

Гарист А.В.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЧНОГО МОНТАЖУ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

Сучасні тенденції при виготовленні електронного обладнання характеризуються прагненням до збільшення функціональності пристроїв та одночасно зменшення їх габаритних параметрів. В результаті можна отримати велику кількість якісних та недорогих за собівартістю виробів. Стаття присвячена огляду основ та принципів технології автоматизованого монтажу, який є оптимальним і найбільш затребуваним варіантом для великосерійного виробництва.

В статті з'ясовано, що якість зібраного електронного модуля залежить від дотримання технології монтажу. До проектної документації для автоматизованого поверхневого монтажу висуваються певні вимоги: монтажна схема та складальні креслення з зазначенням висоти комплектуючих, способу формування, полярності, ключів елементів та позиційних значень, а також специфікація з повним найменуванням та позиційним позначенням компонентів.

В статті визначено, що автоматизований монтаж друкованих плат – це процес заздалегідь запрограмований і відбувається практично без участі оператора. При виробництві використовують багатофункціональне автоматичне обладнання. Воно дозволяє монтувати на друкованій платі понад 50000 елементів за годину, що особливо актуально при великосерійному виробництві. Виводи SMD-компонентів мають мініатюрні розміри та припаюються до точок контактних площинок на поверхні плат. Тому дуже важлива точність установки елементів, що досягається із застосуванням новітнього автоматичного обладнання.

У статті розкрито, що технологія поверхневого монтажу стає оптимальним способом виробництва плат. Якщо раніше при їх виготовленні використовувалися переважно навісні компоненти, то сьогодні понад 90% елементів друкованих плат – це SMD елементи. Якщо фіксація DIP-компонентів здійснюється на спеціальних станціях або вручну, то процес встановлення SMD елементів більш ніж на 95% автоматизується. Людська праця під час поверхневого монтажу потрібна для налаштування автоматичного обладнання, завантаження заготовок та елементів на конвеєрні лінії.

Ключові слова: друкована плата, автоматизований монтаж, SMD-монтаж, THT-монтаж, трафарет.

Постановка проблеми. Автоматизований монтаж – це основа сучасної мікроелектронної промисловості. Він використовується для виробництва продукції практично у всіх галузях, від виготовлення побутових приладів до виробництва верстатів, військової техніки, літаків, космічних апаратів тощо.

В статті розглянуті основні переваги та проблемні питання при автоматичному монтажі, а також описано технологічні процеси при автоматичному наскрізному та поверхневому монтажі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженнями проблемних питань, які виникають на різних етапах автоматичного монтажу, займалися такі закордонні науковці, як Діксон Д. [1], Біксенман Д. [2], Агарвал Н. [3] та інші.

У той же час, незважаючи на значну кількість наукових публікацій присвячених різним технологіям автоматичного монтажу, дослідження

з метою покращення якості та уніфікації продовжуються. Стрімкий розвиток технологій дозволяє вдосконалювати компоненти та матеріали які використовуються в технологічному процесі, що зумовлює потребу в подальших дослідженнях цієї тематики.

Постановка завдання. Метою даної статті є розгляд питання по основах та принципах технології автоматичного монтажу друкованих плат. Описаний процес та технологія дозволяє обирати оптимальний варіант при виготовленні виробів, виконаних на THT або SMD-елементах за допомогою автоматичного монтажу, що дозволяє уникнути помилок та прискорити процес виробництва. Автоматичний монтаж друкованих плат особливо цінується в умовах великосерійного виробництва, коли ручною працею неможливо забезпечити обсяг та швидкість роботи.

Виклад основного матеріалу. Поверхневий монтаж друкованих плат означає кріплення

(паяння) електронних компонентів на контактні площинки, які розташовані на поверхні плати. На відміну від цього, об'ємний або наскрізний монтаж передбачає кріплення компонентів у спеціально розмічені на платі отвори. Тому технологія наскрізного монтажу має абревіатуру ТНМ (through hole mounting – монтаж в отвори).

Технологія поверхневого монтажу друкованих плат має декілька абревіатур:

SMT – surface mounting technology (технологія монтажу на поверхню);

SMD – surface mounted device (поверхневий пристрій), електронний компонент, який монтується на поверхню плати.

