



УДК 004.2

**ADAPTIVE EDUCATIONAL MODELS OF ENERGY SYSTEMS  
АДАПТИВНІ НАВЧАЛЬНІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕНЕРГОСИСТЕМ****Kyryk V. V. / Кирик В.В.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0003-0419-8934

**Kravchenko M. S. / Кравченко М. С.***Master's student / магістрант**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,**Kyiv, Prosp.Peremohy, 37, 03056**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м.Київ, проспект Перемоги, 37, 03056*

**Анотація.** У статті розглядається питання необхідності використання диспетчерських тренажерів для підготовки оперативного персоналу в мережах оператора системи передачі та оператора системи розподілу. Досліджується відмінності між типами навчальних моделей. Проведено аналіз структурної наявності необхідних елементів та їх параметрів в моделі для точного відтворення поведінки реальної мережі ОЕС. Розглянуто питання використання моделі на базі програмного комплексу PowerFactory для експлуатації, управління ОЕС та навчання оперативного персоналу в межах дотримання Кодексу системи передачі.

**Ключові слова:** диспетчерський тренажер, навчальна модель, PowerFactory, навчання оперативного персоналу, моделювання в реальному часі, віртуальний інструктор.

**Вступ.**

Об'єднана енергосистема України, стає дедалі складнішою в експлуатації та управлінні завдяки розширенню ОЕС України з об'єднанням з Європейською енергосистемою ENTSO-E та запровадженню нових децентралізованих джерел генерації. Системному оператору в таких умовах стає все складніше передбачати результати реконфігурації та зміну режиму. Водночас, практичне навчання оперативного персоналу не завжди дозволяє в повній мірі моделювати складні аварійні ситуації в ОЕС України. В цьому плані тренажер може бути потужним інструментом для набуття практичних навичок та досвіду, при умові що він відображає реальні режими та параметри енергосистеми за будь-який період часу. Використання тренажерів як освітніх інструментів на базі програмних комплексів є важливим фактором при підготовці кваліфікованих кадрів, які виконують оперативне або оперативно-технологічне управління та експлуатаційне обслуговування енергоустаткування електростанцій і мереж.

Галузь електроенергетики характеризується балансом вироблення та споживання електроенергії в часі. І той факт, що в кожен момент часу має зберігатись баланс між виробленням та споживанням електричної потужності – створює головну особливість роботи оперативного персоналу (диспетчерів), а також і головну вимогу до тренажерного комплексу для тренувань [1].

Перший диспетчерський тренажер був представлений на виставці PISA у 1977 році [2]. Очевидно, він не задовольняв усіх вимог щодо навчання оперативного персоналу. Недоліки його полягали у невеликій кількості вузлів в моделі, можливостей розрахунку, точності моделювання та графічного



відображення. Після представлення моделі на виставці РІСА велика кількість компаній почали власні розробки. Були представлені розробки ІТ компаній, а також власні продукти електроенергетичних компаній з управління мережею. На сьогоднішній день сформувались як основні вимоги, так і додаткові, які є перевагою того чи іншого програмного комплексу.

Одна з основних складових будь-якого тренажерного комплексу – це наявність моделі енергосистеми. Її складання потребує великої кількості ресурсів, адже необхідно максимально точно відобразити параметри ЛЕП (враховуючи, що можуть бути використанні різні типи опор та провідників), автоматичні системи збудження генераторів, автоматику в енергосистемі.

Варто відзначити, що використання тренажерних комплексів в Україні регулюється на законодавчому рівні. Глава 3 розділу X Кодексу системи передачі (КСП) зазначає вимоги до інтегрованої системи оперативно-диспетчерського управління та систем зв'язку з боку системи управління. Цей пункт також зобов'язує ОСП мати інтегровану автоматизовану систему диспетчерського управління (АСДУ), до якої повинні входити у тому числі комплекс диспетчерського тренажеру. Глава 2 розділу XII КСП описує організацію проведення спеціального навчання. Пункт 2.10 цієї глави зазначає, що навчання працівників проводиться як традиційними методами, так і з використанням сучасних видів навчання включно з технічними засобами навчання (комп'ютерні тренажери та навчально-тренувальні комплекси) [7].

