

АНАЛИЗ ПАССИВНЫХ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗИСТИВНО-ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННЫХ СИГНАЛЬНЫХ ГРАФОВ

Медведева С. Н., Чернецов М. В.

Пензенский региональный центр высшей школы (филиал) ФГБОУ ВПО "Российский государственный университет инновационных технологий и предпринимательства", ул. Красная / Чкалова, 38/53, г. Пенза, 440026, Россия, e-mail: rgu@penza.net

Исследовано влияние паразитных параметров резистивно-емкостных датчиков (РЕД) для одной из возможных схем включения РЕД в пассивных измерительных цепях (ИЦ). При этом для упрощения вывода функций преобразования использованы методы обобщенных сигнальных графов (ОСГ), на основе ОСГ записан определитель для учета влияния входных проводимостей и паразитной емкости между подвижным электродом и корпусом РЕД, а также определитель, учитывающий подключение корпуса РЕД к источнику входного воздействия. Получены соответствующие передаточные функции, которые проанализированы с помощью MathCAD-программ. Показано, что погрешность нелинейности уменьшается в рекомендованном диапазоне рабочих частот; для улучшения динамических свойств доказано и рекомендовано объединение корпуса с источником входного воздействия, поскольку в таком включении паразитные емкости работают как форсирующие.

Ключевые слова: измерительная цепь, резистивно-емкостной датчик, обобщенный сигнальный граф, погрешность нелинейности, динамическая погрешность.

THE ANALYSIS OF THE PASSIVE START CIRCUITRY OF THE RESISTIVE-CAPACITIVE TRANSDUCER ON THE BASE OF THE GENERALIZED SIGNAL GRAPHS

Medvedeva S. N., Chernetzov M. V.

Penza Regional High School Center (Branch) Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Russian State University of innovative technologies and entrepreneurship", Krasnaya / Chkalova, 38/53, Penza, 440026, Russia, e-mail: rgu@penza.net

The authors examine the influence of the stray parameters of the resistive-capacitive transducers (RCT) on the one of the possible schemes of inclusion RCT in the passive measuring circuits (MC). There are used methods of generalized signal graphs (GSG) to simplify the output of the conversion functions. The authors present the determinant for accounting the effect of input conductance and stray capacitance between the movable electrode and RCT. Here also presented the determinant, taking into account the connection of RCT's case to the input exposure. The authors have obtained the appropriate transfer functions, which are analyzed with the help of MathCAD-programs. It is shown that nonlinearity error is reduced in the recommended range of operating frequencies, to improve the dynamic properties it's recommended to combine the case and the input source, because in such way the stray capacitances force.

Key words: the measuring circuit, the resistive-capacitive transducer, generalized signal graph, nonlinearity error, dynamic error.

Введение

Конструктивно резистивно-емкостной датчик (РЕД) отличается от широко используемых потенциометрических датчиков тем, что вместо гальванического контакта подвижного электрода (ПЭ) с резистивным элементом (РЭ), имеющим полное сопротивление R_0 и сопротивления плеч R_x , $(R_0 - R_x)$, по обе стороны от контакта для передачи информации о положении ПЭ используется емкость C_c зазора между ПЭ и РЭ [5].

Из анализа конструктивных особенностей РЕД следует, что схема замещения РЕД может быть достаточно сложной и содержит конденсаторы C_1 , C_2 , а также C_4 – эквивалентные паразитным емкостям между плечами РЭ R_x , $(R_0 - R_x)$ и корпусом, а также

между ПЭ и корпусом РЕД соответственно. Причем: полюс РЕД, в котором соединены ветви (плечи) R_x , $(R_0 - R_x)$, и C_c недоступен для подключения; информативные ветви РЕД, содержащие элементы R_x и $(R_0 - R_x)$, в общем случае шунтируются паразитными емкостями между РЭ и элементами корпуса РЕД (за исключением частного, редкого на практике случая, когда влиянием шунтирующих паразитных емкостей можно пренебречь).

