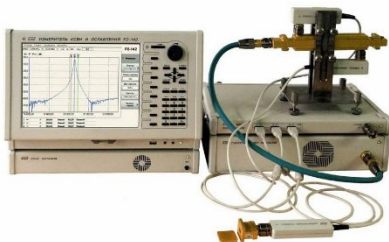


**Измерения в волноводных трактах в свете создания
Государственного первичного эталона единиц комплексного
коэффициента отражения и комплексного коэффициента передачи
в волноводных трактах в диапазоне частот до 178,4 ГГц**

Бондаренко А.С.

Парк средств измерений в волноводных трактах с нормируемыми метрологическими характеристиками по значениям ККО и ККП

1. Нагрузки волноводные (Э9-..., Э0-..., 4-Э8..., 28-Э5.313-..., МП-02, МП-03, МП-04, МП-06, МП-08, МП-12 и др.),
2. Системы измерительные автоматизированные К6-15, К6-19,
3. Калибровочные наборы,
4. Измерительные линии (Р1-...), измерители КСВН и ослаблений, измерители модулей коэффициентов передачи и отражения (Р2-...), измерители полных сопротивлений, измерители комплексных коэффициентов отражения (Р3-...), измерители комплексных коэффициентов отражения и передачи (Р4-...),
5. СИ и СВЧ-устройства с нормируемыми метрологическими характеристиками по значениям ККО и ККП (ваттметры волноводные, модули расширения частотного диапазона и др.),
6. Волноводные аттенюаторы и установки для их поверки и калибровки (Д1-..., Д2-..., Д3-..., ДК1-..., АП-... и др.).

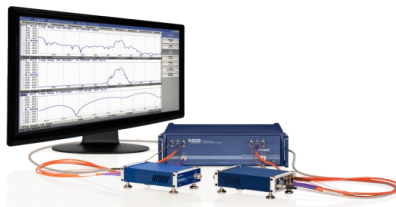


Актуальность разработки Государственного первичного эталона

Государственный первичный эталон единиц комплексного коэффициента отражения (ККО) и комплексного коэффициента передачи (ККП) в волноводных трактах в системе обеспечения единства измерений отсутствует.

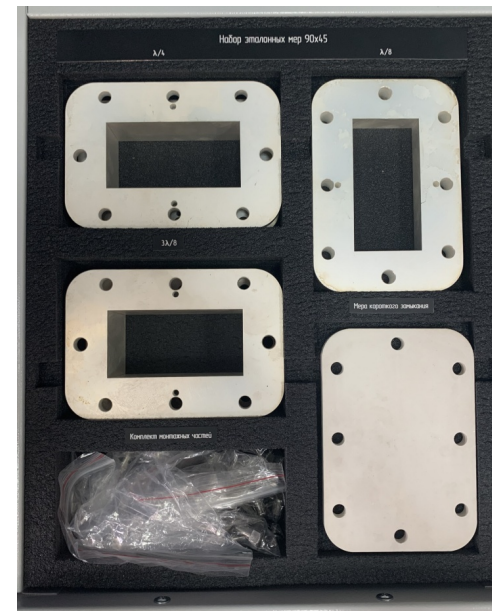
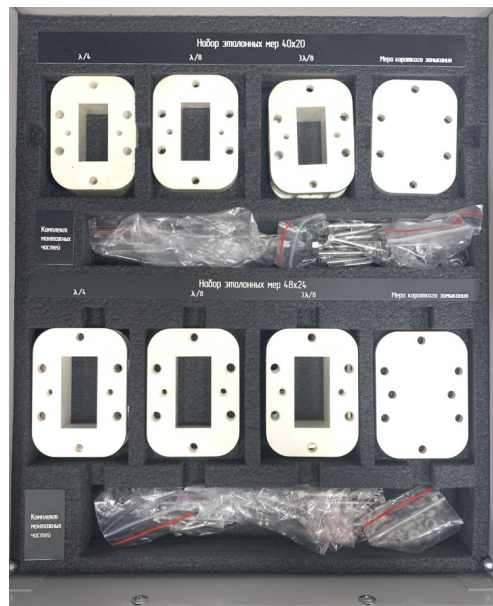
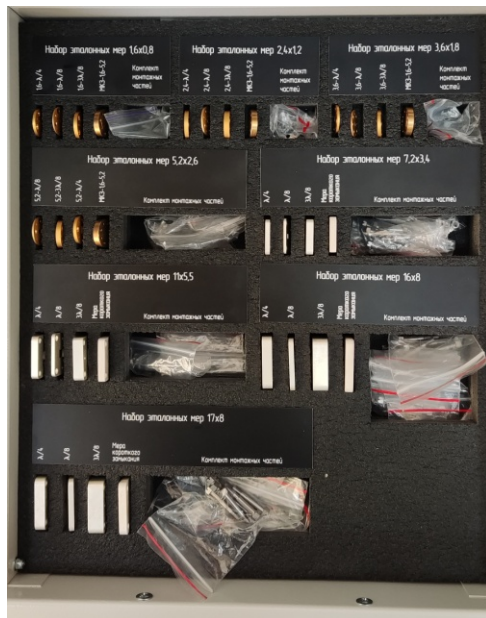
Существующие рабочие эталоны единиц ККО и ККП в волноводных трактах не обеспечивают единство измерений.

Появился ряд новых средств измерений и эталонов с нормируемыми метрологическими характеристиками по значениям ККО и ККП в волноводных трактах.



Состав Государственного первичного эталона

Комплект средств воспроизведения единицы ККО и ККП предназначен для воспроизведения, хранения и передачи единицы комплексного коэффициента отражения в волноводных трактах в диапазоне частот от 2,14 до 178,4 ГГц.



Наборы эталонных мер (38 комплектов по 4 меры)

Состав Государственного первичного эталона

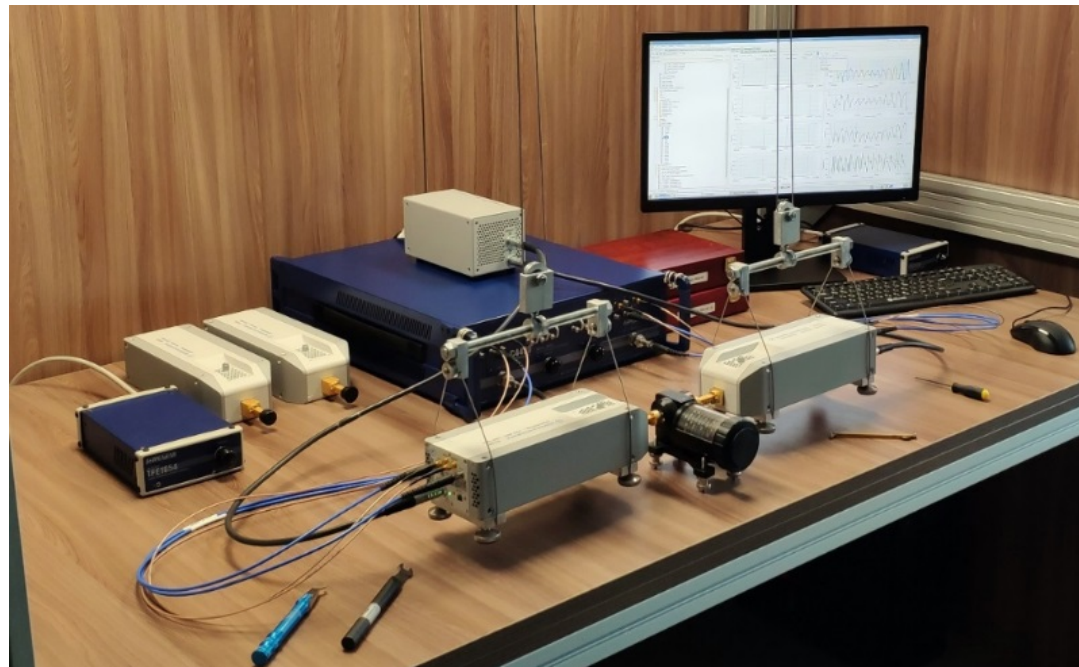


Установка компарирующая волноводная в диапазоне частот от 2,14 до 37,5 ГГц



Установка компарирующая волноводная в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц

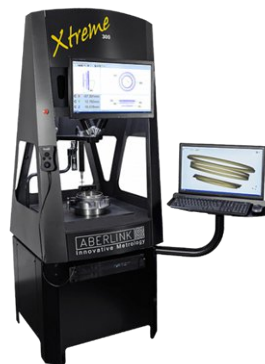
Использование модулей расширения частотного диапазона ZC 78 в составе установки компарирующей волноводной с векторным анализатором цепей С4420 фирмы Планар



Состав Государственного первичного эталона Комплект средств измерений геометрических величин



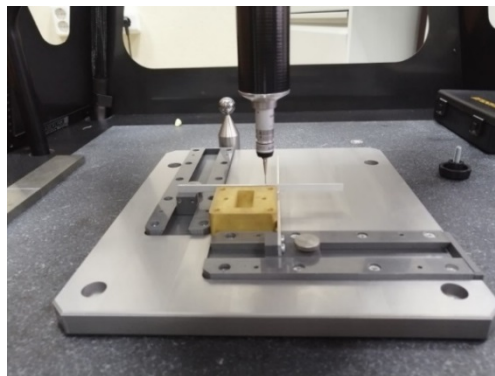
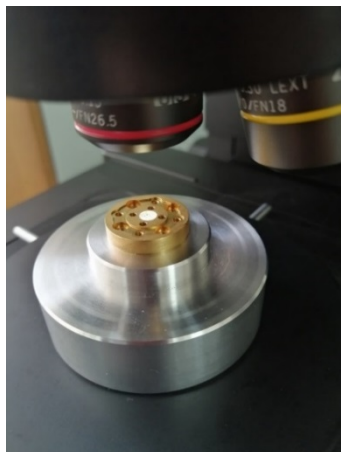
Лазерный сканирующий микроскоп
OLIMPUS LEXT-5000



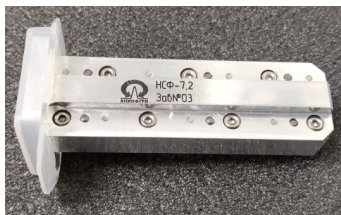
КИМ Xtreme



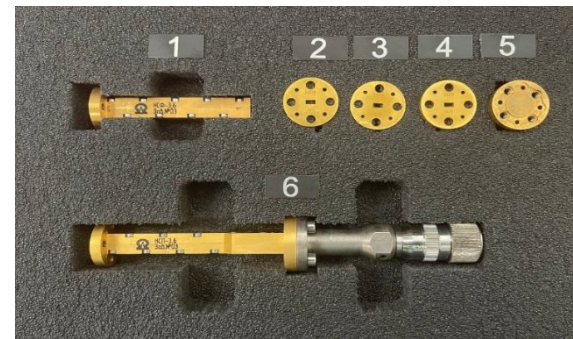
Микрометр цифровой



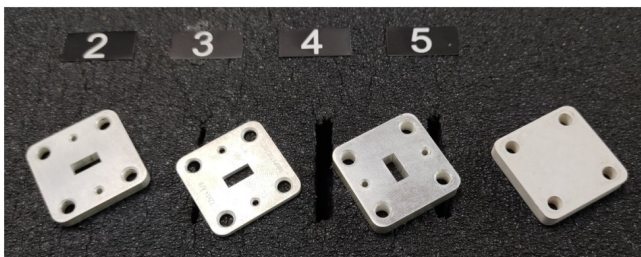
Комплект калибровочных мер единиц ККО и ККП в волноводных трактах в диапазоне частот от 2,14 до 178,4 ГГц



Согласованная фиксированная нагрузка



калибровочные меры (тракт 3,2x1,6 мм)

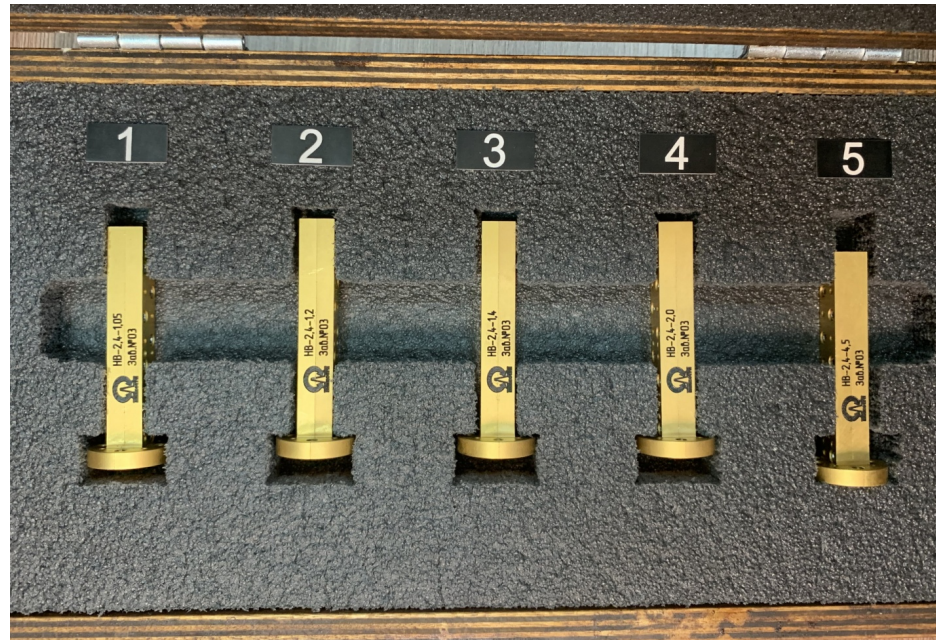


Комплект калибровочных мер (тракт 7,2x3,4 мм)



