

## САПР для схем керування енергосистем

Проектування систем керування в електроенергетиці становить комплексну інженерну задачу, що поєднує елементи електротехніки, автоматики, телемеханіки, вимірювання, комунікаційних технологій та нормативного документування. На відміну від «чисто» силових частин енергосистеми, де ключовими є вибір апаратів, розрахунок режимів та ізоляційних відстаней, системи керування й автоматики описуються великою кількістю сигналів, логічних залежностей, алгоритмів, взаємних блокувань, аварійних сценаріїв, і, що особливо важливо, повинні бути однозначно зафіксовані у вигляді комплексу документації, придатної для монтажу, налагодження, експлуатації та аудиту. У сучасних умовах ця документація створюється і підтримується переважно засобами САПР (CAD/ECAD) та інструментами комп'ютерного документування, що дає змогу зменшити людський фактор, пришвидшити випуск проекту і підвищити узгодженість між різними видами схем. Відповідно, під САПР для схем керування енергосистем у широкому сенсі слід розуміти сукупність програмних засобів, які забезпечують розробку, редагування, перевірку та випуск функціональних діаграм автоматики, схем підключення, однолінійних схем енергосистем, структурних діаграм інформаційного обміну та пов'язаних з ними відомостей (переліків сигналів, кабельних журналів, таблиць клем, специфікацій), а також підтримку стандартів оформлення (ISO/IEC/ДСТУ) на рівні символіки, структури документів та правил позначення.

Методологічно розробку систем керування енергетичними об'єктами зручно розглядати як перехід від високорівневих описів до детальної реалізації. На верхньому рівні формується структурно-функціональна модель об'єкта керування: визначаються контрольовані параметри (напруга, частота, потужність, реактивна потужність, струм, температура, тиск, положення комутаційних апаратів), виконавчі впливи (комутація, регулювання напруги, зміна уставок, керування приводами, увімкнення/вимкнення допоміжних систем), режими (нормальний, ремонтний, аварійний, пусковий, резервний), а також вимоги до надійності та безпеки. На наступному рівні ці вимоги конкретизуються у вигляді функціональних схем автоматики — тобто графічних моделей логіки роботи, які описують причинно-наслідкові зв'язки між сигналами, подіями та керуючими діями. Такі схеми можуть реалізуватися як релейно-контактна логіка (історично і досі поширена у вигляді схем блокувань і міжапаратних залежностей), або як алгоритми ПЛК у стандартизованих мовах IEC 61131-3 (LD — Ladder Diagram, FBD — Function Block Diagram тощо), де логіка представляється як мережа контактів/катушок або як з'єднання функціональних блоків. Важливим є те, що функціональна схема — це не «довільний рисунок», а інженерна модель, яка повинна бути достатньо формальною, щоб її можна було однозначно перевірити, реалізувати в коді або вторинних колах, і задокументувати для подальшого супроводу.

Паралельно із функціональними схемами в енергетиці широко використовують однолінійні схеми (single-line diagrams), що виконують роль топологічної карти первинної мережі або підстанції, і слугують основою для розуміння структури живлення, секціонування шин, резервування та зон захисту.

Однолінійна схема відображає головні електричні зв'язки між лініями, трансформаторами, комутаційними апаратами, шинами, реакторами, батареями конденсаторів тощо, але робить це у «згорнутому» вигляді (трифазну систему умовно показують одним ланцюгом), що різко підвищує читабельність і дозволяє включити в один аркуш те, що у принциповому виконанні зайняло б десятки сторінок. Для систем керування однолінійні схеми є вихідним контекстом: вони визначають, які комутаційні апарати підлягають дистанційному керуванню, які вимірювальні трансформатори струму/напруги забезпечують сигнали, які секції шин підлягають АВР, де виникають логічні блокування, та які уставки захистів мають бути пов'язані з конфігурацією мережі. Тому сучасна САПР-підтримка енергетичних проєктів включає як побудову однолінійних схем, так і пов'язану із ними автоматику та вторинні кола.

