
ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ

doi:<https://doi.org/10.15407/emodel.41.02.063>

УДК 621.3.51

Ю.Г. Куцан, д-р техн. наук, **В.О. Гурєєв**, канд. техн. наук,
Є.М. Лисенко, аспірант, **О.В. Аветісян**

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України,
(Україна, 03164, Київ, вул. Генерала Наумова, 15,
тел. +380444249160, e-mail: viktor.gurieiev@ipme.com.ua)

Кіберзагрози в електроенергетичних системах України

Дано аналіз функціональної структури електроенергетичних систем (ЕЕС) і енергетичних об'єднань з метою виявлення найвірогідніших місць несанкціонованого впливу кіберзагроз на роботу об'єктів критичної інфраструктури. При цьому необхідно враховувати режими роботи дуже складних ієрархічних систем керування об'єктами ЕЕС і Об'єднаної електроенергетичної системи, яка складається з великої кількості часто не пов'язаних між собою автоматичних (без участі людини) і автоматизованих (за участю людини в ухваленні рішень) систем керування вузлами генерації (атомних, теплових, сонячних, вітрових і гідроелектростанцій), електромереж передачі (транспортування) і споживання електроенергії. Запропоновано модель автоматизованої системи виявлення кіберзагроз для розробки оперативних превентивних методів, спрямованих на виявлення і запобігання умов виникнення кіберзагроз в енергетиці.

К л ю ч о в і с л о в а: кіберзагрози, режими енергосистем, моделювання режимів, моделі енергосистем, електронне навчання, сценарії протикіберзагрозних тренувань.

Проблемі кіберзагроз в енергетиці на даний час у всьому світі приділяється велика увага [1—5]. Проектні рішення, недостатньо пропрацьовані та обґрунтовані, залишають неабиякі можливості для кіберзлочинців. Тому дослідження і розробка нових моделей і методів, спрямованих на підвищення рівня кіберзахисту і кібербезпеки діючих і планованих до впровадження в енергетиці інформаційних технологій і систем контролю і управління, є дуже актуальними. На даному етапі виникає необхідність підвищення рівня автоматизації енергетичного виробництва з урахуванням можливих наслідків, використання нових інтелектуальних інформаційних технологій типу Smart Grid (інтелектуальні мережі), IoT (інтернет речей), Industry 4.0 (четверте покоління автоматизації) та ін.

© Куцан Ю.Г., Гурєєв В.О., Лисенко Є.М., Аветісян О.В., 2019

Надійна робота електроенергетичних систем (ЕЕС) забезпечується персоналом диспетчерських систем і засобами релейного захисту і автоматики (РЗА). До складу ДС обов'язково входять територіально розподілені системи управління і збору інформації, так звані SCADA (System Control and Data Acquisition), які забезпечують диспетчерів надійною і актуальною інформацією про режим роботи об'єктів ЕЕС в реальному часі для прийняття ефективних рішень. Коли у разі використання спотвореної кібератаками інформації диспетчер віддає помилкові команди, РЗА забезпечують стабільну роботу енергетичного обладнання. У надзвичайних режимах роботи, які можуть стати причиною аварії, устаткування повинно швидко відключатися. На жаль, сучасний рівень автоматизації підстанцій і електричних мереж не дозволяє прогнозувати виникнення катастрофічних каскадних аварій в ЕЕС, які спричиняють великі збитки.

Реалізація можливостей управління режимами, у свою чергу, нерозривно пов'язана з процесами послідовного отримання оперативним персоналом центральних диспетчерських центрів (підприємств) достовірних вимірюваних або розрахункових даних про параметри режиму роботи електропостачальних компаній та ЕЕС і завжди базується на різних інформаційних моделях елементів або окремих частин ЕЕС.

На даний час спостерігається нестримний розвиток системи глобальної світової електроенергетики, утвореної злиттям національних ЕЕС і ОЕЕС. Прикладом створення єдиного європейського електроенергетичного об'єднання є ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity), до якого включено ЕС Франції, Іспанії, Португалії, Німеччини, Австрії, Італії, Бельгії, Голландії, Західної Данії, Швейцарії, Люксембурга, Словенії, Хорватії, Польщі, Чехії, Словаччини, Угорщини, Греції, Боснії і Герцеговини, Македонії, Сербії і Чорногорії, Албанії, Болгарії, Румунії, а також Великобританії і Ірландії, пов'язані між собою і з континентальною частиною підводними кабельними лініями постійного струму, що по суті являє собою ОЕЕС Європи. У квітні 2011 р. Україна стала членом європейської Енергетичної Спільноти із затвердженням жорсткого графіку імплементації відповідних директив ЄС, в тому числі і у сфері організації національного електроенергетичного сектора [6].

Слід зазначити, що у будь-якій країні процеси отримання, розподілу і споживання електричної енергії структурно подібні і реалізуються зазвичай за допомогою автономно або паралельно працюючих ЕЕС. Забезпечення паралельної роботи ЕЕС збільшує надійність енергопостачання споживачів, проте ускладнює систему управління ОЕЕС в цілому. Тому головна мета формування глобальної електроенергетики — це надійне (без перерви в часі) і економічно ефективно забезпечення споживачів якісною електроенергією в необхідних об'ємах за доступною ціною.

Системи управління електроенергетикою різних країн зазвичай побудовані на основі різноманітних інформаційних моделей (ІМ) елементів ОЕЕС. Просту ІМ функціонування енергетики в реальному часі може бути надано у вигляді двох взаємопов'язаних систем: розсередженого на великій території країни складного енергетичного устаткування і висококваліфікованого персоналу, який ним управляє (рис. 1). Таке уявлення про роботу сучасної енергетики дозволяє чітко сформулювати потрібний перелік найбільш актуальних проблем ефективної експлуатації відповідного обладнання, обсяги та конкретні вимоги до сучасної системи управ-

ління режимами роботи з урахуванням світового досвіду протидії кіберзагрозам. Проте така модель, на жаль, не може бути безпосередньо використана для цілей управління, моделювання і прогнозування різноманітних режимів, а також для вирішення великої кількості проектних і експлуатаційних електроенергетичних завдань в процесі функціонування електропостачальних компаній, ЕЕС і ОЕЕС.