Согласованная подвижная нагрузка

Комплект нагрузок волноводных



Нагрузки волноводные

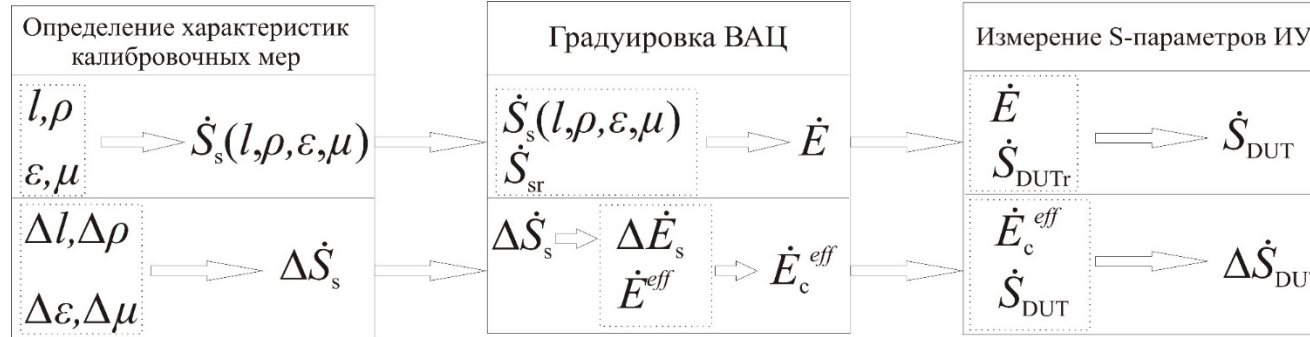
Диапазоны рабочих частот и сечения волноводных трактов

Диапазон частот, ГГц	Сечение волноводного тракта, мм
от 2,14 до 3,20	90,0×45,0
от 2,59 до 3,94	72,0×34,0
от 3,20 до 4,80	58,0×25,0
от 3,94 до 5,64	48,0×24,0
от 4,80 до 6,85	40,0×20,0
от 5,64 до 8,15	35,0×15,0
от 6,85 до 9,93	28,5×12,6
от 8,15 до 12,05	23,0×10,0
от 11,55 до 16,66	17,0×8,0
от 12,05 до 17,44	16,0×8,0
от 17,44 до 25,95	11,0×5,5
от 25,95 до 37,50	7,2×3,4
от 37,50 до 53,57	5,2×2,6
от 53,57 до 78,33	3,6×1,8
от 78,33 до 118,1	2,4×1,2
от 118,1 до 178,4	1,6×0,8

38 трактов (16 отечественных, 22 международных)

Диапазон частот, ГГц	Сечение волноводного тракта, мм
от 2,20 до 3,30	WR-340 (86,340×43,180)
от 2,60 до 3,95	WR-284 (72,140×34,040)
от 3,30 до 4,90	WR-229 (58,170×29,080)
от 3,95 до 5,85	WR-187 (47,549×22,149)
от 4,90 до 7,05	WR-159 (40,386×20,193)
от 5,85 до 8,20	WR-137 (34,849×15,799)
от 7,05 до 10,0	WR-112 (28,499×12,624)
от 7,00 до 11,00	WR-102 (25,908×12,954)
от 8,20 до 12,40	WR-90 (22,860×10,160)
от 10,00 до 15,00	WR-75 (19,050×9,525)
от 12,40 до 18,00	WR-62 (15,799×7,899)
от 15,00 до 22,00	WR-51 (12,954×6,477)
от 18,00 до 26,50	WR-42 (10,668×4,318)
от 22,00 до 33,00	WR-34 (8,636×4,318)
от 26,50 до 40,00	WR-28 (7,112×3,556)
от 33,00 до 50,00	WR-22 (5,690×2,845)
от 40,00 до 60,00	WR-19 (4,775×2,388)
от 50,00 до 75,00	WR-15 (3,759×1,880)
от 60,00 до 90,00	WR-12 (3,0988×1,5494)
от 75,00 до 110,00	WR-10 (2,5400×1,2700)
от 90,00 до 140,00	WR-8 (2,0320×1,0160)
от 110,00 до 170,00	WR-6 (1,6510×0,8255)

Схема метрологической прослеживаемости измерений ККО и ККП



На схеме: l – геометрические размеры мер ККО и ККП; ρ – удельное сопротивление материала мер; ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; \dot{S}_s – S-параметры мер ККО и ККП; \dot{S}_{sr} – показания ВАЦ до проведения калибровки при подключении каждой из мер; \dot{E} – S-параметры искажающего адаптера; \dot{S}_{DUTr} – показания ВАЦ без коррекции при подключении испытуемого устройства (ИУ); \dot{S}_{DUT} – измеренные S-параметры ИУ.

В нижней части схемы: $\Delta l, \Delta \rho, \Delta \varepsilon, \Delta \mu$ – погрешности измерений $l, \rho, \varepsilon, \mu$; $D\dot{S}_s$ – погрешности \dot{S}_s из-за $\Delta l, \Delta \rho, \Delta \varepsilon, \Delta \mu$; $D\dot{E}_s$ – погрешности \dot{E} из-за $D\dot{S}_s$; \dot{E}^{eff} – погрешности, вносимые компаратором; \dot{E}_c^{eff} – погрешности \dot{E} на выходе системы; $D\dot{S}_{DUT}$ – погрешности результатов измерений \dot{S}_{DUT} .

Воспроизведение единиц ККО и ККП

Определение ККО и ККП эталонных мер

ККО нагрузок короткозамкнутых

$$|\dot{S}_{11}| = \sqrt{(\operatorname{Re} \dot{S}_{11})^2 + (\operatorname{Im} \dot{S}_{11})^2}, \quad \begin{cases} \varphi_{S_{11}} = 90 - (180/\pi) \cdot \arcsin(\operatorname{Re} \dot{S}_{11} / |\dot{S}_{11}|) & \text{при } \operatorname{Im} \dot{S}_{11} \geq 0, \\ \varphi_{S_{11}} = -90 + (180/\pi) \cdot \arcsin(\operatorname{Re} \dot{S}_{11} / |\dot{S}_{11}|) & \text{при } \operatorname{Im} \dot{S}_{11} < 0, \end{cases}$$

$$\dot{S}_{11} = (\dot{Z}_H - r) / (\dot{Z}_H + r), \quad r = (b/a) \sqrt{(\mu_a / \varepsilon_a) \left(1 - (c / (2af\varepsilon))^2 / \mu\right)^{-1}},$$

$$\operatorname{Re} Z_H = \rho_y a_n^{-1} \left[4 + \sqrt{\pi f \sigma_M \mu_M \mu_0} (2,83 l_{K3} + b_n) \right],$$

$$\operatorname{Im} Z_H = \frac{b_n}{a_n} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a} \left(1 - \left(\frac{c}{2a_n f \varepsilon \sqrt{\mu}}\right)^2\right)^{-1}} \operatorname{tg} \left(2\pi l_{K3} f \sqrt{\varepsilon - \left(\frac{c}{2af}\right)^2} / c \right).$$

a, b – номинальные размеры соответственно широкой и узкой стенок волновода;

$\varepsilon_a, \mu_a, \varepsilon, \mu$ – абсолютные и относительные диэлектрические и магнитные проницаемости среды соответственно;

$\lambda_0 = c / (f\varepsilon^{1/2})$ – длина волны в свободном пространстве; c – скорость света в вакууме; f – частота электромагнитных колебаний;

ρ_y – удельное сопротивление вещества проводника;

a_n, b_n – измеренные значения длин соответственно широкой и узкой стенок волновода;

σ_M – проводимость материала, из которого изготовлены стенки волновода;

μ_M – относительная магнитная проницаемость материала;

μ_0 – магнитная постоянная;

l_{K3} – длина отрезка волноводного короткозамыкателя.

