

РИЗИКИ У ВИРОБНИЦТВІ АВТОДЕТАЛЕЙ ТА РОЗУМНА МЕТРОЛОГІЯ

С.П.Яцишин, д.т.н., проф., Національний університет «Львівська політехніка», Україна; e-mail: slav.yat@gmail.com

А.Я.Слюз, ДП «Львівстандартметрологія», Україна

Анотація

У роботі на основі вивчення виробництва електричних кабелів для оснащення ними легкових автомобілів оцінено метрологічні ризики у зв'язку з наявною технологією. Запропоновано застосовувати декілька різних методів відбору проб для формування партій для дослідження. Оцінено їх можливості за вибраними критеріями. Показано переваги динамічного методу за можливостями оперативного проведення метрологічних заходів. Встановлено певні фактори методу, що надають йому низку переваг (до прикладу, відсоток кабелів, що підлягають метрологічній перевірці, тривалість очікування партії у черзі на обслуговування, тощо).

Ключові слова

Деталі автомашин, Розумна метрологія, Ризики, Якість продукції, Стратегія відбору вибірки

1. Вступ

Сталий розвиток автомобільного оснащення уможливив подальше вдосконалення серійного виробництва автомобілів при дотриманні вимог стосовно екології виробництва. Так, останнім часом в Україні з'явилися низка виробників автомобільного обладнання. Останні включають потужні кабелі електрообладнання для передачі імпульсу струму від акумулятора до фар та до стартера, причому в момент запуску двигуна значення струмів короткочасно можуть досягати сотень ампер. Щодо проблем з фарами, то Компанія Toyota відкликає в США (з 1.11.2021 р.) 158 тисяч пікапів Tundra, випущених у 2018-2021 рр., через проблеми з фарами, що можуть призвести до займання [1]. Компанія Toyota обіцяє, що її дилери, якщо виявлять дефект, то безкоштовно усунуть.

2. Недоліки

Встановлено наявність метрологічно-зумовлених ризиків, які в умовах значних електрично-енергетичних навантажень при експлуатації автомобілів призводять через економічні ризики до економічних втрат. Безкоштовність усунення для клієнтів не означає, а лише підкреслює її істотну вартість для кінцевого виробника, яким є зазначена компанія. Остання повинна включити у дану вартість не лише вартість усунення неполадки, але вартість відкликання.

3. Мета роботи

Метою роботи є вивчення різних проявів, зумовлених змінами технології виробництва автодеталей, метрологічних і економічних ризиків, причому, як зі сторони виробників, включаючи кінцевого виробника, так і зі сторони споживачів, як рекомендує переглянутий 2017 р. стандарт [2], що стосується роботи і опрацювання результатів калібрувальними та випробувальними лабораторіями, а також дослідження можливостей апаратно-програмного оновлення смарт-засобів виробництва стосовно зменшення зазначених ризиків.

4. Розгляд метрологічних і економічних ризиків у найбільш енергетично напружених елементах конструкції автомобіля

У контексті мети даного дослідження акцентуємо увагу на поглибленому вивченні статистично-метрологічних особливостей технології конкретного виробництва, отримання

загальної картини з точки зору ризикових аспектів та виявлення можливості зниження рівня ризику при ефективнішому використанні можливостей смарт-метрології [3].

Насамперед, розглянемо економічні і метрологічні ризики, як дві групи взаємопов'язаних ризиків, взаємозалежність яких стає особливо вирізняється в енергонапружених елементах конструкції автомобіля. До таких відносяться деталі електропроводки, включаючи кабелі. В останніх виділяються так-звані слабкі елементи та окремі «точки» з максимальним значенням розсіюваної електричної потужності. Взагалі-то, термодинаміка необоротних процесів через її основне рівняння [4] розглядає будь-яку ситуацію, що виникає у складному технічному об'єкті, оцінюючи дисиповану потужність та зумовлені нею зміни ентропії. Саме у зазначених точках, де виділення ентропії є максимальним, відбувається низка фізико-хімічних та механіко-фізичних процесів, що суттєво погіршуються надійність виробу. Інакше, при експлуатації кабелів, виготовлених з порушеннями технології, явними чи неявними, підвищуються ризики його відмови, причому ризики споживача.

4.1. Матеріалознавчі підходи до ризиків

Жорсткі вимоги щодо конструкції енергетично-інформаційного кабелю автомобіля полягають у забезпеченні якості, в першу чергу, його наконечників та зон їх під'єднання до самого провідника, що при усуненні їх спаювання чи зварювання (екологічно шкідлива технологічна операція) призводять до необхідності застосування механічного обтискування наконечником низки дротів, що формують кабель. Електричний опір перехідної зони може становити $10^{-5} \dots 10^{-2}$ Ом, а його вимірювання для характеризування якості з похибкою порядку 1 % вимагає чутливості на рівні $10^{-8} \dots 10^{-5}$ Ом. Тобто, стають необхідними класичні подвійні мости електричного опору [5]. Однак, по-перше, вони достатньо дорогі, а, по-друге, вимагають істотної тривалості для здійснення вимірювань і не спроможні забезпечувати контрольні операції для всіх вироблюваних кабелів, причому одночасно низки найменувань (для різних марок автомашин). Тому такі метрологічні засоби не передбачаються технологічними схемами й замінюються, для усталеної і багатократно перевіреної технології, рівноцінними, на думку виробників, засобами контролю. Ними стали «розмірні» шаблони: якщо шаблон щільно облягає зону обтиску наконечником кабелю, то цього вважається достатнім для забезпечення «нормальної» якості кабелю. Так працюють лінії з виробництва сучасних кабелів і така ситуація практично задовольняє автовиробників, а також кінцевих споживачів, якими є звичайні громадяни. Підкреслюємо, що при відпрацьованій технології виробництва кабелів подібна схема спрацьовує більш-менш надійно.

