

УДК 621.317.332.1

В.А. Сергеев, И.В. Фролов

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ЧАСТОТ ТЕСТОВОГО СИГНАЛА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ

Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, доцент, окончил физический факультет Горьковского государственного университета. Директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук. Имеет статьи и изобретения в области моделирования и исследования характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем. [e-mail: sva@ulstu.ru].

Фролов Илья Владимирович, окончил радиотехнический факультет Ульяновского государственного технического университета. Научный сотрудник Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук. Имеет публикации в области методов и средств неразрушающего контроля полупроводниковых приборов. [e-mail: ilya-frolov88@mail.ru].

Аннотация

Предложен алгоритм определения набора оптимальных частот тестового сигнала, минимизирующего сумму методических погрешностей косвенного измерения параметров многоэлементных двухполюсников (ДП) методом импедансной спектроскопии. Суть алгоритма заключается в многократном компьютерном моделировании процесса измерения модуля и фазы импеданса ДП с учетом аддитивных случайных погрешностей и расчете погрешностей определения параметров ДП по соответствующим функциональным зависимостям на заданном множестве частот. Достоверность алгоритма подтверждена на примере двухэлементного ДП в виде параллельной RC-цепи. Показано, что результаты компьютерного моделирования практически полностью совпадают с результатами аналитического расчета. Приведен пример определения оптимального набора частот тестового сигнала при измерении параметров трехэлементного ДП со структурой, подобной малосигнальной эквивалентной схеме полупроводникового диода. В качестве критерия оптимизации принято условие минимума суммы относительных погрешностей определения всех параметров многоэлементного ДП, однако предложенный алгоритм работает и при других критериях.

Ключевые слова: многоэлементный двухполюсник, параметры, измерение, импедансная спектроскопия, погрешность, алгоритм, оптимальные частоты.

AN ALGORITHM TO DETERMINE A SET OF OPTIMAL FREQUENCIES FOR THE TEST SIGNAL WHEN MEASURING PARAMETERS OF MULTIELEMENT TWO-TERMINALS

Vyacheslav Andreevich Sergeev, Doctor or Engineering, Associate Professor, graduated from the Faculty of Physics at the Gorkov State University; Director of the Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; an author of articles and inventions in the field of modeling and research of characteristics of semiconductor devices and integrated circuits. e-mail: sva@ulstu.ru.

Ilya Vladimirovich Frolov, a research officer of the Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; graduated from the Faculty of Radio-Engineering at Ulyanovsk State Technical University; an author of articles in the field of methods and facilities of the nondestructive testing of semiconductor devices. e-mail: ilya-frolov88@mail.ru.

Abstract

An algorithm for determining the optimal test signal frequency set, minimizing the sum of methodical errors indirect measurement of parameters of multi-element two-terminal by impedance spectroscopy method is proposed. The essence of the algorithm is repeated computer simulation of the measurement of the impedance modulus and phase of the two-pole considering additive random errors and calculation errors in determining the parameters of the two-terminal to the relevant functional dependencies on a given set of frequencies. The accuracy of the algorithm is confirmed by the example of the two-element two-terminal in the form of a parallel RC-circuit. It is shown that the results of computer simulations practically coincide with the results of the analytical calculation. An example of determining the optimal test signal frequency set when measuring the three-element two-terminal with a structure similar to small-signal equivalent circuit of a semiconductor

diode. As optimization criterion adopted condition of minimum sum of relative errors in the determination of all parameters of multielement two-terminal, but the proposed algorithm works with the other criteria.

Key words: multielement two-terminal, parameters, measurement, impedance spectroscopy, error, algorithm, optimal frequencies.

ВВЕДЕНИЕ

При решении задач, связанных с автоматизацией процессов измерения и контроля параметров объектов, которые могут быть представлены многоэлементными ДП, широко используется метод импедансной спектроскопии [1, 2]. Этот метод позволяет осуществлять идентификацию и измерение параметров большого круга объектов и применяется во многих отраслях науки и техники: в биомедицине – для исследования свойств биологических жидкостей и тканей [3]; химии – для исследования механизмов химических реакций, изучения свойств электролитов, антикоррозионных покрытий, диэлектрических материалов и т. п. [4]; в радиоэлектронике – в целях диагностики и измерения параметров элементов электрических цепей, исследования свойств полупроводниковых приборов и т. д. [5, 6].

Во всех случаях применения метода импедансной спектроскопии используется общий подход: исследуемый объект представляется в виде пассивного многоэлементного ДП, образованного соединением резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности, параметры которых однозначно соответствуют физико-химическим, технологическим и иным характеристикам исследуемых объектов [2]. Измерение параметров элементов ДП является косвенным и заключается в измерении характеристик импеданса (полного комплексного сопротивления) ДП на определенных частотах (например, модуля, фазы, действительной или мнимой составляющей) и последующем расчете искомых параметров по известным функциональным зависимостям.

