

УДК 658.562:658.5

[https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-5\(46\)-1725-1738](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-5(46)-1725-1738)

Лях Ігор Михайлович доктор технічних наук, професор, ДВНЗ «Ужгородський національний університет», м. Ужгород, тел.: (050) 372-78-57, <https://orcid.org/0000-0001-5417-9403>

Морохович Василь Степанович кандидат фізико-математичних наук, доцент, ДВНЗ «Ужгородський національний університет», м. Ужгород, тел.: (066) 144-75-30, <https://orcid.org/0000-0002-4939-6566>

Кляп Михайло Михайлович кандидат технічних наук, доцент, ДВНЗ "Ужгородський національний університет". м. Ужгород, тел.: (099) 971-63-47, <https://orcid.org/0000-0003-1933-6148>

Петрус Віталій Михайлович магістр 1 року навчання ОПП «Управління IT проєктами», ДВНЗ "Ужгородський національний університет". м. Ужгород, тел.: (066) 928-25-58, <https://orcid.org/0009-0000-7162-6818>

АНАЛІТИЧНІ ПІДХОДИ ДО ВДОСКОНАЛЕННЯ FIRST ARTICLE INSPECTION У ВИРОБНИЦТВІ

Анотація. У сучасному високотехнологічному виробництві електронних модулів питання якості продукції набуло першочергового значення, оскільки саме воно безпосередньо визначає надійність, безпечність, функціональність та конкурентоспроможність кінцевого виробу. Зростання складності електронних пристроїв, мініатюризація компонентів і підвищення вимог до точності процесів створюють передумови для більш жорсткого підходу до контролю якості на всіх етапах життєвого циклу виробу. В цьому контексті особливого значення набуває процедура перевірки першого виробу (First Article Inspection, FAI), яка є основним інструментом верифікації відповідності виготовленого продукту всім технічним, функціональним та візуальним вимогам перед запуском його у серійне виробництво.

FAI не тільки слугує бар'єром для проникнення невідповідної продукції у наступні фази виробництва, а й дозволяє визначити стабільність технологічного процесу та виявити потенційні точки ризику на ранніх етапах. Правильно організована процедура FAI забезпечує створення зворотного зв'язку між інженерними, технологічними та виробничими підрозділами, сприяє інтеграції систем керування якістю та підвищує об'єктивність прийняття рішень. Це особливо важливо в умовах, коли навіть одинична

відмова електронного модуля може спричинити критичні наслідки – як технічні, так і економічні.

Дослідження, присвячені оптимізації FAI, все більше акцентуються не лише на процедурному аспекті перевірки, а й на впровадженні методологій глибокого аналізу причин дефектів, застосуванні статистичних інструментів управління якістю та адаптації автоматизованих систем збору і візуалізації даних. Серед таких інструментів особливої актуальності набувають діаграми Парето та Ішікави, які дозволяють не лише локалізувати дефекти, а й системно проаналізувати їх походження та взаємозв'язки. Вони відіграють ключову роль у процесі формування ефективних коригувальних дій і стратегії безперервного вдосконалення. У роботі також розглянуто аспекти автоматизованого монтажу (SMT), пайки в отвори (DIP), електричного тестування, програмування компонентів, верифікації критичних характеристик та оцінки відповідності до міжнародних стандартів IPC, що разом формують цілісну архітектуру контролю якості на підприємстві.

Процедура FAI подається не як ізольований елемент контролю, а як системна платформа для розвитку цифрової культури якості у виробництві, що включає в себе передумови для створення замкнутого циклу постійного вдосконалення: від ідентифікації відхилень до впровадження запобіжних дій і повторної валідації. Таким чином, ефективне використання FAI стає не лише інструментом запобігання браку, а й механізмом стратегічного управління якістю, адаптивного до вимог індустрії.

Ключові слова: First Article Inspection (FAI), управління якістю, аналітичні методи, управління виробництвом, тестування матеріалів, діаграма FAI Flow, інструменти контролю якості.

Liakh Ihor Mykhailovych Doctor of Technical Sciences, Professor, Uzhhorod National University, Uzhhorod, tel.: (050) 372-78-57, <https://orcid.org/0000-0001-5417-9403>

Morokhovych Vasyl Stepanovych Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Uzhgorod National University, Uzhhorod, tel.: (066) 144-75-30, <https://orcid.org/0000-0002-4939-6566>

Klyap Mykhailo Mykhailovych Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Uzhhorod National University. Uzhhorod, tel.: (099) 971-63-47, <https://orcid.org/0000-0003-1933-6148>

Petrus Vitalii Mykhailovych Master of the 1st year of study in “IT Project Management”, Uzhhorod National University. Uzhhorod, tel.: (066) 928-25-58, <https://orcid.org/0009-0000-7162-6818>

ANALYTICAL APPROACHES TO IMPROVING FIRST ARTICLE INSPECTION IN PRODUCTION

Abstract. In the modern high-tech production of electronic modules, the issue of product quality has become of paramount importance, as it directly determines the reliability, safety, functionality and competitiveness of the final product. The growing complexity of electronic devices, miniaturization of components, and increased requirements for process accuracy create the prerequisites for a more rigorous approach to quality control at all stages of the product life cycle. In this context, the First Article Inspection (FAI) procedure is of particular importance, as it is the main tool for verifying that a manufactured product meets all technical, functional and visual requirements before it is put into mass production.

