

Особенности эквивалентных преобразований сопротивлений схем треугольника и звезды в П- и Т-образных фильтровых структурах

А.В. Баранов, А.Л. Козиков

АО «НПП «Салют»
603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород
ул. Ларина, 7

В П- и Т-образных фильтровых структурах отмечены особенности эквивалентных преобразований сопротивлений их схем треугольника и звезды, которые необходимо учитывать в процессе выполнения задач фильтрации и при разработке резонансных систем автогенераторов. Определены физические ограничения параметров схем, которые приводят к этим особенностям. Установлены частоты, при которых рассмотренные эквивалентные преобразования справедливы.

Ключевые слова: П- и Т-образные фильтровые структуры, эквивалентные преобразования сопротивлений треугольных и звездообразных схем.

Известные эквивалентные преобразования П- и Т-образных фильтровых (или фильтрующих) структур используются как при решении традиционных задач фильтрации, так и для достижения других технических целей. Например, взаимные эквивалентные преобразования указанных структур, основанные на равенстве элементов их [A]-матриц передач или волновых [S]-матриц [1; 2], применяются при разработке цепей согласования сопротивлений стандартных трактов с входными и выходными импедансами транзисторов в усилителях мощности [3]. Между тем в типовых задачах фильтрации требуется обеспечить заданную частотную характеристику фильтра при минимальном числе его физически реализуемых элементов [4]. Обычно для этой цели применяются эквивалентные преобразования дуальных вариантов фильтров – прототипов низких частот, построенных на основе нескольких звеньев, каждое из которых описывается с помощью эквивалентных схем с табличными параметрами элементов g_k либо в виде П-образной схемы на рис. 1, либо в виде дуальной Т-образной схемы на рис. 2 [3; 5]. В рассматриваемых схемах фильтров – прототипов низких частот используются одинаковые по величине, но отличающиеся по знаку реактивные нормированные сопротивления элементов g_k , которые описываются безразмерными величинами, в одном случае, индуктивностей последовательных

катушек, а в другом – емкостей параллельных конденсаторов, где $k = 1, 2, \dots, n$, а n – общее число реактивных элементов схем. Буквой g_0 на рис. 1 и 2 обозначены нормированные сопротивления генератора, если g_1 соответствует емкостному элементу и проводимости генератора, если величине g_1 соответствует индуктивный элемент. Кроме того, на рис. 1 и 2 буквой g_{n+1} обозначены нормированные сопротивления нагрузки, если g_n соответствует емкостному элементу и проводимости нагрузки, если величине g_n соответствует индуктивный элемент. Фильтры, в которых величины n четные, представлены на рис. 1 и 2, а. Фильтры с нечетными n оканчиваются элементами на рис. 1 и 2, б и являются симметричными устройствами. Используя полученные для фильтров – прототипов низких частот параметры g_k , с помощью частотного преобразования определяются значения нормированных параметров элементов сначала электрической, а затем и конструктивной схем фильтра [4]. В результате на основе эквивалентных преобразований фильтров – прототипов, описываемых параметрами g_k , реализуются разные типы фильтров.

При проектировании резонансных систем автогенераторов и генераторов, управляемых напряжением, широко используются П- и Т-образные фильтровые структуры, способы построения которых принципиально отличаются от традиционных приемов разработки филь-

