

CAD-системи для проєктування електронних, структурних, функціональних та інших схем

Тема присвячена класу програмних засобів, що забезпечують автоматизоване проєктування електронних, структурних, функціональних та інших видів схем, які є ключовими носіями інформації про будову й принципи роботи технічних систем у галузях електротехніки, енергетики, автоматизації та вбудованих систем керування. У сучасній інженерній практиці схема як форма технічного опису виконує не лише комунікативну функцію, тобто передавання знань між учасниками проєкту, а й слугує джерелом даних для подальшої формалізованої обробки, перевірки коректності, генерації документації, підготовки матеріалів для виробництва та експлуатації. Це зумовлює необхідність застосування систем автоматизованого проєктування, які здатні підтримувати інженера на всіх стадіях життєвого циклу виробу або технічної системи: від концептуального опису, вибору архітектури та аналізу вимог до детального проєктування принципів електричних схем, трасування друкованих плат, інтеграції з механічними конструкціями та підготовки до виробничих процесів. Особливу актуальність теми становить той факт, що в сучасних технічних системах, зокрема у вбудованих системах управління енергетичними об'єктами, спостерігається тісна інтеграція електронних компонентів, програмного забезпечення, систем зв'язку та механічних елементів, що потребує узгодженого, мультидисциплінарного підходу до проєктування, який може бути ефективно реалізований лише в інтегрованих CAD/EDA середовищах.

У загальній класифікації інженерних систем автоматизованого проєктування під терміном **CAD (Computer-Aided Design)** розуміють сукупність програмно-апаратних засобів, методів і інформаційних моделей, призначених для створення, модифікації, аналізу та оптимізації проєктних рішень. У межах CAD виокремлюється спеціалізований напрям **EDA (Electronic Design Automation)**, що орієнтований на автоматизацію процесів проєктування електронних пристроїв, насамперед принципів схем (schematic capture), друкованих плат (PCB design), бібліотек компонентів, перевірок правил (rule checks), моделювання електричних режимів і формування вихідних файлів для виробництва. У технічній літературі також використовується термін ECAD (Electronic CAD) як підклас CAD, який акцентує саме на електронній складовій, тоді як MCAD (Mechanical CAD) позначає засоби механічного проєктування. Розмежування CAD і EDA є концептуально важливим, оскільки воно відображає різницю між задачами загального проєктування (наприклад, геометричне моделювання деталей, розрахунок міцності, кінематики, технологічності) та задачами електронного проєктування (структура електричних з'єднань, логічні та електричні правила, параметризація компонентів, електричні обмеження, виробничі формати для плат). Водночас сучасний тренд розвитку інженерних інформаційних технологій полягає у зближенні й взаємопроникненні ECAD та MCAD підходів через необхідність забезпечення узгодженості електронних модулів і механічних корпусів, систем кріплення, розташування роз'ємів, теплових режимів, електромагнітної сумісності та ергономіки. Саме в цьому контексті особливої уваги заслуговують інтегровані платформи, здатні

підтримувати одночасно електронний і механічний дизайн, однією з яких є Autodesk Fusion 360 разом з модулем Fusion 360 Electronics.

