ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЁТА ДИАПАЗОННОЙ ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

В. В. Цибанов

tsibanoff@gmail.com

In amateur radio practice, when designing high-frequency generators or local oscillators of radio receivers, it may be necessary to calculate the parameters of the oscillatory circuit that provide the best temperature stability of the frequency over a given range. The task is to calculate the temperature coefficients of the capacitance of the capacitors of the circuit (range stretch capacitors). Depending on the specific design of the oscillatory circuit, full compensation of the temperature drift of the frequency at one, two frequencies, or over the entire frequency range is possible. Methods for solving this problem are sometimes quite cumbersome. We propose a logically simple, universal digital algorithm for solving the problem, based on the mathematical model of the object optimization. The statement of the problem, the properties of the model and its special cases are considered, the program of the algorithm ("Stabsimplex") for the personal computer compiled in the VBA (Visual Basic for Applications) language of the popular Excel application package MS Office for Windows operating systems is described. The results of calculations for a number of specific schemes are presented. The program is published by the author on the Internet for free use.

В радиолюбительской практике при конструировании высокочастотных генераторов или гетеродинов радиоприёмников бывает необходимо рассчитать параметры колебательного контура, обеспечивающие наилучшую температурную стабильность частоты на заданном диапазоне. Задача сводится к расчёту температурных коэффициентов ёмкости конденсаторов контура (конденсаторов растяжки диапазона). В зависимости от конкретной схемы колебательного контура возможна полная компенсация температурного дрейфа частоты на одной, двух частотах либо на всем диапазоне частот [1]. Приёмы решения данной задачи иногда довольно громоздки [2]. Нами предлагается логически простой, универсальный цифровой алгоритм решения задачи, основанный на оптимизации математической модели объекта. Рассматривается постановка задачи, свойства модели и её частные случаи, описывается программа алгоритма («Stabsimplex») для ПЭВМ, составленная на языке VBA (Visual Basic for Applications) популярного приложения Excel пакета MS Office для операционных систем Windows. Приводятся результаты вычислений для ряда конкретных схем. Программа опубликована автором в сети Интернет для свободного пользования.

1°. Общая постановка задачи.

Имеется в наличии колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности *L*, конденсаторов растяжки диапазона *C*1 и *C*2, конденсатора переменной ёмкости (КПЕ) *C*н, собственной ёмкости катушки *C*0, суммарной ёмкости монтажа и входной цепи *C*м, подстроечного конденсатора *C*п, а также дополнительного параллельного конденсатора *C*3 (рис. 1).

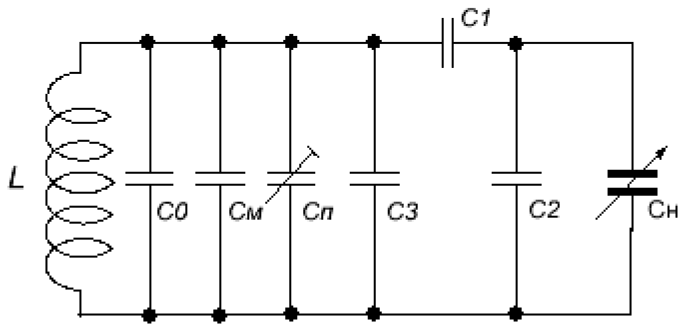

Рис. 1. Подробная схема колебательного контура.

Примечание 1. В принятой модели величины $C0$, Cм и Cп *объединены с величиной ёмкости конденсатора* $C3$, наличие которого, наряду с конденсаторами $C1$ и $C2$, совершенно необходимо, когда требуется полная термокомпенсация на всём диапазоне частот. ТКЕ собственно конденсатора $C3$ будет определяться в итоге расчётов из формулы средневзвешенного значения, о чём сказано в конце статьи. Таким образом, вместо подробной схемы, изображённой на рис. 1, задействована эквивалентная (рис. 2).

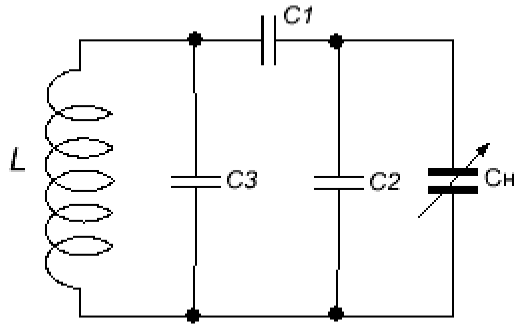

Рис. 2. Модельная схема колебательного контура.

Заданы следующие величины:

L – индуктивность катушки, мкГн;
ёмкости всех конденсаторов, пФ;
λ – температурный коэффициент индуктивности (ТКИ) катушки, град$^{-1}$;
$\theta_{н}$ – температурный коэффициент ёмкости (ТКЕ) конденсатора настройки Cн, град$^{-1}$.

Примечание 2. Считается, что ТКИ и ТКЕ постоянны в рассматриваемом диапазоне частот и не зависят от температуры. Однако если таковые зависимости известны, они при необходимости могут быть учтены в рамках рассматриваемого подхода.

Необходимо найти:

ТКЕ θ_1, θ_2, θ_3 конденсаторов $C1$, $C2$, $C3$, при которых влияние температуры на изменение частоты контура в заданном диапазоне частот будет наименьшим.

2°. Конкретизация задачи и математическая модель объекта.

Задание целевой функции (ЦФ).

Определим критерий температурной стабильности частоты контура и сформулируем целевую функцию задачи оптимизации.

В качестве меры температурного дрейфа частоты принимается величина производной от частоты f по температуре t, $\frac{df}{dt}$ (иное обозначение f_t').