В связи с этим упрощение анализа возможных схем включения РЕД в измерительной цепи (ИЦ) с целью минимизации влияния паразитных параметров РЕД является, несомненно, актуальной задачей.

Данная задача успешно решается при использовании методов обобщенных сигнальных графов (ОСГ) [1].

Отметим, что исключение влияния шунтирующих ветвей на исследуемую достигается, если разность потенциалов на полюсах неинформативных ветвей будет равна нулю [3]. С учетом изложенного варианта пассивной схемы ИЦ, для измерения параметров одной из ветвей РЭ представлен на рис. 1. Здесь ИН – измеритель напряжения, ИТ – измеритель тока, ФОВ – формирователь энергетического воздействия. При этом, если ФОВ – источник заданного тока, то ИТ не нужен и, соответственно, если ФОВ – источник заданного напряжения, то не нужен ИН. В результате сопротивление ветви из последовательно включенных R_x и C_c элементов может быть найдено из условия:

$$Z(R_x, C_c) = R_x + \frac{1}{j\omega C_c} = \frac{U_{\text{ИН}}(\omega)}{I_{\text{ИТ}}(\omega)}, \quad (1)$$

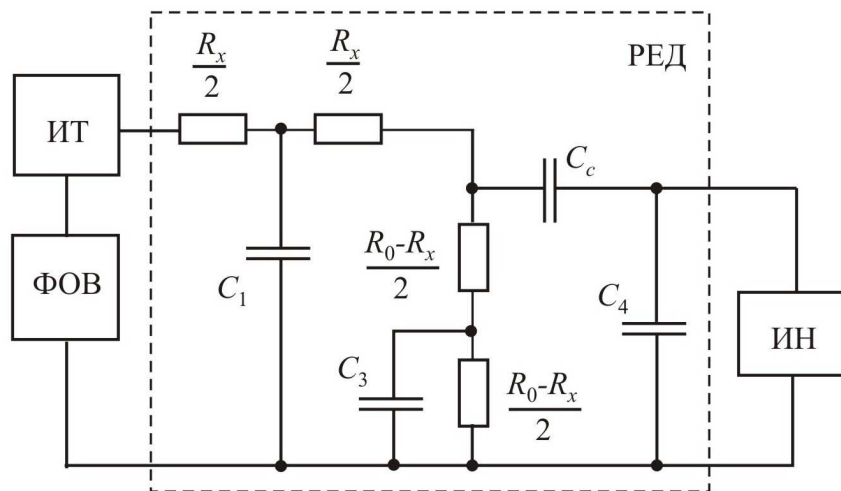


Рис. 1. Вариант схемы включения РЕД для измерения параметров ветви $Z(R_x, C_c)$,

где $U_{\text{ИН}}(\omega)$ и $I_{\text{ИТ}}(\omega)$ – измеренные комплексные значения напряжения в ИН и тока в ИТ. Для раздельного измерения значений R_x и C_c могут быть использованы известные методы инвариантного преобразования [4].

Очевидно, что изложенное справедливо и для ветви $R_0 - R_x$ и C_c , включенных вместо ветви R_x, C_c .

Для анализа возможностей пассивных цепей ИЦ для РЕД и выработки требований к их параметрам исследуем режим заданного напряжения $U(p)$ в схеме рис. 1. Свойства рассматриваемой схемы отображаются обобщенным сигнальным графом, представленным на рис. 2, где $Z_{\text{ВХ}}$ – комплексная реактивная проводимость, учитывающая влияние входных проводимостей ИН и емкости C_4 . Определитель ОСГ описывается выражением [2]:

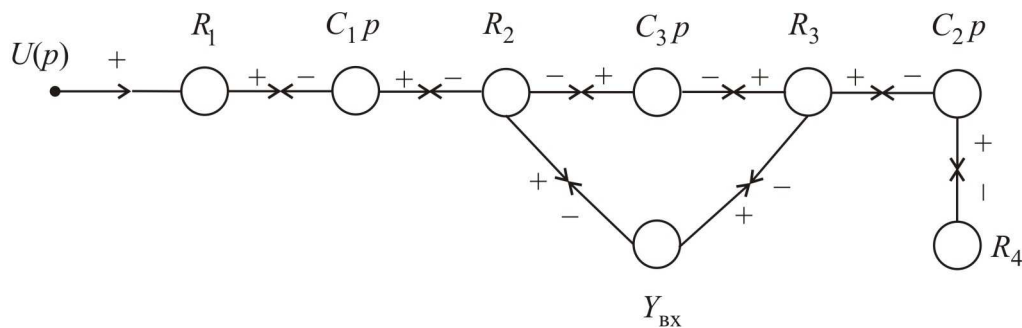


Рис. 2. Обобщенный сигнальный граф для схемы РЕД:

$$\Delta = Y_{\text{ВХ}} \Delta_G + (R_1 C_1 p + 1) [(R_3 C_3 p + 1)(R_4 C_2 p + 1) + R_4 C_3 p] + (R_4 C_2 p + 1) [(R_1 C_1 p + 1)(R_2 C_3 p + 1) + R_1 C_3 p] + (R_1 C_1 p + 1)(R_4 C_2 p + 1), \quad (2)$$

где

$$\Delta_G = C_3 p (R_1 R_2 C_1 p + R_1 + R_2) (R_3 R_4 C_2 p + R_3 + R_4) + (R_1 C_1 p + 1) (R_3 R_4 C_2 p + R_3 + R_4) + (R_4 C_2 p + 1) (R_1 R_2 C_1 p + R_1 + R_2). \quad (3)$$

Исходная для анализа передаточная функция РЕД имеет вид:

$$H(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U(p)} = \frac{1}{\Delta} [(R_3 C_3 p + 1)(R_4 C_2 p + 1) + R_4 C_3 p - (R_4 C_2 p + 1)]. \quad (4)$$

Для проверки примем, что $Y_{\text{ВХ}} = 0$; $C_1 = C_2 = 0$.

В результате подстановки в (4) с учетом (2) получим:

$$H(p) = \frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \cdot \frac{\frac{1}{3}(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)C_3 p}{\left(1 + \frac{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)C_3 p}{3}\right)}. \quad (5)$$

Принимая $p \rightarrow \infty$, убедимся, что передаточная функция совпадает с передаточной функцией резистивного делителя напряжения потенциометрического датчика.

Для наглядности и простоты анализа влияния паразитных емкостей C_1 и C_2 примем $Y_{\text{вх}} = 0$, при этом:

$$H(p) = \frac{(R_3 + R_4)(R_4 C_2 p + 1) C_3 p}{Q(p)}, \quad (6)$$

где:

$$Q(p) = (R_1 C_1 p + 1) [(R_3 C_3 p + 1)(R_4 C_2 p + 1) + R_4 C_3 p] + (R_4 C_2 p + 1) \times \\ \times [(R_1 C_1 p + 1)(R_2 C_3 p + 1) + R_1 C_3 p] + (R_1 C_1 p + 1)(R_4 C_2 p + 1).$$

Анализ выражения (6) осуществляем с помощью MathCAD-программы Анализ-1.