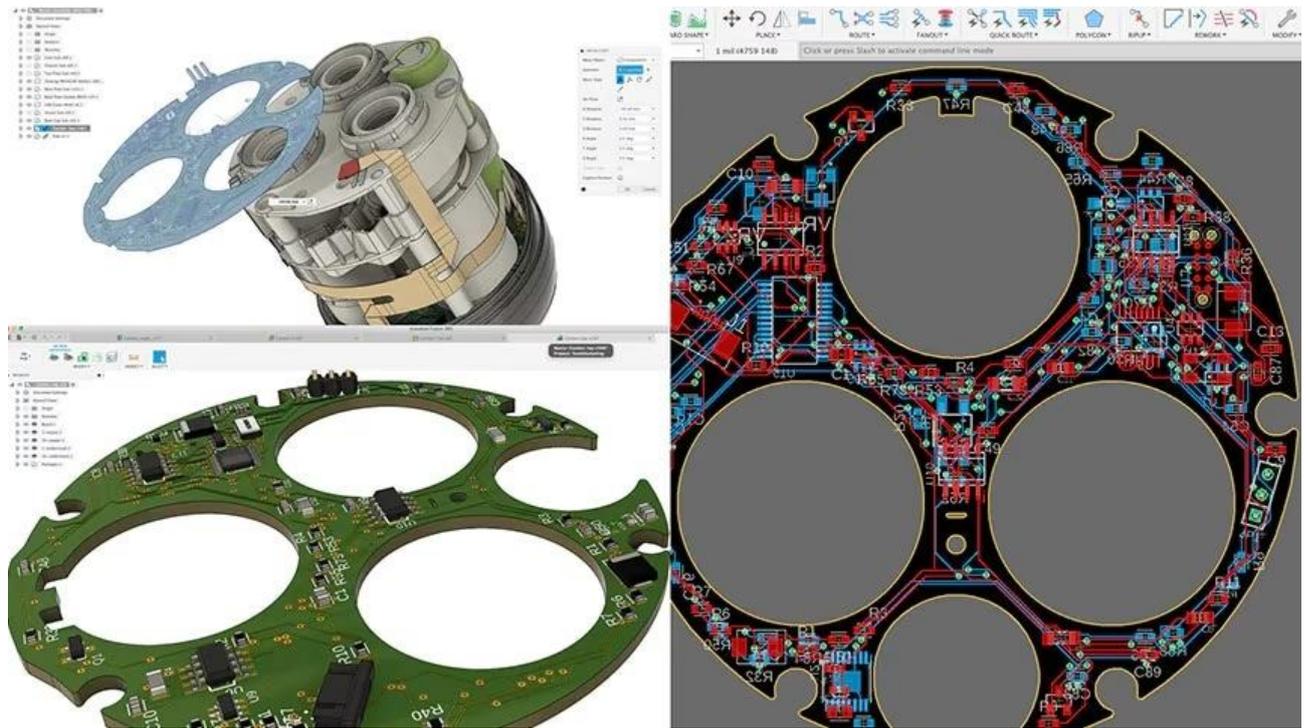


Рис. 4.1 Реалізація CAD/EDA систем на різних етапах проектування

Для коректного розуміння предметної області необхідно визначити типи схем, які створюються у процесі проектування технічних систем, і які, відповідно, мають підтримуватися CAD/EDA інструментарієм. Принципова електрична схема є основним видом документа, що відображає електричні з'єднання та взаємодію елементів системи незалежно від їх фізичного розташування. У принциповій схемі формалізуються електричні ланцюги живлення та сигналів, вказуються умовні графічні позначення елементів, їхні електричні параметри, номінали та взаємозв'язки. Для низьковольтних електричних схем у галузі енергетики та автоматизації принципова схема зазвичай включає кола керування й сигналізації, елементи захисту (автомати, запобіжники, реле контролю), комутаційні пристрої (контактори, реле), датчики, кнопки, індикатори, а також елементи живлення вбудованих систем (DC/DC перетворювачі, стабілізатори, фільтри). Принципова схема може бути як суто електротехнічною (для щитових систем керування), так і електронною (для друкованих плат контролерів, датчиків, інтерфейсних модулів). Монтажні схеми та схеми з'єднань на відміну від принципових орієнтуються на практичну реалізацію фізичних з'єднань: вони відображають клемні колодки, кабелі, маркування провідників, роз'єми, розташування апаратів у шафі або на монтажній панелі. Для енергетичних об'єктів монтажна документація має критичне значення, оскільки вона визначає коректність монтажу, забезпечує однозначність підключень при обслуговуванні та модернізації, а також дозволяє мінімізувати помилки під час польових робіт. Структурні схеми представляють систему на рівні функціональних блоків і зв'язків між ними, не деталізуючи конкретні елементи. Вони використовуються для формування архітектури, визначення меж підсистем, розподілу функцій і потоків інформації чи енергії.

