

УДК 621.372

А.Н. Сычев, В.В. Анисимов, В.А. Бондарь, К.Б.-Б. Дагба, А.И. Степанюга

Модальные параметры неодинаковых связанных линий

Приводятся новые формулы и графики для модальных параметров, необходимые для синтеза неодинаковых связанных линий с произвольным диэлектрическим заполнением. Выбор модальных параметров, таких как характеристическое сопротивление, коэффициент связи, модальные напряжения и диэлектрические проницаемости, в качестве исходных данных для расчета позволяет оптимально синтезировать погонные параметры связанных линий с последующим определением геометрических размеров конструкции.

Ключевые слова: связанные линии, диэлектрическое заполнение, синтез, погонные параметры, модальные параметры, неоднородный диэлектрик, коэффициент связи.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-3-26-30

Моделированию связанных линий передачи (СЛ) посвящено достаточно много публикаций [1–14], в которых приводится обширное многообразие различных систем параметров, их описывающих, что требует вывода большого количества переходных соотношений и обусловлено теоретической и практической необходимостью.

В одной из последних работ [13] по моделированию неодинаковых связанных линий с неоднородным диэлектриком предлагались соотношения для синтеза погонных параметров по заданным модальным. Однако в ней остались «за кадром» соображения по выбору значений исходных данных. Изучение этой проблемы привело к необходимости вывода новых дополнительных формул, помогающих обосновать численные значения исходных модальных параметров, включая их физическую реализуемость, что и явилось мотивом написания данной статьи.

В большинстве случаев целью электрического синтеза СЛ являются шесть погонных параметров – три емкостных и три индуктивных, получаемых из заданных модальных параметров – импедансных и фазовых. Шесть модальных параметров, которые являются исходными данными для синтеза СЛ, здесь выбираются так: 1) характеристическое сопротивление Z_0 ; 2) коэффициент связи k ; 3) синфазное R_c и 4) противофазное R_π модальные числа напряжения; 5) синфазная ε_{rc} и 6) противофазная $\varepsilon_{r\pi}$ модальные диэлектрические проницаемости.

Коэффициенты связи, трансформации и симметрии

Вначале из системных соображений задаются физически реализуемые значения характеристического сопротивления Z_0 и коэффициента связи k . Это накладывает определённые ограничения на выбор следующих двух параметров – модальных чисел R_c и R_π , характеризующих напряжение. Следовательно, необходимо рассмотрение соотношений, влияющих на этот выбор.

Стартовыми являются три соотношения между следующими тремя взаимозависимыми коэффициентами: связи k , трансформации n и симметрии R_z . Все эти коэффициенты безразмерны, нормированы и приводятся к диапазону от нуля до единицы: $0 < (k; n; R_z) < 1$.

Сначала записывается формула для коэффициента симметрии R_z , определяемого отношением собственных частичных импедансов, а также зависящего от коэффициентов связи k и трансформации n :

$$R_z = \frac{Z_{2\pi}}{Z_{1\pi}} = \frac{Z_{22} - Z_{12}}{Z_{11} - Z_{12}} = \frac{n - k}{1/n - k}, \quad (1)$$

где $Z_{1\pi}, Z_{2\pi}$ – собственные 1-й и 2-й частичные импедансы элементов Т-образной эквивалентной схемы («звезда»); Z_{11}, Z_{22}, Z_{12} – элементы матрицы характеристических импедансов (волновых сопротивлений) связанных линий; $n = \sqrt{Z_{22}/Z_{11}}$ – коэффициент трансформации. При этом должны выполняться следующие условия физической реализуемости [4, 13]: $\min(n^{\pm 1}) > k$ или $\max(n^{\pm 1}) < 1/k$, т.е. необходимо, чтобы коэффициент понижающей трансформации всегда превышал коэффициент связи $0 \leq k < n \leq 1$. Отсюда, при полной связи ($k = 1$), когда линии «слипаются», трансформация импеданса невозможна ($k = n = 1$), а при отсутствии связи ($k = 0 < n$) возможна любая трансформация ($0 < n = \sqrt{R_z} \leq 1$), но без обмена энергией между линиями.