Питанням аналізу і моделювання режимів роботи ЕЕС присвячено багато публікацій [7—11], проте системному аналізу умов функціонування ОЕЕС України з точки зору кібербезпеки і перспективою інтеграції в ENTSO-E не приділено достатньої уваги.

Процес вирішення будь-якої електроенергетичної задачі з використанням засобів обчислювальної техніки зазвичай пов'язаний з розробкою зручного інтерфейсу, що забезпечує можливість багатоваріантних розрахунків, а також простої для користувача системи підготовки і зберігання початкових даних з метою подальшого аналізу результатів і ухвалення відповідних рішень. Для цього широко використовується проста в експлуатації файлова система операційних систем, структура якої формується залежно від вимог вирішуваної задачі. Самий трудомістський етап — підготовка і формування структури початкових даних, які зазвичай мають рідко змінювану початкову форму. Будь-яка зміна в постановці завдання або допущеннях майже завжди призводить до необхідності зміни струк-



Рис. 1. Проста інформаційна модель ОЕЕС

тури файлів, які містять початкові дані. Це, у свою чергу, зумовлює необхідність переписування кодів програм.

Такий підхід утруднює можливість широкої інтеграції різних програмних комплексів, а також безпосереднього використання результатів аналізу, отриманих в процесі рішення споріднених груп електроенергетичних завдань. Для цього на практиці використовують так звані програмні шлюзи, файлообмінники, електронні поштові скриньки та ін. Часто доводиться забезпечувати синхронізацію даних в різних файлових системах, що спричиняє численні виправлення та помилки в кодах програм і структурах початкових даних і зумовлює невиправдане збільшення витрат часу програмістів. Як приклад можна привести програмні комплекси для розрахунку режимів роботи енергосистем і струмів коротких замикань, у яких використовуються майже однакові схеми заміщення елементів ЕЕС (повітряні лінії (ПЛ), підстанції та ін.) однієї і тієї ж енергосистеми.

Практично одну і ту ж інформацію з незначними відмінностями доводиться зберігати в різних місцях декілька разів, забезпечувати її надійне зберігання і обов'язкову архівацію, а також вести облік усіх змін в цих комплексах в процесі модернізації яких-небудь частин. Крім того, обмін інформацією між цими комплексами в процесі рішення вказаних завдань завжди дуже ускладнений. Саме тому практично усі інженерні проекти за визначенням повного життєвого циклу енергетичного устаткування, які реалізовано в передових країнах світу, базовано на застосуванні однакових інструментальних засобів, а саме географічних інформаційних систем (ГІС), об'єднаних в ГІС-технології. Вони застосовуються на усіх етапах проведення науково-дослідних робіт, проектування і виготовлення устаткування, подальшого монтажу і пуско-налагоджувальних робіт. Ці ж засоби також використовуються в процесі експлуатації устаткування і його демонтажу після закінчення запланованого терміну служби.

Такий підхід дозволяє значно скоротити загальні витрати на впровадження нового устаткування і спростити процедуру його інтеграції в працюючі ЕЕС, полегшити процеси введення (або виведення) устаткування в планові ремонти, знижуючи таким чином експлуатаційну складову витрат на виробництво і передачу електроенергії споживачам. У ГІС-технології використовуються сучасні системи управління базами даних (СУБД), серед яких важливе місце займають ORACLE, PostgreSQL і MySQL. Системи управління базами даних ORACLE і PostgreSQL використовують зазвичай для реалізації масштабних проєктів, а MySQL — для порівняно невеликих за об'ємом локальних проєктів. При розробці структур зберігання початкових даних у вигляді різних моделей елементів ЕЕС використовують концептуальні, зовнішні та внутрішні схеми БД [12].

Системи управління ЕЕС і ОЕЕС розсереджені на великій території і включають велику кількість складного устаткування для генерації електричної енергії (атомні, теплові, гідравлічні станції та ін.), відкриті розподільні пристрої (ВРП), підстанції і лінії електропередачі різних класів напруги. Експлуатацію всього устаткування здійснює кваліфікований персонал як невід’ємна складова частина різних систем управління на рівнях існуючої ієрархічної системи управління енергетикою. Використовуючи підхід, вживаний в технологіях розробки ІМ різних предметних областей (наприклад, CASE-технологія), предметну область енергетики будь-якої країни можна подати у вигляді різних сутностей (описів), об’єднаних певними технологічними зв’язками і стосунками, що адекватно відображають режими її функціонування. Інформаційна структура сутностей у БД подається у вигляді таблиць, які мають стовпці і рядки. Кожна сутність відбиває певні властивості енергетики в цілому як технології.

Розглянемо найбільш важливі сутності предметної області енергетики на простих прикладах.

1. Перша сутність відбиває факт приналежності енергетики якій-небудь країні — Україні, Росії, Білорусі, Польщі та ін. Цю сутність можна назвати ENERGY (енергетика). Вона дозволяє у разі потреби легко досліджувати та аналізувати важливі загальні показники результатів моделювання умов автономних або паралельних режимів роботи ОЕЕС і ЕЕС сусідніх країн без внесення змін до таблиць вже існуючих БД. Ця сутність також уможливує визначення балансів енергії (вироблення, споживання, сальдо та ін.) в реальному часі, дає змогу використовувати географічні карти з розміщенням на них електроенергетичним устаткуванням, діаграми, параметри режиму (напруга, перетікання потужностей, частота та ін.) на тлі географічних, технологічних і електричних схем, опис особливостей діючого енергетичного устаткування, параметри режимів роботи та ін. Зазвичай різні варіанти сутності ENERGY використовуються на самих верхніх рівнях ієрархічної системи управління енергетикою для ухвалення ефективних управлінських рішень.

