

## MINIBEND CTR —

# ФАЗОСТАБИЛЬНЫЕ КАБЕЛЬНЫЕ СБОРКИ

Статья специалиста компании Huber+Suhner AG посвящена новому поколению СВЧ коаксиальных кабельных сборок, стабильных по фазе в диапазоне температур. Применение нетрадиционного для кабельной промышленности диэлектрика PFA (Фторопласт-50) позволило получить уникальные электрические характеристики кабеля. Возможности, которые они открывают, заинтересуют отечественных разработчиков современных радиоэлектронных средств.

Фторопласт-4 широко применяется в качестве диэлектрика ВЧ- и СВЧ-кабелей. Его применение позволяет достичь низкого уровня потерь и обеспечить работу в широком диапазоне температур. Однако при температуре около +18 °С в объеме фторопласта-4 происходит структурное изменение, которое приводит к существенному изменению задержки сигнала. Явление, известное как Teflon knee («колени»), показано на рис. 1. Оно состоит в резком понижении диэлектрической проницаемости и расширении материала, которые приводят к изменению электрической длины кабеля и фазы передаваемого сигнала. Описываемое явление — следствие молекулярного строения материала, и не может быть технологически устранено. Но рынок коаксиальных кабелей проявляет тенденцию к повышению требований к фазовой стабильности в диапазоне рабочих температур кабеля. Значимость применяемого материала возрастает, так как он должен отвечать более высоким требованиям.

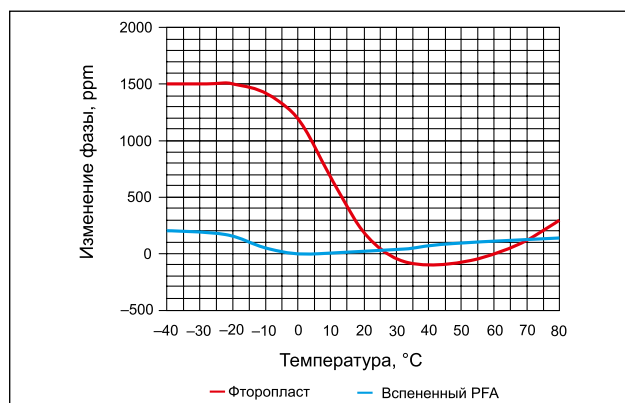
В ответ на возрастающие потребности компания Huber+Suhner, имеющая большой опыт в производстве вспененных пластиков, создала диэлектрик на основе перфторвинилэтера (PFA), обладающий высокой стабильностью фазы в диапазоне рабочих температур. Процесс вспенивания материала представляет собой непрерывное впрыскивание газообразного азота в экструдированный расплавленный диэлектрик с образованием распределенной структуры, наполненной пузырьками. Формирование слишком больших пузырьков азота может привести к неравномерности диэлектрической проницаемости вокруг центрального контакта и ухудшению характеристик, поэтому установка для вспенивания имеет возможности для контроля размера и распределения пузырьков азота в материале. После экструдирования материал затвердевает в виде вспененного PFA. Преимуществами этого материала являются низкая диэлектрическая проницаемость, низкая емкость и высокая скорость распространения сигнала, но главным преимуществом является значительно более высокая стабильность электрической длины в диапазоне рабочих температур в сравнении с фторопластом-4.

Компания Huber+Suhner использовала эту технологию как способ удовлетворить возрастающий спрос рынка и внедрила ее во всемирно известную серию кабельных сборок minibend. В семействе фазостабильных кабельных сборок minibend CTR применяются соединители bend-to-the-end, позволяющие изгибать кабель у основания соединителя без ухудшения характеристик. Абсолютное изменение фазы составляет менее 300 ppm в диапазоне температур -50...+125 °С. Сочетание технологий

