

Diagnostyka i naprawy modułów elektronicznych w trakcie procesu produkcyjnego

Streszczenie. W pracy opisano metody wykrywania uszkodzeń modułów elektronicznych i ich napraw w trakcie procesu produkcyjnego. Przedstawiono typowe usterki występujące w procesie produkcji takich modułów. Omówiono urządzenia niezbędne do wykrywania i naprawy takich usterek. Przedstawiono sposób diagnozowania uszkodzeń w wybranym module elektronicznym stosowany w jednym z przedsiębiorstw. Przeprowadzono analizę ekonomiczną realizacji procesu diagnozowania i naprawy modułów elektronicznych.

Abstract. The work describes methods for detecting failures to electronic modules and repairing them during the production process. Typical faults in the production process of such modules are being presented. The devices necessary to detect and repair such faults are discussed. Shows how to diagnose those failures in a selected electronic module used in one of the enterprises. An economic analysis of the implementation of the process of diagnosing and repairing electronic modules was carried out. **(Diagnostics and repair of electronic modules during the production process)**

Słowa kluczowe: Jakość produkcji, Układy elektroniczne, Testowanie, Naprawa modułów elektronicznych, diagnostyka urządzeń elektronicznych

Keywords: Production Quality, Electronic Circuits, Electronic Systems Testing, Electronic Modules Repair, Electronic Devices Diagnostics

Wstęp

Żyjemy w dobie gwałtownego rozwoju techniki i technologii. Jesteśmy świadkami postępu i przełomowych wynalazków w wielu obszarach elektroniki. Inżynierowie stają przed nowymi wyzwaniami, którymi są zapewnienie wymaganego poziomu jakości produkowanych wyrobów oraz automatyzacja procesów produkcyjnych i testowych. Etapy rozwoju przemysłu podzielić można na kilka poziomów. W umownej nomenklaturze stosowanej w literaturze, przemysł osiągnął poziom 4 [1, 2].

Czwarty stopień rozwoju przemysłu, obejmuje wprowadzenie zaawansowanych cybernetycznych systemów opartych na pełnej cyfryzacji urządzeń, mających zastosowania w wielu gałęziach produkcji [2]. W przemyśle może to dotyczyć linii produkcyjnych w pełni autonomicznych, gdzie wszystkie urządzenia w procesie produkcji komunikują się między sobą, przekazując dane, które mają wpływ na kolejne etapy produkcji. Systemy te działają w oparciu o inteligentne algorytmy, które pozwalają na autonomiczne podejmowanie decyzji bazując na przewidzianych wcześniej i zaprogramowanych przez konstruktora reakcjach [3].

Zintegrowany system komunikacji pomiędzy maszynami musi być spójny i szczelny, ponieważ ingerencja człowieka w działanie takiego systemu i podejmowane decyzje są bardzo ograniczone lub całkowicie wykluczone. Stąd jest konieczny duży wysiłek by tak zaawansowane technicznie urządzenia działały niezawodnie i nie były przyczyną wypadków. Dlatego, obecnie największym wyzwaniem jest budowanie w pełni autonomicznych linii produkcyjnych oraz zoptymalizowanych systemów testowych.

Szczególnie istotne są etapy wdrażania i budowy produktu zanim stanie się on gotowy do masowej produkcji. Proces, podczas którego wprowadza się nowy wyrób nazywany **NPI** (New Product Introduction), składa się ze ściśle określonych etapów [4]. Proces NPI pozwala opisać standard, w jakim powinien być wykonywany wyrób czyli jest wstępem do wdrożenia wyrobu do produkcji. Głównym celem procesu NPI, jest wyeliminowanie wszelkich możliwych do identyfikacji wad proponowanego produktu jeszcze przed jego produkcją. Ma zapewnić gotowość wyrobu do etapu produkcji i w rezultacie - wejścia do sprzedaży.

W celu zapewnienia jak najlepszej jakości procesu produkcyjnego i samego wyrobu, bardzo dużo uwagi poświęca się procesom projektowania, badania, weryfikacji

prototypów i ich testowania. Jest to konieczne by uzyskać najlepsze wyniki związane zarówno z jakością wytwarzania i niezawodnością gotowego wyrobu zanim będzie on mógł być dopuszczony do produkcji masowej. Należy zapewnić stabilny i możliwie niezawodny proces produkcji, który będzie uznany za standard.

Poszukiwane są nowe rozwiązania i sposoby na skrócenie czasu wytwarzania wyrobów, poprzez budowę jak najbardziej integralnych systemów wspierających montaż po metody pakowania i magazynowania [1]. Redukuje się do minimum ilość, występujących w procesie tworzenia wyrobów, etapów produkcyjnych, do niezbędnych spełniających kryteria wymaganej jakości wyrobu i jego funkcjonalności. Działania zmierzające do udoskonalenia procesu produkcji mają przełożenie na liczbę specyficznych, koniecznych do przeprowadzenia testów strukturalnych i funkcjonalnych. Tworzy się nowe algorytmy i systemy testowe umożliwiające skrócenie czasu testowania w procesie produkcji danego wyrobu. W myśl, że każda zaoszczędzona chwila przynosi dodatkową korzyść finansową, powstają coraz bardziej zintegrowane systemy pomiarowe [5].

Ustalenie efektywnych metod testowania wyrobu to jeden z najważniejszych etapów projektowania. Ma to na celu zweryfikowanie nowo wdrażanego produktu pod kątem użyteczności, jakości, działania w określonych warunkach pracy zgodnie z wymaganiami. Etap ten wymaga szczególnie technicznej, inżynierskiej wiedzy o projektowaniu. Proponowane rozwiązania muszą spełniać określone kryteria by produkt, przed wejściem do produkcji miał ustalony proces weryfikacji zgodności z oczekiwaniami. Systemy testowe często w kilku krokach procesu produkcji weryfikują działanie jeszcze nie w pełni gotowego produktu, ale np. półproduktu w celu sprawdzenia czy dany proces przebiegł prawidłowo i wyrób działa zgodnie z założeniami [5]. W ten sposób pokrywa się pełną weryfikację funkcjonalności wyrobu, która ostatecznie sprawdzana jest najczęściej na teście finalnym kiedy produkt jest w pełni gotowy do użytku. Na tym etapie ustala się wymagane fikstury i narzędzia oraz opisuje instrukcje do przygotowania odpowiedniego procesu produkcji.

Podczas uruchamiania produkcji masowej, wciąż trwają prace inżynierów, którzy weryfikują i wdrażają konieczne poprawki w celu otrzymania najlepszej stabilności i powtarzalności parametrów wytwarzanego wyrobu. Pierwsza produkcja wyrobów, realizowana zgodnie z

ustalonym standardem zwana jest **produkcją pilotażową**. Odbyna się ona pod nadzorem inżynierów. Ma ona na celu weryfikację procesu pod kątem wymagań jakościowych, dokumentacji technicznych i innych wymagań opisanych przez klienta. Zatwierdzenie produkcji pilotażowej to przede wszystkim potwierdzenie dedykowanych punktów na liście kontrolnej, gdzie zespół inżynierów wpisuje swoje obserwacje i wnioski. W zależności od wyniku produkcji i znalezionych błędów, można ustalić, czy proces jest gotowy do startu produkcji masowej, czy wciąż muszą się toczyć prace na poziomie wdrażania NPI [4]. Ten etap podsumowuje zwięźczenie dotychczasowej pracy inżynierów przy projektowaniu. Dlatego wynik produkcji pierwszych produktów w dużym stopniu opisuje dojrzałość procesu produkcyjnego i samego produktu.