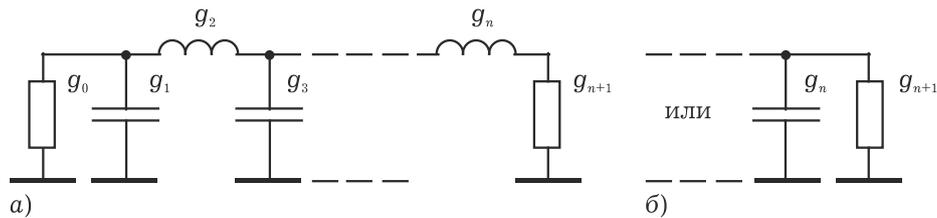


Рис. 1

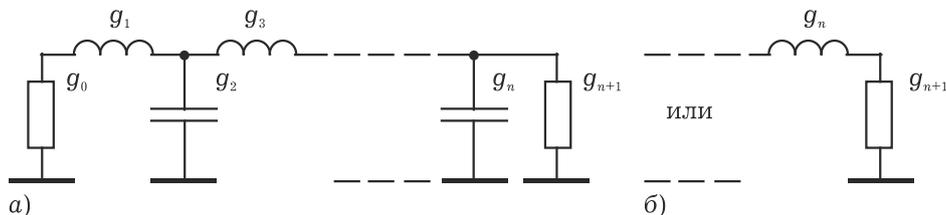


Рис. 2

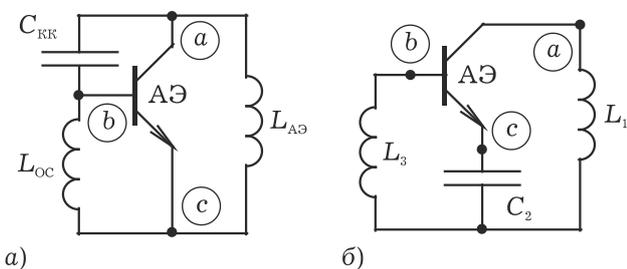


Рис. 3

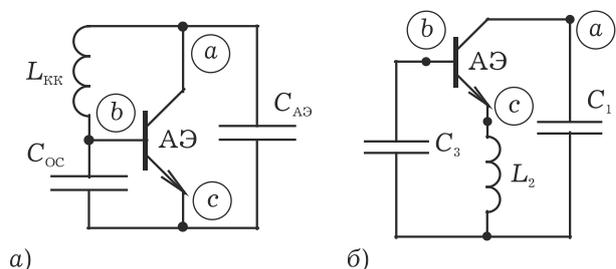


Рис. 4

тров [6; 7]. В данных случаях обычно применяются эквивалентные преобразования треугольника сопротивлений в звезду и, наоборот, сопротивлений звезды в треугольник [7; 8].

Несмотря на то что П- и Т-образные фильтровые структуры достаточно хорошо исследованы [1–5], особенно при решении задач фильтрации, вопросы эквивалентных преобразований импедансов в треугольных и звездообразных схемах этих структур не рассматривались. Цель статьи – изучить особенности указанных эквивалентных преобразований как в процессе выполнения задач фильтрации, так и при проектировании резонансных систем автогенераторов.

В первом случае применим эквивалентные преобразования сопротивлений в треугольных и звездообразных схемах при проектировании резонансных систем трехточечных автогенераторов. Поскольку необходимым условием работы любого генераторного устройства является вполне определенные способы подключения к электродам транзистора трех реактивных элементов, рассмотрим на рис. 3 и 4 типовые [9] (а) и синтезированные в работе [8] (б) обобщенные эквивалентные трехточечные схемы автогенераторов. Элементы всех схем предполагаются чисто реактивными, то есть применяются лишь

емкости $C_1, C_2, C_3, C_{OC}, C_{KK}, C_{AЭ}$ и индуктивности $L_1, L_2, L_3, L_{OC}, L_{KK}, L_{AЭ}$ (или эквивалентные емкости или индуктивности соответствующих идеальных контуров, подключенных к электродам транзистора). Так же, как и в работе [8], для обозначения словосочетаний «активный элемент», «обратная связь» и «колебательный контур» использованы индексы «АЭ», «ОС» и «КК». А для замены слов: «коллектор», «база» и «эмиттер транзисторов» на рисунках под буквой б применены цифры «1», «2» и «3». В представленных трехточечных схемах генераторов соответствующие точки обозначены буквами а, б и с. Неотмеченные точки в звездообразных трехточечных схемах генераторов являются центральными точками звезды. Схемы устройств на рис. 3 и 4 представляют собой треугольные (а) и звездообразные (б) трехточечные схемы генераторов, которые в зарубежной литературе [10] называют, соответственно, автогенераторами с параллельной и последовательной обратной связью.

