

Кошкин Егор Николаевич

магистр, НОЦ ВКО «Алмаз-Антей», г.Москва

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ ПАЙКИ ПРОВОДОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КАБЕЛЬНО-ЖГУТОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Аннотация. Предлагаемая работа содержит обзор актуальных подходов к автоматизации финишной стадии сборки кабельных сборок — присоединения токопроводящих жил к контактными элементам электрических разъемов. Проанализирована специфика данной технологической операции в контексте выпуска жгутовых изделий, детально разобраны ключевые способы реализации: традиционное ручное паяние, механический обжим, применение лазерного излучения и избирательная пайка волновым методом. Для каждой техники выделены сильные стороны, присущие ей ограничения и предпочтительная сфера использования. Наибольшее внимание уделено лазерному способу как наиболее многообещающей технологии формирования соединений повышенной ответственности. Обозначены факторы, сдерживающие применение селективного волнового воздействия в жгутовом производстве. Дано описание актуальных инструментов автоматизации — роботизированных комплексов, излучающих установок и интерактивных систем-помощников. Раскрыта архитектура управляющей системы для автоматизированного паяльного процесса. Сформулированы итоговые положения о рациональности задействования того или иного способа в привязке к масштабу выпуска и критериям безотказности неразъемных контактов.

Ключевые слова: жгутовые сборки, роботизация паяльных операций, лазерное формирование спаев, механическое обжатие, селективное лужение, робот-паяльщик, управляющий контур, оптический контроль, аналитический обзор.

Abstract. This paper presents a review of current approaches to the automation of the final assembly stage of cable assemblies, namely, the attachment

of conductive cores to the contact elements of electrical connectors. The specific nature of this technological operation is analyzed in the context of wire harness manufacturing, with a detailed examination of the key implementation methods: traditional manual soldering, mechanical crimping, laser radiation, and selective wave soldering. For each technique, the strengths, inherent limitations, and preferred areas of application are highlighted. Particular attention is paid to the laser method as the most promising technology for forming highly reliable joints. The factors constraining the use of selective wave soldering in harness production are identified. A description of current automation tools is provided, including robotic systems, laser emitting units, and interactive assistant systems. The architecture of a control system for an automated soldering process is disclosed. Concluding remarks are formulated regarding the rational choice of a particular method depending on production volume and the reliability requirements for permanent electrical contacts.

Key words: cable harness assemblies, robotization of soldering operations, laser formation of solder joints, mechanical crimping, selective tinning, soldering robot, control loop, optical inspection, analytical review.

Введение

Электротехнические системы авиационно-космических аппаратов, автомобилестроительной индустрии и оборонного сектора трудно вообразить без кабельно-жгутовой продукции. Подобные сборки, включающие многие десятки или даже сотни проводов, выполняют функцию связующего звена между функциональными блоками. Эксплуатационная долговечность и устойчивость радиоэлектронного оборудования к отказам в решающей степени задаются добротностью межсоединений внутри жгутов [1, 3].

Производственный маршрут получения жгута объединяет ряд последовательных шагов: мерный отрез и удаление изоляционного слоя, горячее лужение токоведущих жил, трассировку по шаблону, формирование пучков и, в завершение, фиксацию проводников на штырях и гнездах соединительных устройств. Продолжительный период названные манипуляции оставались уделом ручного труда, причем завершающая стадия

— распайка — выделяется особой трудоемкостью и одновременно критичностью, требуя от персонала высокой выучки [2, 4].

В недавние десятилетия предпринимаются энергичные шаги по механизации и роботизации процессов изготовления жгутов. Появились программируемые автоматы для резки, снятия изоляции и обслуживания токопроводящих жил, станки с числовым программным управлением для раскладочных операций [18]. Тем не менее стадия присоединения жил к контакт-деталям до сего дня сохраняет статус наиболее слабо роботизированной, образуя «критическую точку» всего технологического потока [4, 14].

Задача, решаемая в настоящей публикации, состоит в систематизации и критическом разборе новейших методик и технических решений по автоматизации операции распайки в кабельно-жгутовом производстве, в выявлении их плюсов и минусов, а также в определении ниш их хозяйственно оправданного внедрения.

1. Специфика операции распайки проводов

Финальное закрепление проводящих жил на выводах электрических соединителей представляет собой чрезвычайно ответственную стадию, замыкающую цепочку изготовления жгута. Именно качество исполнения паяного стыка напрямую коррелирует с вероятностью безотказного функционирования аппаратуры: нестабильный контакт способен провоцировать сбои аппаратуры при штатной эксплуатации [3, 15].

К числу главных затруднений, сопровождающих распайку, можно отнести:

1. Компактное расположение штырей в современных низковольтных разъемах. Межконтактный интервал подчас оказывается меньше миллиметра, что диктует чрезвычайно жесткие допуски на позиционирование рабочего инструмента [9].

2. Широкий ассортимент соединительных изделий и контактных пар — различающихся как по геометрической форме, так и по материалу покрытия (золото, серебро, никель) и по типу монтажа (в сквозное отверстие, планарно, внатяг) [17].

3. Строгие нормативы к физико-механическим характеристикам контактов, эксплуатируемых при знакопеременных нагрузках, термоциклировании и в атмосфере с повышенной влажностью [15].

