

Рибаків Вадим Костянтинович, заступник керівника, +38(097)488-21-15, rybakov0905@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-0713-5311

*ТОВ «Центр відповідності вибухозахищеного обладнання»
вул. Клочківська 99А, м. Харків, Україна, 61058*

Котлярів Володимир Олегович, к.т.н., доцент, +38(095)382-26-11, vok2kaf@gmail.com

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

ІНФОРМАЦІЙНО-ЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ У ПРОЕКТУВАННІ ТА СЕРТИФІКАЦІЇ ВИБУХОЗАХИЩЕНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Анотація: Запропоновано методику урахування оцінки відповідності вимогам вибухозахисту у проектуванні електроприводів. Відібрано набір позначень мови проектування SysML, мінімально достатній для забезпечення простежуваності взаємовпливу процедур проектування та сертифікації електроприводів. Зазначено, що проектувальники не бачать наслідків для складності сертифікації прийнятих ними на різних етапах проектування конструкторських рішень з вибухозахисту, не враховують необхідні подальші випробування та процедури сертифікації. Це впливає на терміни та вартість сертифікації, а вибрані відповідно до вимог вибухобезпеки конструктивні рішення (оболонки, ущільнення, способи охолодження та обмеження за тепловими режимами) надалі впливають на режими роботи електроприводів та загальну ефективність їх експлуатації. Застосування методики показано на прикладі вибухозахисту мобільного робота. Продемонстровано використання інформаційно-логічних моделей для мінімізації ризику помилок проектування та складності сертифікації.

Ключові слова: проектування електроприводів, моделі вимог, сертифікація вибухозахисту, мобільні роботи, температурні обмеження.

Rybakov Vadym, Deputy Head, +38(097)488-21-15, rybakov0905@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-0713-5311

*«Center of conformity of Ex-equipment» Ltd
99A Klochkivska St., Kharkiv, Ukraine, 61058*

Kotlyarov Vladimir, PhD, associate professor, +38(095)382-26-11, vok2kaf@gmail.com

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2 St. Kirpychova, Kharkiv, Ukraine, 61002*

INFORMATION-LOGICAL MODELING OF DESIGN AND CERTIFICATION OF EX-PROOF ELECTRIC DRIVES

Abstract: Abstract: A methodology for taking into account the assessment of compliance with explosion protection requirements in the design of electric drives is proposed. A set of notations of the SysML design language is selected, minimally sufficient to ensure traceability of the interaction of design procedures and certification of electric drives. It is noted that designers do not see the consequences for the complexity of certification of the explosion protection design solutions they have adopted at different stages of design, do not take into account the necessary further testing and

certification procedures. This affects the timing and cost of certification, and the design solutions selected in accordance with explosion safety requirements (enclosures, seals, cooling methods and thermal restrictions) further affect the operating modes of electric drives and the overall efficiency of their operation. The application of the methodology is shown on the example of explosion protection of a mobile robot. The use of information-logical models to minimize the risk of design errors and the complexity of certification is demonstrated.

Keywords: *electric drive design, requirement models, explosion protection certification, mobile robots, temperature limitations.*

Вступ. Вибухозахист електротехнічного обладнання вкрай важливий для безпеки підприємств низки галузей промисловості. Потенційно вибухонебезпечні середовища присутні, зокрема, на вугільних шахтах [1], [2] та інших підприємствах енергетичного комплексу, хімічної та харчової промисловості [3]. Вибухобезпечне обладнання таких підприємств, включаючи електроприводи, має задовольняти численним стандартам з вибухобезпеки, виконання вимог яких дає презумпцію відповідності Директиві АТЕХ 2014/34/EU [4]. Як зазначають багато виробників і проектних організацій [5], забезпечення та оцінювання такої відповідності є самостійним складним завданням проектування електроприводів та систем промислової автоматизації, до складу яких вони входять.

Складність вирішення цього завдання визначається численністю наявних стандартів, складною системою вимог і концепцій вибухозахисту, що містяться в них. Вимоги вибухобезпеки регулярно змінюються і доповнюються, часто не узгоджені між собою, що призводить до помилок при їх аналізі для конкретного обладнання, що проектується. Проектувальники не бачать наслідків для складності сертифікації прийнятих ними на різних етапах проектування конструкторських рішень з вибухозахисту, не враховують необхідні подальші випробування та процедури сертифікації. Це впливає на терміни та вартість сертифікації, а вибрані відповідно до вимог вибухобезпеки конструктивні рішення (оболонки, ущільнення, способи охолодження та обмеження за тепловими режимами) надалі впливають на режими роботи електроприводів та загальну ефективність їх експлуатації.

Важливе значення для успішної сертифікації має аналіз проектно-технічної документації. Частина видів документів, що використовуються проектувальниками, задає вимоги, що включаються в технічне завдання на

проектування. Наприклад, це нормативна документація щодо обраних видів вибухозахисту, гармонізовані стандарти вибухобезпеки. Інша частина проектної документації підтверджує виконання цих вимог, наприклад, схема розташування обладнання, перелік елементів, розрахунки, функціональні та принципові електричні схеми тощо. Велика кількість вимог щодо вибухобезпеки при сертифікації підтверджується лише за технічною документацією виробника, і лише частина цих вимог – за результатами типових випробувань. Пошук, структурування та чітке відображення зв'язків між різними видами документів та варіантами проектних рішень є необхідністю для алгоритмізації процесів проектування вибухобезпечного обладнання. Наочне відображення зв'язків між документами, що встановлюють вимоги, і документами, що задовольняють цим вимогам, сприяє зниженню помилок проектування і, як наслідок, усуває невідповідності при випробуваннях і сертифікації вибухозахищеного обладнання.

Однак на сьогоднішній день відсутня загальноприйнята методологія забезпечення вибухобезпеки електроприводів на всіх етапах їх проектування з урахуванням вимог їх сертифікації. Тому стає необхідним детальний аналіз, систематизація та алгоритмізація процесів проектування вибухозахисту та оцінки його відповідності нормативам діючого законодавства. Така методологія буде корисною і як методична основа для врахування впливу теплових та інших конструктивних обмежень вибухобезпеки на експлуатаційні параметри електроприводів у контексті завдань енергозбереження.

