

## «Електромеханічна інтеграція в САПР»

У сучасній енергетиці та суміжних галузях автоматизації дедалі більше пристроїв мають змішану природу: електроніка (плати керування, датчики, інтерфейсні модулі, джерела живлення), електротехнічні компоненти (клемники, апарати захисту, контактори, реле, перетворювачі), засоби комутації та підключення (роз'єми, кабелі, шини), а також механічні складові (корпуси, панелі, монтажні плити, рами, кріплення, ущільнення, вентиляційні вузли). У таких виробках помилка на межі дисциплін часто є дорожчою за помилку всередині однієї дисципліни, оскільки вона проявляється вже на етапі складання, монтажу або випробувань і може призвести до переробки плат, корпусів, кабельних джгутів, клемних підключень, а інколи — до порушення вимог безпеки чи надійності. Саме тому електромеханічна інтеграція в САПР розглядається як ключовий елемент цифрового інженерного циклу, що забезпечує скорочення кількості фізичних прототипів, зменшення ризиків колізій, підвищення точності монтажу та якіснішу взаємодію між електро- та механоінженерами. На прикладах SolidWorks та Fusion 360 можна продемонструвати типову логіку такого узгодженого проєктування: 3D CAD використовується для моделювання корпусів і панелей, компоновки обладнання та трасування монтажних шляхів, тоді як електричні компоненти (від плати до шафових апаратів) враховуються у цій моделі як цифрові об'єкти з геометрією, атрибутами, точками підключення і просторовими обмеженнями. Особливо варто згадати модуль SolidWorks Electrical 3D, який ілюструє ідею зв'язку між електричною схемою/списком обладнання і 3D компоновкою в межах екосистеми SOLIDWORKS.