Функціональні схеми є більш деталізованими за структурні і показують логіку роботи системи, взаємозалежності сигналів, режими, алгоритми, а також причинно-наслідкові зв'язки між подіями та реакціями системи. У вбудованих системах керування енергетичними об'єктами функціональні схеми часто поєднуються з описом програмної логіки, таблицями сигналів входів/виходів, діаграмами станів, часовими діаграмами та іншими формами представлення алгоритмів.

Розгляд САД-систем для проектування низьковольтних електричних схем доцільно розпочати з аналізу характерних вимог цієї предметної області. Низьковольтні схеми зазвичай функціонують у діапазоні до 1000 В змінного струму або до 1500 В постійного струму, але у контексті автоматики керування, сигналізації, електронних модулів і живлення контролерів найбільш поширені рівні 24 В DC, 12 В DC, 5 В DC та проміжні рівні. Такі схеми характеризуються великою кількістю повторюваних фрагментів, необхідністю дотримання стандартів позначень і маркування, потребою у генерації специфікацій, кабельних журналів, переліків провідників, таблиць клемних з'єднань та перехресних посилань. Крім того, низьковольтні схеми у складі енергетичних систем часто мають підвищені вимоги до надійності, електробезпеки, електромагнітної сумісності, резервування та діагностичних функцій. З огляду на це САД для електротехніки повинні забезпечувати зручний механізм побудови багатолістових проектів, підтримку стандартних бібліотек умовних позначень, автоматичну нумерацію компонентів і проводів, засоби логічної перевірки з'єднань, інтеграцію з системами керування даними (PDM/PLM), а також формування вихідної документації за встановленими шаблонами. До найбільш відомих систем такого класу належать AutoCAD Electrical, EPLAN Electric P8, SolidWorks Electrical, SEE Electrical та інші, які орієнтовані на промислове проектування щитової автоматики, розподільчих пристроїв, систем керування приводами, диспетчеризації, сигналізації тощо. Їх функціональні можливості часто включають інструменти для проектування клемників і шаф, побудови маршрутів кабелів, формування маркування провідників, а також генерації звітів. У науково-методичному контексті важливо підкреслити, що такі системи відрізняються від "універсальних" графічних редакторів тим, що вони працюють з електричними схемами як з формалізованими даними, які підлягають обробці, перевірці й автоматичному узгодженню. Наприклад, коли інженер додає реле або контактор, система може автоматично вставляти необхідні допоміжні контакти на інших листах, формувати перехресні посилання, відстежувати використання контактів, ідентифікувати конфлікти нумерації або невідповідність типів сигналів. Аналогічно, введення клемника як об'єкта може породжувати таблицю клем, список проводів і кабелів, а також забезпечувати узгодження між принциповою і монтажною частинами документації.

