

# Технология Press Fit – надёжные непаяные соединения: применение в высокоскоростном соединителе СКП445 (российский аналог MULTIGIG RT2)

Денис Баканин (d.bakanin@ranet.ru)

В работе выполнено комплексное исследование технологии механической запрессовки контактов (Press Fit), рассматриваемой в качестве альтернативы классическим методам пайки. Проанализированы физические механизмы образования газонепроницаемого сопряжения, способы предотвращения фреттинг-износа, специфические требования к металлизации посадочных мест печатных плат. На основании результатов сертификационных испытаний согласно стандартам IEC 60352-5 и IEC 60068-2 выполнено сопоставление эксплуатационной надёжности соединений Press Fit и паяных аналогов при воздействии экстремальных климатических и механических факторов. Отдельное внимание уделено геометрии комплаентных зон (область контакта) и свойствам гальванических покрытий. Практическая значимость работы продемонстрирована на примере внедрения технологии в высокоскоростной соединитель СКП445 – отечественную разработку, обеспечивающую передачу данных на скоростях до 10 Гбит/с.

## Введение

Развитие электронной индустрии сопровождается постоянным увеличением плотности компоновки, ростом быстродействия аппаратуры и ужесточением требований к условиям эксплуатации изделий. Классические способы формирования электрических связей, включая пайку волной или групповую пайку оплавлением, обладают рядом принципиальных ограничений. К ним относятся возникновение термических напряжений, вероятность деформации печатных плат (ПП), риск образования случайных перемычек в условиях плотного монтажа, а также подверженность соединений усталостному разрушению под воздействием вибраций [1]. В качестве ответа на указанные технологические вызовы метод механической запрессовки контактов (Press Fit) эволюционировал из узкоспециализированного решения в общепринятый стандарт для широкого спектра устройств, включая телекоммуникационное оборудование и силовую электронику [2].

Особую актуальность данная технология приобретает при работе с многослойными печатными платами объединительных панелей. Наличие

массивных слоёв питания и земли в таких платах создаёт эффект мощного теплоотвода, что существенно затрудняет качественную пайку сквозных отверстий. В подобных условиях припой зачастую не прогревается равномерно, застывая на уровне одного из слоёв, что приводит к образованию непропаев. Попытки ликвидировать дефекты посредством дополнительного перегрева панели влекут за собой разбрызгивание припоя и ставят под угрозу термоустойчивость диэлектрического материала платы [2].

Целью настоящего исследования является систематизация технических требований к контактам Press Fit с опорой на физику контактных явлений, оценка их работоспособности в экстремальных режимах и анализ возможностей использования в рамках отечественной компонентной базы на примере высокоскоростного соединителя СКП445.

## Физика контактирования и сопоставление с паяными соединениями

Фундаментом надёжности соединения типа Press Fit (рис. 1) служит формирование газонепроницаемого интерфейса (gas-tight interface).

В соответствии с фундаментальными положениями, сформулированными Р. Холмом, величина переходного сопротивления контакта находится в прямой зависимости от количества и радиуса токопроводящих мостиков [3]. Геометрия комплаентной зоны контактов Press Fit проектируется таким образом, чтобы в процессе запрессовки генерировать нормальное усилие в пределах 100...300 Н на контакт. Данное усилие инициирует пластическую деформацию микронеровностей сопрягаемых поверхностей, способствуя разрушению оксидных плёнок толщиной до 100 нм и образованию зон холодной сварки [4].

При сопряжении двух металлических поверхностей реальная электрическая связь («металл–металл») возникает лишь в нескольких точках, что характерно даже для полированных деталей. Минимальный радиус подобной области контакта, как правило, не превышает 10 мкм. Применение технологий усиленного прижима, к которым относится Press Fit, вызывает необходимую пластическую деформацию контактных точек внутри зоны соединения. Это обусловлено высоким давлением, возникающим вследствие концентрации значительной прижимной силы на микроскопической площади контакта [4].