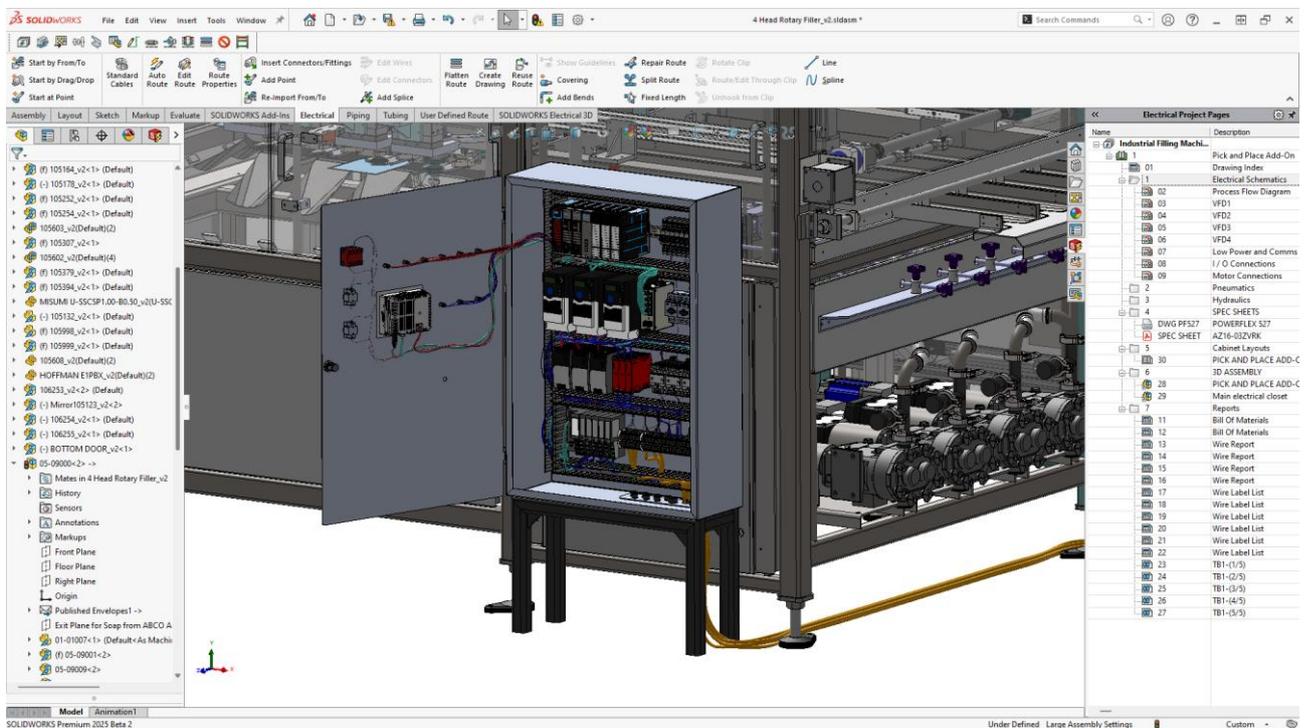


Рис. 6.1 Приклад реалізації 3D візуалізації компоновки обладнання

З методологічної позиції електромеханічна інтеграція є реалізацією мультидисциплінарного проєктування, де кінцевий продукт описується не як сума “креслень” окремих частин, а як єдина система з узгодженими моделями. У

класичній (роз'єднаній) організації робіт електричний інженер створює принципові схеми, специфікації і, за потреби, проєкт друкованої плати або шафової проводки, тоді як механічний інженер проєктує корпус і кріплення, орієнтуючись на габаритні вимоги з технічного завдання та приблизні моделі. Узгодження між цими частинами часто виконується вручну: через обмін 2D кресленнями, PDF, скріншотами, таблицями габаритів або 3D файлами, які не пов'язані з актуальними електричними даними. У результаті будь-яка зміна в електричній частині (інший роз'єм, інший форм-фактор плати, інша висота компонента, інша довжина клемника чи DIN-рейки) потребує повторного циклу ручного узгодження. Така модель робіт породжує систематичні ризики: зростає ймовірність, що механічна модель не відповідає фінальному складу електричних компонентів; збільшується кількість ітерацій; виникають приховані колізії, які “вилазять” на монтажі; збільшується кількість прототипів і, відповідно, витрати часу та бюджету. Електромеханічна інтеграція в САПР змінює цю картину, переносючи процес узгодження у цифровий простір: електричні компоненти отримують геометричні представлення, а механічне середовище отримує доступ до їхнього розташування, габаритів і підключень. Внаслідок цього з'являється можливість виконувати віртуальні перевірки, зокрема перевірки колізій і монтажних допусків, ще до виготовлення фізичного зразка, а також підтримувати узгодженість між дисциплінами в ітераційному циклі.

Для енергетичних пристроїв електромеханічна інтеграція має особливе значення через специфіку експлуатації. По-перше, такі пристрої часто монтуються у стандартні шафи або на панелі, де простір жорстко обмежений, а розміщення апаратури повинно відповідати правилам безпеки й сервісного доступу. По-друге, в умовах енергетики важливими є теплові режими, вентиляція, вібраційна стійкість, механічна міцність, пиловологозахист, а також електромагнітна сумісність. По-третє, багато енергетичних пристроїв вимагають чіткої організації кабельних трас і мінімізації помилок підключення, що неможливо забезпечити лише “гарною схемою” без просторової перевірки монтажу. По-четверте, у пристроях керування та автоматики часто поєднуються силові та сигнальні кола, які мають різні вимоги до відстаней, екранування, прокладання і взаємного впливу. Відповідно, проєктувальник повинен одночасно враховувати електричні, механічні і технологічні фактори, а інтегровані САПР стають засобом, який дозволяє перевести ці фактори у формалізовані вимоги до моделі.