FAI not only serves as a barrier to the penetration of non-conforming products into subsequent phases of production, but also allows you to determine the stability of the technological process and identify potential risk points at an early stage. A properly organized FAI procedure provides feedback between engineering, technology, and production departments, facilitates the integration of quality management systems, and increases the objectivity of decision-making. This is especially important in an environment where even a single failure of an electronic module can have critical consequences, both technical and economic.

Research on FAI optimization is increasingly focused not only on the procedural aspect of inspection, but also on the implementation of methodologies for in-depth analysis of the causes of defects, the use of statistical quality management tools, and the adaptation of automated data collection and visualization systems. Among such tools, Pareto and Ishikawa diagrams are becoming particularly relevant, allowing not only to localize defects but also to systematically analyze their origin and interrelationships. They play a key role in the process of formulating effective corrective actions and continuous improvement strategies. The work also covers aspects of automated assembly (SMT), solder-in-pin (DIP), electrical testing, component programming, critical characteristic verification, and conformity assessment to international IPC standards, which together form a holistic quality control architecture at the enterprise.

The FAI procedure is not presented as an isolated control element, but as a system platform for the development of a digital quality culture in production, which includes the prerequisites for creating a closed cycle of continuous improvement: from identifying deviations to implementing preventive actions and re-validation. Thus, the effective use of FAI becomes not only a tool for preventing defects, but also a mechanism for strategic quality management adaptive to the requirements of the industry.

Keywords: First Article Inspection (FAI), quality management, analytical methods, production management, material testing, FAI Flow chart, quality control tools.

Постановка проблеми. Незважаючи на високу значущість перевірки першого виробу перед запуском виробничого процесу, існує ряд проблем, які потребують вирішення. Зокрема, це залежність від людського фактора, складність аналізу великих обсягів даних та необхідність узгодження процесів FAI зі стандартами якості, таким як IPC. Важливим викликом є необхідність інтеграції FAI у цифрові виробничі системи для забезпечення безперервного моніторингу якості та швидкого виявлення дефектів. Ключовою проблемою залишається відсутність уніфікованих стандартів реалізації процедури FAI на різних підприємствах, що спричиняє варіативність у забезпеченні належного рівня якості продукції. Крім того, обмежене впровадження автоматизованих систем контролю призводить до затримок у виявленні невідповідностей, що, своєю чергою, обумовлює зростання витрат на їх усунення та знижує загальну ефективність виробничих процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження у сфері контролю якості та методології FAI підкреслюють важливість застосування автоматизованих оптичних перевірок (AOI), рентген-контролю (X-RAY) та аналізу кореневих причин дефектів (RCA). Роботи, присвячені загальному управлінню якістю (Total Quality Management, TQM), також демонструють ефективність комплексного підходу до забезпечення якості, що включає аналіз даних, впровадження стандартів та залучення персоналу до процесів удосконалення. Використання методів статистичного аналізу (наприклад, діаграма Парето), допомагає визначити основні причини дефектів і оптимізувати виробничі процеси. Сучасні підходи до управління якістю наголошують на інтеграції принципів Lean та Six Sigma у процедури перевірки першого виробу, що дозволяє знизити рівень дефектів та мінімізувати відходи виробництва [1, 2].

У виробничих проєктах, концепція TQM залишається актуальною та широко застосовується в різних сферах діяльності – від промисловості до сфери послуг. Вона спрямована на постійне вдосконалення процесів, орієнтацію на клієнта, залучення персоналу та системне мислення. Останні дослідження демонструють, що використання принципів TQM сприяє досягненню конкурентних переваг, підвищенню ефективності логістичних процесів і загальному покращенню якості продукції та послуг. Крім того, TQM може відігравати роль посередника між управлінськими практиками та кінцевими результатами, посилюючи вплив внутрішніх процесів на стратегічні показники діяльності підприємства [3, 4, 5, 6].

TQM передбачає культуру покращення, яка базується на принципах та інструментах, які підтримують її застосування. Важливими принципами, які повинні дотримуватися в процесі виробництва, є орієнтація на клієнта, залучення людей (формування міждисциплінарних команд, орієнтованих на співпрацю), процесний підхід, постійне вдосконалення. Перевагою TQM є

широкий спектр інструментів, які використовуються в управлінні якістю. Наприклад, інструменти, які можуть бути використані для забезпечення вимог до якості в виробничому процесі, включають: 5WHY, FMEA, 5S, Канбан, діаграми Парето, гістограми [7].