Ключевым преимуществом технологии считается устойчивость к фреттинг-коррозии (коррозия, возникающая при колебательном перемещении двух металлических поверхностей относительно друг друга в условиях воздействия коррозионной среды). В ходе эксплуатации электронного оборудования наблюдаются механические перемещения компонентов, спровоцированные вибрационными нагрузками или температурными циклами. Экспериментальные данные компании Infineon Technologies свидетельствуют о том, что высокое нормальное усилие в соединении

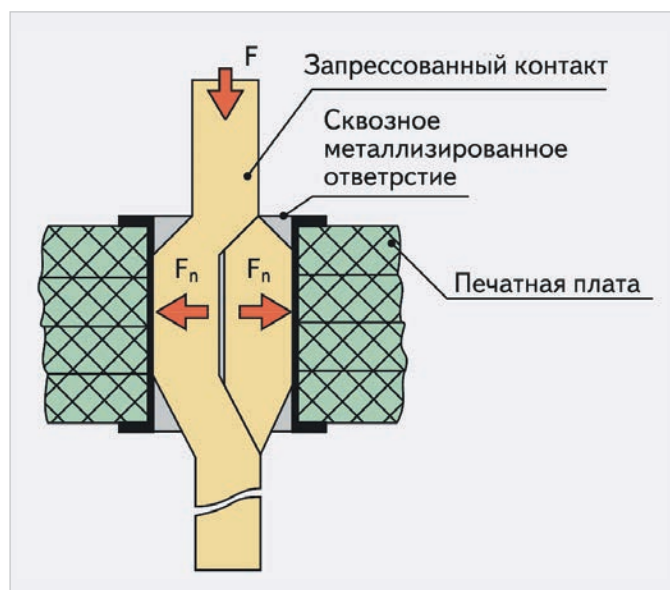


Рис. 1. Соединение Press Fit

ях Press Fit ограничивает амплитуду микроперемещений значением менее 10 мкм. При таких параметрах не фиксируется заметных вариаций контактного сопротивления. В противоположность этому, если амплитуда фрикций превышает 10 мкм (что типично для деградировавших паяных соединений при усталости материала), контактное сопротивление стремительно возрастает до нескольких Ом, что приводит к отказу системы [4].

Сопоставление надёжности обеих технологий в условиях экстремальных нагрузок верифицировано данными квалификационных испытаний по стандартам IEC 60352-5 и IEC 60068-2. В рамках тестов на тепловой удар (TST) в температурном диапазоне  $-40...+125^{\circ}\text{C}$  и вибрационных испытаний с ускорением 20g соединения Press Fit не продемонстрировали прерывания цепи или существенного изменения контактных свойств. В отличие от паяных соединений, где различие в коэффициентах теплового расширения (КТР) материалов провоцирует накопление усталости в интерметаллической фазе, механическое соединение Press Fit не содержит хрупких слоёв и демонстрирует стабильность даже после 150 циклов термоударов и многократного демонтажа модулей [4].

Дополнительные испытания на воздействие агрессивных газов с повышенным содержанием  $\text{H}_2\text{S}$  (50 ppm вместо нормативных 10 ppm) при температуре  $+40^{\circ}\text{C}$  и влажности 93% подтвердили отсутствие деградации контактов Press Fit. Онлайн-мониторинг сопротивления в ходе

испытаний не зафиксировал прерываний или заметного изменения контактных свойств, что критически важно для силовых модулей с интегрированными функциями измерения тока при низком напряжении. Напряжение устанавливается на уровне  $\sim 1,3$  мВ (1,2...1,4 мВ, в зависимости от температуры и соответствующей электрической проводимости), ток 1 А. Подобные низкие значения необходимы для исключения эффекта спекания, влияние которого может нивелировать малые изменения контактного сопротивления [4].

### Конструктивные особенности комплаентных элементов

Эффективность соединения определяется геометрией комплаентной зоны (пуклёвки). Запрессовываемая часть контакта играет ключевую роль в формировании соединения. Ее конфигурация в поперечном сечении может варьироваться, имея общепринятые англоязычные наименования (рис. 2). Основная задача данной части контакта – создание давления на боковые стенки сквозного металлизированного отверстия, устойчиво удерживающего штырь в отверстии в напряжённом состоянии [2].