Dla działu produkcji, główne cele są powiązane najczęściej z uzyskaniem maksymalnej wydajności linii produkcyjnej, efektywności pracy i wykorzystania urządzeń przy minimalizacji kosztów i pełnym utrzymaniu wymaganej jakości. W redukcji kosztów produkcji, tak samo ważne jest skupienie się inżynierów nad ciągłą poprawą samego procesu produkcji i jakości wytwarzanego wyrobu [6]. Zmiany produktu, kalibracji testów i limitów testowych oraz innych usprawnień i automatyzacji procesu, pozwalają też z czasem pozyskiwać lepsze wyniki jakościowe. Limitem zmian jest balans pomiędzy kosztami związanymi z inwestycjami na poprawę procesu a zyskiem pochodzącym ze sprzedaży wyrobu.

Przy założeniach ograniczonego budżetu, ważne jest by inwestycje związane z wdrażaniem zmian w procesie były wydajne [7]. Oznacza to że kolejne zmiany mają przynieść redukcję kosztów w czasie i tym samym dodatkowy zysk finansowy. Bilans inwestycji i sprzedaży musi się zakończyć zyskiem zanim produkt zostanie wycofany z produkcji.

W dostępnej literaturze brakuje informacji o zasadach organizacji produkcji modułów elektronicznych zapewniającej uzyskanie wysokiej niezawodności wyprodukowanych modułów. Pomijane jest także istotne powiązanie zagadnień technicznych i ekonomicznych dotyczących testowania i napraw modułów w trakcie procesu produkcji.

W kolejnych rozdziałach przedstawiono:

- procesy i wskaźniki kontroli jakości wytwarzania wyrobów, w tym układów elektronicznych,
- grupy usterek procesowych i materiałowych mogących pojawić się podczas produkcji takich układów,
- różne rodzaje systemów testowych produktów elektronicznych,
- wybrane informacje dotyczące procesu diagnozowania uszkodzeń i realizacji napraw modułów elektronicznych,
- uzasadnienie biznesowe prowadzenia czynności naprawczych.

Prezentowane informacje bazują na doświadczeniach zdobytych w czasie pracy w jednym z międzynarodowych zakładów produkcyjnych.

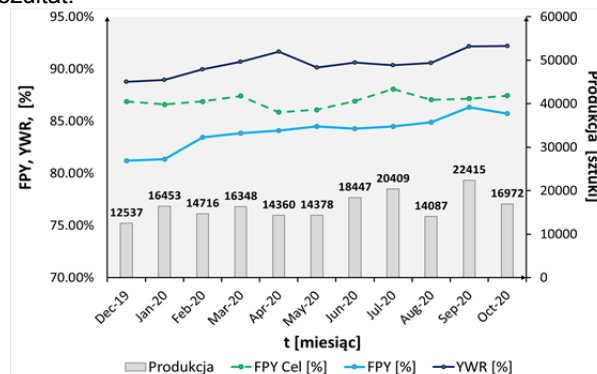
Wskaźniki i normy jakości wymagane w standardzie wytwarzania układów elektronicznych

Istnieją metody, narzędzia i działania zdefiniowane tak, by postępując zgodnie z nimi, ryzyko jakichkolwiek uszkodzeń produktu, czy też wystąpienia odchylenia od limitów zdefiniowanych w procesie produkcyjnym, ograniczyć do minimum. Żaden jednak proces nie jest doskonały i zawsze istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia błędu.

Istnieje kilka wskaźników jakości opisujących poziom jakości procesu produkcyjnego. Wskaźnik **FPY** (First Pass Yield lub throughput yield) wyrażony w %, określa wydajność

pierwszego przejścia przez proces [8]. Opisuje on stosunek liczby produktów wykonanych zgodnie z założeniami w stosunku do liczby wszystkich produktów. Ustala się cel poziomu jakości dla stabilnego procesu produkcji, tzn. takiego, przy którym w określonym standardzie wytwarzany jest produkt. Cel jakościowy może być różny i zależeć od skomplikowania procesów produkcyjnych i poziomu integracji komponentów wytwarzanych wyrobów. W idealnym przypadku $FPY=100\%$, a wzorcem jest proces produkcji bez żadnych defektów (zero defect line).

Często jednak przy budowie skomplikowanych produktów lub układów elektronicznych, cel FPY jest znacznie mniejszy. Na **rysunku 1** przedstawiono przykład, w którym cel FPY wynosi **85%**. Przedstawione dane pochodzą z jednej z firm produkującej elektronikę i zebrane na podstawie produkcji jednego z wyrobów. Ustawiony w tym przypadku cel (linia ---- na **rysunku 1**), świadczy o tym, że przyjmuje się prawdopodobieństwo, że **15%** wyrobów może mieć defekt, który należy usunąć zanim produkt będzie mógł opuścić fabrykę. Na **rysunku 1**, prezentowany jest również rzeczywisty przebieg zmian wskaźnika FPY w poszczególnych miesiącach (linia — na **rysunku 1**). Po przez porównanie pomierzonego FPY z wymaganym celem, weryfikuje się, czy poniesione działania w ramach poprawy procesu produkcyjnego przynoszą oczekiwany rezultat.



Rys.1 Przykład kontroli wskaźników jakości FPY, FPY cel oraz YWR w poszczególnych miesiącach

Z uwagi na dążenie do uzyskania jak największego poziomu wskaźnika FPY, bardzo ważna jest kontrola produkcji na każdym etapie wytwarzania wyrobów i konieczność odseparowywania produktów niezgodnych z całego strumienia przepływu produktów, tzn. od startu procesu produkcji do momentu wytworzenia wyrobów gotowych. Obok FPY stosuje się też YWR (linia — na **rysunku 1**). Jest to wskaźnik jakości uwzględniający produkty, które po ponownej walidacji, nie przechodząc jednak procesu naprawy, uzyskały wynik pozytywny na dedykowanym teście. Oprócz dążenia do uzyskania jak najwyższego wskaźnika FPY, wymaga się, by różnica pomiędzy FPY i YWR była jak najmniejsza i w najlepszym przypadku wynosząca „0”. Mała różnica pomiędzy tymi wskaźnikami świadczy, że poziom błędów fałszywych jest mały. Oznacza to bardzo dobrze zaprojektowany i stabilny system testowy, który wskazuje prawdziwe błędy związane z jakością wykonanego wyrobu.

Taki system trudno osiągnąć w rzeczywistości, szczególnie w przypadku testów funkcjonalnych, często skomplikowanych w obsłudze i mających liczne zadania, w tym sprawdzanie działania układów VLSI (Very Large Scale Integration) o bardzo dużej integracji komponentów. Istnieje możliwość, że pojawiają się pomyłki podczas podłączania przewodów testowych do badanego układu. Jest też możliwe, że podczas projektowania systemu testowego niedostatecznie zostały oszacowane limity pomiarowe.

Wówczas niektóre funkcje logiczne testu mogą działać niestabilnie. Tego typu błędy uznaje się jako fałszywe, czyli niemające odniesienia do prawidłowego działania produkowanego wyrobu.