У термінах інформаційних моделей електромеханічна інтеграція базується на тому, що електричні компоненти описуються не лише як елементи схеми чи специфікації, а як об'єкти, що мають геометричні й монтажні атрибути. Для друкованих плат це означає наявність 3D моделі плати, моделі корпусів компонентів (або принаймні їхніх габаритних контурів і висот), а також визначення “зони допустимого об'єму” (keep-out/keep-in) і монтажних отворів. Для шафових компонентів (автомати, контактори, блоки живлення, клемники, ПЛК, модулі вводу-виводу) це означає наявність моделей з реальними габаритами, точками кріплення, посадковими місцями на DIN-рейку або монтажну панель, граничними зонами для підключення проводів (простір під кабельні наконечники, мінімальні радіуси згину, доступ інструментом), а також орієнтацією при монтажі. Для кабельної системи й джгутів це означає

визначення маршрутів, кривизни, довжин, технологічних запасів, правил розведення силових і сигнальних трас, а також місць проходження через гермовводи й кабельні канали. Коли ці дані представлені в цифровому вигляді й синхронізовані, 3D CAD стає не лише “геометричним редактором корпусу”, а середовищем комплексного проєктування, у якому монтажні рішення можна не просто намалювати, а перевірити на колізії, доступність і технологічність.

Розглянемо, як 3D CAD використовується для моделювання корпусів, панелей і компоновки обладнання, і як у таку модель вводяться електричні компоненти. Механічне проєктування корпусів у 3D CAD, такому як SolidWorks або Fusion 360, зазвичай починається з визначення габаритів, конструктивних обмежень і типу виконання. Для енергетичних пристроїв це можуть бути корпуси для монтажу на DIN-рейку, настінні металеві чи пластикові коробки, панельні модулі, корпуси для монтажу в шафу 19", або спеціальні корпуси з теплообміном. На цьому етапі критичними є такі параметри, як доступність монтажних зон, забезпечення місця для плати та її кріплень, розміщення роз'ємів і індикаторів на передній панелі, формування отворів під кабельні вводи, а також забезпечення шляхів вентиляції або тепловідведення. У традиційному підході механік будує корпус, а потім “підганяє” його під компоненти, керуючись габаритними кресленнями. В інтегрованому підході компоненти присутні в збірці як повноцінні 3D об'єкти: механік бачить реальний об'єм плати, висоту конденсаторів, трансформаторів, радіаторів, відстані до кришки, доступ для конекторів, і може на ранньому етапі оптимізувати форму корпусу або розміщення плати. Аналогічно, для щитів і шаф керування 3D CAD може використовуватися для створення цифрового двійника внутрішньої компоновки: монтажна панель, DIN-рейки, кабель-канали, клемні ряди, апарати, а також маршрути прокладання проводів. Це дозволяє оцінювати щільність монтажу, уникати конфліктів і забезпечувати необхідні відстані для підключення і обслуговування. У контексті енергетики, де часто застосовують стандартні корпуси і шафи, 3D модель дає можливість заздалегідь врахувати обмеження конкретного виробника корпусів (наприклад, розміри монтажної панелі, положення отворів, наявні ребра жорсткості, місця для кабельних каналів), що безпосередньо знижує ризик невідповідності на стадії складання.

Інтеграція електричних компонентів у 3D CAD може здійснюватися кількома типомо вживаними способами, які відрізняються рівнем “інтелектуальності” зв'язку. Найпростішим способом є використання 3D моделей компонентів як окремих файлів, які вставляються у збірку механічного виробу. Такий підхід забезпечує геометричну перевірку колізій, але не гарантує синхронізацію зі схемою: якщо електрик замінив компонент на інший, механічна збірка не “знає” про це автоматично. Більш розвинений підхід передбачає узгоджені бібліотеки компонентів між електричним і механічним середовищами або використання спільного джерела даних (PDM/PLM), де компонент має як електричні атрибути (позначення, каталожний номер, параметри), так і механічні атрибути (габарити, 3D модель, кріплення). У такому разі зміни в списку обладнання можуть бути відображені у 3D компоновці як оновлення складу, а зміни в механіці можуть впливати на допустимі розташування компонентів. Найбільш інтегрований підхід реалізується в системах, які прямо поєднують електричне і механічне проєктування в одній екосистемі, де 3D модель може

бути пов'язана з принциповою схемою, кабельними даними та маршрутизацією. Саме в цій логіці згадують модулі, подібні до SolidWorks Electrical 3D, а також можливості Fusion 360, де в рамках одного середовища можуть співіснувати механічні моделі й електронні проекти (особливо коли мова про інтеграцію плати з корпусом).

