

Н. В. РУДЕВИЧ, Д. А. ГАПОН

СТРАТЕГІЯ СИСТЕМНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНОГО СЕРЕДОВИЩА POWERFACTORY ДЛЯ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ЗА ОСВІТНЬОЮ ПРОГРАМОЮ «ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА»

В роботі проаналізовано область застосування програмного комплексу PowerFactory в нашій країні та за її межами. Визначено необхідність інтеграції програми в навчальний процес вищих технічних закладів України. Сформульовано стратегію системного застосування програми PowerFactory для професійної підготовки майбутніх фахівців електроенергетичної галузі. Розроблено загальні рекомендації щодо інтеграції програми в триступеневу систему підготовки за освітньою програмою «Електроенергетика». Зокрема за результатами навчання першого бакалаврського рівня вищої освіти повинні бути сформовані базові знання й уміння з розрахунку сталого й перехідного режимів, струмів короткого замикання й стійкості енергосистем, пуску електродвигунів, показників якості електричної енергії, захистів мереж у тому числі за допомогою програми. Це дозволить забезпечити у повній мірі понятійно-аналітичний рівень засвоєння знань. Другий магістерський рівень підготовки повинен передбачати оволодіння навичками розв'язання нетипових професійних завдань з проєктування електроенергетичних об'єктів та систем релейного захисту й автоматики, оптимізації режимів, диспетчерського керування та перспективного розвитку мережі в середовищі PowerFactory. Це буде сприяти продуктивно-синтетичному рівню засвоєння навчального матеріалу. Обов'язковим компонентом підготовки здобувачів наукового ступеня доктора філософії повинно бути опанування мовою програмування DigSilent - DPL та інтерфейсами програми. Все це дозволить в подальшому вирішувати комплексні задачі в межах їх дисертаційного дослідження, що можуть бути пов'язані з плануванням та введенням режиму енергосистем, підвищенням якості електричної енергії, координацією роботи систем релейного захисту, автоматики та силової електроніки, оптимізацією роботи джерел розподіленої генерації, забезпеченням надійності та стійкості енергосистем тощо.

Ключові слова: програма PowerFactory, професійна підготовка, енергосистема, освітня програма, майбутні фахівці електроенергетичної галузі.

N. V. RUDEVICH, D. A. GAPON

SYSTEM APPLICATION STRATEGY OF THE POWERFACTORY SOFTWARE ENVIRONMENT FOR PROFESSIONAL TRAINING UNDER THE ELECTRICAL ENERGY EDUCATIONAL PROGRAM

The paper analyzes the scope of application of the PowerFactory software complex in our country and abroad. The need to integrate the program into the educational process of higher technical institutions of Ukraine was determined. A strategy for the systematic application of the PowerFactory program for the professional training of future specialists in the power industry has been formulated. General recommendations on the integration of the program into the three-level system of training under the educational program "Electroenergetics" have been developed. In particular, based on the results of studies of the first bachelor's level of higher education, basic knowledge and skills should be formed in the calculation of stable and transient modes, short-circuit currents and stability of power systems, starting electric motors, indicators of the quality of electric energy, network protection, including with the help of a program. This will allow to fully ensure the conceptual and analytical level of assimilation of knowledge. The second master's level of training should involve mastering the skills of solving atypical professional tasks in the design of electric power facilities and relay protection and automation systems, optimization of modes, dispatch control and prospective development of the network in the PowerFactory environment. This will contribute to the productive and synthetic level of assimilation of the educational material. Mastering the DigSilent – DPL programming language and program interfaces should be a mandatory component of the training of PhD candidates. All this will allow in the future to solve complex problems within the scope of their dissertation research, which may be related to the planning and introduction of the energy system regime, improving the quality of electric energy, coordinating the operation of relay protection systems, automation and power electronics, optimizing the operation of distributed generation sources, ensuring reliability and stability of energy systems, etc.

Keywords: PowerFactory program, professional training, energy system, educational program, future specialists of the electric power industry.

Постановка проблеми. Основою електроенергетики України є єдина електроенергетична система, що представляє собою об'єднання електростанцій, підстанцій, електричних мереж та споживачів електричної енергії на різних класах напруги. Через те, що така система є технологічно єдиним об'єктом, функціонування якої підпорядковується відповідним фізичним законам, дослідження та аналіз процесів, що відбуваються в ній при різного роду збуреннях, є досить складною науково-практичною задачею.