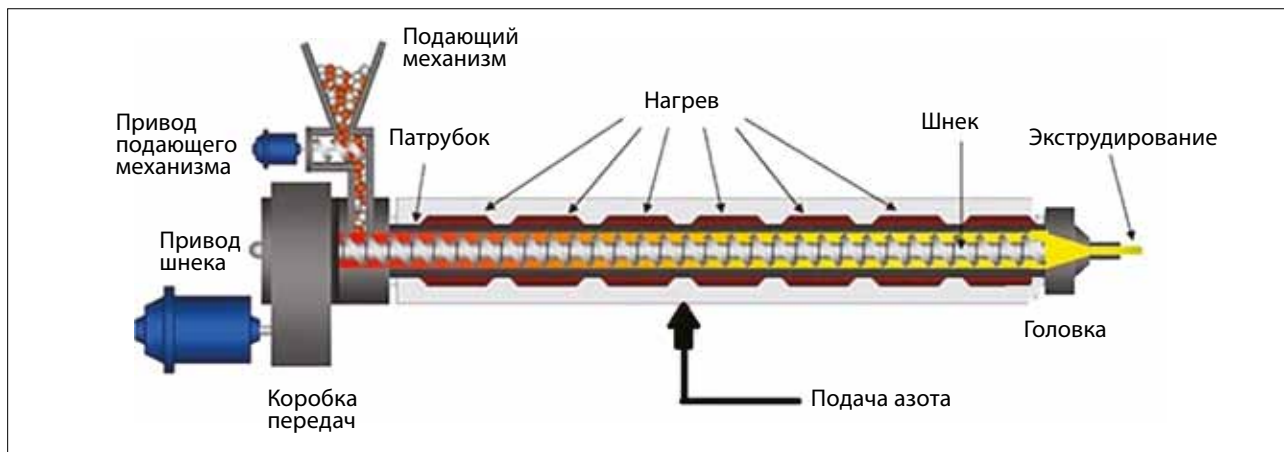
установки соединителей без пайки и кабеля на основе PFA, отвечающего требованиям MIL-DTL-17, позволяет предложить кабельные сборки minibend CTR, применимые в том числе в космической технике для задач до 40 ГГц.

### ОСОБЕННОСТИ ФТОРОПЛАСТА-4

Многие годы фторопласт-4 применялся в коаксиальных линиях и считался лучшим диэлектриком благодаря его низким потерям и превосходным электрическим и механическим свойствам. Вслед за рынком,двигающимся к более высоким рабочим частотам, развивались и технологии производства фторопласта-4 для достижения наименьшего значения диэлектрической проницаемости путем максимального заполнения материала воздухом и использования не слипающегося фторопласта-4. Фторопласт-4 низкой плотности обеспечивает еще более низкое затухание и более высокую скорость распространения. Для обеспечения более высокой фазовой стабильности используются особые способы создания диэлектрика из фторопласта-4 — намотка фторопластовой ленты. Но даже после огромного количества улучшений технологии производства фторопластового диэлектрика сохранился один ограничивающий фактор. Примерно при +18 °С во фторопласте происходит структурный переход, изменяющий диэлектрическую проницаемость материала, что приводит к существенному изменению задержки сигнала. Это нелинейное явление, носящее название «колени» (Teflon knee), является следствием молекулярного строения фторопласта и не может быть устранено техно-



▲ Рис. 1. Температурная зависимость фазы сигнала для фторопласта-4 и вспененного PFA



▲ Рис. 2. Схема установки для формирования вспененного PFA

логическими методами. Производители коаксиальных кабелей делали много попыток уменьшить влияние данного явления, в то время как разработчики фазированных антенных решеток всеми силами старались избежать проявлений фторопластового изгиба, продолжая использовать этот материал как безальтернативный. Для удовлетворения всех потребностей стала очевидной необходимость разработки альтернативного материала.