Pojawianie się ich sprawia, że pomiędzy FPY i YWR istnieje kilka punktów procentowych różnicy. Dlatego jako bardzo stabilne systemy testowe można uznać te, w których omawiana różnica nie jest duża (1- 3 %). Każda większa odchyłka może wymagać dodatkowej współpracy inżynierów by doprowadzić do redukcji błędów fałszywych do poziomu, w którym nakład kosztów produkcji do ceny wyrobu będzie zgodny z założeniami i celami biznesowymi.

Bardzo ważna jest znajomość norm jakościowych opisujących zasady wytwarzania układów elektronicznych. Normy, które opisują zasady i wymagania jakościowe do wytwarzania układów elektronicznych zwane są normami **IPC** [9]. Również uwzględniają zasady lutowania, procesy, limity i metodologię. Każda firma zajmująca się wytwarzaniem układów elektronicznych musi postępować zgodnie z tymi regułami. Przykładem jednej z norm jest standard **IPC-A-610**, który jest najpowszechniej znanym i opublikowanym został w wielu językach [9]. W dokumencie tym znajdują się kryteria oceny procesu lutowania, w tym połączeń bezołowiowych (RoHs), opis zasad montażu powierzchniowego komponentów typu „chip”, gniazd, złączy, wyprowadzeń elementów przewlekanych typu DIP i wiele innych, uwzględniających kształt obudowy i typ komponentu. W normie tej opisano też metody napraw podstawowych usterek procesowych, o których mowa będzie w dalszej części pracy.

Grupy usterek w procesie budowy układów elektronicznych SMT

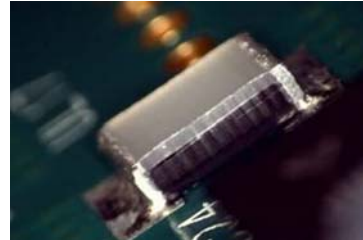
Proces wytwarzania układów elektronicznych **SMT** (Surface Mounted Technology) jest pierwszym pełnym procesem wytwarzania układu elektronicznego bazującym na komponentach **SMD** (Surface Mount Device), czyli montowanych powierzchniowo na laminacie PCB. W wyniku realizacji tego procesu mogą pojawić się defekty, które mają różny wpływ na jakość wytworzonego układu. Przykładowo, można wyróżnić następujące usterek wykrywane poprzez metody kontroli wizualnej:

- Przesunięty komponent,
- Brak komponentu,
- Komponent do góry nogami,
- Niepoprawna polaryzacja/orientacja,
- Podniesiony komponent/podniesione wyprowadzenia,
- Złe zwilżenie/brak zwilżenia/lut poza normą,
- Brak lutu,
- Efekt nagrobkowy,
- Dodatkowy komponent,
- Zwarcie,
- Komponent leży na jednym z boków,
- Za dużo lutu/ kulki lutu,
- Uszkodzony komponent/krzywy pin,
- Niewłaściwy komponent,
- Brak komponentu,
- Urywany komponent.

Istnieją również błędy, które mogą być wynikiem stosowanych warunków i wysokich temperatur w procesie montażu, mające wpływ na defekty związane z materiałem laminatu PCB, na którym montowany jest układ. Takie błędy nie muszą być spowodowane źle dobranymi parametrami czy nieprawidłowym, poza kontrolą, przechowywaniem komponentów wrażliwych na wilgoć. Defekty te mogą wynikać też z procesu wytwarzania samych komponentów, które nie spełniają określonych kryteriów. Przykładem tego typu wad, może być

delaminacja warstw materiału, z którego składa się komponent zaprezentowana na rysunku 2. Z uwagi na występowanie wad materiału można zdefiniować listę możliwych do wystąpienia defektów. Do uszkodzeń materiałowych należą:

- Zadziory,
- Uszkodzenia mechaniczne,
- Zabrudzenia,
- Uszkodzenia elektryczne,
- Komponent poza tolerancją,
- Rozwarstwienie.



Rys.2 Przykład rozwarstwienia materiału z którego zbudowany jest komponent

Przyczyny błędów procesowych mogą być różne. Przykładowo, zwarcie może wynikać z niewłaściwej ilości pasty lutowniczej. Ten sam powód może dotyczyć efektu nagrobkowego. Ważne jest pochodzenie błędów, gdyż tym samym istnieje możliwość eliminacji ich źródeł. Głównym jednak celem tej pracy jest zrozumienie, które defekty są możliwe do usunięcia, jakimi metodami usuwa się tego typu usterek i jaki jest koszt takich działań. Na tym skupiono uwagę w dalszej części pracy.

Skrócony przegląd metod diagnostyki usterek procesowych i ich napraw

Do lokalizacji usterek wynikających z procesu SMT przede wszystkim stosuje się **AOI** (Automated Optical Inspection). Proces wspierany jest również przez stosowanie specjalnych automatów, takich jak wspomniane **AOI** czy też **X-Ray**. Maszyny te działają na innych zasadach. AOI, to maszyna, która wykorzystując systemy optyczne, wyświetla obraz z kamery poruszającej się w zakresie osi XY. Przyrząd rozpoznaje produkt i weryfikuje komponenty zgodnie z zakresami ustawionymi przez Inżyniera Procesu. X-Ray wykorzystuje zakres promieniowania rentgenowskiego, pozwalającego na prześwietlenie produktu w komorze promieniowania i dokładne obejrzenie wyniku procesu lutowania i położonych komponentów [10, 11, 12].

Opisane przyrządy do kontroli wizualnej, nie ingerują i nie powodują uszkodzeń układów elektronicznych. Dzięki opisanym metodom takiej kontroli istnieje możliwość wykrycia najmniej dostrzegalnych ludzkim okiem defektów montażu. Wspólną cechą AOI oraz X-Ray może być możliwość porównywania wykonywanych produktów z zapisanym wzorcem.

Każda z powyżej opisanych metod wykrywania defektów procesowych jest obciążona pewnym błędem. Tym samym istnieje możliwość pominięcia któregoś z

defektów. Zdarza się, że na dalszych etapach procesu produkcji zostanie wykryta wada wynikająca z procesu montażu SMT. Wówczas, na bazie informacji zwrotnej, również należy odpowiednio ustawić program testowy maszyny AOI by taki defekt, nie miał prawa zostać pominięty i został uwzględniony w następnym cyklu.

Aby uniknąć ryzyka związanego z akceptacją produktu niezgodnego, w procesach produkcji urządzeń elektronicznych, istnieje kilka punktów kontroli produktu pod względem jakości jego wykonania. Są one definiowane już podczas projektowania wyrobu.

W celu naprawy błędów procesowych, wymagana jest podstawowa wiedza z zakresu elementów elektronicznych, zasad ich montażu i metod wymiany komponentów SMD. Szczególnie istotne są umiejętności manualne, z uwagi na konieczność posługiwania się odpowiednim sprzętem do lutowania. W jednej z firm przyjmuje się 80h praktyki w lutowaniu i wymianach elementów jako minimum przed przystąpieniem do egzaminu z umiejętności wymiany komponentów elektronicznych. W tym czasie pracownik, pod nadzorem doświadczonej osoby, ma za zadanie dokonywać wymiany różnych komponentów, o różnym typie obudowy. Stosuje się w tym czasie dedykowane narzędzia, a podstawowy ich zestaw obejmuje:

- Stację lutowniczą,
- Stację gorącego powietrza,
- Wstępny podgrzewacz,
- Zestaw pęset,
- Pastę lutowniczą lub topnik aktywny,
- Środek do oczyszczenia i usunięcia pozostałości chemii lutowniczej,
- Szczotkę antystatyczną do oczyszczenia układu po naprawie,
- Mikroskop / lupa.

