

РАДИОТЕХНИКА, РАДИОЛОКАЦИЯ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

УДК 004.896

**МЕТОД СИНТЕЗА СОГЛАСУЮЩИХ ЦЕПЕЙ
НА ОСНОВЕ СМЕШАННОЙ
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ****М. В. Черкашин**, к.т.н., доцент, доцент кафедры КСУП ТУСУР, Томск, Россия;

orcid.org/0000-0001-7536-363X, e-mail: mikhail.v.cherkashin@tusur.ru

К. С. Сарин, к.т.н., доцент, доцент кафедры КСУП ТУСУР, Томск, Россия;

orcid.org/0000-0003-3264-7768, e-mail: sarin.konstantin@mail.ru

И. А. Ходашинский, д.т.н., профессор, профессор кафедры КСУП ТУСУР, Томск, Россия;

orcid.org/0000-0002-9355-7638, e-mail: hodashn@rambler.ru

М. О. Светлаков, к.т.н., доцент кафедры КСУП ТУСУР, Томск, Россия;

orcid.org/0000-0002-5060-0958, e-mail: mikhail.o.svetlakov@tusur.ru

Синтез широкополосных согласующих цепей является важной задачей при построении радиотехнических и телекоммуникационных систем и устройств. Обычно требования к согласующим цепям являются противоречивыми по показателям качества полученного результата, что усложняет автоматизацию процесса синтеза. Одним из возможных подходов к её решению является применение многокритериальных эвристических алгоритмов, которые позволяют совместить процедуры структурного и параметрического синтеза, однако эффективность таких алгоритмов сильно зависит от способа формирования целевой функции и методов её оптимизации. Целью работы является разработка метода структурно-параметрического синтеза широкополосных согласующих цепей на основе применения смешанной многокритериальной оптимизации, осуществляющей поиск в пространстве с дискретными и вещественными переменными. Для решения оптимизационной задачи был использован метаэвристический алгоритм «кукушкин поиск» с генетическим оператором скрещивания. Метод позволяет одновременно осуществлять построение структуры и настройку параметров элементов согласующей цепи. В качестве целей оптимизации выступают сложность структуры и отклонение амплитудно-частотной характеристики от требуемого значения. В результате работы алгоритма формируется множество недоминируемых по данным целям вариантов цепей. Основываясь на требованиях к разрабатываемому устройству и компромиссе между его точностью и сложностью, эксперт выбирает подходящий вариант. С помощью разработанного метода было решено несколько типовых примеров: задача одностороннего согласования (задача Фано), проблема двухстороннего согласования и задача согласования-выравнивания. Результаты эксперимента показали высокую эффективность построенных цепей в сравнении с цепями альтернативных методов синтеза.

Ключевые слова: согласующая цепь, широкополосное согласование, синтез согласующих цепей, метаэвристический алгоритм, многокритериальная оптимизация, смешанная оптимизация, генетический алгоритм, метаэвристика «кукушкин поиск».

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-93-3-18**Введение**

Согласующие (СЦ) и корректирующие (КЦ) цепи широко применяются в составе радиоэлектронных устройств и систем для согласования входа\выхода устройства с трактом передачи сигнала и обеспечения максимального коэффициента передачи мощности сигнала от генератора в нагрузку в некоторой полосе рабочих частот. При этом сами СЦ и КЦ как пра-

вило реализуют на основе реактивных элементов, чтобы они не поглощали мощность передаваемого сигнала [1-3].

Для согласования в узкой полосе частот вполне подходят аналитические [3, 4-6] или графоаналитические [4, 7-9] методики, которые позволяют рассчитывать 2-3-х элементные СЦ для получения максимального коэффициента передачи на одной частоте. В случае широкой полосы согласования получить идеальный коэффициент передачи не получается. В работе Фано [10] были сформулированы теоретические ограничения на достижимый уровень коэффициента передачи для задачи согласования произвольной комплексной нагрузки и активного сопротивления генератора в полосе частот. Было показано, что достичь максимального коэффициента передачи в некоторой полосе частот возможно только в отдельных точках этой полосы. При этом предельно достижимый уровень коэффициента передачи будет зависеть от типа нагрузки и ширины полосы согласования.

Таким образом, задача широкополосного согласования состоит в том, чтобы обеспечить максимальный (или заданный) уровень коэффициента передачи сигнала в заданной полосе частот при некотором заданном (или минимальном) уровне неравномерности передаточной характеристики для заданных комплексных импедансов генератора $Z_i(f)$ и нагрузки $Z_n(f)$. Если дополнительно требуется получить специальную форму амплитудно-частотной характеристики коэффициента передачи (АЧХ), отличную от прямоугольной, (как правило, с некоторым подъемом или спадом) то такая задача носит название согласования-выравнивания.

Начиная с работ Фано [10], задачей широкополосного согласования занимались многие исследователи, и было разработано большое число разнообразных подходов для её решения. Условно их можно разделить на следующие классы: 1) аналитические методы расчета на основе общей теории фильтров или методе вносимых потерь [4-6, 11-14]; 2) классические методы синтеза на основе теории Фано-Юлы [6, 10, 15]; 3) графо-аналитические методы на основе применения диаграммы Вольперта-Смита [1, 4, 7, 8]; 4) численные подходы на основе применения метода «реальной» частоты и его модификации [16-19]; 5) методы синтеза на основе случайного или систематического (направленного) поиска [20]; 6) методики «визуального» синтеза цепей [21-25]; 7) методы на основе применения генетических (ГА) и/или метаэвристических (МЭА) алгоритмов [26-38]; 8) другие численные методы [39, 40 и др.].

В последнее время с ростом мощности средств вычислительной техники все наибольшую популярность приобретают методы структурно-параметрического синтеза, в основе которых лежат метаэвристические алгоритмы. Их привлекательность состоит в том, что они позволяют одновременно осуществлять как поиск оптимальной структуры цепи, так и выполнять оптимизацию параметров элементов по заданным ограничениям на характеристики. При этом, как правило, получается несколько альтернативных решений (структур цепей) из которых разработчик может выбрать лучшую, например, с точки зрения физической реализуемости схемы. Основная идея этого подхода заключается в том, что электронную схему можно представить как хромосому, частицу или агента некоторого итерационного процесса, в котором над этой схемой выполняются стандартные операции, используемые в метаэвристике [26].

Проектирование схемы определяют две сущности [27]: топология схемы и значения компонентов. Собственно проектирование включает оптимизацию топологии и параметров компонентов. При этом, в ходе процесса оптимизации топологии размеры векторов-решений могут быть либо переменной, либо фиксированной длины. В методах с решениями фиксированной длины должен быть заранее определен размер схемы, который должен быть не слишком большим (если пространство поиска слишком велико, то трудно найти оптимальное решение), но и не слишком маленьким (если пространство поиска слишком мало, то приемлемого решения может не быть) [28].

Метаэвристический алгоритм может использоваться либо в проектировании схемы с предопределенной топологией и применяться только для оптимизации значений компонентов [29, 30], либо для автоматического создания топологии и определения значений компонентов. Методы создания топологии схемы можно разделить на две группы: 1) методы об-

щей топологии, которые могут генерировать схемы с большим разнообразием топологий, 2) методы с ограничением топологии, позволяющие уменьшить пространство поиска и избегать недопустимых топологий.

В [27, 31-33] предложены методы на основе генетического программирования, которые позволяют одновременно формировать топологию схемы и определять значения компонентов; в [27] авторы применили ГА для решения задачи синтеза фильтров с различными ограничениями на значения компонентов. Результаты экспериментов показывают, что даже в тех случаях, когда значения компонентов сильно ограничены, предложенный метод может эффективно находить решения на основе новых топологий схемы. В [31] также рассматривается применение метода синтеза СЦ и фильтров на основе применения ГА. Данный алгоритм реализован в виде программы GeneSyn, которая позволяет рассчитывать цепи на сосредоточенных (*RLC*) и распределенных (в виде отрезков линии передачи) элементах.

Процесс синтеза цепей на основе применения МЭА представляет собой многокритериальную задачу, решение которой позволяет получать набор компромиссных решений, называемых Парето-множеством, которые могут быть полезны для оценки эффективности структуры цепи для конкретного применения. Наиболее популярными методами решения задач многоцелевой оптимизации являются эволюционные и роевые алгоритмы. Их основное преимущество заключается в способности генерировать всё Парето-множество за один запуск алгоритма. Главным недостатком является их высокая вычислительная сложность.

В [34] описываются два примера применения алгоритма роящихся частиц для проектирования аналоговых схем в режиме одноцелевой и многоцелевой оптимизации. Авторы показали пригодность данного алгоритма для оптимизации сложных схем с большим количеством параметров и ограничений.