### PFA (ФТОРОПЛАСТ-50)

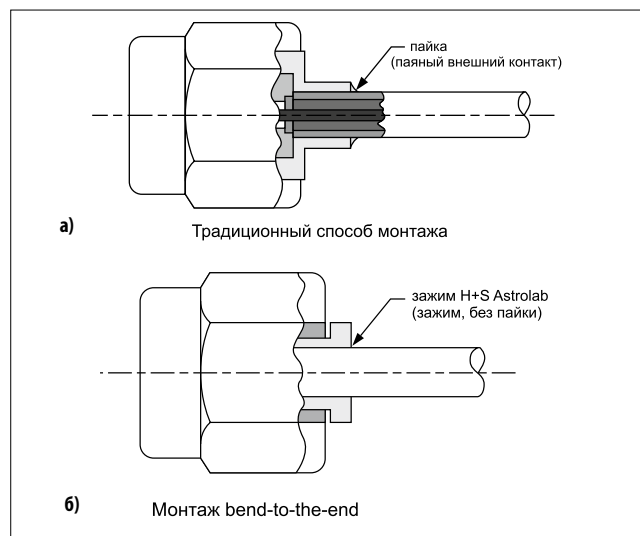
Основной причиной того, что для фторопласта было невозможно найти альтернативу, и он так долго оставался самым распространенным материалом для создания диэлектрика, являлось то, что существует не так много материалов, способных обеспечить такое низкое значение тангенса диэлектрических потерь, как фторопласт. От нового материала требовались электрические параметры не хуже фторопласта и одновременно лучшие параметры по фазовой стабильности. Материалом, удовлетворяющим этим условиям, стал PFA. Данный материал не проявляет существенных структурных изменений в широком диапазоне температур. PFA — это фторполимер, который обладает схожими с фторопластом характеристиками. Перед тем как эффективно заменить фторопласт, PFA должен был подвергнуться модификации для обеспечения тех же параметров по уровню потерь и диэлектрической проницаемости. Главным технологическим различием этих двух материалов является то, что PFA может быть экструдирован в расплавленном виде, в то время как фторопласт может быть экструдирован только под давлением. Это свойство PFA позволило компании Huber+Suhner перенести свой огромный опыт в экструзии и вспенивании пластика на производство PFA. Используя технологию точно контролируемого вспенивания расплавленного PFA газообразным азотом, удалось создать вспененный PFA. Точность управления вспениванием невозможно переоценить, так как именно это — ключ к созданию стабильного однородного материала.

Типовая экструзионная установка показана на рис. 2. Установка состоит из патрубка, в который подается подготовленный материал; с помощью вращения винта внутри патрубка создается необходимая скорость движения материала. Патрубок нагревается снаружи для расплавления материала. В процессе экструзии в патрубок под большим давлением подается газообразный азот, который вспенивает материал. Азот, впрыскиваемый под давлением, создает пустоты в форме пузырьков в структуре материала, который в таком виде выходит из патрубка и остывает на центральном проводнике кабеля, образуя слой диэлектрика. Установка должна обеспечивать высокую точность контроля количества подаваемого азота для равномерного распределения пузырьков в структуре материала, которое является условием обеспечения равномерности электрических параметров и надежной адгезии к поверхности центрального проводника.

Технология вспенивания азотом компании Huber+Suhner имеет существенные преимущества в сравнении с традиционной технологией экструзии расплавленного материала. Диэлектрическая проницаемость и погонная емкость снижаются, скорость распространения повышается, при этом механические характеристики остаются на уровне твердого PFA. Вместе с этими преимуществами, наиважнейшим результатом является фазовая стабильность в диапазоне рабочих температур. Кабель на основе вспененного PFA в качестве диэлектрика может иметь фазовую стабильность до 200 ppm в диапазоне температур  $-50...+125$  °C. В диапазоне температур  $+18...+25$  °C, который характерен для большинства применений, фазовая характеристика практически постоянна. Именно в этом диапазоне температур проявляется «колесо» фторопласта-4. Преимущества нового материала и технологии оценят, в том числе, и специалисты, проводящие измерения СВЧ-устройств, потому что калибровку оборудования можно будет проводить реже из-за меньшего влияния изменений температуры.

### MINIBEND® CTR

Серия кабельных сборок minibend от компании Huber+Suhner с запатентованными соединителями bend-to-the-end (рис. 3), позволяющими изгибать кабель у основания соединителя и устанавливающимися по специальной технологии без пайки, используется для соединения разнообразных ВЧ- и СВЧ-устройств уже более 20 лет. Традиционный метод установки соединителей при помощи пайки подразумевает обязательное использование соединителей с защитой от перелома пропитанного припоем внешнего проводника у основания соединителя, что увеличивает минималь-



▲ Рис. 3. Способы монтажа соединителей

ное расстояние до начала изгиба кабеля. В серии кабельных сборок minibend используются специальные зажимные соединители, позволяющие изгибать кабель в пределах  $\pm 90^\circ$  у основания соединителя с минимальными радиусами изгиба и без влияния на электрические характеристики кабеля при первых 30 изгибах. В кабельных сборках серии minibend уменьшены как габариты, так и масса кабеля и соединителей. Технологии, применяющиеся при изготовлении этих кабельных сборок, позволяют не только избежать попадания припоя в оплетку, но и исключают возможные проблемы, типичные для пайки соединителей. Конструкция без пайки оценена как более надежная статистическим реестром надежности изделий MIL-HDBK-217.