Из условий эквивалентности электрических цепей на рис. 3 и 4, а и б, когда на участках, ограниченных точками а, б и с, токи и напряжения остаются неизменными, следует, что величины комплексных импедансов элементов схем связаны известными соотношениями [11]

для преобразования треугольника сопротивлений $\dot{Z}_{AЭ}, \dot{Z}_{КК}, \dot{Z}_{ОС}$ в звезду $\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dot{Z}_3$:

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = \frac{\dot{Z}_{КК}\dot{Z}_{AЭ}}{\dot{Z}_{AЭ} + \dot{Z}_{ОС} + \dot{Z}_{КК}}, \\ \dot{Z}_2 = \frac{\dot{Z}_{AЭ}\dot{Z}_{ОС}}{\dot{Z}_{AЭ} + \dot{Z}_{ОС} + \dot{Z}_{КК}}, \\ \dot{Z}_3 = \frac{\dot{Z}_{КК}\dot{Z}_{ОС}}{\dot{Z}_{AЭ} + \dot{Z}_{ОС} + \dot{Z}_{КК}} \end{cases} \quad (1)$$

и наоборот – сопротивлений звезды в треугольник:

$$\begin{cases} \dot{Z}_{AЭ} = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \frac{\dot{Z}_1\dot{Z}_2}{\dot{Z}_3}, \\ \dot{Z}_{ОС} = \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3 + \frac{\dot{Z}_2\dot{Z}_3}{\dot{Z}_1}, \\ \dot{Z}_{КК} = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_3 + \frac{\dot{Z}_1\dot{Z}_3}{\dot{Z}_2}. \end{cases} \quad (2)$$

Считая импедансы в выражениях (1) и (2) чисто реактивными, в работе [8] получены взаимные условия, при которых трехточечные схемы генераторов под буквами *a* и *б* на рис. 3 и 4 являются эквивалентными:

$$|X_1X_3| > |X_1X_2 + X_2X_3|, \quad (3)$$

$$|X_{КК}| > |X_{AЭ} + X_{ОС}|, \quad (4)$$

где $X_1, X_2, X_3, X_{ОС}, X_{КК}, X_{AЭ}$ – сопротивления соответствующих реактивных элементов схем. Данные сопротивления определяются с помощью общих для каждого из генераторов на рис. 3, 4 выражений: $\dot{Z}_{ОС} = jX_{ОС}$, $\dot{Z}_{AЭ} = jX_{AЭ}$, $\dot{Z}_{КК} = jX_{КК}$, $\dot{Z}_1 = jX_1$, $\dot{Z}_2 = jX_2$, $\dot{Z}_3 = jX_3$. Причем для любых емкостных и индуктивных элементов: $X_C < 0$, $X_L > 0$, так как

$$\dot{Z}_C = \frac{1}{j\omega_n C}, \quad X_C = -\frac{1}{\omega_n C}, \quad a$$

$$\dot{Z}_L = j\omega_n L, \quad X_L = \omega_n L,$$

где ω_n – циклическая частота преобразования, для которой выполняются взаимные соотношения (1) и (2). В генераторной технике эта частота совпадает с частотой генерации.

Полученные неравенства (3) и (4) являются следствием того, что величины сопротивлений реактивных элементов трехточечных генераторов не могут быть произвольными, они удовлетворяют системам установленных ограничений [8]:

$$\begin{cases} X_{AЭ}X_{ОС} > 0, \\ X_{AЭ}X_{КК} < 0, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} |X_{ОС}| < |X_{AЭ}|, \\ |X_{ОС}| < |X_{КК}|, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} X_1X_3 > 0, \\ X_2X_3 < 0, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} |X_3| < |X_1|, \\ |X_2| < |X_1|. \end{cases} \quad (8)$$