Сучасний розвиток комп'ютерних технологій дозволив створити такі програмні продукти, за допомогою яких стало можливим моделювати процеси, що відбуваються в реальному електротехнічному обладнанні в різних режимах

їхньої роботи. Із найбільш поширених пакетів програм, що використовуються для моделювання процесів в електричних системах, є MATLAB, PSCAD, ETAP, PSS@SINCAL, POWERFACTORY тощо [1, 2]. Найбільший інтерес викликає розроблений німецькою компанією DigSilent GmbH програмний продукт PowerFactory [3]. Його ефективно використовують сьогодні для моделювання об'єктів енергетичного комплексу всіх класів напруги в науково-дослідних, проєктних та експлуатаційних організаціях в різних країнах світу [4, 5]. В нашій країні програма знайшла широке впровадження в Інституті Електродинаміки НАН України, зокрема для дослідження стійкості енергосистем [6]. Водночас її застосовують для розрахунків в НЕК «Укренерго» та регіональних проєктувальних енергетичних

компаніях, в яких фірмою DMCC Engineering (український представник компанії DigSilent) періодично проводяться тренінги з підвищення кваліфікації фахівців щодо використання програми [7, 8]. Результати проведеного аналізу уможливають формулювання висновку про те, що застосування програмного комплексу PowerFactory на теренах України та за її межами буде тільки розширюватися.

З метою забезпечення відповідності результатів навчання вимогам ринку праці та потребам роботодавців сьогодні вища технічна освіта нашої країни повинна впроваджувати нові методи та засоби навчання, які дозволять студентам краще підготуватися до вирішення складних завдань в їх майбутній професійній діяльності. Вочевидь обсяг отриманої та обробленої навчальної інформації буде абсолютно різним у випадку, коли викладач говорить про будь-який перехідний процес в електричному колі і дає одне або два рівняння та кілька зображень, і коли студент самостійно розробляє енергосистему, моделює подію в ній та спостерігає за зміною параметрів режиму у часі.

Таким чином, для підготовки більш кваліфікованих та конкурентоздатних фахівців першого (бакалавр), другого (магістр) та третього (доктор філософії) рівнів вищої освіти за освітньою програмою «Електроенергетика», слід використовувати програмний комплекс PowerFactory в процесі професійної підготовки у вищих технічних закладах України. На сьогодні інтеграція програми в навчальний процес відбувається в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Національному університеті «Львівська політехніка», Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського тощо. Але, на жаль, ця адаптація носить несистемний, фрагментарний та епізодичний характер. Відсутні загальні рекомендації щодо системного впровадження програми в процес професійної підготовки майбутніх фахівців електроенергетичної галузі.

Програмне середовище PowerFactory досить ємне та багатофункціональне, воно спочатку розроблено як завершений програмний продукт для досвідченого користувача, тобто не має яких-небудь полегшених версій, тільки керівництво користувача займає більш ніж 1000 сторінок [9]. Отже, для успішного формування у студента базових знань, умінь, навичок з використання програми PowerFactory у своїй майбутній професійній діяльності, слід системно підійти до задачі інтеграції її в навчальний процес.

Мета статті. Метою статті є розробка стратегії системного застосування програмного середовища DigSilent PowerFactory для професійної підготовки за освітньою програмою «Електроенергетика».

Основні матеріали дослідження. В контексті компетентнісного підходу очікуваними результатами навчання є формування професійних

компетентностей, які визначають здатність особи успішно здійснювати професійну діяльність. Освітніми програмами різних рівнів вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» в тому числі передбачається формування здатностей застосовувати прикладне програмне забезпечення для вирішення професійних задач. Безумовно, ступень складності цих задач для різних рівнів освіти формується з дотриманням наступності, логічної послідовності та системи змістової й процесуальної сторін навчання. Відповідно до цього, засвоєння функціональних можливостей програми PowerFactory повинно здійснюватися у певному порядку, що відповідає системному змісту професійної підготовки від бакалавра до доктора філософії за освітньою програмою «Електроенергетика».