Примечание 3. Обычно в качестве меры «термической нестабильности» частоты контура рассматривают температурный коэффициент частоты (ТКЧ) [1], однако практическое значение имеет не эта *относительная* величина, а дрейф частоты *абсолютный*, равный произведению $(\text{ТКЧ})\cdot f$.

ЦФ представляет собой усреднённую сумму квадратов значений производной на заданном множестве частот диапазона:

$$\Phi = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{df}{dt}\right)_i^2, \tag{1}$$

где n – число точек диапазона. Очевидно, что при идеальной компенсации температурного дрейфа собственной частоты контура на всём множестве частот значение ЦФ должно быть равным нулю. В тех случаях, когда идеальная компенсация недостижима, *минимальное* значение ЦФ обеспечит компенсацию, наилучшую из возможных.

Примечание 4. Термин «наилучшая компенсация» надо понимать не в отвлечённом, каком-либо абсолютном смысле, а именно в контексте конкретного задания ЦФ. Кроме выбранного, возможны иные варианты, как-то: минимум суммы абсолютных величин, минимум максимальной величины («минимакс») и т.п. Нами отдано предпочтение минимуму суммы квадратов, т.к. ЦФ имеет при этом понятный статистический смысл – это *дисперсия* отклонений, т.е. мера погрешности при подгонке.

Построение математической модели объекта.

Зависимость частоты контура от индуктивности L и полной ёмкости C даётся формулой:

$$f = 159.154943\left(LC\right)^{-0.5}. \tag{2}$$

Здесь и далее частота – в МГц, индуктивность – в мкГн, ёмкость – в пФ.

Полная ёмкость контура даётся формулой:

$$C = C_3 + C_1\left(C_2 + C_{\text{н}}\right)/\left(C_1 + C_2 + C_{\text{н}}\right), \tag{3}$$

где C_j – ёмкости соответствующих конденсаторов Cj, j – цифровой или буквенный индекс при соответствующем C.

Находим выражение для производной f_t':

$$\frac{df}{dt} = -79.577472\left(LC\right)^{-3/2}\left(L\frac{dC}{dt} + C\frac{dL}{dt}\right),$$

которое, учитывая, что $\frac{dL}{dt} \equiv \lambda L$, переписываем в виде:

$$\frac{df}{dt} = -\frac{79.577472}{C\sqrt{LC}}\left(\frac{dC}{dt} + \lambda C\right). \tag{4}$$

Записываем выражение для производной C_t', дифференцируя (3), при этом учитываем, что $\frac{dC_j}{dt} \equiv \theta_j C_j$:

$$\frac{dC}{dt} = \theta_3 C_3 + \frac{\left[C_1\left(\theta_2 C_2 + \theta_{\text{н}} C_{\text{н}}\right) + \left(C_2 + C_{\text{н}}\right)\theta_1 C_1\right]\left(C_1 + C_2 + C_{\text{н}}\right) - C_1\left(C_2 + C_{\text{н}}\right)\left(\theta_1 C_1 + \theta_2 C_2 + \theta_{\text{н}} C_{\text{н}}\right)}{\left(C_1 + C_2 + C_{\text{н}}\right)^2}. \tag{5}$$

При заданной частоте f, значение $C_{\text{н}}$ находится по формуле:

$$C_{\text{н}} = \frac{(C - C_{\text{п}})(C_1 + C_2) - C_1 C_2}{C_1 + C_3 - C}, \tag{6}$$

где

$$C = 25330.2959 \Big/ \left(L \cdot f^2\right). \tag{7}$$

Формулировка задачи:

Найти координаты вектора $\vec{\theta}^* = \left(\theta_1^*, \theta_2^*, \theta_3^*\right)^{\text{T}}$ минимума функции трёх переменных (ЦФ)

$$\Phi^* \equiv \Phi\left(\vec{\theta}^*\right) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{df}{dt}\right)_i^2, \tag{8}$$

с учётом соотношений, заданных формулами (3)÷(7). Здесь и далее индекс i есть номер точки (частоты f_i) диапазона.

3°. Реализация алгоритма.

Задаём множество частот f_i диапазона, в которых будут вычисляться значения $\left(\frac{df}{dt}\right)_i$, ($i = 1, \ldots, n$), для чего разбиваем диапазон $f_н \div f_в$ ($f_н$ и $f_в$ – нижняя и верхняя частоты диапазона, соответственно) на $n + 1$ частей и вычисляем частоты в n узлах сетки:

$$f_i = f_{\text{н}} + \frac{f_в - f_н}{n+1} i. \tag{9}$$

Примечание 5. При увеличении n модель показывает асимптотическое поведение, т.е. результат перестаёт зависеть от n; в расчётах принято $n = 20$, что более чем достаточно.

Для нахождения величины ЦФ (8) при некоторых заданных параметрах $\vec{\theta}$, в каждой i-ой точке вычисляются:

1) полная ёмкость контура, C;
2) ёмкость конденсатора настройки, $C_{\text{н}}$;
3) величина производной f_t'.

Производится суммирование квадратов по i и рассчитывается значение ЦФ. Дальнейшие действия сводятся к поиску минимума (8) в пространстве параметров $\vec{\theta}$.

Таким образом, рассматриваемая задача относится к категории нелинейного программирования. Такая постановка, несмотря на кажущуюся сложность, очень удобна своей универсальностью, ибо при наличии готовой программы позволяет решать задачу температурной стабилизации для различных конкретных схем колебательного контура буквально за несколько «кликов», без необходимости углубляться в суть метода.

4°. Подготовка и некоторые важные свойства математической модели.

Прежде чем переходить к рассмотрению компьютерной программы алгоритма, полезно рассмотреть свойства уравнения (4) для производной f_t' и произвести ряд алгебраических преобразований.

