

«Програмні засоби САПР для проектування електротехнічних систем»

Тема присвячена аналізу класу спеціалізованих програмних інструментів, які забезпечують автоматизоване проектування, документування та перевірку технічних рішень у галузі електроенергетики, електропостачання, електротехнічного обладнання, систем керування та релейного захисту. На відміну від попередніх тем, де фокус робився на загальних CAD/EDA підходах до схем і електроніки, ця тема концентрується на електротехнічних системах як на об'єктах інженерного проектування, що характеризуються складними ієрархіями, багаторівневою структурою документації, жорсткими вимогами до стандартів і безпеки, а також необхідністю формувати не лише принципові схеми, але й широкий спектр супровідних документів, без яких неможливі виготовлення, монтаж, введення в експлуатацію та подальша експлуатація. Електротехнічні системи включають як мережеву інфраструктуру (лінії, підстанції, розподільні пристрої), так і локальні об'єкти (шафи керування, панелі автоматизації, щити низької напруги), а також спеціалізовані підсистеми захисту та автоматики, що реалізують релейний захист, протиаварійну автоматику, сигналізацію і диспетчеризацію. У зв'язку з цим програмні засоби САПР для електротехніки формують окремий клас інженерних систем - електротехнічні САД (часто позначувані терміном ЕСАД у контексті електрики), які розширюють класичні можливості креслення до рівня семантичного проектування, де кожен елемент схеми є не просто графічним примітивом, а об'єктом з електротехнічними атрибутами, правилами, зв'язками та залежностями.

У сучасній енергетиці та електротехніці процес проектування можна концептуально поділити на кілька пов'язаних рівнів. Перший рівень утворюють задачі планування та аналізу електричних мереж і підстанцій, де інженер працює з топологією мережі, режимами роботи, потоками потужності, рівнями напруги, струмами короткого замикання, резервуванням, надійністю та узгодженням захистів. Другий рівень включає проектування первинних і вторинних схем підстанцій, розподільних пристроїв, електричних щитів та шаф керування, де важливою є графічна й нормативна коректність документації, а також керуваність великого масиву даних про апаратуру, кабелі, клеми, проводи, сигнали та перехресні посилення. Третій рівень охоплює підсистеми автоматики та релейного захисту, де електротехнічна документація безпосередньо пов'язана з логікою функціонування, каналами вимірювання, дискретними і аналоговими входами/виходами, параметризацією пристроїв захисту та взаємодією з системами диспетчеризації. Реальна інженерна практика вимагає узгодження цих рівнів, а програмні засоби САПР виступають інструментальною основою такого узгодження, оскільки забезпечують формалізоване подання даних, механізми перевірки, стандартизацію оформлення й можливості автоматичної генерації супровідної документації.

універсальний 2D/3D креслярський пакет) інженер працює здебільшого з геометрією: лініями, колами, блоками та розмірами. Такі інструменти можуть бути надзвичайно потужними для створення геометричних креслень, але вони не розуміють електричного сенсу об'єктів: провідник, контакт, клема, кабель, пристрій, потенціал або логічний сигнал у них є лише графічним зображенням без внутрішньої семантики. Це означає, що будь-які операції, які у електротехніці виконуються як правила й залежності, у загальноінженерних CAD перетворюються на ручну працю: нумерація проводів, присвоєння тегів компонентам, формування кабельних журналів, відстеження перехресних посилань, перевірка цілісності з'єднань, контроль дублювання позначень, підтримка стандартних умовних позначень та автоматичне формування звітів. У спеціалізованих електротехнічних CAD ці функції реалізовані на рівні системи як частина базової логіки проектування, що істотно зменшує ймовірність помилок і підвищує продуктивність. Як приклад, AutoCAD Electrical містить бібліотеку десятків тисяч “інтелектуальних” електричних символів і заявляє можливість автоматизації нумерації проводів, генерації тегів компонентів і автоматичного формування звітів. Подібний принцип демонструє SOLIDWORKS Electrical, який акцентує на швидкому оновленні нумерації проводів і узгодженні документації під час змін, що є критично важливим у великих проєктах. Такі характеристики не є “косметичними” функціями; вони відображають фундаментальний перехід від креслення як зображення до креслення як носія структурованих проектних даних.