2. Друга сутність — це розподілена багаторівнева ієрархічна система управління Control System (CS) енергетикою країни. Вона відбиває факт існування (наприклад, в Україні) розподіленої ієрархічної системи управління, вершиною якої є Кабінет Міністрів і Міненерговугілля України. Наступні ієрархічні рівні системи управління включають системи управління корпоративними правами підприємств, системи управління відновлювальними джерелами енергії, АЕС, ТЕС, ГАЕС і ГЕС, а також магістральними мережами ОЕЕС України та енергопостачальними підприємствами. Ця сутність може посилатися на сутності систем управління

(TYPE_OF_CS), які використовують в практиці управління світової енергетики, а також на сутність ENERGY, враховуючи, таким чином, належність CS до певної групи систем управління, яка застосовується в конкретній країні. Дана сутність використовується для аналізу ефективності функціонування різних варіантів систем управління. Її головна особливість — ієрархічна структура.

3. Третя сутність — це сукупність усього енергетичного устаткування (EQUIPMENT), яке утворює енергетичну галузь країни. Ця сутність містить опис типів устаткування і включає повний перелік ПЛ, підстанцій, атомних, теплових, гідравлічних, гідроакумуючих та геліо- і вітроелектростанцій України.

4. Четверта сутність — це устаткування ліній електропередачі (EQU_OF_LINES). Ця сутність містить інформацію про реальний склад устаткування усіх ліній електропередачі (найменування, довжина, розташування і матеріал дроту, кількість і тип опор, найменування прилеглих підстанцій та ін.), що об'єднують підстанції, включаючи ВРП електростанцій різних класів напруги. До устаткування ПЛ зазвичай відносять також траверси, ізолятори, арматуру, опори, блискавкозахисні троси, розрядники, заземлення, пристрої, що секціонують системи шин підстанцій, волоконно-оптичні лінії зв'язку (у вигляді окремих самонесучих або вбудованих кабелів), а також допоміжне устаткування (апаратура високо-частотного зв'язку, ємнісного відбору потужності та ін.). Ця сутність може посилатися на сутності ENERGY і CS, а також на різні довідники типів елементів устаткування ліній електропередачі (марка дроту, клас напруги та ін.).

5. П'ята сутність подібна до EQU_OF_LINES і описує повний перелік устаткування підстанцій (EQU_OF_SUB). Ця сутність включає найменування підстанції, клас напруги, диспетчерські найменування устаткування та ін. Може посилатися на сутності TRANSFORMER (трансформатори), SWITCHES (вимикачі), STATION_BUS (шини підстанцій) та ін. Також можливі посилання на довідники по різним типам устаткування підстанцій, до якого зазвичай належать наступні елементи:

силові трансформатори і автотрансформатори, ввідні конструкції для ПЛ і кабельних ліній електропередачі;

ВРП і закриті розподільні пристрої, включаючи системи і секції шин, силові вимикачі і роз'єднувачі;

вимірювальне устаткування (вимірювальні трансформатори струму і напруги, вимірювальні прилади);

струмообмежувальні, регулюючі пристрої (конденсаторні батареї, реактори, фазообертачі та ін.).

Система живлення власних потреб підстанції:
трансформатори власних потреб, щити змінного струму;
акумуляторні батареї, щити постійного (оперативного) струму, дизельні генератори та інші аварійні джерела енергії (на великих і особливо важливих підстанціях);

системи захисту і автоматики, допоміжні системи та ін.

6. Шоста сутність містить опис устаткування теплових електростанцій EQU_POWER_STATION. Ця сутність може посилатися на сутності GENERATORS (генератори), TURBINES (турбіни), BOILERS (котли та ін.).

Наступні сутності — це устаткування атомних (EQU_ATOMIC_POWER_STATION), гідравлічних (EQU_HYDRO_POWER_STATION) і вітрових (EQU_WIND_POWER_STATION) електростанцій. Загальним для цих сутностей є те, що вони обов'язково посилаються на сутності ENERGY і CS, можуть посилатися на сутності GENERATORS, TURBINES та інші, а також на різні довідники типів елементів устаткування електростанцій.

Сутність енергопостачальних організацій (OBLENERGO), які входять до складу ЕЕС, описується своїм найменуванням, приналежністю до ЕЕС, схемами підстанцій, балансами та ін.

Розроблена концептуальна схема дозволяє легко додавати і корегувати сформовані набори сутностей в процесі функціонування ОЕЕС. Перелічені вище сутності покладені в основу інформаційної частини моделі електроенергетики України для створення віртуального середовища автоматизованої системи виявлення кіберзагроз (АСВК) для ОЕЕС України.

Для моделювання режимів роботи ЕЕС зазвичай у світі широко використовуються сутності вузлів і гілок. У цих сутностях обов'язково має бути наведено відомості про їх належність до ЕЕС, підстанцій енергетики цієї країни. Це забезпечує однозначну ідентифікацію будь-яких елементів ЕЕС, які використовуються у розрахунках, а також незалежність процесів моделювання режимів роботи ЕЕС і ОЕЕС конкретної країни від структури початкової інформації, що формується у БД. Фрагмент концептуальної схеми інформаційної частини моделі електроенергетики України наведено на рис. 2.

Концептуальна схема дає можливість здійснити найповніший опис предметної області енергетики будь-якої країни в цілому або їх об'єднань. До неї включено весь набір сутностей і зв'язків електроенергетичного устаткування, призначеного для виробництва і розподілу енергії, а також сутності і зв'язки, що відбивають характеристики і рівень кваліфікації експлуатаційного персоналу, об'єднаного в ієрархічні системи управління режимами роботи устаткування. Міра деталізації концептуальної схеми