Идеальная диапазонная компенсация температурного дрейфа частоты контура, отвечающая нулевому значению ЦФ (8), очевидно, достигается при условии $f_t' = 0$ на всех частотах диапазона, или, что то же, при условии:

$$\frac{dC}{dt}+\lambda C=0. \tag{10}$$

Поскольку данное уравнение содержит три независимых параметра, то следовало бы ожидать, что должны существовать только *три* частоты полной термокомпенсации на диапазоне. При исключении из схемы контура (рис. 2) одного либо двух конденсаторов из *C*2, *C*3, таких частот будет две либо одна, соответственно. При исключении же конденсатора *C*1 (подключении *C*н к катушке «накоротко») оба конденсатора *C*2, *C*3 превращаются в один, и частота полной термокомпенсации будет только одна.

Согласно данным работы [1], при наличии всех трёх конденсаторов, т.е. трёх параметров модели (4), существует набор их значений, при котором условие (10) выполняется на *всём* диапазоне частот, а именно:

$$\theta_1=0.5\left(\theta_{\text{н}}-\lambda\right), \tag{11}$$

$$\theta_2=\theta_{\text{н}}+0.5\left(\lambda+\theta_{\text{н}}\right)C_1/C_2, \tag{12}$$

$$\theta_3=-\lambda-0.5\left(\lambda+\theta_{\text{н}}\right)C_1/C_3. \tag{13}$$

Соотношения являются весьма важными, в частности для оценки работоспособности оптимизационного алгоритма (программа должна отыскать соответствующие численные значения параметров). Однако в тексте статьи [1] не приводится сведений о том, как получены данные соотношения, поэтому далее, по ходу подготовки математической модели, мы покажем, как осуществляется их вывод.
Используя формулу (3) для *C* и взяв производную C'_t, записываем уравнение (10) в виде:

$$\frac{\left[C_1\left(\theta_2C_2+\theta_{\text{н}}C_{\text{н}}\right)+\theta_1C_1\left(C_2+C_{\text{н}}\right)\right]\left(C_1+C_2+C_{\text{н}}\right)-C_1\left(C_2+C_{\text{н}}\right)\left(\theta_1C_1+\theta_2C_2+\theta_{\text{н}}C_{\text{н}}\right)}{\left(C_1+C_2+C_{\text{н}}\right)^2}+$$

$$+\left(\lambda+\theta_3\right)C_3+\lambda\frac{C_1\left(C_2+C_{\text{н}}\right)}{C_1+C_2+C_{\text{н}}}=0. \tag{14}$$

Далее умножаем слагаемые на $\left(C_1+C_2+C_{\text{н}}\right)^2$, раскрываем все скобки и приводим числитель к каноническому виду

$$AC_{\text{н}}^2+BC_{\text{н}}+D=0, \tag{15}$$

где

$$A=\left(\lambda+\theta_3\right)C_3+\left(\lambda+\theta_1\right)C_1, \tag{16}$$

$$B=2\left(\lambda+\theta_3\right)C_3\left(C_1+C_2\right)+2\left(\lambda+\theta_1\right)C_1C_2+\left(\lambda+\theta_{\text{н}}\right)C_1^2, \tag{17}$$

$$D=\left(\lambda+\theta_3\right)C_3\left(C_1+C_2\right)^2+\left(\lambda+\theta_1\right)C_1C_2^2+\left(\lambda+\theta_2\right)C_1^2C_2. \tag{18}$$

Итак, условие (10) будет выполнено на всём диапазоне частот, когда выполняется условие (15), для чего необходимо и достаточно, чтобы $A=B=D=0$. Решая три уравнения с тремя неизвестными θ_1, θ_2, θ_3, получим искомые соотношения (11)÷(13).

Кроме того, очевидно, существует ещё одно решение подобного рода, а именно, когда ТКЕ всех конденсаторов контура, включая $C_{\text{н}}$, равны $-\lambda$, однако, данный случай практически не осуществим, поскольку конденсаторы переменной ёмкости имеют положительный ТКЕ.

Если один из конденсаторов C2, C3 отсутствует, то уравнение (15) имеет два корня $C_{\text{н}}$, т.е. компенсация возможна на *двух* частотах диапазона. Если отсутствуют оба, то имеется лишь одно решение, а именно:

$$C_{н} = -\frac{\lambda + \theta_{н}}{\lambda + \theta_1} C_1, \tag{19}$$

причём должно быть выполнено условие $\theta_1 < -\lambda$.

Случай, когда отсутствует последовательный конденсатор растяжки диапазона C1 требует особого рассмотрения.

Чтобы не проделывать для данного случая алгебраических выкладок заново, можно осуществить «предельный переход» в уже имеющихся формулах. Т.к. отсутствие в схеме контура ёмкости C1 означает, что $C_1 \to \infty$, то имеем:

$$\lim_{C_1 \to \infty} \left(\frac{dC}{dt} + \lambda C \right) = (\lambda + \theta_2) C_2 + (\lambda + \theta_3) C_3 + (\lambda + \theta_{н}) C_{н}. \tag{20}$$

Поскольку оба параллельных конденсатора превращаются в один суммарный (пусть это будет конденсатор C3), то термокомпенсация частоты контура возможна лишь на одной частоте, а именно, которой соответствует

$$C_{н} = -\frac{\lambda + \theta_3}{\lambda + \theta_{н}} C_3 \tag{21}$$

Масштабирование задачи.

В оптимизационных задачах важную роль играет правильное масштабирование варьируемых параметров и ЦФ. Желательно, чтобы все они были величиной одного порядка, лучше – порядка 1. Такой вариант возможен не всегда, особенно когда ЦФ в оптимуме заведомо равна нулю и притом чувствительна (как это имеет место в данной задаче) к изменению параметров. К счастью, современные ПЭВМ данную трудность преодолевают.