4. Сильная подверженность результатов влиянию исполнителя — термическое повреждение изоляционного слоя при избыточном нагреве, появление непропаев из-за недогрева, ошибочная коммутация жил, ведущая к отбраковке всего узла [2, 4].

Перечисленные трудности стимулируют производственные компании к освоению технологий, гарантирующих воспроизводимое качество при высокой тактовой частоте выпуска.

2. Типология способов прикрепления проводов

В производственной практике задействуют четыре доминирующих подхода к монтажу жил на контакты разъемных соединителей. Их допустимо сгруппировать в контактные и бесконтактные, а также обособить метод механического обжатия.

2.1. Традиционная ручная методика

Ручной монтаж с помощью электропаяльника остается преобладающим на большинстве заводов, в особенности при выпуске опытных партий и в мелкосерийном секторе. Оператор вручную прогревает контактную зону, дозирует флюс и присадочный материал [2].

Сильные стороны:

1. Минимальные капиталовложения в оснастку;
2. Универсальность — совместимость практически с любыми типами разъемов;
3. Возможность манипуляций в стесненных условиях.

Слабые стороны:

1. Прямая зависимость результатов от психофизиологического состояния и навыков монтажника;
2. Разброс длительности и температуры термоцикла;
3. Высокая вероятность перегрева диэлектрика;

4. Низкая скорость поточного выпуска;
5. Значительная доля отбраковки, обусловленная субъективными ошибками [2, 16].

Подобный подход оправдывает себя в опытных цехах, в ремонтных подразделениях и при работе с уникальными, нестандартизованными соединителями, для которых проектирование автоматики экономически невыгодно.

2.2. Обжим (кримпирование)

Сущность метода сводится к неразъемному соединению провода с хвостовиком контакта посредством холодной пластической деформации металла. Защищенная жила вводится в контактную гильзу, после чего пуансон матрицы смыкает ее с заданным усилием [8].

Сильные стороны:

1. Высокая тактовая частота (вплоть до 1000 циклов в час);
2. Термическое воздействие исключено — диэлектрик остается неповрежденным;
3. Квалификационные требования к оператору минимальны;
4. Прекрасная воспроизводимость параметров от образца к образцу.

Слабые стороны:

1. Повышенное, относительно паяного стыка, электрическое сопротивление перехода;
2. Необходимость периодической поверки и настройки обжимного инструмента;
3. Потенциальная деградация механической целостности стыка под длительным вибрационным воздействием;
4. Неприменимость к некоторым конструктивным разновидностям контактов [8, 15].

Технология получила широчайшее распространение в автомобилестроительном конвейере и крупносерийном выпуске бытовых электроприборов. В аэрокосмической отрасли кримпирование также

востребовано, однако в особо ответственных цепях предпочтение по-прежнему отдают паяным соединениям [8].

2.3. Применение лазерного луча

Лазерная технология на сегодняшний день рассматривается как наиболее передовой бесконтактный вариант. Сфокусированное излучение строго локально доводит область стыка до температур плавления дозированного припоя. На практике активно используют твердотельные установки на алюмоиттриевом гранате с неодимом (1,06 мкм), а также полупроводниковые лазерные модули [5, 7].

Сильные стороны:

1. Исключительно локальный прогрев — термическая нагрузка на диэлектрик пренебрежимо мала;
2. Бесконтактный характер — механическое травмирование контактных элементов исключается;
3. Быстродействие — продолжительность импульса варьируется в диапазоне 0,3–1,0 с;
4. Превосходная сходимость результатов и стабильность свойств спаев;
5. Полная совместимость с роботизированными комплексами;
6. Выдающиеся эксплуатационные параметры (минимальное переходное сопротивление, высокая механическая прочность) [5, 7, 9].

Слабые стороны:

1. Значительная стоимость аппаратной части;
2. Трудоемкая оптимизация режимов излучения применительно к разным семействам разъемов;
3. Обязательное применение мер по защите персонала от прямого и отраженного излучения;
4. Повышенные требования к прозрачности и чистоте оптического тракта [6, 9].

На рисунке 1 визуализировано сопоставление термограмм для различных источников нагрева. Отчетливо видно главенствующее достоинство лазерного

метода: в точке пайки достигается температура смачивания припоем (порядка 240–250 °С), тогда как изоляция соседнего участка проводника не разогревается выше безопасных значений. Классический паяльник, напротив, провоцирует нагрев изоляционного слоя до температур, нарушающих его структурную целостность [9] (рис. 1).

Ссылаясь на экспериментальные работы, можно констатировать, что лазерный спай на 30–70% превосходит ручной по прочности на разрыв и имеет в полтора-два с половиной раза более низкое омическое сопротивление по сравнению с обжимным контактом [5, 7]. Упомянутые показатели выводят лазерную технику в лидеры при изготовлении особо ответственных бортовых кабельных сетей.

