

свідчить про те, що запропоновані моделі дають точніші результати моделювання гучномовців в смузі нижніх частот, що особливо важливо для процесу проектування їх акустичного оформлення. Застосування запропонованих моделей гучномовців в системах схемотехнічного моделювання дозволить проводити аналіз електронної звуковідтворювальної апаратури загалом.

1.Алдошина И. А., Войшвилло А. Г. *Высококачественные акустические системы и излучатели.* — М.: Радио и связь, 1985. 2.Алдошина И. А. *Электродинамические громкоговорители.* — М.: Радио и связь, 1989. 3.Сапожков М. А. *Электроакустика: Учебник для вузов.* — М.: Связь, 1978. 4.Римский-Корсаков А. В. *Электроакустика.* — М.: Связь, 1973. 5.Вахитов Я. Ш. *Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура: Учебное пособие для вузов.* — М.: Искусство, 1982.

УДК 621.396.67

Є.І. Яковенко

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра РЕПС

ДО ПИТАНЬ ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОСМУЖКОВИХ БАГАТОЛАНКОВИХ НАПРЯМЛЕНИХ ВІДГАЛУЖУВАЧІВ

© Яковенко Є.І., 2003

Розроблений алгоритм та програма для проектування мікросмужкових багатоланкових напрямлених відгалужувачів з розподіленим електромагнітним зв'язком.

The alorythm and the programm for microstrip multisectional directional couplers design were elaborated.

Напрявлені відгалужувачі (НВ) — це чотириплечі взаємні пристрої, що призначені для напрямленого відводу частини НВЧ потужності з одного (основного 1—3) каналу в інший (допоміжний 2—4) (рис. 1). Чотириплечий пристрій має властивість напрямленості, якщо при збудженні одного плеча, наприклад 1, одне з решти трьох, наприклад 4, залишається незбудженим.

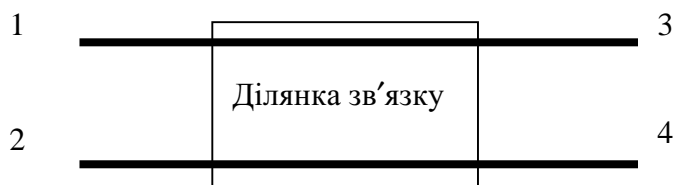


Рис.1. Структура напрямленого відгалужувача

Основними характеристиками таких 4-плечих пристроїв є: робоче загасання, перехідне послаблення С, напрямленість та розв'язання плечей. Крім цих параметрів, в технічному завданні на напрямлені відгалужувачі зазвичай вказуються: нерівномірність

характеристики перехідного послаблення ΔC і широкосмуговість v , що визначається через відношення верхньої та нижньої частоти робочого діапазону.

За типом зв'язку між основним та допоміжним каналами НВ поділяються на: НВ з розподіленим електромагнітним зв'язком, НВ зі зв'язком шлейфного типу, НВ з ємнісним зв'язком. З перерахованих пристроїв НВ з розподіленим електромагнітним зв'язком забезпечують найбільшу широкосмуговість, але їх проектування є найскладнішим.

Описана в літературі методика проектування спирається на вирішену проблему синтезу НВ за заданими характеристиками [1], що дає можливість визначити величину зв'язку для окремих ланок багатоланкового НВ. На наступному етапі проектування використовуються табульовані значення параметрів мікросмужкової структури, одержані на основі теорії зв'язаних ліній [2,3]. Основні недоліки такої методики полягають у значних витратах часу на виконання розрахунків, неможливості використання всієї номенклатури підшарків за ОСТ4.023.000, незавершеності розрахунків, оскільки питання необхідної точності виконання друкованої мікросмужкової структури залишаються поза увагою проектанта.

Мета даної роботи полягає в усуненні вказаних недоліків завдяки використанню математичного моделювання на базі пакета прикладних математичних програм MATHCAD. Для цього були розроблені алгоритм та програма, що дозволяють здійснювати проектування багатоланкових мікросмужкових НВ — як несиметричних (рис.2, а), так і симетричних (рис.2, б).