Проблема дослідження. Перспективним підходом до відображення та аналізу зазначених зв'язків є побудова інформаційно-логічних моделей процесів проектування, сертифікації, моделей вимог та варіантів рішень, моделей структури проектної документації. Відомим засобом такого моделювання є мова проектування SysML [6], що широко застосовується в мехатроніці. Складені цією мовою діаграми вимог та структурні діаграми проекту помітно спрощують збирання, облік, аналіз вимог до обладнання та варіантів проектних рішень. Позначення зв'язків артефактів проектування, що є в мові, допомагають точно описувати відношення між проектними документами і варіантами рішень з

урахуванням проектних обмежень та взаємодії інженерів проектувальників, інженерів з сертифікації, інженерів випробувачів. Однак рекомендації щодо застосування цієї мови під час проектування вибухобезпеки промислових електроприводів досі були відсутні.

Основною проблемою нашого дослідження є визначення засобів представлення мовою SysML взаємозв'язків процедур проектування з вимогами сертифікації для їх подальшого аналізу та вдосконалення. У графічній формі мовою SysML ця проблема представлена на рис. 1 інформаційно-логічною структурною моделлю проектування та подальшої сертифікації обладнання, що пов'язує ці процеси. Подальшим завданням є деталізація цієї моделі. Подібний підхід уже застосовувався в роботі [7] з систематизації проектування електричних двигунів. Побудовані моделі демонструють ефективність цього підходу до розроблення вимог і вибору проектних рішень у проектуванні елементів електроприводів. Проте його поширення на проектування вибухозахищеного обладнання з урахуванням подальшої оцінки відповідності є інноваційним.

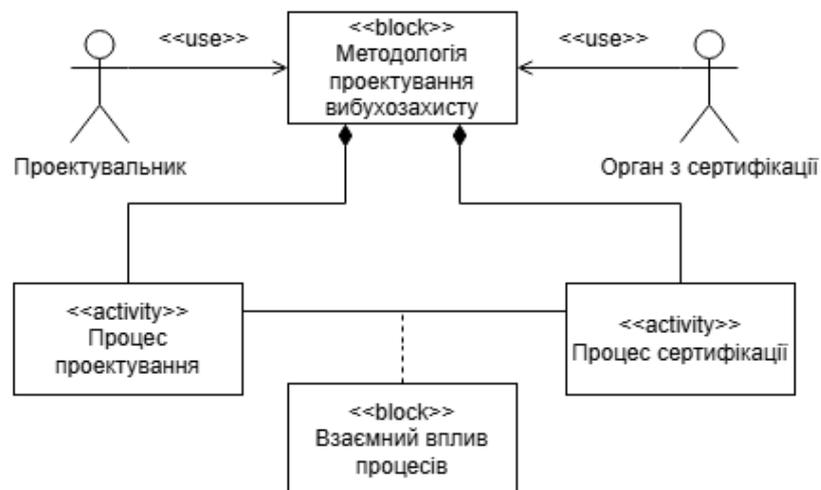


Рисунок 1 – Модель дослідницької проблеми

Застосування підходу продемонструємо на конкретних прикладах, відокремлюючи види складності завдань проектування та засоби їх розв'язання. Аналізуватимемо проектні рішення для електроприводів шахтних мобільних роботів. Упровадження вибухозахищених роботів у потенційно вибухонебезпечні

середовища суттєво підвищує ефективність і безпеку таких об'єктів. У гірничодобувній промисловості відоме застосування рятувальних роботів, роботів для контролю безпеки, транспортних, тунельних, а також роботів для видобутку вугілля [8]. Компанія Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. впроваджує наземних патрульних роботів на нафтохімічних підприємствах та атомних електростанціях [9].

Варіанти вибухозахисту таких роботів відзначаються значною різноманітністю технічних рішень. Наприклад, можна відокремити такі типові варіанти:

1) MINIBOT-II – рятувальний робот для вугільних шахт [10]. Судячи з опису конструкції цього робота, вибухозахист елементів його електропривода полягає у розміщенні їх у вибухонепроникному корпусі типу «d». Оскільки автори не зазначають маркування вибухозахисту, а описують лише тип вибухозахисту «d», можна зробити висновок, що цей робот не призначений для роботи в шахтах за наявності метану, а його рівень вибухозахисту (EPL) – Mb;

2) LURKER-3 – пошуковий робот для вугільних шахт, розроблений Науково-дослідним центром робототехніки Шаньдунського університету, Китай [11]. Як концепцію вибухозахисту використано корпус із надлишковим тиском і балон високого тиску, заповнений інертним газом, таким як CO₂ або N₂. Оскільки інші засоби вибухозахисту в описі робота не зазначені, можна припустити, що застосовано концепцію вибухозахисту «рхb», що відповідає рівню EPL Mb;

3) Мобільний інспекційний робот для шахт GMRI [5], розроблений Інститутом інноваційних технологій EMAG та Промисловим науково-дослідним інститутом автоматизації та вимірювань PIAP. Категорію M1 (EPL Ma) досягнуто завдяки застосуванню пневматичного привода на стисненому азоті та обмеженню швидкості рухомих елементів. Стиснений азот охолоджує внутрішню частину конструкції приводів, що є додатковим заходом безпеки проти перегрівання фрикційних елементів. Електронні вузли GMRI розроблені відповідно до концепції іскробезпеки «ia»;

4) Експлуатаційний робот EX ROVR «ASCENT», розроблений компанією Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. [9]. Робот призначений для патрулювання нафтохімічних підприємств та атомних електростанцій із можливістю періодичного виникнення вибухонебезпечних середовищ (зона 1), група ПВ, температурний клас Т3. Літій-іонна батарея цього робота захищена вибухонепроникною оболонкою «d», а інші елементи електропривода – концепцією вибухозахисту «рхв».

Наведемо приклади структурування вимог, проєктних процедур і технічних рішень у таких проєктах шляхом побудови фрагментів інформаційно-логічних моделей.