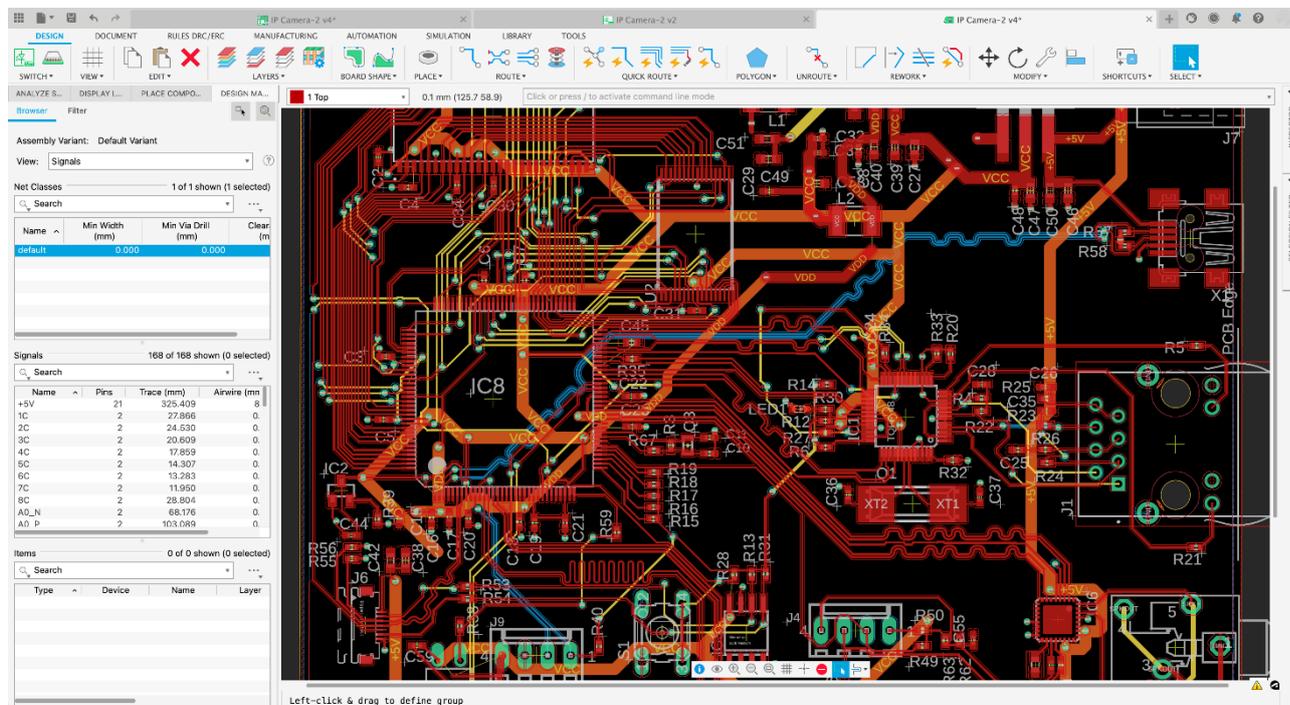


Рис. 4.2 Приклад інтерфейсу програмних продуктів для розробки друкованих плат

Паралельно з електротехнічними CAD, у проектуванні вбудованих систем управління енергетичними об'єктами широко застосовуються EDA/ECAD системи для створення електронних схем і друкованих плат. Системи керування в енергетиці можуть включати мікроконтролери або промислові процесори, модулі зв'язку (Ethernet, RS-485, CAN, LTE, LoRaWAN), аналого-цифрові й цифро-аналогові перетворювачі, інтерфейсні драйвери, гальванічну розв'язку, датчики струму, напруги, температури, вібрації, а також силові елементи керування (MOSFET/IGBT драйвери, релейні виходи, твердотільні реле). Відповідно до цього EDA система повинна забезпечувати підтримку бібліотек електронних компонентів, формування принципової схеми з урахуванням електричних правил, проектування PCB з правилами трасування та ізоляційними вимогами, а також генерацію виробничих файлів: Gerber або ODB++, файли свердління, pick-and-place, специфікації, збірні креслення, а в сучасних умовах ще й 3D-моделі плати для механічної інтеграції. Типові промислові системи цього класу включають Altium Designer як один із найпотужніших комплексів для професійної розробки електроніки, а також KiCad як широко поширений відкритий інструмент, придатний для навчання, прототипування та частини професійних задач. До цього ж класу належить Fusion 360 Electronics, який є важливим для розуміння сучасних інтеграційних тенденцій.