*Bow-Tie* («Галстук-бабочка»). Поперечный элемент с расширенными окончаниями. Испытания продемонстрировали, что данная конструкция способна создавать локальные концентрации напряжений, приводящие к недопустимым повреждениям

металлизации отверстия, в связи с чем её применение в ответственных соединениях ограничено.

*Eye of Needle* (EON, «Игольное ушко»). Конический элемент, сужающийся к окончанию. Гарантирует равномерное распределение нормального усилия и высокую плотность монтажа. Указанный тип является стандартом для высокоскоростных соединителей, таких как СКП445, где шаг контактов минимизирован.

*C-Pin* (С-образный). U-образный изгиб, выполненный из металлической ленты. Обеспечивает значительную общую деформацию, что предпочтительно для силовой электроники (модули Econo, Easy) с высокими токовыми нагрузками, где требования к плотности монтажа менее жёсткие.

Выбор типа элемента обусловлен компромиссом между плотностью монтажа и механической надёжностью. Для высокоскоростных приложений, где критична геометрия дифференциальных пар, конструкция EON признаётся оптимальной.

Важно подчеркнуть, что упругая деформация пуклёвки компенсирует релаксацию материалов и погрешности размеров отверстий плат. Без специальной пуклёвки материал основания платы «плывёт», ослабляя первоначально тугое соединение, и штыри могут выпасть из отверстий через некоторое время. Положительный эффект был достигнут, когда удалось реализовать на контактом штыре специальную пуклёвку, создающую упругую деформацию при впрессовывании штыря в отверстие [2].

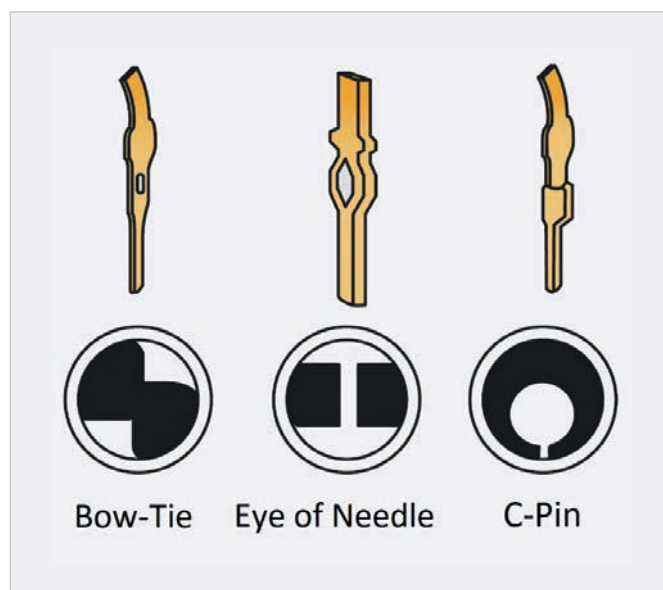


Рис. 2. Формы комплаентной зоны (пуклёвки) контакта

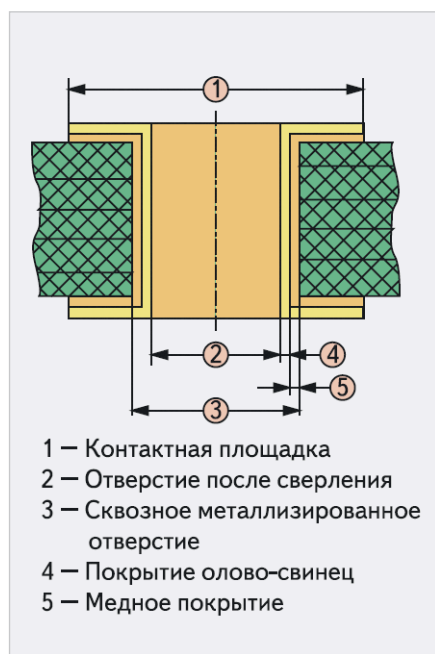


Рис. 3. Металлизированное отверстие

Жёсткость пуклёвок должна быть ограничена, в противном случае внедрение контакта может разрезать металлизацию отверстия. Степень деформации элементов сочленения определяется соотношением диаметра металлизированного отверстия и размера пуклёвки контактного штыря, а также соотношением их жёсткости [2].

