



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-61-69>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.372.512

МЕТОДЫ СИНТЕЗА СОГЛАСУЮЩИХ ЦЕПЕЙ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С НЕСТАБИЛЬНЫМ ИМПЕДАНСОМ НАГРУЗКИ

И.А. ДУБОВИК¹, П.В. БОЙКАЧЕВ¹, В.О. ИСАЕВ¹, А.А. ДМИТРЕНКО²

¹Военная академия Республики Беларусь (г. Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 22 июня 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Целью работы является выбор метода синтеза широкополосной согласующей цепи, обеспечивающей максимальную передачу мощности от источника сигнала в нагрузку при наличии изменяющегося импеданса нагрузки радиотехнического устройства. Для достижения поставленной цели был осуществлен анализ основных направлений проектирования широкополосных согласующих цепей (аналитические, численные, графоаналитические методы синтеза). По результатам сравнения методов синтеза были указаны их особенности (достоинства и недостатки). Был выполнен анализ методов синтеза широкополосных согласующих цепей. Для анализа были выбраны обобщенный метод Дарлингтона, метод вещественных частот, структурно-параметрический метод синтеза на основе аппарата Т-матрицы, графоаналитический метод на основе диаграммы Вольперта – Смитта. С помощью данных методов синтеза были получены широкополосные согласующие цепи применительно к различным типам нагрузок. Сопоставление полученных результатов осуществлялось по нескольким показателям: уровню коэффициента передачи мощности в рабочем диапазоне частот, чувствительности коэффициента передачи по мощности к изменению номиналов элементов согласующей цепи и импедансу нагрузки при условии, что количество элементов согласующей цепи не более шести. На основании проведенного сравнения и анализа методов синтеза было установлено, что для решения поставленной задачи наиболее предпочтительным является метод вещественных частот. Его достоинством является использование комбинационного подхода (итеративного нахождения параметров функции сопротивления с аналитическим представлением функции передачи). Согласующие цепи, полученные с помощью данного метода синтеза, обеспечили наибольший уровень коэффициента передачи по мощности, а также наименьшее значение чувствительности в заданной полосе частот для рассматриваемых типов нагрузок.

Ключевые слова: согласование, метод, чувствительность, нагрузка, широкополосный.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Дубовик И.А., Бойкачев П.В., Исаев В.О., Дмитренко А.А. Методы синтеза согласующих цепей для широкополосных радиотехнических устройств с нестабильным импедансом нагрузки. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 61-69.

METHODS FOR SYNTHESIS OF MATCHING CIRCUITS FOR BROADBAND RADIO DEVICES WITH UNSTABLE LOAD IMPEDANCE

ILYA A. DUBOVIK¹, PAUL V. BOYKACHEV¹, VLADISLAV O. ISAEV¹,
ALES A. DMITRENKO²

¹*Educational Institution "Military Academy of the Republic of Belarus" (Minsk, Republic of Belarus)*

²*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 22 June 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The aim of this work is to select a synthesis method for a broadband matching circuit that provides maximum power transfer from a signal source to a load in the presence of a changing load impedance of a radio engineering device. To achieve this goal, an analysis of the main directions of designing broadband matching circuits (analytical, numerical, graphic-analytical synthesis methods) was carried out. Based on the results of a comparison of synthesis methods, their features (advantages and disadvantages) were indicated. The analysis of methods of synthesis of broadband matching circuits was carried out. For the analysis, the generalized Darlington method, the method of real frequencies, the structural-parametric synthesis method based on the T-matrix apparatus, and the graphic-analytical method based on the Volpert-Smith diagram were chosen). Using these synthesis methods, broadband matching circuits were obtained for various types of loads. Comparison of the results obtained was carried out according to several indicators: the level of the power transfer coefficient in the operating frequency range, the sensitivity of the power transfer coefficient to the change in the ratings of the elements of the matching circuit and the load impedance, provided that the number of elements of the matching circuit is no more than six. Based on the comparison and analysis, it was found that the most preferable synthesis method for solving the problem posed is the method of real frequencies. Its advantage is the use of a combination approach (iterative determination of the parameters of the resistance function with an analytical representation of the transfer function). Matching circuits obtained using this synthesis method provided the highest level of power transmission coefficient, as well as the lowest sensitivity value in a given frequency band for the considered types of loads.