Модуль SolidWorks Electrical 3D концептуально демонструє, як електричні дані (електричний проект, список обладнання, дані про з'єднання) можуть бути використані для формування 3D компоновки та проводки. В ідеалізованій схемі робіт електроінженер створює електричний проект: принципіві схеми, визначає компоненти, клемники, кабелі, з'єднання та маркування. На основі цієї інформації механічне середовище отримує перелік компонентів, які мають бути розміщені у шафі чи корпусі, і може автоматизовано або напівавтоматизовано створити 3D представлення розміщення. Далі виконується 3D маршрутизація проводів і кабелів між компонентами, що дозволяє оцінити довжини, радіуси вигину, необхідність технологічного запасу, а також уникнути перетинів і зон конфлікту. Принципова перевага такого підходу полягає в тому, що 3D проводка не є "мальованою", а відображає електричну модель з'єднань, тому може підтримуватися в узгодженому стані при змінах. Для енергетичних щитів це важливо, оскільки проводка і кабельна організація є значним джерелом трудовитрат і помилок: віртуальна маршрутизація дає змогу передбачити проблеми ще до складання і підготувати більш точну монтажну документацію.

У Fusion 360 логіка електромеханічної інтеграції зазвичай розкривається через спільне проектування механічної частини виробу та електронної частини, зокрема друкованих плат. Тут ключовою практичною задачею є перевірка того, що компоненти плати не заважають корпусу, що роз'єми збігаються з отворами або вирізами на панелі, що плата має достатні монтажні відстані і не конфліктує з ребрами жорсткості або кріпленнями. У науковій інтерпретації це можна описати як задачу узгодження обмежень двох підсистем: електронна підсистема задає габаритні обмеження на рівні плати і компонентів (висота, площа, монтажні отвори, keep-out зони), механічна підсистема задає габаритні обмеження на рівні корпусу (внутрішній об'єм, положення кріплень, отвори, допуски, товщини стінок), і інтегрована САПР повинна забезпечити перевірку сумісності цих обмежень. Практичним наслідком є скорочення числа прототипів: замість виготовлення корпусу "на пробу" і подальшого підрізання чи переробки, інженер може виконати віртуальну перевірку колізій. У контексті енергетики, де корпуси й шафи часто виготовляються з металу або замовляються як стандартні вироби, зменшення кількості прототипів дає відчутний економічний ефект і скорочує терміни.

Колізії, які виявляються при електромеханічній інтеграції, можуть мати різну природу. Найпростіша колізія — геометричний перетин, коли компонент плати фізично "влазить" у стінку корпусу або кришку. Однак на практиці важливими є й колізії доступності: наприклад, роз'єм може не мати достатнього простору для вставляння кабельної вилки; гвинт клемника може бути недоступним для викрутки; кабельний наконечник не може бути встановлений через занадто малий зазор; радіус вигину проводу перевищує допустимий; отвір під кабельний ввід опинився в зоні ребра жорсткості. Частина таких проблем

може бути формалізована і перевірена в 3D CAD через аналіз мінімальних відстаней, зон доступу, “envelope” моделей інструментів і кабельних трас. Інша частина вимагає інженерного судження, але навіть тоді 3D модель служить середовищем візуалізації, що підвищує якість рішень. У системах керування енергетичними об'єктами ці колізії особливо критичні, оскільки польові монтажні роботи виконуються в умовах обмеженого часу, і кожна помилка в компоновці або доступності може зупинити введення в експлуатацію чи збільшити час пусконаладження.