В [28] для автоматического синтеза аналоговых схем описан алгоритм на основе дифференциальной эволюции, в котором векторы-решения имеют переменную длину, что позволяет формировать как топологию, так и размеры аналоговой схемы. Авторы [35] использовали алгоритм дифференциальной эволюции для разработки схемы фильтра с заданной топологией и штрафной функцией, учитывающей ограничения на диапазон значений элементов. В [36] рассмотрены методы эволюционной стратегии, дифференциальной эволюции, ГА, а также их гибрид для нахождения оптимальных топологий аналоговых схем и значений их компонентов в процессе проектирования двух типов фильтров. Показано, что ГА и эволюционная стратегия близки по эффективности, а используемый гибридный метод масштабируется для решения более сложных задач без изменения найденных параметров.

В данной работе представлен метод структурно-параметрического синтеза широкополосных согласующих цепей на основе МЭА смешанной многокритериальной оптимизации. Проведены эксперименты и проведены сравнения эффективности его работы с аналогичными методами.

Описание метода синтеза

Основная идея рассматриваемого метода заключается в сведении задачи синтеза реактивной СЦ к проблеме смешанной многокритериальной оптимизации, в которой присутствуют переменные дискретного и вещественного типов [41]. Использование смешанной оптимизации позволяет проводить одновременно как структурный, так и параметрический синтез СЦ путем кодирования структуры цепи и ее компонентов с помощью дискретных переменных, а значения их параметров – с помощью вещественных. Применение многокритериальности даёт возможность учитывать несколько целей в процессе синтеза. В настоящей работе рассматриваются две цели: с одной стороны необходимо получить цепь, удовлетворяющую заданной форме АЧХ, а с другой стороны цепь должна содержать минимально возможное число компонентов, или содержать компоненты, которые обуславливают минимальные затраты на изготовление цепи. Таким образом, результат решения задачи синтеза должен представлять множество вариантов (структур) цепей, недоминируемых по данным двум

целям, т.е. образующих фронт Парето [41]. Разработчик, основываясь на требованиях решаемой проблемы, выбирает из этого множества подходящий вариант цепи, например с точки зрения физической реализуемости или др.

Для того чтобы свести задачу синтеза СЦ к проблеме оптимизации необходимо задать кодирование цепи с помощью переменных вектора решения, определить целевые функции и задать ограничения на значения переменных. Ниже описаны данные этапы метода.

Кодирование цепи. Цепь кодируется в виде смешанного вектора решения (т.е. содержащего дискретные и вещественные переменные, см. рис. 1).

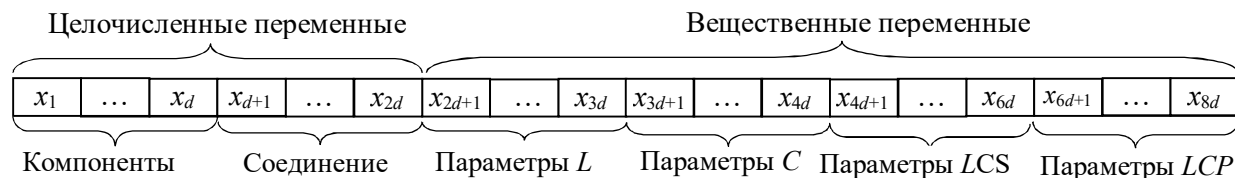
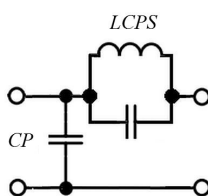


Рисунок 1 – Кодирование цепи вектором решения
Figure 1 – Circuit Encoding with solution vector

Максимальное количество компонентов в цепи ограничено значением d , которое является параметром и задается до выполнения синтеза. Вектор разделен на целочисленные и вещественные переменные. Целочисленные переменные $x_1, \dots, x_{2d}$ кодируют структуру цепи. Переменные $x_1, \dots, x_d$ содержат информацию о типе компонента цепи или его отсутствии. Значение переменной «1» соответствует катушке индуктивности L , значение «2» – конденсатору C , значение «3» – LC -контур с последовательным соединением элементов (LCS), значение «4» – LC -контур с параллельным соединением элементов (LCP), значение «0» показывает отсутствие элемента, привязанного к данной переменной. Переменные $x_{d+1}, \dots, x_{2d}$ кодируют тип соединения соответствующего компонента, значение «1» показывает последовательное соединение, а значение «2» – параллельное. Переменные $x_{2d+1}, \dots, x_{8d}$ содержат значения параметров компонентов, соответствующих переменным $x_1, \dots, x_d$. Для катушек индуктивности это переменные $x_{2d+1}, \dots, x_{3d}$; для конденсаторов – $x_{3d+1}, \dots, x_{4d}$; для LCS контуров – $x_{4d+1}, \dots, x_{6d}$; для LCP контуров – $x_{6d+1}, \dots, x_{8d}$. Если переменная x_i , ($i = 1, \dots, d$), кодирует катушку, то её индуктивность находится в переменной x_{2d+i} . Если кодирует конденсатор, то его емкость содержится в переменной x_{3d+i} . Если переменная кодирует LCS -контур, то индуктивность катушки находится в x_{4d+i} , а емкость конденсатора в x_{5d+i} . В случае LCP -контура индуктивность содержится в x_{6d+i} , а емкость в x_{7d+i} . Пространство поиска (число переменных в векторе решения) ограничено значением $8d$.

На рисунке 2, a показана схема двухэлементной цепи, а на рисунке 2, b – вектор решения, который кодирует данную структуру.



a (a)

2	4	0	2	1	1	0,2	2,3	7,6	0,2	4,5	7,8	0,6	0,8	2,1	3,9	8,3	7,8	0,2	1,8	0,4	7,3	6,6	9,3
Компоненты			Соединение			Параметры L			Параметры C			Параметры LCS							Параметры LCP				

б (b)

Рисунок 2 – Схема цепи (a) и пример ее кодирования (б)
Figure 2 – Example of circuit structure (a) and circuit encoding (b)

Цепь состоит из двух компонент C и LCP с типом соединения параллельное (s) включение и последовательное (p) включение. Соответствующие параметры имеют значения 0,2 для емкости C , 1,8 и 9,3 для элементов L и C параллельного контура. На рисунке 2, б переменные, кодирующие компоненты, тип соединения и параметры цепи, выделены темной заливкой. При этом вектор решения рассчитан на максимальное значение количества компонент – 3, т.е. содержит один «пустой» элемент.

Следует также отметить, что одна и та же цепь может быть закодирована несколькими вариантами. На рисунке 3 показан вариант вектора решения, кодирующий цепь на рисунке 2, а, но имеющий другие значения некоторых переменных в отличие от вектора на рисунке 2, б.

0	2	4	2	2	1	0.1	3.1	4.1	8.2	0.2	2.5	2.8	7.2	1.7	4.1	0.7	9.0	3.3	1.7	1.8	0.7	3.9	9.3
Компоненты		Соединение		Параметры L		Параметры C		Параметры LCS		Параметры LCP													

Рисунок 3 – Пример варианта альтернативного кодирования цепи

Figure 3 – Example of alternative circuit encoding

Целевые функции. Как отмечалась выше, синтез цепи в настоящей работе преследует две цели. Первая цель – удовлетворение требуемой форме АЧХ коэффициента передачи. В этом случае в качестве целевой функции предлагается использовать максимальное отклонение коэффициента передачи от заданного значения в диапазоне частот работы цепи. При этом целевая функция должна быть минимизирована:

$$F_1(\mathbf{X}) = \max_{i=1, \dots, n} \left(\left| G(f_i) - G^*(\mathbf{X}, f_i) \right| \right),$$

где $\mathbf{X} = (x_1, \dots, x_{8d})$ вектор решения, определяющий цепь; $f_1, f_2, \dots, f_n$ заданные частоты для проверки коэффициента передачи цепи; $G(f_i)$, $G^*(\mathbf{X}, f_i)$ требуемое и реальное значение коэффициента передачи цепи $\mathbf{X}$ на частоте f_i , ($i = 1, \dots, n$).

Вторая цель – минимизация числа компонент в цепи или затрат на её изготовление. В этом случае предлагается использовать сумму стоимостных коэффициентов компонентов цепи, которая должна быть минимизирована:

$$F_2(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^d \begin{cases} k_L, \text{ если } x_i = 1 \\ k_C, \text{ если } x_i = 2 \\ k_{LCS}, \text{ если } x_i = 3, \\ k_{LCP}, \text{ если } x_i = 4 \\ 0, \text{ иначе} \end{cases}$$

где k_L , k_C , k_{LCS} , k_{LCP} , величины стоимости компонент L , C , LCS и LCP соответственно. В случае минимизации числа компонент данные величины устанавливаются значение «1».