Найчастіше для позначення поверхневого монтажу друкованих плат використовують назви SMD-технологія монтажу, SMD-монтаж або просто SMD.

При автоматичному монтажі електронні компоненти та вузли встановлюються на поверхню друкованої плати за допомогою спеціалізованого обладнання, яке так і називається – установники компонентів.

Так як при складанні електронних вузлів на друкованих платах використовуються різні види монтажу, то й установники поділяються на кілька типів, а саме:

- установники вивідних (ТНТ) компонентів;
- установники поверхнево-монтованих (SMD) компонентів;
- установники змішаного типу, які можуть працювати як з ТНТ, так і з SMD-компонентами.

Основна функція апарату – це вибір відповідних елементів та його точне центрування на платі. Компоненти заздалегідь фіксуються точками за допомогою клею та паяльної пасти, після чого апарат здійснює певний тиск, щоб закріпити елемент на платі. Автоматична процедура проводиться з максимальною точністю, що зводить до мінімуму можливий брак та дефекти виробу.

Суть технології ТНТ-монтажу полягає в тому, що перед паянням на друкованій платі компоненти розміщуються таким чином, що їх виводи встановлюються у наскрізні отвори плати і припаюються. Такий тип монтажу є основою сучасних технологій виробництва електронних модулів. Тобто одночасно з появою друкованих плат з'явився і вивідний монтаж. Спочатку він проводився лише вручну. Поступово ТНТ-монтаж відходить у минуле, поступаючись місцем технології поверхневого монтажу, проте вивідний монтаж продовжує використовуватись у багатьох пристроях та галузях промисловості, де існують під-

вищені вимоги до надійності, це блоки живлення, високовольні схеми моніторів, силові пристрої, автоматичні пристрої для атомних станцій тощо. Тому були розроблені автоматизовані установники ТНТ-компонентів, які мають набагато більшу продуктивність, ніж такий самий вивідний монтаж вручну.

Використання автоматів з ТНТ-монтажу на виробництві, крім збільшення швидкості монтажу в отвори, має додаткові переваги:

- надійність;
- нижча собівартість кінцевого продукту;
- висока точність вивідного монтажу;
- автоматичний контроль;
- монтаж мініатюрних елементів;
- розташування компонентів на мінімальній відстані один від одного;
- автоматичне підрізування та підгинання виводів зі зворотного боку плати.

У SMT-технології використовують спеціальні електронні компоненти (SMD-компоненти). Їх специфіка полягає у відсутності традиційних дрітних виводів, властивих наскрізному монтажу. Замість установки в спеціальні монтажні отвори такі компоненти припаюються своїми контактами безпосередньо до контактних площинок друкованої плати. Їх правильне положення, а також міцність паяного з'єднання забезпечуються за рахунок поверхневого натягу розплавленого припою.

Технологічний процес поверхневого монтажу поділяється на кілька етапів. Перша частина робіт – підготовча. Електронні компоненти проходять вхідний контроль якості та перераховуються. Далі їх у встановленій послідовності доставляють на ділянки монтажу та встановлюють у живильники.

Автоматичний монтаж друкованих плат під час підготовки включає метод панелізації – проектування масиву плат щоб одержати єдину деталь. Це дозволяє зробити групову заготовку із однакових плат. Панелізація або мультиплікування необхідно, коли використовуються пристрої поверхневого збирання компонентів SMD.

Другий етап – це нанесення паяльної пасти. Для паяння елементів та утримання їх на поверхні плати до моменту утворення паяного з'єднання використовується паяльна паста, яка є порошкоподібним припоєм з додаванням флюсу, різних активаторів і присадок. Паста має гелеподібну консистенцію і повинна забезпечувати очищення контактних площинок друкованої плати і компонентів від оксидної плівки, та інших домішок, які заважають утворенню паяного з'єднання, а також

утримання компонента на поверхні плати до моменту паяння, тобто мати клеючі властивості.

Розрізняють два методи нанесення паяльної пасти, це дозування та трафарет.