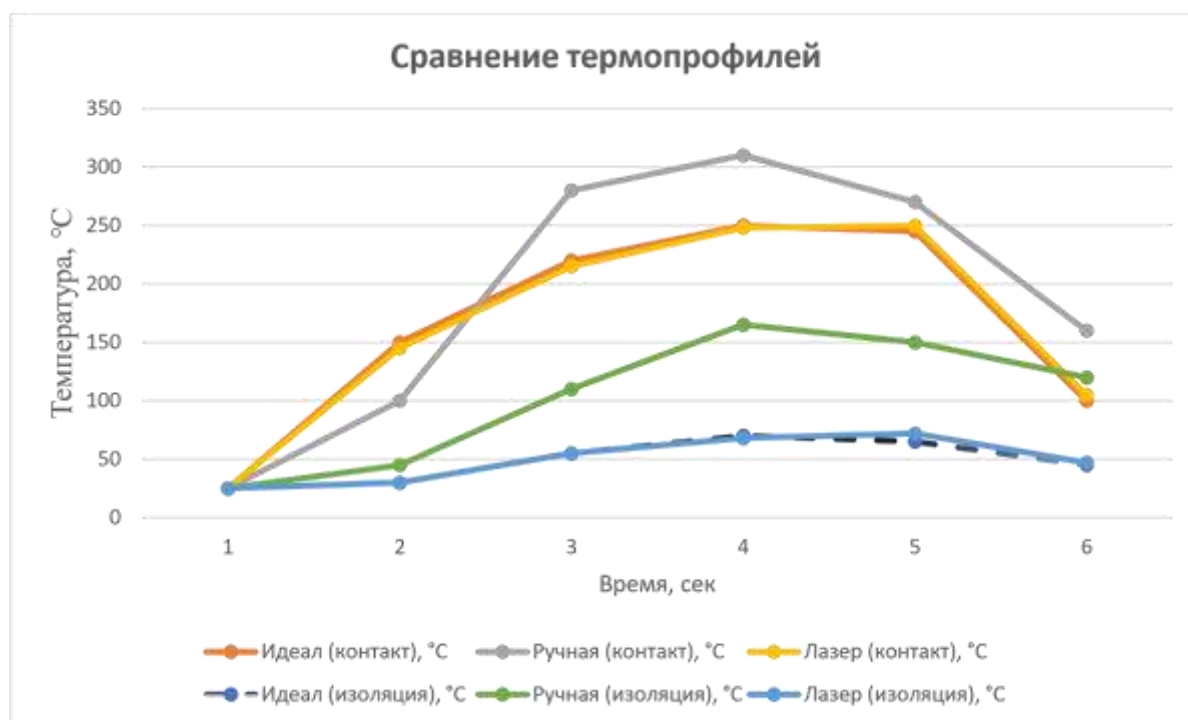


Рис. 1. – Сравнительные термопрофили различных методов нагрева.

2.4. Селективная пайка волной припоя

Сущность процесса состоит в адресной подаче струи расплавленного припоя на единичные контакты либо их локальные группы. Метод прекрасно

зарекомендовал себя в операциях поверхностного и сквозного монтажа планарных плат, однако его потенциал для жгутового производства ограничен [10].

Сильные стороны:

1. Высочайшая производительность для многоштырьковых соединителей;
2. Перспектива единовременной обработки кластера выводов;
3. Стабильное качество применительно к монтажу на печатных платах.

Ключевые преграды для жгутового применения:

1. Опасность капиллярного проникновения жидкого флюса вдоль многопроволочной жилы под оболочку (глубина затекания может достигать нескольких миллиметров), что создает очаги последующей электрохимической коррозии [10];

2. Термическая неравномерность по полю многовыводного разъема;
3. Затруднения в экранировании изоляции от жара волны, что вынуждает переходить на термоупорные компаунды [17].

4. Резюмируя, можно утверждать, что внедрение селективной волны для кабельных сборок оправдано исключительно при комбинации теплостойких разъемов и проводников с термостабилизированной изоляцией.

3. Архитектура контура управления процессом

Для практического воплощения автоматизированной пайки спроектирована иерархическая система регулирования, агрегирующая три функциональных кольца обратной связи [13, 20].

Структурная декомпозиция системы (рис. 2) выявляет трехуровневое построение с центральным промышленным контроллером в роли ядра.

Стратегический уровень объединяет автоматизированное рабочее место оператора и сервер технологических данных. Его задача — человеко-машинное взаимодействие, импорт конструкторских спецификаций (трехмерные геометрические модели жгута, перечни элементов), ведение

архива рецептов пайки [14]. Отсюда в программируемый контроллер транслируется производственное задание на обрабатываемую серию.

Тактический уровень (собственно промышленный контроллер) реализует координацию функционирования всех субмодулей в режиме жесткого реального времени. Он аккумулирует сигналы обратных связей от измерительных преобразователей, обсчитывает корректирующие воздействия и выдает директивы на оконечные устройства [13, 22]. Внутренняя память контроллера вмещает в себя математику кинематической задачи позиционирования, код ПИД-регулятора и обученную модель свёрточной нейросети для классификации дефектов [20, 21].

Исполнительный уровень составлен тремя параллельно функционирующими контурами:

1. *Контур наведения и позиционирования* отвечает за совмещение оси инструмента с геометрическим центром монтируемого контакта. Целеуказание осуществляется по координатам, извлеченным из CAD-модели [14]. В роли актуаторов выступают сервоманипуляторы с 4–6 степенями свободы либо прецизионные двухкоординатные столы на шаговых двигателях. Сигнал рассогласования формирует оптическая подсистема (камера с высоким разрешением), идентифицирующая истинное положение штыря [11, 12]. Погрешность наведения укладывается в допуск $\pm 0,02\text{--}0,05$ мм, что открывает возможность обслуживать соединители с шагом выводов до 0,625 мм [9].