Але оскільки даній технології передують декілька попередніх технологій: технологія виготовлення листа з металу певної товщини, технологія виготовлення металу, технологія добування сировини і т.д. – то мінімальні відхилення на будь-якій попередній технологічній ланці можуть призвести і призводять до ризиків у наступних ланках і так аж до кінцевого споживача. На жаль, зміни у виробництві матеріалу для виготовлення наконечників (із міді), що зумовлюються вичерпанням руд, коректуванням технології виробництва металу і самого листа для виробництва наконечників, тощо, можуть призводити до наступних відхилень, ніби-то незначних, але здатних проявитися у екстремальних ситуаціях. Саме такою, вважаємо, є момент запуску двигуна, коли через контакт, що обтискає струмопровідний дріт, проходить струм у сотні Амперів, що викликає його нагрівання. Особливо нагрівається зона наконечника, прилегла до кабелю. Адже внаслідок мікронерівностей її електричний опір є дещо вищим від опору провідника. Виникає надлишкове виділення електричної потужності, яке призводить до її істотнішого нагрівання і, тим самим, до подальшого посилення потужності, що розсіюється у даному місці. Інакше, процесу притаманний позитивний зворотній зв'язок. У лампі розжарення подібним чином перегрівається дефектна зона спіралі й вона передчасно виходить з ладу. На цей процес накладається температурний відпуск металу контакту, внаслідок якого останній втрачає частково формостійкість, що також посилює інтенсивність прояву «гарячої» точки.

4.2. Економічні підходи до ризиків

У світі торгівлі існує відомий принцип, який називається розподілом ризиків. Відтворюючи ці засади, якими б доречною вони не були у своєму первісному контексті, промисловість сконцентрувалась на гарантіях відповідності наданого товару чи послуги. У разі дефекту наслідки відчує замовник, а наслідки дійсно можуть бути досить серйозними [6]. Просто поміркуйте про критичний компонент автомобіля, у якого вийшов з ладу стартер, або від перегріву кабелю сталася пожежа; тоді проблема відразу стає гранично зрозумілою. Метрологія та економіка повинні стати достатньо розумними, щоб дати коректну відповідь на єдине питання, яке цікавить розумних метрологів: "Які ризики пов'язані з прийняттям рішення?"

Тому виробнича практика вимагає щоденного контролю метрологічних показників, а вимірювальні прилади повинні відповідати необхідним специфікаціям. Слід пам'ятати, що вони повинні бути встановлені не лише на основі бюджету невизначеності (шляхом визначення впливу інструменту щодо інших внесків невизначеності), але і враховувати відповідні прийнятні ризики для клієнтів та постачальників відповідно до [7].

Як наслідок, виходячи з того, що заплановане калібрування - це практика, що належить до світу законодавчої метрології і не завжди відповідає реальним потребам промислової реальності, тобто подоланню ризиків, пов'язаних з кожним рішенням, смарт-метрологія пропонує модель корисності постійного моніторингу на відміну від моделі довільно-періодичного калібрування [3]. У нашому випадку це може означати, що на кожному автомобілі слід встановити смарт-засіб (подвійний міст електричного опору), про можливість чого ще рано міркувати. Зосередимо подальшу увагу на ризиках, пов'язаних з вирішенням проблеми перехідних контактів силової частини кабелів автомобілів, адже наявність зазначеної проблеми зауважена виробниками на етапах, що передують використанню автомобілів кінцевими споживачами.

4.3. Метрологічні підходи до ризиків

Важливість точного і прецизійного інструменту метрології визначалася за допомогою емпіричних правил, таких як правило Gagemaker. Однак, з появою статистичного процесу управління виробництвом, перейшли практично до статистичного визначення ймовірності неправильної класифікації товару під час метрологічного вивчення. Декілька параметрів, таких як розподіл процесу, прецизійність і точність інструменту метрології, стратегії вимірювання тощо, визначають ймовірність того, що хороший продукт класифікується як поганий, і навпаки. Згодом функцію ймовірності можна перетворити на число, еквівалентне відсотку неправильно класифікованого продукту. З цього числа можна розрахувати вартість неправильної класифікації, яка є функцією прецизійності, точності та використовуваної стратегії вимірювання. Ця вартість може бути використана для прийняття рішень, що передбачають обґрунтування нових можливостей метрології, покращення стратегій вимірювання, або для вирішення, чи потрібна метрологія взагалі. Були отримані приклади, що ілюструють фактичні витрати, пов'язані з використанням неякісного інструменту метрології, і пропонувались стратегії, що враховують вартість неправильної класифікації [8].

5. Технологія виробництва автодеталей та її метрологічне забезпечення

Складність процесів виробництва автодеталей постійно зростає; додаються етапи контролю, що повинні гарантувати високу якість продукції (до прикладу, для виготовлення кабельної продукції автомашин необхідні етапи, які можуть повторюватись). Крім того, різноманітність типів ускладнює процес. Незважаючи на необхідність кроків контролю, більшість з них виробник може вважати непотрібними; оскільки це переважно не операції з доданою вартістю, які збільшують вартість кінцевої продукції, то від них відмовляються. Мета виробника - виявити баланс між виконанням потрібної кількості операцій контролю та досягненням високої продуктивності.

