

# Оригинальные конструктивные решения фазостабильных кабелей СВЧ-диапазона

Алексей ПРОКИМОВ  
prok@spcable.ru  
Кива ДЖУРИНСКИЙ  
kbd.istok@mail.ru  
Александр ФОМЧЕНКО  
alexander.fomchenko@molex.com

В работах [1, 2] были рассмотрены основные параметры современных радиочастотных кабелей и кабельных сборок, в которых сердечник кабеля изолирован сплошным или пористым политетрафторэтиленом (ПТФЭ). Показано, что основным препятствием для создания фазостабильных кабельных сборок является так называемое «тефлоновое колено» на температурно-фазовой характеристике кабелей. Данная статья посвящена рассмотрению оригинальных конструктивных решений кабелей с высокой температурно-фазовой стабильностью.

Зарубежные компании не прекращают работы по совершенствованию в едином комплексе конструкции и технологии изготовления фазостабильных радиочастотных кабелей. Для этого используют новые материалы и конструкции кабелей с одновременной оптимизацией технологии их изготовления.

Основными направлениями работ по созданию фазостабильных радиочастотных кабелей являются:

- разработка конструкции сердечника кабеля на основе новых, нетрадиционных изоляционных материалов с минимальными структурными изменениями при температурных переходах. Идеальным диэлектриком является воздух с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 1$ , однако требуется соосное крепление внутреннего проводника кабеля. Очевидным решением становится полувоздушная конструкция изоляции сердечника с минимальными эквивалентными значениями  $\epsilon$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\tan \delta$ ;
- разработка конструкции и применение новых материалов проводников (прежде всего внутреннего проводника) с минимальным изменением линейных размеров при изменении температуры.

## Радиочастотные кабели Temp-Flex

Для обеспечения жестких требований к фазовой стабильности кабелей для аэрокосмической техники, а также для прецизионного измерительного и медицинского оборудования компания Molex, США ([www.molex.com](http://www.molex.com)), разработала серию гибких радиочастотных кабелей Temp-Flex и с 2013 года начала их про-

изводство. Некоторые данные о кабельных сборках шести типов компании Molex приведены в работе [3], однако в ней не раскрыто одно из главных преимуществ кабелей семейства Temp-Flex — отсутствие в температурно-фазовых характеристиках нежелательного эффекта «тефлоновое колено».

Во всех кабелях Temp-Flex в качестве материала изоляторов сердечника использованы высокотемпературные диэлектрики высокой чистоты ФЭП (FEP — Fluorinated Ethylene Propylene, фторированный этилен-пропилен, отечественный аналог Ф-4 МБ) и ПФА (PFA — PerFluoroAlkoху, отечественный ана-

лог Ф-50 [4, 5]), у которых на температурно-фазовых характеристиках отсутствует «тефлоновое колено».

Конструкция серийно выпускаемых кабелей семейства Temp-Flex Low Loss Microwave Coax показана на рис. 1, а их основные параметры приведены в таблице 1.

Кабели Temp-Flex Low Loss Microwave Coax всех марок имеют волновое сопротивление  $(50 \pm 1)$  Ом, скорость распространения сигнала  $V_p = 70\%$ , время задержки сигнала  $t_{зад} = 4,76$  нс/м, электрическую емкость  $C = 95$  пФ/м и диапазон рабочих температур  $\Delta T_{раб} = -65...+150$  °С.

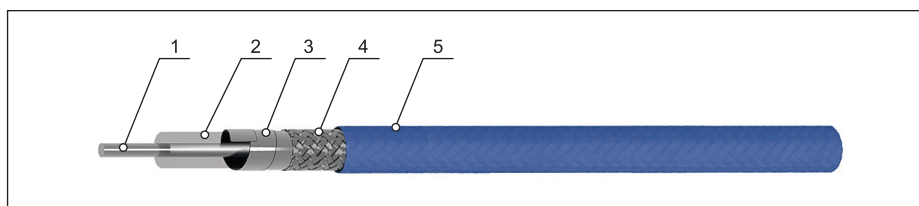


Рис. 1. Конструкция кабелей Temp-Flex Low Loss Microwave Coax:

1 — внутренний проводник, SPC; 2 — сплошной изолятор из особо чистого FEP; 3 — внутренний ленточный экран, SPC; 4 — внешний экран в виде оплетки из проволоки, SPC; 5 — оболочка из ФЭП

Таблица 1. Параметры кабелей семейства Temp-Flex Low Loss Microwave Coax

№ п/п	Марка кабеля	Диаметр, мм; материал			$f_{пред}$ , ГГц	$\alpha$ , дБ/м на $f = 18$ ГГц	$\alpha$ , дБ/м на $f = 40$ ГГц	$\Delta\psi$ , ° при изгибе ( $f$ , ГГц)	$\Delta\psi$ , ppm ( $\Delta T$ , °С)
		Внутренний проводник	Изолятор; ФЭП	Оболочка; ФЭП					
1	141SC-1901	0,91; SPC	2,97	3,99	35	2,13	—	Рис. 2а	Рис. 2г
2	086SC-2401	0,51; SPC	1,65	2,57	62	3,31	5,38	Рис. 2б	Рис. 2д
3	063SC-2701	0,36; SPC	1,17	1,9	—	—	—	—	—
4	047SC-2901	0,29; SPC	0,92	1,42	112	5,51	8,56	Рис. 2в	Рис. 2е

Примечание. SPC — Silver Plated Copper, медь, покрытая серебром;  $f_{пред}$  — теоретическая предельная частота кабеля;  $\alpha$  — коэффициент затухания;  $\Delta\psi$  — изменение фазы.