Поскольку параметры модели (ТКЕ) суть величины порядка $(1 \div 1000) \cdot 10^{-6}$, то с целью хотя бы частичного масштабирования задачи в программе используются величины $\lambda, \vec{\theta}$ в 10^4 раз бóльшие. Это надо учитывать при вводе исходных данных. Значения температурного дрейфа частоты f_t' даются в Гц/град.

С учётом выполненных преобразований, *масштабированное* уравнение (4) записывается следующим образом:

$$\frac{df}{dt} = -\frac{7957.74715}{C\sqrt{LC}} \cdot \frac{AC_{н}^2 + BC_{н} + D}{\left(C_1 + C_2 + C_{н}\right)^2}, \tag{22}$$

где по-прежнему L – в мкГн, C_j – в пФ.

5°. Компьютерная программа «Stabsimplex».

Вышеописанный алгоритм запрограммирован в среде Excel VBA в виде макросов. Исходные данные вводятся в ячейки таблиц, а результаты вычислений даются в виде таблиц и графиков.

Для минимизации ЦФ используется хорошо зарекомендовавший себя симплекс-метод по Нелдеру и Миду, известный также как метод деформируемого многогранника [3]. Данный алгоритм в общем виде также был запрограммирован нами в среде Excel VBA [4].

Итогом расчётов являются $\theta_1^*, \theta_2^*, \theta_3^*$ – оптимальные величины ТКЕ конденсаторов $C_1 \div C_3$.

Примечание 6. В программе предусмотрена фиксация любого из данных параметров, а также их пар в любом сочетании. Это может оказаться полезным в ряде случаев, например, когда конденсатор *C*2 либо *C*3 как таковые отсутствуют, либо их ТКЕ предопределены и оптимизации не подлежат. Случай, когда последовательного растягивающего конденсатора *C*1 не требуется, отдельно в программе не предусмотрен, но может быть просчитан при задании контура с заведомо большим значением C_1. При этом нужно помнить, что в контуре остаётся фактически лишь один параллельный конденсатор, например, $C2$; тогда для ёмкости $C3$ необходимо ввести нуль; кроме того, положить $\theta_1 = 0$; $\theta_3 = 0$ и данные параметры зафиксировать.

Описание программы и её пользовательского интерфейса (для версии MS Office 2003).

Скачать файл программы «Stabsimplex» можно пройдя по ссылке [5]. Затем необходимо установить *средний* уровень безопасности приложения Excel (меню «Сервис» → «Макрос» → «Безопасность» → кнопка «средний»). Открыть файл программы и в окне запроса системы безопасности выбрать вариант «Не отключать макросы».

Интерфейс содержит пять листов: «Константы», «Simplex», «Таблица», «График 1» и «График 2».

Исходным является лист «Константы», в соответствующие (подсвеченные голубым фоном) ячейки которого необходимо ввести исходные данные: $f_н$, $f_в$, L, λ, C_1, C_2, C_3, $\theta_н$.

Задать начальное приближение θ_1, θ_2 , θ_3, и если необходимо, зафиксировать один или два параметра, введя в соответствующие ячейки значок *. Учитывать, что значения ТКИ, ТКЕ следует вводить умноженными на 10^4. В дробных числах используется *запятая*, а не точка.

Далее следует нажать клавиши <Ctrl + t> (раскладка клавиатуры англоязычная). Будет изображён график зависимости температурного дрейфа частоты $f_t'(f)$ в точке начального приближения. На вкладке «Таблица» ту же зависимость можно посмотреть в цифровом виде (колонка 2). В строке 23 – значение ЦФ.

Запуск процедуры оптимизации осуществляется нажатием <Ctrl +s>. Откроется вкладка «Simplex», где показаны значения $\theta_1^*, \theta_2^*, \theta_3^*$ и Φ^* в оптимуме, а также число обращений к процедуре вычисления ЦФ. На вкладке «График 2» показана зависимость температурного дрейфа частоты $f_t'(f)$ в оптимуме. На вкладке «Таблица» та же зависимость представлена численно (в колонке 3).

<u>Примечание 7.</u> Очень важно выдержать соответствие между заявленным диапазоном частот контура и его параметрами «Stabsimplex», параметры контура должны быть предварительно рассчитаны по существующим методикам, например, можно воспользоваться компьютерной программой [6]. Менять произвольно исходные данные для контура C_j, L, смещать и расширять границы диапазона частот не следует, иначе можно получить абсурдные данные и аварийный останов программы.

6^{o}. Испытание алгоритма и примеры использования программы.

6.1. Пример 1.

Продемонстрируем и испытаем алгоритм на следующем примере.

Пусть требуется рассчитать ТКЕ конденсаторов колебательного контура гетеродина на диапазон принимаемых частот 4÷9 МГц. Промежуточная частота (ПЧ) равна 465 кГц. Настройка гетеродина верхняя.

Имеем следующие исходные данные:

Диапазон частот гетеродинного контура 4,465÷9,465 МГц; параметры контура при этом следующие: $C_н$ = 12÷495 пФ (данные величины были использованы в расчётах параметров контура, в программе оптимизации они не участвуют); L = 4,627 мкГн; C_1 = 602 пФ; C_2 = 30 пФ; C_3 = 30 пФ. Пусть ТКЕ $C_н$ ($\theta_н$) = $100 \cdot 10^{-6}$; ТКИ L (λ)= $50 \cdot 10^{-6}$.

Открываем файл программы и вводим данные.

Расчёт полной термокомпенсации на всём диапазоне частот.