Naprawę i dodatkowe ingerencje w obwód drukowany **PCB** (Printed Circuit Board) obejmującą też wymianę komponentów, określa się mianem „**reworku**” [13]. Częścią tego procesu jest poprawa jakości lutowania, położenia lub też dodania brakującego komponentu, rozumiane jako „**touch-up**” gdyż dotyczy tylko eliminacji defektów wynikających z procesu lutowniczego [13].

Podczas wymiany komponentów należy utrzymywać pewien zakres parametrów w określonych granicach. Szczególnie dotyczy to maksymalnej dopuszczalnej temperatury w czasie lutowania komponentu. Ważne jest kontrolowanie pewnych parametrów po wprowadzeniu ograniczeń w stosowaniu materiałów uznanych za szkodliwe w dyrektywach RoHS oraz RoHS II [14,15,16].

Istnieją w pełni profesjonalne metody „**reworku**” komponentów pozwalające kontrolować profil temperaturowy z wykorzystaniem specjalnie dedykowanych urządzeń. Takie maszyny, szczególnie stosuje się do wymiany układów **BGA** (Ball Grid Array). Są to komponenty, po zamontowaniu których nie ma dostępu do punktów lutowniczych tradycyjną kolbą lutowniczą [17]. Dodatkowo z uwagi na konstrukcję, często charakteryzują się one bardzo dużą liczbą połączeń, które wymagają jednoczesnego grzania całego obszaru komponentu. Metoda wymiany tego typu układów jest jedną z najciekawszych metod stosowanych do wymiany komponentów i dokładnie opisana w pracy [18].

Metodyka analizy błędów i podejście do naprawy usterek funkcjonalnych układów elektronicznych

Proces SMT zwany jako „**Front-end**”, kończy się na etapie montażu komponentów SMD. Druga część procesu, od momentu montażu komponentów przewlekanych

PTH (Plated Through Holes), które mogą być lutowane na fali, po testy funkcjonalne weryfikujące działanie gotowego produktu, zwana jest jako „**Back-end**”. To właśnie w obszarze zwanym „**Back-end**”, w ramach budowy układów elektronicznych można znaleźć różne rodzaje testów, a te najczęściej stosowane opisano w dalszej części pracy.

Testy JTAG (Joint Test Action Group), jest to podstawowy zestaw testów w standardzie IEEE 1149.1. W celu przeprowadzenia testu JTAG, wymagany jest dedykowany interfejs w obwodzie elektrycznym [19]. Poprzez odpowiednio wysyłane sygnały, weryfikuje się poprawność połączeń pomiędzy komponentami. Rozróżnia się łańcuchowe oraz pierścieniowe rodzaje połączeń. Tym samym, sprawdza się podstawowe, mające się pojawiać napięcia w dedykowanych punktach pomiarowych. Grupa testów tak przeprowadzanych zwana jest „**Boundary Scan**”. Metoda ta stosowana jest w celu wykrycia błędów procesowych. Test umożliwia zidentyfikowanie zwarc, brak wymaganych połączeń, czy też brak komponentów, które to definiuje się jako „**stuck at faults**” i sprawdzane są w logice boolowskiej poprzez weryfikację czy pojawił się sygnał cyfrowy [19, 20].

Inną grupę testów stanowią testy typu Flying Probe. Testy te przeprowadza się za pomocą specjalnych sond, które dokonują pomiaru parametrów takich jak rezystancje, pojemności, indukcyjności obwodów w układzie elektronicznym jak i indywidualnych komponentów [21]. Dokonują pomiarów też diod Zenera, tranzystorów oraz umożliwiają sprawdzenie polaryzacji kondensatorów

Założenia Flying Probe opierają się więc na sondach pomiarowych przemieszczających się w 3 osiach. Dzięki temu umożliwiają dynamiczny i płynny dostęp do wybranych punktów testowych. Wadą tego typu testów jest dość długi czas wykonywania pomiarów oraz brak pełnego pokrycia wszystkich komponentów. Stosuje się je do produkcji małoseryjnej i prototypów.

Kolejną grupę testów stanowią **Testy ICT** (in-circuit test). Składają się one z tak zwanego testera głównego, bazy oraz dedykowanych fikstur pomiarowych z zamontowanymi igłami służącymi do wykonywania pomiarów w dedykowanych miejscach układu elektronicznego [20]. Tester analizuje poprawność wykonania obwodu poprzez pomiar większości parametrów zamontowanych komponentów, uwzględniając tolerancję w określonym zakresie, a także dokonuje pomiaru napięć, prądów oraz parametrów, które nie jest w stanie pokryć tester Flying Probe [22].

Jedną z najważniejszych i najciekawszych grup testów stanowią testy funkcjonalne **FCT** (functional test). Istnieją różne rodzaje testów, pozwalających sprawdzić działanie produktu pod kątem funkcji jakie ma spełniać. Podczas projektowania testów FCT, podejmuje się próbę weryfikacji wszystkich możliwych funkcjonalności produktu, w celu walidacji jego pracy podobnie jak w warunkach przyszłego jego zastosowania. Testy funkcjonalne mają na celu sprawdzenie bloków funkcjonalnych i ich działania zgodnie z logiką przyjętą podczas projektowania. Produkt traktowany jest jak czarna skrzynka, gdzie sygnały sterujące mają na celu uruchamiać kolejne funkcjonalności produktu. Na zadane sygnały wymagana jest określona odpowiedź układu, która potwierdza, czy produkt działa zgodnie z oczekiwaniami.

Na etapie testów funkcjonalnych, produkt staje się wyrobem gotowym i poza samym układem elektronicznym posiada wiele dodatkowych elementów wpływających na jego kompleksowość i użyteczność. Dlatego też wyróżnia się kolejną grupę usterek, mogących pojawić się podczas kroków montażu. Przykładowa lista obejmuje:

- Brak padu odprowadzającego ciepło,

- Ciało obce,
- Brak komponentu,
- Nie docięnięty/nie dokręcony komponent,
- Komponent urwany,
- Źle zmontowane komponenty,
- Brak połączenia,
- Wygięty pin,
- Podniesione / urwane pole lutownicze.

Listę tego typu zdarzeń można rozszerzyć w zależności od specyfiki i złożoności produktu.

W celu eliminacji błędów funkcjonalnych konieczne jest przygotowanie odpowiedniego procesu napraw. Proces ten powinien uwzględniać wszystkie niezbędne etapy do bycia gotowym na kontrolę materiału niezgodnego i efektywne działania w celu eliminacji ryzyka z nim związanego.