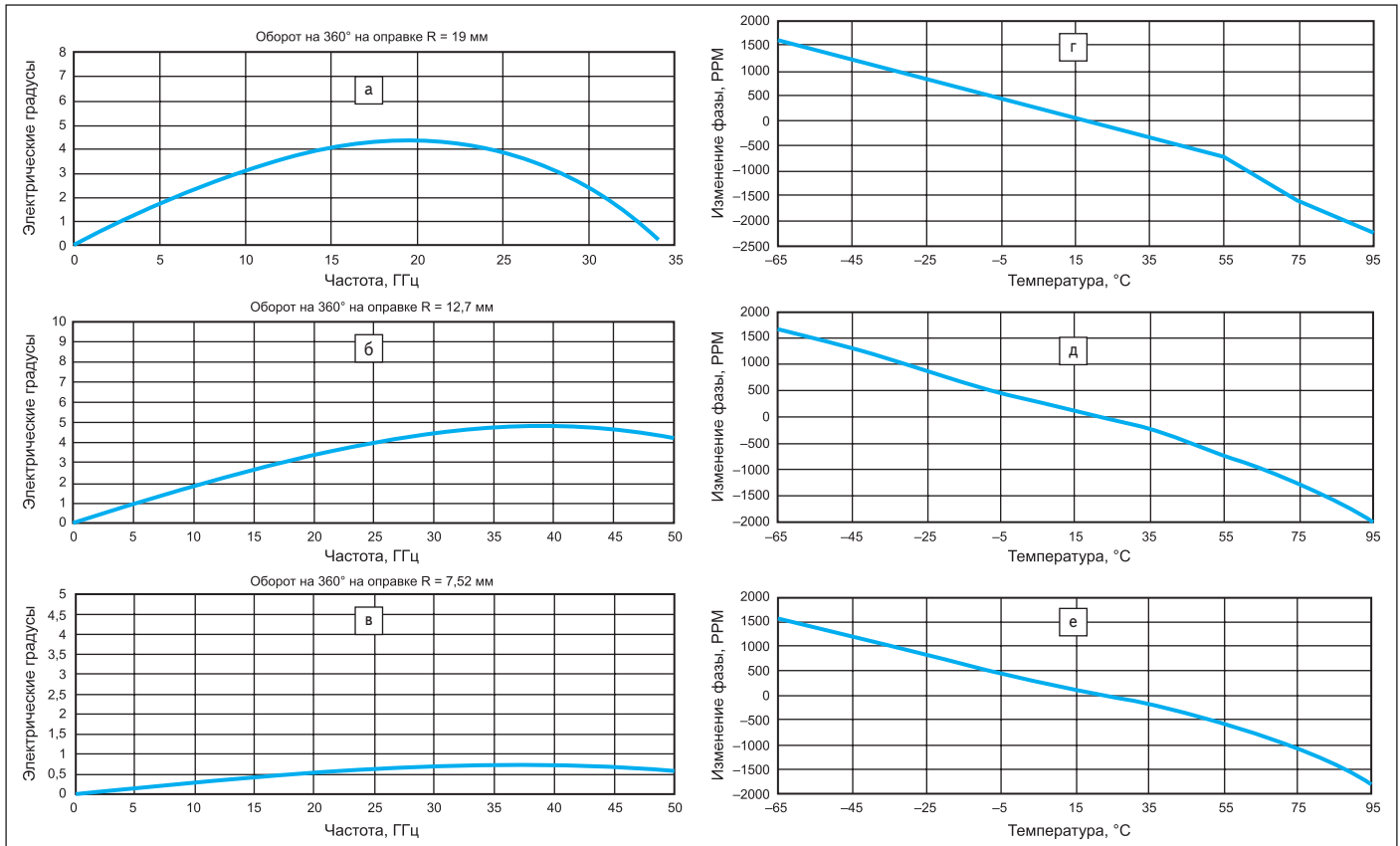


Рис. 2. Зависимости изменения фазы при изгибе (а, б, в) и от температуры (г, д, е) для кабелей: а, г) 141SC-1901; б, д) 086SC-2401; в, е) 047SC-2901

Кроме того, разработаны миниатюрные кабели Temp-Flex Low Loss Microwave Coax марок 034SC-3201, 032SC-3301 и 020SC-3701. Центральные проводники кабелей 034SC-3201 и 020SC-3701 с диаметром 0,2 и 0,11 мм изготовлены из стали, плакированной медью, покрытой серебром (SPC<sub>Cs</sub> — Silver Plated Copper clad Steel); центральный проводник кабеля 032SC-3301 с диаметром 0,18 мм — из SPC. Изолятор кабелей и оболочка выполнены из материала ФЭП. Диаметры изолятора соответственно равны 0,66; 0,58 и 0,37 мм, оболочки — 1,1; 1 и 0,71 мм. Кабели 034SC-3201 и 020SC-3701 имеют волновое сопротивление  $(50 \pm 2)$  Ом, 032SC-3301 —  $(50 \pm 1)$  Ом.

На рис. 2 приведены зависимости изменения фазы при изгибе и от температуры для кабелей 141SC-1901, 086SC-2401 и 047SC-2901.

Особенность кабеля 047SC-2901 состоит в рекордно низком изменении фазы при изгибе (рис. 2в). Более тонкие кабели, по-видимому, имеют аналогичные характеристики изменения фазы при изгибе.

Сравнительные характеристики кабеля 141SC-1901 и аналогичного по конструкции кабеля MULTIFLEX\_141 компании Huber + Suhner (Швейцария) приведены в таблице 2.

При прочих равных характеристиках основным преимуществом кабеля 141SC-1901 является практически линейная температурно-фазовая характеристика (рис. 2г). У кабеля MULTIFLEX\_141 фаза в рабочем диапазоне температур изменяется более

Таблица 2. Характеристики кабелей 141SC-1901 и MULTIFLEX\_141

Марка кабеля, компания	Диаметр, мм; материал			$t_{\text{зад}}$ , нс/м	$V_p$ , %	$C$ , пФ/м	$f_{\text{прогр}}$ , ГГц	$\alpha$ , дБ/м на $f = 18$ ГГц	$\alpha$ , дБ/м на $f = 33$ ГГц	$\Delta T_{\text{раб}}$ , °C	$\Delta \Psi$ , ppm ( $\Delta T$ , °C)
	Внутренний проводник	Изолятор	Оболочка; ФЭП								
141SC-1901, MOLEX	0,91; SPC	2,97; ФЭП	3,99	4,76	70	95	35	2,13	3,14	-65...+150	3750 (-60...+95)
MULTIFLEX_141, HUBER+SÜHNER	0,92; SPC	2,93; ПТФЭ	4,14	4,7	70,6	95	33	2,09	3,06	-65...+165	4200 (-60...+95)

Таблица 3. Параметры кабелей Temp-Flex с изолятором из сплошного ПФА

№ п/п	Марка кабеля	Диаметр, мм; материал			$t_{\text{зад}}$ , нс/м	$V_p$ , %	$C$ , пФ/м	$\Delta T_{\text{раб}}$ , °C
		Внутренний проводник	Изолятор; ПФА	Оболочка; ФЭП				
1	100067-1086	0,51, SPC	1,65	2,57	4,76	70	95	-65...+150
2	100067-1047	0,29, SPC	0,92	1,42				

нелинейно, в основном из-за «тефлонового колена» изолятора сердечника из ПТФЭ [6]. Незначительные отличия величины коэффициента затухания  $\alpha$  обусловлены, по-видимому, различием величин  $\text{tg } \delta$  сплошных диэлектриков сердечника.

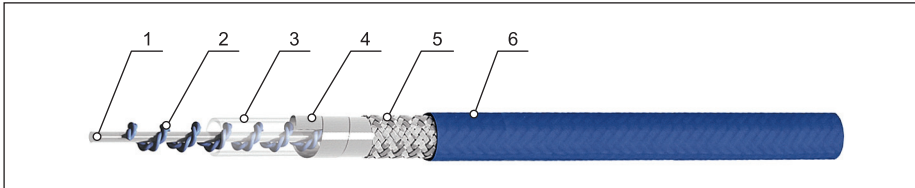
Для снижения  $\alpha$  компания Molex приступила к работам по созданию серии кабелей с изолятором (поз. 2 на рис. 1) из пористого ФЭП. По скорости передачи данных и другим технологическим параметрам данная серия будет обладать промежуточными характеристиками между сериями Temp-Flex Low Loss и Temp-Flex Ultra Low Loss.

Компанией Molex проведены работы по замене сплошного изолятора сердечника из ФЭП

на ПФА. Параметры кабелей с изолятором из сплошного ПФА приведены в таблице 3.

Хотя приведенные в таблице 3 параметры этих кабелей не отличаются от параметров аналогичных кабелей 086SC-2401 и 047SC-2901 (табл. 1), преимущества кабелей с изолятором ПФА очевидны: более высокая допустимая температура нагрева сердечника (250 °C) и электрическая прочность 35–40 кВ/мм [4, 5].

Оригинальным техническим решением компании Molex является создание серии кабелей Temp-Flex Ultra Low Loss Microwave Coax, конструкция которых показана на рис. 3 (патент US 6.812.401 B2, 2004 г., “Ultra-small high speed coaxial cable with dual filament insulator”).



