

## Синтез фиксированных фазовращателей СВЧ на ступенчатых связанных линиях передачи класса II с несогласованными нагрузками

*Получены результаты решения задачи синтеза сверхширокополосных фиксированных фазовращателей СВЧ на ступенчатых связанных линиях передачи класса II с несогласованными нагрузками. Показано преимущество предложенной структуры по сравнению с известной на ступенчатых связанных линиях передачи класса II с согласованными нагрузками.*

**Ключевые слова:** фиксированный фазовращатель, ступенчатые структуры класса II, несогласованные нагрузки, шлейф.

Фиксированные фазовращатели (ФФ) на линиях передачи (ЛП) относятся к пассивным устройствам, обеспечивающим постоянный фазовый сдвиг между сигналами на выходе опорного канала (ОК) и фазосдвигающего канала (ФК). Они являются базовыми элементами радиоэлектронной аппаратуры различного функционального назначения в диапазоне сверхвысоких частот.

В известных ФФ на связанных ступенчатых ЛП класса II [1] опорный канал образован из отрезка одиночной однородной ЛП, а ФК представляет собой связанные ступенчатые ЛП класса II, у которых выходные плечи последнего отрезка связанных ЛП соединены между собой (рис. 1). Как известно [2], связанные ступенчатые ЛП класса II образуются каскадным включением чередующихся отрезков однородных распределенно связанных и несвязанных ЛП с различными электрическими длинами. Отрезки связанных ЛП имеют одинаковые коэффициенты связи, условия идеальной направленности и согласования предполагаются для них выполненными. Волновые сопротивления несвязанных ЛП полагаются равными волновому сопротивлению подводящих ЛП. Таким образом, ФК в [1] теоретически является идеально-согласованным.

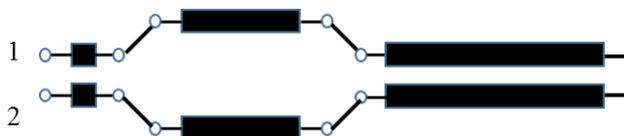


Рис. 1 - Структура ФК на трёхступенчатой связанной ЛП класса II [1].

Однако на практике выходные плечи последнего отрезка связанных ЛП соединены между собой отрезком однородной ЛП конечной длины. В то же время известно эффективное использование шлейфов, которые выполняют одновременно роль соединительного элемента и роль двух дополнительных параметров в математической модели фазовращателя. В [3, 4] рассматриваются связанные ЛП, для которых условия идеальной направленности и согласования не выполняются. Поэтому представляется целесообразным использовать модифицированную структуру связанных ступенчатых ЛП класса II, в которой условия идеальной направленности и согласования для связанных ЛП не выполняются, а волновые

сопротивления несвязанных ЛП одинаковы, но не равны волновому сопротивлению подводящих ЛП.

Цель данной работы – решение задач синтеза широкополосных ФФ с новой структурой ФК, представляющей собой модифицированную связанную ступенчатую ЛП класса II с несогласованными нагрузками, у которой выходные плечи последнего отрезка связанных ЛП соединены между собой коротко-замкнутым шлейфом (см. рис. 2). В исследуемой структуре ФК является полосно-пропускающим четырёхполюсником. В ФК используются отрезки связанных ЛП, не удовлетворяющие условию идеальной направленности и согласования, а волновые сопротивления одиночных ЛП не равны волновому сопротивлению подводящих ЛП.



Рис. 2 - Структура ФК на модифицированной трёхступенчатой связанной ЛП класса II со шлейфом.

При подаче на входы ОК и ФК фазовращателя синфазных волн одинаковой амплитуды на выходных плечах ОК и ФК на частоте  $f$  волны будут сдвинуты по фазе на угол

$$\varphi(f, \mathbf{AL}) = \varphi_{\text{ОК}}(f, \mathbf{AL}) - \varphi_{\text{ФК}}(f, \mathbf{AL}),$$

где  $\varphi_{\text{ОК}}(f, \mathbf{AL})$  набег фазы в ОК на частоте  $f$ ;  $\varphi_{\text{ФК}}(f, \mathbf{AL})$  – набег фазы в ФК на частоте  $f$ ;  $\mathbf{AL}$  – вектор варьируемых параметров:  $\theta_{\text{ОК}}$  – электрическая длина опорного канала на  $f_{\text{ср}}$  (средней частоте рабочего диапазона частот  $[f_1, f_2]$ ),  $\theta_i$  – электрические длины на  $f_{\text{ср}}$  отрезков однородных связанных и несвязанных ЛП,  $i = \overline{1, m}$ ;  $\theta_{\text{шл}}$  – электрическая длина шлейфа на  $f_{\text{ср}}$ ;  $Z_{0e}$  и  $Z_{0o}$  – волновые сопротивления чётного и нечётного типа возбуждения отрезков однородных связанных ЛП,  $Z_{\text{од}}$  – волновое сопротивление отрезков однородных несвязанных ЛП;  $Z_{\text{шл}}$  – волновое сопротивление шлейфа.