В качестве начальных оценок берём нулевые $\left(\vec{\theta}=0\right)$; ни один из параметров не фиксируем:

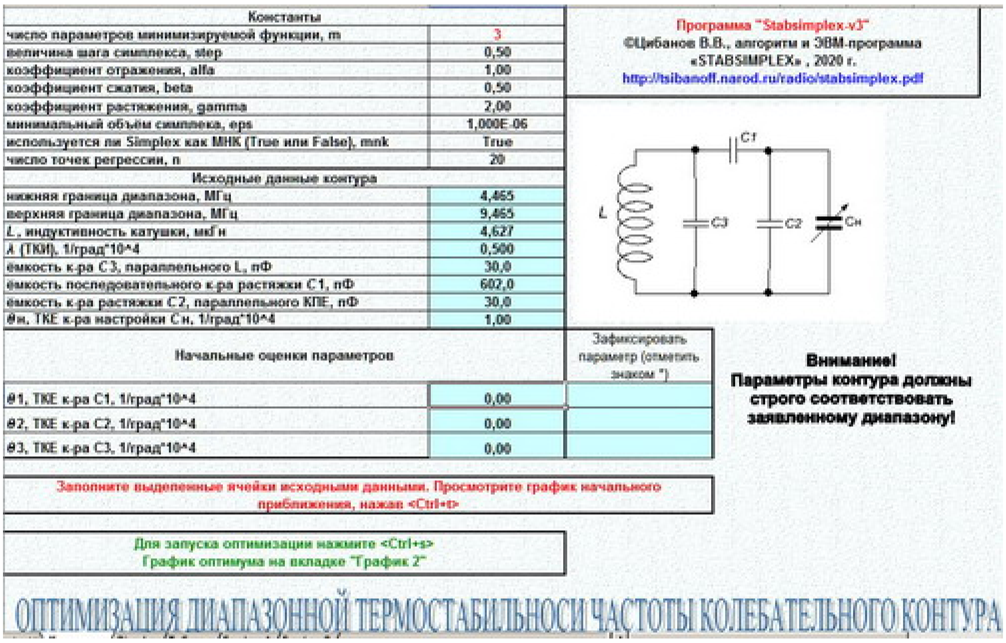

Рис. 3. Ввод данных для примера 1.

Запускаем процедуру построения зависимости $f_t'(f)$ в исходной точке (<Ctrl + t>). Видим, что максимальный дрейф частоты составляет -400 Гц/град:

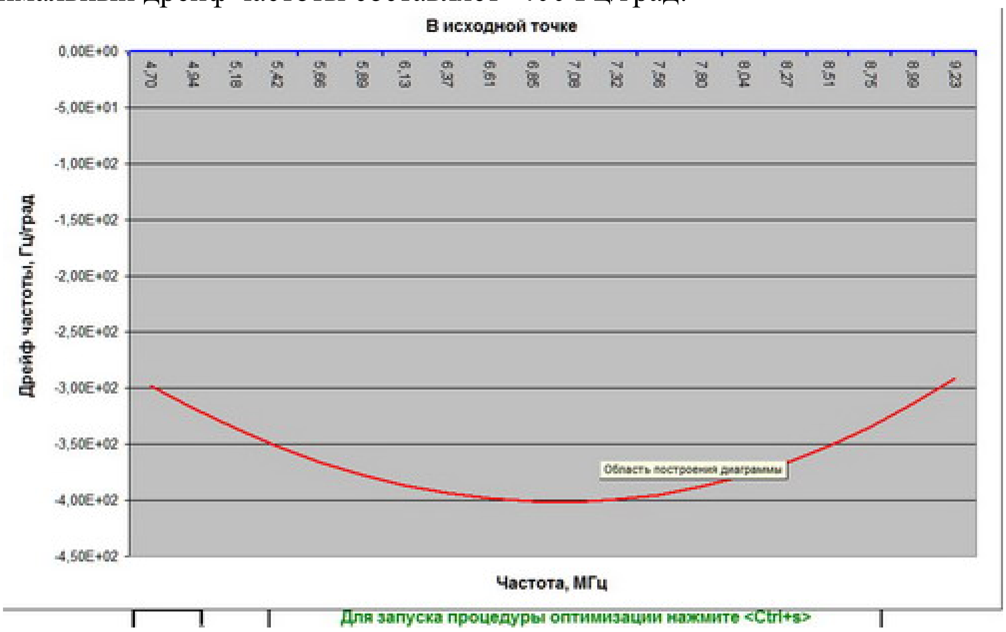

Рис. 4. График $f_t'(f)$ в исходной точке $\left(\vec{\theta}=0\right)$.

Запускаем процедуру оптимизации (<Ctrl + s>) и на вкладке «Simplex» получаем:

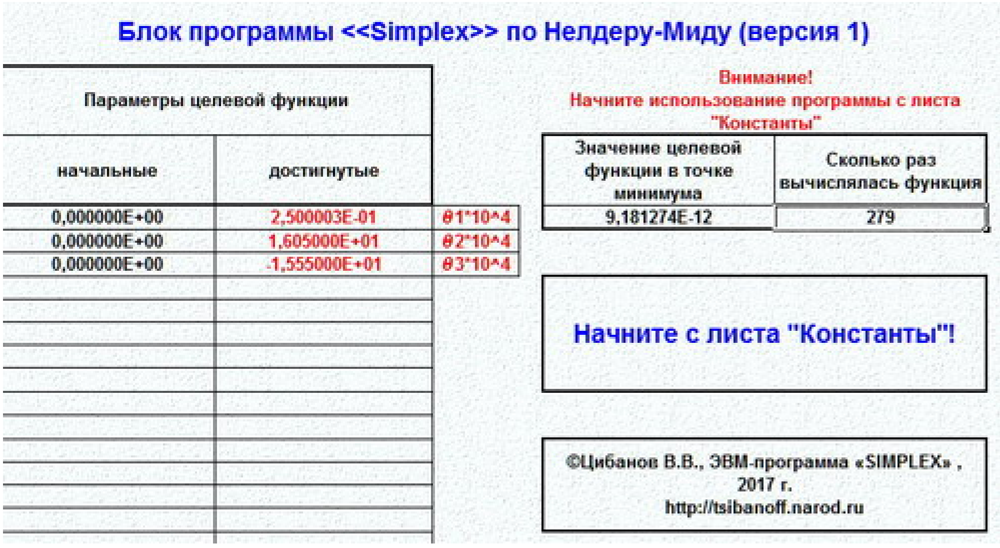

Рис. 5. Результат оптимизации трёх параметров.