Zarządzanie procesem napraw i materiałem niezgodnym, opiera się na tych samych zasadach, co zarządzanie materiałem zgodnym i metodach kontroli procesów produkcji. Na omawianym przykładzie, strategię w przygotowaniu dobrego procesu napraw podzielono na odpowiednie wektory i sekcje w celu pokrycia wszystkich niezbędnych wymagań. Do najważniejszych należą:

1. Zdefiniowanie stosu napraw, przydzielenie dedykowanych magazynów do trzymania produktów w naprawach i ustalenie przedziałów ryzyka wraz z metodologią postępowania i wyznaczeniem priorytetów napraw. W tym powinny być zawarta lista pytań audytowych, potwierdzająca zgodność do przyszłej kontroli procesu.
2. Ustalenie struktury organizacyjnej i poziomów odpowiedzialności za kontrolę materiału niezgodnego. W ramach tematu powinny zostać też ustalone role i kompetencje inżynierów napraw.
3. Stworzenie centrów napraw wraz z dedykowanym i koniecznym sprzętem technicznym do analizy usterek oraz wymiany komponentów:
 - W zależności od potrzeb, stanowiska napraw mogą stanowić część linii produkcyjnej,
 - Należy uwzględnić wymagania ergonomii pracy,
 - Dostarczyć sprzęt i narzędzia do dokonywania analiz usterek,
 - Zapewnić instrukcje serwisowe lub określić, jak mają zostać przygotowane,
 - Przygotować specjalnie dedykowane bazy danych i narzędzia systemowe pozwalające na szybki dostęp do rezultatu testu i naprawy oraz danych historycznych.
4. Ustalenie zasad kontroli komponentów dedykowanych do wykonywania napraw:
 - Czas od momentu zamówienia materiału do dostarczenia powinien być ustalony i możliwe krótki (poniżej 1h), a proces dostawy komponentów wspierany przez działy produkcji i magazynu,
 - Przewiduje się kontrolę zużytych komponentów i ich kosztu, które mają wpływ na kolejne decyzje o wykonywanych akcjach naprawczych danego produktu.
5. Zdefiniowanie celów i podstawowych wskaźników efektywności oraz kontrola rezultatów osiągniętych przez osoby dokonujące napraw:
 - Matryca kompetencji dla dedykowanych stanowisk oraz poziom trudności dokonywanych napraw, powinny zostać zdefiniowane i uwzględniane przy ocenie miesięcznej pracownika,
 - Wprowadzenie metod kontroli czasu naprawy i dokonywanych akcji naprawczych w celu ograniczenia wydatków i strat wynikających z napraw produktu.
6. Ustalenie dziennych norm pracy, przynoszących najlepsze rezultaty w redukcji stosu napraw:

- Metodologie transportu i przechowywania produktów niezgodnych,
 - Rozdzielanie priorytetów do napraw,
 - Kontrola bieżącej sytuacji na redukcję i wsparcie produkcji w przypadku nagłych sytuacji, np. pojawiania się błędów seryjnych.
7. Wprowadzenie zarządzania wizualnego, poprzez raportowanie on-line, wizualizację wyników na dedykowanych tablicach, monitorach i przekazywanie danych w czasie rzeczywistym:
 - Całościowy raport o stanie stoku napraw wraz z trendem (dzienny, tygodniowy, miesięczny) uwzględniającym ilość i wartość produktów w naprawach z podziałem na czas magazynowania produktów w celu kontroli ryzyka,
 - Raport szczegółowy o liczbie napraw zidentyfikowanych na konkretnym typie testu wraz z podziałem na określone grupy defektów dotychczas podjętych prób napraw.
 - Raport efektywności pracy, przedstawiany w czasie rzeczywistym, wskazujący czy liczba wchodzących sztuk do napraw na danej zmianie, jest większa czy też mniejsza od ilości produktów naprawianych na tej zmianie (większa liczba dokonywanych napraw, potwierdzonych rezultatem „pass” na dedykowanym teście, od liczby produktów, które wchodzi do napraw, świadczy że istnieje zdolność do redukcji stoku napraw i minimalizacji ryzyka związanego z koniecznością złomowania materiału).
 8. Zdefiniowanie przepływu produktu w procesie napraw i wymagań do powrotu już naprawionych układów elektronicznych do głównego strumienia produkowanych wyrobów
 9. Ustalenie zasad, narzędzi oraz zasad współpracy ze wspierającymi działami w celu poprawy procesów produkcyjnych, wyników jakościowych i eliminacji przyczyn usterek
 - Przygotowanie raportów jakościowych,
 - Przygotowanie stanowisk do oględzin defektów przez zespół inżynierów „Fishmarket”,
 - Ustalenie spotkań produkcyjnych, podsumowujących działania i proponowanie nowych akcji do poprawy procesów,
 - Prowadzenie dokumentacji o podejmowanych działaniach i odpowiedzialnościach.
 10. Dokonywanie analizy usterek w celu identyfikacji ich źródeł „Failure Analysis”

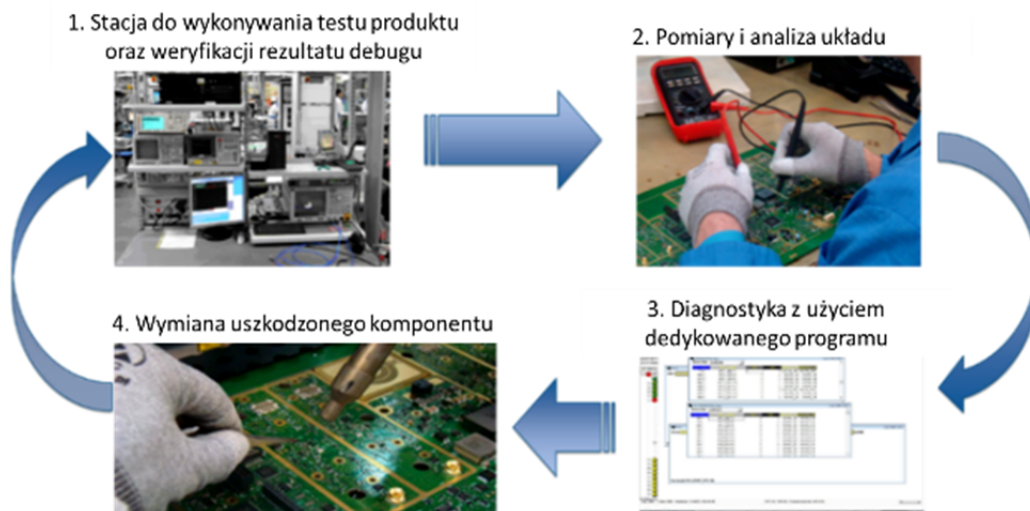
Proces napraw, obejmujący pomiary, analizę oraz diagnozę, celem znalezienia usterek, określa się mianem debugu. Rozpoczyna się procedurą weryfikacji błędów prowadzącą do zlokalizowania uszkodzenia. Proces ten w czterech krokach przedstawiono na rysunku 3.

W prezentowanym na rysunku 3 schemacie postępowania, wyróżniono główne następujące etapy:

 1. Usterka musi zostać odtworzona w celu potwierdzenia defektu na stacji testowej w obszarze produkcji, gdzie zlokalizowano defekt lub jej odpowiedniku, czyli stacji przeznaczonej do debugu, o tych samych funkcjach i ustawionych parametrach w obszarze napraw.
 2. Po potwierdzeniu usterek, w zależności od rozpoznanego symptomu, rozpoczyna się proces dedykowanych pomiarów wstępnych, koniecznych i wynikających z głównego działania danego bloku funkcjonalnego - dotyczy pomiarów prądów, napięć i podstawowych stanów logicznych najczęściej prezentowanych w opisie funkcjonalnym produktu. Postępowanie krok po kroku, zgodnie z logiką w opisie

- funkcjonalnym produkcie i skorelowaną z odpowiednim schematem elektrycznym diagnozowanego układu.
3. W momencie lokalizacji uszkodzenia, następuje proces naprawy, najczęściej poprzez wymianę wadliwego komponentu.

4. Ostatnim krokiem jest powrót do stacji testowej jak w pkt.1 i sprawdzenie poprawności działania układu.



Rys.3. Etapy procesu naprawy układów elektronicznych

Proces powtarza się dopóki błąd nie zostanie usunięty lub wystąpi kolejny, który również musi zostać zdiagnozowany i naprawiony.