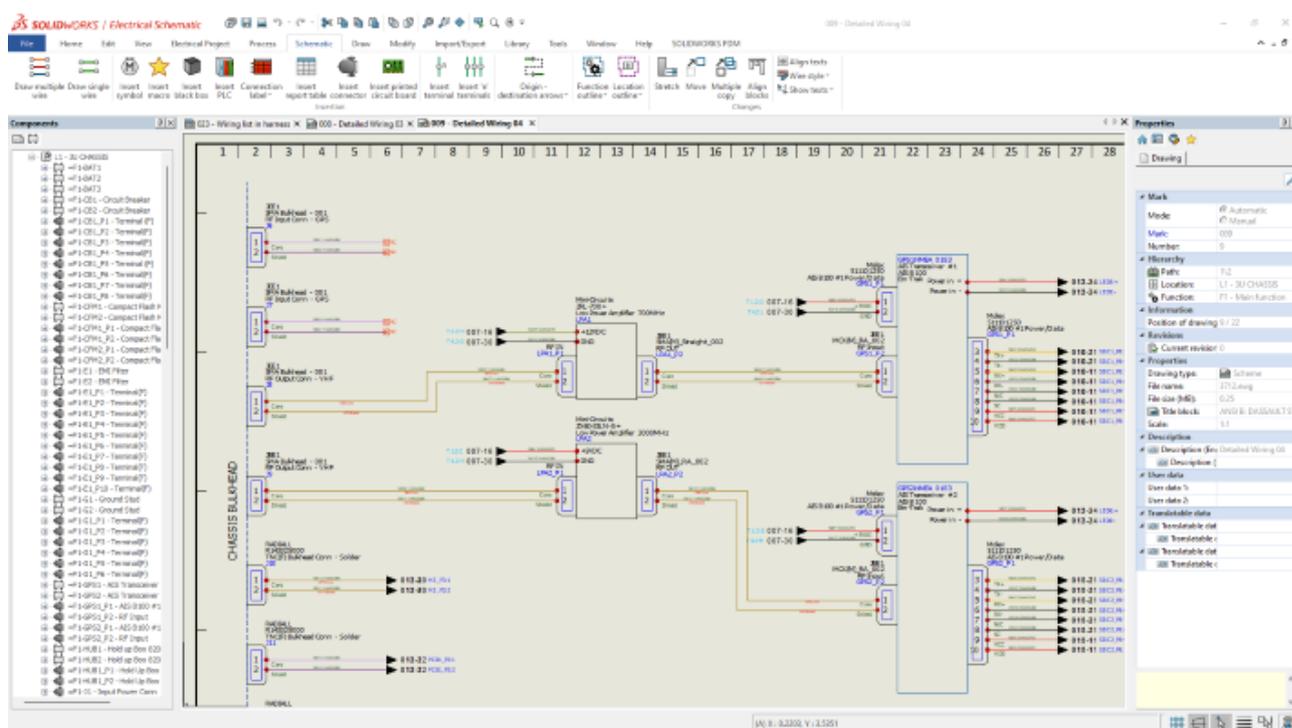


Рис. 5.2 Приклад інтерфейсу в SOLIDWORKS Electrical

У контексті електротехнічних систем ключовими об'єктами проектування є однолінійні (однолінійні) схеми, принципові схеми, схеми

з'єднань, кабельні журнали, компоновки шаф і щитів, відомості елементів та інші звіти. Однолінійна схема є високорівневим представленням електричної мережі або частини установки, де багатопровідні системи трифазного струму умовно згортаються в один графічний ланцюг, а апаратура (вимикачі, роз'єднувачі, трансформатори, шини) показується з основними параметрами та зв'язками. Однолінійні схеми особливо важливі для підстанцій і розподільчих пристроїв, оскільки дозволяють у компактній формі відобразити структуру комутації, резервування, секціонування шин і логіку живлення. Принципова електрична схема, навпаки, деталізує конкретні кола керування і сигналізації, вторинні кола вимірювання, блокування, логіку увімкнення та відключення апаратів, взаємодію з релейним захистом, а також підключення датчиків і виконавчих механізмів. У системах високої напруги принципова документація часто містить значний обсяг вторинних схем, де відображаються кола трансформаторів струму і напруги, ланцюги вимірювання, захисні й керуючі кола, а також інтерфейси з цифровими терміналами релейного захисту. Складність таких схем визначається великою кількістю сигналів, необхідністю дотримання стандартів і потребою в забезпеченні цілісності даних, що робить автоматизацію нумерації та звітності критично важливою.