Для забезпечення системності викладу доцільно розглянути характерні функціональні модулі, які зазвичай присутні в CAD/EDA середовищах, і пояснити їх роль у проектуванні. Середовище створення принципових схем виконує завдання формального опису електричної логіки з'єднань. На цьому етапі інженер вибирає елементи з бібліотек, розміщує їх на аркуші, визначає електричні мережі та вузли, позначає сигнали і джерела живлення, задає параметри та атрибути, що є важливими для подальшого формування

специфікації і переходу до плати. Система, яка реалізує схематичний ввід, як правило, підтримує ієрархічні структури, що дозволяє будувати складні проекти з повторюваними модулями, використовувати блоки, шаблони, підсхеми, а також створювати різномірні моделі від функціональних блоків до конкретних електричних реалізацій. Засоби електричної перевірки правил (ERC) відіграють роль первинного контролю якості, зокрема виявляють нез'єднані входи, конфлікти типів мереж, некоректні з'єднання живлення, дублікати ідентифікаторів, недопустимі зв'язки між типами сигналів. У контексті наукового підходу ERC можна розглядати як реалізацію формальних обмежень, що накладаються на граф електричної схеми, де вершини відповідають виводам компонентів, а ребра - електричним з'єднанням. Перехід від принципової схеми до друкованої плати в EDA зазвичай реалізується через механізм нетліста або внутрішньої моделі зв'язності, яка визначає, які контакти повинні бути з'єднані фізичними провідниками на платі. У процесі проектування PCB система підтримує розміщення компонентів, визначення контурів плати, отворів, шарів, класів мереж, правил ширин і зазорів. Перевірка DRC, на відміну від ERC, працює з геометричними та технологічними обмеженнями: мінімальні відстані між провідниками, розміри площадок, правила для високовольтних або високострумних ланцюгів, допуски виробництва. Після завершення плати формуються виробничі файли, які забезпечують можливість виготовлення та монтажу.

Окремий аспект, що є принципово важливим для теми лекції, пов'язаний із проектуванням структурних та функціональних схем як засобів системного моделювання і документування архітектури та алгоритмів. У науковій традиції структурна схема трактується як графічна модель системи у вигляді сукупності блоків, що реалізують певні функції, та зв'язків між ними, які відображають потоки сигналів, даних або енергії. Такий тип схем є фундаментальним у системній інженерії, оскільки забезпечує перехід від опису вимог до архітектурного рішення. В енергетичних системах структурні схеми застосовуються для подання елементів енергетичного об'єкта (джерела енергії, перетворювачі, лінії, навантаження), а також підсистем керування (датчики, контролери, виконавчі механізми, канали зв'язку). Функціональна схема деталізує логіку взаємодії блоків і може включати умовні залежності, тригери, сигнали керування, зворотні зв'язки, а інколи — часові параметри і режими. У проєктах вбудованих систем керування енергетичними об'єктами, де алгоритм керування визначає безпечність і ефективність, функціональні схеми набувають ролі проміжної ланки між електричною частиною і програмною реалізацією. Наприклад, система може реалізовувати режими автоматичного включення резерву, керування генератором, балансування навантаження, керування компенсацією реактивної потужності, моніторинг параметрів мережі й аварійні відключення. Для таких задач функціональна схема має відобразити не лише наявність каналів вимірювання і керування, а й умови переходу між режимами, залежності сигналів, пріоритети та блокування.

У практиці застосування CAD/EDA інструментів важливим є питання інтеграції різних рівнів опису системи: від структурного й функціонального до принципового і конструкторського. У традиційних підходах структурні та функціональні схеми часто виконувалися окремо в засобах загального

призначення, наприклад у редакторах діаграм, тоді як принципові схеми — у спеціалізованих CAD/EDA. Такий розрив створює ризики несумісності та втрати узгодженості, особливо в складних проєктах. Сучасні підходи прагнуть мінімізувати ці ризики через єдині інформаційні моделі, використання загальних бібліотек і компонентів, а також через інтеграцію CAD із системами керування даними про виріб. У контексті теми особливо важливо розуміти, що схеми, створені в CAD/EDA, містять не лише графічну інформацію, а й атрибутивні дані, які можуть використовуватися для подальшої автоматизації, наприклад для генерації списків матеріалів, аналізу відповідності вимогам, перевірки стандартів, формування звітів та інтеграції з виробничими процесами. Таким чином, CAD/EDA у сучасному розумінні слід розглядати як елемент цифрового інженерного середовища, де ключову роль відіграє керування даними, трасованість змін, версіонування, узгодженість між дисциплінами.

