

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 подводющих 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 П 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 П 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 $[f_1, f_2]$), θ_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 φ_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 φ_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

φ_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
	θ_1 , град	5.522613	5.607267	6.119799
	θ_2 , град	46.320711	49.867907	51.022883
	θ_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

φ_0 , град		45	67.5	90
к=3	$\Delta\varphi$, град	0.0375	0.0461	0.0817
	КСВН _{макс}	1.0393	1.0403	1.1458
	$\theta_{ок}$, град	389.169629	423.386502	446.602351
	θ_1 , град	3.423978	3.033047	2.390213
	θ_2 , град	49.915369	50.973737	42.993317
	θ_3 , град	9.776852	10.072878	7.816955
	θ_4 , град	25.784633	28.322970	32.825387
	θ_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

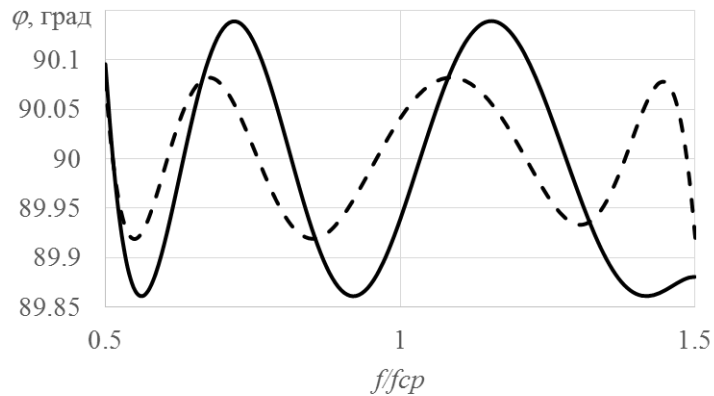


Рис. 3 - ФЧХ фазовращателей с ФК на m -ступенчатых связанных ЛП класса II со шлейфом: $m=3$ (сплошная линия); $m=5$ (пунктирная линия).

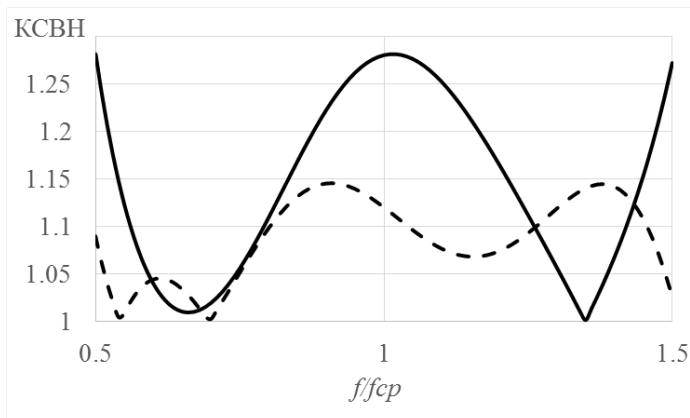


Рис. 4 - КСВН фазовращателя с ФК на m -ступенчатых связанных ЛП класса II со шлейфом: $m=3$ (сплошная линия); $m=5$ (пунктирная линия).

На основе анализа полученных результатов установлено следующее:

1. Для всех номинальных значений φ_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 φ_0 волновые сопротивления шлейфов уменьшаются.

3. При равном числе ступеней, одинаковых номинальных значениях φ_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
θ_{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.