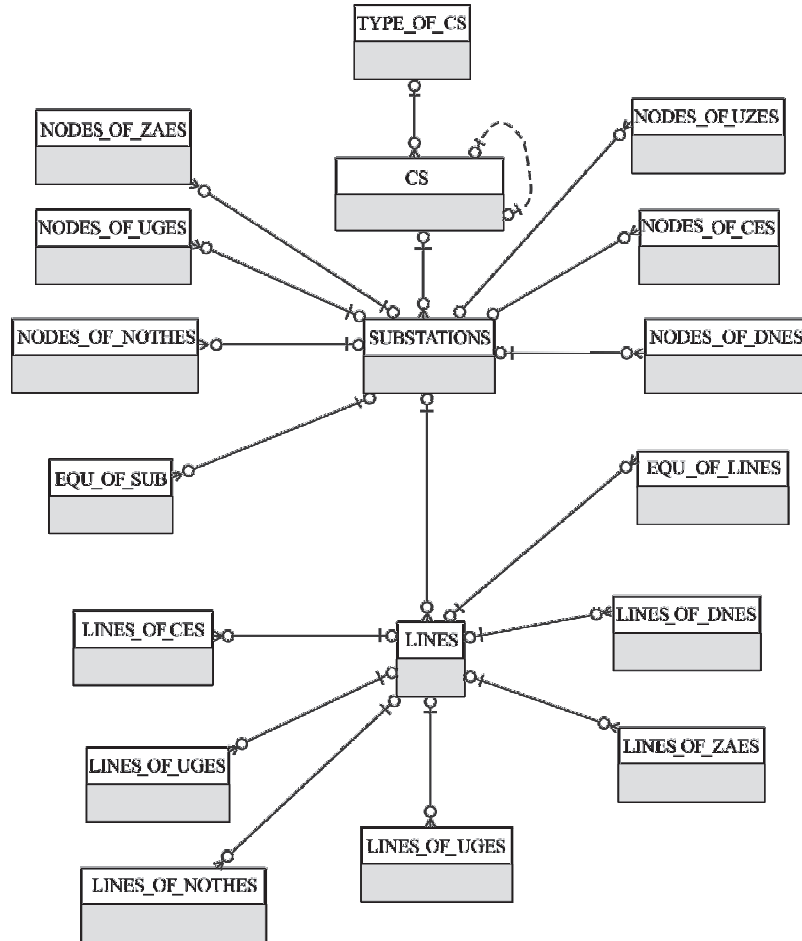


Рис. 2. Фрагмент концептуальної схеми БД ОЕЕС України: NODES_OF_ZAES — вузли Західної ЕЕС; NODES_OF_UZES — інформація про вузли Південно-Західної ЕЕС; NODES_OF_UGES — вузли Південної ЕЕС; NODES_OF_NOTHES — вузли Північної ЕЕС; NODES_OF_DNES — вузли Дніпровської ЕЕС; NODES_OF_CES — вузли Центральної ЕЕС; TYPE_OF_CS — сутність типів систем управління; CS — сутність систем управління; SUBSTATIONS — сутність підстанцій ОЕЕС; LINES — сутність ліній електропередач ОЕЕС; EQU_OF_SUB — сутність обладнання підстанцій ОЕЕС; EQU_OF_LINES — сутність обладнання ліній електропередач ОЕЕС

залежить від цілей певної групи конкретних електроенергетичних завдань. У будь-якому випадку концептуальна модель енергетики повинна будуватися на ітераційній основі з можливістю подальшого доповнення і модифікації.

Можливий набір сутностей для енергетики України наведено в таблиці. Принцип формування складу сутностей визначається належністю

різного енергетичного устаткування і персоналу до процесів виробництва і розподілу енергії. При такому підході до устаткування можна віднести все те, що належить електростанціям, ПЛ, підстанціям, включаючи ВРП електростанцій і багато іншого, а до персоналу — об'єднані в ієрархічну систему управління різні експлуатаційні підприємства і підрозділи.

Метою даного дослідження є аналіз можливих напрямів несанкціонованих кібернетичних впливів (атак) на енергетичні об'єкти ОЕС України за допомогою АСВК. Запропонована АСВК призначена для використання експертами різних рівнів ієрархічної системи управління ОЕС України в реальному часі як порадики для прийняття оперативних рішень. Її реалізовано з урахуванням особливостей розподіленого середовища моделювання режимів роботи енергосистем. До складу АСВК включено набори серверів додатків з вбудованими модулями (контролерами) аналізу наявності кібернетичних втручань, розподілені БД з уніфікованими адаптивними людино-машинними інтерфейсами і розподільні тренажерні системи підготовки персоналу за тематикою захисту від кіберзагроз об'єктів енергетики [13].

Важливою функцією АСВК є допомога при розробці методів структуризації подання інформації та існуючих знань про предметну область технології оперативних перемикачів в електричних мережах і ефективного застосування цих знань для формування навичок, які відповідають ключовим компетентностям оперативно-диспетчерського персоналу в області кіберзахисту. Це також стосується питань технології оперативних перемикачів в аварійних режимах електричних мереж і питань безпечної роботи з електроустановками.

АСВК побудовано на основі реляційної моделі структуризації оперативної інформації про параметри режимів і об'єкти ЕЕС у вигляді віртуальних реляційних таблиць в локальних або віддалених БД. В якості початкової інформації для роботи АСВК використовується достовірна і адекватна інформація про поточні режими роботи ЕЕС і (або) енергетичних об'єднань, яка формується в локальній SCADA ОЕЕС України і періодично (з дискретністю приблизно три хвилини) передається на сервер АСВК у вигляді так званих зрізів параметрів режиму і стану комутаційного обладнання для певних моментів часу після оцінки ситуації. Режим роботи ЕЕС для будь-якого моменту часу описується системою рівнянь

$$[\dot{S}_s(t)] = ([\dot{Y}_{ss}] [\dot{U}_s(t)]), [\hat{U}_s(t)], \quad (1)$$

де $\dot{S}_s(t)$ — вектор заданих (відомих) потужностей вузлів; s — кількість вузлів електричної мережі; \dot{Y}_{ss} — комплексна матриця вузлової провідності