В большинстве практических решений используются связанные линии с идеальной симметрией ($R_z = 1$), где трансформация не предусмотрена ($n = 1$). И лишь при совмещении асимметрии и приемлемой межлинейной связи возникают условия для реальной трансформации. Принимая нормировку коэффициента трансформации, лежащей в диапазоне от нуля до единицы $0 < \min(n^{\pm 1}) < 1$ (понижающий трансформатор), находим, что со стремлением к асимметрии, с достижением нулевого коэффициента симметрии ($R_z \approx 0$), т.е. двойного экранирования [14] внутреннего проводника СЛ, возможна максимальная трансформация импеданса, ограниченная величиной связи ($n \approx k < 1$). Заметим, что большое трансформационное отношение, выражающееся малым значением коэффициента трансформации ($n \approx 0$) достижимо лишь при слабой связи ($k \approx 0$). Так, при коэффициенте трансформации, равном $n = \sqrt{2}$ (т.е. при 2-кратном отношении импедансов),

связь не должна превышать 3 дБ, а для обеспечения 10-кратного отношения межлинейных импедансов связь должна быть слабее 10 дБ [4, 13].

Зависимость для коэффициента симметрии $R_z = R_z(n, k)$ изображена на рис. 1.

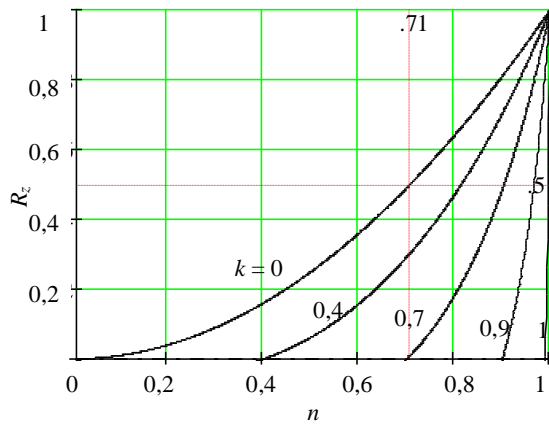


Рис. 1. Зависимость коэффициента симметрии $R_z = (0...1)$ от коэффициентов трансформации $n = (0...1)$ и связи $k = (0; 0,4; 0,7; 0,9; 1)$

Второе соотношение – зависимость коэффициента трансформации n от коэффициентов связи k и симметрии R_z – получаем, обращая формулу (1):

$$n = \sqrt{\frac{Z_{22}}{Z_{11}}} = \frac{(1-R_z)k}{2} + \sqrt{\left[\frac{(1-R_z)k}{2}\right]^2 + R_z}. \quad (2)$$

При условии двойного экранирования $R_z \approx 0$ выполняется равенство $n \approx k$. График зависимости коэффициента трансформации $n = n(R_z, k)$ от коэффициентов связи и симметрии показан на рис. 2.

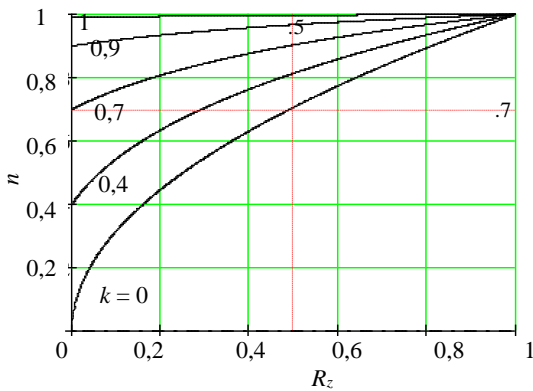


Рис. 2. Зависимость коэффициента трансформации $n = (0...1)$ от коэффициентов симметрии $R_z = (0...1)$ и связи $k = (0; 0,4; 0,7; 0,9; 1)$

Третье соотношение определяет коэффициент связи k , зависящий от коэффициентов симметрии R_z и трансформации n :

$$k = \frac{Z_{12}}{\sqrt{Z_{11}Z_{22}}} = \frac{R_z/n - n}{R_z - 1}. \quad (3)$$

Заметим, что эта формула является проверочной, так как при синтезе коэффициент связи обычно задан. В случае двойного экранирования $R_z \approx 0$ имеем $k \approx n$. График зависимости $k = k(R_z, n)$ приводится на

рис. 3, из которого видно, что условием сильной межлинейной связи ($k \rightarrow 1$) являются незначительная трансформация импеданса ($n \rightarrow 1$) и существенная асимметрия линий ($R_z \rightarrow 0$).