На основі аналізу різних характеристик метрологічних заходів та методів розглянемо підходи щодо оптимізації параметрів вибірки (число зразків та частота перевірок) та розроблення динамічних стратегій для зниження ризику під час виготовлення автомобільних кабелів. Також розробимо процедуру, що допомагає визначити, яка стратегія вибірки підходить краще, орієнтуючись на метрологічні характеристики та значення ризиків. Дослідження показали, що непотрібних заходів можна уникнути, якщо стратегія вибірки стосується лише технологічних машин з постійним коефіцієнтом вибірки; правда, це прийнятно для простих систем метрології (тих, які вимірюють властивість заготовки, яка не пов'язана з типом товару). Процедури для зміни стратегії вибірки пропонують розрахувати коефіцієнти для нового методу вибірки.

У роботі [9] пропонуються підходи до оптимізації вибірки для різних типів інструментів метрології з урахуванням можливостей метрології та їх врахуванням щодо параметрів обрахунку, таких як продуктивність метрологічних інструментів та ймовірності невдачі. Тоді метрологічні можливості можна краще використати, причому залежно від характеристик контрольованого технологічного обладнання. Тим самим, можна приділити більше уваги до виявлення критичних характеристик.

Щодо методів вибірки, їх можна класифікувати на три основні типи: статичний, адаптивний та динамічний [10].

- Метод статичної вибірки визначає партії, що підлягають вимірюванню на початку виробництва без будь-яких можливих змін.
- Адаптивний тип, як статичний, позначає лоти, які повинні вимірюватися на початку з допомогою відповідних правил вибірки, але з можливістю остаточно виконати вимірювання або не виконати, залежно від інформації, зібраної під час виробництва.
- Третій тип - динамічна вибірка - вимірює в режимі реального часу найкращі партії виробів або комплектуючих, залежно від потужностей метрології та поточної ситуації.

Недоліки були виявлені для статичної вибірки [11], де деякі технологічні засоби жодного разу не вживались аж до завершення, тобто до кінця використання методу динамічної вибірки для контролю зразків.

Для управління технологічними машинами або продуктами може бути призначена статична вибірка із заданим значенням коефіцієнт вибірки як $1/N$, N - кількість партій кабелів в межах групи ризику. Це означає, що для співвідношення $1/10$ одна партія буде проміряна із 10 вироблених партій. Якщо у кожній партії міститься 10 кабелів, то під загрозою відсутності контролю перебуває 90 кабелів того самого типу. C@R (кабелі під ризиком) - це індикатор для управління рівнем ризику технологічного засобу. Він вказує на кількість виготовлених кабелів, що можуть бути під загрозою між двома черговими заходами.

Крім того, виявлено, що залучення деяких метрологічних методик не залежать від контрольованого об'єкту, але залежить від можливостей технологічного обладнання (до прикладу оптичного) та відбору проб за допомогою цього обладнання. У нашому випадку таким технологічним засобом можна вважати високоточний подвійний міст для вимірювання малих значень електричного опору перехідних зон «наконечник - кабель». Цей міст обмежує відбір проб у часі, поза-як вимагає 5-10 хвилин для визначення опору одного кабелю.

У цьому контексті акцентуємо на поглибленому вивченні чинної на підприємстві системи контролю і дотримання якості, у тому числі заходів стосовно забезпечення вибірки кабелів. Підприємства галузі постійно розробляють методи, щоб якнайшвидше виявити відхилення у чинних технологічних процесах, зберігаючи високу якість продукції. При цьому, вивчення шляхів покращення надійності технологічних процесів та обладнання без перевантаження виробничої системи набуває пріоритету. Для досягнення якості технологічних процесів і виробничого обладнання, рекомендовано виконання операцій контролю (для контролю якості обтискання наконечників використовуються розмірні калібри, з допомогою яких перевіряють кожен виготовлений зразок. Тобто, здійснюється 100% вибірка зразків).

На жаль, чинні ризики, зумовлені неналежним рівнем вхідного контролю щодо матеріалу та технології виготовлення матеріалу наконечників, призводять до виникнення і можливого повторення з часом вищеописаних дефектів, що проявляються у кінцевого споживача.

На даний момент, нами запропоновано низку заходів, здатних за рахунок збільшення ризиків виробника/групи виробників знизити ризики споживача. До таких відносимо різні заходи додатково контролю або ж заходи, направлені на заміни операції перевірки обтиснутих наконечників з допомогою розмірного калібру. Перелічимо і охарактеризуємо їх:

- Заміна операції перевірки обтиснутих наконечників з допомогою розмірного калібру операцією контролю проблемного місця кабелю з допомогою 3D-зору [12]. Отримуємо всі переваги вказаного методу відбракування. Проте, причина, зумовлена послабленням формостійкості, не спроможна бути усунутою. Тут вимагається впровадження жорсткішого вхідного контролю листового матеріалу наконечників, до прикладу, з допомогою методу термоелектричного зонда [13];
- Доповнення або заміна операції перевірки обтиснутих наконечників з допомогою розмірного калібру операцією вимірювання електричного опору перехідної зони обтиснутого наконечника. Це дає змогу охарактеризувати саме визначальну для формування «гарячого» місця кабелю при його експлуатації електричну характеристику, на відміну від чисто розмірної характеристики у раніше прийнятому методі.