Ограничения на значения переменных. Оптимизация для синтеза цепей в настоящей работе является безусловной. Ограничения накладываются только на диапазон значений параметров компонент. Индуктивность для катушек изменяется в диапазоне от $L_{\min}$ до $L_{\max}$ нГн, а емкость конденсаторов от $C_{\min}$ до $C_{\max}$ пФ. Минимальные ($L_{\min}$ и $C_{\min}$) и максимальные ($L_{\max}$ и $C_{\max}$) значения элементов зависят от диапазона частот согласования. Таким образом, синтез согласующей цепи сводится к следующей задаче смешанной многокритериальной оптимизации:

$$\begin{cases} F_1(\mathbf{X}) \rightarrow \min \\ F_2(\mathbf{X}) \rightarrow \min \\ x_i \in \{0, 1, 2, 3, 4\}, i = 1, \dots, d \\ x_i \in \{1, 2\}, i = d + 1, \dots, 2d \\ x_i \in [L_{\min}, L_{\max}], i = 2d + 1, \dots, 3d, 4d + 1, \dots, 5d, 6d + 1, \dots, 7d \\ x_i \in [C_{\min}, C_{\max}], i = 3d + 1, \dots, 4d, 5d + 1, \dots, 6d, 7d + 1, \dots, 8d \end{cases}. \quad (1)$$

Решить задачу оптимизации (1) предлагается гибридным алгоритмом «кукушкин поиск» с генетическим оператором скрещивания, описанным в [42]. Благодаря комбинации эволюционного и роевого интеллекта алгоритм показал высокую эффективность на комплексных оценках сходимости и многообразия [42].

Экспериментальные исследования

Предложенный метод синтеза реализован в виде программного приложения в среде системы для математических и инженерных расчетов MATLAB. Проведено тестирование разработанного метода на типовых задачах широкополосного согласования, представленных в литературе [10, 13-19, 20, 23-25, 31-33, 38-40]. Параметры алгоритма «кукушкин поиск» с генетическим оператором скрещивания, которые были заданы при решении тестовых задач, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры алгоритма

Table 1 – Algorithm parameters

Название параметра	Обозначение	Значение параметра
Максимальное число компонентов в цепи	d	30
Количество переменных в векторе решений	n	240
Размер популяции	N	50
Число итераций	$MaxIter$	60000
Вероятность удаления решения	p_a	0,05
Коэффициент прыжка полетов Леви	γ	Равномерно уменьшался с 0,4 до 0,05

Диапазоны варьирования параметров катушек индуктивностей и конденсаторов изменялись в зависимости от решаемой задачи.

Пример 1. Задача одностороннего согласования Фано. Первый пример демонстрирует решение классической задачи согласования резистивного сопротивления генератора с комплексной RLC -нагрузкой, предложенный Фано в [10], см. рисунок 4, а. Для удобства исходная задача была перенормирована для полосы пропускания 1 ГГц и сопротивления нагрузки 50 Ом (см. рисунок 4, а). Используя методику Фано [10], можно найти, что предельное (минимально возможное) значение модуля коэффициента отражения на входе СЦ для заданных нагрузки и полосы частот равно $|\Gamma_{пред}| = 0,2811$ или предельный коэффициент передачи $G_{пред} = 1 - |\Gamma_{пред}|^2 = 0,921$ (см. рисунок 4, б).

Задача состоит в том, чтобы рассчитать СЦ, которая в требуемом диапазоне частот обеспечивает величину модуля коэффициента отражения $|\Gamma(f)| < 0,346$ или коэффициента передачи $G > 0,88$, где $\Gamma = \sqrt{1 - G^2}$. При этом необходимо получить цепь, у которой АЧХ имеет минимальную неравномерность в полосе согласования, т.е. $\Delta G \rightarrow \min$.

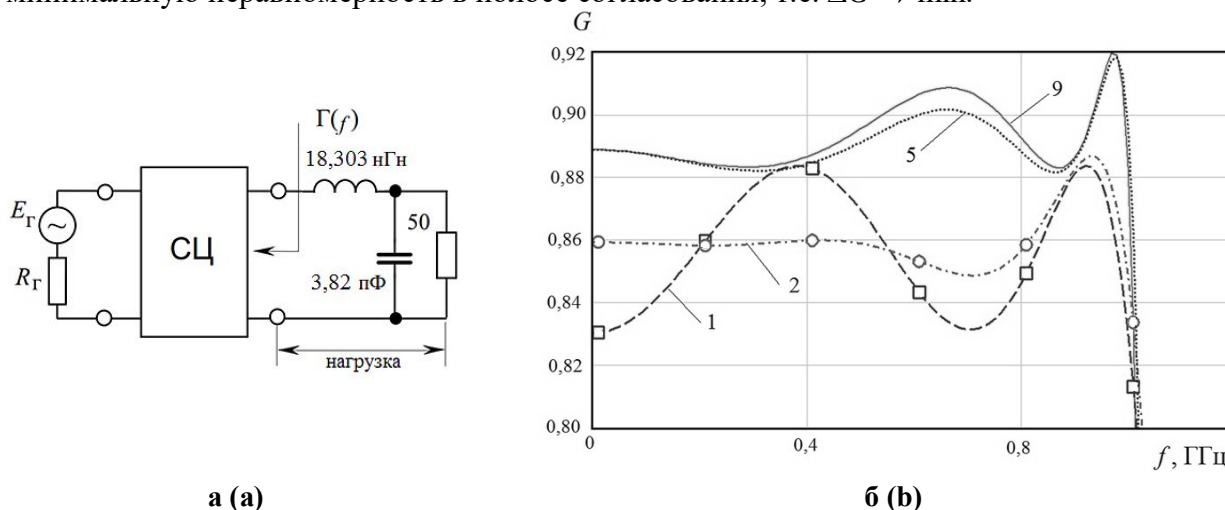


Рисунок 4 – Задача одностороннего согласования Фано (а), АЧХ синтезированных СЦ (б)
Figure 4 – Single-matching problem (Fano problem) (a) and gain response of designed MNs (b)

По условиям рассматриваемой задачи сопротивление генератора R_{Γ} может варьироваться для улучшения согласования в заданном диапазоне частот. Разработанный в данной работе метод не позволяет варьировать импедансы генератора и нагрузки (они являются фиксированными), поэтому значение R_{Γ} принималось равным 100 или 110 Ом.

Возможные структуры СЦ, полученные разными методами, показаны на рис. 5. Значения элементов СЦ и результаты расчетов представлены в таблице 2. Цепь 1 рассчитана на основе аналитической методики Фано-Юлы [10, 15]. Цепь 2 была синтезирована методом «реальной частоты» на основе кусочно-линейной аппроксимации вещественной части в [15]. Видно, что применение классической теории требует использования в составе СЦ трансформатора. Цепь 3 была получена на основе применения метода наименьших квадратов [16]. Цепи 4 и 5 были рассчитаны на основе применения методики «визуального» синтеза [22-24]. Цепи 6 и 7 были рассчитаны с помощью программы GeneSyn [31-33], в которой реализован структурно-параметрический синтез на основе применения ГА. Цепи 7 и 8 получены с помощью метода, представленного в данной работе.

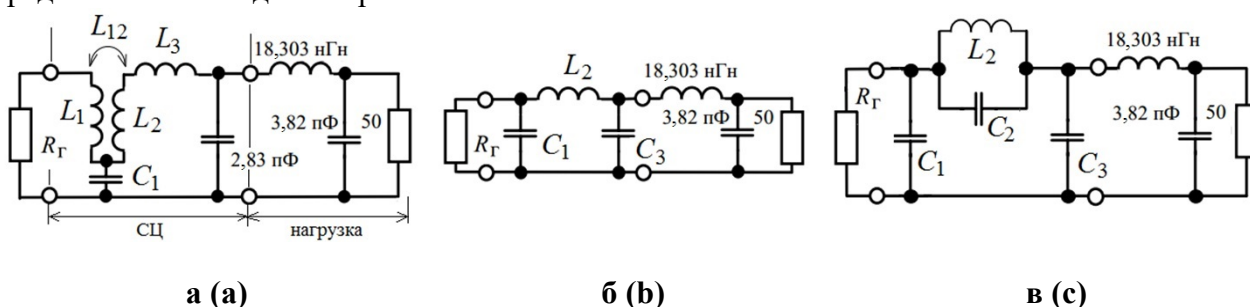


Рисунок 5 – Структуры синтезированных СЦ для задачи Фано
Figure 5 – Designed structures of MNs for Fano problem