Сутності предметної області енергетики

Найменування	Короткий опис
BALANS_ENERGY_COUNTRY	Баланси потужності підприємств енергетики України
EMPLOYEES_COUNTRY_CS CS	Система управління (СУ) персоналом устаткуванням
DEPARTMENT_CS	Підрозділи СУ
DIAGRAMS	Сукупність електричних схем
DISP_CONTROL_PANEL_DIAGRAM	Сукупність диспетчерських щитів
EMPLOYEES_CS	Персонал СУ
ENERGY	Енергетика країни
EQU_OF_LINES	Устаткування ПЛ
EQU_OF_SUB	Устаткування підстанцій
EQU_OF_SUB_SWITCH	Вимикачі
EQU_OF_SUB_SWITCH_DEV	Регулятори напруги
NAME_OF_SUB	Перелік підстанцій
EQU_TYPE_COMMON	Типи устаткування
JOB_HISTORY_CS	Персональні дані
JOBS_CS	Система посад персоналу
LOCATION_CS	Розташування (адреса) підрозділів
MODEL_EQU_SUB	Моделі устаткування підстанцій
MODEL_EQU_SUB_TRANSF	Моделі трансформаторів
LINES_OF_DNES	Початкові дані про гілки Дніпровської ЕЕС
LINES_OF_NOTHES	Північної ЕЕС
LINES_OF_UGES	Південної ЕЕС
LINES_OF_UZES	Південно-Західної ЕЕС
LINES_OF_ZAES	Західної ЕЕС
LINES_OF_CES	про вузли Центральної ЕЕС
NODES_OF_DNES	Дніпровської ЕЕС
NODES_OF_NOTHES	Північної ЕЕС
NODES_OF_UGES	Південної ЕЕС
NODES_OF_UZES	Південно-Західної ЕЕС
NODES_OF_ZAES	Західної ЕЕС
LINES_OF_CES	Центральної ЕЕС
SCADA_DIAGRAM	Відеограми (SCADA)
REGION_ES	Розташування ЕЕС
SUBSTATIONS	Підстанції
TC	Система телесигналів
TI	Система телевимірювань
TYPE_OF_CS	Типи СУ
LINES	Параметри і характеристики ПЛ

електричної мережі; $\dot{U}_s(t)$ — вектор-стовпець комплексної напруги вузлів; $\hat{U}_s(t)$ — спряжений вектор-стовпець напруги вузлів.

Рівняння (1) розв’язуються з використанням різних варіантів методу Ньютона або Гауса, рідше використовуються ітераційні методи визначення контурних струмів. Основна вимога до цих методів — забезпечити максимально швидкий (комфортний) час отримання результатів моделювання для виявлення кіберзагроз. Тому в даному випадку використано дуже швидкий багатоопорний метод розрахунку контурних струмів [12]. Основна ідея методу полягає в ітераційній процедурі еквівалентної заміни замкненої електричної мережі на розімкнену, режим якої повністю співпадає з режимом початкової електричної системи. Реалізація контурної розрахункової моделі для розрахунку режимів електричної мережі передбачає автоматичне виділення в розрахунковій схемі мережі дерев і хорд для формування окремих нелінійних систем рівнянь (1).

В результаті постійних перемикань і збурень в електричних мережах виникають тривалі слабо згасаючі коливання активної і реактивної потужності по лініях електропередач, які можуть порушити стійкість синхронних генераторів, об’єднаних електричною системою. Найточніше відображення електромагнітних процесів в ідеалізованих синхронних машинах, підключених до електричних мереж, дають повні рівняння Парка—Горева [14—16] в координатах d — q :

$$\frac{d\psi_d}{dt} = -\omega_s(u_d + r i_d + (1+s)\psi_q), \quad \frac{d\psi_q}{dt} = -\omega_s(u_q + r i_q + (1+s)\psi_d), \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_r}{dt} = \frac{1}{T_r}(E_r - E_q), \quad \frac{d\psi_{rdi}}{dt} = -\frac{1}{T_{rdi}}E_{rqi}, \quad \frac{d\psi_{rqk}}{dt} = \frac{1}{T_{rqk}}E_{rdk}, \quad (3)$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_j}(M_T - M_E), \quad \frac{d\delta}{dt} = \omega_s(s - s_v), \quad (4)$$

$$x_s i_q + \frac{r_s i_d}{1+s} = -\frac{1}{1+s} u_d + E_{\delta d}, \quad x_s i_d - \frac{r_s i_q}{1+s} = -\frac{1}{1+s} u_q - E_{\delta q}, \quad (5)$$

$$\psi_d = x_s i_d + E_{\delta q}, \quad \psi_q = x_s i_q - E_{\delta d}, \quad \psi_r = \frac{x_{ad}}{x_r} E_{\delta q} + \frac{x_{sr}}{x_r} E_q, \quad (6)$$

$$\psi_{rdi} = \frac{x_{ad}}{x_{rdi}} E_{\delta q} + \frac{x_{srdi}}{x_{rdi}} E_{rqi}, \quad i=0, \dots, n_d, \quad (7)$$

$$\psi_{rdi} = \frac{x_{ad}}{x_{rdi}} E_{\delta q} + \frac{x_{srdi}}{x_{rdi}} E_{rqi}, \quad k=0, \dots, n_q,$$

$$E_{\delta q} = x_{ad} i_d + E_q + \sum_{i=1}^{n_d} E_{rqi}, \quad E_{\delta d} = -x_{aq} i_q - \sum_{k=1}^{n_q} E_{rdk}. \quad (8)$$

Формули (2)—(8) відповідають схемі заміщення, зображеній на рис. 3. Проте розв’язування системи диференціальних рівнянь пов’язане з великими обчислювальними витратами, оскільки вимагає розрахунку з малим кроком, який визначається періодичною складовою струму ротора і аперіодичною складовою струму статора. Взаємодії вказаних вільних складових струмів, які виникають при трифазних коротких замиканнях, викликають додатковий гальмівний момент, що помітно впливає на рух ротора при короткому замиканні поблизу виводів генератора. Інша складність, яка іноді здається непереборною, — необхідність обліку електромагнітних процесів в електричній мережі.