Proces naprawy powinien przebiegać płynnie i dlatego bardzo ważne jest przygotowanie raportów pokazujących w czasie rzeczywistym wyniki dokonywanych napraw. W przypadku napraw złożonych, może się okazać, że mamy do czynienia z łańcuchem usterek i podejście do naprawy musi odbyć się w kilku powtarzalnych krokach. Pętla napraw zostaje zamknięta w momencie, gdy w wyniku ostatniej naprawy, wynik testu diagnostycznego, na którym zdefiniowano defekt, obecnie wskazuje brak błędów czyli rezultat „pass”. Wówczas produkt po naprawie wraca do głównego strumienia produkowanych wyrobów.

W celu dokonania pomiarów, stosuje się różne specjalistyczne narzędzia i przyrządy pomiarowe, obecnie na rynku istnieje bardzo wiele firm zajmujących się produkcją i dostawą przyrządów pomiarowych. Można wyróżnić podstawowe oprzyrządowanie złożone z: zasilacza (najczęściej 60V, 2A), oscyloskopu od 200 kHz do 500 MHz), multimetru do pomiaru podstawowych napięć, prądów i rezystancji w układzie oraz generatora arbitralnego.

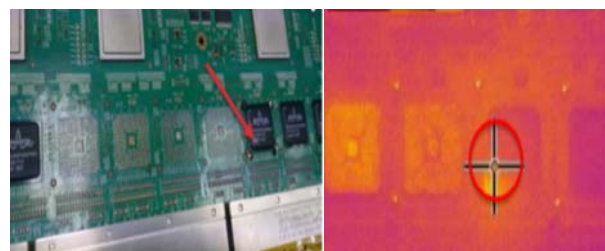
Podejście do debugu i lokalizacji defektów, będzie różne w zależności od złożoności produktu, jego kompleksowości i funkcjonalności oraz możliwych do przeprowadzenia testów. Do debugu dowolnego typu usterek elektrycznych, najczęściej do dyspozycji jest dokumentacja techniczna w postaci opisu funkcjonalnego, układu blokowego produktu jak i schemat elektryczny układu.

Wielofunkcyjność systemów wbudowanych, takich jak transmisja danych, funkcje sieci Ethernet, sprawiają, że trzeba stosować zaawansowane systemy pomiarowe i testy funkcjonalne. Tylko takie pozwalają przeprowadzić diagnostykę usterek układu, pomimo, że często wynik wskazuje na problem działania wybranego bloku funkcjonalnego a nie konkretnego elementu w tym bloku. Lokalizacja uszkodzonego elektrycznego komponentu bazuje na wynikach odpowiedzi układu na zadane sygnały sterujące i porównaniu ich ze wzorcem. Wszelkie odchyłki

między oczekiwaniami czyli odbiegające od rezultatów tzw. Golden Sample, wskazują na miejsce usterek.

Jedną z najnowszych i najciekawszych w zastosowaniu metod do szukania usterek w układzie elektronicznym jest metoda termograficzna. Stosując kamerę termowizyjną można lokalizować miejsca o zmieniającej się temperaturze i porównując je ze wzorcem wychwytywać, które z komponentów mają wyższą temperaturę niż przewidziane kryteria. W ten sposób można przykładowo identyfikować zwarcia wewnątrz warstw laminatu pomiędzy połączeniami komponentów.

Na rysunku 4 zaprezentowano przykład lokalizacji zwarcia układu BGA do masy za pomocą omawianej metody.



Rys.4 Lokalizacja usterek w układzie elektronicznym z pomocą kamery termowizyjnej

Zaznaczono strzałką pozycję uszkodzonego komponentu BGA, który wskazała kamera termowizyjna jako wadliwy (rys. 4). Znacznik kamery termowizyjnej skoncentrowany w miejscu najwyższej temperatury na komponentcie BGA. Po wymianie komponentu zwarcie zostało usunięte i układ wrócił do prawidłowego działania.

Ta metoda jest bardzo efektywna i pozwala uniknąć kosztów związanych z niepotrzebnie odlutowywanymi komponentami w celu lokalizacji zwarcia. Jest to bardzo istotne, gdyż szczególnie komponenty BGA, często drogie z uwagi na swoją wyjątkową konstrukcję i też spełniane funkcje w układzie, mogą przejść tylko jednokrotny proces lutowania i kolejny wiąże się już z ich złomowaniem. Komponent taki można poddać regeneracji (tzw. reballing),

ale jedynie w celu ponownego przetestowania go i sprawdzenia źródła usterki (elektryczne uszkodzenie lub problem w procesie lutowania – np. zimny lut). Komponent po regeneracji nie nadaje się do ponownego użycia w procesie produkcyjnym z powodów jakościowych.

Zestaw pomiarowy do kontroli termicznej układu w warunkach normalnej pracy i przy założonym zasilaniu składać się może z następujących elementów:

- Kamera termograficzna o odpowiedniej rozdzielczości
- Stół serwisowy poruszający się w osiach XY,
- Ramię do kamery poruszające się w osi Z,
- Kontroler kamery do regulacji ostrości,
- Komputer wraz z dedykowanym oprogramowaniem,
- Zasilacz do kamery,
- Zasilacz do badanego układu,
- Komora światłoszczelna.

W celu szybkiego dostępu do dokumentacji, sprawdzenia historii napraw danego produktu, kontroli ilości produktów do napraw oraz określenia, na jakich krokach testowych produkty nie uzyskały pozytywnego wyniku, stosuje się często dedykowane programy i aplikacje. Narzędzia te przyspieszają procedurę debugu i wspierają kontrolę napraw.

Przykład metodologii diagnostyki błędów w wybranym układzie elektronicznym

Do celów prezentacyjnych wybrano panel sterowania jednego z producentów układów wykorzystywanych w telekomunikacji z zastosowaniem modułów optycznych. Produkt składa się z dwóch układów elektronicznych prezentowanych na rysunku 5. Schemat blokowy panelu prezentowany jest na rysunku 6.

Jeden z układów posiada konektory, elementy optoizolacyjne oparte na transoptorach i diody LED służące do identyfikacji alarmów. Realizuje funkcję interfejsu szeregowego. Tylko jedno z dostępnych złączy może być używane do transmisji szeregowej: przez złącze USB lub przez złącze RS232.

Druga część układu składa się z bloku typu Spider prezentowanego na rysunku 7, opartego na strukturze ASIC (Application Specific Integrated Circuit). Realizuje on ściśle określone zadania w sposób zoptymalizowany pod kątem poboru mocy. Mikrokontroler realizuje działania urządzenia wejścia/wyjścia (GPIO- general-purpose input/output). Układ ten zarządza 6-portowym przełącznikiem Ethernet, kontroluje napięcie poprzez przetwornik analogowo-cyfrowy, zawiera czujnik kontroli temperatury i zarządza pamięcią EEPROM oraz liniami wejścia/wyjścia expandera poprzez magistralę typu SPI (Serial Peripheral Interface).