Таблица 2 – Результаты синтеза СЦ для задачи Фано
Table 2 – Results of MNs synthesis for Fano problem

№ цепи	Рис.	Методика синтеза	Элементы (Ом, пФ, нГн)	$G_{\min}$	ΔG	$ \Gamma _{\max}$	Число элементов
1	5, а	Классический синтез на основе методики Фано-Юлы [10]	$R_{\Gamma} = 120$; $C_1 = 6,18$ $L_1 = 16,85$; $L_2 = 13,57$ $L_{12} = 17,22$; $L_3 = 16,85$	0,8261	0,0588	0,417	4
2	5, б	Метод «реальной частоты» [17]	$R_{\Gamma} = 110$; $C_1 = 1,12$ $L_2 = 23,15$; $C_3 = 2,936$	0,8487	0,0381	0,389	3
3	5, в	Алгоритм Левенберга-Марквардта [40]	$R_{\Gamma} = 100$ $C_1 = 0,252$; $L_2 = 6,9$ $C_2 = 2,526$; $C_3 = 2,762$	0,8662	0,0496	0,367	4
4	5, б	Визуальное проектирование – программа LOCUS [23]	$R_{\Gamma} = 110$; $C_1 = 1,215$ $L_2 = 23,63$; $C_3 = 3,05$	0,8499	0,0508	0,387	3
5	5, в	Визуальное проектирование – программа LOCUS [23]	$R_{\Gamma} = 100$ $C_1 = 0$; $L_2 = 4,58$ $C_2 = 4,33$; $C_3 = 2,69$	0,8814	0,0362	0,344	3
6	5, б	ГА – программа GeneSyn [31-33]	$R_{\Gamma} = 110$; $C_1 = 1,28$ $L_2 = 24,0$; $C_3 = 3,08$	0,854	0,0593	0,382	3
7	5, в	ГА – программа GeneSyn [31-33]	$R_{\Gamma} = 100$ $C_1 = 0$; $L_2 = 4,27$ $C_2 = 4,75$; $C_3 = 2,72$	0,8835	0,0252	0,3413	3
8	5, б	Предлагаемый метод синтеза	$R_{\Gamma} = 110$ $C_1 = 1,296$ $L_2 = 24,02$; $C_3 = 3,096$	0,854	0,0682	0,382	3
9	5, в	Предлагаемый метод синтеза	$R_{\Gamma} = 100$ $C_1 = 0$; $L_2 = 4,25$ $C_2 = 4,82$; $C_3 = 2,71$	0,882	0,0405	0,3435	3

Сравнение результатов расчетов для примера 1 показало, что предлагаемый метод выполняет синтез СЦ лучше, чем методы классического синтеза, нелинейной оптимизации и

«реальной» частоты, и примерно на том же уровне, что и методы на основе визуального подхода и ГА. Также как и программы LOCUS и GeneSyn, предлагаемый метод для цепи, состоящей из 3-х элементов, находит два возможных решения – СЦ в виде ФНЧ (цепь 8) и цепь с параллельным LC-контуром (СЦ с эллиптической формой АЧХ) в (цепь 9). По сравнению с визуальным подходом предлагаемый метод позволил получить больший уровень $G_{\min}$ (0,882 против 0,8814), но неравномерность АЧХ ΔG (0,0405 против 0,0362) стала несколько хуже (см. цепи 7 и 9 в таблице 2). Цепь 7, полученная с помощью ГА, имеет лучшие предельные значения $G_{\min}$ и ΔG среди представленных в таблице 2. Для сравнения графики АЧХ коэффициента передачи для цепей 1, 2, 5 и 9 показаны на рисунке 4, б.

Пример 2. Задача двухстороннего согласования. Второй пример демонстрирует решение задачи синтеза реактивной СЦ для согласования двух комплексных нагрузок [17-19, 38], заданных в виде эквивалентных схем (см. рисунок 6). Реактивная СЦ должна обеспечить согласование частотно-зависимых импедансов генератора $Z_r(f)$ и нагрузки $Z_n(f)$ в полосе частот от 47 МГц до 157 МГц при уровне коэффициента передачи по мощности не хуже, чем -1,25 дБ (0,75 раз). Результаты расчетов показаны на рисунке 7 и сведены в таблицу 3.

Цепи 1 и 2 были получены методом «реальной» частоты» в [18] и [19] соответственно. Цепь 3 получена в [39] с помощью метода, комбинирующего оптимизационный стохастический алгоритм Гаусса-Ньютона и алгоритм случайного поиска. Цепь 4 была рассчитана в [38] на основе применения генетического алгоритма и метода наискорейшего спуска.

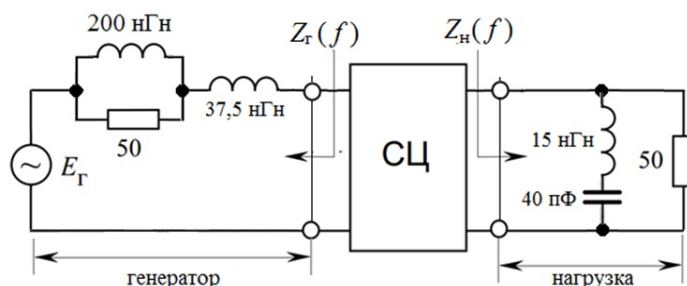


Рисунок 6 – Задача согласования двух комплексных нагрузок

Figure 6 – Double matching problem

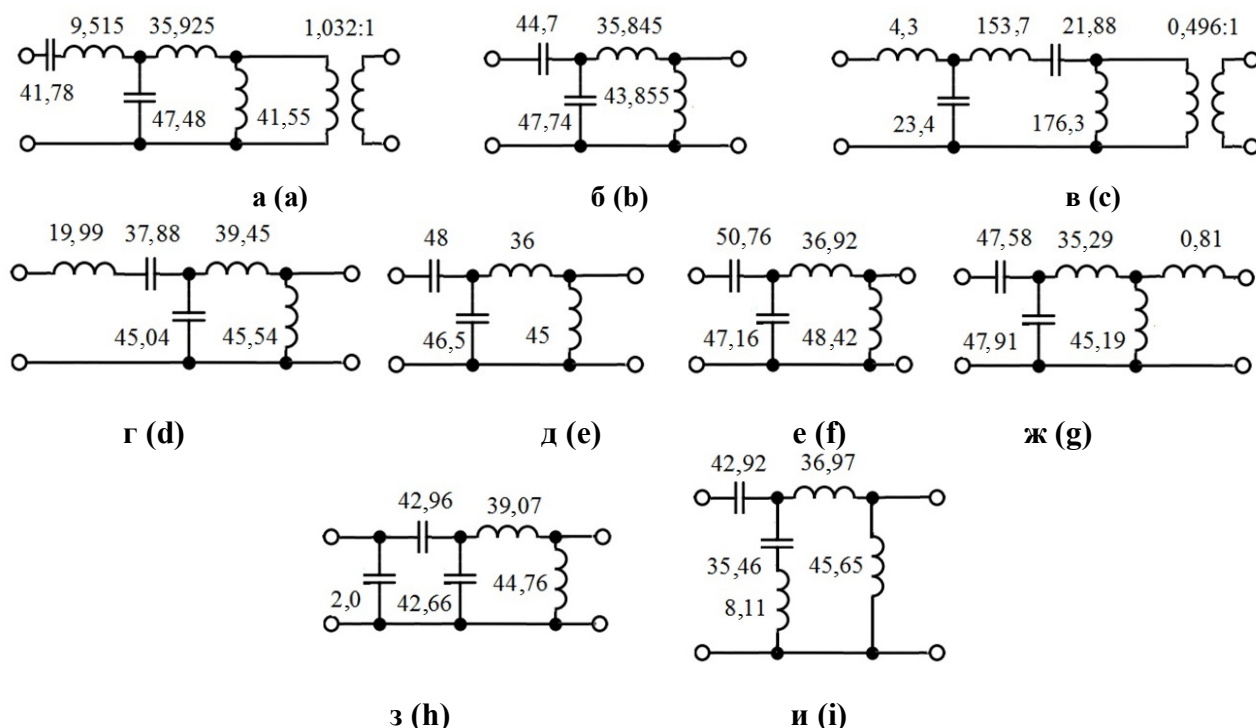


Рисунок 7 – Синтезированные СЦ для примера 2 (индуктивность L в нГн, емкость C в пФ)

Figure 7 – Designed structures of MNs for example 2 (L in nH and C in pF)

Цепь 5 получена на основе применения метода «визуального» синтеза и программы LOCUS [24]. В [24] отмечается, что применение «визуальной» методики позволяет получить лучшие результаты по сравнению с методами «реальной частоты» и методами численной оптимизации. Предлагаемый метод нашёл несколько решений данной задачи с разным количеством элементов (от 4 до 8), из которых в таблицу 3 вынесено четыре – это цепь 6 с минимальными количеством элементов ($n = 4$) и три пятиэлементные цепи 7, 8 и 9 с разными структурами, которые имеют лучшие показатели по уровню $G_{\min}$ ($|\Gamma|_{\max} = \sqrt{1 - G_{\min}^2}$). Найденные СЦ с большим числом элементов (6-8) не показаны в таблице 3, так в них некоторые элементы не удовлетворяют условиям реализуемости.