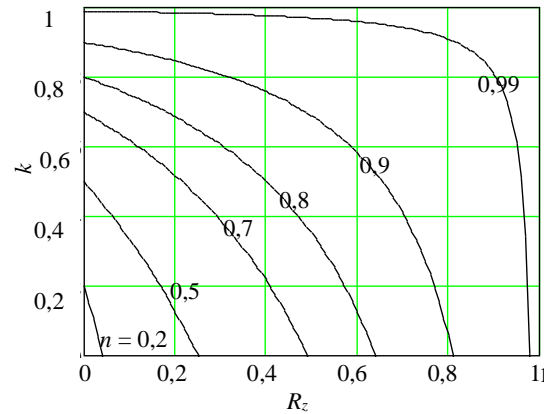


Рис. 3. Зависимость коэффициента связи $k = (0...1)$ от коэффициентов симметрии $R_z = (0...1)$ и трансформации $n = (0,2; 0,5; 0,7; 0,8; 0,9; 0,99)$

Противофазное и синфазное модальные числа

Необходимое для синтеза противофазное модальное число R_π можно найти, зная три параметра – синфазное число R_c , коэффициенты трансформации n и связи k

$$R_\pi = \frac{Z_{\pi 2}}{-R_c Z_{\pi 1}} = \frac{Z_{12} - Z_{22}/R_c}{Z_{11} - Z_{12}/R_c} = \frac{R_c k - n}{R_c/n - k} = -R_z \Big|_{R_c=1}. \quad (4)$$

В соразмерном случае, когда выполняется условие конгруэнтности $C_{01}/C_{02} = C(1)_{01}/C(1)_{02} = L_{02}/L_{01}$, впервые сформулированное Специале в [5], синфазное модальное число принимается равным единице $R_c = 1$, тогда противофазное число становится равным коэффициенту симметрии с противоположным знаком

$$R_\pi = -R_z = -Z_{2\pi}/Z_{1\pi} = -L_{02}/L_{01} = -C_{01}/C_{02} = -C(1)_{01}/C(1)_{02}. \quad (5)$$

Заметим, что условию конгруэнтности, т.е. соразмерности ($R_c = 1$), удовлетворяет около 90 % типов связанных линий это: соразмерно симметричные СЛ; все СЛ с однородным диэлектриком; часть несимметричных СЛ с неоднородным диэлектриком [1–6].

В случае импедансной симметрии, когда $Z_{11} = Z_{22}$, коэффициенты симметрии и трансформации равны единице ($R_z = n = 1$), т.е. при отсутствии трансформации получаем соотношение для R_π

$$R_\pi = \frac{k - n/R_c}{1/n - k/R_c} = \frac{k - 1/R_c}{1 - k/R_c} \Big|_{n=1} = \frac{R_c k - 1}{R_c - k} \Big|_{n=1}, \quad (6)$$

зависящее лишь от двух величин – синфазного модального числа R_c и коэффициента связи k . Следовательно, его можно отобразить на двумерном графике (рис. 4), который имеет разрывной характер; при этом $R_c > 0$; $R_\pi = (-\infty \dots \infty)$.

Важно заметить, что здесь в неоднородном диэлектрике ($\epsilon_{rc} \neq \epsilon_{r\pi}$) несоразмерная импедансная симметрия связанных линий при $R_c \neq 1$ и $R_z = 1$ не

сопровождается симметрией емкостного ($C_{11} \neq C_{22}$) и индуктивного ($L_{11} \neq L_{22}$) характера, как в обычном соразмерном случае, когда $R_c = 1$; $R_\pi = -R_z = -1$.

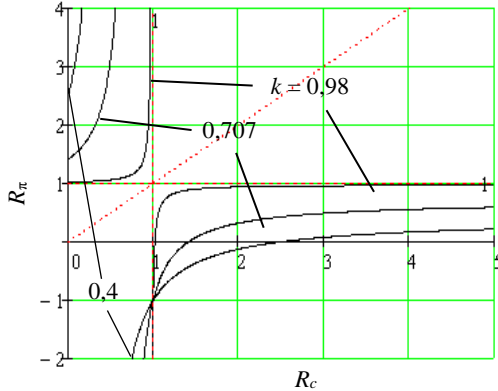


Рис. 4. Зависимость противофазного модального числа R_π от синфазного R_c при заданном коэффициенте связи $k = (0,4; 0,707; 0,98)$ в случае импедансной симметрии