Keywords coordination, method, sensitivity, load, broadband.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

For citation. Dubovik I.A., Boykachev P.V., Isaev V.O., Dmitrenko A.A. Methods for synthesis of matching circuits for broadband radio devices with unstable load impedance. Doklady BGUIR. 2021; 19(1): 61-69.

Введение

Современные радиотехнические устройства (РТУ) благодаря функционированию в широком диапазоне частот обеспечивают возможность высокоскоростной передачи большого объема информации. Важным фактором для качественной работы таких устройств является передача максимальной мощности сигнала от источника в нагрузку в широком диапазоне частот. Для этого необходимо обеспечить согласование сопротивления нагрузки с входным трактом РТУ. Для выполнения поставленной задачи в РТУ используются широкополосные согласующие цепи (ШСЦ).

В настоящее время широкое применение нашли методы синтеза ШСЦ, где в качестве нагрузки рассматриваются антенные, усилительные и другие устройства, представленные в виде значения комплексного сопротивления на дискретном ряде частот. Но в то же время в методах синтеза ШСЦ не учитывается непостоянство комплексного сопротивления нагрузки РТУ, вызванное изменениями окружающей среды либо условиями эксплуатации. Изменение величины комплексного сопротивления нагрузки приводит к рассогласованию тракта РТУ с нагрузкой. Это способствует появлению в тракте отраженной волны, что приводит к потерям мощности передаваемого (принимаемого) сигнала. Целью статьи является выбор метода

синтеза ШСЦ, который обеспечивает максимальный уровень передачи мощности от источника сигнала в нагрузку при наличии изменяющегося импеданса.

Постановка задачи

В общем случае задачу согласования сопротивления тракта РТУ с комплексным сопротивлением нагрузки можно свести к нахождению сопротивления реактивного четырехполюсника $Z_{\text{чп}}(s)$, обеспечивающего равенство активных (1) и компенсацию реактивных (2) составляющих сопротивления цепи с комплексным сопротивлением нагрузки.

$$\operatorname{Re}(Z_{\text{вх}}(s)) = \operatorname{Re}(Z_{\text{н}}(s)); \quad (1)$$

$$\operatorname{Im}(Z_{\text{вх}}(s)) = -\operatorname{Im}(Z_{\text{н}}(s)), \quad (2)$$

где $Z_{\text{вх}}(s) = Z_{\text{чп}}(s) + Z_{\text{г}}(s)$ – комплексное сопротивление цепи;

$Z_{\text{чп}}(s)$ – комплексное сопротивление четырехполюсника;

$Z_{\text{г}}(s)$ – комплексное сопротивление генератора;

$Z_{\text{н}}(s)$ – комплексное сопротивление нагрузки;

$s = \sigma + j\omega$ – комплексная частота.

Исходя из поставленной задачи, необходимо осуществить обзор и анализ методов синтеза ШСЦ, по результатам которых выбрать наиболее предпочтительный метод синтеза для решения задачи адаптации РТУ к изменяющемуся импедансу нагрузки. Для сравнения методов предлагается использовать следующие показатели качества:

1. Уровень коэффициента передачи мощности (КПМ) (выражение (3)) (обеспечение максимального уровня КПМ в заданной полосе частот является основной задачей согласования). Оценка уровня КПМ осуществляется относительно максимального значения КПМ ($K(f) = 1$) в рабочей полосе частот:

$$\Delta K = \frac{1}{f_{\text{в}} - f_{\text{н}}} \int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} [1 - K(f)]^2 df, \quad (3)$$

где $K(f) = \frac{4 \operatorname{Re} Z_{\text{вх}}(f) \operatorname{Re} Z_{\text{н}}(f)}{(\operatorname{Re} Z_{\text{вх}}(f) + \operatorname{Re} Z_{\text{н}}(f))^2 + (\operatorname{Im} Z_{\text{вх}}(f) + \operatorname{Im} Z_{\text{н}}(f))^2}$ – функция коэффициента передачи по мощности;

$f_{\text{в}}, f_{\text{н}}$ – верхняя (нижняя) частота рабочего диапазона частот.