2. *Контур термостатирования* призван гарантировать строго дозированное введение тепловой энергии для исключения как пережога, так и холодной спайки. Исполнительный орган — излучатель (Nd:YAG либо диодный) с перестраиваемой мощностью до 50 Вт [5, 6]. Датчиком обратной связи служит бесконтактный ИК-пирометр, опрашиваемый с частотой 50–100 Гц [7]. Алгоритмическая основа — цифровой ПИД-регулятор, непрерывно сравнивающий текущую температуру пятна нагрева с предписанной уставкой

(к примеру, 245–250 °С для эвтектического состава ПОС-61). Отклонение от задания при установившемся режиме не превышает ± 3 °С [20].

3. *Контур выходного контроля* выполняет верификацию каждого полученного спая. Анализируемый образ — цифровой снимок зоны контакта, зафиксированный камерой после завершения теплового цикла [11]. Задача распознавания возложена на предварительно обученный классификатор на базе сверточной нейронной сети, детектирующий морфологические аномалии: нарушение геометрии галтели, присутствие избыточных сфер припоя, мостиков или зон несмачивания [12, 21]. Контроллер маркирует результат как «принят» или «отбракован» и протоколирует вердикт в базе данных.

Обмен данными между подсистемами организован по скоростным промышленным протоколам (EtherCAT, Profinet), что создает предпосылки для строгой тактовой синхронизации и оперативного перепрограммирования линии при смене номенклатуры разъемов без механической переналадки [22] (рис. 2).

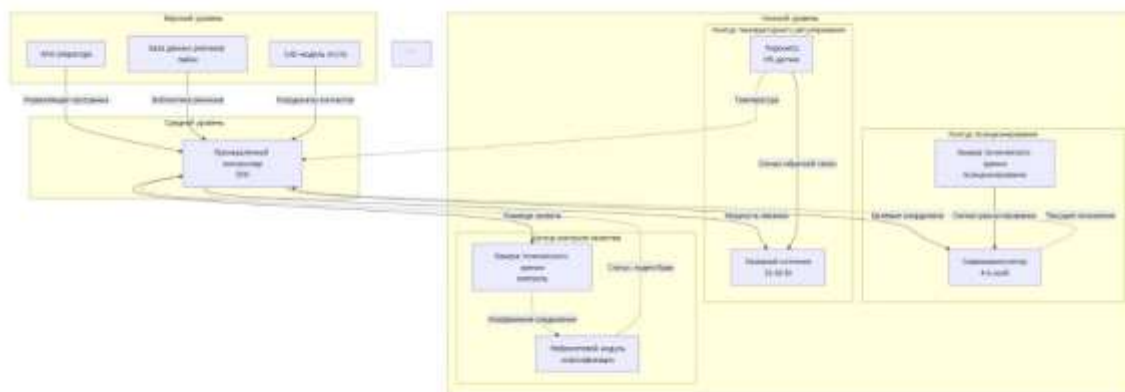


Рис. 2. – Структурная схема системы управления

4. Сопоставительный анализ конкурирующих технологий С целью наглядной демонстрации разрыва в производительности обсуждаемых методов на рисунке 3 отображена столбчатая диаграмма, отражающая часовую выработку в соединениях. Очевидно колоссальное отставание ручной методики (20–30 спаев/ч) от механизированных и автоматических альтернатив. Среди последних наивысший темп показывает селективная волна

(до 2500 соедин./ч), за которой с отрывом следуют обжим (до 750 соедин./ч) и лазер (до 400 соедин./ч) [4, 8, 10] (рис. 3).

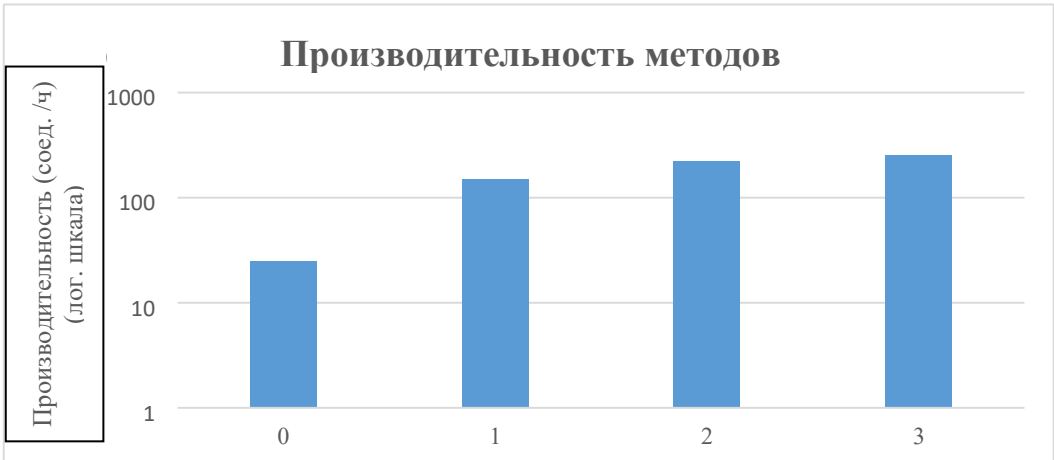


Рис. 3. – Производительность методов

Таблица № 1

Сводка параметров методов монтажа проводов

Производительность, соедин./ч	20–30	500–1000	300–500	1000–5000
Качество соединения	среднее	среднее	высокое	высокое
Стабильность результата	низкая	высокая	высокая	средняя**
Термическое воздействие	высокое	отсутствует	минимальное	высокое***
Стоимость оборудования	низкая	средняя	высокая	высокая
Квалификация персонала	высокая	низкая	средняя	высокая
Применимость для жгутов	высокая	высокая	высокая	ограниченная

* — в контексте жгутовых сборок;
** — варьируется от геометрии разъема;
*** — существует угроза перегрева диэлектрика.