Точність монтажу є ще одним фундаментальним аргументом на користь спільного електромеханічного проектування. Монтажна точність включає як геометричну точність (співпадіння отворів, посадкових місць, кріплень, панельних вирізів), так і логістично-організаційну точність (правильна ідентифікація компонентів, відповідність маркувань, коректність підключення). У традиційній практиці, коли електрична і механічна частини проектуються роздільно, існує ризик невідповідності між кресленням панелі та реальним положенням роз'ємів на платі або модулі, що призводить до переробки панелі або застосування “тимчасових” рішень, які знижують якість виробу. Інтегроване проектування дозволяє прив'язувати панельні вирізи до реальних 3D позицій роз'ємів і контролювати допуски. Для шаф керування точність монтажу означає також оптимальне розташування апаратів з урахуванням прокладання проводів: 3D модель дозволяє мінімізувати хаотичність провідки, зменшити довжини, забезпечити кращу вентиляцію та сервісний доступ. У науковому контексті це можна трактувати як підвищення технологічності конструкції через цифрове моделювання процесу складання і монтажу.

Скорочення числа прототипів є прямим наслідком того, що частина випробувань переноситься в цифрову площину. Прототипування в електромеханічних виробках включає не лише перевірку функціональності електроніки, але й перевірку механічної сумісності, теплових режимів, електробезпеки, монтажних операцій. Якщо механічна частина виготовляється без точного урахування електричних компонентів, перший прототип часто виконує роль “підгонки”, після чого робляться зміни і виготовляється друга версія. Для складніших виробів кількість таких ітерацій може бути більшою. Електромеханічна інтеграція знижує потребу в таких ітераціях, оскільки дозволяє виявити помилки на ранньому етапі: ще до замовлення корпусу можна перевірити розміщення плати, висоти компонентів, позиції роз'ємів, взаємні відстані, маршрути кабелів. Це не усуває потребу у функціональному прототипі електроніки, але зменшує ймовірність того, що функціональний прототип “не збереться” в корпус або потребуватиме механічних переробок. Для енергетичних пристроїв, які часто виготовляються малими серіями або під проєкт, економія навіть одного циклу прототипування має значний ефект на календарні терміни й бюджет.

Поліпшення співпраці між електро- та механоінженерами є менш очевидною, але не менш важливою перевагою інтегрованого підходу. У мультидисциплінарних командах основні проблеми виникають не через нестачу професійності, а через різні “мови” опису: електрик мислить схемами, переліками сигналів, клемними таблицями та правилами маркування, тоді як механік мислить геометрією, допусками, технологією виготовлення і складання.

Коли відсутній спільний цифровий контекст, комунікація перетворюється на передачу фрагментів інформації, які можуть бути інтерпретовані неоднозначно. Інтеграція в САПР створює спільний контекст: електричні дані отримують геометричне відображення, механічні обмеження стають видимими електрику, а зміни можуть відслідковуватися як версіоновані події. У практичному сенсі це зменшує кількість “узгоджувальних зустрічей”, де обговорюють, чому роз’єм не співпав з отвором, і збільшує кількість продуктивних ітерацій, де одразу приймають рішення на основі цифрової моделі. У науковій перспективі це можна описати як підвищення узгодженості інформаційних моделей проекту, що знижує ентропію проектних даних і підвищує якість управління змінами.

Для повноти викладу доцільно окреслити типові сценарії електромеханічної інтеграції в енергетичних пристроях і показати, які саме рішення приймаються у 3D CAD. Перший сценарій - проектування контролерного модуля або вбудованого пристрою для системи керування енергетичним об’єктом. Такий пристрій зазвичай включає плату керування, роз’єми живлення і зв’язку, індикацію, кнопки, елементи захисту й фільтрації, а також корпус з можливістю монтажу на DIN-рейку або на панель. У цьому сценарії 3D CAD використовується для проектування корпусу з урахуванням плати: положення плати визначає місця стійок і кріплень; роз’єми визначають форму панельних вирізів; висота компонентів визначає внутрішню висоту корпусу; тепловідлення визначає потребу в отворах вентиляції або теплових вставках. Другий сценарій - проектування шафи керування або щита автоматики, де набір апаратури розміщується на монтажній панелі. 3D CAD дозволяє створити компоновку, оцінити щільність розміщення, розташувати кабель-канали, забезпечити відстані для підключення, спланувати прокладання проводів, а в ідеалі - виконати 3D маршрутизацію кабелів/джгутів і отримати більш точні довжини та відомості. Третій сценарій - інтеграція електронного модуля (плата) у механічний виріб з рухомими частинами або з обмеженнями по вібрації; тут важливими стають кріплення, фіксатори, амортизація, а також забезпечення того, що кабелі не потрапляють у зони руху. У кожному сценарії інтеграція дозволяє виконувати цифрові перевірки, які знижують ризик проблем на реальному монтажі.