**Рис. 3.** Конструкция кабелей Temp-Flex Ultra Low Loss Microwave Coax:  
 1 — внутренний проводник, SPC; 2 — две скрученные между собой нити из PFA; 3 — трубка из FEP;  
 4 — внутренний экран из ленты SPC; 5 — внешний экран в виде оплетки из проволок SPC; 6 — оболочка из ФЭП

**Таблица 4.** Параметры кабелей серии Temp-Flex Ultra Low Loss Microwave Coax

№ п/п	Марка кабеля	Диаметр, мм; материал			$t_{\text{внут}} \text{ К/м}$	$V_{\text{пр}} \%$	$C, \text{ пФ/м}$	$f_{\text{прод}} \text{ ГГц}$	$\alpha_1, \text{ дБ/м}_z$ на $f = 18 \text{ ГГц}$	$\alpha_2, \text{ дБ/м}_z$ на $f = 40 \text{ ГГц}$	$\Delta T_{\text{раб}} \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta V_{\text{ф}}^*$ при изгибе ( $f, \text{ ГГц}$ )	$\Delta V_{\text{ф}} \text{ ppm}$ ( $\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$ )
		Внутренний проводник	Сердечник: ПФА+ФЭП	Оболочка: ФЭП									
1	141-1701	1,15	2,97	4,01	3,82	87	76,4	41	1,41	2,46	-65...+150	Рис. 4а	Рис. 4д
2	086-2201	0,64	1,66	2,57	3,85	86	77,5	72	2,68	4,25		Рис. 4б	Рис. 4е
3	063-2501	0,46	1,16	1,9	3,82	87	75,5	105	3,35	5,12		Рис. 4в	Рис. 4ж
4	047-2801	0,32	0,82	1,42	3,92	87	76,4	143	4,69	7,22		Рис. 4г	Рис. 4з

На внутренний проводник из посеребренной меди (SPC) навиты по спирали две скрученные между собой нити из высокочистого

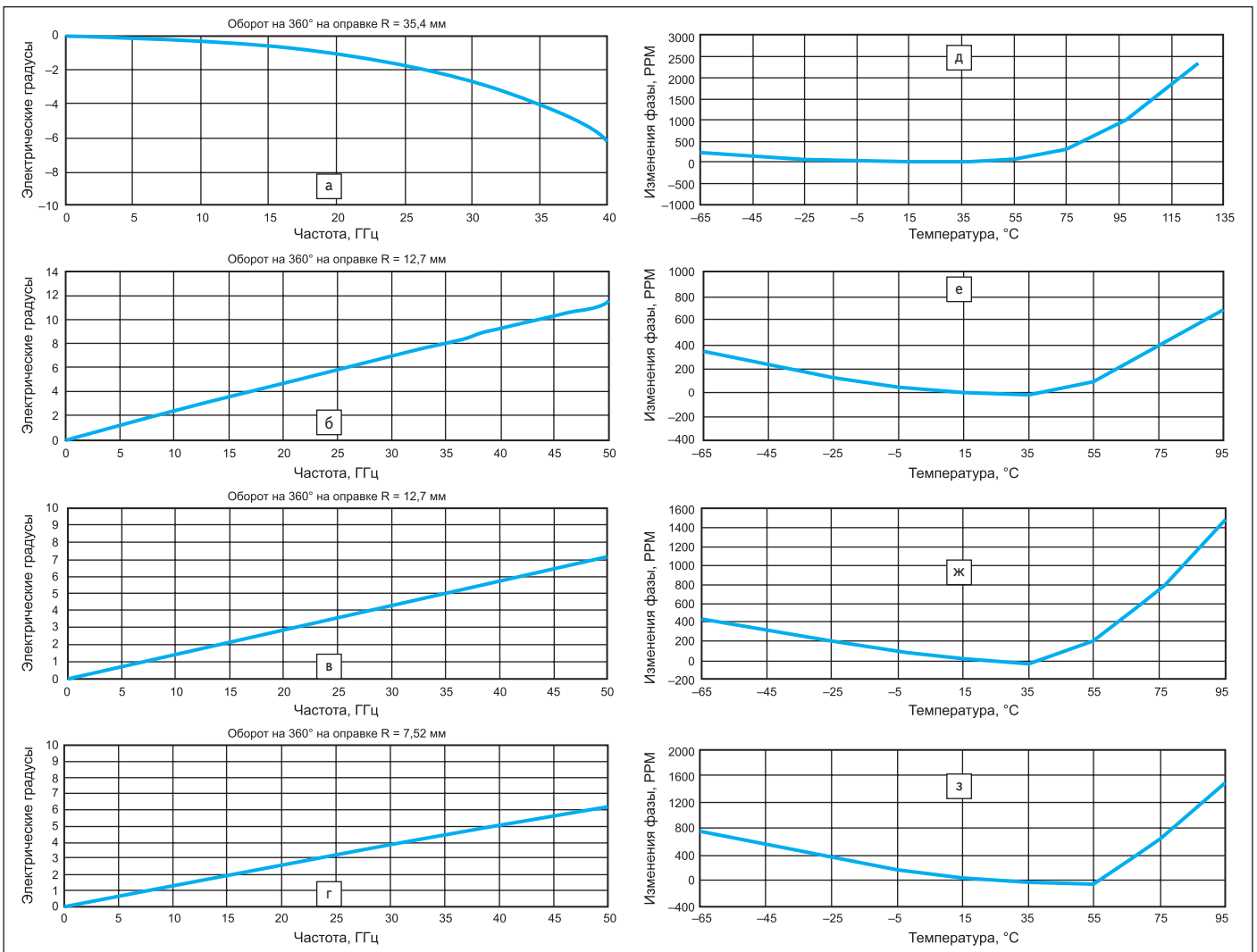
ПФА. Изменяя шаг навивки спирали из скрученных нитей ПФА, можно регулировать диэлектрическую проницаемость изоляции

сердечника и, следовательно, передаточные параметры кабеля.

На спираль наложена прозрачная трубка из высокочистого ФЭП. В патенте US 7.795.536 B2, 2010 г., “Ultra high-speed coaxial cable” в качестве материала для изготовления трубки рекомендован диэлектрик ФЭП высокой чистоты Daikin Neoflon FEP NP-1101 с тангенсом угла диэлектрических потерь менее  $5 \times 10^{-4}$  на частоте 2,45 ГГц. По сравнению с ФЭП обычной чистоты это обеспечивает существенное снижение потерь в кабелях. На трубку навит по спирали внутренний экран из посеребренной медной ленты, поверх которого наложена оплетка плотностью более 90% из посеребренной медной проволоки диаметром до 0,08 мм. Кабель защищен оболочкой из ФЭП обычной чистоты.

Параметры кабелей серии Temp-Flex Ultra Low Loss Microwave Coax приведены в таблице 4, а зависимости изменения фазы при изгибе и от температуры показаны на рис. 4.

Наряду с кабелями с однопроводными внутренними проводниками компания Molex сообщает о выпуске кабеля 50HCX24



**Рис. 4.** Зависимости изменения фазы при изгибе (а, б, в, г) и от температуры (д, е, ж, з) кабелей серии Temp-Flex Ultra Low Loss Microwave Coax:  
 а, д) 141-1701; б, е) 086-2201; в, ж) 063-2501; г, з) 047-2801

Таблица 5. Параметры кабелей Temp-Flex с изоляцией из ПФА

№ п/п	Марка кабеля	Диаметр, мм; материал			$t_{\text{зап}}, \text{нс/м}$	$V_p, \%$	$C, \text{пФ/м}$	$\alpha_1, \text{дБ/м на } f = 18 \text{ ГГц}$	$\alpha_2, \text{дБ/м на } f = 40 \text{ ГГц}$
		Внутренний проводник; SPC	Изолятор; ПФА	Оболочка; ФЭП					
1	100054-0008	1,15	2,97	4	3,82	87	76,4	1,48	2,43
2	100054-0007	0,32	0,82	1,42	3,82		75,5	4,69	7,22

Таблица 6. Параметры кабелей 141-1701 и UFB142A

Марка кабеля, компания	Диаметр, мм, материал			$t_{\text{зап}}, \text{нс/м}$	$V_p, \%$	$C, \text{пФ/м}$	$f_{\text{резон}}, \text{ГГц}$	$\alpha_1, \text{дБ/м на } f = 18 \text{ ГГц}$	$\alpha_2, \text{дБ/м на } f = 40 \text{ ГГц}$	$\Delta T_{\text{раб}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Delta \Psi, \text{ppm } (\Delta T, \text{ } ^\circ\text{C})$
	Внутренний проводник	Сердечник	Оболочка, ФЭП								
141-1701, Molex	1,15, SPC	2,97, ПФА+ФЭП	4,01	3,822	87	76,4	41	1,41	2,46	-65...+150	800 (-60...+95)
UFB142A, Micro-Coax	1,023, SPC	2,74, пористый ПТФЭ	3,607	4,08	83	80,4	40	1,74	2,64	-65...+100	1000 (-60...+95)

Ultra Low Loss с многопроволочным внутренним проводником.