ККО и ККП отрезков линий

$$\begin{cases} |S_{11}| = (r_n - r) / (r_n + r) & \text{при } r_H > r, \\ |S_{11}| = (r - r_n) / (r_n + r) & \text{при } r_H \leq r, \end{cases}$$

$$r_n = (b_n / a_n) \sqrt{(\mu_a / \varepsilon_a) \left(1 - (c / (2a_n f \varepsilon))^2 / \mu\right)^{-1}},$$

$$|\dot{S}_{21}| = |\dot{S}_{12}| = e^{-\alpha l}, \quad \alpha = \left(\frac{c^2}{2f^2 a_n^3 \varepsilon} + \frac{1}{b} \right) \sqrt{\frac{2\pi \varepsilon_a f \sqrt{\varepsilon}}{\sigma_M \left(1 - (c / (2f \sqrt{\varepsilon} a_n))^2\right)^2}},$$

$$\varphi_{S_{21}} = 2\pi l_n f \sqrt{\varepsilon - [c / (2a_n f)]^2} / c.$$

Воспроизведение единиц ККО и ККП

Определение S-параметров искажающих адаптеров

Однопортовая калибровка

$$\begin{aligned}\dot{E}_{SF} &= \frac{(\dot{S}_{11R2} - \dot{S}_{11M})(\dot{\Gamma}_{R1} - \dot{\Gamma}_M) - (\dot{S}_{11R1} - \dot{S}_{11M})(\dot{\Gamma}_{R2} - \dot{\Gamma}_M)}{\dot{\Gamma}_{R2}(\dot{S}_{11R2} - \dot{S}_{11M})(\dot{\Gamma}_{R1} - \dot{\Gamma}_M) - \dot{\Gamma}_{R1}(\dot{S}_{11R1} - \dot{S}_{11M})(\dot{\Gamma}_{R2} - \dot{\Gamma}_M)}, \\ \dot{E}_{RF} &= \frac{(\dot{S}_{11R1} - \dot{S}_{11M})(1 - \dot{e}_{11}\dot{\Gamma}_{R1})(1 - \dot{e}_{11}\dot{\Gamma}_M)}{\dot{\Gamma}_{R1} - \dot{\Gamma}_M}, \\ \dot{E}_{DF} &= \dot{S}_{11R1} - \dot{e}_{10}\dot{e}_{01}\dot{\Gamma}_{R1} / (1 - \dot{e}_{11}\dot{\Gamma}_{R1}),\end{aligned}$$

Двухпортовая калибровка

$$\begin{aligned}\dot{E}_{LF} &= (\dot{B}_1\dot{\Gamma}_R - \dot{C}_1\dot{\Gamma}_R + \dot{C}_1\dot{S}_{11L}) / (\dot{C}_1\dot{A} - \dot{C}_1\dot{S}_{22L}\dot{\Gamma}_R + \dot{B}_1), \quad \dot{E}_{LR} = (\dot{B}_2\dot{\Gamma}_R - \dot{C}_2\dot{\Gamma}_R + \dot{C}_2\dot{S}_{22L}) / (\dot{C}_2\dot{A} - \dot{C}_2\dot{S}_{11L}\dot{\Gamma}_R + \dot{B}_2), \\ \dot{E}_{SF} &= (\dot{C}_1 - \dot{C}_1\dot{E}_{LF}\dot{S}_{22L} - 1) / (\dot{C}_1\dot{S}_{11L} - \dot{E}_{LF} - \dot{C}_1\dot{E}_{LF}\dot{A}), \quad \dot{E}_{SR} = (\dot{C}_2 - \dot{C}_2\dot{E}_{LR}\dot{S}_{11L} - 1) / (\dot{C}_2\dot{S}_{22L} - \dot{E}_{LR} - \dot{C}_2\dot{E}_{LR}\dot{A}), \\ \dot{E}_{RF} &= (\dot{S}_{11R} - \dot{S}_{11T})(1 - \dot{E}_{SF}\dot{\Gamma}_R)(1 - \dot{E}_{SF}\dot{E}_{LF}) / (\dot{\Gamma}_R - \dot{E}_{LF}), \quad \dot{E}_{RR} = (\dot{S}_{22R} - \dot{S}_{22T})(1 - \dot{E}_{SR}\dot{\Gamma}_R)(1 - \dot{E}_{SR}\dot{E}_{LR}) / (\dot{\Gamma}_R - \dot{E}_{LR}), \\ \dot{E}_{TF} &= \dot{S}_{21T}(1 - \dot{E}_{SF}\dot{E}_{LF}), \quad \dot{E}_{TR} = \dot{S}_{12T}(1 - \dot{E}_{SR}\dot{E}_{LR}), \quad \dot{E}_{DF} = \dot{S}_{11R} - \dot{E}_{RF}\dot{\Gamma}_R / (1 - \dot{E}_{SF}\dot{\Gamma}_R), \quad \dot{E}_{DR} = \dot{S}_{22R} - \dot{E}_{RR}\dot{\Gamma}_R / (1 - \dot{E}_{SR}\dot{\Gamma}_R), \\ \dot{A}_1 &= \dot{S}_{11L}\dot{S}_{22L} - \dot{S}_{21L}\dot{S}_{12L}, \quad \dot{B}_1 = (\dot{S}_{11R} - \dot{S}_{11L}) / (\dot{S}_{11R} - \dot{S}_{11T}), \quad \dot{B}_2 = (\dot{S}_{22R} - \dot{S}_{22L}) / (\dot{S}_{22R} - \dot{S}_{22T}), \\ \dot{C}_1 &= \dot{S}_{21L} / (\dot{S}_{21L}\dot{S}_{21T}), \quad \dot{C}_2 = \dot{S}_{12L} / (\dot{S}_{12L}\dot{S}_{12T}),\end{aligned}$$