Обратив формулы (4) и (6), получаем следующие аналогичные соотношения для синфазного модального числа R_c :

$$R_c = \frac{R_\pi k - n}{R_\pi / n - k} = \begin{cases} 1, & R_\pi = -R_z; \\ \frac{R_\pi k - 1}{R_\pi - k}, & n = 1. \end{cases} \quad (7)$$

При выводе представленных выше соотношений использовались зависимости элементов матрицы характеристических импедансов от характеристического сопротивления Z_0 , коэффициентов связи k и трансформации n [13]

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{12} & Z_{22} \end{bmatrix} = \frac{Z_0}{\sqrt{1-k^2}} \begin{bmatrix} 1/n & k \\ k & n \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Кроме того, применение следующего матричного соотношения [6, 7, 13]

$$\mathbf{U} = \mathbf{Z}\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ R_c & R_\pi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{12} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{c1}^{-1} & Z_{\pi 1}^{-1} \\ -Z_{c1}^{-1} R_\pi^{-1} & -Z_{\pi 1}^{-1} R_c^{-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

позволило получить формулы для модальных чисел – синфазного R_c и противофазного R_π , а также два импедансных соотношения, соответствующих случаю, когда оба модальных числа могут одновременно быть положительными, т.е. $(R_c; R_\pi) > 0$:

$$\begin{aligned} Z_{c1} &= Z_{11} - Z_{12}/R_\pi; \\ Z_{\pi 1} &= Z_{11} - Z_{12}/R_c. \end{aligned} \quad (10)$$

Физическая реализуемость модальных диэлектрических проницаемостей

В заключение проверяем физическую реализуемость выбранных значений модальных диэлектрических проницаемостей ε_{rc} и $\varepsilon_{r\pi}$. Они всегда должны быть больше единицы $\varepsilon_{rc} > 1$ и $\varepsilon_{r\pi} > 1$, чтобы скорости волн в линиях не превышали скорости света. С другой стороны, отношения модальных скоростей и

диэлектрических проницаемостей не должны быть больше максимальных значений, допустимых в расчетной структуре. При этом существенно превышающее единицу отношение возможно лишь в сильно связанных линиях, а в слабо связанных оно близко к единице, т.е.

$$\begin{aligned} 1 < \max \left[\left(\frac{v_c}{v_\pi} \right)^{\pm 1} \right] &= m < m_{\max}; \\ 1 < \max \left[\left(\frac{\varepsilon_{r\pi}}{\varepsilon_{rc}} \right)^{\pm 1} \right] &= m^2 < m_{\max}^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Когда заданное отношение модальных диэлектрических проницаемостей становится максимальным m_{\max}^2 , тогда значение одного из частичных погонных параметров СЛ – L_{01} , L_{12} , C_{01} , C_{02} , C_{12} опускается до нуля, становясь физически нереализуемым. Максимально допустимое/достижимое отношение модальных скоростей m_{\max} и диэлектрических проницаемостей m_{\max}^2 определяется отношением модальных импедансов каждой из линий $m_1 = Z_{c1}/Z_{\pi 1} = Z_{c2}/Z_{\pi 2}$ и парой модальных чисел R_c и R_π следующим образом:

$$\begin{aligned} m_{\max}^2 &= \min(m_1^2, m_2^2, m_3^2) = \min \left\{ \left(\frac{Z_{c1}}{Z_{\pi 1}} \right)^2; \dots \right. \\ &\left. \dots; \left(\frac{R_\pi - 1}{R_c - 1} \cdot \frac{Z_{\pi 1}}{Z_{c1}} \right)^2; \left(\frac{1/R_\pi - 1}{1/R_c - 1} \cdot \frac{Z_{\pi 1}}{Z_{c1}} \right)^2 \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

При этом

$$\begin{aligned} m_1^2 &= \max \left[\left(\frac{\varepsilon_{r\pi}}{\varepsilon_{rc}} \right)^{\pm 1} \right]_{L_{12}=0}^{C_{12}=0} = \left(\frac{Z_{c1}}{Z_{\pi 1}} \right)^2; \\ m_2^2 &= \max \left[\left(\frac{\varepsilon_{r\pi}}{\varepsilon_{rc}} \right)^{\pm 1} \right]_{L_{02}=0}^{C_{01}=0} = \left(\frac{R_\pi - 1}{R_c - 1} \cdot \frac{Z_{\pi 1}}{Z_{c1}} \right)^2; \\ m_3^2 &= \max \left[\left(\frac{\varepsilon_{r\pi}}{\varepsilon_{rc}} \right)^{\pm 1} \right]_{L_{01}=0}^{C_{02}=0} = \left(\frac{1/R_\pi - 1}{1/R_c - 1} \cdot \frac{Z_{\pi 1}}{Z_{c1}} \right)^2. \end{aligned} \quad (13)$$