На підставі вище приведеного і враховуючи досвід [9], детальніше розглянемо особливості динамічної вибірки стосовно вирішення завдань чинних досліджень. Динамічна вибірка ґрунтує свої критерії для вибору найкращих партій для вимірювання в режимі реального часу та залежно від поточної ситуації на виробництві (у даному випадку електрокабелів), не враховуючи заздалегідь визначені правила, що передують етапу вимірювань. Цей метод відбору проб дає змогу краще керувати метрологічними потужностями порівняно із статичними та адаптивними методи вибірки.

Перші роботи, що стосувались динамічного відбору партій контрольованих зразків, викладено Purdy et al. [14-15]. Тут запропоновано метод ефективного управління чергою на метрологічні дослідження, поєднуючи відокремлені правила вибірки в єдине унікальне рішення стосовно вибірки, а згодом алгоритм, здатний реагувати на зміну заводських умов, що дозволив покращити гнучкість у визначенні правил вибірки. Введено [16] алгоритм вибору оптимальних пластин, покладаючись на набір правил відбору, що базувався на присвоєнні певних «мінусів» кожному з правил вибірки, щоби, як наслідок, потім за допомогою змішаної цілочисельної лінійної програми вибрати об'єкти з мінімальною сумою мінусів. Далі було розроблено інтегровану програму [17] для відбору проб на рівні партії та окремого об'єкту, розгорнуту на заводі AMD, яка краще контролює тривалість метрологічного циклу при збереженні відмінної якості виготовлюваної продукції. Щоб уникнути надмірного відбору проб, було запропоновано [18] методологію виконання вибірки, здатну розрізняти систематичні дефекти та виділяти випадкові дефекти, застосовуючи проєктні (попередньо встановлені) дані.

Представлено [19] алгоритм планування та виконання вибірки, щоб динамічно мінімізувати ризики на основі глобального показника вибірки - Global Sampling Indicator (GSI), який був визначений для вибору партій для вибірки та планування їх дослідження з допомогою метрологічних інструментів що приписує вагу кожній партії, яка надходить на етап вимірювання [20]. Симулятор під назвою S5 (Smart Sampling Scheduling and Skipping Simulator) був реалізований і перевірений на основі фактичних даних. Це показує, що ризики можна значно зменшити, дотримуючись обмеженої кількості заходів [21].

Підводячи підсумок, у [9] зазначено, що розроблення стратегій динамічного відбору вибірки для досліджень вимагає більших інвестицій – час + кошти - на розробку методології та впровадження, порівняно зі статичним або адаптивним методами відбору. Щодо переваг, то стратегія динамічної вибірки пропонує точний керування заходами, які необхідно виконати, щоб обрати найбільш підходящу вибірку зразків зі знизеним метрологічним ризиком, з забезпеченням пропускну здатності по метрологічним можливостям (потужностям), скороченням тривалості циклу при збільшеній продуктивності. Отже, покладаючись на досвід [9] у даній праці прагнемо запропонувати нові рішення щодо впровадження методу динамічної вибірки на виробництві електрооснащення автомашин.

Щоб отримати кінцевий продукт, над кабелями здійснюється понад 100 технологічних операцій, включаючи підготовчі операції по переналадці технологічної лінії: на відміну від операцій виготовлення напівпровідникових мікросхем, де тривалість циклу досягає двох місяців, тут тривалість циклу – до 1 робочої зміни. Технологія повинна гарантувати, що оснащення використовується коректно, а кабелі виготовлені правильно, відповідно до вимог до заданого типу автомашини. Використовуються причіплювані ярлики на виготовлювані об'єкти. На думку виробника, надмірне використання метрологічних інструментів призводить до затримки виробництва. Компроміс між кількістю метрологічно-обґрунтованих заходів і продуктивністю зсувається в бік останньої, що і зумовлює виявлювані споживачем на автомашиних недоліки. Лише повна оцінка вартості відкликання та ремонту автомобілів, а також втрата ними іміджу надійних марок, яку здійснити доволі важко, може надати ваги метрологічним заходам.

5.1. Метод подвійного моста у контролі якості електричних кабелів автовиробництва

Метод – детально описаний у [5]. Час, необхідний для проведення вимірювань даним методом всього одного об'єкта (кабелю), становить декілька хвилин. Це означає, що за умови наявності необхідного метрологічного інструменту та досвідченого метролога, при загальній продуктивності 1000 кабелів за зміну, спроможні перевірити 10 % кабелів на протязі зміни. Інакше, забезпечується 10 % вибірка; адаптивний метод вибірки, який передбачає можливість перевірки партії кабелів по завершенні їх виготовлення, не може застосовуватись.

5.2. Зондовий метод вивчення стабільності матеріалу поставлених пластин для наконечників кабелів за їх термо-е.р.с.

Метод може застосовуватись на етапі підготовки матеріалів до виготовлення кабелів і наконечників до них. Здійснюється перевірка, як листа, з якого виготовляються наконечники, так і самих наконечників. Матеріал характеризується на відповідність взірцю-еталону, стосовно якого існують дані про надійність, підтвержену кінцевим споживачем. Для контролю використовується метод вивчення локальної термо-е.р.с. [13].

5.3. Метод 3D-мірного зору

Метод стосується дефектоскопії, виконуваної автоматично з допомогою веб-камери при залученні штучної нейронної мережі для аналізу зображень. Практично даний метод релевантний описаному вище і широко застосовуваному методу вибракування виготовлених кабелів після операції обтискання тіла кабелю наконечниками. Він не вимагає багато часу і може бути застосованим повторно через певний час з аналізом інтенсивності початкових стадій втрати формостійкості. Проте, даний метод ще не залучався у технології виробництва кабелів [22].