Определение ККО и ККП испытуемого устройства

Однопортовая калибровка

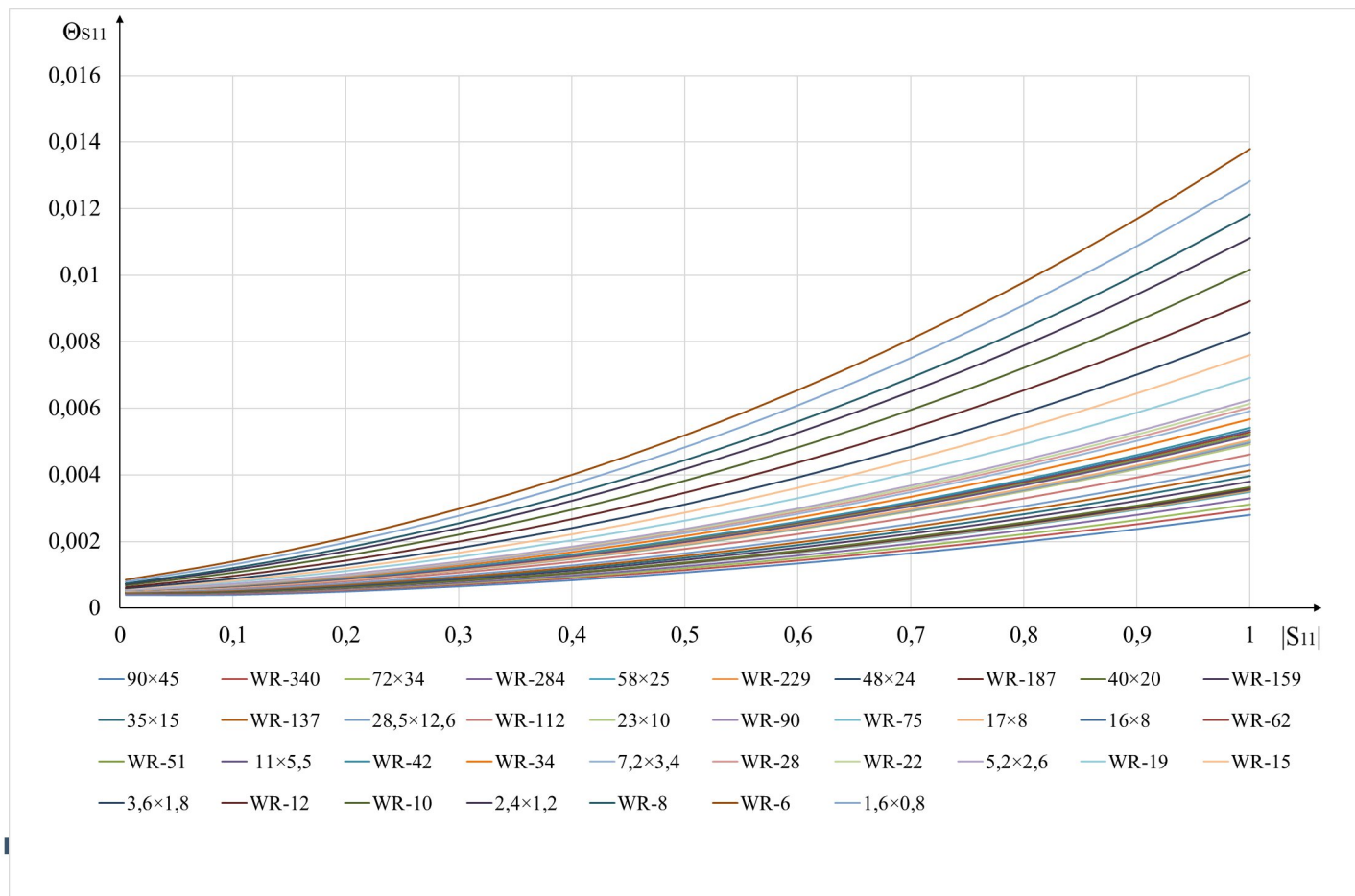
$$\dot{S}_{11} = \frac{\dot{S}_{11}^M - \dot{E}_{DF}}{\dot{E}_{RF} + \dot{E}_{SF}(\dot{S}_{11}^M - \dot{E}_{DF})}.$$

Двухпортовая калибровка

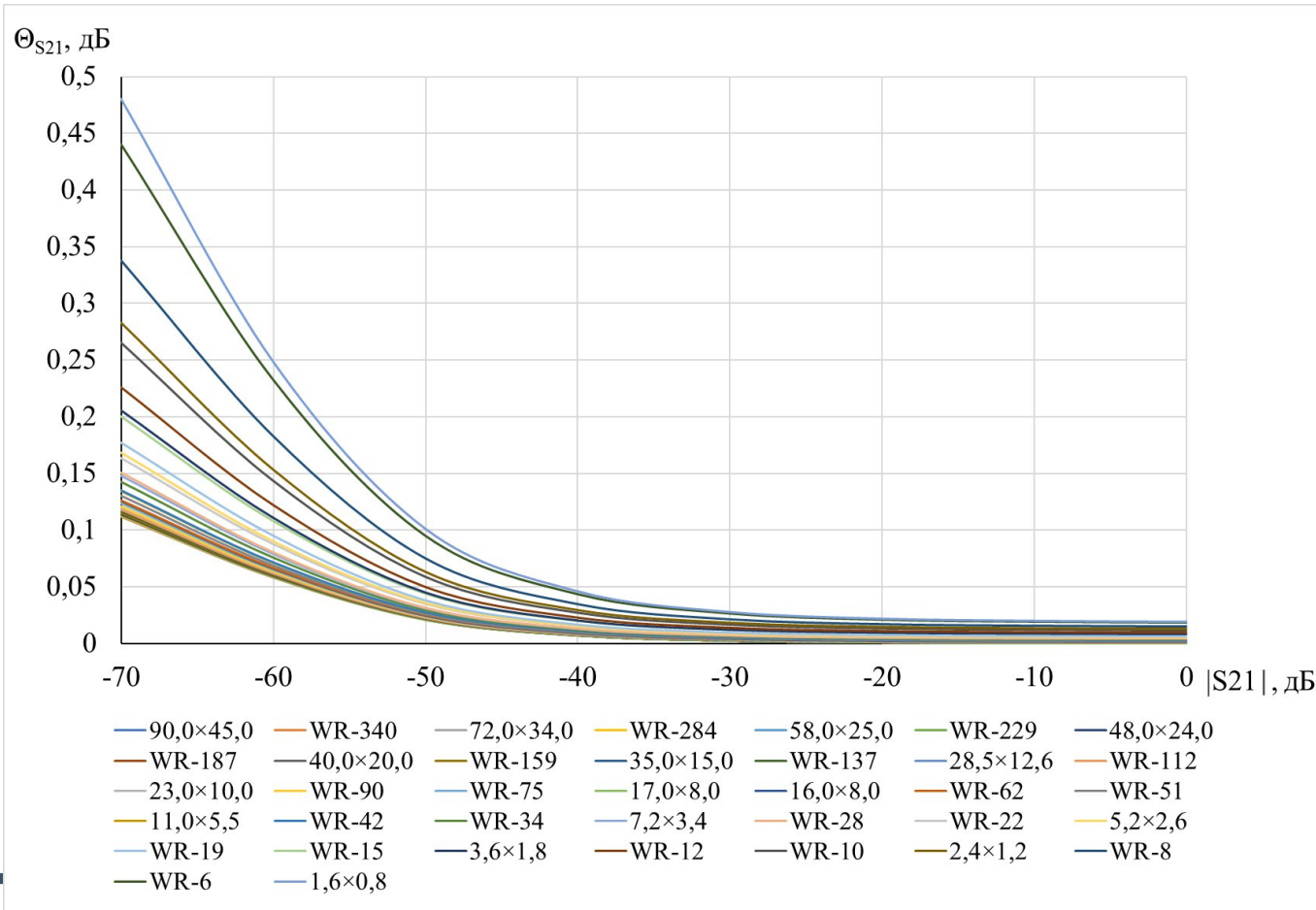
$$\begin{aligned}\dot{S}_{11} &= [\dot{A}(1 + \dot{E}_{SR}\dot{B}) - \dot{E}_{LF}\dot{C}\dot{D}] / \dot{Z}, \quad \dot{S}_{21} = \dot{C}[1 + \dot{B}(\dot{E}_{SR} - \dot{E}_{LF})] / \dot{Z}, \\ \dot{S}_{22} &= [\dot{B}(1 + \dot{E}_{SF}\dot{A}) - \dot{E}_{LR}\dot{C}\dot{D}] / \dot{Z}, \quad \dot{S}_{12} = \dot{D}[1 + \dot{A}(\dot{E}_{SF} - \dot{E}_{LR})] / \dot{Z}, \\ \dot{A} &= (\dot{S}_{11}^M - \dot{E}_{DF}) / \dot{E}_{RF}, \quad \dot{B} = (\dot{S}_{22}^M - \dot{E}_{DR}) / \dot{E}_{RR}, \quad \dot{C} = \dot{S}_{21}^M / \dot{E}_{TF}, \quad \dot{D} = \dot{S}_{12}^M / \dot{E}_{TR}, \quad \dot{Z} = (1 + \dot{E}_{SF}\dot{A})(1 + \dot{E}_{SR}\dot{B}) - (\dot{E}_{LF}\dot{E}_{LR}\dot{C}\dot{D})\end{aligned}$$