Применение ФЭП вместо ПТФЭ в сочетании с запатентованной конструкцией кордельно-трубчатой изоляции с высоким содержанием воздуха позволило практически устранить эффект «тефлонового колена». Однако на температурно-фазовых характеристиках кабелей наблюдается излом при температурах +35...+55 °С, который обусловлен, вероятно, особенностями кордельной конструкции сердечника.

Продолжая совершенствовать фазостабильные кабели, компания Molex разработала кабели, аналогичные по конструкции кабелям серии Ultra Low Loss, в которых оба элемента изолятора — кордельная спираль и удерживающая ее трубка — выполнены из ПФА. Параметры этих кабелей приведены в таблице 5.

Сравнительные характеристики кабеля 141-1701 и аналогичного кабеля UFB142A компании Micro-Coax (США) с изолятором из пористого ПТФЭ приведены в таблице 6.

Данные таблицы 6 показывают, что кабель 141-1701 типа Ultra Low Loss имеет меньший коэффициент затухания и более монотонную температурно-фазовую характеристику.

Компанией Molex разработаны и субминиатюрные кабели повышенной гибкости за счет использования многопроволочного внутреннего проводника. Внутренний проводник состоит из семи скрученных медных проволок, покрытых серебром, изолятор и оболочка изготовлены из ФЭП, проволочная оплетка — из медных проволок, покрытых серебром. Параметры этих кабелей приведены в таблице 7.

Следует отметить перспективность использования субминиатюрных кабелей компании Molex для межблочных соединений в современной аппаратуре СВЧ с высокой плотностью компоновки, в том числе для соединений с подвижными блоками аппаратуры — антеннами приемопередающих устройств и датчиками медицинской аппаратуры.

Заслуживает внимания сообщение компании Molex о том, что все кабели серии Temp-Flex и кабельные сборки с их использованием

могут быть выполнены из немагнитных материалов, что важно, например, для уменьшения интермодуляционных искажений.

### Радиочастотные кабели с изоляцией из двуокиси кремния

Поиски материала изоляции для радиочастотных кабелей специального применения привели к неорганическому диэлектрику SiO<sub>2</sub> (диоксиду кремния) повышенной чистоты. В 1957 году в США было разработано и запатентовано уникальное решение коаксиального кабеля с изолятором из SiO<sub>2</sub>. В 1999 году компания Meggit Safety System США [7] стала первым производителем серийных коаксиальных SiO<sub>2</sub>-кабелей и кабельныхборок для большинства критических применений.

Кроме этого, в настоящее время такие кабели и сборки выпускают компании США: Times Microwave Systems [8] и Measure Tech [9], а также французская фирма ThermoCoax [10].

Кабели с изолятором из сверхчистого SiO<sub>2</sub> отличаются крайне высокими значениями рабочей температуры (от -270 до +1000 °С) и радиационной стойкости (более 200 Мрад), а также имеют близкую к линейной температурно-фазовую характеристику. Высокая надежность, электрическая стабильность и жесткость конструкции SiO<sub>2</sub>-кабелей компании Meggit Safety Systems обеспечивают среднюю наработку на отказ 1 млн ч. Этот полужесткий кабель на 30% легче, чем эквивалентный кабель с изолятором ПТФЭ. Радиус его изгиба в 1,5 раза меньше, чем у гибких кабелей того же диаметра.

SiO<sub>2</sub> коаксиальные кабели применяют в прецизионных линиях задержки, в фазированных антенных решетках, в технике высоких энергий и ядерной энергетике, в криогенных установках, в измерительном оборудовании, а также в космических и военных системах. Конструкция кабеля с диэлектриком SiO<sub>2</sub> показана на рис. 5 [7].

Для изготовления внутреннего проводника кабеля применена бескислородная медь, наружного проводника (оболочки) — трубка из нержавеющей стали, плакированная вну-

Таблица 7. Параметры кабелей Temp-Flex повышенной гибкости

№ п/п	Марка кабеля	Диаметр, мм				Волновое сопротивление, Ом	$C, \text{пФ/м}$	$V_p, \%$
		Внутренний проводник	Сердечник	Оплетка из проволоки; плотность	Оболочка			
1	50CX-42	0,405	1,35	0,102; >95%	2,54	50 ± 2	98,4	
2	50CX-41	0,255	0,84	0,079; >95%	1,8		98,4	
3	50CX-11	0,202	0,67	0,051; >90%	1,12		95,12	

три медью, диэлектриком является сверхчистый диоксид кремния SiO<sub>2</sub> (99,985%). Мелкодисперсный диоксид кремния смешивают с контролируемым количеством деионизованной воды для образования экструзионной пастообразной смеси, которую наносят на внутренний проводник методом плунжерного прессования. После сушки воздухом полученный сердечник вставляют внутрь стале-медной оболочки и нагревают в вакуумной печи для удаления остаточных загрязнений. Затем полученный сердечник уплотняют обжатием наружной оболочки до такого диаметра, который обеспечивает импеданс 50 Ом и требуемую электрическую прочность. Непосредственно после изготовления кабеля необходимой длины на него с помощью лазерной сварки устанавливают герметичные соединители, получая в результате герметичную кабельную сборку. Для идентификации сборки на оболочку из нержавеющей стали наносят маркировку методом травления.

Эффективная диэлектрическая проницаемость образовавшегося полувоздушного диэлектрика с микрочастицами SiO<sub>2</sub> равна 1,56–1,6. Для сравнения: диэлектрическая проницаемость аморфного кварцевого стекла равна 3,75–3,8.

Кабельные сборки из кабелей с диоксидом кремния имеют ряд особенностей по сравнению с кабельными сборками других типов:

- Рекордно широкий диапазон рабочих температур. Кабель с диэлектриком SiO<sub>2</sub> может работать в диапазоне температур: -270...+1000 °С. Однако в кабельных сборках с таким кабелем предельная температура нагрева ограничена допустимой рабочей температурой серийных соединителей: -270...+200 °С. Разработаны также высокотемпературные соединители с диапазоном рабочих температур: -270...+600 °С, в которых используется изолятор из керамического композитного стекла в сочетании с корпусами из никелевых сплавов Inconel 625, X750 или 718.

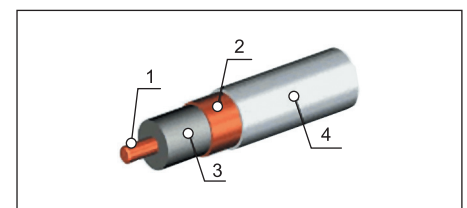


Рис. 5. Конструкция кабеля с диэлектриком SiO<sub>2</sub>:  
1 — медный внутренний проводник;  
2 — оболочка меди; 3 — изолятор SiO<sub>2</sub>;  
4 — оболочка из нержавеющей стали

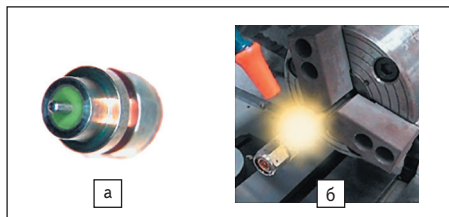


Рис. 6. а) Герметичный соединитель SMA; б) установка соединителя на кабель лазерной сваркой

2. Необходимость использования для кабельных сборок соединителей, герметизированных металлостеклянным спаем. Герметичность сборки, определяемая скоростью натекания гелия, равна  $1,3 \times 10^{-9} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ . Установку соединителя на кабель осуществляют лазерной сваркой (рис. 6).

3. Важнейшее достоинство кабеля с диэлектриком SiO<sub>2</sub> — значительно более высокая температурно-фазовая стабильность по сравнению с кабелями с диэлектриком из пористого ПТФЭ (рис. 7) [7].