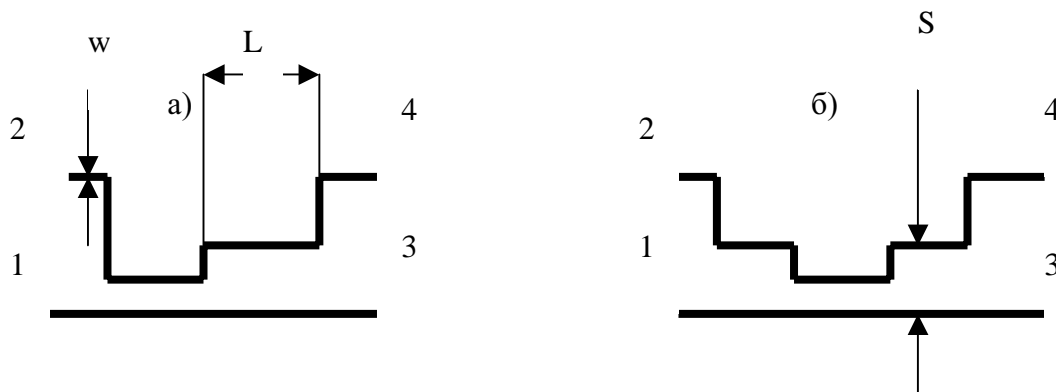


Рис.2. Багатоланкові мікросмужкові напрямлені відгалужувачі

За розробленим алгоритмом на першому етапі проектування вибирається підшарок відповідно до рекомендацій ОСТ4.023.000 і у програму вводиться товщина підшарку H та його діелектрична проникність ϵ . Для заданого хвильового опору Z_x визначається ширина мікросмужкової лінії (МСЛ) w , а також розраховуються довжина хвилі в лінії Λ для середньої частоти робочого діапазону і довжина секції $L = \Lambda / 4$ [2, 3].

На другому етапі проектування за значеннями параметрів C , ΔC та v згідно з рекомендаціями [1] вибирається кількість ланок НВ n і встановлюється перехідне послаблення для кожної з них: $C_1, C_2 \dots C_n$. Тип НВ, симетричний чи несиметричний, вибирається залежно від додаткових вимог: якщо різниця фаз хвиль на виходах плечей 3 та 4 в робочому діапазоні частот повинна бути постійною і дорівнювати $\pi / 2$, то вибирається симетричний НВ, інакше — несиметричний.

Наступний етап проектування полягає у визначенні конструктивних параметрів робочої частини НВ і включає в себе такі пункти:

— розрахунок коефіцієнтів зв'язку ланок:

$$Kz_n = 10^{-\frac{C_n}{10}} \quad (1)$$

— визначення характеристичних опорів зв'язаних ліній з парним Z_e та непарним Z_o видами коливань для кожної з ланок:

$$Z_{e_n} = Z_x \cdot \sqrt{\frac{1+Kz_n}{1-Kz_n}} \quad Z_{o_n} = Z_x \cdot \sqrt{\frac{1-Kz_n}{1+Kz_n}} \quad (2)$$

— обчислення нормованих значень зазорів в кожній ланці:

$$s_n = \left| \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left\{ \ln \left[\operatorname{th} \left(15 \cdot \pi^2 \cdot \varepsilon^{-0.5} \cdot \left(\frac{1}{Z_{o_n}} - \frac{1}{Z_{e_n}} \right) \right) \right] \right\} \right| \quad (3)$$

— розрахунок нормованих значень ширини смужкових ліній ланок:

$$w_n = \frac{30 \cdot \pi}{Z_{e_n} \cdot \sqrt{\varepsilon}} + \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left[\frac{\pi}{2} \cdot \operatorname{ch} \left(\pi \cdot \frac{S_n}{2} \right) \right], \quad (4)$$

— визначення конструктивних параметрів робочої частини НВ:

$$S_n = s_n \cdot H, \quad W_n = w_n \cdot H, \quad (5)$$

— знаходження мінімального та максимального перехідного послаблення у відносних одиницях:

$$C_{\min} = C - \Delta C, \quad C_{\max} = C + \Delta C, \quad A = 10^{\frac{C_{\min}}{10}}, \quad B = 10^{\frac{C_{\max}}{10}}, \quad (6)$$

— обчислення параметрів частотної характеристики напрямленого відгалужувача:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{|B-1|}}, \quad h = \sqrt{\left| \frac{1}{B-1} - \frac{1}{A-1} \right|}, \quad p = \left(\frac{h}{\beta} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (7)$$

— розрахунок частотної характеристики перехідного послаблення НВ:

$$C(f) = 10 \cdot \lg \left[\beta^2 - h^2 \cdot \left(\frac{\cos(\Theta(f))}{p} \right)^{2 \cdot n} \right], \quad \text{дБ}, \quad (8)$$

де $\Theta(f) = 2 \cdot \pi \cdot \frac{L}{\Lambda(f)}$ — фазовий зсув хвилі на одній секції НВ на заданій частоті f .