Результати досліджень. Проєктування та сертифікація обладнання потребують скоординованої взаємодії всіх сторін, залучених до процесу, зокрема проєктної організації, підрядників, органу з оцінки відповідності та випробувальних лабораторій. Координація їхніх ролей, обов’язків і обміну інформацією забезпечує необхідний контроль процесів проєктування та сертифікації [12]. Взаємодія фахівців у різних галузях знань є однією з ключових проблем забезпечення вибухобезпеки. Типовий приклад організаційної структури проєкту, поданої мовою SysML, наведено на рис. 2:

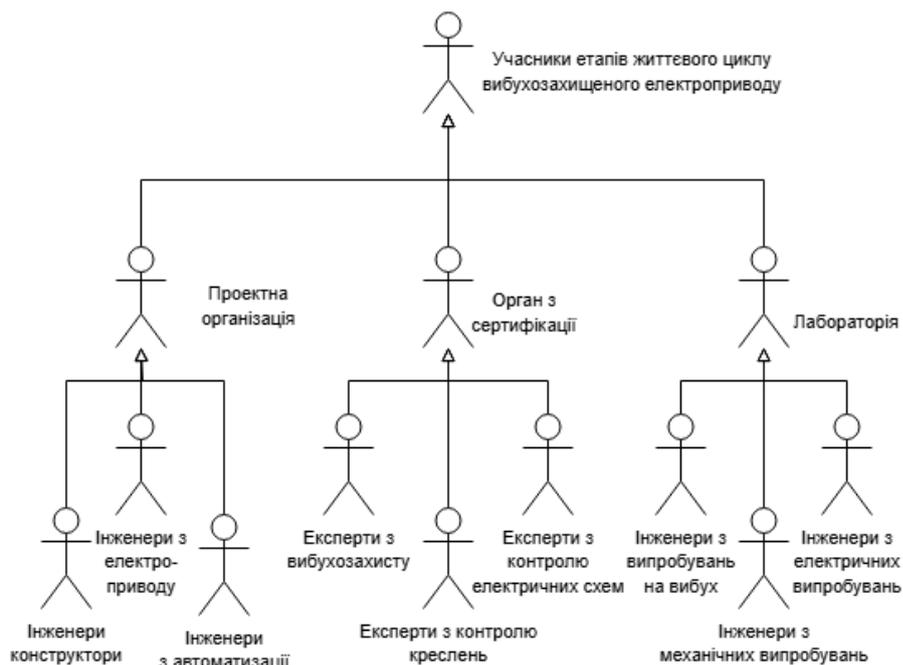


Рисунок 2 – Модель організаційної складності проєкта

Елементи цієї організаційної структури надалі необхідно пов'язати з проектною документацією, для якої також слід побудувати модель її структури. Оскільки обладнання для вибухонебезпечних середовищ підпадає під дію законодавства [4] і має відповідати вимогам стандартів, ці стандарти та їх взаємозв'язки необхідно відобразити в такій моделі, як це показано на рис. 3:



Рисунок 3 – Модель зв'язків документів з стандартизації вибухозахисту

Аналогічно й інші нормативні документи, що використовуються під час проектування вибухозахисту, можуть бути структуровані подібним чином.

Далі в моделі слід відобразити зв'язки між вимогами до вибухозахисту та структурою іншої проектною документації. На першому етапі визначаються вибухонебезпечні середовища та зони, для яких має бути забезпечено вибухозахист. Структуру цієї інформації та її взаємозв'язки з нормативною, проектною та сертифікаційною документацією подано у вигляді інформаційно-логічної моделі, зображеної на рис. 4.

Пояснимо використані тут позначення мови SysML. Під час забезпечення вибухозахисту першим кроком має бути уточнення вимог до типу, складу та частоти присутності вибухонебезпечного середовища. Документ «Технічне завдання» у моделі представлений як контейнер вимог, а включення до нього конкретних вимог позначено лінією зі знаком «плюс» з боку контейнера.

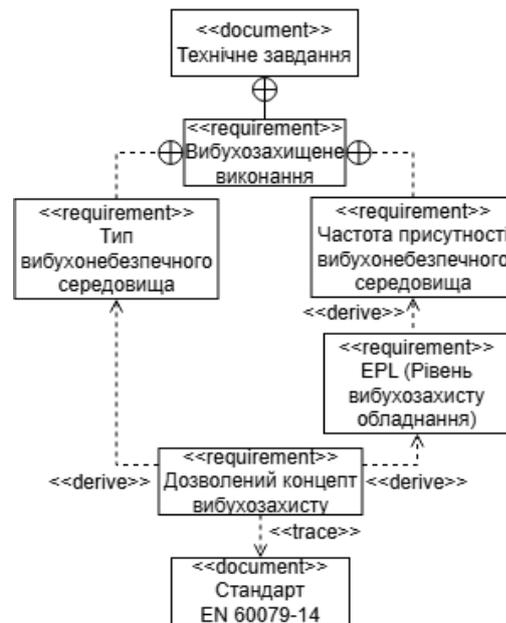


Рисунок 4 – Взаємозв’язок вимог, що впливають на вибір концепту вибухозахисту

Мінімальний рівень вибухозахисту, допустимий для застосування в обладнанні, залежить від частоти присутності вибухонебезпечного середовища, тому вимога до рівня (EPL) вибухозахисту обладнання виводиться з вимоги до частоти присутності вибухонебезпечного середовища (позначка <<derive>> на діаграмі). Концепція вибухозахисту, допустима для вибору, також виводиться з вимог до вибухонебезпечного середовища та частоти його присутності. Взаємозв’язок між типами та рівнями вибухозахисту інженери-конструктори можуть знайти в табл. 2 стандарту EN 60079-14:2014. Їхній зв’язок із нормативним документом показано лінією <<trace>>.

Окремого аналізу потребують джерела займання відповідно до стандартів EN 1127-1:2019, EN 1127-2:2014 та параметри вибухонебезпечних середовищ. Прикладом вимог до параметрів може слугувати температурний клас обладнання (T1–T6), що визначає температурні обмеження, оскільки кожне вибухонебезпечне середовище має власну температуру займання. Залежно від концепції вибухозахисту та способу її реалізації відповідність температурному класу визначається температурою різних елементів і частин електропривода (зовнішня температура поверхні корпусу або температура найгарячішого компонента системи керування чи двигуна всередині корпусу).