### Гальванические покрытия и коррозионная стойкость

Выбор покрытия определяется балансом между технологичностью монтажа и эксплуатационной стойкостью. На любой контактной поверхности присутствуют следы коррозии, органические отложения (например, жиры), различные загрязнения и оксидные слои. Большинство проблем создаётся именно оксидными слоями, и для борьбы с ними используются покрытия из благородных металлов [4].

Толщина коррозионных слоёв на поверхности благородных металлов составляет около 2 нм. На всех «базовых» металлах могут образовываться коррозионные слои толщиной от 5 до более чем 100 нм. Существует два механизма создания хорошего контакта и поддержания его характеристик: «спекание» и разрушение загрязнений в процессе формирования контакта [4].

Наиболее распространённым покрытием является матовое олово (Matte Tin), обладающее низкой твёрдостью и хорошими антифрикционными

свойствами [6]. Однако для агрессивных сред требуются более стойкие решения.

Исследования коррозионной стойкости в условиях воздействия сероводорода ( $H_2S$ ) показали критическую важность выбора материала. При концентрации  $H_2S$  50 ppm, температуре +40°C и влажности 93% (условия теста IEC 60068-2-43 с ужесточёнными параметрами) стандартные покрытия могут деградировать. Многослойные плёнки на основе олова с легирующими добавками серебра (Sn/Ag<sub>3</sub>Sn) демонстрируют выдающуюся стойкость к сульфидной коррозии, сохраняя стабильное сопротивление даже после 120 часов воздействия [7].

Для высокоскоростных соединителей применяется система никель-золото (Ni/Au) в контактной зоне и олово или олово-свинец на хвостовиках Press Fit. Никель служит диффузионным барьером, предотвращая миграцию меди, а золото обеспечивает низкое переходное сопротивление. Хвостовики контактов покрываются оловом или оловянно-свинцовым сплавом для обеспечения оптимального коэффициента трения при запрессовке [8].

Характер покрытия по меди в отверстиях также влияет на прочность удержания контактного штыря. Оловянно-свинцовое покрытие не должно быть слишком толстым, так как в этом случае его частицы будут выдавливаться из отверстия запрессовываемым контактом и создадут опасность замыкания. Допустимые финишные покрытия отверстий включают: HASL (олово-свинец), иммерсионное олово, OSP, иммерсионное серебро, ENIG (золото по никелю) [9].

### Требования к печатным платам и монтажу

Надёжность соединения Press Fit на 50% зависит от качества посадочных мест на ПП. В отличие от пайки, где припой компенсирует неточности, здесь требуется прецизионное сопряжение. Технология запрессовки требовательна к конечному диаметру металлизированного отверстия в печатной плате (рис. 3) в большей мере, чем для процессов пайки [2].

Согласно стандарту IPC-6012 и спецификациям производителей, для высокоскоростных соединителей предъявляются следующие требования [8, 9]:

- материал платы: стеклоэпоксид (FR-4). Минимальная толщина платы – 1,60 мм;
- толщина меди в отверстии: 25...50 мкм;
- покрытие олово-свинец: 4...12 мкм;
- допуски на диаметр: отклонение более ±0,05 мм от номинала может привести либо к недостаточному усилию контакта, либо к разрушению отверстия;
- качество стенки отверстия: отсутствие заусенцев и разрывов металлизации. Заусенцы могут срезаться при монтаже и попадать в зазор, увеличивая переходное сопротивление.

Процесс монтажа осуществляется с помощью прессового оборудования, обеспечивающего перпендикулярность установки. Основными компонентами комплекта для запрессовки одиночных контактов и многоштыревых соединителей с запрессовываемыми контактами являются пуансон, передающий давление со штока пресса на соответствующие опорные поверхности контакта, и подплатная матрица, обеспечивающая дополнительную жёсткость платы, чтобы она не прогибалась под воздействием усилия запрессовки.