5.4. Вивчення правил та стратегій формування вибірки, а також видів вибірок

На основі аналізу метрологічних заходів для виробництва автодеталей, базуючись на принципових моментах, що стосуються якості виготовлюваних об'єктів, дійшли до необхідності погодження розміру партій вибірки зі значеннями ризику (економічного та метрологічного). Нарешті, розроблено метод зміни стратегії вибірки, метою якого є визначення правильних кроків, щоби погодити існуючу стратегію відбору зразків із можливостями метрологічних інструментів, досягнути оптимальної стратегії стосовно ризиків, зафіксувавши наявність зайвих метрологічних інструментів та зайвих вимірювань, встановити можливості зменшення ризиків із врахуванням інформації стосовно наступних етапів виробництва та експлуатації контрольованих виробів.

Переважно спеціалізовані підприємства кабельного виробництва забезпечують перевірку кожного кабелю при виготовленні з допомогою певного виду метрологічного контролю кожні 30 секунд. Метрологічна команда складається з 6 осіб, що використовують 16 автономних інструментів метрології (для таких вимірювань, як товщина, накладення, критичний розмір тощо), 7 інструменти виявлення забруднень, частинок, подряпин, залишків, порожнеч, неякісного ущільнення, тощо), 12 видів інструментарію (засоби для зберігання та захисту об'єктів від забруднень) і 4 вбудовані інструменти метрології (для електронно-паперових міток); всього 39 засобів.

5.5. Алгоритм відбору та диспетчеризації вибірок. Метрологічні підходи

Нами запропоновано підхід, що дає змогу оцінити коректність здійснення вибірки контрольованих об'єктів та диспетчеризацію цих вибірок у часі у поєднанні з технологічними можливостями виготовлення та метрологічного забезпечення технологічної лінії з тим, щоби метрологічний контроль не призводив до надмірних часових затримок, як на етапі вимірювань, так і на етапі очікування на перевірку. Цей підхід призначений, у першу чергу, автовиробництву, як галузі з істотним значенням ризику, в тому числі, кінцевого споживача. Крім того, запропонований підхід концентрує увагу винятково на часі черги і часі вимірювання з використанням різноманітних метрологічних засобів.

Розглядаються наступні види диспетчеризації окремих партій виробів:

- FIFO (аббревіатура англomовного терміну): Першим прийшов, першим вийшов.

Перша партія, що надійшла у зону метрології та призначена до вимірювання – вимірюється першою.

- LIFO: Останнім прийшов, першим вийшов.

Остання партія, що надійшла у зону метрології та призначена до вимірювання – вимірюється першою.

- Пріоритетний порядок:

Партії, які досягають метрологічної зони, поступають на перевірку згідно попередньо встановленому порядку.

- Інший порядок:

Порядок досліджень партій встановлюється довільно і не обговорюється наперед. Цей порядок може визначатись, до прикладу, збільшенням термінів доставки комплектуючих або поступленням їх від технологічного обладнання, що характеризується найбільшим рівнем ризику.

Окрім застосування вище приведених правил диспетчеризації, розглянемо можливість виконати ще один крок з точки зору кращого використання метрологічного потенціалу та отримання нижчих значень ризику за допомогою методики відбору проб [10]. Зокрема, це можна зробити за допомогою динамічного методу, за яким реалізується політика пропуску для ефективного управління чергами метрології і за яким для початку обирають партії, що надходять від технологічного обладнання з притаманними йому вищими ризиками.

Щоб встановити, який із методів вважати більш прийнятним розглянемо три критерії:

А) Простір: оцінює метод на основі необхідного фізичного місця для партій виробів, які чекають на вимірювання.

Б) Ресурси, необхідні для впровадження: оцінює метод на основі ресурсів, необхідних для впровадження з точки зору часу, грошей та складності.

В) Ефективність: Оцінює метод на основі його очікуваних результатів з точки зору ризику та наскільки розумно виконані заходи (вимірюються партії, здатні максимально знизити ризик). Методи впорядковані за критерієм від найкращого коефіцієнту (значення 1) до найгіршого (значення 4). Зрештою, метод з найменшим сумарним значенням оціночного коефіцієнта вважається найкращим для вибору.

Таблиця 1. Оцінка методів диспетчеризації та стратегій вибірки для автодеталей

Метод	Простір	Ресурси	Ефективність	Коефіцієнт оцінки методу
FIFO	3	1	3	2,33
LIFO	3	1	4	2,67
Пріоритетний порядок	2	2	2	2,00 (усереднене)
Інший порядок (динамічний метод)	1	3	1	1,67
-за видом кабелів	1	3	1	1.67
-за потенційно неякісними складовими кабелів, до прикладу їх наконечників	1	1	1	1.00
-за конкретною зміною або конкретним виконавцем	1	2	1	1.33

Зазначений підхід може привести до впровадження нового методу, відмінного від раніше використовуваного та направлено на покращення значення метрологічного ризику C@R внаслідок впровадження метрологічних заходів, у т.ч. шляхом мінімізації тривалості черг. Такий метрологічний захід, як перевірка якості обтискання кабелю наконечником шляхом перевірки його за механічним калібром, переважно не несе корисної метрологічно-обґрунтованої інформації; він не знижує C@R) стосовно технологічного обладнання для обтискання. Замінивши його операцією автоматизованого 3D-зору, а також ввівши операцію вхідної перевірки матеріалу пластини контакту або самого контакту методом зондової термо-е.р.с., можемо зменшити час очікування, тобто чергу.