Отношение модальных импедансов для каждой из линий $Z_{c1}/Z_{\pi 1} = Z_{c2}/Z_{\pi 2}$ выражается через коэффициент связи k и модальные числа R_c и R_π ($R_\pi < 0 < R_c$) следующим образом:

$$\frac{Z_{c1}}{Z_{\pi 1}} = \frac{Z_{c2}}{Z_{\pi 2}} = X \pm \sqrt{X^2 - 1} = \exp[\text{Arch}(X)], \quad (14)$$

$$\text{где } X = \frac{1 - k^2 (R_c/R_\pi + R_\pi/R_c)/2}{1 - k^2}.$$

Важно заметить, что существует ещё одна форма того же импедансного отношения, полученная из (9). Она справедлива и в том случае, когда оба модальных числа положительны, т.е. $(R_\pi; R_c) > 0$:

$$\frac{Z_{c1}}{Z_{\pi 1}} = \frac{Z_{c2}}{Z_{\pi 2}} = \frac{Z_{11} - Z_{12}/R_{\pi}}{Z_{11} - Z_{12}/R_c} = \frac{1 - kn/R_{\pi}}{1 - kn/R_c}, \quad (15)$$

где

$$n = \sqrt{\frac{Z_{22}}{Z_{11}}} = \frac{(R_c + R_{\pi})k}{2} \pm \sqrt{\left[\frac{(R_c + R_{\pi})k}{2}\right]^2 - R_c R_{\pi}}$$

коэффициент трансформации.

При этом коэффициенты связи k и трансформации n соотносятся известным образом: $0 < k < n < 1$. В соразмерном (конгруэнтном [5]) случае, когда $R_c = 1$, имеет место равенство $R_{\pi} = -R_z$, следовательно, зависимости (14) и (15) упрощаются, и их становится возможным отобразить графически (рис. 5).

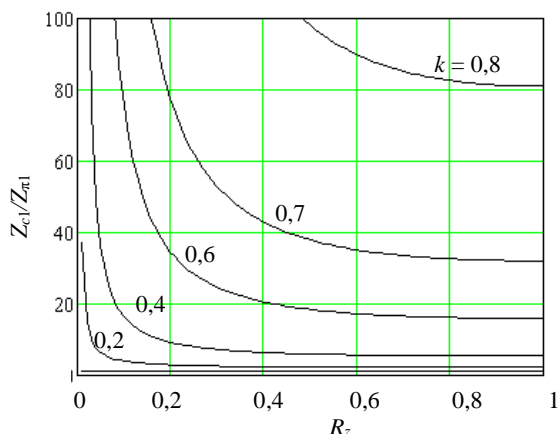


Рис. 5. Зависимость отношения модальных импедансов $Z_{c1}/Z_{\pi 1}$ от коэффициентов симметрии $R_z = (0 \dots 1)$ и связи $k = (0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,7; 0,8)$ при $R_c = 1$

Из соотношений (14) и (15), а также из соответствующих графиков (см. рис. 5) видно, что рост отношения модальных импедансов $Z_{c1}/Z_{\pi 1}$, а значит, и отношения модальных скоростей v_c/v_{π} , обусловливается ростом асимметрии ($R_z \rightarrow 0$) и связи ($k \rightarrow 1$) между линиями передачи.

Заключение

Представлены новые формулы для модальных параметров, сопровождаемые графиками, необходимые для синтеза неодинаковых СЛ, как с однородным, так и с неоднородным диэлектрическим заполнением. Выбор рассмотренных модальных параметров в качестве исходных при расчете СЛ дает аналитическую возможность оптимально синтезировать погонные параметры с последующим определением геометрических размеров конструкции.

Предложенные формулы используются в составе математического обеспечения новых компьютерных программ AsymH [15] и ParamApp для расчета неодинаковых связанных линий с однородным и неоднородным диэлектриком соответственно.

Литература

1. Влостовский Е.Г. К теории связанных линий передачи // Радиотехника. – 1967. – Т. 22, № 4. – С. 28–35.
2. Фельдштейн А.Л. Синтез четырёхполюсников и восьмиполусников на СВЧ / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич. – 2-е изд. – М.: Связь, 1971. – 399 с.