Теплові обмеження в цьому сенсі виступають спільним параметром для вибухобезпеки та експлуатаційної ефективності: зниження втрат і керування режимами нагрівання є класичним шляхом до підвищення енергоефективності електропривода. Тому рання формалізація вибору концепції вибухозахисту у вигляді інформаційно-логічної моделі є важливою і для завдань енергозбереження: вона знижує ризик складних конструктивних рішень, надлишкових оболонки, систем із підвищеним ступенем захисту ІР, які надалі погіршують експлуатаційну ефективність і тепловий баланс електропривода.

Кожне вибухонебезпечне середовище також характеризується мінімальними струмами та енергіями займання відповідно до EN 60079-20-1:2010, EN ISO/IEC 80079-20-2:2016 та [13]. Це має важливе значення для елементів електропривода з вибухозахистом типу іскробезпечне електричне коло «і». Тому доцільно окремо простежувати зв'язки з нормативною документацією щодо параметрів і класифікації вибухонебезпечних середовищ у наступній інформаційно-логічній моделі (рис. 5):

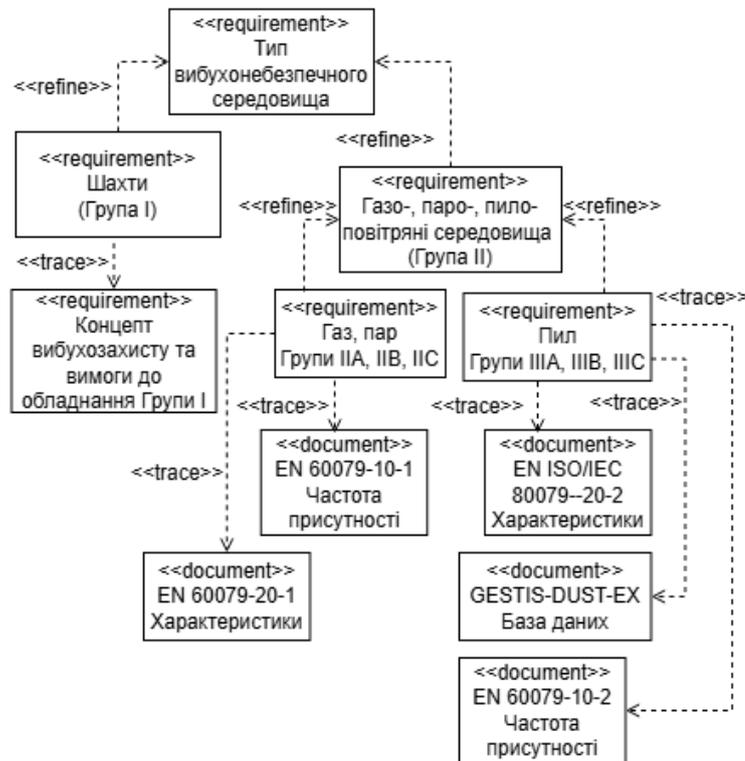


Рисунок 5 – Взаємозв'язок між типами вибухонебезпечних середовищ та стандартами

Лінією з позначкою <<refine>> на рис. 5 показано, що вибухонебезпечні середовища, а отже й групи обладнання відповідно до [4] поділяються на шахтні та будь-які інші газо-, паро- або пилоповітряні середовища. Оскільки хімічний склад вибухонебезпечних шахтних середовищ є відомим, а частоту їх присутності неможливо передбачити через ризик раптових викидів метану, спеціальних нормативних документів для визначення характеристик шахтних вибухонебезпечних середовищ не передбачено. Під час проєктування вибухозахисту шахтного обладнання необхідно уточнити, чи має обладнання бути розраховане на роботу в присутності метану (категорія M1), чи відключатися у разі його виявлення в шахті (категорія M2). Далі відповідно до цього обирається допустимий рівень вибухозахисту (Ma або Mb).

Тип вибухозахисту вибирається відповідно до EN 60079-14:2014 з подальшим урахуванням вимог нормативних документів відповідно до групи I. Газо/пароповітряні вибухонебезпечні середовища відносяться до групи II, а пилоповітряні вибухонебезпечні атмосфери – до групи III. Ці уточнення за типами середовищ відображаються у моделі лініями зв'язку з позначкою <<refine>>. Зв'язки вибухонебезпечних середовищ із відповідними нормативними документами за характеристиками та розрахунками частоти присутності відображаються зв'язками <<trace>>.

Такі інформаційно-логічні моделі допоможуть проєктувальнику скласти та перевірити набір вимог до виявлених вибухонебезпечних середовищ. Ці вимоги повинні бути включені до технічного опису ЕП і стосуються як температурного класу, так і забезпечення рівня захисту IP (у випадках коли IP є засобом вибухозахисту у вибраній концепції вибухозахисту).

Документом, що остаточно підтверджує відповідність продукції директиві АТЕХ, є Декларація про відповідність, складена виробником обладнання та представлена в моделі на рис. 6. Ця модель показує структуру сертифікаційної документації з посиланнями на організації, що її використовують.

Оскільки для обладнання категорії 3 з мінімальним рівнем вибухозахисту та неелектричного обладнання категорії 2 групи 2 виробник може самостійно

провести оцінку відповідності із застосуванням модуля А – це не відображено на рис. 6. В інших випадках необхідно залучити уповноважений орган з оцінки відповідності, який проводить типові випробування, та застосувати другий модуль оцінки відповідності, що зазвичай стосується системи управління якістю виробництва [4].

Основним пакетом документів, який подається виробником для оцінки відповідності, є «Технічний файл», що містить усю проектно-технічну документацію, документ «Аналіз та оцінка ризиків займання» і протоколи випробувань. Уповноважений орган проводить типові випробування, перевіряючи технічну документацію та виріб на відповідність вимогам кожного розділу і пункту застосованих стандартів для обраної виробником концепції вибухозахисту. На підставі результатів експертизи технічної документації уповноважений орган складає програму та методику типових випробувань, які мають бути проведені акредитованою лабораторією.