Рівняння ланцюгів ротора залежать від кількості контурів ротора, що розглядаються в явному вигляді. При обліку двох демпферних контурів диференціальні рівняння перехідних процесів машини, записані на основі огинаючих періодичних складових струмів статора, мають вигляд

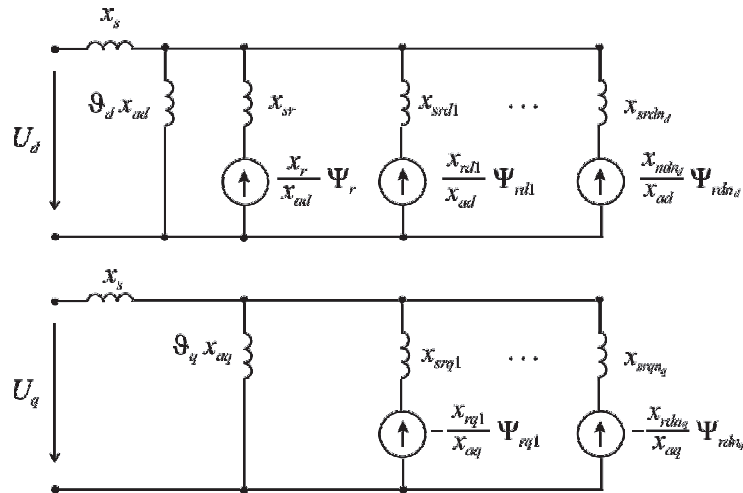
$$\frac{d\psi_r}{dt} = \frac{1}{T_r}(E_r - E_q), \quad \frac{d\psi_{rdi}}{dt} = -\frac{1}{T_{rdi}}E_{rqi}, \quad \frac{d\psi_{rqk}}{dt} = \frac{1}{T_{rqk}}E_{rdk},$$

де $\psi_r, \psi_{rdi}, \psi_{rqk}$ — потокозчеплення обмотки збудження, подовжнього і поперечного демпферних контурів ,

$$\psi_r = \frac{x_{ad}}{x_r} E_{\delta q} + \frac{x_{sr}}{x_r} E_q, \quad \psi_{rd1} = \frac{x_{ad}}{x_{rdi}} E_{\delta q} + \frac{x_{srdi}}{x_{rdi}} E_{rq1}, \quad \psi_{rq1} = -\frac{x_{aq}}{x_{rqk}} E_{\delta q} - \frac{x_{srqk}}{x_{rqk}} E_{rd1};$$

T_r, T_{rd1}, T_{rq1} — постійні часу відповідно обмотки збудження, подовжнього і поперечного демпферних контурів при розімкнених обмотках статора і збудження; E_q, E_{rd1}, E_{rq1} — енергорушійні сили, індуковані в статорі магнітним полем струмів відповідних контурів; E_r — напруга, прикладена до обмотки збудження; x_d, x_q — синхронні реактивні опори по подовжній і поперечній осях; x'_d — перехідний реактивний опір по подовжній осі (для машини з демпферними контурами відповідають їх розімкненому стану); x_{ad}, x_{aq} — реактивність реакції якоря по подовжній та поперечній осях; x_s — реактивний опір розсіювання статора; x_r — реактивний опір обмотки збудження; x_{rd1}, x_{rq1} — реактивні опори демпферних обмоток по повздовжній і поперечній осях.

Порівнюючи результати випробувань потужних турбогенераторів і розрахунків по класичній моделі, яка має по одному демпферному кон-

Рис. 3. Схема заміщення синхронного генератора в осях d і q

туру в кожній осі, бачимо недостатність останнього при аналізі тривалих перехідних процесів, особливо відносно моделювання масиву ротора машини в поперечній осі. Середньоквадратична похибка в апроксимації частотної характеристики при описі масиву ротора одним контуром по подовжній осі і одним по поперечній може досягати 15—25%. Водночас, з погрішністю не більше, ніж помилка вимірів ($\sigma = 2\text{—}3\%$), експериментальні частотні характеристики можуть апроксимуватися при обліку ротора двома еквівалентними контурами по кожній осі, тобто в подовжній осі — обмотка збудження і один демпферний контур, а в поперечній осі — два демпферні контури. Така модель з трьома демпферними контурами широко застосовується за кордоном.

Для прискорення розв'язку систем нелінійних рівнянь зазвичай використовується оперативна або локальна пам'ять. Проте для моделювання режимів роботи великих енергосистем доводиться використовувати тільки розподілені системи управління БД. Це може збільшити час реакції моделюючої АСВК і підсистеми відображення результатів моделювання, але не дуже критично для отримання достовірних результатів за комфортний час (від одної до трьох секунд).

Різноманітні сценарії оперативних перемикачів легко структуруються у вигляді формальної системи логічних правил певних дій типу «виконати», «відключити», «оглянути» та інших на реальному або уявному устаткуванні. Фіксовано місце таких дій: позначено номер комірки, панелі тощо. Це дозволяє створити базу знань оперативних перемикачів в елект-

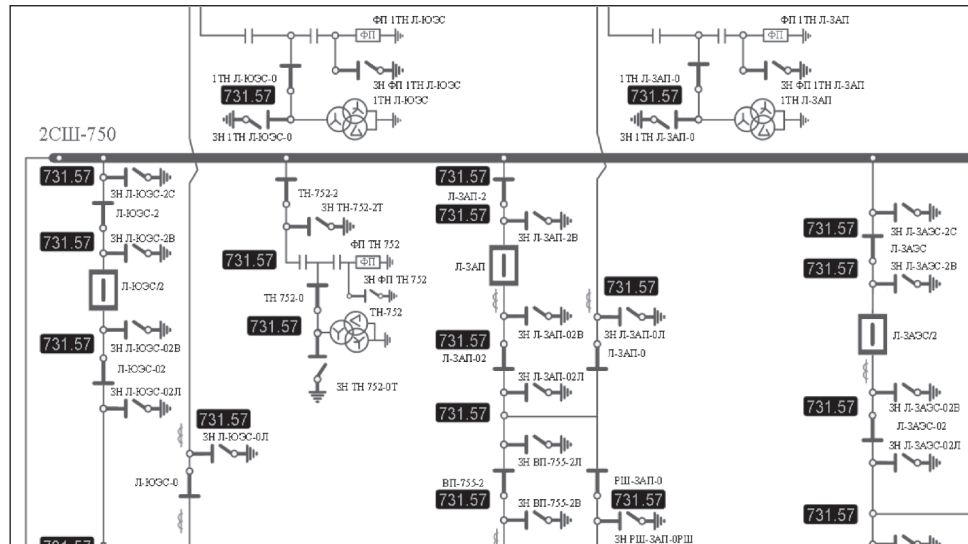


Рис. 4. Параметри режиму та стан обладнання принципової схеми підстанції 750 кВ

ричних мережах у вигляді системи логічних правил типу «якщо щось сталося або виконано, то результат буде наступним», яка в подальшому використовується для аналізу різноманітних сценаріїв кібератак і їх впливу на об'єкти критичної інфраструктури.