Приведенная таблица 1, основанная на агрегировании разрозненных литературных данных [2, 4, 5, 8, 10, 16], позволяет сделать ряд принципиальных заключений. Ручная операция проигрывает автоматическим

по темпу и однородности качества. Лазерный метод демонстрирует наилучший компромисс между добротностью спаев и тактовой частотой, легко встраиваясь в полностью роботизированные ячейки [5, 7]. Обжимная технология лидирует в крупносерийных производствах, где требования к сверхнизкому сопротивлению контакта не являются доминирующими [8]. Волновая селективная пайка, несмотря на феноменальную скорость, для кабельных сборок наталкивается на принципиальные теплофизические барьеры [10].

Для многомерной визуализации сильных и слабых сторон методов на рисунке 4 построена лепестковая диаграмма. Она интегрирует экспертные балльные оценки по таким осям, как качество, повторяемость, щадящий термический режим, удельная стоимость и производительность. Своеобразный «портрет» каждого метода позволяет мгновенно идентифицировать его профиль: ручной метод экономичен, но нестабилен; обжим сбалансирован, однако уступает пайке по электрическим характеристикам; лазерный профиль близок к эталонному за исключением ценового фактора [5, 7, 9] (рис. 4).

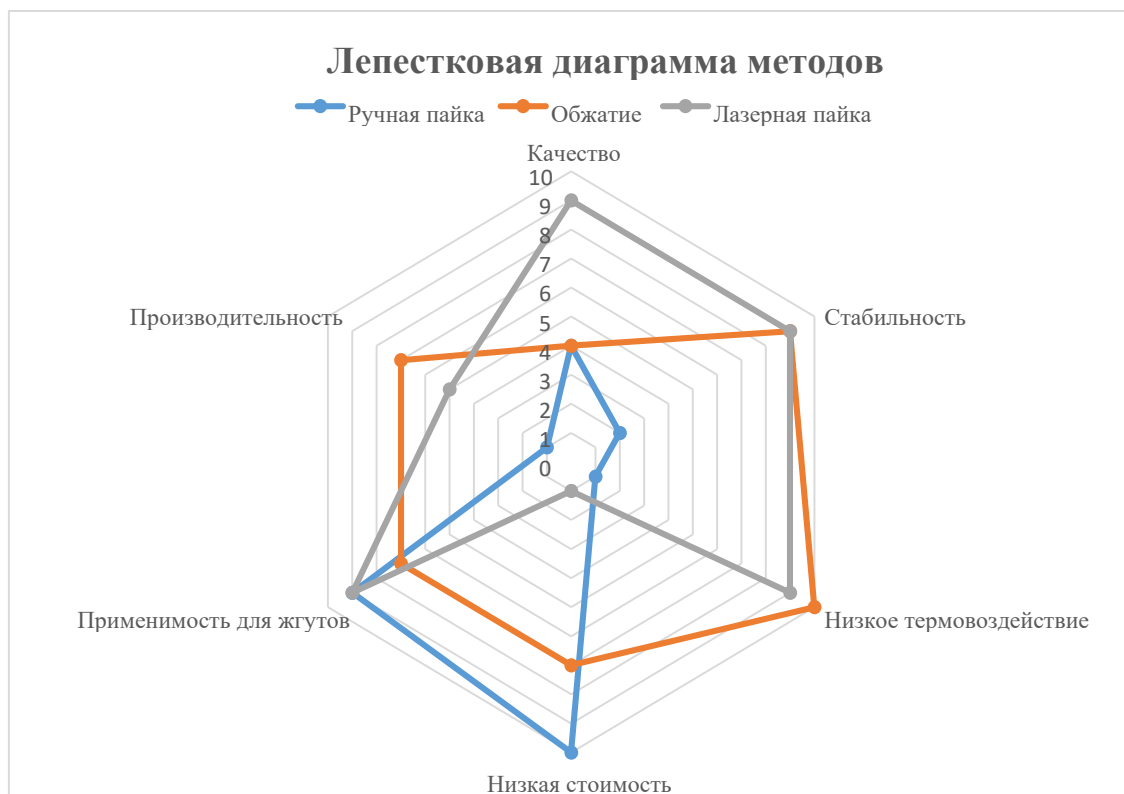


Рис. 4. – Лепестковая диаграмма методов.

5. Инструментальное обеспечение автоматизированной пайки

5.1. Роботизированные паяльные комплексы

Современный робот-паяльник — это, как правило, многоосевой промышленный манипулятор, укомплектованный специализированным нагревательным инструментом и оптической системой машинного зрения. Подобная конфигурация дает возможность заранее программировать траекторию обхода всех контактов конкретного разъема, добиваясь высокой прецизионности и повторяемости [14, 18].