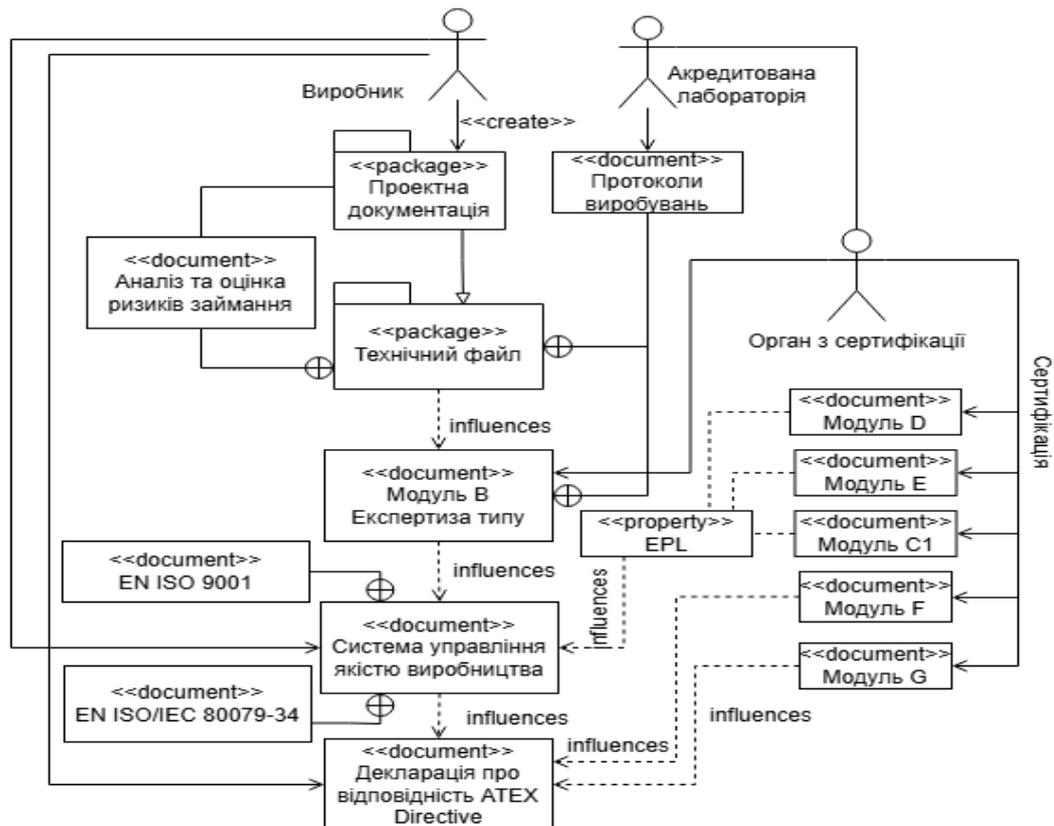


Рисунок 6 – Модель структури сертифікаційної документації

За результатами сертифікації складається перелік особливих умов та обмежень експлуатації виробів. Такі експлуатаційні обмеження (зокрема пов'язані з тепловими режимами та умовами застосування) є вихідною інформацією не лише для організації безпечної експлуатації, а й для подальших процедур енергоаудиту / енергоменеджменту на об'єкті – як частина вихідних припущень щодо допустимих режимів роботи електропривода.

Далі також визначаються зміст і програма контрольних випробувань, що проводяться виробником. Ці випробування є складовою системи управління якістю, яка для виробників вибухозахищеного обладнання регулюється окремим спеціальним стандартом EN ISO/IEC 80079-34:2011.

На наступному етапі моделювання до структури моделі слід включати вимоги до конкретних елементів електроприводів, пов'язуючи їх із відповідними стандартами. Розглянемо це на прикладі рішень щодо вибухозахисту елементів електропривода робота EX ROVR «ASCENT» [9]. Структурну схему робота наведено на рис. 7:

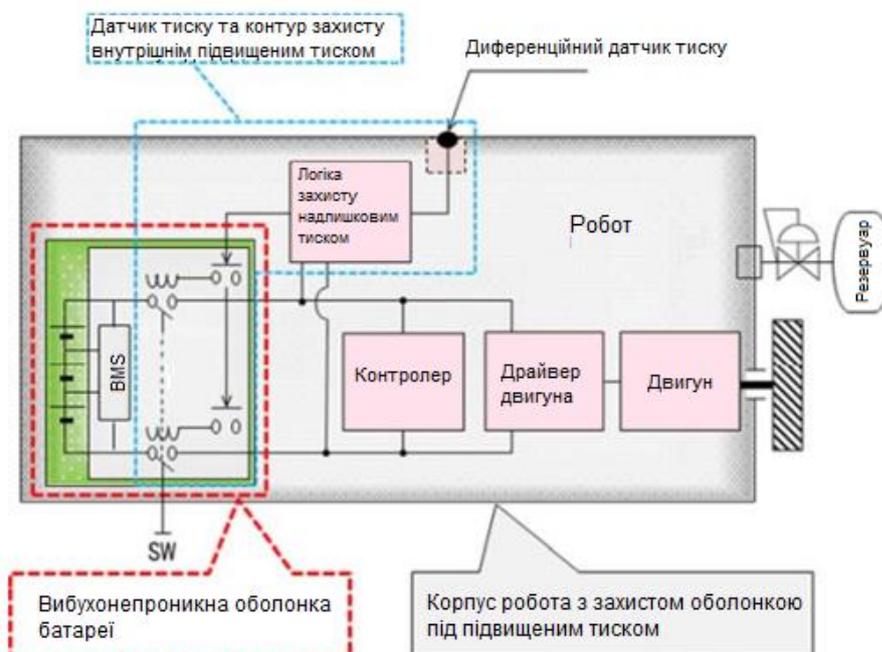


Рисунок 7 – Конструкція засобів вибухозахисту робота [9]

Метою моделювання є демонстрація вимог до вибухозахисту з урахуванням конструктивних рішень, прийнятих компанією Mitsubishi Heavy Industries, а також встановлення зв'язків між цими вимогами, проєктною та нормативною документацією. Приклад результату такого аналізу у вигляді фрагмента моделі наведено на рис. 8.