Кабельні журнали є одним із найбільш характерних документів електротехнічного проекту, без якого практично неможливі монтаж і експлуатація. Кабельний журнал містить систематизовані відомості про кожен кабель: позначення, початок і кінець маршруту, кількість жил, перетин, тип, довжину (проектну), спосіб прокладання, належність до ланцюгів, інформацію про екранування, а також зв'язок із клемними колодками й апаратурою. У великих проектах кількість кабелів може обчислюватися сотнями і тисячами, і будь-яка ручна робота з таким масивом даних призводить або до неприпустимо великих витрат часу, або до помилок, які з'являються внаслідок неузгодженості між схемами й журналами. Електротехнічні CAD-системи вирішують цю проблему за рахунок того, що кабель розглядається як об'єкт, пов'язаний із клемами й пристроями, а журнал формується автоматично на основі моделі з'єднань. Аналогічні механізми застосовуються для формування переліків проводів, відомостей клем, таблиць маркування, списків обладнання та інших звітів. Показово, що в сучасних системах класу EPLAN Electric P8 можливості автоматизованого проектування включають використання стандартних символів, автоматичне з'єднання проводів, автоматизовану нумерацію та перехресні посилання, а також формування звітів і списків як частину типового процесу.

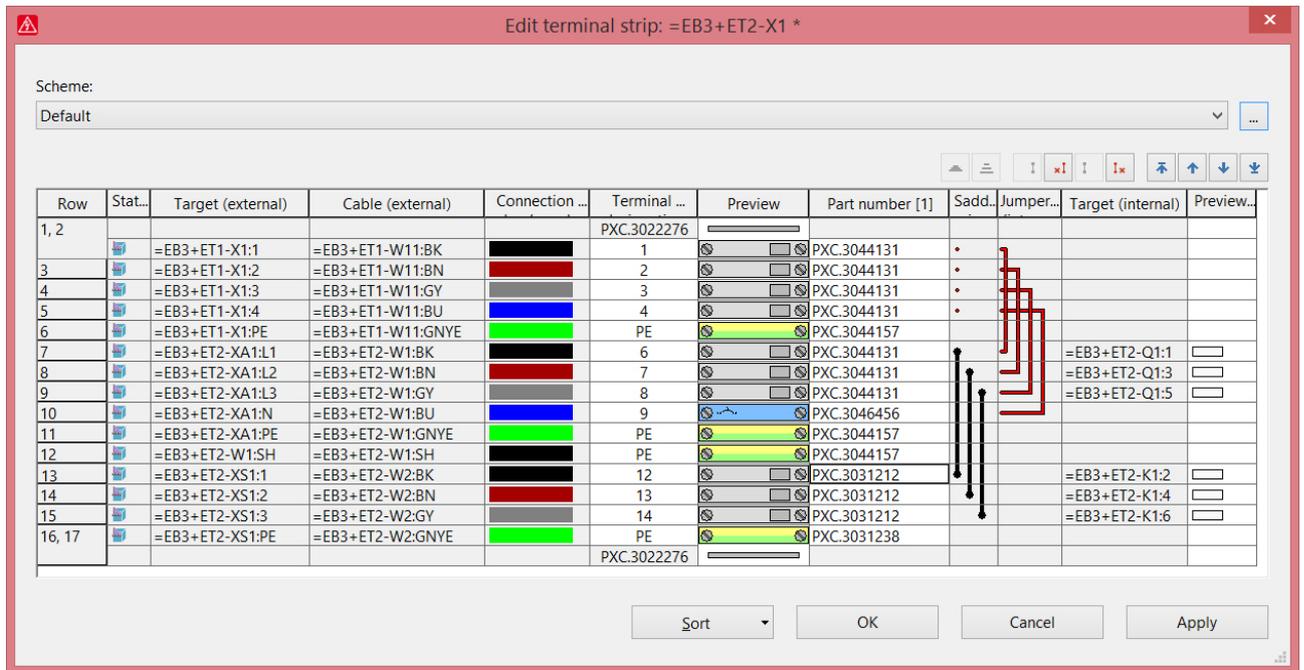


Рис. 5.3 Приклад інтерфейсу EPLAN

Компоновка електричних шаф управління та щитів є специфічною задачею, що знаходиться на межі між електротехнічним і механічним проєктуванням. З одного боку, необхідно визначити склад обладнання: автоматичні вимикачі, контактори, реле, джерела живлення, ПЛК, комунікаційні модулі, клемники, елементи індикації, засоби захисту. З іншого боку, потрібно розмістити це обладнання у просторі шафи, забезпечивши технологічність монтажу, відповідність нормам електробезпеки, допустимі температурні режими, необхідні відстані для вентиляції, зручність обслуговування і прокладання проводів. У спеціалізованих ECAD-системах компоновка шафи може підтримуватися як окремий модуль: інженер працює з монтажними панелями, DIN-рейками, кабель-каналами, а також з “футпринтами” апаратів, які мають реальні габарити. Деякі системи дозволяють пов’язувати компоновку з принциповою схемою, тобто забезпечувати трасованість: якщо на схемі додано новий апарат, він автоматично з’являється в списках обладнання і може бути доданий у шафу, а зміни у складі обладнання відображаються у звітах. Це скорочує кількість невідповідностей між схемою і фізичною реалізацією. У SOLIDWORKS Electrical, наприклад, існують можливості, пов’язані з 2D компоновками шаф та оптимізацією проводки, що підкреслює важливість інтеграції схеми й компоновки для коректної нумерації та документації.

Спеціалізовані електричні CAD-програми, які застосовуються у схемотехніці високої напруги та у системах релейного захисту, мають додаткові вимоги, зумовлені критичністю помилок і високими стандартами безпеки. У високовольтних системах некоректність у вторинних колах вимірювання чи керування може мати наслідком неправильну роботу захистів, що призводить до аварійних відключень або, навпаки, до відмови захисту спрацювати при аварії. Тому важливою є не лише правильність електричних з’єднань, а й відповідність стандартам побудови вторинних схем, маркування клем, розділення кіл, дотримання вимог до ізоляції, наявність резервування та коректність каналів