Значну частину прикладної цінності CAD/EDA системи визначає рівень її підтримки документації та стандартів. У електротехнічному проєктуванні існує потреба в дотриманні правил оформлення, які визначаються національними та міжнародними стандартами. Це стосується умовних графічних позначень, способів маркування елементів, формату специфікацій, структури документів. У промисловій автоматизації і щитових проєктах критичною є коректність маркування провідників і клем, оскільки саме ці дані використовуються монтажниками й експлуатаційним персоналом. Сучасні CAD системи для електрики дозволяють створювати шаблони проєктів, де заздалегідь визначені структури сторінок, рамки, основні написи, правила нумерації, а також формати звітів. У EDA для електроніки подібну роль відіграють правила і шаблони бібліотек, що впливають на формування специфікацій і виробничих документів. Науково коректно підкреслити, що стандартизація в CAD/EDA не є суто формальною вимогою; вона знижує ентропію проєктної інформації, забезпечує однозначність інтерпретації, спрощує аудит і сертифікацію, а також створює основу для автоматизованого аналізу й перевірки.

У межах огляду систем автоматизованого проєктування для низьковольтних схем доцільно розглянути два ключові напрямки: електротехнічні CAD для проєктування щитів та інженерних електричних схем і EDA для електронних модулів вбудованих систем. Електротехнічні CAD, такі як EPLAN Electric P8 або AutoCAD Electrical, зазвичай надають засоби для швидкого створення схем керування і силових ланцюгів, формування клемників, проєктування монтажних панелей, автоматичного розміщення маркувань, а також генерації переліків кабелів, провідників та апаратури. Їх модель даних орієнтована на специфіку електротехнічних документів: поняття “провідник”, “клема”, “кабель”, “апарат”, “контакт” мають явну семантику і можуть бути об’єктами автоматизації. Наприклад, вставлення пристрою може супроводжуватися автоматичною вставкою його контактів у різні місця схеми з перехресними посиланнями. EDA системи, навпаки, оперують категоріями електронного проєктування: компоненти мають символи й посадкові місця, кожен контакт має електричний тип, мережі можуть бути класифіковані за призначенням, а переходи між схемою і PCB реалізуються через узгоджену модель зв’язності. Це означає, що під час вибору системи для конкретного проєкту необхідно враховувати, які артефакти є результатом роботи: якщо

ключовим результатом є документація для монтажу щита з клемниками і проводами, то спеціалізована електротехнічна CAD забезпечить максимальну продуктивність; якщо ж результатом є розробка друкованої плати контролера або датчика, то необхідна EDA/ECAD система.

У сучасних вбудованих системах управління енергетичними об'єктами проектування часто охоплює обидві складові одночасно. З одного боку, існує електротехнічна частина, що включає підключення до силових ліній, реле, контактори, захисти, джерела живлення, клемні з'єднання. З іншого боку, існує електронна частина, яка може бути реалізована на окремій платі чи модулі й включає мікроконтролер, інтерфейси, вимірювальні ланцюги, гальванічну розв'язку, системи живлення електроніки. Крім того, система має механічне виконання: корпус, панель, монтажні кріплення, кабельні вводи, тепловідведення. У такій ситуації особливого значення набуває інтеграція між ECAD і MCAD, оскільки помилки на стику дисциплін можуть призводити до суттєвих затрат часу і коштів. Наприклад, некоректне розташування роз'ємів може унеможливити монтаж у корпусі; неправильна висота компонентів може спричинити механічні конфлікти; неврахування кріплень може призвести до потрапляння отворів у критичні зони плати; невідповідність габаритів плати — до необхідності переробки корпусу або плати. Саме тому інтегровані платформи, які дозволяють одночасно працювати з електронною і механічною моделями, забезпечують суттєве підвищення ефективності проектування.