2. Количество элементов согласующей цепи $N_{\text{эл}}$.

3. Чувствительность функции коэффициента передачи мощности к изменению комплексного сопротивления нагрузки (выражение (4)) (под чувствительностью понимается мера изменения функции КПМ, которая произошла в результате некоторого отклонения комплексного сопротивления импеданса нагрузки [1]). Чем меньше значение параметра, тем меньше влияние изменений импеданса нагрузки на уровень КПМ.

$$S_{\alpha}^{K(f, \alpha)} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial K(f, \alpha_i)}{\partial \alpha_i} \frac{\alpha_i}{K(f, \alpha_i)}, \quad (4)$$

где α_i – элемент нагрузки (C, L, R);

$K(f, \alpha_i)$ – функция КПМ от частоты и параметров СЦ;

n – количество элементов в нагрузке.

Наиболее предпочтительным будет тот метод синтеза ШСЦ, который позволяет синтезировать цепи, обеспечивающие максимальный уровень КПМ (3) и минимальную чувствительность (4) в рабочем диапазоне частот.

Обзор методов широкополосного согласования

На данный момент можно выделить несколько групп методов синтеза ШСЦ:

- аналитические методы (Бодэ, Фано, Юлы, Дарлингтона, метод вносимых потерь и др.);
- численные методы (параметрические, структурно-параметрические);
- графоаналитические методы.

Аналитические методы синтеза ШСЦ предполагают синтез четырехполюсника, полное сопротивление которого может быть представлено в виде аналитического выражения, полученного в ходе аппроксимации требуемой характеристики коэффициента отражения либо функции КПМ. Нагрузки в аналитических методах представляются в виде эквивалентной цепи с полным сопротивлением $Z_n(s)$, так как необходимо знать наличие и расположение нулей передачи.

По результатам обзора аналитических методов Бодэ, Фано, Юлы [2], Вай Кай Ченя [3], представленных в работах Г. А. Филипповича [4], Вольховича Д.И.¹, Самуилова А.А.², установлено что аналитические решения позволяют исследовать влияние физических параметров, начальных и граничных условий на характер решения. Результаты аналитических решений способствуют разработке адекватных математических моделей исследуемых явлений. Они более информативны, вычисление решения при любом конкретном значении аргумента можно выполнить как угодно точно. Всегда существует возможность определения значения искомого параметра в любой точке, а не только в узлах сетки интерполяции, и получаемый результат всегда является устойчивым. В то же время главным недостатком аналитических решений является их ограниченные возможности в решении ряда сложных задач согласования. Для синтеза ШСЦ требуется представление (или предварительная аппроксимация) импеданса нагрузки в виде эквивалента, а функция КПМ должна быть задана с помощью аппроксимирующей функции (АФ). Процедура синтеза, как правило, является сложной и приводит к неоптимальным решениям (наличие трансформатора в согласующей цепи). Реализация согласующих цепей по заданному критерию соответствия их идеальным частотным и фазовым характеристикам исключительно трудна из-за сложности расчетов. Задача согласования для нагрузок с нулями передачи на фиксированных частотах не является тривиальной ввиду отсутствия подходящих АФ.

Численные методы синтеза предполагают синтез четырехполюсника, структура которого определена на начальном этапе или формируется в процессе синтеза исходя из целевой функции. Основным отличием численных методов от аналитических является отсутствие необходимости представления нагрузки только в виде эквивалента.