Типичные технические метрики:

1. подвижность манипулятора — 4–6 степеней свободы;
2. пространственная погрешность — $\pm 0,02$ – $0,05$ мм;
3. темп работы — в среднем до 300 циклов в час;
4. интегрированные модули терморегулирования и подачи

присадочной проволоки [13].

Применение таких роботизированных ячеек наиболее рентабельно в условиях серийного выпуска при ограниченной номенклатуре применяемых соединителей. Переход на иной тип разъема сопряжен с написанием новой управляющей программы и, зачастую, со сменой технологической оснастки [14].

5.2. Аппаратура лазерного монтажа

Лазерные станции для формирования спаев — это прецизионное оборудование, агрегирующее квантовый генератор, оптическую систему наведения и фокусировки луча, механизм автоматической доставки присадочного материала и промышленный контроллер [5, 6].

Ряд отечественных предприятий (в частности, саратовское НПП «Инжект» и коллективы Московского авиационного института) активно ведут собственные разработки в указанной нише [19]. Характерные показатели серийных образцов:

1. Выходная оптическая мощность — 25–50 Вт;

2. Пятно в фокальной плоскости — 1,5–3 мм;
3. Пиковая производительность — до 330 операций в минуту;
4. Возможность встраивания в сквозные конвейерные линии [5, 7].

Такое оснащение успешно справляется с пайкой сверхминиатюрных разъемов (межконтактное расстояние до 0,625 мм), гарантируя при этом сохранность изоляционной оболочки. Встроенный контур управления температурой гарантирует высокую сходимость свойств спаев от цикла к циклу [9].

5.3. Цифровые помощники сборщика

В ситуациях, когда полномасштабная роботизация представляется финансово нецелесообразной (например, в условиях частой смены модельного ряда), востребованы системы пошагового инструктирования персонала. Подобные программно-аппаратные комплексы визуализируют на дисплее схему коммутации, подсвечивая очередную жилу и адресный контакт [18].

Ключевые опции:

1. Автоматизированное формирование монтажной карты на основе проектной документации;
2. Интерактивная индикация текущего шага на экране;
3. Верификация корректности подсоединения (с помощью технического зрения или сканирования идентификаторов);
4. Стыковка с корпоративной MES-системой [11, 12].

Интеграция таких ассистентов способствует резкому снижению числа коммутационных ошибок и ускоряет ввод в должность новых кадров, что является критически важным при динамично обновляемой номенклатуре выпуска [18].

6. Тенденции развития методов пайки

Систематизация научно-технической периодики позволяет сформулировать ряд магистральных трендов в сфере монтажа проводов на разъемы:

Устойчивый тренд последних лет — вытеснение контактных техник оптическими квантовыми генераторами. Лазер постепенно занимает нишу традиционного паяльника в секторах с повышенными запросами к

безотказности, что объясняется отсутствием силового воздействия на деталь, локализованным тепловложением и великолепной воспроизводимостью [5, 7].

Переход к «безлюдным» сквозным технологиям. Речь идет о компоновке единых производственных цепочек, охватывающих заготовку жил, трассировку, монтаж и выходной контроль под эгидой общей цифровой платформы [4, 14].

Широкая экспансия технического зрения. Оптические сенсоры и анализирующие алгоритмы задействуются на всех этапах: для прецизионного наведения инструмента, для постоперационной оценки геометрии спаев и для фиксации ошибок раскладки [11, 12, 21].

Виртуализация инженерной подготовки. Создание цифровых двойников жгутовых сборок с последующей автоматической генерацией управляющих программ для монтажного оборудования [14].

Курс на технологический суверенитет. В условиях внешних ограничений интенсифицировались работы по созданию конкурентоспособных отечественных образцов паяльной техники, что особенно чувствительно для оборонно-промышленного комплекса [19].

Заключение

Выполненный аналитический разбор техник и аппаратных средств финишного монтажа жил кабельных жгутов позволяет прийти к нижеследующим обобщающим выводам:

1. Процесс распайки относится к наиболее ресурсоемким и критичным в плане влияния на итоговую безотказность ступеням производства [2, 3]. Традиционный подход с ручным трудом ощутимо проигрывает роботизированным альтернативам и по выработке, и по однородности выходных параметров [4].

Иллюстрацией служит гистограмма распределения характерных дефектов (рис. 5). Она демонстрирует, что переход на лазерные автоматы дает возможность практически полностью элиминировать такие разновидности брака, как обугливание изоляции и холодные контакты, а также многократно

сократить процент непропаев и межконтактных замыканий. Интегральный показатель дефектности уменьшается с 10–11%, свойственных ручному труду, до уровня менее 1% [3, 7] (рис. 5).