$\dot{S}_{11}^M, \dot{S}_{21}^M, \dot{S}_{12}^M, \dot{S}_{22}^M$ – некорректируемые S-параметры, приписываемые испытуемому устройству; \dot{E}_{DF} и \dot{E}_{DR} – направленность; \dot{E}_{SF} и \dot{E}_{SR} – рассогласование источника сигнала; \dot{E}_{LF} и \dot{E}_{LR} – рассогласование нагрузки; \dot{E}_{RF} и \dot{E}_{RR} – неравномерности тракта отраженного сигнала; \dot{E}_{TF} и \dot{E}_{TR} – неравномерность тракта передаваемого из порта в порт сигнала. $\dot{\Gamma}_R$ – действительное значение ККО короткозамыкателя, $\dot{S}_{11L}, \dot{S}_{21L}, \dot{S}_{12L}, \dot{S}_{22L}$ – действительные значения ККО и ККП отрезка линии, $\dot{S}_{11Lr}, \dot{S}_{21Lr}, \dot{S}_{12Lr}, \dot{S}_{22Lr}, \dot{S}_{11R}, \dot{S}_{22R}, \dot{S}_{11T}, \dot{S}_{21T}, \dot{S}_{12T}, \dot{S}_{22T}$ – значения, полученные при измерении ККО и ККП отрезка линии, короткозамыкателя и при соединении двух портов

НСП воспроизведения модуля ККО в диапазоне его значений для разных трактов



НСП воспроизведения модуля ККП в диапазоне его значений для разных трактов



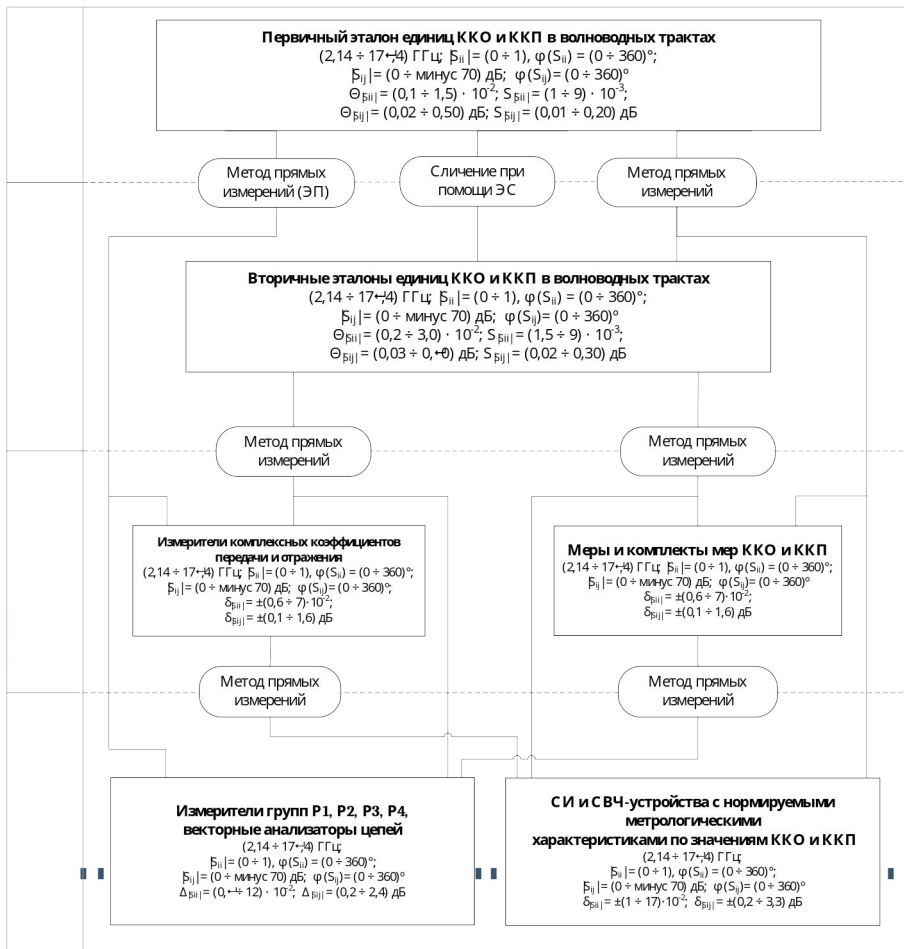
Метрологические характеристики Государственного первичного эталона

Наименование метрологических и технических характеристик	Значения метрологических и технических характеристик
Диапазон частот, ГГц	от 2,14 до 178,4
Диапазон значений модуля коэффициента отражения	от 0 до 1
СКО при воспроизведении единицы модуля ККО (S_{S11}) не превышает	от 0,001 до 0,007
НСП воспроизведения единицы модуля ККО (Θ_{S11}) не превышает	от 0,001 до 0,014
Диапазон значений фазы коэффициента отражения, градус	от 0° до 360°
СКО при воспроизведении единицы фазы ККО не превышает, градус	$57\arcsin(S_{S11}/ S_{11})$
НСП воспроизведения единицы фазы коэффициента отражения, не превышает, градус	$57\arcsin(\Theta_{S11}/ S_{11})$
Диапазон значений модуля коэффициента передачи, дБ	от 0 до минус 70
СКО при воспроизведении единицы модуля ККП (S_{S21}) не превышает, дБ	от 0,01 до 0,2
НСП воспроизведения единицы модуля ККП (Θ_{S21}) не превышает, дБ	от 0,02 до 0,5
Диапазон значений фазы коэффициента передачи, градус	от 0° до 360°
СКО при воспроизведении единицы фазы ККП не превышает, градус	$57\arcsin(S_{S21}/8,6)$
Неисключенная систематическая погрешность воспроизведения единицы фазы ККП не превышает, градус	$57\arcsin(\Theta_{S21}/8,6)$

