

# Проектирование линейки фазовращателей на планарных сосредоточенных элементах для диапазона ДМВ

П. А. Власов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

pavel.rute@mail.ru

**Аннотация.** Спроектирована линейка фазовращателей на подложке из сапфира со сдвигами фазы от  $-80^\circ$  до  $80^\circ$  с шагом  $20^\circ$  в виде Т- и П-образных звеньев цепи на планарных сосредоточенных элементах для диапазона дециметровых длин волн. Учтены паразитные параметры элементов и приведены результаты электромагнитного моделирования, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** фазовращатель; сосредоточенные элементы; пассивные элементы; сапфир

## I. ВВЕДЕНИЕ

Фазовращатели являются двухпортовыми устройствами, предназначенными для изменения фазы проходящего через них сигнала на заданную величину. Они находят применение в качестве ключевых элементов в составе систем с фазированной антенной решеткой (ФАР) для настройки направления антенного луча, используются для линеаризации мощных усилителей, в системах радиолокации и для тестирования радиооборудования [1–2]. Простейшим фазовращателем, который обеспечивает фиксированное значение фазового сдвига на заданной частоте  $f$ , является отрезок линии передачи. Любой отрезок линии передачи можно охарактеризовать электрической длиной  $\theta$  и волновым сопротивлением  $Z_0$ . Первая величина, связанная с физической длиной отрезка  $l$ , отражает изменение фазы волны при прохождении через всю его длину. Электрическая длина  $\theta$  как правило измеряется в градусах и определяется по формуле:

$$\theta = \beta l = 2\pi \frac{lf \sqrt{\epsilon_{\text{эфф}}}}{c}, \quad (1)$$

где  $\beta$  – фазовая постоянная,  $\epsilon_{\text{эфф}}$  – эффективная относительная диэлектрическая проницаемость подложки. Электрическая длина совпадает по величине с вносимым отрезком фазовым сдвигом  $\Delta\varphi$ , но имеет противоположный знак. Из формулы (1) следует, что электрическая длина отрезка пропорциональна частоте, что означает, что для достижения тех же значений фазового сдвига с уменьшением частоты требуемая фактическая длина отрезка  $l$  должна расти. На низких частотах, в частности в диапазоне дециметровых длин волн (ДМВ), отрезок большой длины может оказаться практически нереализуем, поэтому разумнее произвести его замену на компактный аналог на сосредоточенных элементах.

## II. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ НА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Длинную линию передачи, являющейся элементом с распределенными параметрами, всегда можно представить в виде искусственной длинной линии, состоящей из последовательно соединенных звеньев цепи на основе элементов с сосредоточенными параметрами. Отрезок линии передачи с волновым сопротивлением  $Z_0$  и электрической длиной  $\theta$  удобно заменить эквивалентной ему на заданной частоте  $\omega_0$  схемой в виде каскадного соединения Т- или П-образных звеньев [3]. В случае отсутствия потерь звено состоит из трех реактивных элементов, каждое из которых является фильтром нижних (ФНЧ) либо верхних частот (ФВЧ) [4]. Условие эквивалентности характеристик схемы и отрезка линии передачи выполняется строго для одной частоты, однако число звеньев в схеме определяет ширину диапазона частот, в котором подобие их характеристик сохраняется.

Для замены коротких отрезков с  $|\theta| \leq 90^\circ$  обычно достаточно лишь одного звена цепи. Стоит отметить, что использование звеньев на основе ФВЧ позволяет получить искусственные отрезки линий передачи с отрицательной электрической длиной ( $\theta < 0^\circ$ ) или же с отрицательной дисперсией (ЛПОД), аналог которого в виде элемента с распределенными параметрами невозможно воспроизвести в реальности [5]. В табл. 1 представлены все виды звеньев ФНЧ и ФВЧ на основе сосредоточенных элементов, выполняющих функции фазовращателей, и формулы расчета индуктивности  $L$  и емкости  $C$  для каждого типа звена и требуемого фазового сдвига  $\Delta\varphi = -\theta$ .