На сьогодні випускники шкіл в достатній мірі володіють комп'ютерною грамотністю, зокрема з таких додатків, як Word, Excel, що є достатнім та дозволяє впевнено розпочати ознайомлення з програмним продуктом PowerFactory вже з першого або другого курсу їхньої професійної підготовки. Не володіючи ще в необхідній мірі професійними знаннями щодо роботи електричної системи та її складових, можливо провести підготовчу роботу з огляду прийнятих умовних позначень, термінів та скорочень, що використовуються при описі та роботі з програмою, сформувати уміння щодо входу й виходу з програми та створення й збереження нового проєкту. Після чого познайомитись з робочим простором проєкту (інтерфейс користувача) та інструментарієм малювання, сформувати навички щодо створення моделей мережі за допомогою графічного редактора. Цієї інформації буде достатньо для того, щоб розпочати вивчення студентами базових функцій розрахунку енергосистем, що реалізовані в середовищі PowerFactory. Всілякі опції, команди та функції налаштування, як свідчить практичний досвід, доцільно опановувати паралельно вивченню розрахункових можливостей, а в даному випадку це стосується і структури бази даних програми.

Як відомо, основу аналізу електричних систем складають розрахунки сталих та перехідних режимів, а, отже, оволодіння програмним продуктом PowerFactory повинно розпочинатися з ознайомлення саме з цими функціями. Безумовно, опанування можливостями команд розрахунків повинно відбуватися в межах відповідних дисциплін, вивчення матеріалу яких підпорядковано певній структурно-логічній схемі. Класичними базовими професійними дисциплінами за освітньою програмою «Електроенергетика» першого бакалаврського рівня освіти, що пов'язані з вивченням базових розрахунків енергосистем, є «Електричні системи та мережі», «Математичні задачі енергетики», «Електрична частина станцій та підстанцій», «Електромагнітні перехідні процеси» та «Електромеханічні перехідні процеси».

В межах курсу «Електричні системи та мережі» слід розпочати розроблення моделей реальних енергосистем в середовищі PowerFactory, при цьому поступово вдосконалюючи роботу з його графічним редактором. З урахування видів електротехнічного обладнання та режимів роботи мережі, що вивчаються в дисципліні, студенту необхідно створити електричну мережу з введенням заданих вихідних даних елементів (назвемо її підсистема 1). Після чого стає можливим оволодіння однією з базових функцій – це розрахунок сталого режиму, який може бути проведений в PowerFactory трьома можливими методами при різних умовах щодо регулювання й управління реактивною потужністю та роботи навантаження. Слід відзначити, що математичні основи аналізу сталого режиму, що закладені в програмі, слід розглянути в курсі «Математичні задачі енергетики», а для закріплення теорії можливо для простої схеми розрахувати сталий режим власноруч та за допомогою програми з подальшим порівнянням результатів.

Для закріплення знань щодо головних схем підстанцій й станцій та їхнього обладнання, що розглядаються в курсі «Електрична частина станцій та підстанцій», в середовищі PowerFactory слід розробити ще одну електричну мережу (назвемо її підсистема 2), використовуючи різні схеми систем шин з усім наявним електрообладнанням. Після чого в цій підсистемі 2, яка є вже більш складною у порівнянні з підсистемою 1, розрахувати сталий режим при певних умовах. Таким чином, в межах двох дисциплін в достатній мірі можуть бути сформовані знання та уміння щодо розрахунку сталого режиму будь-якої електричної системи. В подальшому можливо поєднати ці дві підсистеми та створити енергосистему, яка стане базовою для опанування всіх можливих розрахункових функцій програми на протязі усього процесу навчання.

Як відомо, перехідні режими в електричній системі умовно поділяють на електромагнітні та електромеханічні, у відповідності з цим в програмі PowerFactory можливо змоделювати їх при різного роду збуреннях з подальшою візуалізацією результатів в наочному й інформативному вигляді. Окремими функціями в середовищі закладено розрахунок струмів короткого замикання, пуск двигунів, аналіз чутливості та модальний аналіз (статична стійкість). Методики обчислення струмів короткого замикання перш за все передбачають складання схеми заміщення електричної системи та перетворення її до найпростішого вигляду. Але в деяких випадках при дуже розгалужених та складних енергосистемах для спрощення розрахунків певну її частину представляють еквівалентним джерелом живлення. Отже, в межах дисципліни «Електромагнітні перехідні процеси» слід опанувати відповідну команду моделювання та функції розрахунку струмів короткого замикання й еквівалентування мережі. При цьому слід обов'язково приділити увагу огляду методів розрахунку струмів