Fusion 360 Electronics у цьому контексті є показовим прикладом сучасної інтегрованої ECAD-платформи, що функціонує в екосистемі Autodesk Fusion 360. Концептуальна особливість Fusion 360 полягає в тому, що він історично створювався як хмарно-орієнтований інструмент для механічного проектування, параметричного моделювання, підготовки виробництва (CAM) і спільної роботи. Додавання електронного модуля створило можливість реалізувати наскрізний робочий процес, у якому схема, плата і механічна модель можуть бути узгоджені в єдиному середовищі без складних операцій експорту-імпорту та втрати даних. Fusion 360 Electronics забезпечує функції створення принципів схем, управління бібліотеками, перевірок електричних правил, переходу до РСВ, трасування й перевірки правил проектування плати, а також формування 3D представлення плати. Ключовим моментом є те, що 3D-модель плати може бути використана в механічній частині Fusion 360 для перевірки компоновки виробу, узгодження корпусу і плати, позиціонування роз'ємів і кріплень, а також для аналізу габаритних конфліктів. Таким чином, Fusion 360 можна вважати унікальною CAD-системою в тому сенсі, що вона поєднує електронний та механічний дизайн в єдиному інженерному середовищі і дозволяє реалізувати інтеграційний підхід ECAD-MCAD.

На рівні методології проектування у Fusion 360 Electronics типowo виділяють декілька взаємопов'язаних етапів. Спочатку виконується розробка принципової схеми як формального опису електричної логіки виробу. На цьому етапі інженер формує перелік компонентів, визначає електричні мережі, підбирає номінали, задає параметри й атрибути, що необхідні для специфікації та подальшої інтеграції. Далі застосовуються засоби перевірки ERC, які дозволяють виявляти типові помилки ще до переходу на рівень плати. Після узгодження схеми виконується перехід до РСВ, де реалізується розміщення

компонентів, визначення контурів плати, шарів, правил трасування, а також власне трасування з'єднань. Перевірка DRC на цьому етапі забезпечує відповідність геометричних параметрів технологічним обмеженням. Після цього формується 3D модель плати, яка може бути використана в механічному середовищі Fusion 360 для інтеграції з корпусом. Науково важливим є те, що такий процес забезпечує двонапрямну узгодженість: зміни в платі можуть вимагати змін у корпусі, і навпаки, що формує основу для ітераційного багатодисциплінарного проектування.

Для вбудованих систем управління енергетичними об'єктами застосування інтегрованого підходу має додаткові переваги, пов'язані з особливостями експлуатаційних вимог. Такі системи часто монтуються в обмежених просторах електричних шаф, працюють у середовищах з підвищеною температурою, вібраціями, впливом електромагнітних полів, а також повинні забезпечувати простоту монтажу й обслуговування. Тому інтеграція електронного модуля з механічною конструкцією та електротехнічною частиною підключень стає не просто зручністю, а необхідністю для забезпечення надійності. Наприклад, грамотне позиціонування роз'ємів і кабельних ввідів полегшує монтаж і знижує ризик механічних пошкоджень; узгодження висот компонентів і тепловідведення впливає на теплові режими; розміщення кріплень може впливати на електричну безпеку та ізоляційні зазори. У цьому сенсі інтегрована CAD-платформа дозволяє розглядати виріб як цілісну систему, де електроніка, механіка та електротехнічні підключення є взаємопов'язаними підсистемами.