Для аналізу вимог вибухобезпеки було обрано такі елементи електропривода робота: джерело живлення (8-елементна літій-іонна батарея), захищена вибухонепроникною оболонкою «d», а також корпус робота, у якому встановлено систему керування, драйвер, двигуни (оболонка з надлишковим тиском «р»).

Батарея повинна відповідати вимогам Технічного завдання – це показано у моделі зв'язком <<satisfy>>. Батарея повинна мати мінімальні габарити і вагу, перезаряджатись у присутності вибухонебезпечного середовища, відповідати електричним характеристикам живлення приводної системи та допоміжних пристроїв, а також бути вибухозахищеною для газо/пароповітряних вибухонебезпечних середовищ з періодичною частотою присутності (зона 1).

Процедура вибору концепту вибухозахисту представлена в моделі блоком <<activity>>. Вибрана концепція вибухонепроникної оболонки «Ex db» пов'язана у моделі зі стандартами, які застосовуються до цієї концепції захисту відповідно до Директиви АТЕХ [4].

Після встановлення зв'язку проєкту з нормативними документами для обраних концепцій вибухозахисту можна скласти діаграму вимог до засобів вибухозахисту. Це дозволить визначити як враховані вимоги, так і спосіб підтвердження їх виконання – за допомогою проєктної документації або шляхом проведення типових та контрольних випробувань. Приклад такої моделі наведено на рис. 9.