При нанесенні паяльної пасти методом *дозування* автоматичні установки з дозаторами наносять паяльну пасту безпосередньо на контактні площинки друкованої плати, при цьому використовуються паяльні пасти низької в'язкості. Цей метод дозволяє наносити паяльну пасту поверх вже нанесеного шару. Спочатку паста наноситься згідно з налаштуваннями програмного забезпечення, які використовуються за замовчанням на підставі введених САД-даних. Тим не менш, у користувача є можливість змінювати обсяг паяльної пасти, що наноситься, область нанесення, висоту і кількість шарів пасти для кожної окремої контактної площинки. Обсяг доз, розмір і форма шару, що наноситься, легко налаштовуються і оптимізуються для кожного окремого компонента і контактної площинки на платі. Цей метод дозволяє працювати з найбільш складними платами та компонентами найбільш складної конструкції та оптимізувати роботу існуючої виробничої лінії.

При нанесенні пасти з допомогою *трафарету*, паста наноситься на контактні площинки друкованої плати через трафарет, отвори в якому – апертури – повторюють малюнок, розташування та форму контактних площинок на платі. Нанесення пасти відбувається на автоматичних принтерах трафаретного друку. Ці пристрої оснащені системою технічного зору, що забезпечує точне поєднання трафарету з платою. Паста продавлюється спеціальним ракелем через отвори у трафареті і переноситься на контактні площинки плати. Спеціальні пристрої принтера контролюють різні параметри процесу, такі як швидкість переміщення ракеля, тиск, відрив трафарету від плати, контроль стану, очищення трафарету і т.д.

Якість нанесення паяльної пасти контролює спеціалізоване обладнання 3D оптичної інспекції, яке визначає точність нанесення пасти на контактні площинки, об'єм, а також можливі дефекти. Автоматизований помічник встановлює обсяг та розташування пасти на площинках, передаючи дані оператору.

Наступний етап – встановлення компонентів на плату. Сьогодні існує безліч автоматів, які виконують цю операцію. Вони відрізняються за принципом роботи, конструкцією, продуктивністю, можливостями і призначенням. Встановлення компонентів на плату виконується відпо-

відно до проектною документації за заздалегідь розробленою програмою. Найчастіше в одній лінії можна зустріти два і більше автоматів встановлення компонентів, які виконують певні завдання. Наприклад, швидкісне встановлення простих SMD-елементів та встановлення компонентів, які вимагають високої точності, компонентів великих розмірів або складної форми. Але, незалежно від принципу роботи верстата, основна послідовність дій виглядає наступним чином: захоплення компонента з носія (найчастіше стрічки), його центрування за допомогою відеосистеми або лазера; встановлення компонента на плату. Перед початком монтажу технічний зір пристрою визначає координати реперних точок на платі та вносить поправки на неточність позиціонування плати в робочій області верстата.

Наступний етап – це групове паяння. Паяння зібраних друкованих плат у сучасних автоматичних лініях здійснюється груповим методом у конвекційних, інфрачервоних або парофазних печах. Найбільш високу якість паяння та продуктивність забезпечують конвекційні печі. У цих пристроях зібрана плата переміщається конвеєром між декількома зонами з різною температурою, гаряче повітря в які передається від нагрівачів за допомогою вентиляторів. Це забезпечує рівномірне прогрівання всього виробу, плавне кероване зростання температури до потрібного пікового значення, і подальше поступове охолодження спаяної плати, що запобігає температурному стресу. Спеціальні модулі печі контролюють розподіл потоків повітря всередині робочої зони та видалення з нього продуктів, які виділяються при нагріванні флюсу та активаторів паяльної пасти.

На завершальному етапі відбувається оптичний контроль якості монтажу. Спаяні модулі проходять контроль за допомогою установки автоматичної оптичної інспекції, яка дозволяє розпізнати такі дефекти, як відсутність або зміщення компонентів, утворення перемичок припою між выводами мікросхем, «непропай», ефект холодного паяння та ін. Перевірка відбувається в автоматичному режимі, плати, на яких були виявлені дефекти, сортуються в окремий відсік автоматичного розвантажувача і передаються на ділянку ремонту (якщо це передбачено технологією).