У комп'ютерному проєктуванні функціональних схем автоматики існують два типові класи інструментів. Перший клас — спеціалізовані електротехнічні ECAD-системи (на кшталт EPLAN/AutoCAD Electrical/SolidWorks Electrical тощо), які забезпечують семантичне креслення електричних схем, автоматизацію нумерації проводів, перехресні посилання, генерацію таблиць клем і звітів. Другий клас — універсальні інструменти побудови діаграм і блок-схем, які дозволяють швидко і наочно документувати логіку та структуру на рівні функціональних моделей, навіть якщо кінцева реалізація буде виконана в іншій системі. Саме тут доречно демонструвати Draw.io / diagrams.net як простий і доступний інструмент для блок-схем, структурних схем і функціональних діаграм. Diagrams.net позиціонується як середовище для створення діаграм різних типів (flowcharts, UML, ER, network diagrams тощо) та має офіційну документацію з прикладами діаграм і методами експорту у формати, придатні для вставлення в звітність. В освітньому та проєктному контексті draw.io корисний тим, що дозволяє оформити логіку автоматики у вигляді блок-схем (алгоритмічний підхід), у вигляді структурних схем (архітектурний підхід), у вигляді функціональних діаграм (потоківий підхід), і швидко експортувати результат у PDF або SVG для включення в пояснювальну записку чи комплект документації. Офіційні інструкції draw.io прямо описують експорт у SVG та загальний механізм «File → Export As» з параметрами масштабу, меж і вибору сторінок, що важливо для якісного поліграфічного результату.

Ключовим питанням є те, як саме САД допомагає автоматизувати випуск документації для систем керування енергосистем. Автоматизація проявляється на декількох рівнях. На рівні функціонального опису САД-інструменти дозволяють структурувати алгоритми, вводити повторювані блоки, забезпечувати єдність позначень і зменшувати неоднозначність, що, у підсумку, скорочує кількість помилок при реалізації логіки в ПЛК або в релейних схемах. На рівні електричної реалізації і підключень спеціалізовані ECAD-системи дозволяють створювати схеми підключення, клемні таблиці та кабельні журнали як похідні від моделі з'єднань, зменшуючи ризик неузгодженості між схемою і табличними документами. На рівні мережевої і підстанційної автоматики САД допомагає підтримувати узгодженість між однолінійними схемами, схемами вторинних колів, таблицями сигналів SCADA/RTU, а також конфігураціями підстанційної автоматики (зокрема, коли використовується IEC 61850, де логічні

вузли, GOOSE-повідомлення, process bus і station bus створюють додатковий рівень формалізації комунікацій). Архітектурні діаграми підстанційної автоматики в стандарті IEC 61850 часто показують поділ на station bus і process bus, IED захисту/керування, мережеві комутатори і пристрої вимірювання; такі діаграми зручно включати в документацію як “структурний контекст” для схем керування, і типові приклади можна знаходити в наукових публікаціях.

У практиці енергетики особливе місце посідають схеми керування генераторами, підстанціями та системами комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ). Схеми керування генератором охоплюють принаймні два базові контури: контур регулювання напруги (через систему збудження і AVR) та контур регулювання частоти/потужності (через регулятор швидкості/турбінний або дизельний governor), які взаємодіють у межах системи електромеханічної динаміки генератора та мережі. У документуванні та моделюванні часто використовують блок-діаграми AVR та governor як узагальнені структурні схеми, що показують зворотні зв'язки та основні ланки регулювання; такі блок-схеми (у різних варіаціях) широко представлені в наукових джерелах та можуть використовуватися як ілюстрація принципів керування генератором у лекції. На підстанціях системи керування включають комутаційні операції, блокування, AVR, телемеханіку, інтерфейси до SCADA, та, у сучасних рішеннях, цифрові IED, що реалізують функції захисту і керування. Для таких систем документація включає однолінійні схеми, схеми вторинних колів, схеми підключення до IED, таблиці сигналів, мережеві схеми (station bus/process bus) і опис алгоритмів. У комерційному обліку (АСКОЕ) структурні схеми зазвичай показують рівні системи (лічильники → пристрої збору/передачі даних → сервер/АРМ → інтеграція з оператором системи розподілу), канали зв'язку та вузли концентрації даних; приклади таких структурних схем наведені в українських навчальних/наукових матеріалах і можуть бути включені в лекцію як наочний приклад “керування/моніторингу даних” в енергетиці.