Ступінь деталізації, можливості щодо моделювання та розрахунків можуть значно відрізнятись. Розглянемо якого типу навчальні моделі існують. Передусім, варто розуміти для якої ланки диспетчерського управління призначений тренажер: оператор системи передачі, оператор системи розподілу, електрична частина станції чи оператор залізничної мережі. До прикладу, основні задачі оператора системи розподілу – дотримання параметрів з надійності електропостачання SAIDI та SAIFI, локалізація несправностей у розгалуженій мережі, швидке перемикання для використання резервних схем електропостачання.

Постають питання: які елементи та компоненти мають бути в моделі для найбільш точного відтворення процесу симулювання? Які параметри дозволяється не використовувати з метою економії ресурсів? Відповіді на ці питання має давати електроенергетична компанія, враховуючи свої потреби [5]. Проте існують базові компоненти, які можна знайти на найбільш поширених диспетчерських тренажерах. Особлива увага має приділятися моделям захисту та автоматиці: диференціальні реле, реле направленої захисту, реле максимального струму, захист від відмов автоматичного вимикача, автоматика повторного включення, автоматика ліквідації асинхронного режиму.

Автоматика частотного розвантаження також базовий компонент будь-якого тренажерного комплексу. Частота – невід'ємний параметр при моделюванні перехідних динамічних процесів. Системний оператор у своїх тренуваннях повинен освоїти асинхронний режим роботи енергосистеми з поділом її на 2 та більше частин. Дефіцитні ізольовані зони в першу чергу використовують резерви підтримки, відновлення частоти, а також резерви



заміщення. Однак, при подальшій низькій частоті мають бути використані черги автоматичного частотного розвантаження (АЧР), а також інші заздалегідь сплановані можливості щодо підтримки частоти: графіки аварійних відключень споживачів, спеціальна автоматика відключення навантаження, графіки обмеження споживання електричної енергії, спеціальні графіки аварійних відключень [8].

Важливим моментом тренування є регулювання частоти та потужності – як однієї з основних задач, яка стоїть перед оператором системи передачі. Саме тому в диспетчерському тренажері особливу увагу слід приділити цьому аспекту.

Первинне регулювання здійснюється за допомогою автоматичних регуляторів швидкості турбіни і може задаватись як крутизна статичної частотної характеристики (СЧХ), що показує залежність зміни потужності на одиницю частоти.

Вторинне регулювання – це централізована автоматична функція, яка контролює виробництво електроенергії в зоні регулювання. На процес регулювання частоти в енергосистемі мають вплив і споживачі, адже згідно статичної характеристики навантаження по частоті і напрузі у разі відхилення цих компонентів змінюється і фактичне споживання потужності у споживача. Варто відзначити, що програмний комплекс PowerFactory дає можливість швидкого налаштування первинного та вторинного регулювання, а також СХН кожного споживача. На рис. 1 наведено функціональну структуру побудови системи регулювання частоти та потужності в ОЕС України.



**Рисунок 1 – Функціональна структура побудови системи регулювання частоти та потужності в ОЕС України**

Джерело: [7]

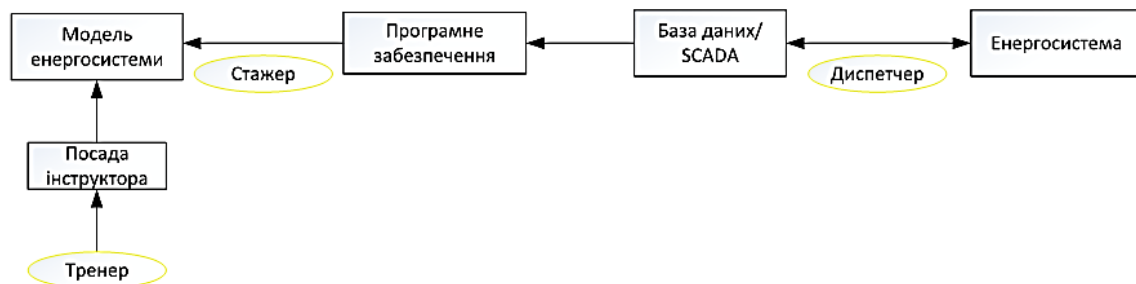
Для підвищення кваліфікації оперативного персоналу необхідно проводити



навчання, використовуючи тренажер з моделлю реальної ОЕС. Одним з важливих моментів є проведення моделювання в режимі реального часу з використанням регуляторів частоти, релейного захисту та автоматики. Але в той же час, створення такого тренажеру (моделі) потребує великої кількості ресурсів, та, відповідно, фінансів [3]. Саме тому пропонується універсальне рішення щодо використання вже наявної моделі ОЕС, яку енергетичні компанії використовують для внутрішніх розрахунків статичної та динамічної стійкості, електричних режимів  $n-1$ , релейного захисту та автоматики.