Кінцевий етап проектування НВ полягає у визначенні необхідної точності виконання друкованих елементів, що дозволяє правильно вибирати технологію. В роботі [4] був розглянутий вплив конструктивно-технологічних допусків на зміну хвильових опорів зв'язаних мікросмужкових ліній, однак для напрямлених відгалужувачів одним з основних параметрів є перехідне послаблення. Автором цієї роботи були одержані вирази для визначення коефіцієнтів чутливості перехідного послаблення до зміни конструктивних параметрів і розроблена наступна методика оцінки необхідної точності виконання друкованої плати:

— встановлення допустимих відхилень конструктивних параметрів ΔW , ΔS та $\Delta \varepsilon$, виходячи з можливостей сучасних технологій виробництва друкованих плат та нормативних документів на підшарки — ОСТ4.023.000, ОСТ4 ГО.054.008,

— обчислення значень коефіцієнтів чутливості за виразами:

$$\Psi = \frac{30 \cdot \pi^2}{Z_x \cdot \sqrt{\epsilon}} \cdot \frac{Kz}{\sqrt{1 - Kz^2}}, \quad G_s = (1 - Kz^2) \cdot \frac{\text{sh}(2 \cdot \Psi)}{2 \cdot \Psi}, \quad G_e = \frac{1 - Kz^2}{2}, \quad G_w = G_e, \quad (9)$$

де G_s , G_e , G_w — коефіцієнти чутливості перехідного послаблення до зміни зазору між смужками, коливань діелектричної проникності підшарку та ширини смужкового провідника на ділянці зв'язку відповідно. Розрахунок коефіцієнтів чутливості виконується для найгіршого випадку: максимального коефіцієнта зв'язку Kz (мінімального зазору S),

— оцінка результуючої відносної зміни коефіцієнта зв'язку, що викликана відхиленнями всіх конструктивних параметрів, з імовірністю 0.99:

$$\delta = 3.1 \cdot \sqrt{\left(G_s \cdot \frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(G_e \cdot \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}\right)^2 + \left(G_w \cdot \frac{\Delta W}{W}\right)^2}, \quad (10)$$

— визначення відповідної зміни перехідного послаблення НВ:

$$\Delta C_k = \frac{\delta}{\ln\left(\frac{1}{\delta}\right)}, \quad \text{дБ}, \quad (11)$$

— з порівняння параметрів ΔC та ΔC_k робляться висновки щодо доцільності підвищення або зниження технологічних вимог.

Для перевірки програми були проведені тестові розрахунки НВ, виконаного на підшарку з полікора з такими параметрами: $H = 1$ мм, $\epsilon = 9.8 \pm 0.1$. За вихідні дані були прийняті: середня частота робочого діапазону $f = 5$ ГГц, широкосмуговість ν не менше 2, перехідне послаблення 10 дБ, допустимі зміни перехідного послаблення в робочому діапазоні частот $\Delta C = 0.5$ дБ, фазовий зсув хвиль на виходах НВ не регламентований, вхідний опір 50 Ом. За цими даними згідно з рекомендаціями [1] був вибраний несиметричний дволанковий НВ з перехідним послабленням для першої ланки $C_1 = 8.53$ дБ, для другої ланки $C_2 = 23.63$ дБ. Виконані за програмою розрахунки дали наступні результати: ширина смужкової лінії $w = 1.01$ мм, ширина смужок першої секції $W_1 = 0.684$ мм, другої — $W_2 = 0.932$ мм, зазор в першій секції $S_1 = 0.213$ мм, в другій — $S_2 = 0.765$ мм, довжини секцій $L = 5.782$ мм. Розрахована частотна характеристика перехідного послаблення НВ подана на рис. 3.