Таблица 3 – Результаты синтеза СЦ для второго примера

Table 3 – Results of MNs synthesis for example 2

№ цепи	Рис.	Методика синтеза	$G_{\min}$	ΔG	$ \Gamma _{\max}$	Число элементов
1	7, а	Метод «реальной» частоты [18]	0,7423	0,109	0,5076	6
2	7, б	Метод «реальной» частоты [19]	0,7474	0,098	0,5026	4
3	7, в	Сочетание алгоритмов Гаусса-Ньютона и случайного поиска [39]	0,7503	0,09	0,4997	6
4	7, г	Сочетание ГА и алгоритма наискорейшего спуска [38]	0,7362	0,157	0,5136	5
5	7, д	Визуальное проектирование – программа LOCUS IN-DESYS [24]	0,7488	0,063	0,5012	4
6	7, е	Предлагаемый метод синтеза	0,7522	0,075	0,4978	4
7	7, ж	Предлагаемый метод синтеза	0,7615	0,075	0,4884	5
8	7, з	Предлагаемый метод синтеза	0,7876	0,076	0,4609	5
9	7, и	Предлагаемый метод синтеза	0,7654	0,089	0,4844	5

Из сравнения результатов расчетов (см. таблицу 3) можно сказать, что полученные решения (цепи 6-9) имеют лучшие параметры, чем СЦ, полученные на основе методов «реальной» частоты (цепи 1 и 2) и оптимизационных подходов (цепь 3 и 4), и сопоставимы с параметрами СЦ, которая была получена на основе визуальной методики (цепь 5). Рассчитанная предлагаемым методом цепь 8 имеет лучшее значение $G_{\min}$ (0,7876 против 0,7488), чем цепь 5, но неравномерность ΔG у нее стала немного больше (0,076 против 0,063).

Пример 3. Расчет СЦ с наклонной формой АЧХ. В данном примере решается задача синтеза межкаскадной СЦ для двухкаскадного СВЧ усилителя диапазона частот 2-6 ГГц, выполненного на полевых GaAs транзисторах (T_1, T_2), см. рисунок 8, а. Эта задача была рассмотрена в [18], а также использовалась в [16, 20] в качестве тестовой для сравнения различных методов синтеза. В качестве импеданса источника сигнала $Z_r(f)$ для межкаскадной цепи СЦ₂ выступает выходной импеданс транзистора первого каскада, а в качестве нагрузки $Z_n(f)$ – входной импеданс транзистора второго каскада. При этом АЧХ СЦ₂ должна иметь подъем для компенсации спада частотной зависимости коэффициента усиления транзисторов.

Исходные данные для проектирования межкаскадной цепи представлены в таблице 4, для фиксированных частот диапазона 2-6 ГГц заданы импедансы генератора ($\text{Re}Z_r, \text{Im}Z_r$) и нагрузки ($\text{Re}Z_n, \text{Im}Z_n$), а также желаемая форма АЧХ коэффициента передачи СЦ₂ (G_0). Здесь $G_0(f_k) = (G^+(f_k) - G^-(f_k))/2$, где G^+ и G^- – верхняя и нижняя границы уровня допуска коэффициента передачи соответственно. Результаты расчетов представлены на рисунке 9 и сведены в таблицу 5. В таблице $\Delta G_{\max} = \max(|G(f_k) - G_0(f_k)|)$ – максимальное отклонение АЧХ СЦ от желаемого значения; $G_{\max} = \max(G(f_k))$ – максимальное значение АЧХ в полосе рабочих частот. На рисунке 8, б желаемое значение G_0 показано серой непрерывной линией, а заданные допуски на АЧХ G^-, G^+ – пунктирными линиями. Результаты расчетов СЦ сведены в таблицу 5. Также на рисунке 8, б приведены АЧХ для СЦ с номерами 2, 5, 7 и 8 (номера СЦ указаны в таблице 5).

Таблица 4 – Исходные данные к задаче синтеза межкаскадной СЦ2

Table 4 – Data for the problem of interstage MN2 synthesis

$f, \text{ГГц}$	$G_0, \text{дБ}$	$G^-, \text{дБ}$	$G^+, \text{дБ}$	$\text{Re}Z_r, \text{Ом}$	$\text{Im}Z_r, \text{Ом}$	$\text{Re}Z_n, \text{Ом}$	$\text{Im}Z_n, \text{Ом}$
2	-1,271	-1,471	-1,071	75,08	0,84	83,16	-135,9
3	-0,5188	-0,7188	-0,3188	81,22	2,98	53,02	-102,9
4	-0,5542	-0,7542	-0,3542	81,94	-1,52	35,56	-77,55
5	0,0	-0,20	0,20	85,15	-1,40	39,93	-68,64
6	-0,6525	-0,8525	-0,4525	81,44	-1,19	22,69	-46,11

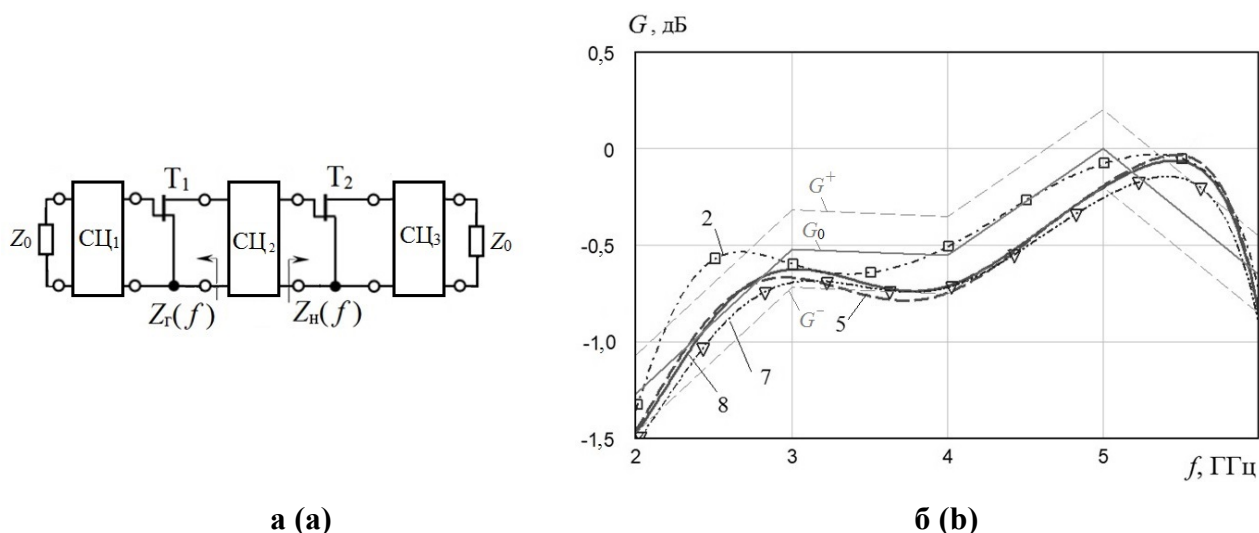


Рисунок 8 – Структурная схема двухкаскадного СВЧ усилителя (а), АЧХ синтезированных межкаскадных СЦ для примера 3 (б)
Figure 8 – Structural diagram of two-stage MW amplifier (a) and gain response of designed interstage MNs (b)