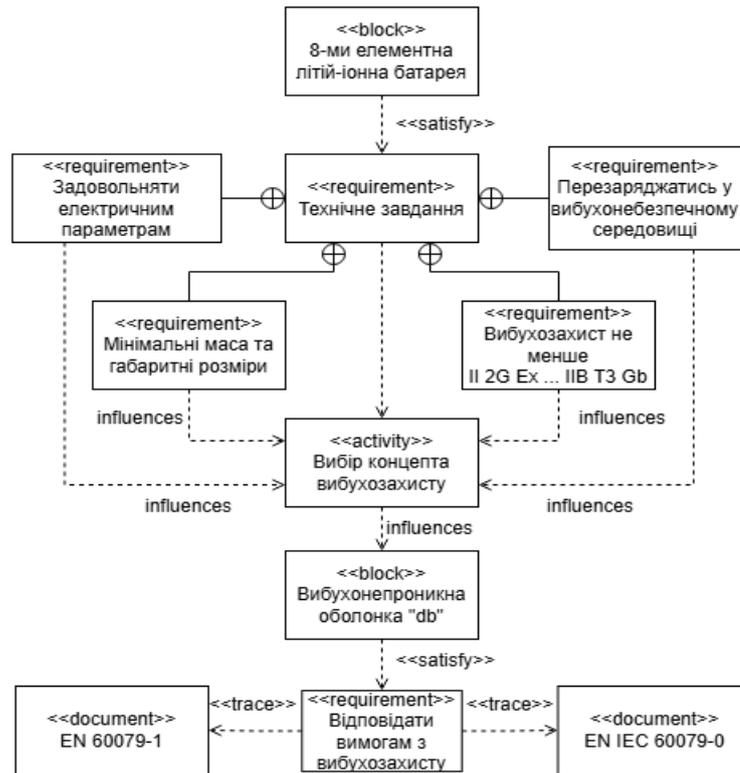


Рисунок 8 – Модель вимог, що показує зв'язок зі стандартами вибухозахисту

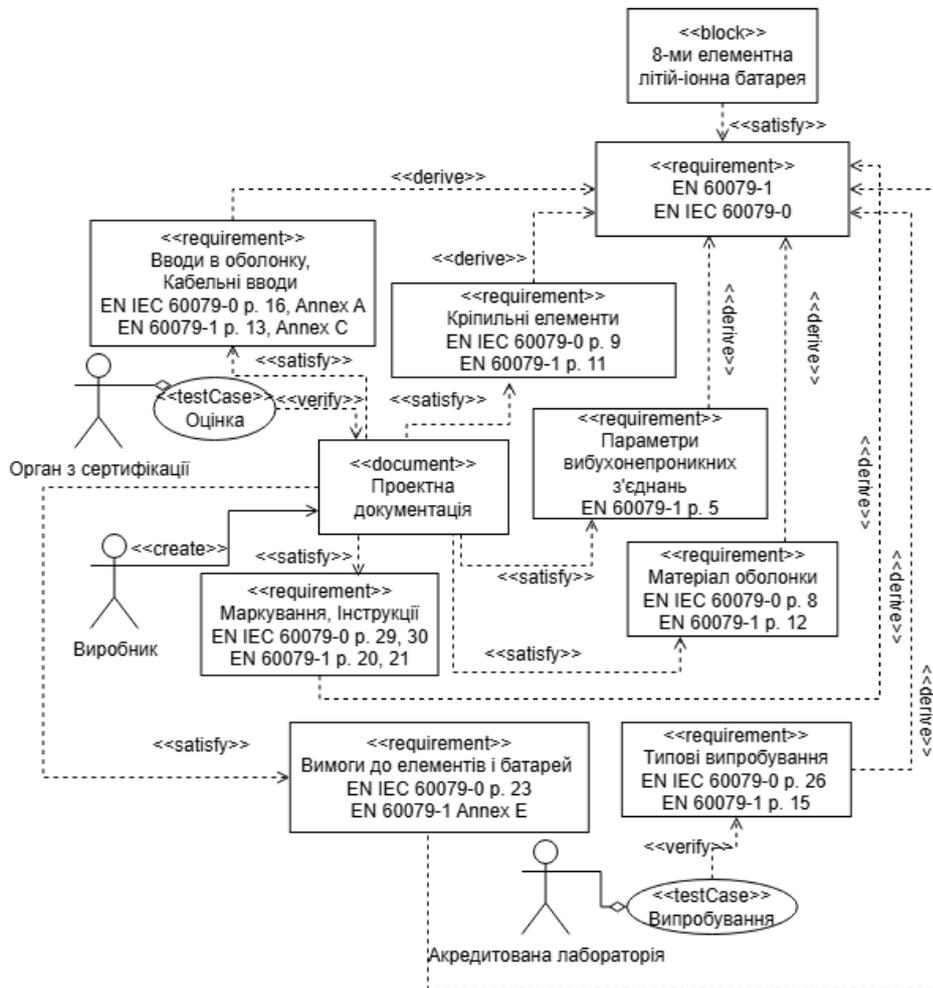


Рисунок 9 – Модель вимог EN IEC 60079-0:2018, EN 60079-1:2014

Вимоги, що застосовуються до обраної концепції вибухозахисту, охоплюють вимоги безпосередньо до батареї (наприклад, тип електроліту, захисні плати), а також до її вибухозахищеного корпусу (зокрема, матеріали конструкції, параметри вибухонепроникних з'єднань). Ці вимоги підтверджуються проектною документацією та оцінюються уповноваженим органом з оцінки відповідності. Лабораторія залучається уповноваженим органом для проведення типових випробувань.

Оскільки вартість і тривалість оцінки відповідності відіграють важливу роль, доцільно конкретизувати, які саме типові випробування, що підтверджують відповідність, мають бути проведені лабораторією. Приклад такої конкретизації наведено на рис. 10:

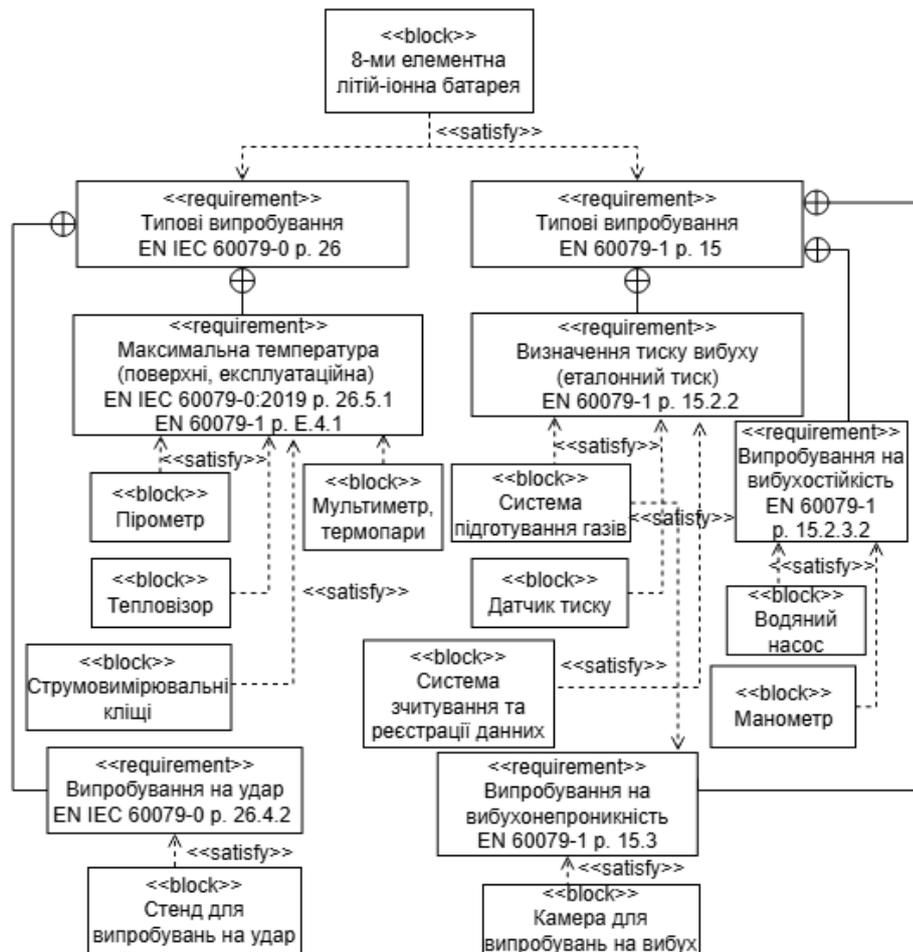


Рисунок 10 – Модель вимог до типових випробувань EN IEC 60079-0:2018, EN 60079-1:2014

Модель демонструє приклад необхідних типових випробувань, зокрема випробування вибухонепроникної оболонки (перевірку її механічної міцності, визначення внутрішнього тиску вибуху, випробування на надлишковий тиск і вибухонепроникність, температурні випробування нагрівання батареї в режимі короткого замикання, визначення експлуатаційних температур). Теплові режими є наслідком внутрішніх втрат, і їх коректний облік є важливим як для підтвердження вибухозахисту, так і для забезпечення енергоефективності привода робота. Випробування ступеня захисту IP для неметалевих частин у моделі відсутні, оскільки ущільнювальне кільце (навіть якщо воно передбачене конструкцією) не є засобом вибухозахисту оболонки «d», хоча у разі класифікації виробником цей параметр також може бути підтверджений.

Аналогічним чином формуються моделі вибухозахисту й інших елементів електропривода, таких як контролер, драйвер двигуна та сам двигун. У розглянутому проєкті вони захищені концепцією «рхb», що дає змогу використовувати їх у невибухозахищеному виконанні.

Висновки. Розглянутий підхід до моделювання спрямований на структурування зв'язків між проєктними рішеннями, нормативною документацією та сертифікацією вибухобезпеки. Структурування досягається шляхом формалізації опису взаємовпливу між процесами проєктування та сертифікації засобами мови SysML. Моделювання цих зв'язків дає змогу виконати аналіз ризику невідповідності проєктованого обладнання стандартам вибухобезпеки та скоротити час і вартість сертифікації.