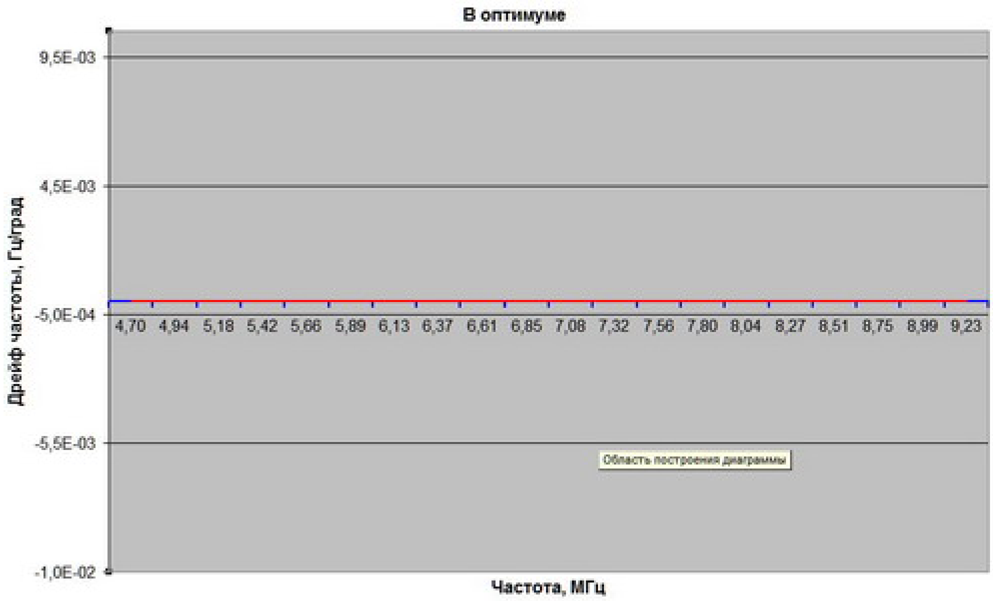

Рис. 6. График $f_t'(f)$ в точке оптимума $\left(\vec{\theta} = \vec{\theta}^*\right)$.

Итак, результат (с точностью до 5 десятичных знаков) такой:

$$\vec{\theta}^* = \left(0,25000;\ 16,05000;\ -15,55000\right)^T .$$

Можно убедиться, что он совпадает с расчётами, если их выполнить по формулам (11)÷(13). Вкладка «График 2» показывает, что достигнута идеальная компенсация температурного дрейфа частоты по всему диапазону.

Испытаем также другой вариант «идеальной», но практически неосуществимой термокомпенсации, о котором говорилось выше: зададим масштабированные величины $\theta_{н} = -\lambda = -0.5$. Убеждаемся, что, в соответствие с формулами (16)÷(18), с высокой точностью определяется вектор $\vec{\theta}^* = \left(-0.5;\ -0.5;\ -0.5\right)^T$:

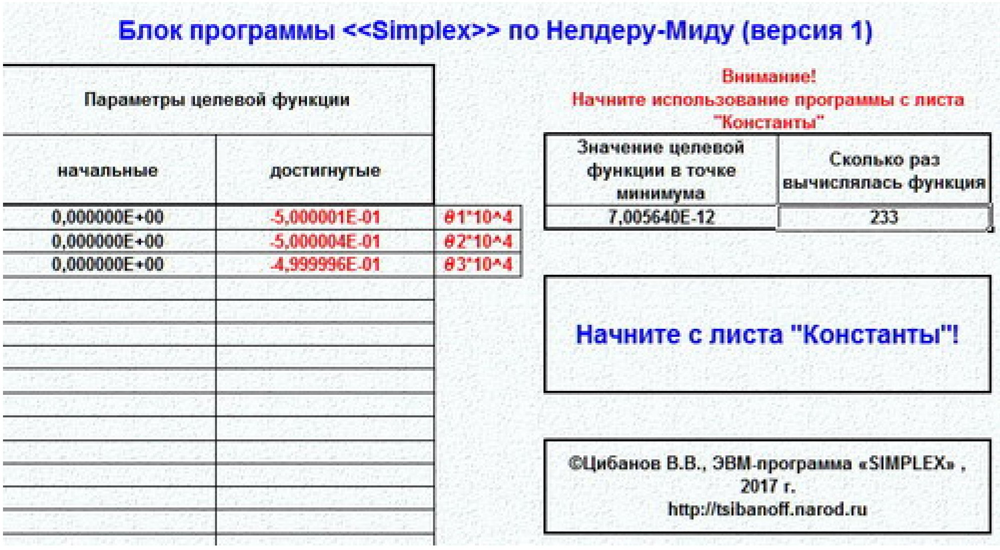

Рис. 7. «Тривиальный» оптимум, когда все $\theta_j = -\lambda$.

Термокомпенсация в отдельных точках диапазона.