Важно отметить, что запрессовку рекомендуется выполнять после пайки остальных компонентов, чтобы исключить влияние нагрева на материал основания платы, который может «поплыть» при температуре выше точки стеклования, ослабляя соединение. Однако при высоком уровне заселённости платы компонентами может оказаться недостаточно пространства для размещения подплатной матрицы, что требует поиска взаимоприемлемого компромисса. При пайке после запрессовки разъёмов печатные платы нагреваются до температур, превышающих температуру стеклования связующего материала платы [2].

Модули с Press Fit-контактами можно демонтировать, а печатная плата может быть использована с новым модулем ещё два раза без потери надёжности соединения [4]. Результаты тестов подтверждают отсутствие измеримой деградации контактных характеристик после многократного использования [4]. Для проведения теста на повторное использование первый модуль был запрессован на печатную плату. После предваритель-

ного измерения сопротивления выполнялось 50 циклов TST (-40...+125°C) и повторное измерение сопротивления. Далее модуль был демонтирован и произведена установка нового компонента [4].

### Высокоскоростной соединитель СКП445

Соединитель СКП445 (рис. 4) является достойным российским аналогом высокопроизводительного соединителя MULTIGIG RT2 производства TE Connectivity [9].

Разработка данного соединителя была направлена на обеспечение импортозамещения в сегменте высокоскоростных интерфейсов отечественного оборудования. Конструкция контактов СКП445 основана на оригинальных технических решениях, защищённых патентом на полезную модель [10], что обеспечивает соответствие международным стандартам при сохранении технологического суверенитета.

Целостность сигнала (*Signal Integrity*). Основное преимущество технологии Press Fit в соединителе

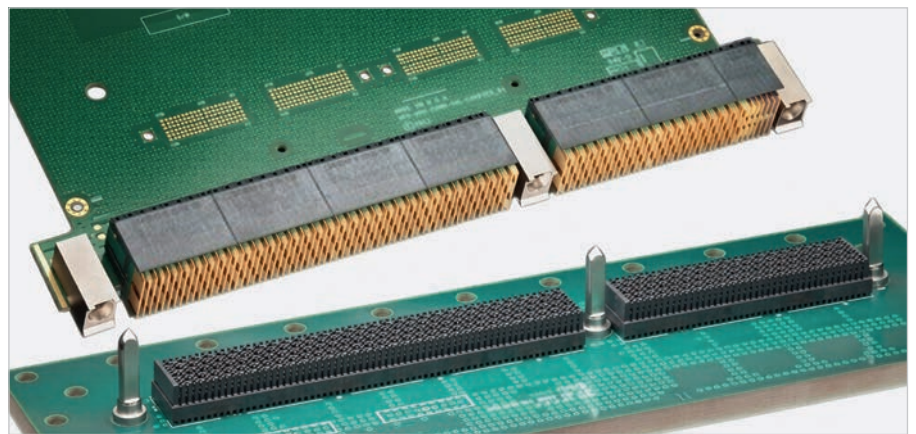


Рис. 4. Высокоскоростной соединитель СКП445

СКП445 заключается в минимизации импедансных неоднородностей. При пайке сквозных отверстий остаточная часть металлизации работает как резонатор, вызывая потери на определённых частотах. Конструкция контактов Press Fit в СКП445 позволяет оптимизировать длину перехода, снижая потери на вставке (*Insertion Loss*). Соединитель обеспечивает следующие параметры.

- Поддержка скоростей передачи данных до 10 Гбит/с.