Недостатком кабелей с диэлектриком SiO<sub>2</sub> является больший коэффициент затухания, чем у кабелей с пористым ПТФЭ.

Характеристики кабелей компании Meggitt Safety Systems с диэлектриком SiO<sub>2</sub> приведены в таблице 8 и на рис. 8. Все кабели имеют волновое сопротивление 50 Ом. Эффективная диэлектрическая проницаемость изоляции кабеля 1,56. Сопротивление изоляции  $3,3 \times 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}$  при 20 °С и  $3,3 \times 10^7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  при 760 °С, затухание экранирования — не менее 120 дБ.

Кабели предназначены для применения в сборках с соединителями SMP, 2,4 и 3,5 мм, SMA, TNC, N, HN, SSMA, SC и других типов.

Компания Times Microwave Systems выпускает кабели четырех типов с диэлектриком SiO<sub>2</sub> с гарантированным затуханием экранирования: -110...-120 дБ. Предлагаются кабельные сборки со стандартными и с высокотемпературными соединителями. Характеристики выпускаемых кабелей приведены в таблице 9. Величина коэффициента затухания в зависимости от частоты такая же, как на рис. 8.

Компания ThermoCoax разработала серию кабелей с диэлектриком SiO<sub>2</sub> (SiO<sub>2</sub> insulated signal transmission cables) для работы при температуре до +1000 °С в условиях агрессивных сред [10]. Кабели соответствуют стандарту MIL-T81492. Характеристики кабелей компании приведены в таблице 10.

Характеристики кабелей с изолятором SiO<sub>2</sub>, изготовленных ведущими компаниями Meggitt Safety Systems, Times Microwave Systems и ThermoCoax, близки. Однако первые две компании ориентированы на применение кабелей в АФАР и измерительной технике и поэтому стремятся обеспечить высокую фазовую стабильность кабелей. Компания ThermoCoax разрабатывает кабели для применения в технике высоких энер-

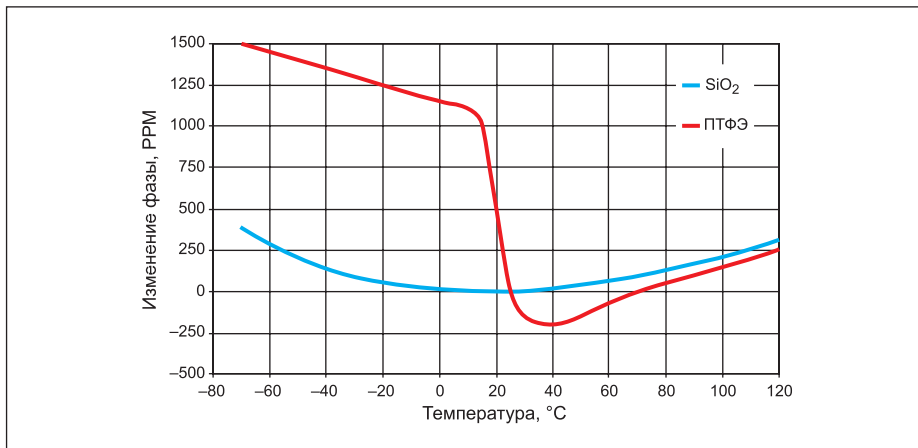


Рис. 7. Температурная зависимость фазы в кабелях с диэлектриками ПТФЭ и SiO<sub>2</sub>

Таблица 8. Характеристики кабелей Meggitt Safety Systems

№ п/п	Марка кабеля	Диаметр, мм		Минимальный радиус изгиба, мм	t <sub>зад</sub> , нс/м	V <sub>p</sub> , %	C, пФ/м	f <sub>гред</sub> , ГГц	ΔV, ppm (T, °C)	α, дБ/фут (T, ГГц)	Пропускаемая мощность, кВт	Напряжение пробоя, кВ	Масса, г/м
		Внутренний проводник	Оболочка										
1	0,09	0,56	2,29	7,62	4,13	80	82	71,4	Рис. 7	Рис. 8	0,4	0,4	7,71
2	0,125	0,85	3,18	12,7				60,7			1	10,83	
3	0,142	0,99	3,61	12,7				40,7			1,6	1,46	15,58
4	0,2	1,53	5,08	15,24				26,1			2,6	2,6	21,83
5	0,275	2,21	6,99	17,8				18,1			3,4	3,4	35,38
6	0,296	2,44	7,52	17,8				16,6			3,4	3,4	40,82
7	0,532	4,5	13,51	38,1				8,9			7	7	95,26

Примечание. Компания разработала еще более миниатюрные кабели типов 0,047" и 0,069" с наружным диаметром соответственно 1,19 и 1,75 мм.

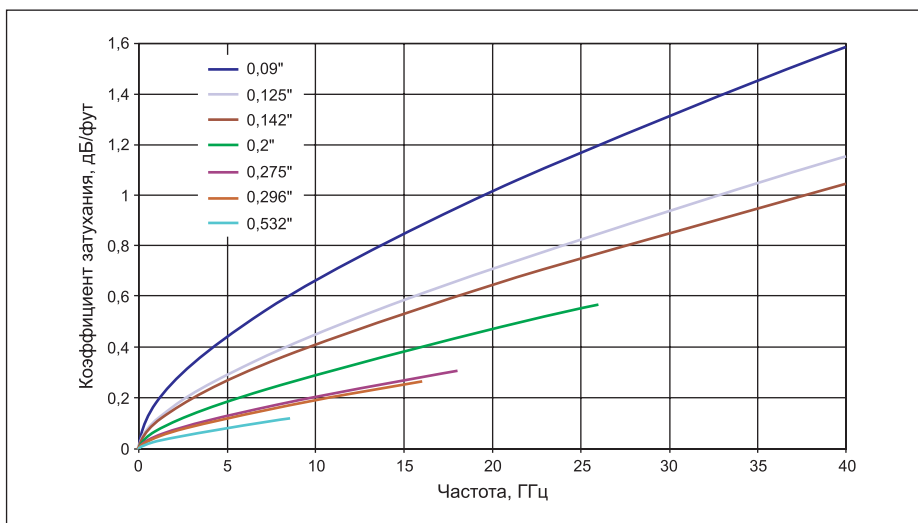


Рис. 8. Зависимость коэффициента затухания кабелей Meggitt Safety Systems от частоты при 20 °С. 1 дБ/фут = 3,281 дБ/м

Таблица 9. Характеристики кабелей компании Times Microwave Systems

№ п/п	Марка кабеля	Диаметр оболочки, мм	Минимальный радиус изгиба, мм	t <sub>зад</sub> , нс/м	V <sub>p</sub> , %	C, пФ/м	f <sub>гред</sub> , ГГц	ΔV, ppm (T, °C)	Напряжение пробоя, кВ
1	SiO <sub>2</sub> -0,09	2,29	7,6	4,1	80	73,2	65	600 (-60...100 °C)	0,9
2	SiO <sub>2</sub> -0,141	3,58	11,4				38		1,6
3	SiO <sub>2</sub> -0,2	5,08	17,8				25		2,4
4	SiO <sub>2</sub> -0,27	7,11	25,4				19		3,3

гий, а потому основное внимание уделяет способности кабелей работать при высоких температурах.