Для исследуемых  $m$  - ступенчатых ( $m=3, 5$ ) структур ФК в среде проектирования AWR\_DE были совместно решены минимаксные задачи:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{AL}} \max_{f \in [f_1, f_2]} |\varphi_0 - \varphi(f, \mathbf{AL})|; \\ \min_{\mathbf{AL}} \max_{f \in [f_1, f_2]} \text{КСВН}(f, \mathbf{AL}), \end{aligned}$$

где  $\varphi_0$  номинальное значение фазового сдвига. Волновые сопротивления подводящих ЛП полагались равными 50 Ом. Задачи решались в приближении Т-волн с помощью симплексного метода оптимизации.

В таблицах 1, 2 приведены найденные значения оптимальных параметров ФФ для ширины рабочей полосы  $\kappa=3$  ( $\kappa = f_2/f_1$ ), где использованы обозначения:  $\Delta\varphi$  – максимальное отклонение функции фазового сдвига от номинального значения  $\varphi_0$ ;  $\text{КСВН}_{\text{макс}}$  – максимальное значение КСВН на входе ФК. Соответствующие им частотные характеристики ФФ для  $\varphi_0 = 90^\circ$  показаны на рис. 3 и 4.

Таблица 1. Оптимальные параметры трёхступенчатых ФФ

$\varphi_0$ , град		45	67.5	90
$\kappa=3$	$\Delta\varphi$ , град	0.0787	0.0963	0.1401
	$\text{КСВН}_{\text{макс}}$	1.0996	1.1946	1.2813
	$\theta_{\text{ОК}}$ , град	313.863424	358.323007	393.166034
	$\theta_1$ , град	5.522613	5.607267	6.119799
	$\theta_2$ , град	46.320711	49.867907	51.022883
	$\theta_3$ , град	84.339998	90.468341	93.637223

	$\theta_{шл}$ , град	81.916071	86.765431	88.879421
	$Z_{0e}$ , Ом	44.522206	41.908949	38.995838
	$Z_{0o}$ , Ом	32.842267	28.152542	23.745726
	$Z_{од}$ , Ом	48.172682	46.597340	46.060459
	$Z_{шл}$ , Ом	87.660508	50.273050	33.401214

Таблица 2. Оптимальные параметры пятиступенчатых ФФ

$\varphi_0$ , град		45	67.5	90
к=3	$\Delta\varphi$ , град	0.0375	0.0461	0.0817
	КСВН <sub>макс</sub>	1.0393	1.0403	1.1458
	$\theta_{ок}$ , град	389.169629	423.386502	446.602351
	$\theta_1$ , град	3.423978	3.033047	2.390213
	$\theta_2$ , град	49.915369	50.973737	42.993317
	$\theta_3$ , град	9.776852	10.072878	7.816955
	$\theta_4$ , град	25.784633	28.322970	32.825387
	$\theta_5$ , град	83.496048	85.168454	90.630373
	$\theta_{шл}$ , град	88.740028	89.673460	90.172243
	$Z_{0e}$ , Ом	44.180628	40.222170	35.546157
	$Z_{0o}$ , Ом	30.416116	24.265439	20.368125
	$Z_{од}$ , Ом	47.665105	46.758444	45.390127
	$Z_{шл}$ , Ом	91.646955	51.337806	31.437904

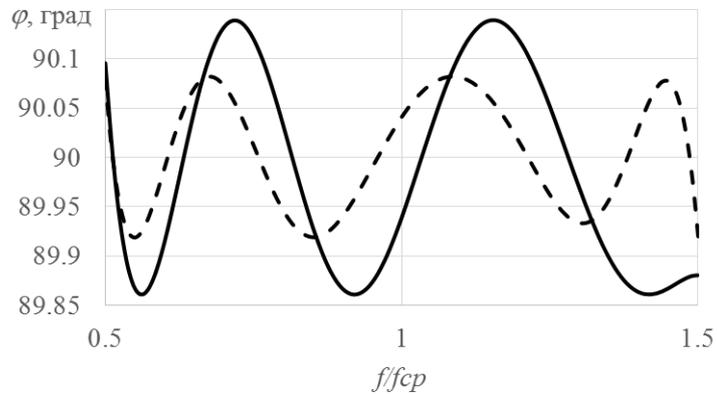


Рис. 3 - ФЧХ фазовращателей с ФК на  $m$ -ступенчатых связанных ЛП класса II со шлейфом:  $m=3$  (сплошная линия);  $m=5$  (пунктирная линия).