Современные измерители импеданса (измерители RLC) используют гармонический тестовый сигнал с заданной амплитудой и частотой [7]. В [2, 4] показано, что для каждой структуры ДП существует набор оптимальных частот тестового сигнала, при измерении на которых погрешность определения параметров элементов ДП, обусловленная случайной погрешностью измерения параметров импеданса, принимает минимальное значение. Однако известный алгоритм определения набора оптимальных частот тестового сигнала [2], заключающийся в минимизации числа обусловленности системы исходных уравнений, требует выполнения большого количества сложных математических операций и неудобен при решении инженерных задач.

Для двухэлементного ДП задача определения оптимальных частот может быть решена аналитически, однако для ДП, состоящих из трех и более элементов, аналитическая оценка относительных погрешностей и определение набора оптимальных частот представляют трудную задачу в связи со сложностью расчетных формул, что также подтверждено в работе [2].

В данной статье представлен алгоритм определения набора оптимальных частот для многоэлементного ДП с известной схемой путем компьютерного моделирования. Алгоритм апробирован для случая двухэлементного ДП в виде параллельной RC-цепи и трехэлементного ДП со структурой, характерной для эквивалентной схемы полупроводникового диода.

1 АЛГОРИТМ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ ЧАСТОТ ТЕСТОВОГО СИГНАЛА ДЛЯ ДП С ЗАДАННОЙ СТРУКТУРОЙ

Методологической основой предлагаемого алгоритма является способ определения параметров $\{X_i\}$ элементов n -элементного ДП с известной структурой по результатам измерения модуля $|Z(f)|$ и (или) фазы $\varphi(f)$ импеданса $Z(f)$ ДП на n различных частотах. Поскольку для заданной структуры ДП аналитическое выражение, определяющее импеданс ДП, известно: $Z(f) = F(f, X_i)$ и $\varphi(f) = \Psi(f, X_i)$, то для нахождения неизвестных параметров $\{X_i\}$ по результатам измерения модуля $|Z(f)|$ и (или) фазы $\varphi(f)$ можно составить и решить n уравнений вида:

$$\begin{cases} \Phi(f_k, X_i) = |Z(f_k)| + \overset{\circ}{\Delta}_{|z_k|}, \\ \varphi(f_l) = \Psi(f_l, X_i) + \overset{\circ}{\Delta}_{|\varphi_l|}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\overset{\circ}{\Delta}_{|z_k|}$ и $\overset{\circ}{\Delta}_{|\varphi_l|}$ – случайные погрешности измерения модуля $|Z(f)|$ и (или) фазы $\varphi(f)$ на частотах f_k и f_l соответственно.

Очевидно, что сумма числа частот, на которых измеряются модуль и фаза импеданса, должна быть равна n , а сами значения частот не должны совпадать. При этом теоретически показано [2, 4], что для любой однозначно идентифицируемой структуры ДП существует набор оптимальных частот, при измерении на которых модуля $|Z(f)|$ и (или) фазы $\varphi(f)$ погрешность определения параметров ДП будет минимальной.

Суть предлагаемого алгоритма состоит в многократном компьютерном моделировании процесса измерения модуля и фазы импеданса ДП с учетом случайных аддитивных погрешностей и определения параметров ДП (с известными истинными значениями параметров элементов) из решения системы уравнений (1) на заданном множестве наборов частот тестового сигнала. Выбор оптимальных частот осуществляется путем сравнения значений параметров, полученных по результатам моделирования, с истинными значениями. При этом выбор критерия оптимизации представляет отдельную самостоятельную задачу и определяется общей задачей исследования объекта. В данной работе в качестве критерия оптимизации принято

условие минимума суммы относительных погрешностей определения всех параметров многоэлементного ДП. Однако предлагаемый алгоритм компьютерного моделирования будет работать и при других критериях.

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 1.

На первом шаге алгоритма задается структура n -элементного ДП, которая определяется набором элементов $\{X_i\}$, где $1 \leq i \leq n$, и схемой их соединения. Для заданной структуры ДП записывается аналитическое выражение, определяющее импеданс ДП: $Z(f) = F(f, X_i)$, и задаются численные значения x_i параметров соответствующих элементов ДП. При исследовании реальных объектов ожидаемые численные значения параметров эквивалентной схемы ДП задаются, исходя из априорной информации об объекте.

Для моделирования погрешности измерения модуля и фазы импеданса ДП используется генератор случайных чисел. Параметры погрешности задаются в виде абсолютных значений среднеквадратического отклонения случайной погрешности измерения модуля $\sigma_{|Z(f)|}$ и фазы $\sigma_{\varphi(f)}$ импеданса $Z(f)$ соответственно.