короткого замикання, що закладені в програму, та провести обчислення для вже створеної енергосистеми за методом IEC 60909, що відповідає прийнятому міжнародному стандарту в західній Європі та нашій країні [10]. Аналогічно засвоєння таких функцій програми, як моделювання електромеханічних перехідних процесів та розрахунок стійкості, провести в межах дисципліни «Електромеханічні перехідні процеси». При цьому доцільно освоєння кожної нової функції виділяти в нове дослідження зі своїми оперативними сценаріями, що буде сприяти поступовому формуванню знань щодо структури бази даних програми.

Слід зазначити, що кожна з названих дисциплін передбачає виконання розрахункової чи курсової роботи, а, отже, для закріплення знань студент може самостійно створити проєкт, де буде реалізовано його індивідуальне завдання, що дозволить порівняти результати моделювання з власними розрахунками. При цьому корисним буде опанування таких функцій PowerFactory, як розрахунок й перевірка перерізів ліній електропередач та техніко-економічний аналіз мережі, що є складовими елементами більшості бакалаврських дипломних проєктів.

Серед іншого в межах підготовки за першим бакалаврським рівнем вищої освіти повинні бути засвоєні базові опції таких функцій програми PowerFactory, як «Гармонічний аналіз» та «Захист електричних мереж та систем». Це може бути реалізовано в тому числі в інших професійних дисциплінах, що вивчаються різними спеціалізаціями (наприклад, для спеціалізації «Системи управління виробництвом та розподілом електроенергії» – в курсах «Системи обліку та контролю якості електричної енергії» та «Основи проектування релейного захисту енергосистем» відповідно).

Так володіючи теорією аналізу якості електричної енергії, студенти повинні вміти проводити розрахунок гармонік в сигналах струму та напруги в усталеному режимі, а також втрати від їх наявності в мережі, у тому числі за допомогою відповідної програмної опції. Розміщення та моделювання роботи вимірювальних трансформаторів струму й напруги, запобіжників (що реалізовані як реле максимального струму), а також готових моделей реле повинні складати основу ознайомлення з функцією захисту енергосистем, що представлена в середовищі PowerFactory.

Таким чином, після завершення четвертого курсу майбутній фахівець з електроенергетики повинен бути здатним розв'язувати типові професійні задачі з розрахунку сталого та перехідного режимів, струмів короткого замикання та стійкості енергосистем, а також показників якості електричної енергії у тому числі за допомогою програмного середовища PowerFactory, що дозволить забезпечити в повній мірі понятійно-аналітичний рівень засвоєння знань.

Розуміння правильності відтворених процесів в електроенергетичних системах при їх моделюванні нерозривно пов'язано із ґрунтовними знаннями щодо

фізики процесів в електротехнічному обладнанні, яка відображається в їхніх математичних моделях. Враховуючи це, професійна підготовка за другим магістерським рівнем вищої освіти повинна розпочинатися саме з формування знань щодо математичних моделей елементів енергосистеми, що наявні в бібліотеці програми PowerFactory. При цьому математичні моделі слід представляти у вигляді, при якому її вхідні параметри будуть відповідати основним даним, що вводяться у вікнах редагування елементів. До того ж доцільно ознайомитись з особливостями застосування різних характеристик для параметрів обладнання, а також з вбудованою системою ідентифікації й оптимізації параметрів, що дозволяє розробляти їхні схеми заміщення та математичні моделі з використанням даних реальних випробувань. Крім того вирішення майбутнім фахівцем більшості професійних задач в середовищі PowerFactory не можливо буде здійснити без оволодіння навичками створення складових фреймів та самостійного розроблення цифрових моделей енергооб'єктів. Ці питання серед інших повинні розглядатися в дисциплінах I курсу підготовки майбутніх магістрів за різними спеціалізаціями, що пов'язані з математичним та комп'ютерним моделюванням в електроенергетичних системах. Водночас на цьому етапі навчання слід більш детально познайомитись зі структурою проекту, зі змістовним наповненням її складових, сформулювати уміння щодо використання менеджера даних.