Ввиду отсутствия высокочастотных конденсаторов с большими положительными ТКЕ (более $120 \cdot 10^{-6}$), полная диапазонная термокомпенсация частоты контура возможна не всегда. В таких случаях придётся жертвовать термостабильностью путём фиксации параметра на границе, возможно близкой к оптимуму. Можно убедиться, что фиксация любого одного из компонентов вектора $\vec{\theta}$ приводит к параболической зависимости $f_t'(f)$, и точная компенсация температурного дрейфа возможна только в двух точках диапазона. Зафиксируем, например, ТКЕ конденсатора $C2$, для которого оптимальное значение составило $1.605 \cdot 10^{-6}$, на достижимом уровне $120 \cdot 10^{-6}$:

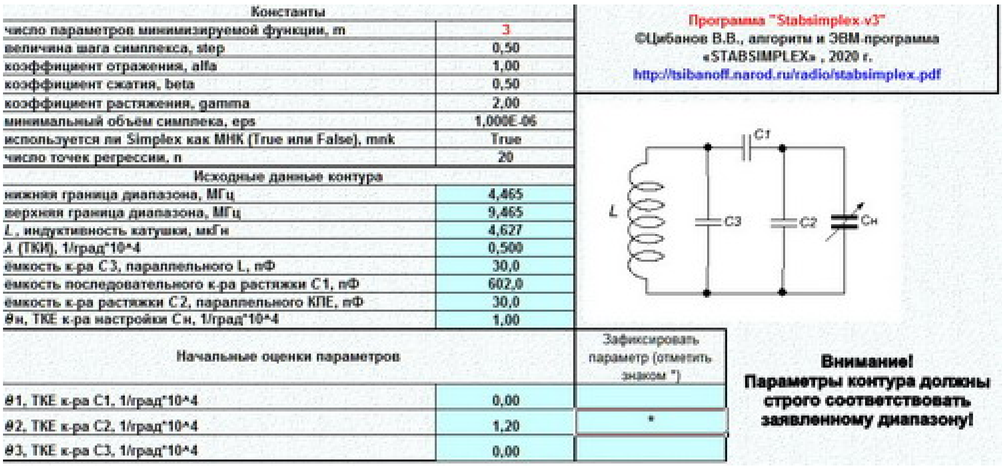

Рис.8. Фиксирован параметр $\theta_2 = 1,2$.

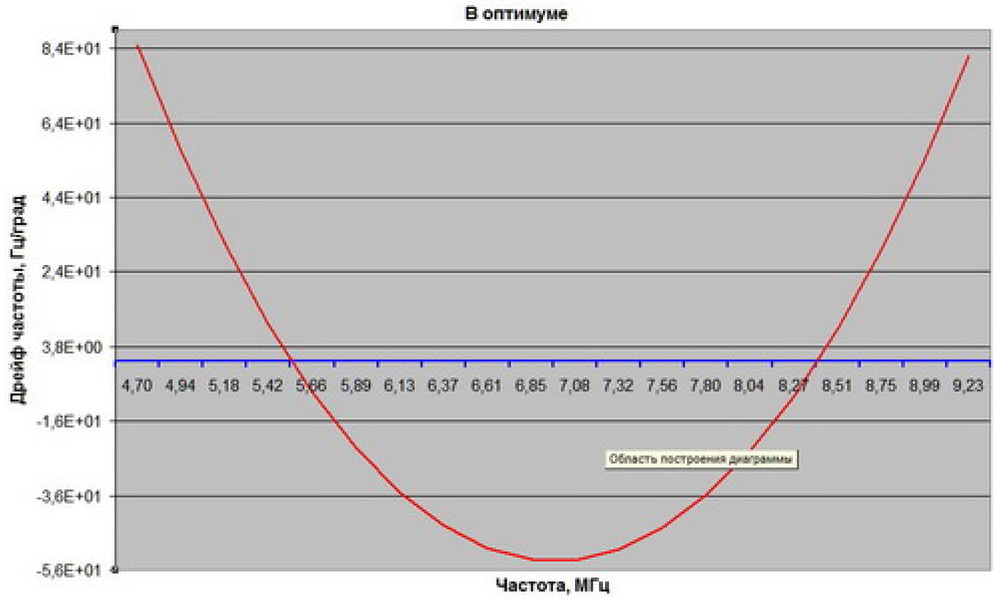

Рис. 9. Локальный оптимум при фиксации параметра $\theta_2 = 1,2$.

Фиксация любых *двух* параметров даёт возможность получить компенсацию только в одной точке диапазона:

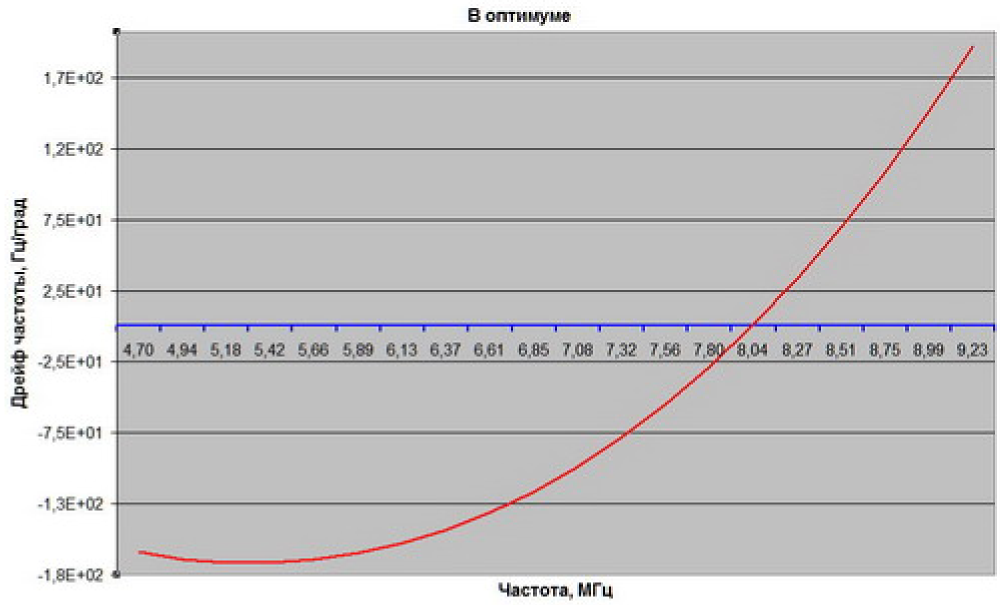

Рис. 9. Локальный оптимум при фиксации параметров $\theta_1 = 0; \theta_3 = 1.2$.

6.2. Пример 2.

Рассмотрим случай, когда последовательный конденсатор растяжки $C1$ отсутствует.

<u>Примечание 8.</u> Всегда лучше таковой конденсатор предусмотреть, чтобы иметь возможность полной диапазонной термокомпенсации, в противном же случае можно будет обеспечить компенсацию только на одной частоте. Приводимый ниже расчёт имеет более теоретический, нежели практический интерес: он должен подтвердить наличие асимптотического решения задачи и работоспособность алгоритма при $C_1 \to \infty$.

Пусть требуется рассчитать ТКЕ параллельного конденсатора С3 (можно рассматривать С2, это безразлично) гетеродинного контура, заданного следующими параметрами:

диапазон принимаемых частот 5,5÷12,5 МГц; ПЧ равна 465 кГц; настройка гетеродина нижняя, диапазон его частот 5,035÷12,035 МГц; $C_н$ = 12÷495 пФ; C_3 = 90,47 пФ; L = 1,707 мкГн (рассчитано по программе [6]). Пусть $\theta_н = 1,5;\ \lambda = 1$.

Вводим исходные данные, принимая, что C_2 = 0; $\theta_1 = \theta_2$ = 0 – фиксируем. Для C_1 будем выбирать заведомо большие значения и будем их увеличивать, следя за изменением результатов (они должны сойтись к пределу), начиная с $C_1 = 10^3$ пФ:

Повторяем расчёты, задавая всё большее значение C_1; убеждаемся, что предельное решение, о котором говорилось выше, существует (табл.). Уже при $C_1 = 10^5$ имеем для θ_3^* три верных знака. Как и ожидалось, имеется только одна частота компенсации на диапазоне.

Таблица. Иллюстрация к примеру 2. Влияние величины C_1 на оценку параметра θ_3^*.

C_1, пФ	θ_3^*
10^3	-2,431634
10^4	-2,515929
10^5	-2,524205
10^6	-2,525192
10^7	-2,525301
10^8	-2,525276
10^9	-2,525276

5°. После того как вектор найден.

Найденные значения ТКЕ надо ещё обеспечить, что можно осуществить при помощи разбиения конденсаторов растяжки на пары или большее число конденсаторов с различными значениями ТКЕ. Пусть, например, требуется подобрать такую пару, чтобы получить суммарную ёмкость $C_\Sigma = c_1 + c_2$, у которой ТКЕ равен θ. Обозначим через τ_i ТКЕ конденсатора c_i, тогда

$$\theta = \left(\tau_1 c_1 + \tau_2 c_2\right)/C_\Sigma ,$$

откуда найдём $c_1 = \dfrac{\theta - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \cdot C_\Sigma;\ c_2 = C_\Sigma - c_1$.

Рассмотрим ситуацию с «суммарным» конденсатором *С*3. В рассмотренном выше примере было выбрано C_3 = 30 пФ (это C_Σ); получено в оптимуме θ_3 = -15,55$_{10}$-4. Пусть на долю монтажной ёмкости *С*м, собственной ёмкости катушки *С*0 и конденсатора подстройки *С*п приходится в сумме 15 пФ. Если положить, что общий ТКЕ группы равен, например, +100$_{10}$-6, то на долю собственно конденсатора *С*3 придётся ТКЕ, равный $\frac{1}{15}\left(-1555 \cdot 10^{-6} \cdot 30 - 100 \cdot 10^{-6} \cdot 15\right) = -3210 \cdot 10^{-6}$. Поскольку ёмкость *С*3 была задана небольшой, на долю параллельного конденсатора пришлась большая «термо-компенсационная нагрузка». При необходимости её можно снизить, задав в расчётах контура большее значение *С*3, после чего оптимизационную процедуру придётся повторить.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аршинов С. Диапазонная термокомпенсация собственной частоты контура. // Радио. – 1953. – №12. – С. 32-35.
2. Радиоприёмные устройства. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций. Методичка курсовая. С. 64 – 72. URL: http://studfile.net/preview/6330700/. Посещен 21.05.2020.
3. Nelder J.A., Mead R. // Computer Journal. – 1964. – V. 7. – P. 308.
4. Цибанов В. Компьютерная программа минимизации функций многих переменных методом деформируемого многогранника по Нелдеру и Миду. URL: http://tsibanoff.narod.ru/algorythms/simplex.pdf. Посещен 21.05.2020.
5. Цибанов В. Компьютерная программа «Stabsimplex». URL: http://tsibanoff.narod.ru/radio/stabsimplex-v3.xls
6. Цибанов В. Подгонка параметров гетеродинного контура к заданному диапазону по методу наименьших квадратов (новый вариант расчёта сопряжения гетеродинного контура, Oscillator Padding). URL: http://tsibanoff.narod.ru/radio/oscillator_padding_fullfit.pdf. Посещён 22.05.2020.