Передбачено можливість формування переліку необхідних операцій від імені персоналу, який буде безпосередньо виконувати комутації, і за допомогою моделюючого комплексу, перевіряти можливість фізичного існування режиму для заданих конкретних умов і параметрів, коректність роботи релейного захисту і автоматики та зможе взяти до уваги різні зовнішні збурення або відмови устаткування в заданий час і залежно від ситуації, що склалася. На рис. 4 наведено фрагмент типової підстанції 750/330/110/35/10/0.4 кВ з комутаційними елементами, які аналізуються в АСВК.

Висновки

Розроблену АСВК з вбудованими функціями конструювання, редагування, створення і виявлення потенційно можливих сценаріїв кіберзагроз для об'єктів критичної інфраструктури орієнтовано на використання науковцями і експертами кіберзахисту об'єктів критичної інфраструктури. Середовище розподіленого моделювання забезпечує широкі можливості для ефективного використання АСВК і дозволяє перейти до розробки уніфікованих стандартів кібербезпеки та навчання і тренажерної підготовки персоналу для енергетики України. Об'єднання можливостей сучасних

інформаційних технологій та інструментальних програмних засобів розподіленого віртуального моделюючого середовища для виявлення кіберзагроз дозволяє створювати ефективні системи протидії кібератакам на об'єктах критичної інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Понимание киберпреступности: Руководство для развивающихся стран*. Проект. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.itu.int/dms_pub/itu-d/oth/01/0B/D010B0000073301PDFR.pdf. Название с экрана.
2. *Кобец Б.Б., Волкова И.О.* Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. М.: ИАЦ Энергия, 2010, 208 с.
3. *Старовойтов А.В.* Кибербезопасность как актуальная проблема современности // *Информация и связь*, 2011, № 6, с. 4—7.
4. *Бородакий Ю.В., Добродеев А.Ю., Бутусов И.В.* Кибербезопасность как основной фактор национальной и международной безопасности XXI века (ч. 2) // *Вопросы кибербезопасности*, 2014, № 1 (2), с. 5—12.
5. *Марков Г.А.* Вопросы физической безопасности информации // *Там же*, 2015, № 4 (12), с. 70—76.
6. *ENTSO-E* финализиовало соглашение о присоединении ОЭС Украины к континентальной сети Европы. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://reform.energy/news/entso-e-finalizirovalo-soglashenie-o-prisoedinenii-oes-ukrainy-k-kontinentalnoy-seti-evgoru-1125>. Название с экрана.
7. *Левинштейн М.Л., Щербачев О.В.* Методика расчетов статической устойчивости сложных электрических систем с помощью эквивалентных регулирующих эффектов станций и нагрузок // *Изв. вузов. Энергетика*, 1962, № 8, с. 11—19.
8. *Цукерник Л.В., Коробчук К.В.* Расчет с помощью ЦВМ предела статической устойчивости сложной энергосистемы // *Докл. на II Всесоюз. науч.-техн. совещ. по устойчивости и надежности энергосистем СССР*. М.: Энергия, 1969, с. 56—62.
9. *Готман В.И., Готман О.В.* Эквивалентирование подсистем энергообъединений на базе режимных параметров // *Изв. вузов. Электромеханика*, 2006, № 3, с. 111—114.
10. *Строев В.А., Сульженко С.В.* Математическое моделирование элементов электрических систем: курс лекций. М.: МЭИ, 1997, 56 с.
11. *Веников В.А., Суханов О.А.* Кибернетические модели электрических систем. М.: Энергоиздат, 1982, 328 с.
12. *Гурсев В.О.* Розробка алгоритмів і програм швидкодійних методів розрахунку режимів роботи великих електроенергетичних систем і енергооб'єднань для тренажерів // *Наукові праці ВНТУ*, 2018, № 1, с. 1—5.
13. *Куцан Ю.Г., Гурсев В.О., Лисенко Є.М.* Моделювання і розробка адаптивної автоматизованої системи конструювання сценаріїв протиаварійних тренувань // *Електронне моделювання*, 2018, №4, с. 55—64. DOI:<https://doi.org/10.15407/emodel.40.04.055>.
14. *Гурсев В.О.* Моделювання великих енергосистем для побудови комп'ютерних розподілених тренажерних систем в енергетиці // *Моделювання та інформаційні технології. Збірник наук. праць ПІМЕ ім. Г.Є. Пухова*, 2018, вип. 83, с. 94—105.
15. *Gissing S., Chaumes P., Antoine J.-P., Bihain A.* An Advanced Dispatcher Training Simulator/ S. Gissing // *Computer Applications in Power*, IEEE, 2000, Vol. 13, Issue 2, p. 25—30.
16. *Karlsson D., Hill D.J.* Modeling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems // *IEEE Transactions on Power Systems*, 1994, Vol. 9, № 1, p. 157—166.