Поскольку П- и Т-образные звенья эквивалентны друг другу, то для проектирования линейки фазовращателей следует выбрать тот тип звена, что обеспечивает наименьшие габариты устройства. Большой компактности, а также точности и воспроизводимости характеристик фазовращателей, позволяет добиться использование планарных сосредоточенных элементов, таких как встречно-штыревые конденсаторы и планарные катушки индуктивности. Для минимизации размеров конденсаторов, с одной стороны, следует выбрать материал подложки с как можно большей относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  и малыми диэлектрическими потерями, с другой стороны, это приведет к значительному росту паразитной емкости катушек, расположенных на той же подложке.

ТАБЛИЦА 1. ЭЛЕМЕНТЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ОТРЕЗКА ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Электрическая длина отрезка	$0 \leq \theta \leq 90^\circ$		$-90^\circ \leq \theta \leq 0$	
Схема звена				
Вид звена	П-звено	Т-звено	П-звено	Т-звено
Формула расчета	$L = \frac{Z_0 \sin \theta }{\omega_0}$ $C = \frac{1}{\omega_0 Z_0} \operatorname{tg}\left \frac{\theta}{2}\right $	$L = \frac{Z_0}{\omega_0} \operatorname{tg}\left \frac{\theta}{2}\right $ $C = \frac{1}{\omega_0 Z_0} \sin \theta $	$L = \frac{Z_0}{\omega_0} \operatorname{ctg}\left \frac{\theta}{2}\right $ $C = \frac{1}{\omega_0 Z_0 \sin \theta }$	$L = \frac{Z_0}{\omega_0} \frac{1}{\sin \theta }$ $C = \frac{1}{\omega_0 Z_0} \operatorname{ctg}\left \frac{\theta}{2}\right $

На роль материала подложки для данной задачи подходит монокристаллический сапфир с  $\varepsilon=10$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-4}$  и толщиной  $h = 300$  мкм. Поскольку габариты фазовращателей в первую очередь определяются размерами и числом встречно-штыревых конденсаторов, то для достижения положительных сдвигов фазы разумнее использовать П-звено ФВЧ, а для отрицательных сдвигов – Т-звено ФНЧ, требующих в составе лишь один конденсатор. Для формирования линейки фазовращателей со сдвигом фазы с шагом  $20^\circ$  по формулам, приведенным в табл. 1, рассчитаны номиналы элементов  $L$  и  $C$ , которые затем были откорректированы для компенсации влияния паразитных параметров: параллельной емкости для катушек и последовательной индуктивности для конденсаторов [6]. Всего созданы 4 топологии ФВЧ со сдвигами  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $80^\circ$  и 4 топологии ФНЧ со сдвигами  $-20^\circ$ ,  $-40^\circ$ ,  $-60^\circ$  и  $-80^\circ$  для рабочей частоты 434 МГц. На рис. 1 изображены зависимости фазового сдвига от частоты всех моделей фазовращателей.

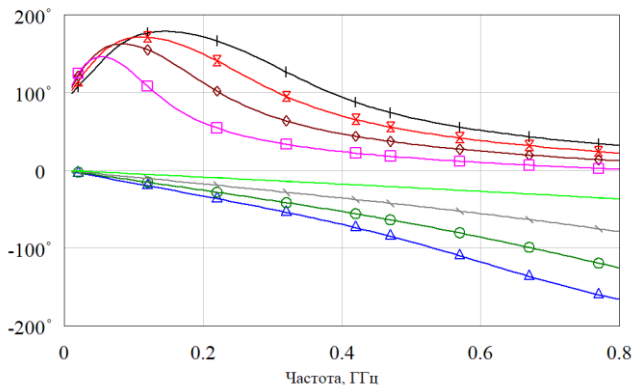


Рис. 1. Частотные зависимости фазовых сдвигов моделей фазовращателей

На рис. 2 в качестве примера изображена топология одного из фазовращателей с  $\theta = 60^\circ$ , обеспечивающего фазовый сдвиг  $-60^\circ$ , выполненного на основе Т-образного звена. Габариты всех устройств линейки не превышают  $5,1 \times 4,7$  мм. При этом предусмотрена возможность установки фазовращателей методом Flip-Chip на универсальное посадочное место на измерительной плате. На рис. 3 показаны  $S$ -параметры данного фазовращателя, полученные в результате электромагнитного моделирования и в результате измерений. Измеренный сдвиг фазы с вычетом