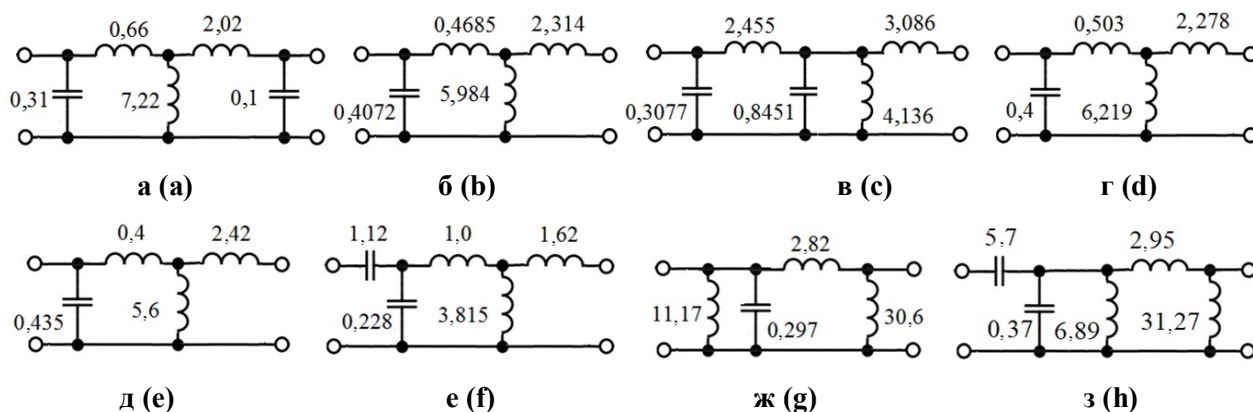


Рисунок 9 – Синтезированные межкаскадные СЦ₂ (индуктивность L в нГн, емкость C в пФ)
Figure 9 – Designed structures of MNs for example 3 (L in nH and C in pF)

Цепь 1 была рассчитана на основе метода систематического поиска [20], цепь 2 – численным методом «реальной» частоты [18]. Цепь 3 – на основе применения ГА и метода градиентного метода нелинейной оптимизации [38]. Цепь 4 – с помощью ГА [31-33]. Цепи 5 и 6 были найдены с помощью «визуального» подхода [24, 25]. При этом для цепи 6 первый элемент был специально задан в виде последовательно включенного конденсатора. Цепи 7 и 8 были получены предлагаемым методом.

Таблица 5 – Результаты синтеза межкаскадной СЦ₂

Table 5 – Results of interstage MN2 synthesis

№ цепи	Рис.	Метод синтеза	$\Delta G_{\max}$, дБ	$G_{\max}$, дБ	Число элементов	Элемент CS
1	9, а	Метод систематического поиска [20]	1,15	-0,597	5	Нет
2	9, б	Метод «реальной» частоты [18]	0,20	-0,059	4	Нет
3	9, в	Сочетание ГА и метода наискорейшего спуска [38]	0,08	-0,055	5	Нет
4	9, г	ГА – программа GeneSyn [31-33]	0,19	-0,059	4	Нет
5	9, д	«Визуальное» проектирование – программа LOCUS INDESYS [24, 25]	0,23	-0,041	4	Нет
6	9, е	«Визуальное» проектирование – программа LOCUS INDESYS [24, 25]	0,17	-0,094	5	Да
7	9, ж	Предлагаемый метод синтеза	0,19	-0,145	4	Нет
8	9, з	Предлагаемый метод синтеза	0,22	-0,063	5	Да

Сравнение результатов расчетов межкаскадной СЦ для примера 3 (см. таблицу 5) позволяет сделать вывод, что разработанный метод нашел решения не хуже, чем альтернативные методы, в том числе и на основе применения ГА (GeneSyn) и визуального подхода (LOCUS). Но последовательно включенный конденсатор, наличие которого требуется в составе СЦ₂, есть только в цепях 5 и 8. Причем, в случае цепи 5 этот элемент был жёстко задан перед началом процедуры синтеза. АЧХ коэффициента передачи для цепей 2, 5, 7 и 8 приведены на рисунке 8, б. Видно, что АЧХ для цепи 7 лучше попадает в желаемый диапазон значений между G^- и G^+ , т.е. имеет меньшее значение $\Delta G_{\max}$, чем цепь 8, но при этом значение $G_{\max}$ для нее стало немного меньше. Следует также отметить, так как импедансы генератора и нагрузки были заданы в виде дискретных точек (см. таблицу 4), для получения «гладких» графиков АЧХ использовалась сплайн-интерполяция.

Выводы по результатам эксперимента

Таким образом, тестирование разработанного метода и реализованной на его основе программы на типовых задачах широкополосного согласования показало его работоспособность и эффективность, найденные решения не уступают результатам, которые были получены на основе альтернативных подходов, а в некоторых случаях и превосходят их.

При этом, в отличие от ГА, реализованного в программе GeneSyn [31-33], предлагаемый метод позволяет за один запуск получить набор возможных решений (структур СЦ) с разным количеством элементов близких к оптимальным. В программе GeneSyn для этого потребуется выполнить несколько стартов с разными настройками размерности синтезируемой цепи. Визуальный подход [21-25] тоже позволяет получать решения близкие к оптимальным, так как дает возможность исследовать решаемую задачу за счет её визуализации, но он является интерактивным, т.е. требует активного участия человека в процессе синтеза.

Заключение

В статье рассматривается разработка и исследование метода автоматического синтеза широкополосных согласующих цепей на сосредоточенных элементах на основе применения метаэвристического алгоритма смешанной многокритериальной оптимизации. Метод позволяет решать задачу синтеза реактивных СЦ для произвольных комплексных нагрузок, которые могут быть заданы как в виде эквивалентных схем, так и в табличном виде (в виде файла формата *.zlp или *.slp). При этом получают решения близкие к оптимальным исходя из двух критериев – получение заданной формы АЧХ коэффициента передачи и получение структуры СЦ с минимальным количеством элементов (или с минимальной стоимостью). Разработанная на основе метода компьютерная программа может применяться для расчета широкополосных СЦ и КЦ при проектировании радиоэлектронных устройств и систем.

Проведены эксперименты по синтезу согласующих цепей и сравнение с аналогичными методами. В задаче одностороннего согласования цепь предлагаемого метода показала второй результат из девяти вариантов по показателю минимального значения коэффициента передачи, который от лучшего решения отличается на 0,0015 дБ, а от худшего на 0,0559 дБ. В задаче двухстороннего согласования цепь предлагаемого метода продемонстрировала лучший результат данного показателя из девяти вариантов цепей. В задаче согласования-выравнивания цепь предлагаемого метода показала третий результат из восьми вариантов по показателю максимального отклонения коэффициента передачи от желаемого значения. Отклонение данного показателя от лучшего варианта составило 0,011 дБ, а от худшего – 0,096 дБ.

Дальнейшее развитие данной работы авторы видят в расширении типа компонентов, добавлении элементов в виде отрезков линий передачи и реализации данного метода в более производительных вычислительных средах.

Библиографический список

1. **Vendelin G.D., Pavid A.M., Rohde U.L., Rudolph M.** Microwave circuit design using linear and nonlinear techniques. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2021. 1180 p.
2. **Besser L., Gilmore R.** Practical RF circuit design for modern wireless systems: Active circuits and systems. Volume 1. London-Boston: Artech House, 2003. 539 p.
3. **Besser L., Gilmore R.** Practical RF circuit design for modern wireless systems: Passive circuits and systems. Volume 2. London-Boston: Artech House, 2003. 569 p.
4. **Фуско В.** СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.
5. **Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т.** Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т. 1. / Перевод с англ. под ред. Л.В. Алексеева и Ф.В. Кушнера. М.: Связь 1971. 440 с.
6. **Вай Кайчень.** Теория и проектирование широкополосных согласующих цепей / Перевод с англ. под ред. Ю.Л. Хотунцева. М.: Связь, 1979. 288 с.
7. **Курушин А.А.** Проектирование СВЧ устройств с использованием электронной диаграммы Смита / Под ред. д.т.н., проф. Б.Л. Когана. М.: изд. МЭИ, 2008. 120 с.
8. **Карсон Р.** Высокочастотные усилители / Перевод с англ. под ред. В.Р. Магнусевского. М.: Радио и связь, 1981. 216 с.
9. **Петров Г.В., Толстой А.И.** Линейные балансные СВЧ усилители. М.: Радио и связь. 1983. 176 с.
10. **Фано Р.** Теоретические ограничения полосы согласования произвольных импедансов / Пер. с англ. под ред. Г.И. Слободенюка. М.: Советское радио, 1965. 72 с.
11. **Богачев В.М.** Синтез цепей связи для широкополосных усилителей / Под ред. С.М. Смольского. М.: изд-во МЭИ, 1980. 100 с.
12. **Алексеев О.В., Головков А.А., Дмитриев А.Я.** Проектирование радиопередающих устройств с применением ЭВМ / Под ред. О. В. Алексеева. М.: Радио и связь. 1987. 392 с.
13. **Mellor D.J.** Improved computer-aided synthesis tools for the design of matching networks for wide-band microwave amplifiers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1986. Vol. MTT-34. No 12. P. 1276-1281.
14. **Mellor D.J., Linvill J.C.** Synthesis of interstate networks of prescribed gain versus frequency slopes // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1975. Vol. MTT-23. No 12. P. 1013–1020.
15. **Youla D.C.** A new theory of broad-band matching // IEEE Transactions on Circuit Theory. 1964. Vol. CT-11, P. 30-50.
16. **Carlin H.J., Yarman B.S.** The double matching problem: Analytic and real frequency solutions // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 1983. Vol. CAS-30. P. 15-28.
17. **Yarman B.S., Carlin H.J.** A simplified real frequency technique applied to broadband multistage microwave amplifiers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1982. Vol. MTT-30. No 12. P. 2216-2222.
18. **Sussman-Fort S.E.** The computer-aided design of microwave matching networks // International Journal of Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering. 1991. Vol. 1, No. P. 288-305.
19. **Carlin H.J., Amstutz P.** On optimum broad-band matching // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 1981. Vol. CAS-28. No 5. P. 401-405.
20. **Abrie P.L.D.** Design of RF and microwave amplifiers and oscillators. London-Boston: Artech House, 2000. 480 p.
21. **Babak L.I., Cherkashin M.V.** Interactive «visual» design of matching and compensation networks for microwave active circuits // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. Phoenix. AZ. IEEE. 2001. Vol. 3. P. 2095-2098.
22. **Бабак Л.И., Черкашин М.В., Зайцев Д.А.** «Визуальное» проектирование корректирующих и согласующих цепей полупроводниковых СВЧ-устройств. Часть 1. Описание процедуры проектирования // Доклады ТУСУР. 2007. Т.14. № 6. С. 11-23.
23. **Бабак Л.И., Черкашин М.В., Зайцев Д.А.** «Визуальное» проектирование корректирующих и согласующих цепей полупроводниковых СВЧ-устройств. Часть 2. Программная реализация и примеры // Доклады ТУСУР. 2007. Т. 15. № 1. С. 10-19.
24. **Самуилов А.А., Черкашин М.В., Бабак Л.И.** Методика «визуального» проектирования цепей на сосредоточенных элементах для широкополосного согласования двух комплексных нагрузок // Доклады ТУСУР. 2013. Т. 28. № 2. С. 30-39.
25. **Самуилов А.А.** Программа «визуального» проектирования корректирующих и согласующих цепей LOCUS на базе среды INDESYS // Доклады ТУСУР. 2012. Т. 26. № 2-2. С. 119-126.