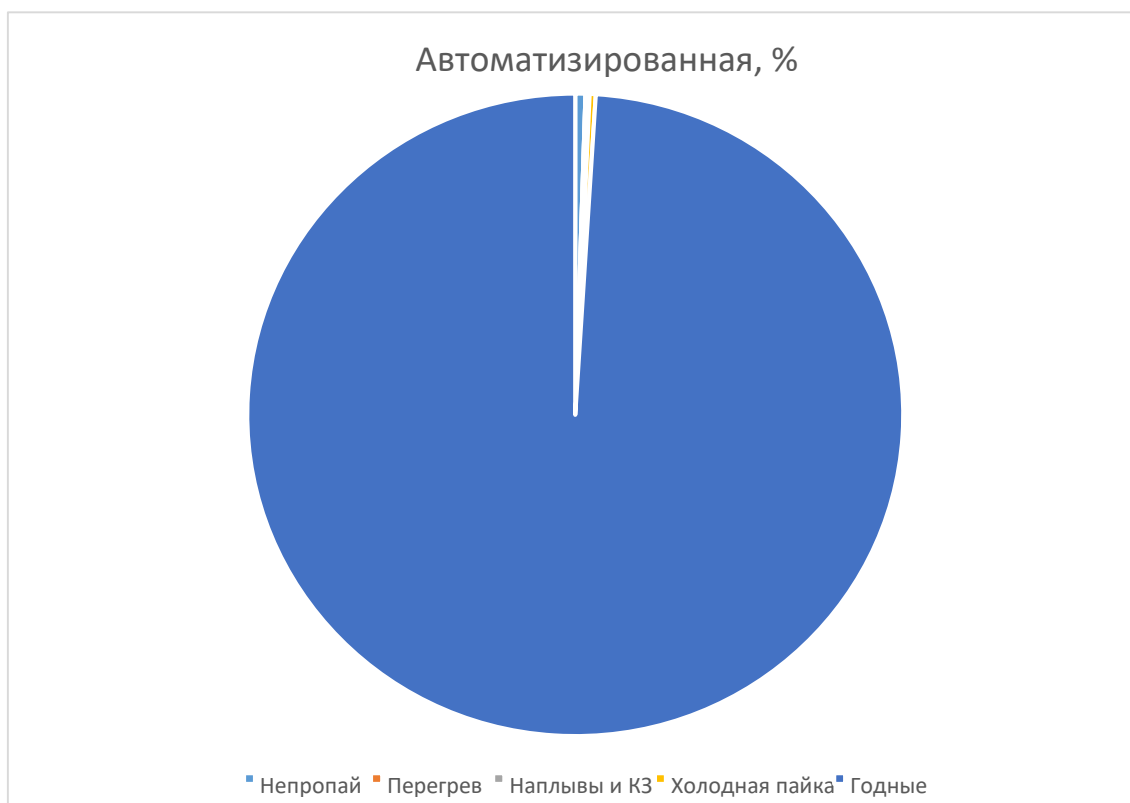
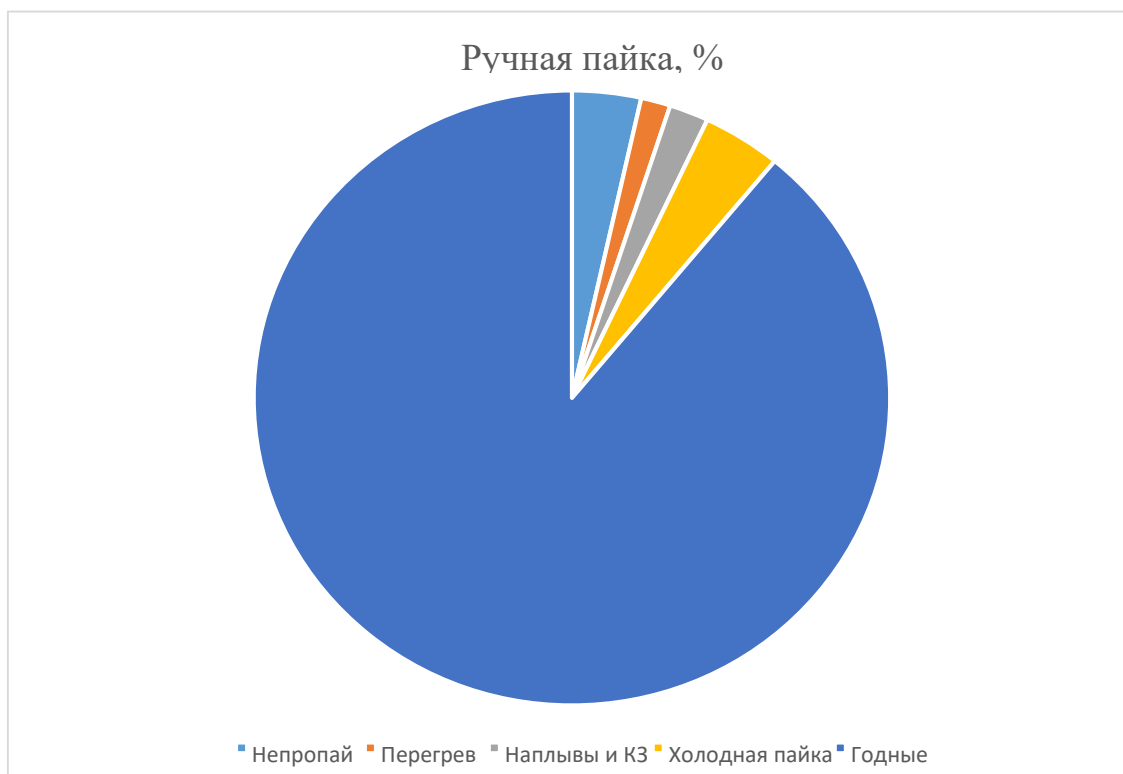


Рис. 5. – Распределение дефектов при ручной и автоматизированной пайке.