3. Pipes L.A. Matrix theory of multiconductor transmission lines // Phil. Magazine, 1937. – Vol. 24, July. – P. 97–113.

4. Cristal E.G. Coupled-transmission-line directional couplers with coupled lines of unequal characteristic impedances // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – 1966. – Vol. MTT-14, No. 7. – P. 337–346.

5. Speciale R. Even- and odd-mode for nonsymmetrical coupled lines in inhomogeneous media // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – 1975. – Vol. MTT-23, No. 11. – P. 897–908.

6. Marx K.D. Propagation modes, equivalent circuits, and characteristic termination for multiconductor transmission lines with inhomogeneous dielectrics // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – 1973. – Vol. MTT-21, No. 7. – P. 450–457.

7. Tripathi V.K. Asymmetric coupled transmission lines in an inhomogeneous medium // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – 1975. – Vol. MTT-23, No. 9. – P. 734–739.

8. Малютин Н.Д. Матричные параметры неодинаковых связанных полосковых линий с неоднородным диэлектриком // Радиотехника и электроника. – 1976. – Т. 21, № 12. – С. 2473–2478.

9. Tsai C. A generalized model for coupled lines and its applications to two-layer planar circuits / C. Tsai, K.C. Gupta // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – 1992. – Vol. MTT-40, No. 12. – P. 2190–2199.

10. Mongia R. RF and microwave coupled-line circuits / R. Mongia, I.J. Bahl, P. Bhartia, J. Hong. – Ed. 2-nd. – Boston, London: Artech House, 2007. – 549 p.

11. Сычев А.Н. Системы параметров одинаковых связанных линий с неуравновешенной электромагнитной связью / А.Н. Сычев, С.М. Стручков // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 1 (31). – С. 39–50.

12. Сычев А.Н. Синтез идеального фазового отношения для ответвителей на связанных линиях по заданному типу направленности / А.Н. Сычев, С.М. Стручков, Н.Ю. Рудый // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 15–18.

13. Сычев А.Н. Параметры несимметричных связанных линий с неоднородным диэлектриком / А.Н. Сычев, Н.Ю. Рудый // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 4-1. – С. 7–15.

14. Сычев А.Н. Анализ и синтез несимметричных связанных линий в однородной диэлектрической среде // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 11–19.

15. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019619406. AsymH / Авторы-правообладатели: А.Н. Сычев, В.А. Бондарь, К.Б.-Б. Дагба, А.И. Степанюга, Р.А. Калменов. – Заявка № 2019616059, поступ.: 27.05.2019, опубли.: 17.07.2019, Бюл. № 7 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/PrEVM/RUNWPR/000/002/019/619/406/2019619406-00001/document.pdf> (дата обращения: 20.09.2020).

Сычев Александр Николаевич

Д-р техн. наук, профессор каф. компьютерных систем в управлении проектировании (КСУП) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, 634050, Россия
ORCID 0000-0002-4079-4605
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: ans@main.tusur.ru

Анисимов Валерий Валерьевич

Магистрант каф. КСУП ТУСУР
Ленина пр-т, 40, г. Томск, 634050, Россия
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: muternatallia@gmail.com

Бондарь Владислав Андреевич

Студент каф. КСУП ТУСУР
Ленина пр-т, 40, г. Томск, 634050, Россия
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: vladuxexel@gmail.com

Дагба Кежик Байыр-Белекович

Студент каф. КСУП ТУСУР
Ленина пр-т, 40, г. Томск, 634050, Россия
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: thiswhitenike@gmail.com

Степаниюга Антон Игоревич

Студент каф. КСУП ТУСУР
Ленина пр-т, 40, г. Томск, 634050, Россия
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: ganeball9799@mail.ru

Sychev A.N., Anisimov V.V., Bondar V.A.,
Dagba K.B.-B., Stepanyuga A.I.

Modal parameters of unequal coupled lines

New formulas and graphs for modal parameters are given, which are necessary for the synthesis of unequal coupled lines with arbitrary dielectric filling. The choice of modal parameters, such as characteristic impedance, coupling coefficient, modal voltages and dielectric constants, as initial data for the calculation allows optimal synthesis of the coupled line parameters, and followed determination of the geometric dimensions of the structure.