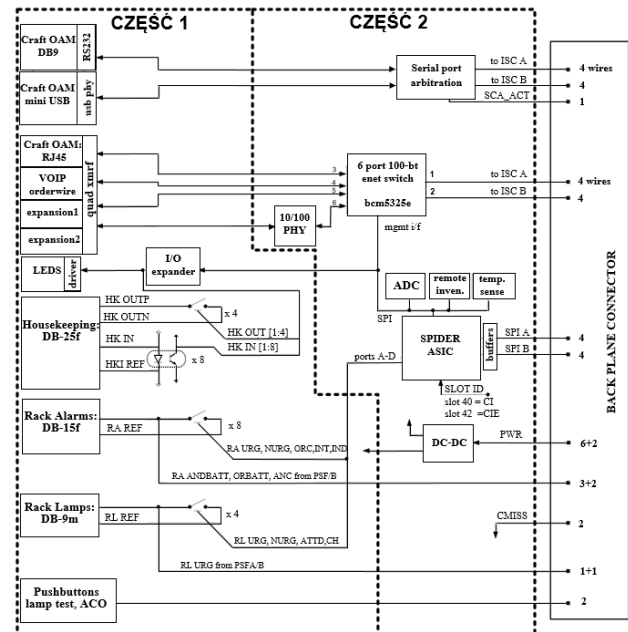


Rys. 5 Układy elektroniczne panelu sterowania

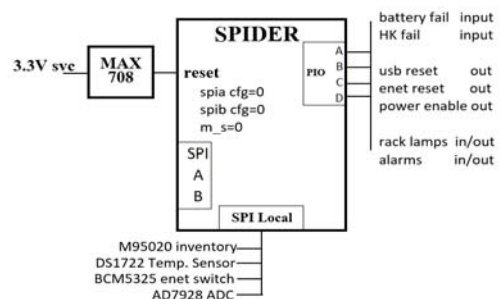
Większość układów zasilana jest napięciem o wartości 3,6 V, które na stałe dochodzi do układu ze źródła zasilania zewnętrznego a pobór prądu nie przekracza 180 mA. Jedynie przełącznik Ethernet oraz port USB, zasilane są napięciem o wartości 5 V i maksymalny pobór prądu wynosi 980 mA. Inicjalizacja układu rozpoczyna się od ustawień

kierunku wszystkich wejść/wyjść układu Spidera poprzez wprowadzenie ich w odpowiedni stan 1 lub 0. Następnie włączone zostaje napięcie 5V i kolejno załączają się funkcje Ethernet oraz USB.

Rozpatrując problem błędu funkcjonalnego układu panelu (rys. 6), na kroku testowym „Rack Alarm Test”, w 40% przypadków uzyskano status „pass”, po ponownym uruchomieniu testu. Jest to bardzo duża część zidentyfikowanych błędów fałszywych i powinna zostać rozpatrzona w osobnej analizie przez Inżyniera Jakości oraz Inżyniera Testu.



Rys. 6 Schemat blokowy panelu sterowania



Rys. 7 Układ Spider wraz z opisem podstawowych wejść i wyjść

W celu diagnostyki pozostałych przypadków, należało sprawdzić wszystkie sygnały dochodzące i wychodzące z transoptorów. Są to sygnały, których brak powoduje właśnie pojawienie się omawianego błędu i alarmu „Rack Alarm Test”. Taka analiza wymaga w pełni rozumienia schematu elektrycznego układu, jak i rozumienia zasady jego działania.

Przyczyna usterki może być różna, należy podążać za wyznaczonym sygnałem i dokonywać pomiarów krok po kroku by znaleźć jej źródło. W omawianym przykładzie, w kilku przypadkach, winien był jeden z konektorów z zanieczyszczonym pinem, co powodowało brak kontaktu i blokadę dla przepływu sygnału. Innym razem sam transoptor uległ uszkodzeniu.

Ze zweryfikowanych danych jednej z firm produkujących urządzenia elektroniczne, wynika że dla produktów zintegrowanych, składających się z kilku układów elektronicznych, podejście do naprawy może wynosić

nawet 5 iteracji a przeciętnie jest to 2,2 iteracji - sprawdzono na 600 produktach tego samego typu o wysokim stopniu integracji (stacje nadawcze 5G). Bardzo ważne jest więc doświadczenie, dane statystyczne o najczęstszych przyczynach uszkodzenia by zmniejszyć ilość iteracji i też zminimalizować koszt naprawy poprzez skrócenie czasu diagnostyki.

Uzasadnienie biznesowe prowadzenia napraw w firmach produkujących układy elektroniczne

Żaden proces produkcji nie jest procesem doskonałym i mogą występować defekty przy wytwarzaniu wyrobu. W celu minimalizacji strat na wytworzenie danego wyrobu, stosuje się proces napraw mający przywrócić wytwarzanemu produktowi, wymaganą jakość, tak by mógł on zostać dopuszczony do sprzedaży. Dobrze przygotowany proces naprawy wymaga nakładów finansowych, przygotowania pełnej struktury organizacyjnej i wiele innych działań opisanych już w rozdziale „Metodyka analizy błędów i podejście do napraw usterek funkcjonalnych układów elektronicznych”. Dlatego, patrząc od strony biznesowej, istotne jest zrozumienie opłacalności takiego procesu.

Każdy wytwarzany produkt ma swoją wymierną wartość rynkową. Cena produktu powinna definiować jaki zakres nakładów finansowych można ponieść w celu jego naprawy, by nadal uzyskać zysk podczas sprzedaży wyrobu. Dlatego definiując proces naprawy, należy kontrolować ponoszone koszty. Poniżej zaprezentowano sposób kontroli czasu naprawy wykorzystując system produkcyjny z zastosowaniem dedykowanych, systemowych stacji naprawczych umożliwiających zbieranie danych takich jak:

- Moment rozpoczęcia naprawy, debugu (Start),
- Moment zakończenia naprawy (Stop),
- Podjęcie akcji naprawczych, w tym wymiana komponentów wraz z ich kosztem.

Pętla Start-naprawa-Stop, może być wykonana kilkakrotnie zanim produkt po przejrzeniu przez dedykowany test otrzyma status „pass” i zostanie włączony do produktów bez wad. Czas ten pomnożony przez godzinową stawkę pracownika definiuje część poniesionych kosztów na naprawę produktu.

Drugą część kosztów definiuje wartość wymienionych komponentów. Najczęściej pasywne komponenty SMD mają znikomy koszt w stosunku do wartości produktu i tylko czas diagnostyki ma wpływ na całkowity koszt naprawy. Jednak wymiana komponentów typu BGA, programowalnych, typu QFP, może mieć znaczenie i definiuje stratę materiałową.

By zdefiniować określony limit wydatku na naprawę, należy przyjrzeć się indywidualnej cenie danego produktu i ustalić pewną część jego wartości przeznaczoną na naprawę. Wówczas zawsze, niezależnie od ceny wyrobu, będzie dedykowana pewna kwota, poprzez którą można ustalić maksymalny czas naprawy i limit finansowy związany z wymianą komponentów.

W rzeczywistości, biorąc pod uwagę jakość produkcji i Yield na poziomie np. 90%, należy być świadomym, że 10% wyrobów będzie posiadać jakąś usterkę. Estymując, że średnia czasu naprawy nie przekracza często 1h/szt. dla doświadczonego personelu zajmującego się naprawami, większość obecnie produkowanych wyrobów (kwestia ceny produktu) opłaca się naprawić by uniknąć kosztów złomowania. Dodatkowo w celu zmniejszenia ryzyka, ważnym jest śledzenie trendu produktów w naprawach czyli ich liczby i wartości, jak i czasu oczekiwania na naprawę.