зв'язку з цифровими терміналами захисту. З позицій програмних засобів це означає, що ЕСАД повинна підтримувати розвинені механізми структурування проектів, ієрархічні схеми, повторне використання типових рішень, роботу з великими бібліотеками апаратури, а також сильні інструменти звітності й перехресних посилань. У системах релейного захисту особливу роль відіграють документи, що описують клемні підключення, кабельні з'єднання, таблиці сигналів та інтерфейси, оскільки саме ці дані використовуються під час пусконаладження, вторинної комутації та тестування. У великих проектах функція автоматичного формування таких документів є ключовою умовою якості. Саме тому системи електротехнічного САД підкреслюють автоматизовану нумерацію, крос-референси та автоматичні звіти як одну зі своїх базових переваг.

Важливим блоком теми є аналіз того, які саме задачі вирішують електротехнічні САПР, і чому ці задачі недостатньо ефективно виконуються у загальноінженерних САД. До базових задач електротехнічних САПР належать створення та редагування однолінійних схем і принципів схем, ведення бібліотек умовних позначень та апаратури, автоматичне маркування і нумерація проводів і компонентів, перевірка цілісності й логічних правил схем, генерація звітів і специфікацій, формування кабельних журналів, підготовка клемних таблиць та інших відомостей, а також підтримка компоновки шаф і панелей. У загальноінженерних САД можна намалювати однолінійну схему й навіть створити бібліотеку блоків символів, але виникає фундаментальна проблема: система не контролює семантику. Якщо інженер змінює позначення апарата, він має вручну відслідкувати всі місця, де це позначення використано. Якщо змінюється логіка з'єднань, потрібно вручну перераховувати провідники, а будь-які звіти треба або вести вручну в таблицях, або створювати напівавтоматичні процедури експорту, які залишаються залежними від дисципліни інженера і не гарантують відсутності помилок. У спеціалізованому ЕСАД позначення провідника чи компонента є атрибутом об'єкта, а звіт — це відображення бази даних проекту на заданий шаблон. Це означає, що при зміні схеми звіт може бути оновлений автоматично, а нумерація проводів — перерахована за заданими правилами. Так, AutoCAD Electrical прямо декларує автоматизацію нумерації проводів і генерації тегів компонентів, а також автоматичне формування та оновлення звітів. SOLIDWORKS Electrical акцентує на швидкому оновленні нумерації проводів у діаграмах і документації під час проектування, що знімає необхідність ручної перевірки “чи все перенумеровано”. У EPLAN Electric P8 як ключові переваги вказуються стандартні символи, автоматичне з'єднання проводів, автоматизована нумерація та крос-референси, що є критично важливими для великих проектів. Таким чином, науково коректно стверджувати, що спеціалізовані електротехнічні САПР мінімізують людський фактор у формальній частині проектної діяльності і переводять багато рутинних операцій у розряд керованих алгоритмів.