Неравенства (5) и (7) означают, что реактивности элементов $\dot{Z}_{AЭ}$ и $\dot{Z}_{ОС}$ (\dot{Z}_1 и \dot{Z}_3) должны иметь одинаковые, а реактивности элементов $\dot{Z}_{КК}$ и $\dot{Z}_{ОС}$ (\dot{Z}_2 и \dot{Z}_3) – разные знаки. Иными словами, если $X_{AЭ}$ и $X_{ОС}$ являются индуктивными сопротивлениями, то $X_{КК}$ – это емкостное сопротивление, а трехточка называется индуктивной (см. рис. 3, *a*). Возможен второй вариант построения схемы автогенератора, когда $X_{AЭ}$, $X_{ОС}$ могут быть сопротивлениями емкостей, а $X_{КК}$ должно быть только индуктивным сопротивлением. В этом случае трехточка называется емкостной (см. рис. 3, *б*).

При выполнении неравенств (6) и (8) в автогенераторе реализуется условие минимальной обратной связи. Оно необходимо для обеспечения режима работы его активного элемента без захода в перенапряженный режим, который характеризуется повышенными уровнями фазовых шумов и высших гармонических составляющих. На практике минимальная обратная связь реализуется в тех случаях, когда, например, в схемах на рис. 3, *a* и 4, *a* индуктивность $L_{ОС}$ выбирается меньшей по величине по сравнению с $L_{AЭ}$, а величина $C_{ОС}$ – большей по сравнению с $C_{AЭ}$ [6].

Если при соблюдении ограничительных мер (5)–(8) выполнить условия (3) и (4), то трехточечные схемы автогенераторов на рис. 5 и 6, *a* и *б* также можно считать эквивалентными. Они получены путем преобразования схем устройств на рис. 3 и 4 к новому виду, когда их активные элементы (транзисторы с общим эмиттером) охвачены внешними обратными связями параллельного (*a*) и последовательного (*б*) типов. Особенностью генераторов под буквами *a* и *б* на рис. 5 и 6 является использование в их эквивалентных схемах разных типов фильтровых структур: в одних случаях – фильтров нижних частот (ФНЧ), в других – фильтров верхних частот (ФВЧ). Автогенератор обычно работает на частотах генерации, которые соответствуют падающему участку АЧХ фильтровой структуры, а не там, где потери цепи обратной связи минимальны. В этом смысле неважно, какого типа будет фильтр в цепи внешней обратной связи генератора. Падающий участок АЧХ одинаково

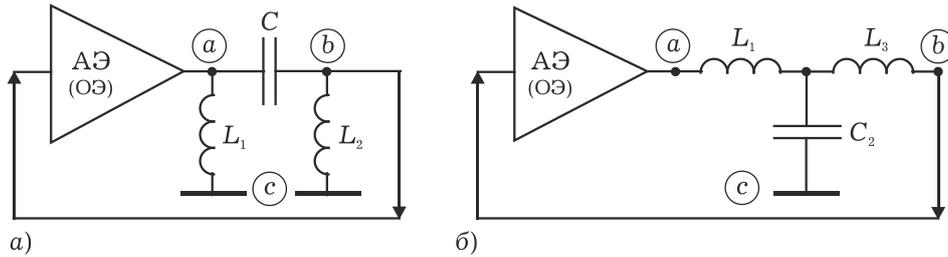


Рис. 5

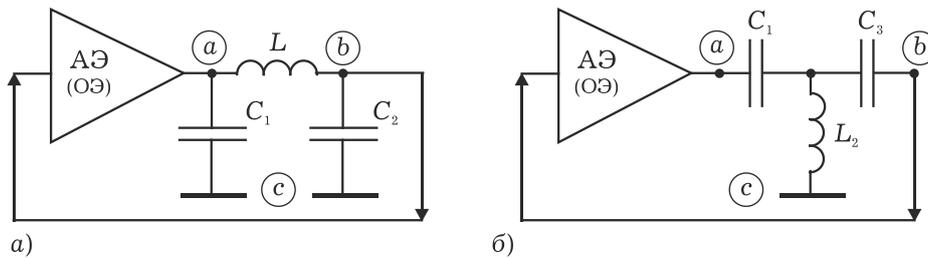


Рис. 6

присутствует как в ФНЧ, так и в ФВЧ. Более того, в общем балансе фаз автогенератора противоположные знаки фаз коэффициентов передач фильтровых структур ФНЧ и ФВЧ принципиально не меняют кратность 2π по отношению к целому числу.