На підставі опанування студентами наведеного вище навчального матеріалу щодо розрахункових функцій програми PowerFactory стає можливим в подальших курсах професійної підготовки магістерського рівня за освітньою програмою «Електроенергетика» самостійно створювати нові (змінювати існуючі) захисні пристрої й засоби автоматики та досліджувати й аналізувати процеси в електроенергетичній системі з урахуванням їхньої дії. Це, насамперед, дозволить сформувати знання та уміння щодо вирішення таких важливих задач диспетчерського керування енергосистемами, як планування та ведення режиму. Програмне середовище PowerFactory дозволяє здійснювати оптимізацію сталих режимів системоутворюючих та розподільних мереж, використовуючи різні методи, цільові функції, способи керування й обмеження, а також вирішувати задачі оптимального відновлення живлення. Водночас однією з розрахункових функцій програми є аналіз післяаварійного сталого режиму, що дозволяє визначити запаси пропускну здатності ліній електропередач, ризики, що пов'язані зі зміною режиму навантаження, а також характер протиаварійних заходів. Студент може самостійно вибрати одну або поєднання декількох подій (наприклад, скидання навантаження, перерозподіл генерації, комутаційні дії й перемикання відпайки), що будуть найбільш ефективними заходами з точки зору збереження оптимального режиму роботи енергосистеми. Як доповнення до функції аналізу

післяаварійного режиму може бути проведений розрахунок показників надійності з використанням стохастичних моделей відказів та ремонтів елементів енергосистеми. Оволодіння навичками роботи з цими модулями та знаннями щодо математичних основ оптимізації та ймовірнісної оцінки надійності енергосистем повинно знайти своє відображення у відповідних курсах професійної підготовки за різними спеціалізаціями.

Випускаючі кафедри з урахуванням специфіки підготовки майбутніх фахівців повинні визначити ступінь значущості та занурення у вивчення теоретичних й практичних аспектів названих розрахункових функцій програми PowerFactory. Зокрема на розсуд кафедри в межах другого освітнього рівня можуть бути розглянуті основи використання таких функцій PowerFactory, як адекватність генерації, квазідинамічне моделювання, перевірка технологічного приєднання, спеціальні розрахунки магістральних мереж та оцінка стану, що дозволить в подальшому вирішувати задачі перспективного розвитку мережі (зміна мережі та етапи розвитку).

Таким чином, в середовищі PowerFactory можливо розв'язувати нетипові професійні задачі, які характеризуються невизначеністю умов та вимог, що буде сприяти продуктивно-синтетичному рівню засвоєння навчального матеріалу за магістерською освітньою програмою.

Формування інтегральної компетентності, як результату підготовки за освітньо-науковою програмою доктора філософії в електроенергетичній галузі, повинно забезпечувати здатність розв'язувати комплексні проблеми та задачі, що передбачає проведення глибоких наукових досліджень. Одним з етапів проведення науково-дослідної роботи за темою дисертації є вибір експериментальних методів дослідження. В більшості захищених на сьогодні дисертаційних роботах за спеціальністю 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи» в якості метода дослідження обрано саме математичне та комп'ютерне моделювання, що обумовлено в першу чергу технічною складністю проведення експериментів на реальних об'єктах електроенергетики. З урахуванням цієї тенденції програмний продукт PowerFactory може бути успішно застосований як інженерний інструментарій для проведення ґрунтовних досліджень в межах дисертаційних робіт, адекватність якого підтверджена низкою впроваджень виконаних організаціями, що займаються плануванням та експлуатацією електроенергетичних систем [9, 10]. Здобувач наукового ступеня доктора філософії, опанувавши за результатами підготовки першого та другого рівнів вищої освіти всі можливі базові функції розрахунку, а також сформувавши навички роботи з програмою, може не витрачаючи часу приступати до виконання поставлених в його дисертаційній роботі завдань. Це може бути дослідження питань, що пов'язані з управлінням активною (реактивною) потужністю та

частотою (напругою), плануванням та введенням режиму, розрахунком втрат та підвищенням якості електричної енергії, координацією роботи систем релейного захисту, автоматики та силової електроніки, оптимізацією роботи джерел розподіленої генерації, забезпеченням надійності та стійкості енергосистем тощо. Вирішення таких складних комплексних задач в більшості випадків не можливо без створення власних модулів розрахунку, що вимагає володіння мовою програмування DigSilent – DPL. Крім того в процесі проведення дослідження може виникнути задача інтеграції PowerFactory з будь-яким іншим програмним забезпеченням, що передбачає використання різних її інтерфейсів. Отже, обов'язковим компонентом освітньої програми доктора філософії повинно бути опанування мовою програмування DPL та інтерфейсами програми PowerFactory.