Окремої уваги заслуговує питання стандартних умовних позначень і дотримання стандартів. Електротехнічна документація є регламентованою: умовні графічні позначення, правила виконання схем, маркування провідників і клем, структура креслень та специфікацій визначаються стандартами, що забезпечують однозначність читання документації різними учасниками процесу. Загальноінженерні CAD не накладають ніяких предметних обмежень на символи, тому відповідність стандартам залежить лише від того, наскільки інженер дисципліновано використовує правильні блоки та шаблони. Електротехнічні CAD зазвичай постачаються з великими бібліотеками стандартних символів і механізмами їх коректного використання, що забезпечує нормативну узгодженість проектів і зменшує ризик того, що різні інженери будуть по-різному оформлювати однакові елементи. Показовим є те, що AutoCAD Electrical на офіційному рівні декларує наявність великої бібліотеки “інтелектуальних” електричних символів як базової можливості, що якраз і забезпечує стандартизованість оформлення. У комплексі з авто-нумерацією і звітністю це формує основу для виконання документації на рівні промислових вимог.

Автоматична генерація специфікацій і звітів у електротехнічних CAD є не допоміжною, а центральною функцією. Специфікація в електротехнічному проекті включає перелік апаратури (вимикачі, контактори, реле, блоки живлення, контролери), клемники, провідники і кабелі, а також може включати дані про виробника, каталожні номери, кількість, примітки щодо монтажу. У проектах підстанцій та енергетичних об'єктів додатково формується значний обсяг відомостей для вторинної комутації. Автоматизація звітів важлива з двох причин. По-перше, вона скорочує витрати часу на підготовку документації та зменшує кількість механічних помилок. По-друге, вона забезпечує узгодженість: якщо схема змінюється, то звіт може бути регенерований без ручного переписування таблиць. AutoCAD Electrical прямо підкреслює можливість автоматично генерувати та оновлювати кілька кастомізованих звітів, що ілюструє промислову спрямованість системи на документування. У EPLAN Electric P8 ідея “reports, lists, overviews” заявлена як один з ключових елементів продуктивності, а автоматизовані крос-референси й нумерація забезпечують цілісність цих звітів у процесі змін.

У рамках системного підходу до проектування електротехнічних систем доцільно розглядати “інформаційну модель проекту” як ядро ECAD. Інформаційна модель включає опис усіх пристроїв і їх атрибутів, структуру документів, мережі й з'єднання, правила маркування і нумерації, а також параметри, що визначають формування звітів. Схема в ECAD є графічним відображенням цієї моделі. З цієї позиції стає зрозумілим, чому загальноінженерні CAD, що оперують геометрією, не забезпечують необхідного рівня автоматизації: у них відсутнє поняття “проект як база даних”, а креслення є в основному набором графічних примітивів. Електротехнічні CAD, навпаки,

реалізують принцип “data-driven design”: інженер оперує не лініями, а пристроями й з’єднаннями, кожен з яких має атрибутивну структуру. Саме тому стає можливим те, що в загальноінженерних САД вимагало б складних скриптів або ручної роботи: авто-нумерація проводів, синхронізація маркувань на різних листах, контроль унікальності позначень, формування крос-референсів, генерація кабельних журналів, відомостей клем, списків проводів та матеріалів.

З практичного погляду робочий процес у електротехнічній САД-системі зазвичай починається з визначення структури проекту і стандартів, за якими він буде оформлений. На цьому етапі налаштовуються шаблони сторінок, системи нумерації, правила маркування, бібліотеки символів і пристроїв. Далі інженер створює однолінійні схеми, які фіксують архітектуру живлення, секціонування, резервування і зв’язки між основними апаратами. Після узгодження однолінійних схем виконується деталізація до принципів схем керування й вторинних кіл, включно з колами вимірювання, сигналізації, блокування, підключення пристроїв захисту, контролерів і модулів введення/виведення. В процесі створення схем система автоматично присвоює позначення, нумерує проводи за заданими правилами і веде перехресні посилання. Коли схема готова, формується монтажна документація: схеми з’єднань, клемні таблиці, кабельні журнали, відомості проводів і специфікації. Паралельно може виконуватися компоновка шафи: розміщення апаратів на DIN-рейках, визначення монтажних зон і кабель-каналів, що дозволяє врахувати технологічність і оптимізувати проводку. Після цього проект випускається у вигляді комплексу PDF/DWG/табличних звітів, які надходять у виробництво або монтаж. У цьому процесі ключовим є те, що більшість “табличних” документів не створюється вручну, а є результатом автоматичної генерації на основі проектних даних, що і є однією з основних причин застосування ECAD.