Плати з встановленими компонентами з прихованими выводами, такі як BGA, CSP, QFN та інші, якість паяння яких неможливо визначити за допомогою оптичних систем, проходять додаткову перевірку на установках рентгеноскопічного контролю.

Через високу чутливість SMD-компонентів до температурного впливу та статичної електрики особлива увага приділяється їх збереженню та організації безпеки виробництва. На промислових об'єктах широко застосовуються автоматизовані системи, що підтримують оптимальні умови їх зберігання. Для захисту компонентів і зібраних з них пристроїв від статичної електрики розроблені спеціальні столи та килимки, що забезпечують безпечне стікання розряду через заземлення.

За рахунок наявності зовнішніх і внутрішніх шарів струмопровідного матеріалу та мінімізації компонентів вдається досягти високої щільності їх розміщення на друкованій платі і, отже, зменшити розмір кінцевого виробу. Однак, при монтажі виникають проблеми, які необхідно вирішити:

- недостатній відступ струмопровідного шару від краю. Друковані плати для поверхневого монтажу містять зовнішні та внутрішні шари струмопровідного матеріалу (міді). Щоб метал не зазнав корозії, його покривають захисним шаром. Проблема виникає, якщо струмопровідний шар покриває всю поверхню плати. Згодом на її краях виникають сколи, і захисне покриття в цих місцях порушується, оголюючи метал, який починає зазнавати окислення. Щоб цього не сталося, рекомендується залишити між струмопровідними шарами та краєм плати відступ (мінімальна ширина для зовнішніх – 0,01 дюйма, для внутрішніх – 0,015 дюйма);

- знижена механічна міцність SMD-компонентів. У поверхневому монтажі електронні компоненти припадають до контактних площинок друкованої плати. Це дозволяє розмішувати їх щільніше і використовувати обидві сторони плати, мінімізуючи кінцевий виріб. Однак встановлені таким способом компоненти менш стійкі до механічних навантажень, ніж змонтовані наскрізним монтажем. Вирішити цю проблему можна комбінуючи на одній платі компоненти для наскрізного та поверхневого монтажу, а також використовуючи паяльні анкери.

- висока щільність компонентів. Це водночас і перевага, і складність технології поверхневого монтажу. З одного боку, вона мінімізує розміри електронної продукції та підвищує її ефективність. З іншого – підвищує вимоги до точності проектування плати, розміщення на ній компонентів, нанесення припою і т. д. Через близьке розташування контактних майданчиків та виводів компонентів один до одного зростає ризик утворення дефектів паяння – наприклад, «мостів» припою. Вирішити цю проблему можна лише ретельнішим

проектуванням плат, а також впровадженням технологій автоматизованого оптичного контролю, удосконалених методів паяння, більш якісних витратних матеріалів (флюсів, припоїв тощо).

- чутливість компонентів. Електронні компоненти, що використовуються в сучасній промисловості, чутливі до високих механічних та термічних навантажень, а також до статичної електрики. Особливо це стосується компонентів для поверхневого монтажу, які через невеликі розміри корпусів і виводів швидко нагріваються, що призводить до їх виходу з ладу. Також через малі розміри паяних з'єднань вони схильні до руйнування при ударах і вібраціях. Вирішити проблему дозволяє ретельніше проектування електричних схем, впровадження нових термопрофілів, легкоплавких припоїв.

- деформація друкованої плати. Така проблема найчастіше виникає під час паяння компонентів на друкованій платі. Причина – нерівномірне або надмірне нагрівання плати та компонентів, викликане дефектами самої підкладки або неправильно підібраним температурним профілем паяння. Також деформацію плати може викликати нерівномірний розподіл компонентів по площині, що викликає різне вагове навантаження на різні ділянки плати. Вирішення проблеми – це використання оптимальних температурних режимів паяння та плат, виготовлених з якісних матеріалів, а також ретельне проектування електричної схеми.

- низька якість з'єднання. При паянні електронних компонентів рідкий припій змочує поверхню контактної площинки та виводу елемента, а при охолодженні утворює паяне з'єднання. Через порушення технології та/або використання некоректно підбраної паяльної пасти, присутності забруднень на поверхнях, які з'єднуються, склад застигає з різними дефектами – наприклад, утворює опуклий меніск замість увігнутого, стає пористим і крихким. Для вирішення цієї проблеми потрібно правильно вибирати паяльну пасту та її дозування, здійснювати попереднє очищення плати від забруднень, використовувати флюси.