- Возвратные потери (*Return Loss*): > 20 дБ в рабочем диапазоне частот.
  - Волновой импеданс: стабильные 100 Ом для дифференциальных пар [9].
- Надёжность и ремонтпригодность.* В условиях эксплуатации оборудования связи (вибрация, термоциклирование) механическое соединение Press Fit лишено недостатков пайки, таких как рост интерметаллидов и усталостные трещины. Кроме того, возможность выпрессовки контакта позволяет заменять повреждённый

ЭЛЕКОНД
РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КОНДЕНСАТОРОВ

<p><b>Оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы K50-...</b>                  Номинальное напряжение, <math>U_{ном}</math>, В,                  Номинальная емкость, <math>C_{ном}</math>, мкФ,                  Диапазон температур среды при эксплуатации, <math>T_{ср}</math>, °C</p>	<p>3,2 ... 485                  1,0 ... 470 000                  -60 ... 125</p>	 
<p><b>Объемно-пористые танталовые конденсаторы K52-...</b>                  Номинальное напряжение, <math>U_{ном}</math>, В,                  Номинальная емкость, <math>C_{ном}</math>, мкФ,                  Диапазон температур среды при эксплуатации, <math>T_{ср}</math>, °C</p>	<p>3,2 ... 200                  1,5 ... 60 000                  -60 ... 175</p>	 
<p><b>Оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы K53-...</b>                  Номинальное напряжение, <math>U_{ном}</math>, В,                  Номинальная емкость, <math>C_{ном}</math>, мкФ,                  Диапазон температур среды при эксплуатации, <math>T_{ср}</math>, °C</p>	<p>2,5 ... 63                  0,033 ... 2 200                  -60 ... 175</p>	 
<p><b>Суперконденсаторы K58-...</b>                  Номинальное напряжение, <math>U_{ном}</math>, В,                  Номинальная емкость, <math>C_{ном}</math>, Ф,                  Диапазон температур среды и эксплуатации, <math>T_{ср}</math>, °C</p>	<p>2,5 ... 2,7                  1,0 ... 4 700                  -60 ... 65</p>	 
<p><b>Накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ</b>                  Номинальное напряжение, <math>U_{ном}</math>, В,                  Номинальная емкость, <math>C_{ном}</math>, Ф,                  Диапазон температур среды при эксплуатации, <math>T_{ср}</math>, °C</p>	<p>5,0 ... 48                  0,08 ... 783                  -60 ... 65</p>	 

Россия, 427968, Удмуртская Республика, г. Сарапул, ул. Калинина, 3  
 Тел.: (34147) 2-99-53, 2-99-89, 2-99-77, факс: (34147) 4-32-48, 4-27-53  
 e-mail: [elecond-market@elcudm.ru](mailto:elecond-market@elcudm.ru), [www.elecond.ru](http://www.elecond.ru)



Реклама

разъём без утилизации дорогостоящей печатной платы, что экономически эффективно для сервисных служб.

Внедрение СКП445 означает упрощение технологического процесса производства (отсутствие отмывки от флюса, снижение энергозатрат на пайку) и повышение выхода годной продукции. Использование отечественной компонентной базы также снижает риски цепочки поставок (supply chain) и обеспечивает соответствие требованиям локализации.

*Применение в специальных системах.* Уникальные характеристики соединителя СКП445 определяют его широкое применение в критически важных системах специального назначения, где требования к надёжности и целостности сигнала значительно превышают стандартные промышленные нормы.

- Бортовые вычислительные комплексы (БВК). В авиационных и космических бортовых компьютерах соединение СКП445 обеспечивает высокоскоростную передачу данных между процессорными модулями и платами памяти. Стойкость к вибрационным нагрузкам (до 20g) и термоциклированию (-60...+125°C) делает технологию Press Fit предпочтительной для бортовой электроники, работающей в условиях постоянных механических и температурных воздействий. Отсутствие паяных соединений исключает риск образования усталостных трещин при многократных взлётах и посадках летательных аппаратов.
- Системы радиолокационных станций (РЛС). В РЛС нового поколения с фазированными антенными решётками (ФАР) требуется передача больших объёмов данных с минимальными задержками. СКП445 обеспечивает необходимую пропускную способность для обработки радиолокационных сигналов в реальном времени. Высокая плотность монтажа позволяет размещать большее количество каналов обработки сигнала на единицу площади, что критически важно для компактных мобильных РЛС.
- Системы радиоразведки. В комплексах радиоэлектронной разведки (РЭР) требуется обработка слабых сигналов в широком диапазоне частот. Технология Press Fit минимизирует паразитные шумы и потери сигнала на переходах «разъём-пла-

та», что повышает чувствительность приёмных трактов. Герметичность контакта защищает от воздействия агрессивных сред, включая солевой туман и повышенную влажность, что важно для морского базирования систем радиоразведки.