На следующем шаге формируется ансамбль из N реализаций частотных зависимостей модуля и фазы импеданса в заданном диапазоне частот. Моделирование случайной погрешности измерения $|Z(f)|$ и $\varphi(f)$ осуществляется путем суммирования значений $|Z(f)|$ и $\varphi(f)$ на каждой частоте и случайной величины со среднеквадратическим отклонением $\sigma_{|Z(f)|}$ и $\sigma_{\varphi(f)}$ и нулевым средним значением.

Затем запускается внешний цикл, в котором осуществляется последовательный перебор частот из диапазона $[f_{min}; f_{max}]$, например, с заданным линейным Δf или логарифмическим $\ln(\Delta f/f)$ шагом, начиная с минимального значения. Поскольку число частот, на которых производится расчет параметров x_i , совпадает с числом n элементов эквивалентной схемы ДП, то количество внешних циклов перебора частот тоже равно n .

Во внутреннем цикле для каждой s -й комбинации частот $(f_1, f_2, \dots, f_n)_s$ производится расчет параметров x_i по соответствующим формулам для каждой j -й реализации ансамбля. При достижении счетчика числа реализаций j значения N производится вычисление среднего значения параметров x_i по ансамблю для заданной комбинации частот $(f_1, f_2, \dots, f_n)_s$:

$$x_{iCP}^{(f_1, \dots, f_n)_s} = \frac{\sum_{j=1}^N x_{i,j}^{(f_1, \dots, f_n)_s}}{N}, \quad (2)$$

среднеквадратического отклонения случайной погрешности:

$$\sigma_{x_i}^{(f_1, \dots, f_n)_s} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_{i,j} - x_{iCP})^2}, \quad (3)$$

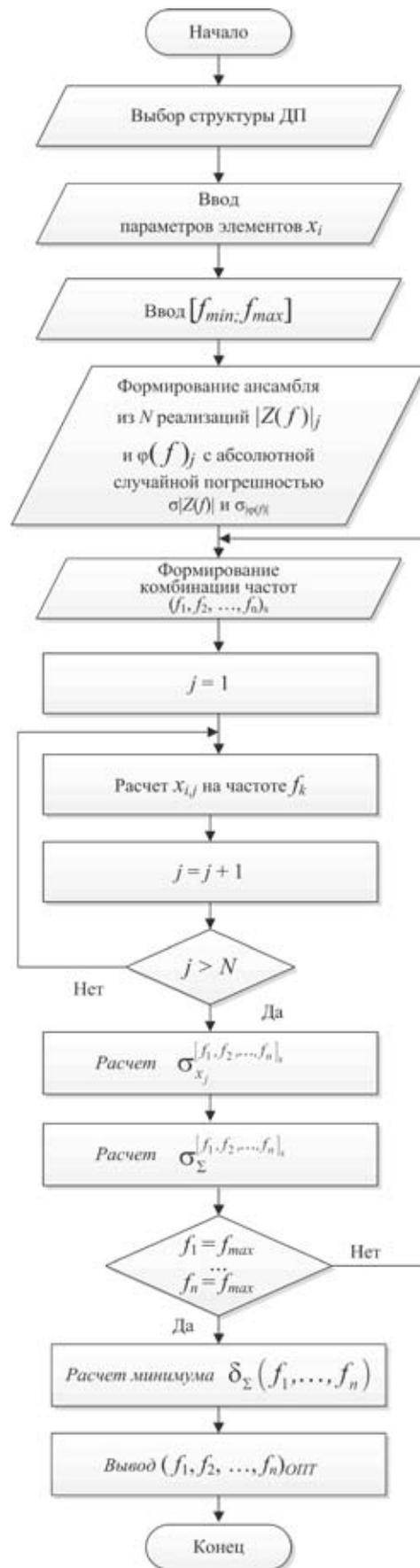


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения оптимальных частот тестового сигнала

относительной среднеквадратической случайной погрешности определения X_i :

$$\delta_{x_i}^{(f_1, \dots, f_n)_s} = \frac{\sigma_{x_i}^{(f_1, \dots, f_n)_s}}{x_{iCP}^{(f_1, \dots, f_n)_s}}, \quad (4)$$

и суммы относительных погрешностей определения параметров элементов ДП:

$$\delta_{\Sigma}^{(f_1, \dots, f_n)_s} = \sum_{i=1}^N \delta_{x_i}^{(f_1, \dots, f_n)_s}. \quad (5)$$

На этом внутренний цикл завершается, задается следующая комбинация частот, и указанные вычисления повторяются. Внешний цикл заканчивается при условии, когда значения всех частот из набора достигнут максимального значения f_{max} из заданного диапазона частот. Затем формируется многомерный массив погрешностей $\delta_{\Sigma}(f_1, \dots, f_n)$ и определяется набор $(f_{1,OPT}, f_{2,OPT}, \dots, f_{n,OPT})$ оптимальных частот, на которых функция $\delta_{\Sigma}(f_1, \dots, f_n)$ принимает значение абсолютного минимума.