Висновки. Як свідчить практичний досвід, вирішення професійних задач в електроенергетичній галузі не можливо без застосування відповідного прикладного програмного забезпечення. Розповсюдженим та перспективним програмним середовищем в проєктних, експлуатаційних та науково-дослідних організаціях нашої країни є PowerFactory. Все це обумовлює необхідність використання його як засобу навчання в процесі професійної підготовки майбутніх фахівців, що сприятиме в тому числі підсиленню наочності, інтенсивності та професійній спрямованості занять.

Відмінною особливістю даного програмного продукту є його універсальність використання для різних спеціалізацій та дисциплін. При цьому підвищенню ефективності засвоєння впродовж усього терміну навчання буде сприяти ще така перевага програми, як незмінність інтерфейсу користувача в усіх її версіях, що дозволить витратити навчальний час тільки на вивчення нових функцій. Крім того використання програми як засобу навчання в професійних дисциплінах дозволить привести зміст навчання у відповідність з теорією, що прийнята світовою спільнотою в електроенергетичній галузі.

З урахуванням проведеного дослідження стає можливим сформулювати наступні рекомендації щодо системної інтеграції програмного комплексу DigSilent PowerFactory в процес професійної підготовки майбутніх фахівців електроенергетичної галузі.

1. Для виконання програмних цілей навчання першого бакалаврського рівня вищої освіти необхідно сформулювати знання та уміння з використання таких функцій програми, як розрахунок сталого режиму, моделювання електромагнітних перехідних процесів, еквівалентування мережі, розрахунок струмів короткого замикання, моделювання електромеханічних перехідних процесів, пуск двигунів, аналіз чутливості, модальний аналіз, гармонічний аналіз, розрахунок спалаху електричної дуги, захист електричних мереж, розрахунок й перевірка перерізів ліній електропередач та техніко-економічний аналіз мережі.

2. Нормативний зміст підготовки за другим магістерським рівнем вищої освіти може бути забезпечений перед усім за рахунок оволодіння студентами навичками самостійного розроблення в середовищі цифрових моделей електроустаткування, а також використання для розв'язання професійних завдань програмних функцій ідентифікації параметрів електрообладнання, захисту електричних мереж, оптимізації режимів, оптимальності відновлення живлення, аналізу аварійних режимів та надійності, адекватності генерації, квазідинамічного моделювання, перевірки технологічного приєднання, розрахунку магістральних мереж та оцінки їхнього стану.

3. Оволодіння основами мови програмування DPL та інтерфейсами програми в тому числі дозволить проводити ґрунтовні експериментальні дослідження для вирішення комплексних професійних задач здобувачами наукового ступеня доктора філософії.

4. Засвоєння розрахункових функцій повинно відбуватися у певному порядку, дотримуючись принципу систематичності та послідовності. Обов'язково у відповідних дисциплінах повинно бути роз'яснено теоретичні основи, що закладені в функції програми. Опанування графічних опцій та команд налаштування, доцільно здійснювати паралельно вивченню розрахункових можливостей програми.

Програмне середовище DigSilent PowerFactory є сучасним засобом навчання та повинно системно інтегруватися в навчальний процес вищих технічних закладів України, які здійснюють підготовку за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Водночас воно успішно може застосовуватися в закладах професійно-технічної освіти та системі післядипломного підвищення кваліфікації.