Численные методы синтеза ШСЦ разделяют на параметрические и структурно-параметрические. Основными представителями структурно-параметрического подхода являются методы синтеза на основе генетического алгоритма, а также каскадные методы (на основе аппарата Т-матрицы [5], канонических моделей и др.). Использование данных методов позволяет синтезировать множество вариантов ШСЦ, привязываясь лишь к порядку искомой целевой функции. Однако при использовании структурно-параметрического метода отсутствует полный контроль структуры и параметров ШСЦ, что может привести к практически нереализуемым решениям.

Одним из основных представителей параметрического метода является метод реальных (вещественных) частот [6]. Он имеет множество модификаций [7] и основан на сочетании аналитического и численного подходов к задаче синтеза. Основное преимущество данного метода по отношению к аналитическим состоит в том, что он не требует представления нагрузки в виде эквивалентной цепи. Функция КПМ при этом представляется в виде аналитического выражения, а согласующая цепь синтезируется с помощью итеративных подходов.

¹ Вольхович Д.И. *Синтез широкополосных согласующих устройств с заданными фазовыми характеристиками: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07.* Новосибирск; 2018:11-20.

² Самуилов А.А. *Автоматизированное проектирование широкополосных согласующих и корректирующих цепей СВЧ устройств на основе интерактивного «визуального» подхода: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07.* Томск; 2014: 255 л.

Графоаналитический метод синтеза подразумевает графическое представление характеристик линии передачи в виде круговой диаграммы. Суть метода состоит во включении в цепь между сопротивлением генератора и нагрузки различных реактивных элементов, что изменяет величину сопротивления цепи, которая контролируется по диаграмме Вольперта – Смита [7]. Основным преимуществом данного метода по отношению к аналитическим и численным методам синтеза является иллюстративность получения простых Г- или L-образных согласующих цепей. Данный метод синтеза является трудоемким, не обеспечивает простого механизма определения оптимальной структуры согласующей цепи.

Таким образом, исходя из проведенного обзора методов синтеза ШСЦ, следует:

- использование аналитических методов позволяет найти решение задачи синтеза ШСЦ для нагрузок, имеющих невысокий порядок и представленных в виде эквивалента, ограничиваясь при этом выбранной АФ;

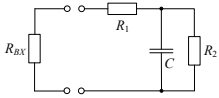
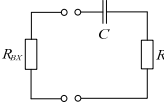
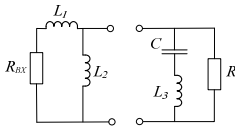
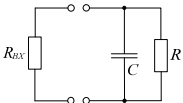
- параметрические и структурно-параметрические методы синтеза всегда приводят к определенному результату, но они зависят от выбора начального приближения и способа формирования целевой функции. Существуют проблемы сходимости. Возможно получение только локальных оптимумов;

- использование графоаналитического метода синтеза приводит к получению простых Г- или L-образных согласующих цепей, нагруженных на $Z_H(s)$. Методика является трудоемкой при расчете ШСЦ.

Анализ методов широкополосного согласования

Для анализа методов синтеза были синтезированы ШСЦ, обеспечивающие максимальный уровень КПМ в нормированном диапазоне частот ($f = 0-1$ Гц). В качестве сопротивления генератора использовалось активное сопротивление ($R_r = 1$ Ом), а в качестве сопротивления нагрузки [4] – нагрузки различных классов (табл. 1), отличающиеся друг от друга расположением нулей передачи.

Таблица 1. Классы используемых нагрузок
Table 1. Classes of used loads

| Класс нагрузки Load class | Эквивалентная схема Equivalent scheme | Функция сопротивления нагрузки Load resistance function |
|--|---|--|
| Нагрузка с нулями передачи I класса (туннельные диоды, кварцы) Load with class I transmission zeros (tunnel diodes, quartz) |  | $Z_H(s) = \frac{(R_1 + R_2) + R_1 R_2 C s}{1 + R_2 C s}$ |
| Нагрузка с нулями передачи II класса (проволочные антенны в диапазонах работы длинных, средних и коротких волн) Load with class II transmission zeros (wire antennas in the long, medium and short wave ranges) |  | $Z_H(s) = \frac{1 + C s R}{C s}$ |
| Нагрузка с нулями передачи III класса (антенны, транзисторы и др.) Load with class III transmission zeros (antennas, transistors, etc.) |  | $Z_H(s) = \frac{R(C L s^2 + 1)}{C L s^2 + C R s + 1}$ |
| Нагрузка с нулями передачи IV класса (биполярный транзистор) Load with class IV transmission zeros (bipolar transistor) |  | $Z_H(s) = \frac{R}{1 + C s R}$ |