Інші автори підкреслюють, що якість продукції виходить за межі її безпосередніх характеристик і включає в себе якість обслуговування клієнтів. Вони наголошують на важливості навчання як клієнтів, так і співробітників, стандартизації систем обслуговування та ефективності процесів [15].

У контексті перевірки першого виробу у виробництві електронних модулів це означає, що, окрім технічної відповідності продукції, необхідно забезпечити навчання клієнтів, яке буде включати роз'яснення замовникам особливостей FAI, його значення та результатів. Це в свою чергу сприятиме кращому розумінню процесу та підвищенню довіри до виробника. Важливим фактором є навчання співробітників, яке передбачає постійне підвищення кваліфікації персоналу, залученого до процесу FAI, для забезпечення високого рівня компетентності та зниження ймовірності помилок.

Рівень якості також визначається стандартизацією процесів, що передбачає розробку та впровадження єдиних стандартів проведення FAI, що забезпечить узгодженість дій та стабільність результатів. Водночас необхідно враховувати ефективність та оперативність перевірки першого виробу, що вимагає оптимізації процесів FAI для скорочення часу перевірки без втрати якості, що дозволить швидше реагувати на виявлені невідповідності та зменшити затримки у виробництві.

Врахування цих аспектів сприятиме підвищенню загальної якості продукції та задоволеності клієнтів, що є ключовими факторами конкурентоспроможності на ринку електронних модулів.

У перспективі, передбачається використання технологій штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування дефектів та вдосконалення процесу контролю якості. Важливим напрямом досліджень є також оцінка ефективності комбінованих методів контролю якості, що включають традиційні статистичні підходи та новітні технології аналізу великих даних (Big Data).

Окрему увагу приділяють використанню діаграми Парето як одного з ключових інструментів оцінки та класифікації дефектів у виробничих процесах. Дана діаграма дозволяє визначити критичні фактори, що впливають на якість, та допомагає встановити пріоритетність коригувальних заходів. У багатьох дослідженнях також розглядається застосування алгоритмів обробки даних та програмних засобів, зокрема мов програмування для автоматизованої побудови графіків та аналітичних моделей оцінки якості продукції.

Мета статті – аналіз ефективності FAI у виробництві електронних модулів та розробка рекомендацій щодо вдосконалення цього процесу.

Основні аспекти дослідження включають визначення ключових проблем FAI, оцінку методів контролю якості та розробку підходів до інтеграції цифрових технологій у процедуру перевірки першого виробу. Впровадження передових підходів до аналізу якості дозволить покращити ефективність процесу FAI та забезпечити стабільність характеристик продукції у серійному виробництві.

Виклад основного матеріалу. Існує кілька факторів, які слід враховувати при розробці процесу FAI, включаючи тип виробленого продукту, процес виробництва та вимоги замовника. Деякі загальні критерії якості, які можуть бути перевірені, включають розміри, допуски, обробку поверхні, властивості матеріалу та функціональність.

FAI є важливим етапом у виробничому процесі, який гарантує, що продукція виготовлена відповідно до затверджених специфікацій і відповідає вимогам замовника. Даний контроль якості передбачає перевірку зразка першого продукту, виготовленого в партії, щоб переконатися, що він відповідає всім стандартам якості. У разі виявлення будь-яких дефектів уся партія може бути відхилена та потребуватиме переробки або утилізації. Це може бути дорогавартісним та повпливати на графік виробництва, тому набуває сенсу впровадити адаптивну процедуру FAI, щоб мінімізувати ризик відмови. Процес FAI також має бути задокументований, щоб усі зацікавлені сторони, включно з виробничим персоналом, персоналом контролю якості та клієнтами знали про очікування та процедури проведення інспекції. Це допоможе забезпечити швидке та ефективне виявлення та усунення будь-яких дефектів. Контроль якості має вирішальне значення у виробництві, і перевірка першого виробу є ключовою частиною забезпечення відповідності продукції всім стандартам якості. Запровадження суворого процесу FAI дозволяє мінімізувати ризик відхилень і забезпечити відповідність продукції очікуванням клієнтів, що особливо важливо на етапі тестування матеріалів. FAI Materials Testing являється невід'ємною частиною цього процесу, оскільки визначення властивостей сировини та її поведінки в різних умовах дає змогу гарантувати придатність матеріалу для запланованого використання. Оскільки кожен матеріал має унікальний набір характеристик, їх ретельна перевірка, зокрема через механічні випробування, є ключовим етапом для забезпечення стабільної якості продукції та відповідності встановленим стандартам. Інші випробування можуть бути проведені для визначення додаткових властивостей, таких як стійкість до корозії або тепла.

Усі матеріали мають відповідати задокументованим специфікаціям, перш ніж їх можна буде використовувати у програмі SMT установника. Тип матеріалу, а також середовище, в якому він буде використовуватися, визначатимуть, якими будуть ці характеристики.