Время выполнения алгоритма зависит от количества элементов ДП, диапазона частот и объема ансамбля N . Например, время расчета набора оптимальных частот тестового сигнала для трехэлементного ДП в диапазоне частот от 1 Гц до 100 кГц с логарифмическим шагом (10 точек на декаду) при $N = 10\,000$ составляет порядка 10 минут. При расширении диапазона частот до 1 МГц время расчета увеличивается до 20 минут.

2 ПРОВЕРКА АЛГОРИТМА НА ПРИМЕРЕ ДВУХЭЛЕМЕНТНОГО ДП ВИДА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ RC-ЦЕПИ

Для случая двухэлементного ДП в виде параллельной RC-цепи (рис. 2) адекватность алгоритма подтверждена путем сопоставления результатов компьютерного моделирования с результатами аналитического расчета.

Выражения для комплексного импеданса заданной схемы, модуля и фазы импеданса на частоте $\omega = 2\pi f$ соответственно имеют вид:

$$Z(\omega) = \frac{R}{1 + j\omega\tau}, \quad (6)$$

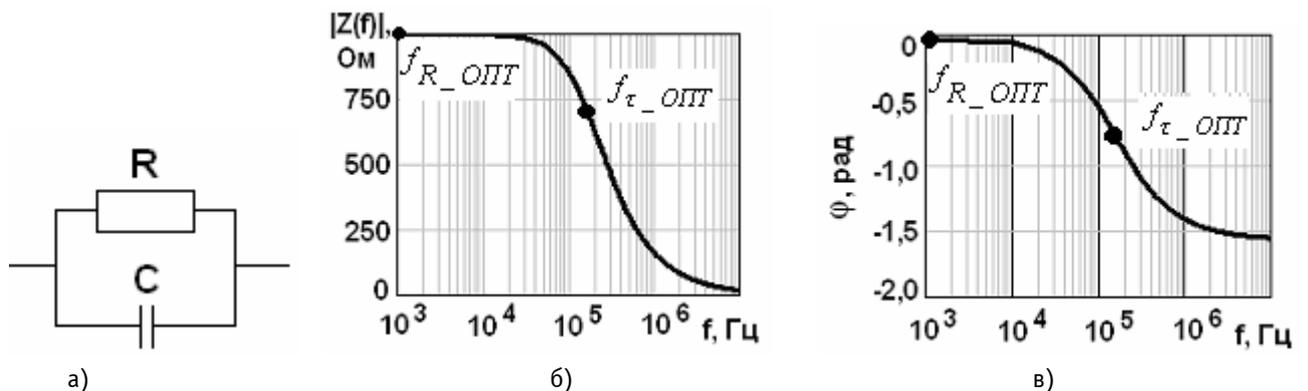


Рис. 2. Параллельная RC-цепь (а) и частотные зависимости модуля (б) и фазы (в) импеданса цепи при $R = 1\text{ кОм}$, $C = 1\text{ нФ}$

$$|Z(\omega)| = \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}, \quad (7)$$

$$\text{tg } \varphi = -\omega\tau, \quad (8)$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени цепи.

Путем совместного решения уравнений (7) и (8) получаем формулы для расчета сопротивления R и постоянной времени τ параллельной RC-цепи:

$$R = |Z(\omega)| \sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi(\omega)}, \quad (9)$$

$$\tau = -\frac{\text{tg} \varphi(\omega)}{\omega}. \quad (10)$$

В соответствии с методикой расчета погрешностей косвенных измерений [8] абсолютные среднеквадратические случайные погрешности измерения сопротивления σ_R и постоянной времени σ_{τ} выражаются соответственно:

$$\sigma_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial |Z(\omega)|}\right)^2 \sigma_{|Z(\omega)|}^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \varphi(\omega)}\right)^2 \sigma_{\varphi(\omega)}^2}, \quad (11)$$

$$\sigma_{\tau} = \frac{d\tau}{d\varphi(\omega)} \sigma_{\varphi(\omega)}. \quad (12)$$

Подставляя выражение (10) в (12) и проводя соответствующие преобразования, подробно изложенные в [9], получаем выражение для относительной среднеквадратической случайной погрешности измерения постоянной времени τ :

$$\delta_{\tau(\omega)} = \frac{\sigma_{\tau}}{\tau} = \frac{1 + (\omega\tau)^2}{\omega\tau} \sigma_{\varphi(\omega)}. \quad (13)$$