ШСЦ были синтезированы с помощью обобщенного метода Дарлингтона, метода вещественных частот, структурно-параметрического метода на основе аппарата T-матрицы,

а также графоаналитического метода. Результаты синтеза ШСЦ представлены в табл. 2. Исходя из полученных результатов, можно убедиться в том, что использование аналитических методов синтеза не позволяет синтезировать ШСЦ для любых типов нагрузки в отличие от численных и графоаналитических методов синтеза. Данное заключение особенно актуально для сложных нагрузок современных РТУ, поиск которых является непростой задачей [9]. Таким образом, аналитические методы для синтеза ШСЦ с учетом изменяющегося импеданса нагрузки предлагается не использовать.

В табл. 3 представлены показатели качества синтезированных ШСЦ (выражения (3), (4)).

Таблица 2. Результаты синтеза ШСЦ
Table 2. Synthesis results of broadband matching devices

| Класс нагрузки Load class | Методика синтеза Synthesis Method | | | |
|---|--|--|--|---|
| | Метод вещественных частот Method Real Frequency | Графоаналитический метод Вольперта – Смита Grafoanalytic method of Volpert – Smith | Структурно-параметрический метод на основе аппарата Т-матрицы Structural-parametric method based on the apparatus of the T-matrix | Обобщенный метод Дарлингтона Generalized Darlington Method |
| I класс ($R_1 = 0,2 \text{ Ом}$, $R_2 = 3 \text{ Ом}$, $C = 0,05 \text{ Ф}$) I class | | | | — |
| II класс ($R = 1 \text{ Ом}$, $C = 1,414 \text{ Ф}$) II class | | | | |
| III класс ($L_1 = 4 \text{ Гн}$, $L_2 = 0,75 \text{ Гн}$, $L_3 = 0,3 \text{ Гн}$, $C = 2 \text{ Гн}$) III class | | | | — |
| IV класс ($C = 0,2 \text{ Ф}$, $R = 5 \text{ Ом}$) IV class | | | | |

Таблица 3. Результаты оценки синтезированных ШСЦ по различным критериям
Table 3. Results of the assessment of synthesized broadband matching chains by various criteria

| Метод синтеза ШСЦ SC synthesis technique | Тип нагрузки | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------|-----|-----------------------|--------------------------------|-----|-----------------------|--------------------------------|-----|-----------------------|-----------------------------------|-----|-----------------------|
| | первого класса first class | | | второго класса second class | | | третьего класса third class | | | четвертого класса fourth class | | |
| | ΔK | N | $S_{\alpha}^{K(f,a)}$ | ΔK | N | $S_{\alpha}^{K(f,a)}$ | ΔK | N | $S_{\alpha}^{K(f,a)}$ | ΔK | N | $S_{\alpha}^{K(f,a)}$ |
| Структурно-параметрический синтез на основе аппарата Т-матрицы Structural-parametric method based on the apparatus of the T-matrix | 0,212 | 4 | 0,77 | 0,122 | 5 | 1,835 | 0,14 | 6 | 0,75 | 0,328 | 5 | 0,896 |
| Метод вещественных частот Method Real Frequency | 0,132 | 4 | 0,256 | 0,075 | 2 | 3,91 | 0,221 | 3 | 0,65 | 0,22 | 2 | 0,678 |
| Графоаналитическая методика Вольперта – Смита Grafoanalytic method of Volpert – Smith | 0,204 | 2 | 0,342 | 0,079 | 2 | 4,089 | 0,486 | 3 | 1,03 | 0,248 | 2 | 0,681 |

По результатам анализа полученных данных было установлено:

– ШСЦ, синтезированные методом вещественных частот, позволяют обеспечить наибольший уровень КПМ для нагрузок 1-го ($\Delta K = 0,132$) и 2-го классов ($\Delta K = 0,075$), а также имеют небольшой порядок и наименьшее значение чувствительности функции КПМ к изменению параметров нагрузки. Для 1-го ($S_a^{K(f,\alpha)} = 0,22$), 3-го ($S_a^{K(f,\alpha)} = 0,65$) и 4-го ($S_a^{K(f,\alpha)} = 0,678$) классов нагрузок синтезированные ШСЦ обладают наименьшей чувствительностью по отношению к другим методам синтеза. Это связано с использованием комбинационного подхода (использование аналитических выражений и итерационной процедуры оптимизации). Использование данного подхода позволяет за счет аналитических выражений и знания структуры цепи учитывать влияние параметров нагрузки на КПМ, что обеспечивает минимальное значение чувствительности, а использование итерационной процедуры поиска обеспечивает оптимальный уровень КПМ;

– ШСЦ, синтезированные с помощью графоаналитического метода синтеза, обладают наименьшим порядком ($N_{эл} = 2$) по отношению к другим методам синтеза. Это связано с тем, что согласование осуществляется на центральной частоте. Синтезированные данным методом цепи обладают малой добротностью, для которой достаточно иметь Г-, П- или Т-образную структуру согласующей цепи;

– ШСЦ, синтезированные с помощью структурно-параметрического метода синтеза на основе аппарата Т-матрицы позволяют обеспечить максимальный уровень КПМ для нагрузки 3-го класса ($\Delta K = 0,14$), но по отношению к другим методам обладают наибольшим порядком ШСЦ ($N = 4-6$). Даже исходя из того, что уменьшения чувствительности КПМ к изменению импеданса нагрузки можно добиться увеличением порядка (количеством элементов ШСЦ) [10], использование структурно-параметрического метода синтеза не обеспечивает минимального значения чувствительности. Это происходит из-за того, что структура ШСЦ в структурно-параметрическом методе синтеза известна лишь на последнем этапе синтеза.

Заключение

Исходя из анализа полученных результатов (табл. 3), можно сделать следующие выводы. Использование аналитической теории для синтеза ШСЦ с учетом изменяющегося импеданса нагрузки нецелесообразно. Применение структурно-параметрических методов синтеза позволяет синтезировать ШСЦ, которые обеспечивают оптимальное значение целевой функции. Но, поскольку структура цепи известна лишь на последнем этапе синтеза, данные ШСЦ не будут обеспечивать минимальную чувствительность. Таким образом, для решения задачи синтеза ШСЦ с учетом влияния изменения параметров нагрузки и согласующей цепи целесообразным является использование метода вещественных частот. Данный метод показал наилучшие результаты по используемым показателям качества в сравнении с другими методами. Это обусловлено тем, что в параметрических методах структура согласующей цепи известна, а использование комбинационного подхода позволяет за счет аналитического представления функции передачи обеспечивать как высокий уровень КПМ, так и минимальную чувствительность.

Список литературы

1. Гехер К. Теория чувствительности и допусков электронных цепей. Москва: Сов. радио; 1973.
2. Youla D.C. A new theory of broadband matching. *IEEE Trans.* 1964;11(1):30-50.
3. Chen W.K. Synthesis of optimum Butterworth and Chebyshev broad-band impedance-matching networks. *IEEE Trans.* 1977;5(24):157-169.
4. Филиппович Г.А. Широкополосное согласование сопротивлений. Минск; 2004.
5. Васильев А.Д. Структурно-параметрический синтез многополосных согласующе-фильтрующих схем на основе аппарата Т-матриц. *Вестник Военной академии Республики Беларусь.* 2010;1:73-80.
6. Carlin H., Amstutz P., Broadband M. *Anales des telecommunications. IEEE Trans.* 1981;28(5):401-405.
7. Yarman B.S. Real frequency broadband matching using linear programming. *RCA Rev.* 1982;43(4):626-654.
8. Курушин А.А.; ред: Когана Б.Л. Проектирование СВЧ устройств с использованием электронной диаграммы Смита. Москва: МЭИ; 2008.