Процес першої перевірки товару або плати FAI є першим кроком у перевірці нового виробничого процесу або постачальника. Окрім ретельної

перевірки початкового продукту на предмет вимірювань, розмірів і правильності складання згідно з кресленням, інспектор також перевіряє, чи весь виробничий процес проходить згідно зазначеного порядку. Якщо будуть виявлені будь-які проблеми, їх потрібно буде вирішити, перш ніж виробництво зможе продовжити масовий випуск продукту. Це може допомогти уникнути дорогих відкликів, переробок або будь-яких затримок у просуванні продукції на ринок.

У контексті виробництва друкованих плат (Printed Circuit Boards, PCB) процедура FAI відіграє ключову роль у забезпеченні якості кінцевої продукції. Друковані плати є основою для більшості електронних пристроїв, тому навіть незначні дефекти можуть спричинити функціональні відмови, підвищені експлуатаційні ризики та фінансові втрати. FAI у виробництві PCB включає багаторівневий контроль критично важливих параметрів. На першому етапі оцінюється відповідність фізичних характеристик плати проєктній документації, включаючи геометричні розміри, конфігурацію отворів, кількість і розташування шарів, а також топологію струмопровідних доріжок. Подальший аналіз спрямований на перевірку якості матеріалів, що використовуються у виробництві. Зокрема, досліджуються механічні, хімічні та електричні властивості діелектричних шарів і металізації, які мають відповідати встановленим стандартам IPC [14]. Крім того, важливим аспектом є аудит технологічних процесів, що включає оцінку відповідності методів виготовлення, нанесення захисних покриттів і паяння до встановлених норм, що може реалізовуватись послідовно, в контексті діаграми загального маршруту процедури FAI. Діаграма охоплює три ключові етапи: Preparation, SMT Department, Assembly Department, демонструє послідовність дій, перевірок та прийняття рішень на кожному етапі.

На першому етапі процедури FAI здійснюється комплексна підготовка матеріалів, що передбачає організацію компонентів на складі та перевірку їх наявності відповідно до виробничого запиту (рис.1). За відсутності окремих позицій ініціюється замовлення необхідних компонентів через виробничу систему. Після надходження матеріалів вони підлягають обов'язковому вхідному контролю, спрямованому на виявлення невідповідностей або дефектів. Отримані результати аналізуються з використанням діаграми Парето, що дозволяє виявити домінуючі причини відхилень і визначити пріоритети для коригувальних дій. У разі виявлення дефектів у критичних компонентах або порушення вимог до якості здійснюється їх блокування з відповідним записом у реєстр невідповідностей. Після успішного проходження етапу контролю здійснюється перевірка сертифікатів якості та відповідності матеріалів технічній документації (зокрема кресленням), а також реєстрація компонентів за відповідним постачальником. Завершальним етапом підготовчої фази є технічна оцінка відповідності матеріалів вимогам

проєкту. У разі виявлення порушень на будь-якому з підетапів матеріали повертаються на етап доопрацювання або відбраковуються, що дозволяє мінімізувати ризики подальших виробничих відхилень.

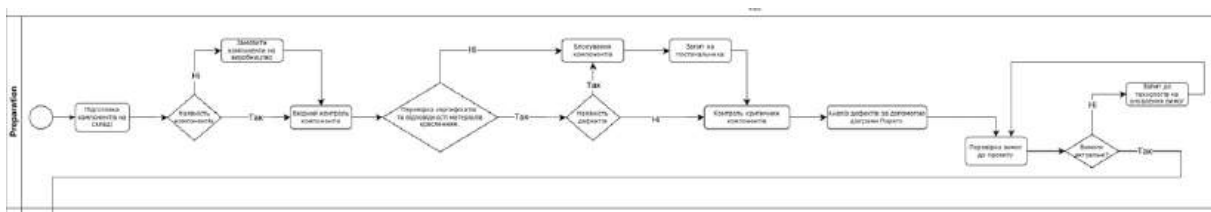


Рис. 1. Підготовчий етап (Preparation)

На етапі поверхневого монтажу, що здійснюється у відділі SMT, реалізується автоматизований процес встановлення електронних компонентів на друковану плату з наступною верифікацією якості монтажу. Першочергово проводиться налаштування SMT-лінії, що включає калібрування обладнання, завантаження відповідного програмного забезпечення та підготовку матеріалів [13]. Після цього запускається FAI-партія, яка підлягає ретельному контролю з боку інженерів якості та технічного персоналу. На даному етапі виконується інспекція нанесення паяльної пасти за допомогою SPI (Solder Paste Inspection), а також перевірка відповідності температурного профілю печі встановленим технологічним параметрам. У разі дотримання норм FAI-плата передається до процесу пайки у конвекційній печі, після чого здійснюється перевірка орієнтації та правильності встановлення компонентів засобами автоматизованої оптичної інспекції (AOI) [8]. Якщо виявлено відхилення у розташуванні або типі паяння, плата повертається на попередній етап для усунення недоліків. У випадках, коли SMT-монтаж відповідає вимогам стандарту IPC, проводиться додатковий контроль за допомогою рентгенівського обладнання (X-RAY), що дозволяє виявити приховані дефекти з'єднання, зокрема під корпусами типу BGA або QFN. Після завершення візуального та апаратного контролю оформлюється відповідна документація щодо результатів SMT-етапу (рис.2.).