Запропонована методика моделювання дозволяє порівнювати доцільність різних концепцій вибухозахисту для компонентів електропривода з урахуванням їх конструктивних характеристик, зокрема теплових втрат. Подібні моделі із застосуванням мови SysML можуть слугувати основою для синтезу раціональних алгоритмів проєктування та сертифікації електроприводів, що експлуатуються у вибухонебезпечних середовищах. Така формалізація вимог може бути корисною і під час енергоаудиту та впровадження заходів з енергозбереження, оскільки дозволяє чітко фіксувати експлуатаційні обмеження й припущення, пов'язані з

тепловими режимами систем електропривода. Застосування моделей цього типу полегшує розроблення програм типових випробувань для вибухозахищеного електропривода та мінімізує помилки під час сертифікації, що проводиться експертами з вибухозахисту.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Li Y., Li M., Zhu H., et al. Development and applications of rescue robots for explosion accidents in coal mines. *J. Field Robotics*, nov. 2019. Vol. 1–24.
2. Zhao J., Gao J., Zhao F., Liu Y. A Search-and-Rescue Robot System for Remotely Sensing the Underground Coal Mine Environment. *Sensors*, Oct. 2017. Vol. 17, № 2426.
3. Colda, C., Burian, S. Designing and using robots for performing inspections in potentially explosive atmospheres. *MATEC Web of Conferences*, 2020. Vol. 305, 00025.
4. ATEX Directive 2014/34/EU, European Union, 2014. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/34/oj/eng>
5. Kasprzyczak L., Trenczek S., Cader M. Robot for Monitoring Hazardous Environments as a Mechatronic Product. *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems*, 2012. Vol. 6, № 4, PP. 57–64.
6. Weikens T. Systems engineering with SysML/UML: Modeling, analysis, design. Amsterdam : Morgan Kaufmann OMG Press/Elsevier, 2007.
7. Rivera C. A., Poza J., Ugalde G., Almandoz G. A Requirement Engineering Framework for Electric Motors Development. *Applied Sciences*, nov. 2018. Vol. 8, № 2391.
8. Z. Huang, S. Ge, Y. He, D. Wang, and S. Zhang. Research on the Intelligent System Architecture and Control Strategy of Mining Robot Crowds. *Energies*, apr. 2024. Vol. 17. № 8, P. 1834.
9. K. Shukutani, K. Onishi, N. Onishi, H. Okazaki, H. Kojima, and S. Kobori. Development of Explosion-proof Autonomous Plant Operation Robot for Petrochemical Plants. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, dec. 2018. Vol. 55. № 4.
10. W. Wang, W. Gao, S. Zhao, W. Cao, and Z. Du. Robot Protection in the Hazardous Environments. In *Robots Operating in Hazardous Environments*. IntechOpen, 2012. PP. 87–107.
11. X. Rong, R. Song, X. Song, and Y. Li. Mechanism and explosion-proof design for a coal mine detection robot. *Procedia Engineering*, 2011. Vol. 15. PP. 100–104.
12. S. Melzer, S. Thiemann, H. Peukert, and R. Möller. Towards a Model-based and Variant-oriented Development of a System of Systems. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 2022. Vol. 7. № 3. PP. 19–31.
13. GESTIS-DUST-EX – Combustible Dusts Database, Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance (IFA). [Online]. Available: <https://staubex.ifa.dguv.de/?lang=e>.

REFERENCES:

1. Li Y., Li M., Zhu H., et al. Development and applications of rescue robots for explosion accidents in coal mines. *J. Field Robotics*, nov. 2019. Vol. 1–24.
2. Zhao J., Gao J., Zhao F., Liu Y. A Search-and-Rescue Robot System for Remotely Sensing the Underground Coal Mine Environment. *Sensors*, Oct. 2017. Vol. 17, № 2426.
3. Colda, C., Burian, S. Designing and using robots for performing inspections in potentially explosive atmospheres. *MATEC Web of Conferences*, 2020. Vol. 305, 00025.
4. ATEX Directive 2014/34/EU, European Union, 2014. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/34/oj/eng>

5. Kasprzyczak L., Trenczek S., Cader M. Robot for Monitoring Hazardous Environments as a Mechatronic Product. *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems*, 2012. Vol. 6, № 4, PP. 57–64.
6. Weilkens T. Systems engineering with SysML/UML: Modeling, analysis, design. Amsterdam : Morgan Kaufmann OMG Press/Elsevier, 2007.
7. Rivera C. A., Poza J., Ugalde G., Almandoz G. A Requirement Engineering Framework for Electric Motors Development. *Applied Sciences*, nov. 2018. Vol. 8, № 2391.
8. Z. Huang, S. Ge, Y. He, D. Wang, and S. Zhang. Research on the Intelligent System Architecture and Control Strategy of Mining Robot Crowds. *Energies*, apr. 2024. Vol. 17. № 8, P. 1834.
9. K. Shukutani, K. Onishi, N. Onishi, H. Okazaki, H. Kojima, and S. Kobori. Development of Explosion-proof Autonomous Plant Operation Robot for Petrochemical Plants. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, dec. 2018. Vol. 55. № 4.
10. W. Wang, W. Gao, S. Zhao, W. Cao, and Z. Du. Robot Protection in the Hazardous Environments. In *Robots Operating in Hazardous Environments*. IntechOpen, 2012. PP. 87–107.
11. X. Rong, R. Song, X. Song, and Y. Li. Mechanism and explosion-proof design for a coal mine detection robot. *Procedia Engineering*, 2011. Vol. 15. PP. 100–104.
12. S. Melzer, S. Thiemann, H. Peukert, and R. Möller. Towards a Model-based and Variant-oriented Development of a System of Systems. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 2022. Vol. 7. № 3. PP. 19–31.
13. GESTIS-DUST-EX – Combustible Dusts Database, Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance (IFA). [Online]. Available: <https://staubex.ifa.dguv.de/?lang=e>.

Стаття надійшла до редакції: 02.12.2025; рецензування: 22.12.2025;

прийнята до публікації 05.01.2026. Автори прочитали и дали згоду рукопису.

The article was submitted on 02.12.2025; revised on 22.12.2025; and accepted for publication on 05.01.2026. The authors read and approved the final version of the manuscript.