Компания Measure Tech [9] выпускает одну марку кабеля — SiO<sub>2</sub>-0,142 (наружный диаметр 3,6 мм), основные параметры которого

Таблица 10. Характеристики кабелей компании ThermoCoax

Марка кабеля	1CCA c10Si	1CCA c15Si	1CCA c20Si	1CCA c30Si	1CCA c36Si	1CCA c40Si
<b>Конструкционные материалы и размеры, мм</b>						
Внутренний проводник	Медь					
Диаметр	0,18	0,25	0,31	0,44	0,6	0,8
Внешний проводник	Медь					
Оболочка	Нержавеющая сталь 304L или Inconel 600 (XН78Т, XН60ВТ)					
Диаметр	1	1,5	2	3	3,6	4
<b>Электрические параметры</b>						
Волновое сопротивление, Ом	50					
$f_{пред}$ , ГГц	20					
Сопротивление изоляции Ом·м, (при температуре)	$\geq 10^{13}$ (20 °C)			$\geq 10^{12}$ (20 °C)		
	$\geq 10^7$ (350 °C), $\geq 10^3$ (600 °C)					
C, пФ/м при 20 °C	100					120
$\alpha$ , дБ/м на $f = 100$ МГц	0,08					
Напряжение пробоя, кВ	0,3	0,5	0,8	1	1,5	1,5
Масса, г/м	15	40	70	170	230	290
Длина, м	10–80		10–60		20–60 до 50	
<b>Эксплуатационные параметры</b>						
Диапазон рабочих температур, °C	–273...+1000					
Вибрация	20 г, 2000 Гц					
Ускорение, м/с <sup>2</sup>	50 г					
Одиночный удар	7000 г, 10 кГц					

совпадают с параметрами аналогичных кабелей других компаний.

## Радиочастотные кабели Phase Track

Компания Times Microwave Systems (США) достигла улучшения температурно-фазовой стабильности, применив в радиочастотных кабелях оригинальные фторуглеродные пористые диэлектрики TF4 и TF5 собственной разработки. Благодаря этому удалось устранить эффект «тефлонового колена», присущий кабелям с ПТФЭ. В 2004 году были созданы кабели PT210 и PF402, в которых был впервые использован диэлектрик TF4.

На основе так называемой TF4-технологии компания Times Microwave Systems создала несколько серий фазостабильных радиочастотных кабелей.

PhaseTrack — гибкие фазостабильные кабели. Конструкция кабелей показана

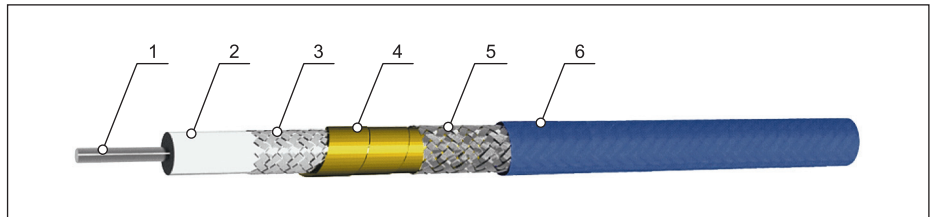


Рис. 9. Конструкция кабелей PhaseTrack:

1 — внутренний проводник из меди или плакированной медью стали, покрытый серебром; 2 — пористый диэлектрик TF4; 3 — экран из медных серебряных лент; 4 — металлизированная полиимидная пленка; 5 — оплетка из медных проволоч, покрытых серебром; 6 — оболочка из ФЭП

Таблица 11. Основные параметры кабелей PhaseTrack

№ п/п	Марка кабеля	Диаметр оболочки, мм; ФЭП	Минимальный радиус изгиба, мм	$t_{зад}$ нс/м	$V_{рл}$ %	C, пФ/м	$f_{пред}$ ГГц	$\Delta\psi$ , ppm (Т, °C)	$\alpha$ , дБ/м на $f = 18$ ГГц	$\Delta T_{раб}$ °C
1	PT110	2,74	14	4,04	82,5	81	80	Рис. 10	4	–55...+150
2	PT150	3,68	19	4,04	82,5	81	52,4		2,3	
3	PT180	4,57	25,4	4,04	83,0	80,7	38,7		1,9	
4	PT210	5,33	28,6	4,04	83,5	80,0	29,0		1,6	
5	PT318	8,07	44,5	4,0	83,5	78,7	18,9		1,1	

на рис. 9. Основные параметры кабелей приведены в таблице 11 и на рис. 10.

PhaseTrack SR — фазостабильные полужесткие кабели. Конструкция кабелей показана на рис. 11, а их основные параметры приведены в таблице 12 и на рис. 12.

PhaseTrack PFlex — гибкие фазостабильные кабели. Конструкция кабеля показана на рис. 13. Основные параметры кабелей приведены в таблице 13 и на рис. 14.

PhaseTrack LS — не распространяющие горение, с низким дымовыделением (low smoke, LS) гибкие кабели, в которых применен оригинальный пористый диэлектрик TF5.

Конструкция кабелей PhaseTrack LS представлена на рис. 15. Для снижения массы внутренний проводник выполнен из алюминия, плакированного медью. Основные параме-

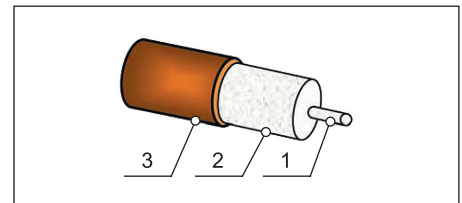


Рис. 11. Конструкция кабелей PhaseTrack SR:

1 — внутренний проводник из меди или плакированной медью стали, покрытый серебром; 2 — пористый диэлектрик TF4; 3 — медная трубка оболочки

тры гибких кабелей PhaseTrack LS приведены в таблице 14 и на рис. 16.

По температурно-фазовой стабильности кабели PhaseTrack значительно превосходят кабели с пористым ПТФЭ.

Таблица 12. Основные параметры полужестких кабелей PhaseTrack SR

№ п/п	Марка кабеля	Диаметр оболочки, мм, медь	Минимальный радиус изгиба, мм	$t_{зад}$ нс/м	$V_{рл}$ %	C, пФ/м	$f_{пред}$ ГГц	$\Delta\psi$ , ppm (Т, °C)	$\alpha$ , дБ/м на $f = 18$ ГГц	$\Delta T_{раб}$ °C
1	PTSRB047	2,74	3,81	4,04	82,5	80,7	138,5	Рис. 12	5,7	–55...+125
2	PTSRB085	3,68	6,35				80,2		3,4	
3	PTSRB141	4,57	10,8				38,4		1,8	

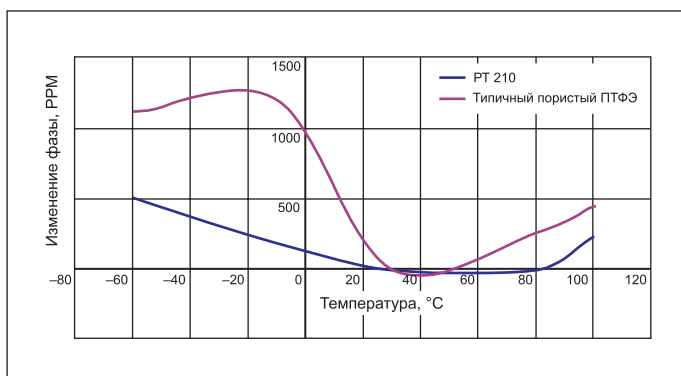


Рис. 10. Температурно-фазовая характеристика кабеля PT210

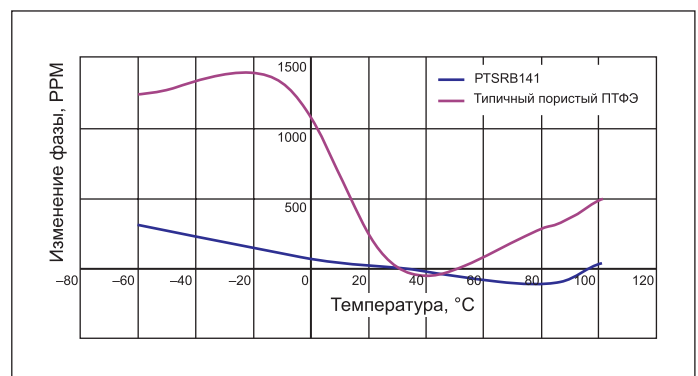
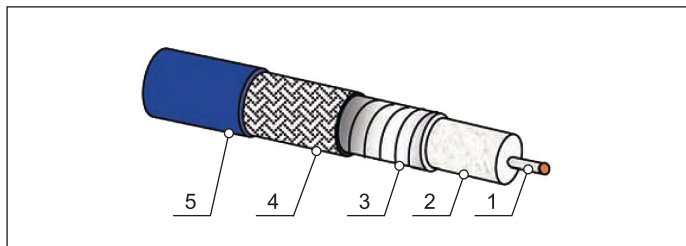
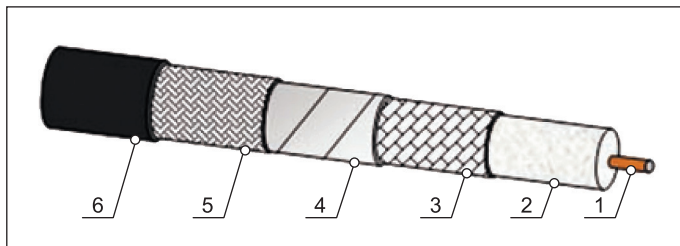