Выражение, которое позволяет спрогнозировать среднее время между сбойми системы (в т. ч. в условиях космического полета):

$$\lambda_e = \sum_{i=1}^n N_i (\lambda_g \pi_Q)_i,$$

где:  $\lambda_e$  — число отказов на миллион часов;  $N_i$  — количество отдельных изделий;  $n$  — отдельные категории изделий;  $\lambda_g$  — базовое значение отказов для каждого изделия;  $\pi_Q$  — значение качества для каждого изделия. Для паяных соединений расчетное значение составляет  $0,0028$  сбоев/ $10^6$  ч, что в четыре раза больше, чем для соединений без пайки. Среднее время между сбойми в тех же условиях для соединений без пайки составляет  $0,0007$  сбоев/ $10^6$  ч. Так как экран кабельных сборок minibend не паяется, в кабельных сборках minibend используется плетеный экран из нержавеющей стали для обеспечения повышенной механической прочности, исключения перекручивания и увеличения числа изгибов без ухудшения характеристик до 1000. Угловые соединители, обычно имеющие худшие характеристики в сравнении с прямыми, могут быть полностью заменены прямыми соединителями с технологией bent-to-the-end без увеличения габаритов соединения с одновременным снижением массы. Семейство кабельных сборок minibend позволяет снизить стоимость и габариты соединения без снижения электрических характеристик и надежности.

Фазостабильные кабельные сборки minibend CTR сочетают в себе преимущества вспененного PFA и всемирно известной технологии minibend и позволяют достичь лучшей фазовой стабильности в диапазоне рабочих температур. Обобщенные характеристики minibend CTR приведены в таблице 1. Вспененный PFA также обеспечивает превосходную фазовую стабильность при изгибе, эквивалентную фазовой стабильности экструдированного фторопласта-4.

### ПРОЕКТЫ И СЕРТИФИКАЦИЯ

Серия minibend широко применяется в аэрокосмической отрасли на протяжении более чем двадцати лет. Вместе с интеграцией в ассортимент minibend, кабельные сборки minibend CTR прошли сертификацию на соответствие MIL-DTL-17. Способ монтажа соединителей без пайки прошел сертификацию ESA и NASA и соответствует стандартам MIL. Сочетая в себе две сертифицированные технологии, кабельные сборки minibend

Таблица 1. Характеристики minibend® CTR

Электрические характеристики	
Номинальное сопротивление, Ом	50
Диапазон рабочих частот, ГГц	DC: 40
Обратные потери, дБ	-32 при 18 ГГц; -25 при 40 ГГц
Потери, дБ	3,67 при 18 ГГц; 5,83 при 40 ГГц
Экранирование, дБ	100
Фазовая стабильность в диапазоне температур, ppm	<300
Механические характеристики	
Диаметр кабеля внешний, мм	2,49
Минимальный радиус изгиба, мм	5,08
Масса (кабеля), г/м	15,6
Требования по газовыделению	
Девазация согласно ECSS-Q-ST-70-02 и NASA Reference Publication 1124	TML <1% CVCM <0,1%

Таблица 2. Перечень испытаний кабельных сборок (типовой)

Испытания кабелей	MIL-DTL-17
Испытания соединителей	MIL-PRF-39012 MIL-PRF-31031
Испытания кабельных сборок	MIL-PRF-55427
Испытания на соответствие условиям эксплуатации в аэрокосмической отрасли	MIL-STD-1547 MIL-STD-790 NASA EEE-INST-002 LEVEL 1 ESA 3902 ESA 3402
Испытания на ударное воздействие	MIL-STD-202, method 213, 12,000 g peak MIL-STD-883, method 2002, 1500 g peak

CTR соответствуют условиям эксплуатации в аэрокосмической отрасли и не требуют проведения дополнительных испытаний. В таблице 2 приведен список типовых испытаний для продукции Huber+Suhner космического применения.

Кабельные сборки с высокой стабильностью фазы в диапазоне температур minibend CTR уже успешно применяются в высокотехнологичных радарх систем спутниковой разведки ведущим производителем отрасли для соединения модулей высокочувствительных фазированных антенных решеток.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кабельные сборки minibend CTR расширяют возможности реализации миниатюрных фазостабильных кабельных соединений в диапазоне рабочих температур. Сочетание новой передовой технологии формирования диэлектрика кабеля и отлично зарекомендовавших технологий серии minibend открывает перспективы существенного развития качественных характеристик современных бортовых радиоэлектронных систем. Кабельные сборки minibend CTR прошли испытания и соответствуют требованиям, предъявляемым к аппаратуре космического применения.