2. Технология с использованием лазерного излучения является наиболее многообещающей для роботизации распайки. Она сочетает высокое качество спаев, щадящее термическое воздействие на изоляцию и превосходную воспроизводимость [5, 7]. Сдерживающим фактором выступает высокая стоимость аппаратной реализации [6, 19].

3. Обжим остается приоритетным в сегменте массового выпуска, где не предъявляются экстремальных требований к переходному сопротивлению [8]. Селективная волна, несмотря на лидерство по скорости, обладает фундаментальными ограничениями применительно к жгутам — опасностью перегрева изоляции и затекания агрессивных флюсов [10, 17].

4. В арсенал современных средств механизации входят роботизированные паяльные ячейки, лазерные станции и интерактивные инструкторы [14, 18]. Выбор конкретного инструмента определяется масштабом производства, типажом используемых соединителей и нормативной планкой качества.

5. Спроектирована структурная схема управляющей системы, интегрирующая контуры прецизионного наведения, термостатирования и выходного контроля на базе оптических сенсоров [13, 20]. Замыкание этих колец на промышленный контроллер создает предпосылки для гибкой адаптации к смене типоразмера разъема [22].

6. Вектор дальнейшего развития отрасли задают курс на бесконтактные методы [5, 7], сквозную роботизацию [4, 14], тотальное внедрение систем технического зрения [11, 12] и комплексную цифровизацию производственных процессов [14].

Литература

1. Кечиев, Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л. Н. Кечиев. – М.: Группа ИДТ, 2007. – 616 с.

2. Медведев, А. М. Технология производства электронных средств / А. М. Медведев. – М.: Техносфера, 2011. – 696 с.
3. Шахнов, В. А. Микроэлектроника и надежность электронных средств / В. А. Шахнов, В. И. Иванов, А. И. Власов; под ред. В. А. Шахнова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 480 с.
4. Кундас, С. П. Автоматизация производства электронных устройств / С. П. Кундас, В. Л. Ланин, В. П. Достанко. – Минск: Бестпринт, 2005. – 412 с.
5. Ланин, В. Л. Лазерная пайка в электронной технологии / В. Л. Ланин. – Минск: БГУИР, 2005. – 168 с.
6. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.
7. Lanin, V. L. Laser Soldering in Electronics: Processing and Equipment / V. L. Lanin // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 9, No. 10. – P. 2105–2114.
8. Zhao, Y. Comparative Analysis of Crimped and Soldered Connections for Harsh Environment Applications / Y. Zhao, X. Liu // Journal of Electronic Materials. – 2020. – Vol. 49. – P. 6764–6773.
9. Kim, D. H. Process Optimization of Diode Laser Soldering for Fine-Pitch Connectors in Wiring Harnesses / D. H. Kim, J. H. Lee // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. – Vol. 74. – P. 312–321.
10. Hwang, J. S. Overview of Soldering and Lead-Free Soldering in Electronics / J. S. Hwang. – 2nd ed. – New York: McGraw-Hill, 2004. – 560 p.
11. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс; пер. с англ. под ред. П. А. Чочиа. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
12. Oyeleye, O. O. Machine Vision-Based Defect Detection for Wire Harness Assembly Using Deep Learning / O. O. Oyeleye, F. B. Akinwale // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 129. – P. 1483–1499.

13. Зенкевич, С. Л. Основы управления манипуляционными роботами / С. Л. Зенкевич, А. С. Ющенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 480 с.
14. Булгаков, А. Г. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление / А. Г. Булгаков, В. А. Воробьев. – М.: СОЛОН-Пресс, 2017. – 488 с.
15. ГОСТ Р 56427-2015. Соединения паяные. Методы испытаний на вибропрочность и механические воздействия. – М.: Стандартинформ, 2015.
16. ГОСТ 23752.1-92. Платы печатные. Общие технические условия (с Изменениями N 1, 2). – М.: Издательство стандартов, 1992.
17. IPC/WHMA-A-620. Requirements and Acceptance for Cable and Wire Harness Assemblies. – IPC, 2020 (Revision D).
18. Ковалев, А. В. Автоматизация проектирования и изготовления кабельных жгутов / А. В. Ковалев, Д. С. Смирнов // Автоматизация в промышленности. – 2016. – № 9. – С. 41–47.
19. Федоров, А. В. Импортзамещение оборудования для монтажа жгутов: состояние и перспективы / А. В. Федоров // Технологии в электронной промышленности. – 2023. – № 4. – С. 48–54.
20. Astrom, K. J. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning / K. J. Astrom, T. Hagglund. – 2nd ed. – Research Triangle Park: ISA, 1995. – 432 p.
21. Шелухин, О. И. Нейросетевые технологии в задачах классификации изображений технических систем / О. И. Шелухин, Д. В. Костин // Электросвязь. – 2022. – № 5. – С. 42–50.
22. Лебедев, В. И. Применение промышленных протоколов EtherCAT и Profinet в системах управления гибкими производственными модулями / В. И. Лебедев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 10. – С. 612–620.