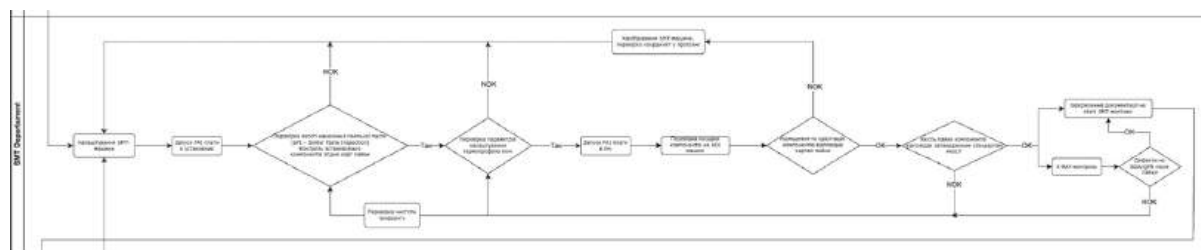


Рис. 2. Поверхневий монтаж (SMT Department)

На завершальному етапі, що реалізується у відділі складання, здійснюється ручний монтаж залишкових компонентів, а також фінальне тесту-

вання з метою підтвердження відповідності продукту встановленим вимогам (рис.3.). У разі необхідності виконується DIP-монтаж, який ініціюється за окремою процедурою із залученням відповідної технічної документації. Далі здійснюється візуальний контроль якості згідно зі стандартами IPC, що дозволяє виявити дефекти паяння, неправильну орієнтацію чи пошкодження компонентів. Після усунення всіх відхилень виконується електричне тестування, під час якого перевіряється коректність з'єднань, працездатність електронної схеми, а також, за необхідності, проводиться програмування мікроконтролерів чи інших цифрових елементів. Якщо виріб успішно проходить усі етапи перевірки, здійснюється аналіз його стабільності в роботі та відповідності технічним специфікаціям. На завершення, результати тестування документуються, і формується фінальний звіт FAI. У разі виявлення критичних дефектів на будь-якому з підетапів виріб повертається до відповідної попередньої стадії для корекції та повторного проходження контролю.

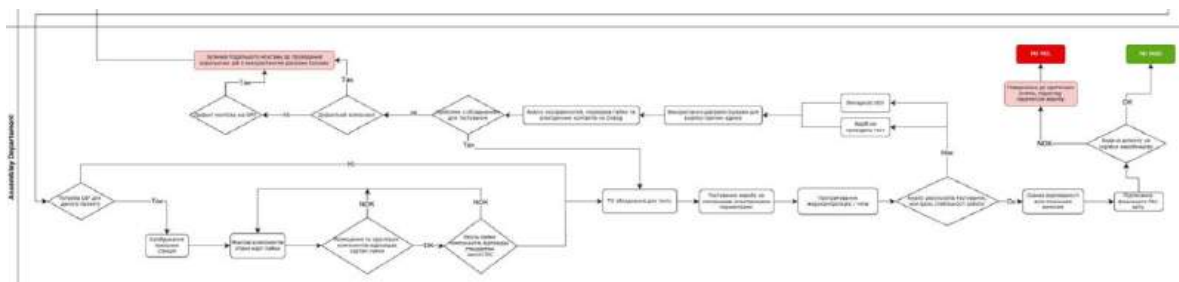


Рис. 3. Монтаж компонентів та фінальне складання (Assembly Department)

Підсумовуючи результати процесу FAI, слід зазначити, що остаточний висновок формується на основі комплексного аналізу всіх етапів контролю – від вхідної перевірки матеріалів до фінального електричного тестування готового виробу. У разі, якщо виріб успішно проходить усі контрольні точки без зафіксованих відхилень, він отримує статус **FAI PASS**, що свідчить про повну відповідність технічним вимогам і надає дозвіл на його впровадження у серійне виробництво. Натомість, якщо протягом процесу виявлено невідповідності або критичні дефекти, результат класифікується як **FAI FAIL**. У такому випадку виріб повертається на відповідний етап виробничого процесу для усунення недоліків, після чого має пройти повторну процедуру FAI. Такий підхід забезпечує високий рівень контролю якості та мінімізує ризик потрапляння дефектної продукції до наступних стадій виробництва або до кінцевого споживача [9].

Одним із ключових інструментів у системному аналізі проблем, що виникають у межах процесу FAI є діаграма Ішікави, або діаграма причинно-наслідкових зв'язків. Вона дозволяє структуровано і наочно ідентифікувати

потенційні причини відхилень, які призводять до відмови виробу на етапі FAI. Такий підхід особливо цінний у складних виробничих системах, де взаємозв'язки між різними факторами, такими, як: технологічними, матеріальними, людськими або організаційними – можуть бути складними для виявлення при звичайному лінійному аналізі.