Дифференцируя правую часть (13) по частоте и приравнявая производную к нулю, определяем частоту, на которой функция $\delta_{\tau}(\omega)$ принимает минимальное значение:

$$\omega = 1/\tau. \quad (14)$$

Таким образом, постоянная времени τ параллельной RC-цепи может быть определена с наименьшей погрешностью по результатам измерения частотной зависимости фазы импеданса на частоте тестового сигнала $f_{\tau_OPT} = 1/(2\pi\tau)$, при которой модуль импеданса умень-

шается в $\sqrt{2}$ раз относительно его квазистационарного значения $\omega \rightarrow 0$, или фаза импеданса принимает значение $-\pi/4$ рад.

Подставляя (14) в (13), получим минимальное значение относительной случайной погрешности δ_τ :

$$\delta_{\tau_{min}} = 2\sigma_{\varphi(\omega)}. \quad (15)$$

Подобным образом проводим расчеты относительной среднеквадратической случайной погрешности измерения сопротивления R и получаем:

$$\delta_R(\omega) = \frac{\sigma_R}{R} = \frac{\sqrt{(1 + (\omega\tau)^2)\sigma_{|Z(\omega)|}^2 + (\omega\tau R)^2\sigma_{\varphi(\omega)}^2}}{R}. \quad (16)$$

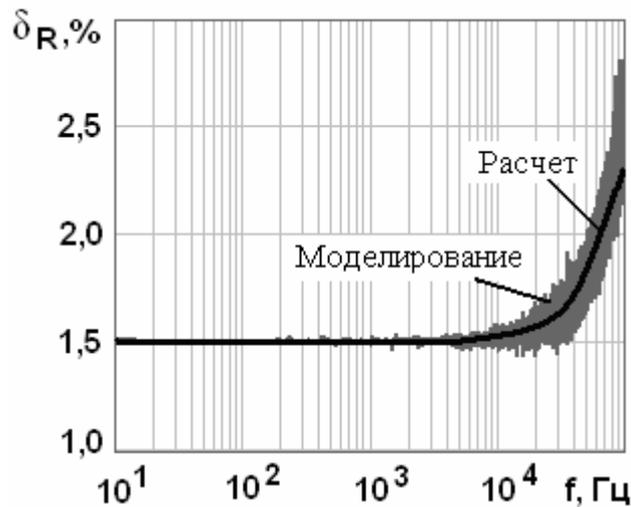
Относительная погрешность δ_R принимает минимальное значение при $f_{R_{OPT}} \rightarrow 0$.

Соответственно, минимальное значение погрешности δ_R составляет:

$$\delta_{R_{min}} = \frac{\sigma_{|Z(0)|}}{R}. \quad (17)$$

Таким образом, показано, что при измерении параметров параллельной RC-цепи, существуют две оптимальные частоты тестового сигнала, при которых погрешность измерения параметров цепи принимает минимальное значение. Для сопротивления – это частота, стремящаяся к нулю, для постоянной времени – частота, при которой модуль импеданса уменьшается в $\sqrt{2}$ раз относительно его начального значения $|Z(0)|$.

На рисунке 3 представлены графики зависимостей относительных среднеквадратических случайных погрешностей определения параметров R и τ , построенные по формулам (13), (16) и полученные путем компьютерного моделирования по изложенному выше алгоритму при следующих значениях параметров: $R = 1 \text{ кОм}$, $C = 1 \text{ нФ}$, $\sigma_{|Z(\omega)|} = 15 \text{ Ом}$, $\sigma_{\varphi(\omega)} = 0,03 \text{ рад}$.



По графикам рисунка 3 а, б определяем минимальное значение относительных погрешностей: $\delta_{R_{min}} = 1,5\%$, $\delta_{\tau_{min}} = 6\%$ и оптимальные частоты $f_{\tau_{OPT}} = 160 \text{ кГц}$ и $f_{R_{OPT}} = 0 \text{ Гц}$. Таким образом, результаты, полученные путем моделирования по предложенному алгоритму, хорошо согласуются с аналитическими значениями.

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЧАСТОТ ТЕСТОВОГО СИГНАЛА ДЛЯ ТРЕХЭЛЕМЕНТНОГО RC ДП ПУТЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предложенный алгоритм применен для определения оптимальных частот тестового сигнала при измерении параметров трехэлементного ДП со схемой, изображенной на рисунке 4 а. Данная схема представляет интерес по той причине, что она подобна эквивалентной схеме прямосмещенного полупроводникового диода, в которой R_1 соответствует сопротивлению перехода, C – диффузионной емкости, а R_2 – последовательному активному сопротивлению [10].