Найважливіша перевага технології поверхневого монтажу – економічність виробничих процесів завдяки автоматизації етапів складання та зниження кінцевої вартості. Паяльна паста використовується в заданих пропорціях з друком по трафаретам і з використанням дозаторів. Автомати для поверхневого монтажу можуть помістити навіть дрібні SMD-елементи на паяльній площинці. Нові технології дозволяють скоротити кількість помилок під час монтажу, тому завдяки

своїм перевагам сьогодні SMD-технологія є основною технологією монтажу друкованих плат.

Висновки.

Особливості та основні переваги автоматичного монтажу:

- групове паяння компонентів – прецизійні установники компонентів забезпечують швидкість встановлення до 50 тисяч компонентів на годину;
- повторюваність процесу дозволяє програмувати встановлення будь-якої складності, виставляючи різні умови в налаштуваннях;
- контроль температурного режиму у конвекційних печах гарантує чітке формування паяних з'єднань.

– час виробництва друкованого вузла зменшується завдяки використанню безвідмивної та екологічної паяльної пасти;

– суворий контроль якості за допомогою приладів оптичної інспекції та покрокового тестування.

У зв'язку з тим, що SMD-монтаж простіше автоматизувати, він застосовується на підприємствах із великосерійним виробництвом. При цьому ТНТ-монтаж, як і раніше актуальний у багатьох галузях промисловості. Тому було створено автомати змішаного типу, які можуть встановлювати як ТНТ, так і SMD-компоненти, не вимагаючи переналадження устаткування.

Список літератури:

1. Dixon D. et al. «Development of a Solder Paste Test Vehicle for Miniaturized Surface Mount Technology». IPC Apex Expo Proceedings, 2018.
2. Bixenman M. et al. «Quantifying the Improvements in the Solder Paste Printing Process from Stencil Nanocoatings and Engineered Under Wipe Solvents». International Conference on Soldering and Reliability Proceedings, 2014.
3. Agarwal N. «Evaluation of Stencil Technology for Miniaturization». SMTA International Proceedings, 2016.
4. Welch R. «SPI Data Analysis, Print Process Characterization/Optimization. Presentation». April 2019.
5. Shea C., Lawrence R. «Solder Paste Qualification Testing for EMS Production». SMTA International Proceedings, 2017.

Haryst A.V. AUTOMATION ASSEMBLY TECHNOLOGY PRINTED CIRCUIT BOARDS

Modern trends in the manufacture of electronic equipment are characterized by the desire to increase the functionality of devices and simultaneously reduce their overall parameters. As a result, you can get a large number of high-quality and inexpensive products. The article is devoted to an overview of the basics and principles of automated assembly technology, which is the optimal and most popular option for large-scale production.

The article found out that the quality of the assembled electronic module depends on compliance with the installation technology. Project documentation for automated surface mounting has certain requirements: an assembly diagram and assembly drawings indicating the height of the components, the method of formation, polarity, element keys and positional values, as well as a specification with the full name and positional designation of the components.

The article defines that the automated installation of printed circuit boards is a pre-programmed process that takes place practically without the operator's participation. Multifunctional automatic equipment is used in production. It allows you to mount more than 50,000 elements per hour on a printed circuit board, which is especially relevant for large-scale production. The terminals of the SMD components have miniature dimensions and are soldered to the points of the contact planes on the surface of the boards. Therefore, the accuracy of the installation of elements, which is achieved with the use of the latest automatic equipment, is very important.

The article reveals that the surface mounting technology is becoming the optimal method of circuit board production. If earlier in their manufacture mainly hanging components were used, today more than 90% of printed circuit board elements are SMD elements. If DIP components are fixed at special stations or manually, the process of installing SMD elements is more than 95% automated. Human labor during surface assembly is required to set up automatic equipment, load workpieces and elements onto conveyor lines.

Key words: printed circuit board, automated assembly, SMD-assembly, TNT-assembly, stencil.