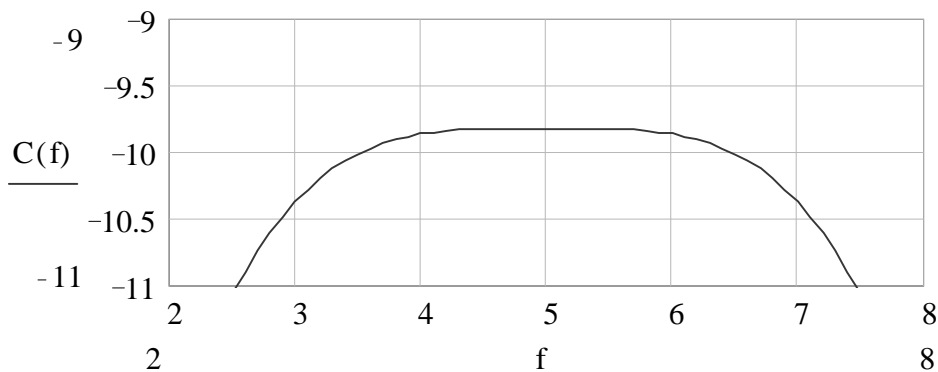


Рис.3. Частотна характеристика перехідного послаблення напрямленого відгалужувача

Для прийнятих допусків на конструктивні параметри : $\Delta W = 0.02$ мм, $\Delta S = 0.02$ мм, $\Delta \epsilon = 0.1$ зміна перехідного послаблення з імовірністю 0.99 не перевищує 0.25 дБ.

Процес проектування НВ завершується розробкою відповідної графічної документації. Її приклад поданий на рис. 4.

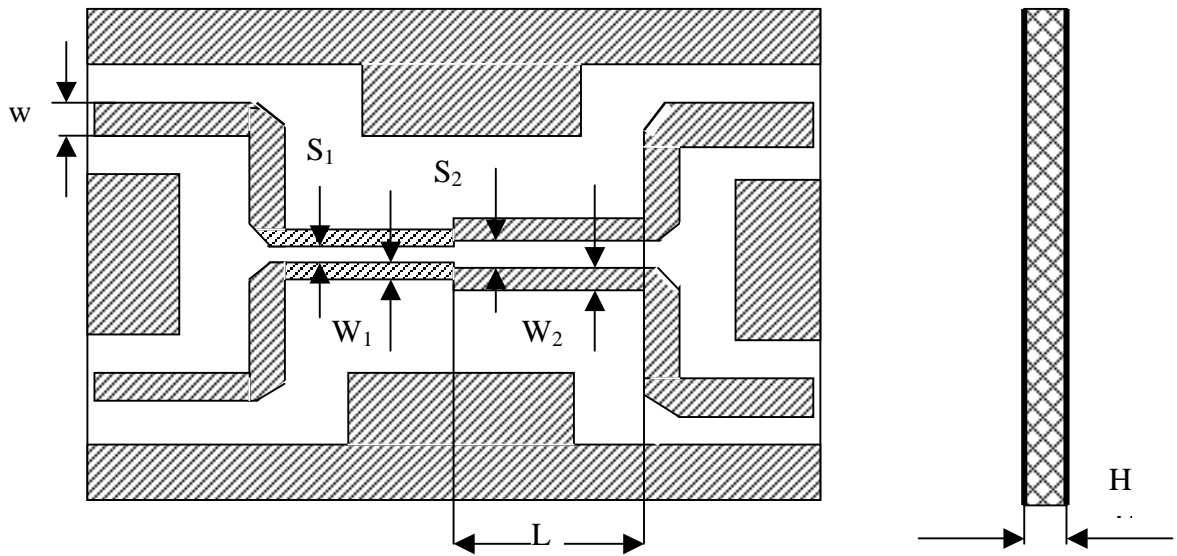


Рис. 4. Плата напрямленого відгалужувача

На кресленні показані тільки ті розміри, що визначають електричні характеристики НВ. Зазори між смужковими та екрануючим провідниками, конфігурація та розміри згинів мікросмужкових ліній та інші елементи друкованої схеми виконуються відповідно до рекомендацій ОСТ 4 ГО.710.001.

Порівняння результатів тестового розрахунку НВ з наведеними в літературі теоретичними та експериментальними даними виявило їх збіжність у межах точності математичних моделей зв'язаних мікросмужкових ліній.

Розроблену методику і програму розрахунку мікросмужкових багатоланкових напрямлених відгалужувачів можна рекомендувати для виконання проектних робіт на виробництві та в навчальному процесі.

1. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ. – М.: Связь, 1971. 2.Справочник по элементам полосковой техники / Под ред. А.Л.Фельдштейна. — М.: Связь, 1979. 3. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / Под ред. В.И.Вольмана. — М.: Радио и связь, 1983. 4. Бушминский И.П., Морозов Г.В..Технология гибридных интегральных схем СВЧ. — М.: Высшая школа, 1980.