Метрологические характеристики Государственного первичного эталона

Наименование метрологических и технических характеристик	Значения метрологических и технических характеристик
Стандартная неопределенность измерений модуля ККО, оцениваемая по типу А, u_A , не более	0,008
Стандартная неопределенность измерений модуля ККО, оцениваемая по типу В, u_B , не более	0,006
Суммарная стандартная неопределенность измерений модуля ККО, не более	0,010
Расширенная неопределенность измерений модуля ККО $U_{\text{ККО}}$ (0,95), не более	0,019
Расширенная неопределенность измерений фазы ККО $U_{\phi_{\text{ККО}}}$ (0,95), градус, не более	$57\arcsin(U_{\text{ККО}}/ S_{11})$
Стандартная неопределенность измерений модуля ККП, оцениваемая по типу А, u_A , дБ, не более	0,20
Стандартная неопределенность измерений модуля ККП, оцениваемая по типу В, u_B , дБ, не более	0,21
Суммарная стандартная неопределенность измерений модуля ККП, дБ, не более	0,29
Расширенная неопределенность измерений модуля ККП $U_{\text{ККП}}$ (0,95), дБ, не более	0,57
Расширенная неопределенность измерений фазы ККП $U_{\phi_{\text{ККП}}}$ (0,95), градус, не более	$57\arcsin(U_{\text{ККП}}/8,6)$
Диапазон значений коэффициента стоячей волны по напряжению (далее – КСВН)	от 1 до 5
Неисключенная систематическая погрешность КСВН при воспроизведении единицы модуля ККО (Θ_K) при доверительной вероятности $P=0.99$ не превышает, %	$200\Theta_{S_{11}}/(1- S_{11} ^2)$
СКО КСВН при воспроизведении единицы модуля ККО (S_K) при 10 независимых наблюдениях не превышает, %	$200S_{S_{11}}/(1- S_{11} ^2)$
Расширенная неопределенность измерений КСВН U_K (0,95) не превышает, %	$200U_{\text{ККО}}/(1- S_{11} ^2)$

Государственная поверочная схема для средств измерений комплексного коэффициента отражения и комплексного коэффициента передачи в волноводных трактах в диапазоне частот до 178,4 ГГц



1. Государственный первичный эталон единиц комплексного коэффициента отражения и комплексного коэффициента передачи в волноводных трактах в диапазоне частот до 178,4 ГГц.

2. Вторичные эталоны:

- Государственный эталон единиц комплексного коэффициента отражения в волноводных трактах в диапазоне частот от 2,14 до 78,33 ГГц (ФГУП «ВНИИФТРИ»),
- Государственный эталон единиц комплексных коэффициентов передачи в диапазоне от 0 до минус 60 дБ и комплексных коэффициентов отражений в диапазоне от 0,006 до 1 в диапазоне частот от 33 до 170 ГГц в волноводных трактах (3.1.ZZT.0148.2015).

3. Рабочие эталоны:

- волноводные аттенюаторы и установки для их поверки и калибровки (Д1-..., Д2-..., Д3-..., ДК1-..., АП-... и др.),
- нагрузки волноводные (Э9-..., ЭО-...),
- нагрузки волноводные (МП-02, МП-03, МП-04, МП-06, МП-08, МП-12),
- системы измерительные автоматизированные К6-15,
- калибровочные наборы.

4. Средства измерений:

- измерительные линии (Р1-...), измерители КСВН и ослаблений, измерители модулей коэффициентов передачи и отражения (Р2-...), измерители полных сопротивлений, измерители комплексных коэффициентов отражения (Р3-...), измерители комплексных коэффициентов отражения и передачи (Р4-...),
- СИ и СВЧ-устройства с нормируемыми метрологическими характеристиками по значениям ККО и ККП.

ВЫВОДЫ

Государственный первичный эталон единиц ККО и ККП в волноводных трактах в диапазоне частот от 2,14 до 178,4 ГГц позволяет:

- обеспечить единство измерений при решении задач метрологического обеспечения существующих и перспективных радиотехнических систем, а также при контроле параметров изделий ЭКБ;
- обеспечить методическую основу в области измерений ККО и ККП в волноводных трактах;
- повысить достоверность и снизить стоимость контроля параметров изделий при разработке, испытаниях и эксплуатации;
- повысить технический уровень измерений ККО и ККП при производстве радиоэлектронных изделий и ЭКБ.

Спасибо за внимание!



Бондаренко Александр Сергеевич
bondarenko@vniiftri.ru

Справочно

Формула для расчета КСВН имеет вид

$$\text{КСВН} = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|}$$

Относительная погрешность модуля ККО, выраженного в КСВН, определяются по формуле

$$dK = \frac{2D|S_{11}|}{1 - |S_{11}|^2} \times 100\%$$

Погрешности модуля ККО (для известных K и δK) определяется по формуле

$$D|S_{11}| = \frac{K \times \delta K}{50(1 + K)^2}$$

Погрешность модуля ККП, выраженного в дБ определяются по формуле

$$D|S_{21}|_{\text{дБ}} = \frac{20 \times D|S_{21}|}{|S_{21}| \times \ln 10}$$

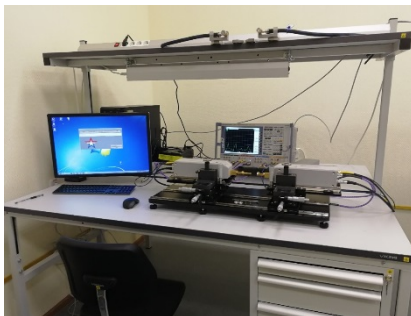
Модуль ККО и ККП вычисляются по формуле $|S| = \sqrt{(\text{Re } S)^2 + (\text{Im } S)^2}$

Фазу ККО и ККП вычисляют по формулам

$$\begin{cases} \varphi_j = 90 - (180/\rho) \times \arcsin(\text{Re } S / |S|) & \text{при } \text{Im } S \geq 0, \\ \varphi_j = -90 + (180/\rho) \times \arcsin(\text{Re } S / |S|) & \text{при } \text{Im } S < 0. \end{cases}$$

Эталон единиц ККО и ККП

1. Государственный эталон единиц комплексного коэффициента отражения в волноводных трактах в диапазоне частот от 2,14 до 78,33 ГГц (3.1.ZZT.0400.2022)
2. Государственный эталон единиц комплексных коэффициентов передачи в диапазоне от 0 до минус 60 дБ и комплексных коэффициентов отражений в диапазоне от 0,006 до 1 в диапазоне частот от 33 до 170 ГГц в волноводных трактах (3.1.ZZT.0148.2015).
3. Государственный эталон единицы коэффициента стоячей волны по напряжению в полых прямоугольных волноводах в диапазоне частот от 17,44 ГГц до 78,3 ГГц (3.1.ZZT.0026.2013).