Таким образом, несмотря на использование разных типов фильтровых структур (ФНЧ и ФВЧ), схемы генераторов под буквами *a* и *b* на рис. 5 и 6 остаются эквивалентными с точки зрения теории цепей, так как получены для одинаковой в сравниваемых устройствах частоты генерации, где справедливы эквивалентные преобразования сопротивлений их элементов.

Во втором случае применим эквивалентные преобразования импедансов в треугольных и звездообразных схемах при выполнении задач фильтрации, используя для этого П- и Т-образные фильтровые структуры на рис. 1 и 2.

Если в фильтре-прототипе низких частот на рис. 1 $(k+2) < (n+1)$ и элемент g_k представляет собой нормированную емкость, то выражения для нормированных сопротивлений k -, $(k+1)$ - и $(k+2)$ -го элементов имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_k^H &= \frac{-j}{\frac{\omega_{\Pi}}{\omega_c} g_k}, & \dot{Z}_{k+1}^H &= j \frac{\omega_{\Pi}}{\omega_c} g_{k+1}, \\ \dot{Z}_{k+2}^H &= \frac{-j}{\frac{\omega_{\Pi}}{\omega_c} g_{k+2}}, \end{aligned} \quad (9)$$

где ω_c – циклическая частота среза, которая соответствует определенным в работе [3] величинам характеристик затухания.

Используя выражения (9) в соотношениях (1) и (2), а также учитывая, что параметры g_k

являются одинаковыми для схем на рис. 1 и 2, получим формулу для расчета частоты преобразования ω_{Π} :

$$\omega_{\Pi} = \omega_c \sqrt{\frac{g_k^2 + g_k g_{k+2} - g_{k+1} g_{k+2}}{g_k g_{k+1} g_{k+2}}}. \quad (10)$$

Можно показать, что вид формулы (10) будет таким же и в случае, когда в фильтре-прототипе низких частот на рис. 2 при условии $(k+2) < (n+1)$ элемент g_k представляет собой нормированную индуктивность, а выражения для нормированных сопротивлений k -го, $(k+1)$ -го и $(k+2)$ -го элементов схемы записываются в виде

$$\dot{Z}_k^H = j \frac{\omega_{\Pi}}{\omega_c} g_k, \quad \dot{Z}_{k+1}^H = \frac{-j}{\frac{\omega_{\Pi}}{\omega_c} g_{k+1}}, \quad \dot{Z}_{k+2}^H = j \frac{\omega_{\Pi}}{\omega_c} g_{k+2}.$$

Формула (10) имеет смысл, если выполняется следующее неравенство:

$$g_k^2 + g_k g_{k+2} > g_{k+1} g_{k+2}. \quad (11)$$

Для табличных значений параметров g_k , g_{k+1} и g_{k+2} неравенство (11) выполняется всегда. По сути, неравенство (11) имеет тот же физический смысл, что и соотношения (3) и (4). В частном случае – для симметричных фильтровых структур, когда $g_k = g_{k+2}$, соотношения (11) и (3), (4) совпадают с точностью до знака неравенства. Противоположные знаки в неравенствах (11) и (3), (4) являются главной особенностью эквивалентных преобразований треугольника сопротивлений в звезду (и наоборот) в процессе выполнения рассмотренных задач – фильтрации и проектирования резонансных систем автогенераторов. Эта особенность фактически обусловлена наличием разных «граничных условий»

или ограничений при достижении выбранных технических целей. В генераторной технике такими ограничениями являются условия (5)–(8), а в технике фильтров – требование получения в фильтрах-прототипах одинаковых амплитудно-частотных характеристик с заданной величиной их затухания.