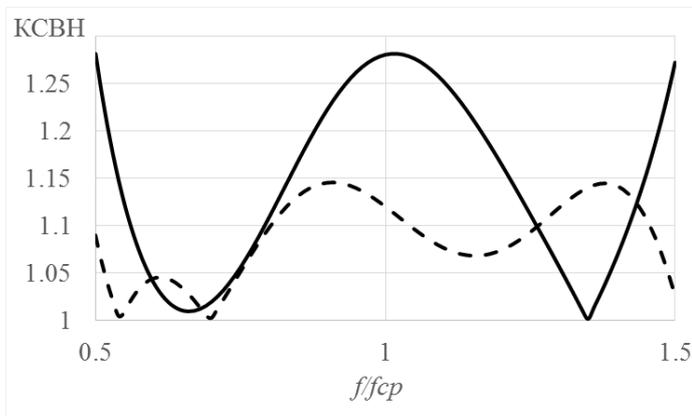


Рис. 4 - КСВН фазовращателя с ФК на  $m$ -ступенчатых связанных ЛП класса II со шлейфом:  $m=3$  (сплошная линия);  $m=5$  (пунктирная линия).

На основе анализа полученных результатов установлено следующее:

1. Для всех номинальных значений  $\varphi_0$  для трёхступенчатой структуры имеет место соотношение:  $\theta_3 > \theta_2 > \theta_1$ , а для пятиступенчатой:  $\theta_5 > \theta_2 > \theta_4 > \theta_3 > \theta_1$ . В [1] была получена такая же закономерность изменения длин ступеней ФК по направлению к концу структуры.

2. С ростом номинального значения  $\varphi_0$  волновые сопротивления шлейфов уменьшаются.

3. При равном числе ступеней, одинаковых номинальных значениях  $\varphi_0$  и ширине рабочей полосы частот ФФ на основе исследованной структуры имеют существенно меньшие значения коэффициентов связи и максимального отклонения функции фазового сдвига от номинального значения по сравнению с ФФ, синтезированными в [1]. В частности, это подтверждается табл. 3.

Таблица 3. Сравнение основных характеристик ФФ

ФК	$m=3$ [1]	$m=3$ (исследуемая структура)	$m=5$ [1]	$m=5$ (исследуемая структура)
к	3	3	4	4
$\Delta\varphi$ , град	1.931	0.140	1.473	0.349
$K_{СВН_{\max}}$	1.000	1.281	1.000	1.358
$\theta_{OK}$ , град	416.88	393.17	580.68	466.4990
$Z_{0e}$ , Ом	111.071	38.9958	370.1675	40.3527
$Z_{0o}$ , Ом	22.508	23.7457	6.7537	19.0134
$k$	0.663	0.243	0.762	0.3595
$Z_{од}$ , Ом	50	46.0605	50	44.3540

Полученные результаты могут быть эффективно использованы в качестве начальных приближений при решении задач синтеза ФФ предложенной структуры на полосковых и микрополосковых ЛПП.

#### Библиографический список

1. Мещанов В. П., Метельникова И. В., Фокеев Л. Г. Оптимальный синтез ступенчатых фазовращателей II класса // Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28, № 12. С. 2341-2346.
2. Мещанов В. П., Фельдштейн А.Л. Автоматизированное проектирование направленных ответвителей СВЧ. М.: Связь, 1980. 144 с.
3. Аристархов Г.М., Алексеев А.А. Широкополосные фазовращатели на связанных микрополосковых линиях с кратными электрическими длинами // Радиотехника. 1987. № 12. С. 58-60.
4. Исаев В.М., Мещанов В.П., Семенчук В.В., Шикова Л.В. Сверхширокополосные фиксированные фазовращатели на связанных линиях передачи со шлейфами // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60, № 6. С. 604-609.