Выражения для импеданса в комплексной форме, а также модуля и тангенса фазы импеданса указанного ДП соответственно имеют вид:

$$Z(\omega) = \frac{R_1}{1 + j\omega\tau} + R_2, \quad (18)$$

$$|Z(\omega)| = \sqrt{\frac{(R_1 + R_2)^2 + (R_2\omega\tau)^2}{1 + (\omega\tau)^2}}, \quad (19)$$

$$\text{tg}\varphi_{Z(\omega)} = -\frac{R_1\omega\tau}{R_1 + R_2(1 + (\omega\tau)^2)}. \quad (20)$$

Объединяя в одно уравнение уравнения (19) и (20), составляем систему из трех линейных уравнений на трех частотах:

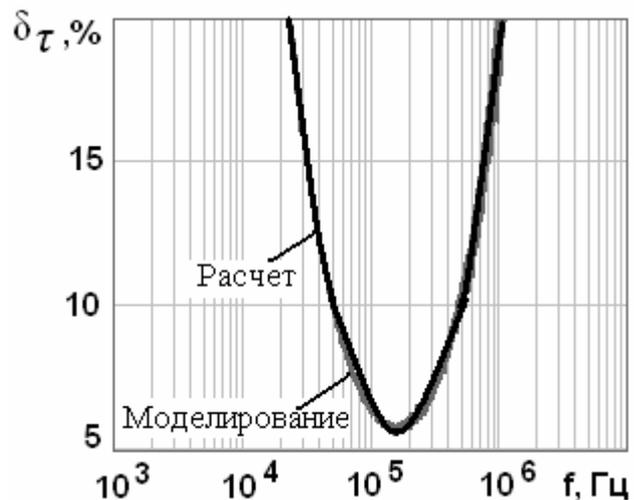


Рис. 3. Графики относительных среднеквадратических случайных погрешностей определения сопротивления R (а) и постоянной времени τ (б) параллельной RC-цепи при $R = 1 \text{ кОм}$, $C = 1 \text{ нФ}$, $\sigma_{|Z(f)|} = 15 \text{ Ом}$ и $\sigma_{\varphi(f)} = 0,03 \text{ рад}$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}, \quad (21)$$

где $a_{11} = |Z(\omega_1)|^2 \omega_1$, $a_{12} = -\omega_1$, $a_{13} = \text{tg}\varphi_{Z(\omega_1)}$,
 $b_1 = -|Z(\omega_1)|^2 \text{tg}\varphi_{Z(\omega_1)}$,
 $a_{21} = |Z(\omega_2)|^2 \omega_2$, $a_{22} = -\omega_2$, $a_{23} = \text{tg}\varphi_{Z(\omega_2)}$,
 $b_2 = -|Z(\omega_2)|^2 \text{tg}\varphi_{Z(\omega_2)}$,
 $a_{31} = |Z(\omega_3)|^2 \omega_3$, $a_{32} = -\omega_3$, $a_{33} = \text{tg}\varphi_{Z(\omega_3)}$,
 $b_3 = -|Z(\omega_3)|^2 \text{tg}\varphi_{Z(\omega_3)}$,

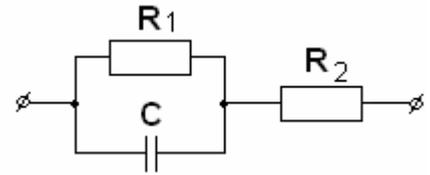
а искомые параметры элементов R_1 , R_2 и C находим путем решения системы нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} \tau = x_1, \\ R_2^2 \tau = x_2, \\ R_2 (R_1 + R_2) = x_3. \end{cases} \quad (22)$$

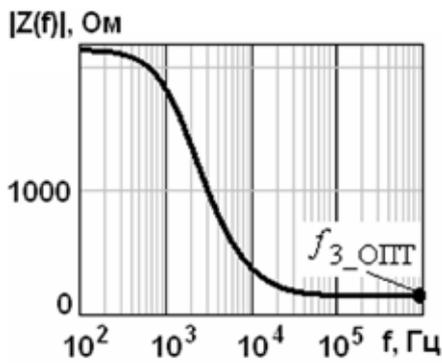
В качестве критерия выбора оптимальных частот при реализации алгоритма поиска также выбран минимум суммы относительных среднеквадратических случайных погрешностей определения параметров элементов:

$$\delta_\Sigma = \delta_{R_1} + \delta_{R_2} + \delta_C.$$

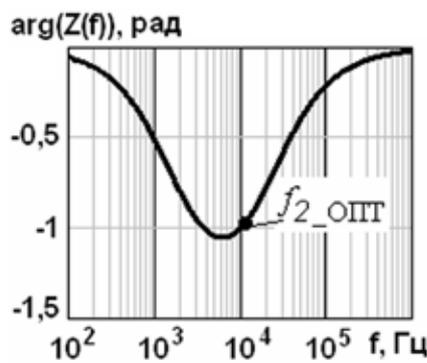
Компьютерное моделирование проводилось при различных численных значениях параметров R_1 , R_2 , C . Во всех случаях расчет показал, что при косвенном измерении параметров эквивалентной схемы ДП, изображенной на рисунке 4 а, существует три оптимальных частоты, лежащие в области характерных точек импеданса ДП:



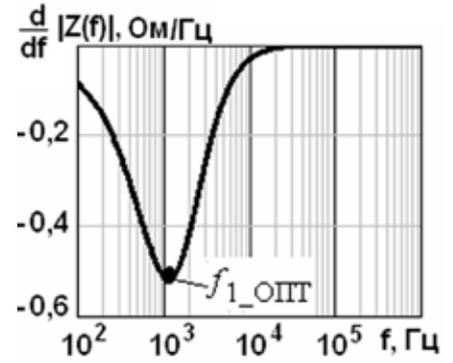
а)



б)

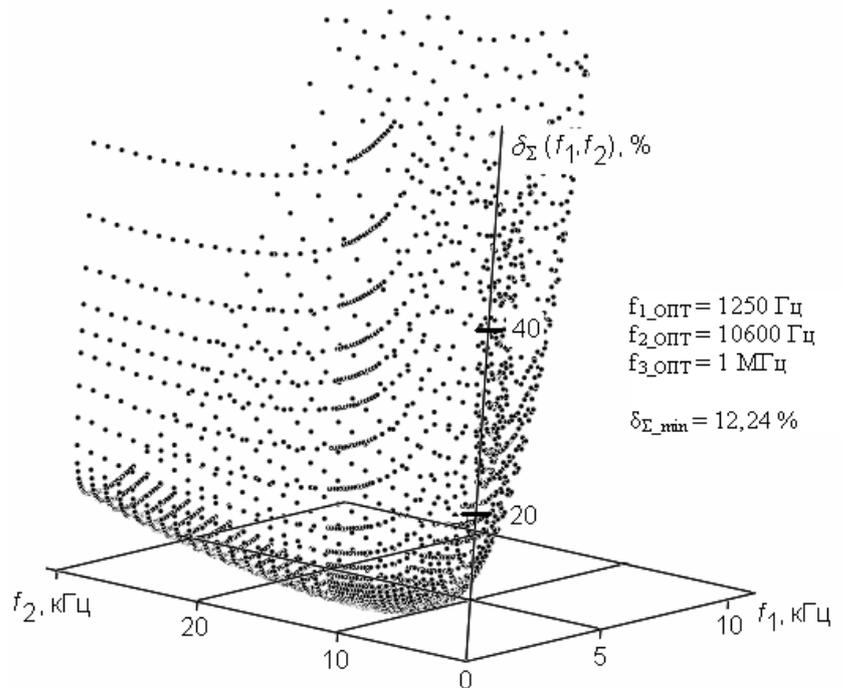


в)



г)

Рис. 4. Схема трехэлементного ДП (а); частотные зависимости модуля (б); фазы импеданса (в); производной модуля импеданса по частоте (г); суммы относительных погрешностей $\delta_\Sigma(f_1, f_2)$ (д) при $R_1 = 2 \text{ кОм}$, $C = 50 \text{ нФ}$, $R_2 = 150 \text{ Ом}$, $\sigma_{|Z(f)|} = 18 \text{ Ом}$, $\sigma_{\varphi(f)} = 0,06^\circ$, $N = 10000$



д)