Второй важной особенностью эквивалентных преобразований треугольных и звездообразных сопротивлений при выполнении рассмотренных задач являются разные частоты, для которых справедливы эти преобразования. В первом случае им соответствуют частоты генерации, во втором – частоты преобразования вычисляются по формуле (10).

Таким образом, в данной работе отмечены две особенности эквивалентных преобразований сопротивлений схем треугольника и звезды в П- и Т-образных фильтровых структурах, которые используются как в процессе выполнения задач фильтрации, так и при разработке резонансных систем автогенераторов. Для достижения указанных технических целей первая особенность связана с необходимостью соблюдения неравенств (11) и (3), (4). Вторая особенность обязывает проводить эквивалентные преобразования звездообразных и треугольных сопротивлений в автогенераторах на частотах генерации, а в фильтровых структурах – на частотах, вычисляемых по формуле (10). Обе эти особенности необходимо учитывать в эквивалентных преобразованиях треугольных и звездообразных сопротивлений рассматриваемых схем.

Список литературы

- Альтман Д.Л. Устройства сверхвысоких частот / под ред. И.В. Лебедева. М.: Мир, 1968. 487 с.
- Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ. М.: Связь, 1965. 352 с.
- Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи / под ред. Л.В. Алексеева, Ф.В. Кушнира. М.: Связь, 1971. Т. 1. 440 с.
- Неганов В.А., Яровой Г.П. Теория и применение устройств СВЧ: уч. пос. для вузов / под ред. В.А. Неганова. М.: Радио и связь, 2006. 720 с.
- Ред Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике: схемы, блоки, 50-омная техника / пер. с нем. М.: Мир, 1990. 256 с.
- Баранов А.В., Моругин С.Л. Транзисторные СВЧ усилители мощности и генераторы гармонических колебаний: уч. пос. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2015. 115 с.
- Баранов А.В., Козиков А.Л. Взаимодополняющие приемы проектирования трехточечных СВЧ-автогенераторов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2018. Вып. 3 (538). С. 75–82.
- Баранов А.В. Частные и обобщенные эквивалентные трехточечные схемы СВЧ-автогенераторов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2017. Вып. 1 (532). С. 18–25.
- Радиопередающие устройства / под ред. М.В. Благовещенского, Г.М. Уткина. М.: Радио и связь, 1982. 408 с.
- Grebennikov A. RF and microwave transistor oscillator design. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. 441 p.
- Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи: учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 1981. 333 с.
- Al'tman D.L. Ustrojstva sverhvysokih chastot / pod red. I.V. Lebedeva [Ultra-high frequency devices / ed. by I.V. Lebedev]. M.: Mir, 1968, 487 p. [in Russian].
- Fel'dshtejn A.L., Javich L.R. Sintez chetyrehpoljuskov i vos'mi poljuskov na SVCh [Synthesis of quadripoles and eight-poles on the microwave]. M.: Svjaz', 1965, 352 p. [in Russian].
- Mattej D.L., Jang L., Dzhons E.M.T. Fil'try SVCh, soglasujuschie tsepi i tsepi svjazi / pod red. L.V. Alekseeva, F.V. Kushnira [Microwave filters, matching circuits and communication circuits / ed. by L.V. Alekseev, F.V. Kushnir]. M.: Svjaz', 1971, 440 p. [in Russian].
- Neganov V.A., Jarovoj G.P. Teorija i primenenie ustrojstv SVCh: uch. pos. dlja vuzov / pod red. V.A. Neganova [Theory and application of microwave devices: account. pos. for universities / ed. by V.A. Neganov]. M.: Radio i svjaz', 2006, 720 p. [in Russian].
- Red E. Spravochnoe posobie po vysokochastotnoj shemotehnike: shemy, bloki, 50-omnaja tehnika / per. s nem. [Reference manual for high-frequency circuitry: circuits, blocks, 50-ohm technique / trans. from German]. M.: Mir, 1990, 256 p. [in Russian].
- Baranov A.V., Morugin S.L. Tranzistornye SVCh usiliteli moschnosti i generatory garmonicheskikh kolebanij: uch. pos. [Transistor Microwave Power Amplifiers and Harmonic Generators]. N. Novgorod: NGTU im. R.E. Alekseeva, 2015, 115 p. [in Russian].
- Baranov A.V., Kozikov A.L. Vzaimodopolnjajuschie priemy proektirovaniya trehtocheknyh SVCh-avtogeneratorov [Complementary design techniques for three-point microwave oscillators]. *Elektronnaja tehnika. Ser. 1. SVCh-tehnika* [Electronic equipment. Ser. 1. Microwave technology], 2018, no. 3 (538), pp. 75–82 [in Russian].
- Baranov A.V. Chastnye i obobshchennye ekvivalentnye trehtocheknyye shemy SVCh-avtogeneratorov [Private and generalized equivalent three-point circuits of microwave oscillators]. *Elektronnaja tehnika. Ser. 1. SVCh-tehnika*