Потенційно слабкий компонент кабелю, тобто наконечники, вивчається кілька разів за допомогою різних методів планування та стратегій вибірки. По-перше, це вхідна перевірка пластини наконечників на відповідність стандартному складу. По-друге, аналіз якості роботи, що є діаграмою C@R для даної технологічної машини, яка стискає наконечник навколо заготовки кабелю. Коли поточний кабель з конкретної партії перевіряється за допомогою традиційної операції із застосуванням калібру розміру, це займає мінімальний час і виконується простим способом. Цей час входить до прийнятого раніше «Час процесу». Тут традиційна технологія доповнюється окремою перевіркою пластини наконечників. Це не виключає можливість появи слабкої гарячої точки в майбутньому, що створює ризик для споживача

Щоб знизити ймовірність появи зазначених місць, необхідно провести додаткові дослідження окремих партій виготовлених кабелів в умовах, близьких до натурних. Це означає необхідність вивчення формостійкості наконечників в прискорених умовах, тобто за пропускання струмів, більших на 10-20 % від номінальних при експлуатації кабелів. Ці випробування слід проводити на уже виготовлених кабелях, до прикладу, організувавши 10 % вибірку зразків; знову-таки тривалість випробування і виробничого циклу в цілому зростає досить істотно – на 2-3 %. При цьому, безпосередньо пропусканню струму передують вимірювання: а) електричного опору перехідної зони «наконечник - кабель»; б) контролю цієї зони розмірним калібром; в) контролю зазначеної зони з допомогою 3Д-бачення.

Ті самі дослідження на зразках того самого лоту повторюються по завершенні струмових випробувань. За наявності відчутних змін, що виходять за межі середньо статистичних даних, вважають, що наявність браку по вказаному слабкому місці кабелю - доведена.

У результаті, коли поточний лот підлягає дослідженням, зростає значення C@R. Вони збільшується пропорційно до кількості кабелів, що чекають на зазначені метрологічні заходи. Пізніше починається операція вимірювання, яка займає певний час. У цей момент значення C@R спадає на стільки, скільки опрацьовано кабелів. Кінцеве значення C@R є різницею між C@R, зменшеним в результаті вимірювальної перевірки, і поточним значенням C@R, збільшеним внаслідок того, що технологічне устаткування виготовляє наступну партію кабелів.

Отже, вводяться 2 часи для аналізу рівня метрологічних ризиків C@R: тривалість метрологічних операцій та тривалість очікування партії у черзі на метрологічні заходи. У середньому, для кожного метрологічного заходу час, відведений на партію виробів, зазвичай перевищує тривалість їх вимірювання, за рахунок тривалості очікування у черзі на обслуговування.

З метою виявлення можливостей підвищення якості контрольованих об'єктів внаслідок метрологічних заходів за наявності декількох одиниць технологічного обладнання на лінії, розглянемо процедуру оцінки підбору та стану вибірки об'єктів та можливість зміни стратегії цієї вибірки. Зазначений підхід повинен часто повторюватись для уточнення коректності застосовуваної моделі відбору проб. Дану процедуру поділимо на такі основні етапи (рис.1): 1. Унаочнення характеристик застосовуваних метрологічних інструментів. 2. Вивчення зв'язку між одиницями технологічного обладнання та інструментами метрології. 3. Виявлення можливого вузького місця технології для його покращення внаслідок впровадження метрологічних заходів. 4. За визначеної поточної стратегії вибірки аналізування можливостей запропонованої нової стратегії вибірки та розрахунок нових коефіцієнтів вибірки. 5. Вирішення чи достатньо метрологічних заходів для збереження чинної технологічної підтримки (шлях 5 - 3) чи слід змінювати технологію та її метрологічне забезпечення (шлях 5 -1).