f_{1_OPT} соответствует точке перегиба частотной зависимости модуля импеданса, то есть частоте минимума первой производной модуля импеданса по частоте; f_{2_OPT} близка к частоте минимума фазы импеданса; f_{3_OPT} стремится к бесконечности, но на практике ее значение можно выбирать в диапазоне частот, в котором комплексное сопротивление ДП в основном определяется последовательным сопротивлением R_2 (рис. 4 б, в, г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье показано, что при косвенном измерении параметров элементов многоэлементных ДП методом импедансной спектроскопии важным является выбор оптимальных частот тестового сигнала, при измерении на которых погрешность определения параметров элементов, обусловленная аддитивной случайной погрешностью измерения характеристик импеданса ДП, принимает минимальное значение. Для определения набора оптимальных частот для многоэлементного ДП с заданной структурой разработан алгоритм, реализуемый путем компьютерного моделирования. Достоверность алгоритма подтверждена на примере двухэлементного ДП в виде параллельной RC-цепи путем сопоставления результатов компьютерного моделирования с результатами аналитического расчета. Предложенный алгоритм применен для определения оптимальных частот тестового сигнала при измерении параметров трехэлементного ДП со схемой, подобной малосигнальной эквивалентной схеме полупроводникового диода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barsukov E. and J.R. Macdonald. *Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment, and Applications*. – USA, 2005. – 595 pp.
2. Кнеллер В.Ю., Боровских Л.П. Определение параметров многоэлементных двухполюсников. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
3. Nebuya S. Measurement of high frequency electrical transfer impedances from biological tissues / S. Nebuya, B. H. Brown, R.H. Smallwood, et al. // *Electron. Lett.* – 1999. – Vol. 35. – pp. 1985–1987.
4. Hoja J. and G. Lentka. Virtual instrument using bilinear transformation for parameter identification of high impedance objects // *Measurement Science and Technology*. – 2003. – Vol. 14. – pp. 633–642.
5. Donmez A. and H. Bayhan. Conduction mechanism of an infrared emitting diode: impedance spectroscopy and current-voltage analysis // *ФТП*. – 2012. – Т. 46, вып. 2. – С. 262–267.
6. Брус В.В. Об импедансной спектроскопии структур с потенциальным барьером // *ФТП*. – 2012. – Т. 46, вып. 8. – С. 1035–1038.
7. Дедюхин А. Обзор современных измерителей импеданса (измерители RLC) // *Компоненты и технологии*. – 2002. – №3.
8. Мирский Г.Я. *Электронные измерения: 4-е изд., перераб. и доп.* – М.: Радио и связь, 1986. – 440 с.
9. Сергеев В.А., Фролов И.В. Аналитический расчет и компьютерное моделирование погрешностей измерения параметров эквивалентных схем двухполюсников // *Радиоэлектронная техника: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В.А. Сергеева*. – Ульяновск: УлГТУ. – 2012. – С. 88–93.
10. Полупроводниковые диоды. Параметры, методы измерений / под ред. Н.Н. Горюнова и Ю.Р. Носова. – М.: Сов. радио, 1968. – 304 с.

REFERENCES

1. Barsukov E. and J.R. Macdonald. *Impedance Spectroscopy. USA, Theory, Experiment, and Applications Publ.*, 2005. 595 p.
2. Kneller V.Yu., Borovskikh L.P. *Opredeleniye parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov* [Determination of Parameters of Multielement Two-terminals]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 144 p.
3. Nebuya S. Measurement of high frequency electrical transfer impedances from biological tissues. S. Nebuya, B. H. Brown, R. H. Smallwood, et al. *Electron. Lett*, 1999, vol. 35, pp. 1985–1987.
4. Hoja J. and G. Lentka. Virtual instrument using bilinear transformation for parameter identification of high impedance objects. *Measurement Science and Technology*, 2003, vol. 14, pp. 633–642.
5. Donmez A. and H. Bayhan. Conduction mechanism of an infrared emitting diode: impedance spectroscopy and current-voltage analysis. *FTP*, 2012, vol. 46, issue 2, pp. 262–267.
6. Brus V.V. Ob impedansnoy spektroskopii struktur s potentsialnym baryerom [On the Impedance Spectroscopy with Potential Barrier]. *FTP*, 2012, vol. 46, issue 8, pp. 1035–1038.
7. Dedyukhin A. Obzor sovremennykh izmeriteley impedansa (izmeriteli RLC) [Review of Modern Impedance Meters (RLC meters)]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2002, no. 3.
8. Mirskiy G.Ya. *Elektronnye izmereniya 4 izd., pererab. i dop.* [Electronic measurements 4th revised and enlarged edition]. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 1986. 440 p.
9. Sergeev V.A., Frolov I.V. Analiticheskiy raschet i kompyuternoye modelirovaniye pogreshnostey izmereniya parametrov ekvivalentnykh skhem dvukhpolyusnikov, pod red. V.A. Sergeeva [Analytical Calculation and Computer-Aided Modeling of Errors in Measuring Parameters of Two-elements' Equivalent Circuits, under the editorship of V.A. Sergeev]. *Radioelektronnaya tekhnika:mezhuuz. sb. nauch. tr.* [Radioelectronics: Collection of Interuniversity Scientific Papers]. Ulyanovsk, UlSTU Publ., 2012, p. 88-93.
10. *Poluprovodnikoviyediody. Parametry, metody izmereniy pod red. N.N. Goryunova i Yu.R. Nosova* [Semiconductor Diodes. Parameters, Methods of Measurement, under the editorship of N.N. Goryunov and Yu.R. Nosov]. Moscow, Sovetskoye Radio Publ., 1968. 304 p.