Отримано 13.12.18

REFERENCES

1. (2016), "Understanding Cybercrime: A Guide for Developing Countries", available at: http://www.itu.int/dms_pub/itu-d/oth/01/0B/D010B0000073301PDFR.pdf (accessed April 2017).
2. Kobets, B.B. and Volkova, I.O. (2010), *Innovatsionnoe razvitie elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart Grid* [Innovative development of electroenergy on the base of conception of Smart Grid], IATs Energiya, Moscow, Russia.
3. Starovoytov, A.V. (2011), «Cybersecurity as an urgent problem of our time», *Informatcij i svyaz*, no. 6, pp. 4-7.
4. Borodakii, Y.V., Dobrodeev, A.V. and Butusov, I.V. (2014), "Cybersecurity as the main factor of national and international security of the XXI century", *Voprosy kiberbezopasnosti*, no. 1(2), pp. 5-12.
5. Markov, G.A. (2015), "Physical Security Issues", *Voprosy kiberbezopasnosti*, no. 4 (12), pp. 70-76.
6. (2018), "ENTSO-E finalized the agreement on the accession of the ECO of Ukraine to the continental network of Europe", available at: <http://reform.energy/news/entso-e-finalizirovalo-soglashenie-o-prisoedinenii-oes-ukrainy-k-kontinentalnoy-seti-evropy-1125> (accessed April 2018).
7. Levinshtein, M.L. and Scherbachev, O.V. (1962), "The method of calculating the static stability of complex electrical systems using equivalent regulatory effects of stations and loads", *Izv. vuzov. Energetika*, no. 8, pp. 11-19.
8. Tsukernik, L.V. and Korobchuk, K.V. (1969), "Calculation with the help of digital computers of the limit of static stability of a complex power system", *Dokl. na II Vsesoyuz. nauch.-tehn. sovesch. po ustoychivosti i nadezhnosti energosistem SSSR* [Report on the II All-Union. scientific and technical meeting on stability and reliability of the power systems of the USSR], Energiya, Moscow, Russia, pp. 56-62.
9. Gotman, V.I. and Gotman, O.V. (2006), "Equivalent of energy bonding subsystems based on operational parameters", *Izv. vuzov. Elektromekhanika*, no. 3, pp. 111-114.
10. Stroev, V.A. and Sulzhenko, C.V. (1997), *Matematicheskoe modelirovanie elementov elektricheskikh sistem* [Mathematical modeling of elements of electrical systems], MEI, Moscow, Russia.
11. Venikov, V.A. and Sukhanov, O.A. (1982), *Kiberneticheskie modeli elektricheskikh sistem* [Cybernetic models of electrical systems], Energoizdat, Moscow, Russia.
12. Gureev, V.O. (2018), "Development of algorithms and programs of high-speed methods for calculating the operating modes of large electric power systems and power units for simulators", *Naukovi Pratsi VNTU*, no. 1, pp. 1-5.
13. Kutsan, Y.G., Gureev, V.O. and Lysenko, E.M. (2018), "Modeling and developing an adaptive automated system for constructing emergency accident scenarios", *Elektronne modelyuvannya*, no. 4, pp. 55-64. DOI:<https://doi.org/10.15407/emodel.40.04.055>.
14. Gureev, V.O. (2018), "Modeling great power systems for the development of computerized training systems in energy systems", *Modelyuvannya ta informatsiini tekhnologii. Zbirnyk nauk. prats IPME im. G.E. Pukhova*, Vol. 83, pp. 94-105.
15. Gissinger, S., Chaumes, P., Antoine, J.-P. and Bihain, A. (2000), "An Advanced Dispatcher Training Simulator", *Computer Applications in Power*, Vol. 13, no. 2, pp. 25-30.
16. Karlsson, D., Hill, D. J. (1994), "Modeling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, no. 1, pp. 157-166.

Received 13.12.18

Ю.Г. Куцан, В.А. Гуреев, Е.Н. Лысенко, Е.В. Аветисян

КИБЕРУГРОЗЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ УКРАИНЫ

Представлен анализ функциональной структуры электроэнергетических систем (ЭЭС) и энергетических объединений с целью определения наиболее достоверных мест несанкционированного влияния киберугроз на работу объектов критической инфраструктуры. При этом необходимо учитывать режимы работы очень сложных иерархических систем управления объектами ЭЭС и Объединенной электроэнергетической системы, которая состоит из большого количества не связанных между собой автоматических (без участия человека) и автоматизированных (при участии человека в принятии решений) систем управления узлами генерации (атомных, тепловых, солнечных, ветровых и гидроэлектростанций), электросетей передачи (транспортировка) и потребления электроэнергии. Предложена модель автоматизированной системы обнаружения киберугроз для разработки оперативных превентивных методов, направленных на выявление и предотвращение условий возникновения киберугроз в энергетике.

К л ю ч е в ы е с л о в а: киберугрозы, режимы энергосистем, моделирование режимов, электронное обучение, сценарии противокиберугрозных тренировок.

Yu.G. Kutsan, V.O. Gurieiev, Y.M. Lysenko, O.V. Avetisyan

CYBERSECURITY IN THE ELECTRIC POWER SYSTEMS OF UKRAINE

The functional structure of electric power systems (EPS) to assess the most reliable places of unauthorized impact on the work of critical infrastructure is analyzed in the article. It is imperative to take into account the continuous operation in time and a very complex hierarchical system of management of E3S facilities and the United Electric Power System (ECO), which consists of a large number of often not directly interconnected automatic (without human participation) and automated systems (with human participation in solutions) management of generation units (nuclear, thermal, solar, wind and hydroelectric power plants), power transmission networks (transportation) and electricity consumption. The variants of cyber threats of these very systems and objects of the existing E3S management structure are also the subject of research of this work. It is proposed to develop operational preventive methods aimed at identifying and preventing the conditions for the emergence of cyber threats in the energy sector.

K e y w o r d s: cyber threats, power system modes, mode simulation, electronic training, scenarios of anti-cybernetic training.

КУЦАН Юлій Григорович, д-р техн. наук, в.о. заст. директора по наук. роботі Ін-та проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. В 1966 г. закінчив Київський політехнічний ін-т. Область наукових досліджень — моделювання технологічних процесів в енергетичній області.

ГУРСЄВ Віктор Олександрович, канд. техн. наук, докторант Ін-та проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С. Пухова НАН України. В 1974 р. закінчив Київський політехнічний ін-т. Область наукових досліджень — моделювання режимів роботи великих електроенергетичних систем і енергооб'єднань для комп'ютерних тренажерних систем.

ЛИСЕНКО Євген Миколайович, аспірант Ін-та проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С. Пухова НАН України. В 2002 р. закінчив Національний авіаційний університет. Область наукових досліджень — моделювання методів автоматизації комп'ютерних тренажерних систем.

АВЕТІСЯН Олена Вікторівна, наук. співр. Ін-та проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С. Пухова НАН України, директор учбового центру НВ ТОВ "Інфотех" (м. Київ). У 2002 р. закінчила Національний технічний університет України "КПІ". Область наукових досліджень — електронні системи навчання, веб-орієнтована тренажерна підготовка персоналу і кібербезпека електроенергетичних систем.