Важливо також наголосити на тому, що CAD та EDA інструменти виконують не лише функцію створення схем і плат, а й забезпечують управління знаннями та повторне використання проектних рішень. Це реалізується через бібліотеки компонентів, шаблони проектів, модулі ієрархічного проектування, використання параметризованих блоків. У проектуванні низьковольтних схем повторюваність фрагментів є високою: типові ланцюги живлення, захисту, керування, підключення датчиків, інтерфейсні вузли можуть переноситися між проектами. Наявність бібліотек і шаблонів дозволяє зменшити кількість помилок і скоротити час розробки, а також підвищує уніфікацію документації. Науково це можна трактувати як реалізацію принципів модульності та абстракції в інженерному проектуванні, де складна система описується як композиція типових модулів, кожен з яких має визначені інтерфейси і функції.

Окремий розділ теми становить питання проектування загальних структурних і функціональних схем у комплексі з CAD/EDA. З позицій системної інженерії структурні схеми формують основу архітектурного опису, а функціональні — основу алгоритмічного опису. Їх роль особливо помітна на ранніх стадіях проектування, коли ще не визначені конкретні компоненти і топологія, але необхідно зафіксувати вимоги, обмеження та принципи взаємодії підсистем. У контексті енергетичних об'єктів структурна схема може відображати джерела енергії, силові перетворювачі, шини, навантаження, системи резервування, а також підсистеми вимірювання й керування. Функціональна схема, у свою чергу, може описувати логіку автоматичного регулювання, включення резервних ліній, реалізацію захистів, взаємодію з диспетчерськими системами, логіку сигналізації аварій. У вбудованих системах

керування наявність таких схем полегшує перехід до програмної реалізації, оскільки вони формують логічний каркас для коду, таблиць входів/виходів, структур даних, протоколів взаємодії.

З практичного погляду процес проєктування комплексної системи, яка включає низьковольтну електрику та вбудовану електроніку, можна представити як послідовність рівнів деталізації. На першому рівні формується структурна модель, де визначаються блоки і взаємозв'язки. На другому рівні формується функціональна модель, де задаються режими та алгоритми. На третьому рівні реалізується принципова схема як формальна електрична модель з конкретними компонентами. На четвертому рівні виконується реалізація в апаратному вигляді: монтажна документація для щитової частини і PCB для електронної частини. У кожному з цих рівнів CAD/EDA системи відіграють роль інструмента формалізації та перевірки, а інтеграція між рівнями визначає якість кінцевого результату. Якщо розриви між рівнями великі, виникає ризик суперечностей: наприклад, функціональна схема може передбачати певні сигнали, які не реалізовані в принциповій схемі, або принципова схема може включати компоненти, що не відповідають структурним обмеженням. Сучасні тенденції розвитку CAD/EDA спрямовані на зменшення таких ризиків через посилення зв'язності даних і можливості трасування вимог до конкретних елементів реалізації.

У підсумку огляду можна сформулювати критерії вибору CAD/EDA системи для задач, які розглядаються в межах теми. Якщо основною задачею є проєктування щитових систем керування, де важливими є клемники, кабельні журнали, маркування провідників, стандартні апарати та формування виробничої документації для монтажу, доцільно використовувати спеціалізовані електротехнічні CAD системи. Якщо ключовою задачею є розробка електронних модулів вбудованих систем керування, включаючи принципові схеми і друковані плати, необхідні EDA/ECAD інструменти. Якщо ж проєкт потребує тісної інтеграції електронної частини з механічною конструкцією, а також швидких ітерацій між платою і корпусом, інтегровані платформи на зразок Fusion 360 з модулем Fusion 360 Electronics можуть забезпечити істотну перевагу завдяки єдиному середовищу і синхронізації ECAD та MCAD. Таким чином, Fusion 360 у межах даної теми слід розглядати як приклад еволюції CAD-систем у напрямі мультидисциплінарної інтеграції, яка відповідає потребам сучасної інженерної практики у сфері енергетики, автоматизації і вбудованих систем.