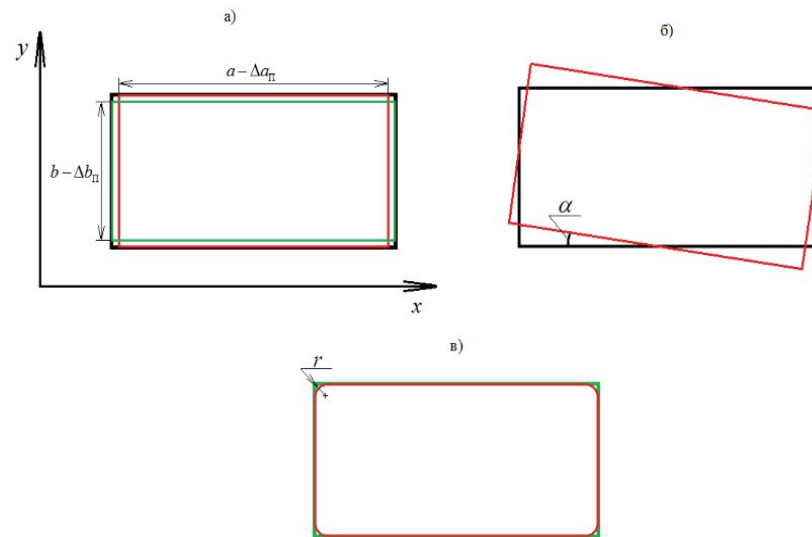


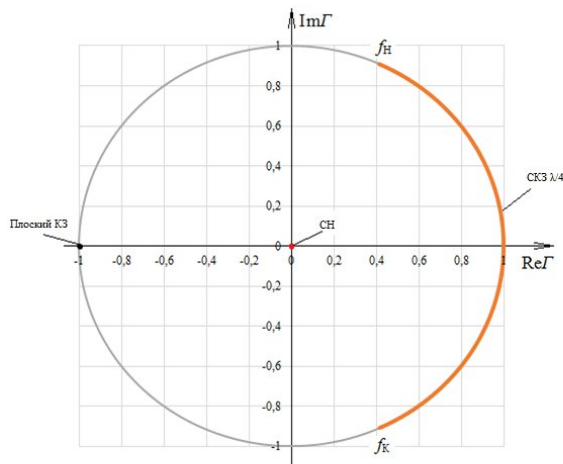
Погрешность измерения ККО из-за неидеальности изготовления калибровочных мер

а) прямое смещение геометрических размеров стенок волновода $\Delta a_{\text{п}}$ и $\Delta b_{\text{п}}$ по осям x и y ;

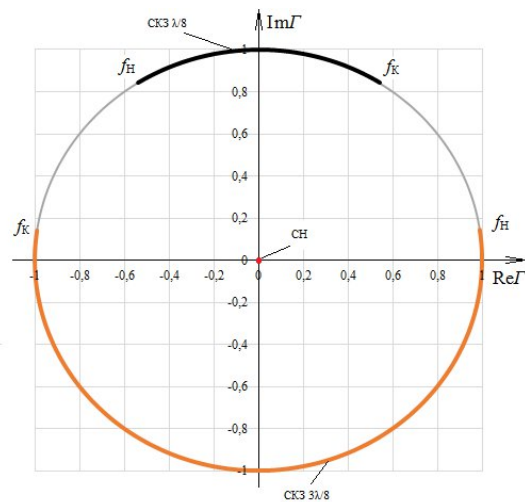
б) перекося из-за появления угла α , образованного пересечением прямой, полученной при измерении геометрических размеров стороны a (и/или b) меры, и осью x (и/или y);

в) скругление углов окна волновода



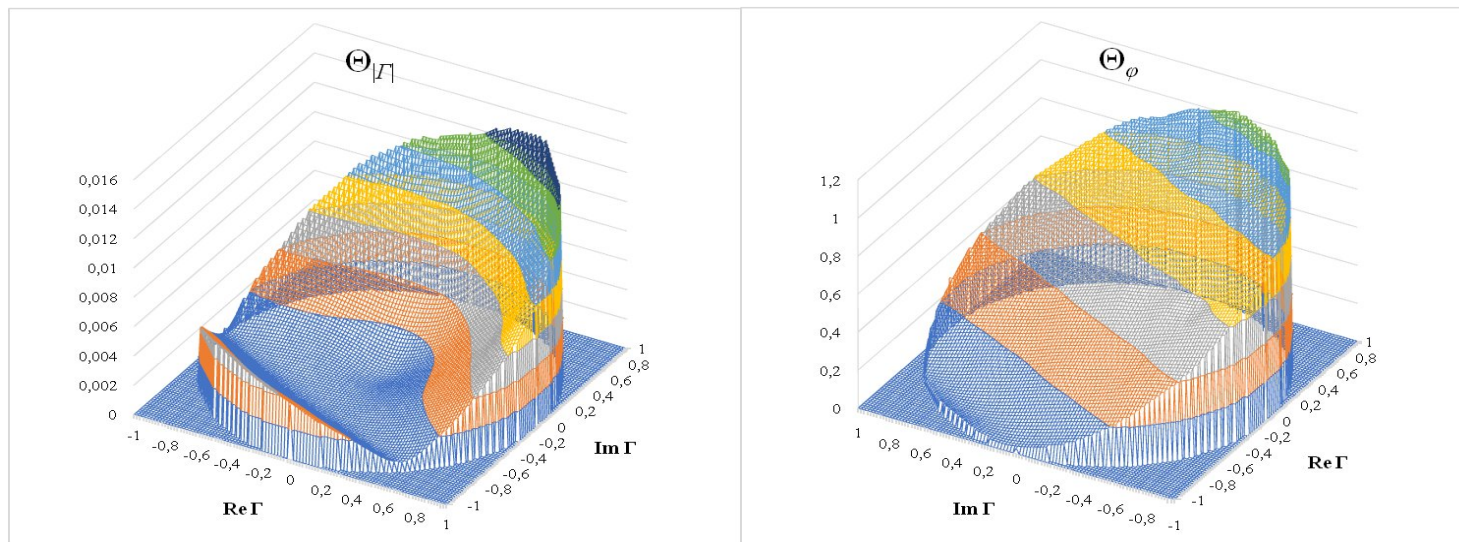


Геометрическое место точек мер плоского короткозамыкателя, смещённого короткозамыкателя $\lambda/4$, согласованной нагрузки на комплексной плоскости



Геометрическое место точек мер смещённого короткозамыкателя $\lambda/8$, смещённого короткозамыкателя $3\lambda/8$, согласованной нагрузки на комплексной плоскости

НСП воспроизведения модуля и фазы ККО на комплексной плоскости



- величина погрешности воспроизведения в диапазоне измерений ККО зависит от характеристик эталонных мер и значений частоты,

- доминирующая составляющая погрешности воспроизведения обусловлена пределами допускаемой погрешности измерений глубины Δl мер короткозамкнутых,

- значения погрешности модуля ККО $\Delta|\Gamma|$ во всем диапазоне измерений на частоте 178,4 ГГц не превышают 0,013.

При проведении по разработанной методике расчета $\Theta_{|\Gamma|}$ для других Δl определена зависимость, описанная уравнением

вида

$$\Delta|\Gamma| = 0,47 \cdot \Delta|\Gamma|_1 + 0,53 \cdot \Delta|\Gamma|_1 \cdot \Delta l,$$

где $\Delta|\Gamma|_1$ – значение погрешности воспроизведения единицы ККО при $\Delta l = 1$ мкм.

НСП воспроизведения действительной и мнимой частей ККО на комплексной плоскости

