definition and main characteristics of cyber-physical systems and smart grids are considered by the authors. The cyber-physical system is a "system of systems", where complex and heterogeneous systems interact continuously, and therefore, the general architecture of such a system requires careful design. The main challenges in modeling cyber-physical systems arise due to the heterogeneous nature of the system, the parallelism of different physical processes and sensitivity to time. Abstractions of physical and computational components differ by the physical nature of these components, granularity and the required level of detail. This makes existing approaches to modeling insufficient for the simulation of cyber-physical systems.

A detailed review of the relevance of this subject and the main directions of development in this field was carried out in the paper. A review and analysis of modeling methods for cyber-physical systems with focus on physical and cybernetic subsystems was done by the authors. The research of existing architectures and methods of simulation of cyber-physical systems for smart grids has revealed the presence of a rather

high number of research in the area, but the lack of standardized approaches to architecture and modeling of such systems. All currently available modeling methods and approaches to designing cyber-physical systems are specific to researcher's domains.

In addition, the authors carried out a study on the feasibility of the introduction of a smart grid in the Zaporizhzhya region, considering it as one of the leaders in the energy industry in Ukraine because it has a presence in almost all types of energy sources – namely, nuclear, thermal, hydro, wind and solar. An overview of the prognoses of the world leaders of the area of cyber-physical systems and the main state programs aimed at the development of smart grids was carried out in the work. The importance of introducing a smart grid in the Zaporizhzhya region was proposed and justified by the authors.

Keywords: cyber-physical systems, smart grids, optimization, modeling.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ АРХИТЕКТУР И МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ УМНЫХ ЭНЕРГОСЕТЕЙ

С. Ю. Коротунов¹, Г. В. Табунщик¹, К. Вольфф²

¹Запорожский национальный технический университет

²Дортмундский университет прикладных наук

Аннотация. Авторами рассмотрены определение и основные характеристики киберфизических систем и умных энергосетей. В работе выполнен детальный обзор актуальности данной тематики и основных направлений развития в данной сфере. Авторами осуществлен обзор и анализ методов моделирования киберфизических систем с фокусом на физические и кибернетические подсистемы. В рамках статьи предложено и обоснована актуальность внедрения умной энергосети в Запорожской области.

Ключевые слова: киберфизические системы, умные энергосети, оптимизация, моделирование.

Отримано 13.03.2018



Коротунов Сергій Юрійович – аспірант кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна, E-mail: skorotunov@yahoo.com, тел. + 38-061-769-85-73

Sergiy Korotunov – PhD student of Software Tools Department of Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovsky str., 64, Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, E-mail: skorotunov@yahoo.com, tel. + 38-061-769-85-73

ORCID ID: 0000-0001-5184-4455



Табунщик Галина Володимирівна – к.т.н., доцент, професор Запорізького національного технічного університету, вул. Жуковського, 64, г. Запоріжжя, 69063, Україна, E-mail: galina.tabunshchik@gmail.com, тел. +38-061-769-82-67

Galyna Tabunshchik – PhD, Prof of Software Tool Department of Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovsky str., 64, Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, E-mail: galina.tabunshchik@gmail.com, tel. +38-061-769-82-67

ORCID ID: 000-0003-1429-5180



Карстен Вольфф – доктор, професор Дортмундського університету прикладних наук, вул. Еміль-Фігге, 42, м. Дортмунд, 44227, Німеччина, E-mail: carsten.wolff@fh-dortmund.de

Carsten Wolff, – Prof. Dr. of Computer Science Faculty of Dortmund University of Applied Sciences and Arts, Emil-Figge str., 42, Dortmund, 44227, Germany, E-mail: carsten.wolff@fh-dortmund.de

ORCID ID: 0000-0003-3646-5240