подводящих линий составил  $-56,7^\circ$ , что отличается от требуемого на 5,5 %.

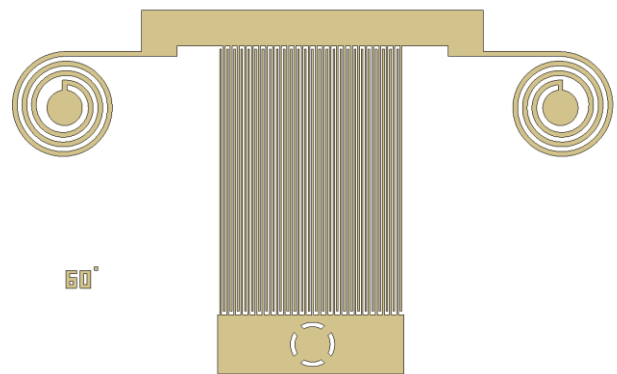


Рис. 2. Топология фазовращателя с фазовым сдвигом  $-60^\circ$

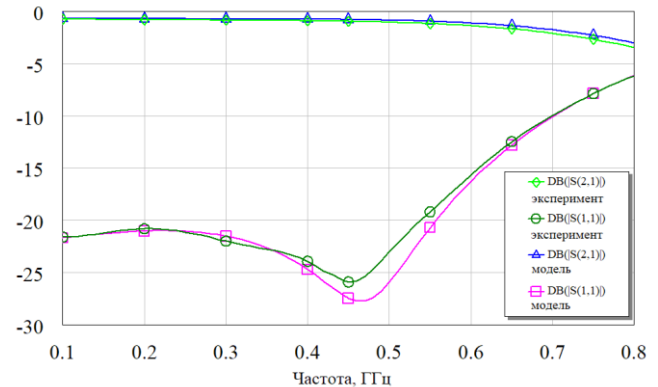


Рис. 3.  $S$ -параметры фазовращателя с фазовым сдвигом  $-60^\circ$

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Путем перехода от громоздких отрезков линии передачи – элементов с распределенными параметрами – к звеньям цепи на сосредоточенных элементах получена линейка компактных фазовращателей, обеспечивающих фиксированный сдвиг фазы в диапазоне от  $-80^\circ$  до  $80^\circ$  с шагом  $20^\circ$ , предназначенных для работы в диапазоне ДМВ. По результатам проведенных измерений можно заключить о корректности характеристик моделей. Наличие расхождения между экспериментальными и моделируемыми данными вызвано влиянием измерительной платы и подводящих линий, а также погрешностью самих измерений, однако при этом не является значительным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кочемасов В., Шадский В. Твердотельные СВЧ-фазовращатели часть 1 // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2017. вып. 1. С. 86-100.
- [2] Sengul M. High-pass/low-pass section design for  $0^{\circ}$ – $360^{\circ}$  lumped-element phase shifters via the real frequency technique // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences. 2017. iss. 25. P. 1922-1931.
- [3] Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.
- [4] Летавин Д.А. Разработка компактного фазовращателя дециметрового диапазона длин волн // Ural Radio Engineering Journal. 2023. вып. 7. С. 441–456.
- [5] Вендик И.Б., Вендик О.Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор). // Журнал технической физики. 2013. Т. 80, вып. 1. С. 3-28.
- [6] Bahl I.J. Lumped Elements for RF and Microwave Circuits. Boston, London: Artech House, 2003. 488 p.