Cały opisany proces monitorowania kosztów napraw powinien być pod kontrolą. Nie warto by inżynierowie

spędzali nadmiar czasu nad analizą jednej usterki, gdy jest wiadomym, że w procesie jest wiele do poprawy. Lepszym rozwiązaniem jest skupić się na słabych elementach w procesie i poprawić jego jakość, by zmniejszyć liczbę produktów niezgodnych, przychodzących do napraw.

Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono proces napraw urządzeń elektronicznych w czasie produkcji, który wymaga odpowiedniego przygotowania. Powinien być on spójny z procesami produkcji tak, by po akcji naprawczej, przetestowany i naprawiony wyrób nie odbiegał od wymaganych norm jakościowych.

Na przykładzie jednego z mogących pojawiać się błędów funkcjonalnych, przedstawiono proces naprawy układu elektronicznego i wykazano jak dużo pracochłonnych analiz i pomiarów wymaga diagnoza usterek.

Ostatecznie przeanalizowano problem kosztów związanych z dokonywaniem napraw i zaproponowano metodę kontroli takich wydatków poprzez odniesienie kosztów naprawy do ceny produktu przy określonym założonym limicie. Opisano też, że każda podjęta próba naprawy przynosi korzyść w postaci dodatkowej wiedzy, która może pomóc w usprawnieniu procesu produkcyjnego poprzez eliminację źródła i przyczyn usterek.

Celem każdej firmy zajmującej się produkcją, jest uzyskanie największych możliwych zysków z produkowanych wyrobów. Dlatego minimalizacja kosztów wynikających z procesów produkcyjnych staje się celem nadrzędnym. Nie ma jednak procesów bez wad i pojawianie się usterek jest nieuniknione. Dlatego powstają coraz bardziej zaawansowane metody napraw produktów i buduje się kompleksowe systemy testowe wspierające diagnostykę tak by czas usunięcia znalezionej usterki był jak najkrótszy.

Autorzy: mgr inż. Wojciech Kowalke, Flex TD, Malinowska 28, 83-100 Tczew, email Wojciech.Kowalke@Flex.com, prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: k.gorecki@we.umg.edu.pl

LITERATURA

1. K. H. Tantawi, A. Sokolov and O. Tantawi, "Advances in Industrial Robotics: From Industry 3.0 Automation to Industry 4.0 Collaboration," 2019 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-ICON), Bangkok, Thailand, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/TIMES-ICON47539.2019.9024658.
2. Y. Liu, X. Ma, L. Shu, G. P. Hancke and A. M. Abu-Mahfouz, "From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current Status, Enabling Technologies, and Research Challenges," IEEE Transactions on Industrial Informatics, doi: 10.1109/TII.2020.3003910.
3. W. Caesarendra, T. Wijaya, B. K. Pappachan and T. Tjahjowidodo, "Adaptation to Industry 4.0 Using Machine Learning and Cloud Computing to Improve the Conventional Method of Deburring in Aerospace Manufacturing Industry," 2019 12th Int. Conf. on Information & Communication Technology and System (ICTS), Surabaya, Indonesia, 2019, pp. 120-124, doi: 10.1109/ICTS.2019.8850990.
4. New Product Introduction NPI, Web page: <https://quality-one.com/npi/>; 248.280.4800; contact (248) 280-4800 | information@quality-one.com
5. M. A. Aguirre, J. Tombs, A. Torralba and L. G. Franquelo, "Improving the design process of VLSI circuits by means of a hardware debugging system: UNSHADES-1 framework," 28th Conf. of the Industrial Electronics Society. IECON 02, Sevilla, 2002, vol.3, pp. 2544-2547 doi: 10.1109/IECON.2002.1185374
6. N. Zhang and J. Wang, "Under the new industrialization model innovation product design thinking", 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design, Wenzhou, 2009, pp. 183-186, doi: 10.1109/CAIDCD.2009.5374863.

7. B. Barnuś, R. Knosala; Zastosowanie metod szacowania kosztów w Fазie projektowania, Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją, Web Page: http://www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/artyk_pdf_2010/9_Barnus_B.pdf;
8. K. Vogt, A. Kujawińska, Analiza wpływu wybranych czynników pracy na skuteczność kontroli wzrokowej, Inżynieria Maszyn, R. 18, z. 1, 2013 <http://yadda.icm.edu.pl/>;
9. IPC Training and Certifications Overview; IPC official web-page: <https://www.ipc.org/ContentPage.aspx?pageid=Training-Certification>
10. Kontrola jakości z wykorzystaniem inspekcji rentgenowskiej; Web page: <https://automatykab2b.pl/temat-miesiaca/41748-kontrola-jakosci-z-wykorzystaniem-inspekcji-rentgenowskiej>
11. K. Górecki, B. Dziurdzia, P. Ptak: The influence of a soldering manner on thermal properties of LED modules. Soldering & Surface Mount Technology, Vol. 30, No. 2, 2018, pp. 81-86.
12. A. Skwarek, P. Ptak, K. Górecki, T. Hurtony, B. Illés: Microstructure influence of SACX0307-TiO2 composite solder joints on thermal properties of power LED assemblies. Materials, Vol. 13, 2020, 1563, doi: 10.3390/ma13071563.
13. The Difference Between Touch-up, Rework and Repair; <https://www.eptac.com/ask/the-difference-between-touch-up-rework-and-repair/>
14. Dyrektywa ws. ograniczenia stosowania niektórych niebezpiecznych substancji w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym: Ministerstwo Rozwoju, Pracy i Technologii; <https://www.gov.pl/web/rozwoj/dyrektywa-ws-ograniczenia-stosowania-niektorych-niebezpiecznych-substancji-w-sprzecie-elektrycznym-i-elektronicznym>
15. K. Botsford, "EU RoHS Recast: Is your company ready, are your products ready," 2010 IEEE Symposium on Product Compliance Engineering Proceedings, Boston, MA, 2010, pp. 1-2, doi: 10.1109/PSES.2010.5637645.
16. O. Deubzer, N. F. Nissen and K. Lang, "Overview of RoHS 2.0 and status of exemptions," 2012 Electronics Goes Green 2012+, Berlin, 2012, pp. 1-6.
17. R. M. Horsley, N. N. Ekere and B. Salam, "Effect of lead-free BGA rework on joint microstructure and intermetallic compound formation," 52nd Electronic Components and Technology Conference 2002. (Cat. No.02CH37345), San Diego, CA, USA, 2002, pp. 1497-1501, doi: 10.1109/ECTC.2002.1008304
18. A. Hirceaga, I. Hasan, Creation Technologies Mississauga, ON, Canada; Process Control and Reliability of reworked BGA Solder Joint; https://www.circuitinsight.com/pdf/process_control_reliability_reworked_bga_smta.pdf
19. C. M. Maunder and R. E. Tulloss; The Test Access Port and Boundary-Scan Architecture; IEEE Computer Society Press 10662 Los Vaqueros Circle P.O. Box 3014 Los Alamitos, CA90720-1264
20. Technical Guide to JTAG ; WEB page: <https://www.xjtag.com/about-jtag/jtag-a-technical-overview/>
21. FLYING PROBE TEST (FPT) - IN-CIRCUIT TEST (ICT), Web page: <https://www.kuttig.eu/en/ems/inspection-test/flying-probe.html>
22. Usługa Test ICT/FCT; Web page: https://elektronikab2b.pl/produkty/produkcja-elektroniki/uslugi-cem-ems/6373-jm-Usluga_TestICTFCT