- Станции спутниковой связи. В оборудовании спутниковой связи, работающем в экстремальных условиях космического пространства и наземных станций, надёжность соединений является критическим параметром. СКП445 обеспечивает стабильную передачу данных на скоростях, необходимых для современных протоколов спутниковой связи. Возможность многократного демонтажа и замены модулей без повреждения печатной платы упрощает обслуживание дорогостоящего оборудования наземных станций. Во всех перечисленных применениях ключевым преимуществом СКП445 является сочетание высокой скорости передачи данных с исключительной механической надёжностью, что делает данный соединитель универсальным решением для современной электронной аппаратуры специального назначения.

## Заключение

Технология контактов Press Fit представляет собой научно обоснованное решение для высокоскоростных соединительных систем. Физика контактирования, базирующаяся на создании высокого нормального усилия и множественных мостиков проводимости, гарантирует стабильное переходное сопротивление и защиту от фреттинг-коррозии даже в экстремальных условиях.

Использование данной технологии в соединителе СКП445 позволяет достигнуть высоких показателей целостности сигнала благодаря исключению паразитных эффектов пайки. Для инженеров-разработчиков и технологов производства внедрение Press Fit требует строгого контроля качества печатных плат, но обеспечивает значительный выигрыш в надёжности, ремонтопригодности и производительности конечного изделия. Переход на отечественные соединители, такие как СКП445, сохраняет все преимущества технологии Press Fit, обеспечивая технологический суверенитет в критически важных отраслях, включая авиацию, космонавтику, радиолока-

цию и системы связи специального назначения.

Соединения, выполняемые запрессовкой, обладают высоким уровнем надёжности, способным конкурировать с паяными соединениями. При этом они лишены тех проблем, которые традиционно сопровождают процессы пайки. Данные соединения сравнительно просты в реализации, требуют минимального комплекта оборудования и отличаются экономической эффективностью, экологичностью и ремонтопригодностью.

## Список литературы

1. *Богатинов Ю.А.* Конструкция и расчёт печатных плат. М.: Горячая линия – Телеком, 2019. 352 с.
2. *Медведев А.* Соединения типа Press Fit // Компоненты и технологии. 2006. № 8. С. 12–15.
3. *Holm R.* Electric Contacts: Theory and Application. 4th ed. Springer, 2013. 658 p.
4. *Штольц Т.* Надёжность Press FIT-соединений // Силовая электроника. 2015. № 3. С. 83–88.
5. *Harper C.A., Sampson R.N.* Electronic Materials Handbook: Packaging. McGraw-Hill Education, 1995. 1136 p.
6. *Antler M.* Survey of Contact Fretting in Electrical Connectors // IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. 1985. Vol. CHMT-8, No. 1. P. 87–104.
7. IPC-6012DA. Qualification and Performance Specification for Rigid Printed Boards. IPC Association Connecting Electronics Industries, 2020. 120 p.
8. *Баканин Д.* Отечественный модульный высокоскоростной соединитель стандарта VPX (VITA 46) от АО «РАДИАНТ-ЭК» // Электронные компоненты. 2023. № 2. С. 56–59.
9. TE Connectivity. Application Specification 114-13056 Rev J. MULTIGIG RT, RT2, and RT2-R Signal Connectors. 11 JUL 16. 19 p.
10. Пат. 238215 U1 Российская Федерация, МПК H01R 12/58. Контакт под запрессовку пресс-фит / А.А. Кабанов, Д.В. Баканин, В.И. Шаломанов, Э.А. Шадронов; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «РАДИАНТ-ЭК». № 2025117845; заявл. 17.06.2025; опубл. 22.10.2025, Бюл. № 30. 8 с.: ил.
11. IEC 60068-2-43:2003. Environmental testing – Part 43: Test Kd: Hydrogen sulphide test for contacts and connections.