Зіставлення AutoCAD Electrical і SOLIDWORKS Electrical як прикладів спеціалізованих електротехнічних САД дозволяє продемонструвати загальні принципи класу. AutoCAD Electrical є розширенням AutoCAD із “Electrical toolset”, де наголос зроблено на інтелектуальних символах, автоматизації нумерації проводів, формуванні тегів компонентів і автоматичній генерації звітів; наявність великої бібліотеки символів і механізмів звітності позиціонується як основа зростання продуктивності. SOLIDWORKS Electrical, будучи частиною екосистеми SOLIDWORKS, акцентує інтеграцію схематичного проектування з контекстом механічного проектування та кабельного/шафового оформлення, а також підкреслює автоматичне оновлення нумерації проводів у процесі змін, що зменшує ризик документаційних розривів. У свою чергу, EPLAN Electric P8 як представник промислового ECAD-класу широко асоціюється з індустріальним стандартом для великих електротехнічних проектів і підкреслює стандартні символи, автоматизовану нумерацію, крос-референси і звіти як невід’ємну частину процесу. Незважаючи на різні екосистеми й позиціонування, ці системи об’єднує загальна ідея: електротехнічна документація повинна бути керованою, узгодженою і

відтворюваною, а отже повинна будуватися на формалізованій моделі, де автоматизація нумерації, бібліотек, звітів і стандартів є базовою функцією.

У межах теми доцільно також пояснити, чому проектування підстанцій, мереж та шаф керування потребує спеціалізованих інструментів і не може бути “повністю закрито” універсальними САД навіть за умови високої кваліфікації інженера. По-перше, електротехнічні проекти є масивними з точки зору кількості об’єктів і зв’язків, що робить ручне ведення нумерації і таблиць практично неефективним. По-друге, електротехнічна документація повинна бути не лише гарно оформленою, а й логічно цілісною; будь-яка неузгодженість між схемою й кабельним журналом є помилкою, яка проявляється на монтажі або під час експлуатації. По-третє, зміни є неминучими: у процесі проектування уточнюються вимоги, змінюється апаратура, коригуються траси кабелів, додаються сигнали, і якщо система не підтримує автоматизоване оновлення звітів та нумерації, то кожна зміна стає джерелом каскадних помилок. По-четверте, електротехнічні стандарти є невід’ємною частиною документування; відступи від стандартів ускладнюють читання документації, вводять неоднозначність і можуть бути неприйнятними в промислових проектах. Електротехнічні САД вирішують ці проблеми, надаючи інструменти, які від початку проектуються під електротехнічну предметну область, а не пристосовуються до неї через ручні прийоми.

Програмні засоби САПР для проектування електротехнічних систем утворюють комплекс, який включає як інструменти планування та аналізу енергосистем (для прийняття технічних рішень на рівні режимів і параметрів), так і електротехнічні САД для формування стандартизованої документації і супровідних відомостей на рівні конкретного обладнання, кабелів і монтажних рішень. Спеціалізовані електротехнічні САД-системи є необхідними тому, що вони перетворюють креслення на керовану інформаційну модель, забезпечують авто-нумерацію проводів і компонентів, підтримку стандартних умовних позначень, автоматичну генерацію звітів і специфікацій та узгодженість багатолістової документації. Декларовані виробниками функції AutoCAD Electrical щодо автоматизації нумерації та звітів, SOLIDWORKS Electrical щодо автоматичного оновлення нумерації проводів у документації, а також EPLAN Electric P8 щодо стандартних символів, автоматизованої нумерації та крос-референсів є показовими прикладами того, як електротехнічні САПР реалізують предметно-орієнтований підхід до проектування. У свою чергу, застосування таких систем у проектах підстанцій, мереж і щитів керування забезпечує підвищення якості проекту, скорочення термінів, зменшення кількості помилок на етапі монтажу та підвищення надійності експлуатації електротехнічних об’єктів.

Список інформаційних джерел:

Autodesk. AutoCAD Electrical toolset (Electrical design software) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.autodesk.com/products/autocad/included-toolsets/autocad-electrical>

Dassault Systèmes. SOLIDWORKS Electrical Schematic [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-electrical-schematic>

SOLIDWORKS Tech Blog. Understanding 2D Cabinet Layouts in SOLIDWORKS Electrical. Part 1 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://blogs.solidworks.com/tech/2021/04/understanding-2d-cabinet-layouts-in-solidworks-electrical-part-1.html>