26. **Zebulum R., Pacheco M., Vellasco M.** Evolutionary electronics. automatic design of electronic circuits and systems by genetic algorithms. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002. 320 p.
27. **Chang S.-J., Hou H.-S., Su Y.-K.** Automated passive filter synthesis using a novel tree representation and genetic programming // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2006. Vol. 10. P. 93-100.
28. **Wu T., He J.** Differential evolution with group crossover for automatic synthesis of analog circuit // LNCS. 2013. Vol. 7928. P. 414-421.
29. **Alpaydin G., Balkir S., Dundar G.** An evolutionary approach to automatic synthesis of high-performance analog integrated circuits // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2003. Vol. 7. P. 240-252.
30. **Werner P.L., Mittra R., Werner D.H.** Extraction of SPICE-type equivalent circuits of microwave components and discontinuities using the genetic algorithm optimization technique // IEEE Transactions on Advanced Packaging. 2000. Vol. 23. P. 55-61.
31. **Бабак Л.И., Вьюшков В.А.** Автоматизированный синтез согласующих цепей на основе генетического алгоритма // Сб. материалов докладов межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». Томск: ТУСУР. 2005. № 2. С. 102-105.
32. **Дорофеев С.Ю., Бабак Л.И.** Синтез согласующих цепей на сосредоточенных и распределённых элементах с использованием генетического алгоритма // 18-я Межд. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2008). Севастополь: Вебер, 2008. Т. 1. С. 133-134.
33. **Дорофеев С. Ю., Бабак Л. И.** Синтез согласующих цепей в распределённом и смешанном элементных базисах // Современные проблемы радиоэлектроники. 2008. С. 98-101.
34. **Fakhfakh M., Cooren Y., Sallem A.** Analog circuit design optimization through the particle swarm optimization technique // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 2010. Vol. 63. P. 71-82.
35. **Vondras J., Martinek P.** Multi-criterion filter design via differential evolution method for function minimization // IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications. St. Petersburg: IEEE, 2002. P. 106-109.
36. **Pillans J.** Efficiency of evolutionary search for analog filter synthesis // Expert Systems with Applications. 2021. Vol. 168. P. 114267.
37. **Deb K., Agrawal S., Pratap A., Meyarivan T.** A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002. Vol. 6. P. 182-197.
38. **Du Plessis W.P.** A genetic algorithm for impedance matching network design: Dissertation for the degree of Master of Engineering (Electronic). Pretoria: University of Pretoria, 2003. 195 p.
39. **Dedieu H., Dehollain C., Dehollain J., Rhodes G.** A New Method for Solving Broadband Matching Problems // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 1994. Vol. 41. No 9. P. 561-571.
40. **Пегасин Д.В.** Синтез согласующих цепей с характеристиками передачи мощности заданного уровня на основе алгоритма Левенберга–Марквардта // Доклады БГУИР. 2010. №. 3 (49). С. 17-23.
41. **Burachik R., Kaya C., Rizvi M.** Algorithms for generating Pareto fronts of multi-objective integer and mixed-integer programming problems // Engineering optimization. 2022. Vol. 54. No 8. P. 1413-1425.
42. **Сарин К.С.** Гибридный алгоритм смешанной многокритериальной оптимизации «кукушкин поиск» с генетическим оператором скрещивания // Искусственный интеллект и принятие решений. 2024. № 2. С. 87-105.

UDC 004.896

MATCHING NETWORKS SYNTHESIS BASED ON METAHEURISTIC MIXED-INTEGER MULTIOBJECTIVE ALGORITHM

M. V. Cherkashin, Ph.D. (in technical sciences), associate professor, Department of Computer Control and Design Systems, TSUCSR, Tomsk, Russia;

orcid.org/0000-0001-7536-363X, e-mail: mikhail.v.cherkashin@tusur.ru

K. S. Sarin, Ph.D. (in technical sciences), associate professor, Department of Computer Control and Design Systems, TSUCSR, Tomsk, Russia;

orcid.org/0000-0003-3264-7768, e-mail: sarin.konstantin@mail.ru

I. A. Hodashinsky, Dr. in technical sciences, full professor, Department of Computer Control and Design Systems, TSUCSR, Tomsk, Russia;

orcid.org/0000-0002-9355-7638, e-mail: hodashn@rambler.ru

M. O. Svetlakov, Ph.D. (in technical sciences), associate professor, Department of Computer Control and Design Systems, TSUCSR, Tomsk, Russia;

orcid.org/0000-0002-5060-0958, e-mail: mikhail.o.svetlakov@tusur.ru

*Synthesis of broadband matching circuits is an important task in the construction of radio technical and telecommunication systems and devices. Usually, the requirements to matching networks are contradictory in terms of quality of the result obtained, which complicates the automation of design process. One of the possible approaches to solving it is to use multiobjective heuristic algorithms that allow combining the procedures of structural and parametric synthesis, but the efficiency of such algorithms strongly depends on the method of target function forming and methods of its optimization. **The aim of the work** is to develop a method for structural-parametric synthesis of broadband matching circuits based on the use of mixed multi-objective optimization that searches in space with discrete and real variables. To solve the optimization problem, a cuckoo search metaheuristic algorithm with genetic crossover operator was used. The method allows simultaneously constructing the structure and adjusting the parameters of matching circuit elements. The optimization goals are structure complexity and the deviation of amplitude-frequency characteristic from the required value. As a result of the algorithm, many circuit variants that are not dominated by these goals are formed. Based on the requirements for the device being developed and the compromise between its accuracy and complexity, an expert selects an appropriate option. Several typical examples were solved using the method developed: single match problem (Fano problem), double match problem, and matching-equalizing problem. The results of the experiment showed high efficiency of constructed circuits in comparison with the circuits of alternative synthesis methods.*

Keywords: matching network, broadband matching, synthesis of matching network, metaheuristic algorithm, multiobjective optimization, mixed-integer optimization, genetic algorithm, cuckoo search metaheuristic.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-93-3-18

References

1. Vendelin G.D., Pavio A.M., Rohde U.L., Rudolph M. *Microwave circuit design using linear and nonlinear techniques*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2021. 1180 p.
2. Besser L., Gilmore R. *Practical RF circuit design for modern wireless systems: Active circuits and systems. Volume 1*. London-Boston: Artech House, 2003. 539 p.
3. Besser L., Gilmore R. *Practical RF circuit design for modern wireless systems: Passive circuits and systems. Volume 2*. London-Boston: Artech House, 2003. 569 p.
4. Fusko V. *SVCh cepi. Analiz i avtomatizirovannoe proektirovanie*. (Microwave circuits. Analysis and automated design), Moscow, Radio and communications, 1990, 288 p. (In Russian).
5. Mattej D.L., Jang L., Dzhons E.M.T. *Fil'try SVCh, soglasujushhie cepi i cepi svyazi*. T. 1 (Microwave filters, matching circuits and coupling circuits. Vol. 1.), Moscow, Communications, 1971, 440 p. (In Russian).
6. Vaj Kajchen *Teorija i proektirovanie shirokopolosnyh soglasujushhih cepej*. (Theory and design of broadband matching networks), Moscow, Communications, 1979, 288 p. (In Russian).
7. Kurushin A.A. *Proektirovanie SVCh ustroystv s ispol'zovaniem jelektronnoj diagrammy Smita*. (Designing Microwave Devices Using the Electronic Smith Chart), Moscow, MPEI, 2008, 120 p. (In Russian).