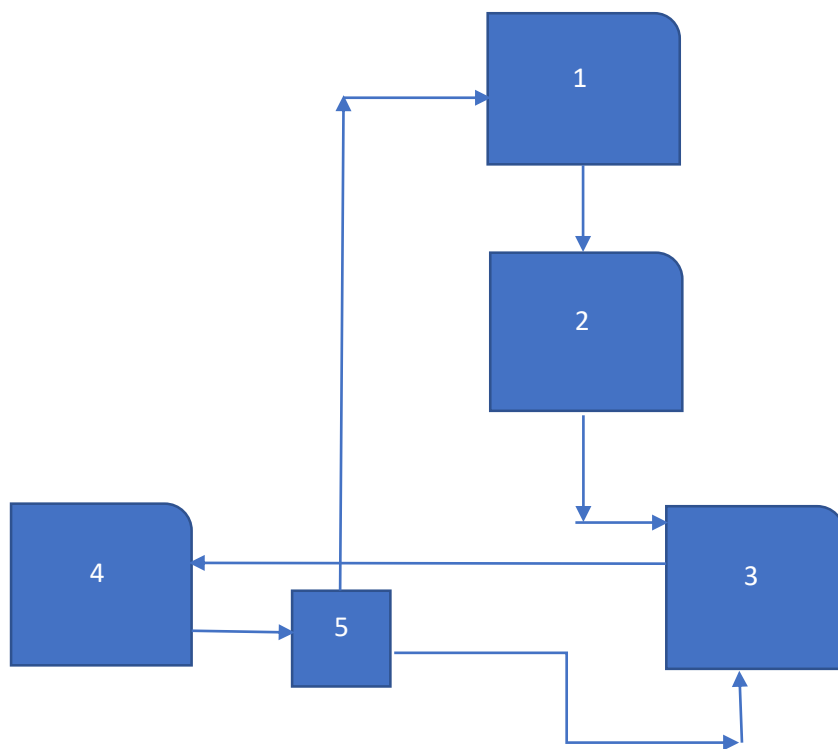


Рис.1. Процедура оцінки підбору та стану вибірки контрольованих об'єктів

Підкреслюємо, що на даному рисунку 3-й етап відповідає за визначення правильних показників при встановленні можливості їх покращення. Якщо показники є достатньо якісними, то поточна вибірка – зберігається незмінною. Інакше, переходимо до 4-го етапу, за яким впроваджується нова стратегія відбору об'єктів. Перед внесенням змін до стратегії вибірки необхідно вивчити та знати показники якості, щоб опісля перевірити у який бік змінився процес внаслідок внесених змін. Тут індикаторами змін можуть бути значення C@R для технологічного обладнання лінії виробництва, загальна ефективність обладнання, тривалість циклу, вихід кабелів, тощо.

Якщо немає змоги покращити методологію вибірки, до прикладу зміною значень частоти дискретизації або зміною стратегії вибірки, вивчається чинна система диспетчеризації партій з метою її можливої зміни. Якщо ж зберігається стратегія вибірки, то створюється модель перевірки її працездатності, з допомогою якої регулярно перевіряється коректність стратегії.

Критерієм, при цьому, служить очікуваність отримуваних результатів і принаймні незмінність або покращення значень C@R технологічної лінії.

Крім значень C@R, перевірячі підлягають два інші ключові показники ефективності, що описують чи відбулося покращення зі зміною стратегії вибірки, а саме: варіабельність ризику та зміна тривалості циклу. Коли загальна варіабельність ризику для певних метрологічних заходів, що виражається стандартним відхиленням σ отриманих значень може зменшуватись зі значень C@R від 78 до 48, навіть якщо не всі види технологічного обладнання перейшли на новий тип контролю.

Таким чином, детальний аналіз метрологічних заходів на прикладі виробництва кабелів електрообладнання легкових автомобілів здійснено з урахуванням наступного: фізичних і конструктивних особливостей компонентів вказаних кабелів, кількості одиниць технологічного устаткування для їх виробництва, складності й кваліфікації виконання метрологічних заходів, видів і типів застосованих метрологічних інструментів, стратегії диспетчеризації партії, розміщення заходів у виробничому циклі, кількістю (відносно кількістю) перевірених кабелів, правилами відбору проб, тривалостями вимірювань та черг, частотою відбору, кількістю виконаних вимірювань і значеннями C@R. Він дає змогу зрозуміти наскільки є ефективними метрологічні заходи за ключовими параметрами, а також наскільки прийняті рішення спроможні покращити продуктивність конкретного заходу і, звідси, знизити метрологічні й економічні ризики виготовлюваної продукції.

Завершення

У результаті вивчення комбінованих ризиків гнучкого виробництва складної та перелаштовуваної електротехнічної продукції електрокабелів - комплектувальних виробів автомашин, поєднаного з проведенням низки метрологічних заходів, направлених на покращення їх якості, встановлено наступне:

- Існує низка заходів, спроможних завдяки підвищенню метрологічного ризику виробника(-ів) - додаткових операцій метрологічного контролю – суттєво підвищити якість автодеталей і знизити ризики кінцевих споживачів – власників автомашин. Для виявлення потенціалу можливого покращення якості та зниження ризиків розвинуто процедуру аналізу метрологічних заходів та встановлено ряд характеристик (до прикладу, відсоток продукції, що підлягає вимірюванню; тривалість очікування партій до проведення метрологічного заходу, тощо) і методів вибірки партій виробів для перевірки на протязі виробничого циклу.
- Змінено підходи до формування стратегії вибірки й розділено метрологічні підходи, що використовують вибірку за виробами та операціями: підходи за виробами повинні базуватися на змінних коефіцієнтах вибірки, тоді як підходи до технологічного обладнання - на постійних коефіцієнтах, оскільки останнє може простоювати певний час без використання.
- Виходячи із специфіки контролю кабелів автомашин, номенклатура яких змінюється від зміни до зміни залежно від замовлення, запропонована комбінований вибір зразків для досліджень, що враховує можливості метрологічних інструментів. Щоб задовольнити необхідну частоту вибірки, комбінована вибірка надає пріоритет відбору зразків за видом продукції та за операцією відправлення партії для вимірювання, причому надсилання партії на метрологічну перевірку здійснюється, коли попередня методика вибірки не забезпечила досягнення поставлених цілей.
- Релевантним підходом можна вважати розгляд характеристик метрологічних інструментів стосовно характеристики досліджуваних автодеталей, наприклад шляхом врахування їх виробленої кількості, пов'язуючи цю кількість з продуктивністю метрологічного інструменту, спроможного їх кваліфікувати.
- Метод динамічної вибірки, що вважається достатньо ефективним на виробництвах виробів напівпровідникової електроніки, показав себе достатньо успішним для дрібносерійного гнучко перебудовуваного виробництва електрокабелів автомашин, як ефективний щодо вибору партій виробів для вимірювання, щодо адаптації методу до

постійної перебудови технологічного процесу (зміни номенклатури кабелів для різних марок автомашин) та щодо управління метрологічними можливостями.