- [Electronic equipment. Ser. 1. Microwave technology], 2017, no. 1 (532), pp. 18–25. [in Russian].
9. Radiopredajuschie ustrojstva / pod red. M.V. Blagoveschenskogo, G.M. Utkina [Radio transmitting devices / ed. by M.V. Blagoveschensky, G.M. Utkin]. M.: Radio i svjaz', 1982, 408 p. [in Russian].
10. Grebennikov A. RF and microwave transistor oscillator design. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007, 441 p. [in English].
11. Mathanov P.N. Osnovy analiza elektricheskikh tsepej. Linejnye tsepi: ucheb. dlja vuzov [Fundamentals of electrical circuit analysis. Linear chains]. M.: Vysshaja shkola, 1981, 333 p. [in Russian].

Peculiarities of «delta» to «star» equivalent impedances conversion in π - and T-shaped filter structures

A.V. Baranov, A.L. Kozikov

LLC «Scientific and Production Enterprise «Salyut»»
7, Larina Street
Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation

The peculiarities of «delta» to «star» equivalent impedances conversion are noted in π - and T-shaped filter structures. They are taken into consideration for design filters and oscillators resonators. The physical limitations are determined for structures parameters, which lead to these peculiarities. The conversion frequencies are obtained for π - and T-shaped filter structures, where «delta» to «star» equivalent impedances transformation is fulfilled.

Keywords: π - and T-shaped filter structures, «delta» to «star» equivalent impedances conversion.

Неганов, В.А.

Современная теория и практические применения антенн: монография / В.А. Неганов, Д.П. Табаков, Г.П. Яровой; предисл. акад. Ю.В. Гуляева; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радиотехника, 2009. – 720 с.

ISBN 978-5-88070-222-0

УДК 621.396.67
ББК 32.845



Рассмотрены основные разделы теории и техники антенн. Освещены вопросы расчета и построения различных типов антенн (от вибраторных до рупорных и антенных решеток, включая фазированные). Основное внимание уделено антеннам СВЧ и расчетам их электромагнитных полей в ближней зоне, т. е. вопросам электромагнитной совместимости.

Принципиальное отличие книги от известных заключается в последовательном применении метода физической регуляризации (самосогласованного метода) к расчету электромагнитного поля антенн, позволяющего осуществлять непрерывный переход с излучающей поверхности антенны к пространству вне ее. С помощью самосогласованного метода получены новые результаты по теории антенн: установлены связь между поверхностной плотностью тока на вибраторной антенне и напряженностью электромагнитного поля, однонаправленный режим излучения для кольцевой (рамочной антенны), режимы стоячих и бегущих волн в цилиндрической спиральной антенне, входное сопротивление практически для всех типов антенн. Теоретический материал подкреплен примерами применения многолучевых антенн.

Предназначено для разработчиков антенно-фидерных устройств, аспирантов и докторантов, занимающихся вопросами проектирования антенных систем различного назначения, студентов радиотехнических специальностей высших учебных заведений.