8. **Karson R.** *Vysokochastotnye usiliteli* (High-frequency amplifiers), Moscow, Radio and communications, 1981, 216 p. (In Russian).
9. **Petrov G.V., Tolstoj A.I.** *Linejnye balansnye SVCh usiliteli*. (Linear balanced microwave amplifiers), Moscow, Radio and communications, 1983, 176 p. (In Russian).
10. **Fano R.** *Teoreticheskie ogranichenija polosy soglasovanija proizvol'nyh impedansov*. (Theoretical Limits of the Matching Bandwidth of Arbitrary Impedances), Moscow, Soviet radio, 1965, 72 p. (In Russian).
11. **Bogachev V.M.** *Sintez cepej svyazi dlja shirokopolosnyh usilitelej*. (Synthesis of coupling circuits for broadband amplifiers), Moscow, MPEI, 1980, 100 p. (In Russian).
12. **Alekseev O.V., Golovkov A.A., Dmitriev A.Ja.** *Proektirovanie radiopredajushhih ustroystv s primeneniem JeVM*. (Design of Radio Transmitting Devices Using Computers), Moscow, Radio and communications, 1987, 392 p. (In Russian).
13. **Mellor D.J.** Improved computer-aided synthesis tools for the design of matching networks for wide-band microwave amplifiers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1986, vol. MTT-34, no 12. pp. 1276-1281.
14. **Mellor D.J., Linvill J.C.** Synthesis of interstate networks of prescribed gain versus frequency slopes. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1975, vol. MTT-23, no 12, pp. 1013-1020
15. **Youla D.C.** A new theory of broad-band matching. *IEEE Transactions on Circuit Theory*. 1964, vol. CT-11, pp. 30-50.
16. **Carlin H.J., Yarman B.S.** The double matching problem: Analytic and real frequency solutions. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. 1983, vol. CAS-30, pp. 15-28.
17. **Yarman B.S., Carlin H.J.** A simplified real frequency technique applied to broadband multistage microwave amplifiers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1982, vol. MTT-30, no 12, pp. 2216-2222.
18. **Sussman-Fort S.E.** The computer-aided design of microwave matching networks. *International Journal of Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering*. 1991, vol. 1, no. pp. 288-305.
19. **Carlin H.J., Amstutz P.** On optimum broad-band matching. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. 1981, vol. CAS-28, no 5, pp. 401-405.
20. **Abrie P.L.D.** *Design of RF and microwave amplifiers and oscillators*. London-Boston, Artech House, 2000, 480 p.
21. **Babak L.I., Cherkashin M.V.** Interactive «visual» design of matching and compensation networks for microwave active circuits. *International Microwave Symposium Digest IEEE MTT-S 2001*. 2001, pp. 2095-2098.
22. **Babak L.I., Cherkashin M.V., Zajcev D.A.** «Vizual'noe» proektirovanie korrektrujushhih i soglasujushhih cepej poluprovodnikovyh SVCh-ustrojstv. Chast' 1. Opisaniye procedury proektirovaniya. *Doklady TUSUR*. 2007, vol. 14, no. 3, pp. 11-23. (In Russian).
23. **Babak L.I., Cherkashin M.V., Zajcev D.A.** «Vizual'noe» proektirovanie korrektrujushhih i soglasujushhih cepej poluprovodnikovyh SVCh - ustrojstv Chast' 2. Programmnaja realizacija i primery. *Doklady TUSUR*. 2007, vol. 15, no. 1, pp. 10-19. (In Russian).
24. **Samuilov A.A., Cherkashin M.V., Babak L.I.** Metodika «vizual'nogo» proektirovaniya cepej na sosredotochennyh jelementah dlja shirokopolosnogo soglasovanija dvuh kompleksnyh nagruzok. *Doklady TUSUR*. 2013, vol. 28, no. 2, pp. 30-39. (In Russian).
25. **Samuilov A. A.** Programma «vizual'nogo» proektirovaniya korrektrujushhih i soglasujushhih cepej LOCUS na baze sredy INDESYS. *Doklady TUSUR*. 2012, vol. 26, no. 2-2, pp. 119-126. (In Russian).
26. **Zebulum R., Pacheco M., Vellasco M.** *Evolutionary electronics. automatic design of electronic circuits and systems by genetic algorithms*. Boca Raton. CRC Press, 2002, 320 p.
27. **Chang S.-J., Hou H.-S., Su Y.-K.** Automated passive filter synthesis using a novel tree representation and genetic programming. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2006, vol. 10. pp. 93-100.
28. **Wu T., He J.** Differential evolution with group crossover for automatic synthesis of analog circuit. *LNCS*. 2013, vol. 7928, pp. 414-421.
29. **Alpaydin G., Balkir S., Dundar G.** An evolutionary approach to automatic synthesis of high-performance analog integrated circuits. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2003, vol. 7, pp. 240-252.
30. **Werner P.L., Mittra R., Werner D.H.** Extraction of SPICE-type equivalent circuits of microwave components and discontinuities using the genetic algorithm optimization technique. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*. 2000, vol. 23, pp. 55-61.

31. **Babak L.I., Vjushkov V.A.** Avtomatizirovannyj sintez soglasujushhih cepej na osnove geneticheskogo algoritma. *Jelektronnye sredstva i sistemy upravlenija. Materialy dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii*. Tomsk, TUSUR. 2005, no. 2, pp. 102-105. (In Russian).
32. **Dorofeev S.Ju., Babak L.I.** Sintez soglasujushhih cepej na sosredotochennyh i raspredeljonnyh jelementah s ispol'zovaniem geneticheskogo algoritma. *SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii (KryMiKo '2008)*. Materialy dokladov mezhdunarodnoj konferencii. 2008, vol. 1, pp. 133-134. (In Russian).
33. **Dorofeev S.Ju., Babak L.I.** Sintez soglasujushhih cepej v raspredelennom i smeshannom jelementnyh bazisah. *Sovremennye problemy radiojelektroniki*. 2008, pp. 98-101. (In Russian).
34. **Fakhfakh M., Cooren Y., Sallem A.** Analog circuit design optimization through the particle swarm optimization technique. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. 2010, vol. 63, pp. 71-82.
35. **Vondras J., Martinek P.** Multi-criterion filter design via differential evolution method for function minimization. *IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications*. St. Petersburg: IEEE, 2002, pp. 106-109.
36. **Pillans J.** Efficiency of evolutionary search for analog filter synthesis. *Expert Systems with Applications*. 2021, vol. 168, pp. 114267.
37. **Deb K., Agrawal S., Pratap A., Meyarivan T.** A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002, vol. 6, pp. 182-197.
38. **Du Plessis W.P.** *A genetic algorithm for impedance matching network design: Dissertation for the degree of Master of Engineering (Electronic)*. Pretoria, University of Pretoria, 2003, 195 p.
39. **Dedieu H., Dehollain C., Dehollain J., Rhodes G.** A New Method for Solving Broadband Matching Problems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. 1994, vol. 41, no 9, pp. 561-571.
40. **Pegasin D.V.** Sintez soglasujushhih cepej s harakteristikami peredachi moshhnosti zadannogo urovnja na osnove algoritma Levenberga-Markvardta. *Doklady BGUIR*. 2010, vol. 49, no. 3, pp. 17-23. (In Russian).
41. **Burachik R., Kaya C., Rizvi M.** Algorithms for generating Pareto fronts of multi-objective integer and mixed-integer programming problems. *Engineering optimization*. 2022, vol. 54, no 8, pp. 1413-1425.
42. **Sarin K.S.** Gibridnyj algoritm smeshannoju mnogokriterial'noj optimizacii «kukushkin poisk» s geneticheskim operatorom skreshhivaniya. *Iskusstvennyj intellekt i prinjatje reshenij*. 2024, no. 2, pp. 87-105. (In Russian).