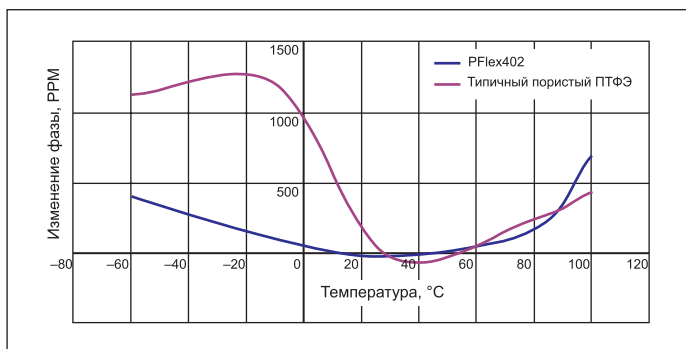
Рис. 12. Температурно-фазовая характеристика кабеля PTSRB141



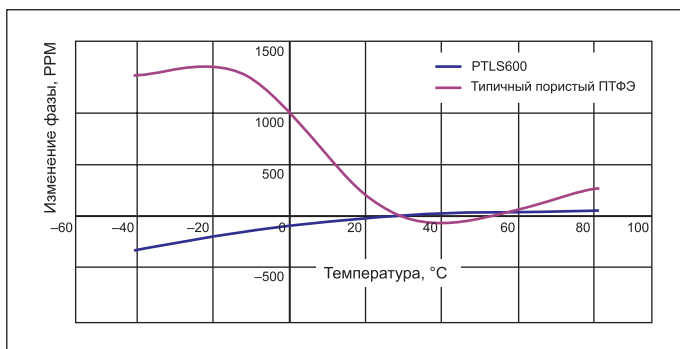
**Рис. 13.** Конструкция кабелей PhaseTrack PFlex:  
 1 — внутренний проводник из меди или плакированной медью стали, покрытый серебром;  
 2 — пористый диэлектрик TF4; 3 — ленточный экран из посеребренной меди;  
 4 — оплетка из медных проволок, покрытых серебром; 5 — оболочка из ФЭП



**Рис. 15.** Конструкция кабелей PhaseTrack LS:  
 1 — внутренний проводник из плакированного медью алюминия;  
 2 — пористый диэлектрик TF5; 3 — экран из медных серебряных лент;  
 4 — металлизированная композитная лента; 5 — оплетка из медных проволок, покрытых серебром; 6 — оболочка из полиэтлена, не распространяющего горение



**Рис. 14.** Температурно-фазовая характеристика кабеля PF402



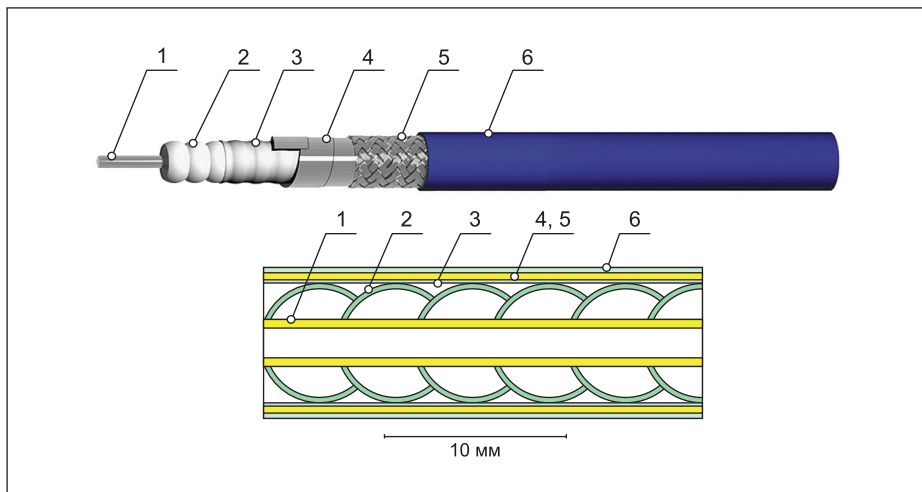
**Рис. 16.** Температурно-фазовая характеристика кабеля PTL600

**Таблица 13.** Основные параметры кабелей PhaseTrack PFlex

№ п/п	Марка кабеля	Диаметр оболочки, мм	Минимальный радиус изгиба, мм	$t_{зад}^*$ нс/м	$V_{рл}$ %	C, пФ/м	$f_{пред}^*$ ГГц	$\Delta\Psi$ , ppm (Т, °С)	$\alpha$ , дБ/м на $f = 18$ ГГц	$\Delta T_{раб}$ °С
1	PF047	1,6	6,35	4,04	82,5	80	142,3	Рис. 14	6,1	-55...+125
2	PF405	2,4	12,7				79,9		3,6	
3	PF130	3,3	15,9				52,3		2,4	
4	PF402	4,1	19,1				38,7		1,9	

**Таблица 14.** Основные параметры кабелей PhaseTrack LS

№ п/п	Марка кабеля	Диаметр оболочки, мм	Минимальный радиус изгиба, мм	Масса, г/м	$t_{зад}^*$ нс/м	$V_{рл}$ %	C, пФ/м	$f_{пред}^*$ ГГц	$\Delta\Psi$ , ppm (Т, °С)	$\alpha$ , дБ/м на $f = 10$ ГГц	$\Delta T_{раб}$ °С
1	PTLS400	10,16	102	149	3,97	84	76,8	16,2	Рис. 16	0,58	-40...+85
2	PTLS600	15,24	152	238				10,0		0,37	



**Рис. 17.** Конструкция кабеля с диэлектриком SucoPearl PTFE: 1 — внутренний проводник; 2 — «бусинки» из ПТФЭ; 3 — трубка из ФЭП; 4 — внутренний ленточный проводник; 5 — внешняя проволочная оплетка; 6 — оболочка из ФЭП

**Радиочастотные кабели SucoPearl**

Для уменьшения эффекта «тефлоновое колено» компания Huber+Suhner, Швейцария ([www.hubersuhner.com](http://www.hubersuhner.com)), в рамках сотрудничества с Европейским космическим агентством (ESA) создала оригинальную конструкцию кабелей с диэлектриком SucoPearl PTFE [11]. Разработанные кабели имеют следующие конструктивные особенности:

- изоляция кабеля выполнена в виде набора полых «бусинок» (pearls) из ПТФЭ с поверхностью сферической формы, наназанных вплотную друг к другу на внутренний проводник, подобно жемчужинам в ожерелье;
- для фиксации взаимного расположения «бусинок» использована трубка из особочистого ФЭП (FER). В итоге создается сердечник с высоким содержанием воздуха, что в сочетании с использованием термоусаживаемой трубки из ФЭП призвано снизить нежелательный эффект «тефлоновое колено»;
- для уменьшения температурного изменения длины внутреннего проводника его изготавливают из сплава Invar (железоникелевый сплав, отечественный аналог — сплав 36Н) с серебряным покрытием, имеющего очень малый ТКЛР —  $1,5 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$  в диапазоне температур:  $-80...+100^\circ\text{C}$ ;
- внешний проводник выполнен из спиральной обмотки посеребренной медной лентой, поверх которой наложена оплетка из посеребренной алюминиевой проволоки;
- оболочка изготовлена из ФЭП.