Розробка функціональних схем автоматики в електроенергетиці має специфічні вимоги до формалізації. По-перше, логіка повинна бути стійкою до відмов і передбачати безпечні стани: наприклад, при втраті зв'язку або відмові датчика система повинна переходити у визначений режим. По-друге, логіка повинна враховувати технологічні міжапаратні блокування і вимоги безпеки комутаційних операцій (неможливість неправильних перемикань). По-третє, алгоритм повинен бути узгоджений із захистами й режимами роботи мережі. У цьому контексті важливо вміти документувати логіку у формі, яку можна перевіряти й обговорювати. Мови IEC 61131-3 (зокрема LD та FBD) є прикладом стандартизованих графічних форм опису логіки ПЛК, що історично наближені до релейної логіки й водночас формалізовані для програмної реалізації; приклади LD/FBD широко демонструються в навчальних матеріалах та публікаціях, і їх використання в лекції дозволяє показати місток між “функціональною діаграмою” і “реалізацією алгоритму”. Для студентів корисно підкреслити, що функціональна схема автоматики не зводиться до одного формату: інколи доцільна блок-схема (коли алгоритм має виражені стани і переходи), інколи - FBD (коли зручно мислити функціональними блоками та сигналами), інколи - LD (коли потрібно документувати логіку на рівні контактів/катушок і

блокувань), а інколи - комбінація (наприклад, структурна схема + таблиця істинності + LD фрагмент).

Однолінійні схеми енергосистем при документуванні керування виконують роль “карти” об’єкта, і принципи їх побудови зводяться до забезпечення однозначності топології, читабельності та наявності необхідних атрибутів (номінальна напруга, тип апарата, ідентифікатори комірок/вимикачів, назви приєднань, трансформаторів тощо). Типові приклади однолінійних схем підстанцій доступні у наукових джерелах (у вигляді ілюстрацій до статей), що робить їх зручними для використання у лекції як “академічних” зразків. З методичної точки зору важливо пояснити, що однолінійна схема не замінює принципових вторинних схем, але задає рамку для визначення зон керування, вимірювання та захисту. Саме тому САД-підхід полягає не лише у кресленні однолінійної схеми, а в підтримці її зв’язку з іншими документами: таблицею сигналів, списком I/O, переліком устаткування, схемами підключення та мережевими діаграмами (для IEC 61850/SCADA).

Окремої уваги заслуговує питання стандартів оформлення та підтримки їх інструментами. У електротехнічному документуванні міжнародною основою є стандарти серії IEC/EN щодо підготовки документів і графічних символів, а на рівні України - гармонізовані ДСТУ або стандарти ЄСКД (для оформлення схем). Як приклад актуальної гармонізації можна навести ДСТУ EN 61082-1:2022, який є ідентичним EN 61082-1:2015 та базується на IEC 61082-1:2014 і встановлює правила підготовки документів в електротехнологіях. Поряд з цим у навчальних матеріалах часто згадуються стандарти ДСТУ щодо видів схем і правил виконання (наприклад, ДСТУ 2.701, 2.702 тощо), що визначають загальні вимоги до схем і позначень. Окремо важливими є графічні символи для схем, які в міжнародній практиці пов’язані з IEC 60617 (Graphical symbols for diagrams), і наявність довідників/баз символів є критичною для уніфікації документації. Для САД-інструментів підтримка стандартів реалізується по-різному: у спеціалізованих ECAD - через бібліотеки стандартних символів, шаблони документів, правила позначень і автоматичні звіти; у draw.io - через бібліотеки фігур/шаблони і дисципліну користувача (уніфіковані набори символів, стильова політика, узгоджені шрифти/лінії), після чого результат експортується у стандартизований формат (PDF/SVG) і включається в документ, оформлений за ДСТУ/ISO.

Практична цінність застосування САД у керуванні енергосистемами проявляється у зниженні вартості помилок. Багато помилок у системах керування мають «пізні» виявлення: вони стають помітними на етапі пусконаладження або при аварійних подіях, коли виправлення коштує дорого. Перенесення частини перевірок у фазу проектування, підвищення якості документації, узгодженість між схемами і таблицями, формалізація алгоритмів і структура сигналів - усе це знижує ризики і підвищує керованість складних систем. У навчальному процесі демонстрація draw.io як “легкого” інструмента для блок-схем і структурних схем корисна тим, що дозволяє студентам швидко опанувати техніку формалізації алгоритмів, а потім перенести ці навички у спеціалізовані ECAD і PLC-середовища. При цьому важливо підкреслювати, що draw.io не замінює електротехнічну САПР у частині автоматичної нумерації та

табличної звітності, але є ефективним інструментом для верхньорівневої інженерної документації, особливо на етапі концепту та проектування логіки.