Keywords: coupled lines, dielectric filling, synthesis, P.U.L. parameters, modal parameters, inhomogeneous dielectrics, coupling coefficient.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-3-26-30

References

1. Vlostovskiy E.G. Theory of coupled transmission lines, *Telecommun. Radio Eng.*, 1967, vol. 21, Apr., pp. 87–93.
2. Fel'dstein A.L., Yavich L.R. *Sintez chetyrekhpolusnikov i vos'mipolusnikov na SVCH* [Synthesis of two-port and four-port networks on the microwaves], Ed. 2-nd, Moscow: Svyaz' Publ., 1971, 336 p. (in Russ.).
3. Pipes L.A. Matrix theory of multiconductor transmission lines, *Phil. Magazine*, 1937, vol. 24, July, pp. 97–113.
4. Cristal E.G. Coupled-transmission-line directional couplers with coupled lines of unequal characteristic impedances, *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, 1966, vol. 14, no. 7, pp. 337–346.
5. Speciale R. Even- and odd-mode for nonsymmetrical coupled lines in nonhomogeneous media, *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, 1975, vol. 23, no. 11, pp. 897–908.
6. Marx K.D. Propagation modes, equivalent circuits, and characteristic terminations for multiconductor transmission lines with inhomogeneous dielectrics, *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, 1973, vol. 21, no. 7, pp. 450–457.
7. Tripathi V.K. Asymmetric coupled transmission lines in an inhomogeneous medium, *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, 1975, vol. 23, no. 9, pp. 734–739.
8. Malyutin N.D. Matrichnyye parametry neodnorodnykh svyazannykh poloskovykh liniy s neodnorodnym

dielektrikom [Matrix parameters of unequal coupled striplines with inhomogeneous dielectrics], *Radio-engineering and electronics*, 1976, vol.21, no. 12, pp. 2473–2478 (in Russ.).

9. Tsai C., Gupta K.C. A generalized model for coupled lines and its applications to two-layer planar circuits, *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, 1992, vol. 40, no. 12, pp. 2190–2199.

10. Mongia R., Bahl I.J., Bhartia P., Hong J. *RF and microwave coupled-line circuits*, Ed. 2-nd, Boston, London: Artech House, 2007. 549 p.

11. Sychev A.N., Struchkov S.M. Parameter sets of the uniform coupled transmission lines with unbalanced electromagnetic coupling, *Proceedings of TUSUR University*, 2014, no. 1 (31), pp. 39–50 (in Russ.).

12. Sychev A.N., Struchkov S.M., Rudyi N.Yu. Synthesis of an ideal phase ratio for a coupled-line coupler with a given type of directionality, *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 15–18 (in Russ.).

13. Sychev A.N., Rudyi N.Y., Parameters of asymmetric coupled lines with inhomogeneous dielectrics, *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 4-1, pp. 7–15 (in Russ.).

14. Sychev A.N. Analysis and synthesis of asymmetric coupled lines in a homogeneous dielectric medium, *Proceedings of TUSUR University*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 11–19 (in Russ.).

15. Certificate of state registration of a computer program № 2019619406. AsymH. Copyright: A.N. Sychev, V.A. Bondar, K.B.-B. Dagba, A.I. Stepanyuga, R.A. Kalmenov. Appl. no. 2019616059, filed May 27, 2019, publ. July 17, 2019. Bul. no. 7. [Online]. Available at: <https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/PrEVM/RUNWPR/000/002/019/619/406/2019619406-00001/document.pdf> (Accessed: September 20, 2020).

Aleksandr N. Sychev

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Department of Computer Systems, Tomsk State
University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, 634050, Russia
ORCID 0000-0002-4079-4605
Phone: +7 (382-2) 41-47-17
Email: ans@main.tusur.ru

Valery V. Anisimov

Student, Department of Computer Systems TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, 634050, Russia
Phone: +7 (382-2) 41-47-17
Email: muternatallia@gmail.com

Vladislav A. Bondar

Student, Department of Computer Systems TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, 634050, Russia
Phone: +7 (382-2) 41-47-17
Email: vladuxexel@gmail.com

Kezhik B.-B. Dagba

Student, Department of Computer Systems TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, 634050, Russia
Phone: +7 (382-2) 41-47-17
Email: thiswhitenike@gmail.com

Anton I. Stepanyuga

Student, Department of Computer Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, 634050, Russia
Phone: +7 (382-2) 41-47-17
Email: ganeball9799@mail.ru