У контексті використання діаграми Ішікави, основна проблема (наприклад, **FAI FAIL**) розміщується в «голові» діаграми, а її «кістки» представляють основні категорії потенційних причин: це можуть бути **людський фактор, матеріали, методи, машини, середовище та вимірювальні засоби**. У межах кожної категорії деталізуються конкретні чинники, які могли вплинути на якість виробу та призвести до виявлених дефектів. Така візуалізація не лише полегшує командну роботу у межах міжфункціонального розслідування, але й сприяє виявленню кореневої причини дефекту, що є передумовою до ефективного усунення проблеми на виробництві.

У виробничому контексті FAI, застосування діаграми Ішікави дозволяє суттєво підвищити ефективність аналізу браку, підтримуючи логічну послідовність розгляду усіх можливих причин дефекту. Завдяки цьому, прийняті коригувальні дії стають більш обґрунтованими та націленими на усунення саме джерела проблеми. У сукупності з іншими інструментами якості, такими як діаграма Парето або 5Why, цей метод забезпечує системний підхід до підвищення надійності продукції на етапі впровадження у виробництво [10, 11].

Діаграма Парето є одним із фундаментальних методів аналізу дефектів у межах процесу FAI, що ґрунтується на емпіричному принципі Парето (правило 80/20). Цей підхід постулює, що приблизно 80% невідповідностей або дефектів спричинені 20% основних факторів. Використання діаграми Парето у процедурі FAI дозволяє не лише квантитативно оцінити поширеність певних дефектів, а й здійснити їхню класифікацію відповідно до їхнього впливу на кінцеву якість продукції.

Аналіз за допомогою діаграми Парето дає змогу проводити ідентифікацію критичних відхилень у параметрах виготовлення, що, у свою чергу, сприяє формуванню пріоритетних напрямів коригувальних дій. Це має особливе значення в умовах багатопараметричних виробничих систем, де висока варіативність технологічних параметрів та складність їхнього прогнозування обумовлюють необхідність пріоритетної оптимізації найбільш значущих процесів [13].

Застосування даного інструменту у процесі FAI дозволяє формувати детерміновані коригувальні стратегії, зосереджуючи виробничі ресурси на усуненні першопричин невідповідностей. Таким чином, систематична реалізація аналізу за допомогою діаграми Парето сприяє не лише зниженню частоти появи дефектів, а й підвищенню загальної надійності технологічного процесу.

Емпіричні дослідження свідчать про високу ефективність діаграми Парето як методу ідентифікації ключових факторів впливу на якість продукції. Наприклад, результати досліджень у сфері контролю якості електронних компонентів демонструють, що застосування діаграми Парето для аналізу дефектів у процесі виготовлення друкованих плат дозволяє знизити рівень браку на 25–40% за рахунок фокусування на усуненні основних першопричин. Водночас комплексне впровадження цього інструменту у межах систем управління якістю сприяє підвищенню операційної ефективності виробництва за рахунок оптимізації технологічних параметрів та впровадження превентивних заходів контролю.

Після аналізу діаграми потоку FAI було виявлено кілька основних точок, де можливі проблеми, що впливають на якість і ефективність процесу. До основних категорій дефектів або відмов можна віднести:

1. **Проблеми з компонентами** (браковані, відсутні сертифікати, невідповідність стандартам).
2. **Помилки у процесі монтажу SMT** (неправильне нанесення паяльної пасти, дефекти пайки).
3. **Проблеми тестування** (відхилення електричних параметрів, нестабільність роботи).
4. **Невідповідності у документації** (відсутність або некоректне оформлення звітів).
5. **Помилки калібрування обладнання** (некоректні налаштування печей, AOI, X-RAY).

З цією метою були зібрані статистичні дані щодо частоти виникнення основних видів браку, на основі яких було побудовано відповідну діаграму Парето.

*Таблиця 1***Зібрані статистичні дані для коректної побудови діаграми Парето**

№	Категорія дефекту	Кількість випадків	Відсоткове співвідношення (%)	Кумулятивна частка (%)
1	Проблеми з компонентами	45	34.6%	34.6%
2	Помилки у процесі монтажу SMT	30	23.1%	57.7%
3	Проблеми тестування	25	19.2%	76.9%
4	Невідповідності у документації	15	11.5%	88.4%
5	Помилки калібрування обладнання	15	11.5%	100.0%
	Разом	130	100%	

Де **Відсоткове співвідношення** – частка кожного типу браку від загальної кількості дефектів у відсотках. Розраховане за формулою:

$$\text{Відсоткове співвідношення} = \frac{\text{Число випадків браку}}{\text{Загальна кількість випадків браку}} \times 100\%$$

Графічне представлення результатів виконано у вигляді кумулятивної кривої, що дозволяє візуалізувати відносний вплив кожного виду браку на загальний рівень дефектності.