Науково важливим аспектом електромеханічної інтеграції є управління змінами. У комплексних проектах зміни неминучі: електрик може замінити компонент на інший через дефіцит постачання або через зміну технічних вимог; механік може змінити корпус через технологічні обмеження або вимоги до герметичності; команда може змінити архітектуру, додавши інтерфейс або модуль. Якщо ці зміни не синхронізуються, виникають “розходження” між моделями, які призводять до помилок. Інтегровані САПР або інтегровані процеси в межах екосистеми (наприклад, коли SolidWorks Electrical 3D пов’язаний з механічною збіркою, або коли механіка і електроніка узгоджуються в рамках Fusion 360) дозволяють зробити зміни керованими: оновлення списку компонентів може автоматично відобразитися в компоновці; зміна плати може вимагати перевірки колізій з корпусом; зміна корпусу може потребувати переміщення роз’ємів або корекції плати. У сучасному інженерному менеджменті це часто підтримується PDM/PLM системами, але навіть без них

інтегроване середовище підвищує прозорість змін і знижує ризик втрати актуальності даних.

Окремо потрібно розглянути, чому електромеханічна інтеграція є важливою саме для енергетики, а не лише для споживчої електроніки. Енергетичні пристрої часто експлуатуються у складних умовах, мають підвищені вимоги до надійності та безпеки, а також повинні бути зручними для сервісу. Вимоги до електробезпеки накладають обмеження на відстані між силовими і сигнальними колами, на ізоляційні зазори, на організацію заземлення. Вимоги до теплових режимів вимагають розрахункової оцінки тепловідведення і врахування вентиляції. Вимоги до монтажу і обслуговування означають, що апаратура має бути доступна, маркування має бути видимим, кабельні траси — організованими. Вимоги до електромагнітної сумісності вимагають правильного просторового розділення джерел перешкод і чутливих ланцюгів, застосування екранування і фільтрації, що також має механічні наслідки (місце для фільтрів, правильні точки заземлення, шляхи кабелів). Електромеханічна інтеграція в САПР є інструментом, який дозволяє врахувати ці вимоги на етапі проектування, а не під час “пожежного” усунення проблем на монтажі.

Узагальнюючи, електромеханічна інтеграція в САПР є необхідним етапом еволюції проектних практик у напрямі цифрового двійника виробу, де електрична й механічна підсистеми розглядаються як єдина система з узгодженими обмеженнями. На прикладах SolidWorks і Fusion 360 можна показати, як 3D CAD використовується для моделювання корпусів, панелей і компоновки обладнання, а електричні компоненти враховуються в цій моделі через 3D представлення та (за наявності інтеграційних модулів) через зв'язок із електричним проектом. Згадування SolidWorks Electrical 3D доречно як приклад модуля, що демонструє ідею зв'язку між електричними даними і 3D компоновкою/маршрутизацією. Переваги спільного проектування проявляються у підвищенні точності монтажу, виключенні колізій (у тому числі перевірки сумісності плати й корпусу), скороченні числа прототипів та поліпшенні комунікації між електро- та механоінженерами. У прикладному сенсі ці переваги трансформуються в скорочення термінів розробки, зниження вартості переробок, підвищення якості й надійності пристрою та більш керовану еволюцію проекту в умовах змін.