Нарешті, розроблено метод зміни стратегії вибірки, метою якого є визначення правильних кроків, щоби погодити існуючу стратегію відбору зразків із можливостями метрологічних інструментів, досягнути оптимальної стратегії стосовно ризиків, зафіксувавши наявність зайвих метрологічних інструментів та зайвих вимірювань, встановити можливості зменшення ризиків із врахуванням інформації стосовно наступних етапів виробництва та експлуатації контрольованих виробів.

Подяка

Автори висловлюють подяку співробітникам кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НУ «Львівська політехніка».

Конфлікт інтересів

Автори стверджують, що фінансові чи інші потенційні конфлікти стосовно даної праці - відсутні.

Список літератури

1. Toyota Recalls Tundra Pickups for Headlights That Catch Fire. Consumer Reports, Sept. 2021 <https://www.consumerreports.org/car-recalls-defects/toyota-tundra-pickup-recall-for-headlights-that-catch-fire-a1208906316/>
2. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:17025:ed-3:v1:en>
3. Cyber-Physical Systems and Metrology 4.0 Cj-editors S.Yatsyshyn, B.Stadnyk, IFSA Publishing, Barcelona, 3031.
4. Ya. Demirel, V.Gerbaud, Nonequilibrium Thermodynamics, Chapter 1. Fundamentals of Equilibrium Thermodynamics, Elsevier, 2019.
5. L. Jones, A. Chin, Electrical Instruments and Measurements, Prentice-Hall, 1991.
6. Metrology et calendar-based calibrations, Instrumentation & Measurement magazine, vol. 20, no. 2, pp. 11-12, April 2017. Posted by J.-M. Pou, 16 May 2017 in Metrology
7. ISO/IEC Guide 98-4:2012. Uncertainty of measurement — Part 4: Role of measurement uncertainty in conformity assessment. <https://www.iso.org/ru/standard/50465.html>
8. S. Kudva, R. Potter, Cost analysis and risk assessment for metrology applications, Proceedings Vol. 1673, Integrated Circuit Metrology, Inspection, and Process Control VI; Event: Microlithography '92, USA, 1992.
9. J. Perez. Risk minimization through metrology in semiconductor manufacturing. Université de Lyon, 2017. HAL Arhives, English. ffNNT : 2017LYSEM022
10. Ju. Nduhura-Munga, G. Rodriguez-Verjan, S. Dauzere-Peres, C. Yugma, Ph. Vialletelle, J. Pinaton. A literature review on sampling techniques in semiconductor manufacturing. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 26, Iss.2, pp.88–195, 2013.
11. Ju. Nduhura-Munga. Implementing and optimizing dynamic control plans in semiconductor manufact., PhD thesis, Ecole Nat. Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Gardanne, France, 2012.
12. 3D-vision on Windows 10. NDIVIA. <https://www.nvidia.com/en-us/geforce/forums/3d-vision/41/286802/3d-vision-on-windows-10/>
13. PCE Instruments. Defectoscope PCE-FD 20. https://www.pce-instruments.com/english/measuring-instruments/test-meters/defectoscope-kat_162404.htm
14. M. Purdy. Dynamic, weight-based sampling algorithm. In Semiconductor Manufacturing, IEEE Int. Symp., pp.1–4. IEEE, 2007.
15. M. Purdy, C. Nicksic, K. Lensing. Method for efficiently managing metrology queues. In Semiconductor Manufacturing, 2005. ISSM 2005, IEEE Int. Symp., pp.71–74. IEEE, 2005.

16. R. Good, M. Purdy. An milp approach to wafer sampling and selection. IEEE Trans. on Semiconductor Manufact., 2007.
17. A. Holfeld, R. Barlovi, R. Good. A fab-wide apc sampling application. IEEE Trans. on Semiconductor Manufact., Vol. 20, Iss.4, pp.393–399, 2007.
18. Ya. Kaga, Yo. Sato, Ya. Yamada, Yu. Yamazaki, M. Aoki, R. Harukawa, E. Chang. Integrated defect sampling method by using design attribute for high sensitivity inspection in 45nm production environment. In Semiconductor Manufacturing (ISSM), 2008 Int. Symp., pp.379–381. IEEE, 2008.
19. S. Dauzere-Pères, J.-L. Rouveyrol, C. Yugma, Ph. Vialletelle. A smart sampling algorithm to minimize risk dynamically. In 2010 IEEE/SEMI Adv. Semiconductor Manufact. Conf. (ASMC), pp.307–310. IEEE, 2010.
20. S. Housseman, S. Dauzère-Pérès, G. Rodriguez-Verjan, J. Pinaton. Smart dynamic sampling for wafer at risk reduction in semiconductor manufacturing. In Aut. Sc. and Eng. (CASE), 2014 IEEE Int. Conf., pp.780–785. IEEE, 2014.
- 21 P. Vialletelle, S. Dauzère-pérès, C. Yugma, J. Pinaton. A Smart Sampling Scheduling and Skipping Simulator and its evaluation on real data sets. Proc. 2011 Winter Simulation Conf. (WSC), 2011 https://www.academia.edu/17594430/A_Smart_Sampling_Scheduling_and_Skipping_Simulator_and_its_evaluation_on_real_data_sets
22. Vision and Learning Lab., Seoul National University, <https://cse.snu.ac.kr/en/lab/vision-and-learning-lab>