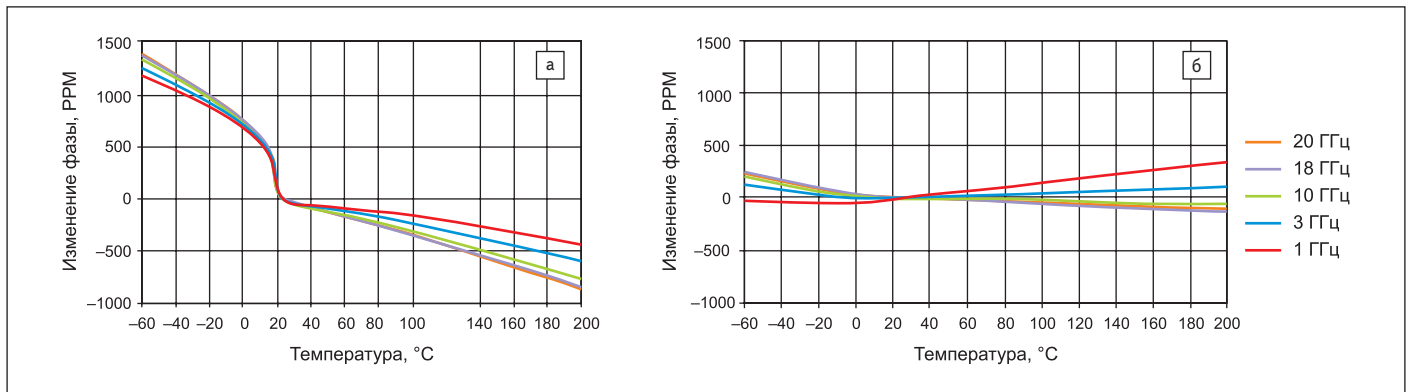


Рис. 18. Расчетные температурные зависимости фазы для кабелей: а) SucoPearl PTFE; б) SucoPearl PFA

Таблица 15. Параметры кабелей SP304\_FEP и SP306\_FEP

Параметры	Значение параметра	Примечание
<b>Электрические параметры</b>		
Верхняя частота применения, ГГц	SP306_FEP — 19,5	
	SP304_FEP — 28,3	
Максимальный КСВн	1,15 (кабель), 1,25 (кабельная сборка)	
Коэффициент затухания, дБ/м	≤1,1, цель — <0,65	На частоте 18 ГГц
Затухание экранирования, дБ	<-90	До частоты 18 ГГц
Стабильность фазы при изгибе, °/ГГц	<±0,4	2-кратная накрутка на оправку радиусом 85 мм
Максимальная пропускаемая мощность, Вт	50	На частоте 18 ГГц при температуре 40 °С
Максимальное напряжение, кВ	2,5	Мультиакторный разряд
Сопротивление изоляции, МОм·м	>10	
<b>Механические и эксплуатационные параметры</b>		
Масса, г/м	≤100	
Наружный диаметр кабеля, мм	SP306_FEP — 7,55	
	SP304_FEP — 5,38	
Минимальный радиус изгиба, мм	85	
Диапазон рабочих температур, °С	-65...+185	

Конструкция кабеля с диэлектриком SucoPearl PTFE показана на рис. 17.

Результаты компьютерного моделирования температурного изменения фазы при разных частотах приведены на рис. 18 [11]. Графики на рис. 18а показывают, что предложенная конструкция сердечника с «бусинками» из ПТФЭ хотя и позволяет уменьшить эффект «тефлонового колена», но полностью его не устраняет.

Теоретический анализ, проведенный разработчиками, показал, что если изготовить «бусинки» из диэлектрика ПФА [4], у которого отсутствует эффект «тефлонового колена», температурно-фазовая характеристика кабеля станет практически линейной (рис. 18б).

Параметры разработанных кабелей SP304\_FEP и SP306\_FEP с диэлектриком SucoPearl PTFE приведены в таблице 15.

Справедливости ради заметим, что конструкция кабеля SucoPearl аналогична конструкции отечественного кабеля, описанной в [12], где в качестве примыкающих друг к другу изолирующих элементов использовались керамические колпачки, частично входящие друг в друга. Однако использование современных полимерных материалов в конструкции SucoPearl способно существенно улучшить параметры кабеля.

Технология изготовления кабелей сложна, что, очевидно, ограничит строительную

длину и приведет к достаточно высокой стоимости кабеля. Метод обладает принципиальным недостатком, обусловленным периодичностью структуры изоляции. Вследствие этого существует вероятность возникновения пиков отражения передаваемых сигналов с длинами волн, кратными линейным размерам «бусин». Описанные кабели до настоящего времени серийно не выпускаются.

### Заключение

В конструкциях зарубежных кабелей применены новые органические материалы. Из всех кабелей с органической изоляцией наиболее перспективны кордельные кабели компании Molex, не имеющие периодической структуры изоляции, и кабели компании Times Microwave Systems с изоляцией TF4 и TF5.

В нашей стране также разработаны перспективные материалы, прежде всего Ф-4МБ и Ф-50. Поэтому необходимы работы по созданию отечественных фазостабильных кабелей с изоляцией из этих пористых материалов. Поскольку применение пористых спирально накручиваемых лент изоляции не представляется перспективным, целесообразна разработка технологии получения сплошных пористых изоляторов сердечника, совмещенной с методами экструзии или плунжерного прессования.

Для высокотемпературных применений перспективны фазостабильные кабели с диэлектриком SiO<sub>2</sub>.

Отечественным производителям необходимо изучить и использовать зарубежный опыт для создания фазостабильных радиочастотных кабелей с параметрами, не уступающими параметрам лучших зарубежных аналогов.

Авторы благодарят Р. Г. Кузнецова за предоставленные материалы и полезные критические замечания и М. И. Шалыгина за помощь в подготовке иллюстративного материала.

### Литература

1. Прокимов А., Джуринский К., Кузнецов Р. Кабельные сборки СВЧ-диапазона. Назначение, классификация, особенности применения // Компоненты и технологии. 2015. № 5.
2. Прокимов А., Лобанов А., Джуринский К., Кузнецов Р. Фазовая стабильность кабельных сборок СВЧ с диэлектриком ПТФЭ // Компоненты и технологии. 2015. № 6.
3. Рентюк В. Решения кабельных сборок СВЧ-диапазона // Компоненты и технологии. 2014. № 7.
4. Teflon PFA Resin and Film. [www.dupont.com](http://www.dupont.com)
5. Фторопласт-50. [www.plastpolymer.org](http://www.plastpolymer.org)
6. Test+Measurement. Edition 2013. [www.hubersuhner.com](http://www.hubersuhner.com)
7. Meggitt Safety Systems. SiO<sub>2</sub> cable systems. [www.stablecable.com](http://www.stablecable.com)
8. Times Microwave Systems. SiO<sub>2</sub> coaxial cable assemblies. [www.timesmicrowave.com](http://www.timesmicrowave.com)
9. Measure Tech.Inc. Silicon Dioxide Cable Assembly. [www.measure-tech.com](http://www.measure-tech.com)
10. ThermoCoax. SiO<sub>2</sub> insulated signal transmission cables. [www.thermocoax.com](http://www.thermocoax.com)
11. Karstensen H., Koufogiannis I., Sorolla E., Kress G., Mattes M., Rupflin M., Fuchs J., Wettstein K. Phase stable RF cable for space applications Space Passive Component Days, 1<sup>st</sup> International Symposium, 24–26 September 2013.
12. Ефимов И. Е. и Останкович Г. А. Радиочастотные линии передачи. Радиочастотные кабели. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Связь, 1977.