9. Yarman B.S. Design of Ultra Wideband Power Transfer Networks. Hoboken, NJ: Wiley; 2010.
10. Курочкин А.Е. Теоретические основы активных магнитных антенн. Минск; 2003.

References

1. Geher K. [Theory of sensitivity and tolerances of electronic circuits]. Moscow: Sov. Radio; 1973. (In Russ)
2. Youla D.C. A new theory of broadband matching. *IEEE Trans.* 1964;11(1):30-50.
3. Chen W.K. Synthesis of optimum Butterworth and Chebyshev broad-band impedance-matching networks. *IEEE Trans.* 1977;5(24):157-169.
4. Filippovich G.A. [*Broadband resistance matching*]. Minsk, 2004. (In Russ.)
5. Vasiliev A.D. [Structural-parametric synthesis of multi-band matching-filtering schemes based on the T-matrix apparatus]. *Vestnik Voennoj akademii Respubliki Belarus.* 2010;1:3-80. (In Russ.)
6. Carlin H., Amstutz P., Broadband M. *Anales des telecommunications.* *IEEE Trans.* 1981;28(5):401-405.
7. Yarman B.S. Real frequency broadband matching using linear programming. *RCA Rev.* 1982;43(4):626-654.
8. Kurushin A.A., ed.: B.L. Kogan. [*Designing microwave devices using an electronic Smith diagram*]. Moscow: MEI; 2008. (In Russ.)
9. Yarman B.S. Design of Ultra Wideband Power Transfer Networks. Hoboken, NJ: Wiley; 2010.
10. Kurochkin A.E. [*Theoretical foundations of active magnetic antennas*]. Minsk; 2003. (In Russ.)

Вклад авторов

Дубовик И.А. синтезировал широкополосные СЦ различными методами синтеза и выполнил анализ полученных результатов.

Бойкачев П.В. выполнил сравнительный анализ и обобщил достоинства и недостатки аналитических, численных, а также графоаналитических методов синтеза.

Исаев В.О. принял участие в оформлении иллюстративных материалов.

Дмитренко А.А. выполнил редактирование и окончательное утверждение рукописи для публикации, ее критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания.

Authors' contribution

Dubovik I.A. synthesized broadband SC with various synthesis methods and conducted an analysis of the results.

Boykachev P.V. conducted a comparative analysis and generalization of the advantages and disadvantages of the analysed methods.

Isaev V.O. took part in the design of illustrative materials.

Dmitrenko A.A. wrote critical review of important intellectual content and approved the prepared article for the publication.

Сведения об авторах

Дубовик И.А., магистр технических наук, адъюнкт Военной академии Республики Беларусь.

Бойкачев П.В., к.т.н, доцент, начальник цикла кафедры автоматизи, радиолокации и приемопередающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Исаев В.О., магистр технических наук, адъюнкт Военной академии Республики Беларусь.

Дмитренко А.А., к.т.н., доцент, доцент кафедры радиоэлектроники ВВС и войск ПВО Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Dubovik I.A., Master of Technical Sciences, Associate of Military Academy of the Republic of Belarus.

Boykachev P.V., Ph.D., Associate Professor, Head of the Cycle of the Automation, Radar and Transceiver Devices Department of Military Academy of the Republic of Belarus.

Isaev V.O., Master of Technical Sciences, Associate Professor of Military Academy of the Republic of Belarus.

Dmitrenko A.A., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Air Force and Air Defense Electronic Equipment Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, 220,
Военная академия Республики Беларусь
тел. +375-17-287-46-52;
e-mail: duba-77@mail.ru
Дубовик Илья Андреевич

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosty ave., 220,
Military Academy of the Republic of Belarus
tel. +375-17-287-46-52;
e-mail: duba-77@mail.ru
Dubovik Ilya Andreevich