На основі проведених досліджень розроблено оригінальний графічний інтерфейс базової моделі ОЕС, який відповідає поточній мнемосхемі системного оператора. Тобто, процес розрахунку та моделювання на фактично відбувається на наявній моделі, а відображення результатів виводиться на звичній для диспетчерського персоналу мнемосхемі. Важливо, що програмний комплекс PowerFactory дозволяє прив'язку телеметрії та виконання функції з оцінки стану.

Структура взаємодії інструктора, стажера та моделі енергосистеми із прив'язкою бази даних графічно відображено на рис. 2.



**Рисунок 2 – Структура взаємодії**

*Авторська розробка*

Розроблена модель для енергетичної компанії дозволяє не тільки скоротити витрати на розробку та закупівлі диспетчерського тренажеру, а також значно спрощує пошук відповідних інструкторів для експлуатації цього тренажеру. В такому випадку кожен структурний підрозділ (до прикладу, релейного захисту та автоматики) візьме на себе частину задачі, пов'язану з підготовкою моделі до тренування саме в аспекті своєї компетенції.

### **Висновки**

Досліджено, що навчання диспетчерського персоналу неминуче навіть на нижчих рівнях ієрархії управління енергосистемою, враховуючи швидку інтеграцію мікромереж та відновлювальних джерел енергії. Для операторів систем розподілу, а також системного диспетчера, використання розробленого графічного інтерфейсу тренажерної моделі ОЕС з моделюванням аварійних ситуацій в режимі реального часу є необхідним інструментом для підвищення кваліфікації, набуття явних та неявних знань. Програмний комплекс дозволить створити універсальну модель, яка може бути використана не тільки для диспетчерського тренажеру, а також для проведення розрахунків електричних режимів, статичної та динамічної стійкості, релейного захисту та автоматики. Такий підхід дозволяє значно зменшити фінансові капіталовкладення до



розробки та створення центру підготовки оперативного персоналу.

### Перелік посилань

1. K. Máslo, M. Kolcun, “Simulation Engine for Dispatcher Training and Engineering Network Simulators”, IFAC, 2016, pp. 195-200
2. Pan Zhelong, Sun Hongbin, Wu Wenchuan, Zhang Boming, “New approach to customize secondary device models in a dispatcher training simulator (DTS)”. Electrical Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, 2002, pp. 616-620.
3. R. Podmore, Fellow, IEEE, M. Robinson, M. Sadinsky and R. Sease. Virtual Instructor for Simulator Training. 2008. Pp. 1-7
4. Y. Bao, Z. Li, D. Wen, C. Guo, L. Zhang, S. Pang. Development and design of dispatcher training simulation evaluation system based on IDAC, Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 15-18 Nov. 2015, 7380937.
5. K. Keerthivasan, K. Geetha, V. Sharmila Deve. Modelling and simulation of a variable step size algorithm for a power simulator, International Review on Modelling and Simulations, Vol. 7, Issue 1, 2014, pp. 185-195.
6. Veloza O P, Santamariab F. Analysis of major blackouts from 2003 to 2015: classification of incidents and review of main causes. The Electricity Journal, 2016, 29: 42–49.
7. Кодекс системи передачі. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#n1538>
8. J.G. Waight, K. Nodehi, M. Rafian, H. Van Meeteren, “An Advanced Transportable Operator Training Simulator” Empros Systems International, pp. 278-284.

**Abstract.** *The article examines the need to use dispatching simulators for the training of operational personnel in the networks of the transmission system operator and the distribution system operator. Differences between types of educational models are studied. An analysis of the structural presence of the necessary elements and their parameters in the model was carried out to accurately reproduce the behavior of the real UES network. The question of using a model based on the PowerFactory software complex for operation, management of the UES and training of operational personnel within the limits of compliance with the Transmission System Code was considered.*

**Keywords:** *dispatcher training simulator, training model, PowerFactory, operational personnel training, real-time simulation, virtual instructor.*

Науковий керівник: д.т.н., проф. Кирик В.В.

Стаття відправлена: 08.11.2023 г.

© Кравченко М. С.