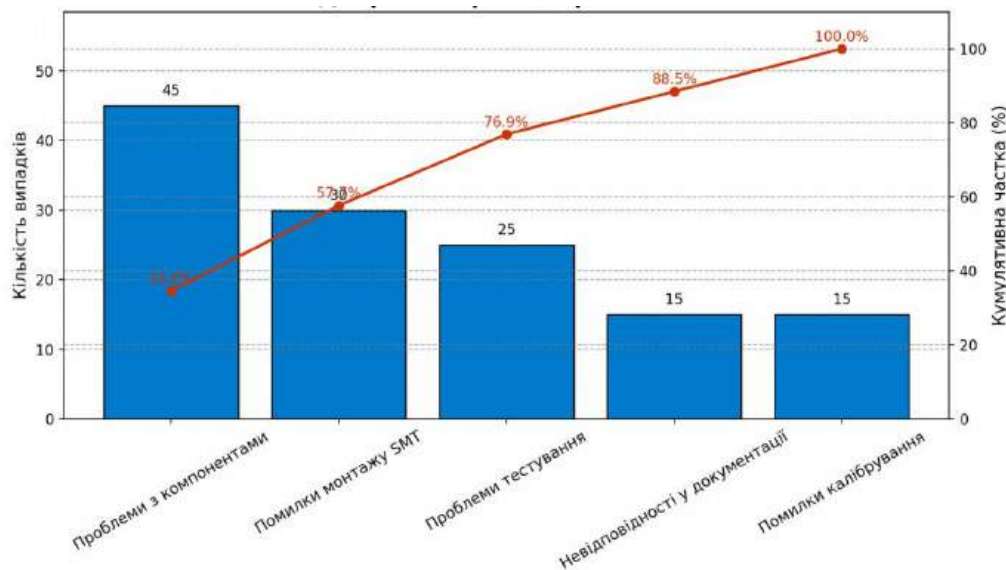


Рис. 4. Діаграма Парето дефектів FAI

Висновки. На основі проведеного дослідження процесу First Article Inspection (FAI) у виробництві електронних модулів, підкреслюють важливість комплексного та системного підходу до управління якістю на початкових етапах виробництва. Детальний аналіз етапів FAI – від підготовки компонентів і SMT-монтажу до фінального тестування – засвідчив, що суворе дотримання встановленої послідовності дій дозволяє виявити та усунути критичні дефекти ще до початку серійного виготовлення. Це не лише сприяє зменшенню кількості відмов, а й оптимізує витрати, пов'язані з переробкою або утилізацією дефектної продукції для виробництва.

Використання таких аналітичних інструментів, як діаграма Ішікави, дає змогу ефективно ідентифікувати першопричини проблем та формувати підґрунтя для впровадження заходів з постійного вдосконалення. Тестування матеріалів, контроль параметрів паяння, застосування AOI та X-ray, а також програмування і фінальна перевірка виробу створюють єдину ланку якості, що формує довіру до продукту й забезпечує відповідність міжнародним стандартам.

Крім того, впровадження принципів Total Quality Management (TQM) у взаємозв'язку з практиками логістичної інтеграції та організаційного навчання може значно підсилити здатність підприємства адаптуватися до змінного середовища та формувати сталу конкурентну перевагу. У свою чергу, описана модель FAI із залученням аналітичних методів та інтеграцією принципів TQM стане ефективним інструментом не лише для забезпечення якості продукції, але й для формування стабільної системи управління якістю, здатної підтримувати інноваційний розвиток виробничого підприємства в умовах глобальної конкуренції.

Література:

1. Blanco-Encomienda, Francisco, Rosillo-Díaz, Elena Muñoz, Juan. (2018). Importance of Quality Control Implementation in the Production Process of a Company. *European Journal of Economics and Business Studies*. 4(1). 240-244.
2. Sharma, A. S. & Sharma, P. (2020). Implementation of DMAIC Methodology of Six Sigma in Vocational Education and Training for Quality Improvement. *International Journal of Advance Research and Innovation*. 8.(4). 297-301. doi: 10.13140/RG.2.2.19687.68001.
3. Teta, J., Xhafka, E., Bodi, I. (2019). Implementation of TQM in Manufacturing Industries of Developing Countries - Case Study: Albanian Companies. *European Journal of Engineering and Formal Sciences*. 3. 6. doi: 10.26417/ejef.v3i2.p6-10.
4. Potkany, M, Zavadsky, J., Hlawiczka, R., Gejdos, P., Schmidtova, J. (2022). Quality Management Practices in Manufacturing Enterprises in the Context of Their Performance. *Journal of Competitiveness*, 14(2), 97–115. doi: 10.7441/joc.2022.02.06.
5. Beraki, T. M., Tessema, M. T., Plecka, M. (2022). Factors affecting the implementation of total quality management (tqm) in small and medium-sized enterprises (smes): the case of south Africa. *Journal of Organizational Culture, Communications and Conflict*. 26(3). 1-14.
6. Yanya, M., Mahamat, N. (2020). The impact of supply chain management practices on competitive advantages: moderation role of total quality management. *Polish journal of management studies*. doi: 10.17512/pjms.2020.21.1.31.
7. Kozień, E. (2019). Quality Improvement in Production Process. *Quality Production Improvement - QPI*. 1. 596-601. doi: 10.2478/cqpi-2019-0080.
8. Pfab, K., Eichler, R., Mallandur, A., Rothering, M. (2024). Data of automated optical inspection of surface-mounted technology electronic production. *Data in Brief*, 53. doi: 10.1016/j.dib.2024.110110.
9. Rusu, M., Soare, I., Botan, M., Dragomirescu, A., Militaru, C. (2019). FAI First Article Inspection in production activity. *Incas bulletin*. 161. 209-222. doi: 10.13111/2066-8201.2019.11.3.18.
10. Luca, L. (2016). A new model of Ishikawa diagram for quality assessment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 161. doi: 10.1088/1757-899X/161/1/012099.
11. Ciocoiu, C. N. & Ilie, G. (2010). Application Of Fishbone Diagram To Determine The Risk Of An Event With Multiple Causes. *Management Research and Practice*. 2(1). 1-20.
12. Alkiayat, M. A. (2021). A Practical Guide to Creating a Pareto Chart as a Quality Improvement Tool. *GlobJ Qual Saf Healthc*. 4(2):83-84. doi: 10.36401/QSH-21-X1.
13. SMT PCB Assembly Process [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.viasion.com/blog/smt-pcb-assembly-process-8-basic-steps/>.
14. IPC-6012: Qualification and Performance Specification for Rigid Printed Boards [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://shop.ipc.org/ipc-6012>.
15. Quality Is More Than Making a Good Product [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hbr.org/1983/07/quality-is-more-than-making-a-good-product>.

References:

1. Blanco-Encomienda, Francisco, Rosillo-Díaz, Elena Muñoz, Juan. (2018). Importance of Quality Control Implementation in the Production Process of a Company. *European Journal of Economics and Business Studies*. 4(1). 240-244.
2. Sharma, A. S. & Sharma, P. (2020). Implementation of DMAIC Methodology of Six Sigma in Vocational Education and Training for Quality Improvement. *International Journal of Advance Research and Innovation*. 8.(4). 297-301. doi: 10.13140/RG.2.2.19687.68001.
3. Teta, J., Xhafka, E., Bodi, I. (2019). Implementation of TQM in Manufacturing Industries of Developing Countries - Case Study: Albanian Companies. *European Journal of Engineering and Formal Sciences*. 3. 6. doi: 10.26417/ejef.v3i2.p6-10.
4. Potkany, M, Zavadsky, J., Hlawiczka, R., Gejdos, P., Schmidtova, J. (2022). Quality Management Practices in Manufacturing Enterprises in the Context of Their Performance. *Journal of Competitiveness*, 14(2), 97–115. doi: 10.7441/joc.2022.02.06.
5. Beraki, T. M., Tessema, M. T., Plecka, M. (2022). Factors affecting the implementation of total quality management (tqm) in small and medium-sized enterprises (smes): the case of south Africa. *Journal of Organizational Culture, Communications and Conflict*. 26(3). 1-14.
6. Yanya, M., Mahamat, N. (2020). The impact of supply chain management practices on competitive advantages: moderation role of total quality management. *Polish journal of management studies*. doi: 10.17512/pjms.2020.21.1.31.
7. Kozień, E. (2019). Quality Improvement in Production Process. *Quality Production Improvement - QPI*. 1. 596-601. doi: 10.2478/cqpi-2019-0080.
8. Pfab, K., Eichler, R., Mallandur, A., Rothering, M. (2024). Data of automated optical inspection of surface-mounted technology electronic production. *Data in Brief*, 53. doi: 10.1016/j.dib.2024.110110.
9. Rusu, M., Soare, I., Botan, M., Dragomirescu, A., Militaru, C. (2019). FAI First Article Inspection in production activity. *Incas bulletin*. 161. 209-222. doi: 10.13111/2066-8201.2019.11.3.18.
10. Luca, L. (2016). A new model of Ishikawa diagram for quality assessment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 161. doi: 10.1088/1757-899X/161/1/012099.
11. Ciocoiu, C. N. & Ilie, G. (2010). Application Of Fishbone Diagram To Determine The Risk Of An Event With Multiple Causes. *Management Research and Practice*. 2(1). 1-20.
12. Alkiayat, M. A. (2021). A Practical Guide to Creating a Pareto Chart as a Quality Improvement Tool. *GlobJ Qual Saf Healthc*. 4(2):83-84. doi: 10.36401/JQSH-21-X1.
13. SMT PCB Assembly Process [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.viasion.com/blog/smt-pcb-assembly-process-8-basic-steps/>.
14. IPC-6012: Qualification and Performance Specification for Rigid Printed Boards [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://shop.ipc.org/ipc-6012>.
15. Quality Is More Than Making a Good Product [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hbr.org/1983/07/quality-is-more-than-making-a-good-product>.