Перспективами подальших досліджень є розроблення методик використання розрахункових функцій програми DigSilent PowerFactory для вирішення завдань професійних дисциплін за освітньою програмою «Електроенергетика»

Список літератури

1. Bam L., Jewell W. Review: power system analysis software tools. *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*, San Francisco, CA, USA, 16 June 2005. 2005. P. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.1109/pes.2005.1489097>.
2. Шевченко С. Ю., Данильченко Д. О., Кузнецов Д. С., Кавакзех М. З., Мірошник О. О. Можливості використання програмного забезпечення PSS@SINCAL, ETAP, PowerFactory для моделювання електричних мереж. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2022. №2 (5). С. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2022.02.09>.
3. Офіційний сайт компанії DigSilent GmbH. *Power System Solutions - DIGSILENT*. URL: <https://www.digsilent.de> (дата звернення: 20.01.2023).
4. Liu J., Zhang J., Ling P., Tao W. Study of relay protection modeling and simulation on the basis of DIGSILENT. *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Beijing, 26–28 November 2017. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ei2.2017.8245226>.

5. PowerFactory Applications for Power System Analysis / ed. by F. M. Gonzalez-Longatt, J. Luis Rueda. Cham : Springer International Publishing, 2014. 489 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12958-7>.
6. Забезпечення стійкості енергосистем та їх об'єднань : монографія / О. Ф. Буткевич, О. В. Кириленко, О. В. Леньга та ін. Київ : Ін-т електродинаміки НАН України, 2018. 320 с.
7. Павловский В. В., Стелюк А. О. Повышение квалификации инженеров-электриков. Обучение программному обеспечению для расчета сетей. *Промышлова електроенергетика та електротехніка*. 2018. №1 (107). С. 8–9.
8. Офіційний сайт компанії DMCC. *DMCC Engineering*. URL: <https://dmcc.com.ua> (дата звернення: 20.01.2023).
9. PowerFactory user's manual DIgSILENT PowerFactory version 14.0. Gomaringen : DIgSILENT GmbH, 2012. 1078 p.
10. IEC 60909-0:2001. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents. Official edition. 2009. 139 p.
3. Power System Solutions - DIgSILENT. <https://www.digsilent.de> (accessed Jan. 20, 2023).
4. J. Liu, J. Zhang, P. Ling, and W. Tao, "Study of relay protection modeling and simulation on the basis of DIgSILENT," in *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Beijing, Nov. 26–28, 2017. pp. 1–5, doi: <https://doi.org/10.1109/ei2.2017.8245226>.
5. F. M. Gonzalez-Longatt and J. Luis Rueda, Eds., *PowerFactory Applications for Power System Analysis*. Cham: Springer International Publishing, 2014, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12958-7>.
6. O. F. Butkevych et al., *Zabezpechennia Stiihosti Enerhosystem Ta Yikh Obiednan [Ensuring the Resilience of Power Systems and Their Associations]*. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2018. (in Ukrainian).
7. V. V. Pavlovskiy and A. O. Steliuk, "Povyishenie kvalifikatsii inzhenerov-elektrikov. Obuchenie programmnomu obespecheniyu dlya rascheta setey [Advanced training of electrical engineers. Network calculation software training]," *Promyslova elektroenerhetyka ta elektrotekhnika*, no. 1 (107), pp. 8–9, 2018. (in Russian).
8. DMCC Engineering. <https://dmcc.com.ua> (accessed Jan. 20, 2023).
9. *PowerFactory User's Manual DIgSILENT PowerFactory Version 14.0*. Gomaringen: DIgSILENT GmbH, 2012.
10. *Short-Circuit Currents in Three-Phase a.c. Systems - Part 0: Calculation of Currents*, IEC 60909-0:2001, International Electrotechnical Commission, 2009.

References

1. L. Bam and W. Jewell, "Review: Power system analysis software tools," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*, San Francisco, CA, USA, Jun. 16, 2005. 2005, pp. 139–144, doi: <https://doi.org/10.1109/pes.2005.1489097>.
2. S. Shevchenko, D. Danylchenko, D. Kuznetsov, M. Z. Qawaqzeh, and O. Miroshnyk, "Possibilities of using PSS®SINCAL, ETAP, powerfactory software for modeling electric power networks," *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 2 (5), pp. 21–28, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2022.02.09>. (in Ukrainian)

Надійшла (received) 10.02.2023

Відомості про автора (-іє) / About the Author (-s)

Рудевич Наталія Валентинівна (Nataliia Rudevich) – доктор педагогічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2858-9836>; e-mail: n.rudevich@ukr.net.

Гапон Дмитро Анатолійович (Dmitriy Gapon) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9707>; email: dimal2345go@gmail.com.