АНАЛИЗ-1: MathCAD-программа для исследования влияния паразитных емкостей между резистивным элементом и корпусом РЕД

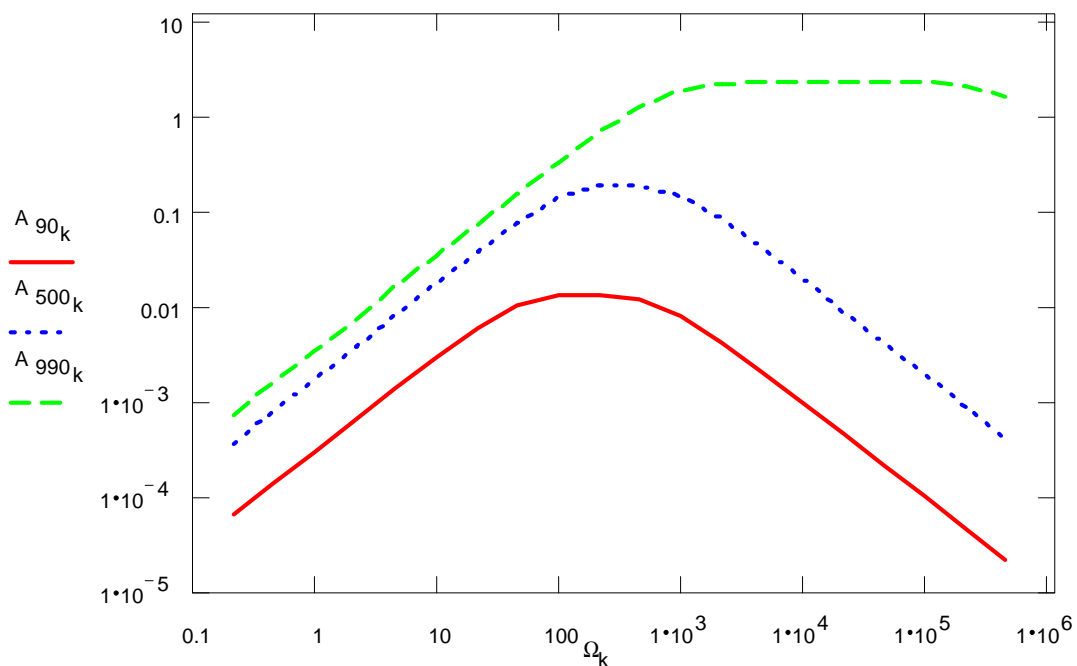
Зададим значения входных независимых переменных:

$$R_0 := 1000 \text{ Ом} \quad R_x = 990 \text{ Ом} \quad C_p := 50 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \quad C_3 := 10 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \\ R_1 := \frac{(R_0 - R_x)}{2} \quad R_2 := R_1 \quad R_3 := \frac{R_x}{2} \quad R_4 := R_3 \\ C_1 := \frac{(R_0 - R_x)}{R_0} \cdot C_p \quad C_2 := C_p - C_1$$

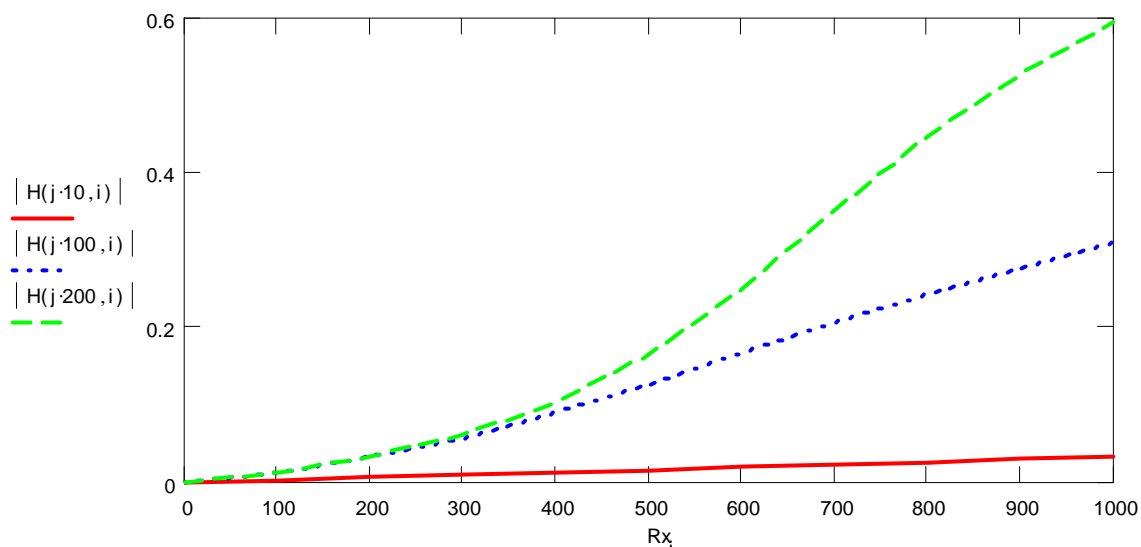
Для вычислений с приемлемой точностью зададим значения емкостей в относительных координатах:

$$Kn := 10^6 \quad C_1 := C_1 \cdot Kn \quad C_2 := C_2 \cdot Kn \quad C_3 := C_3 \cdot Kn$$

Построим амплитудно-частотные характеристики для исследуемой функции (6) соответственно при $R_x=90, 500$ и 990 Ом (рис. 3, а). Построим сечения амплитудно-частотной характеристики при различных Ω (рис. 3, б) и графики абсолютных погрешностей для РЕД (рис. 3, в).

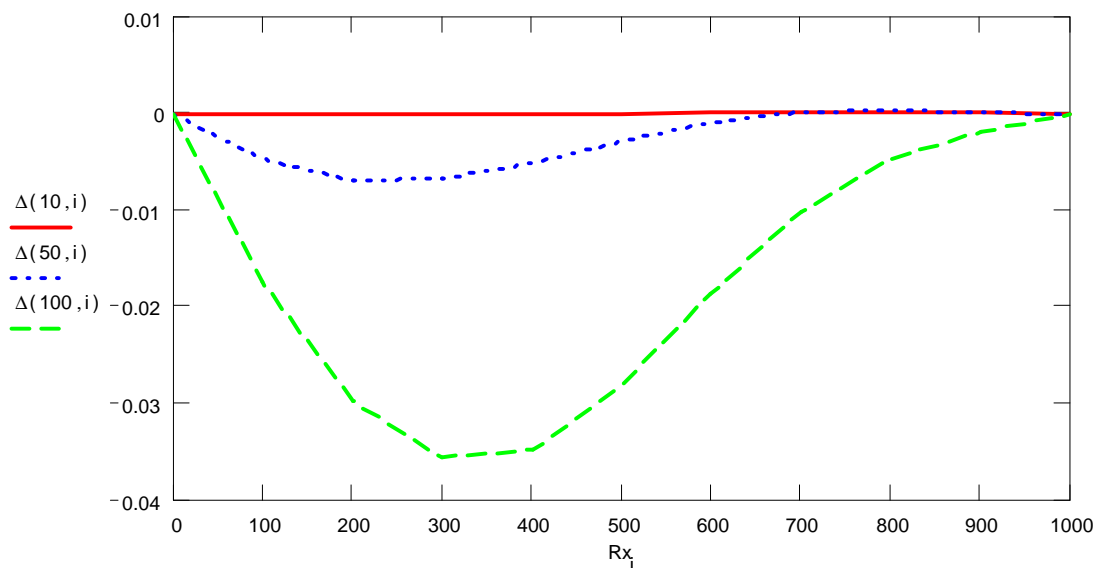


а)



б)

$$\Delta(\Omega, i) := |H(j \cdot \Omega, i)| - \frac{(|H(j \cdot \Omega, 10)| - |H(j \cdot \Omega, 0)|)}{10} \cdot i$$



в)

Рис. 3. Анализ влияния паразитных параметров:

а) амплитудно-частотные характеристики РЕД;

б) графики сечений АЧХ для РЕД; в) графики абсолютных погрешностей для РЕД.

Как видно из графиков рис. 3, а, линейность характеристики преобразования будет существенно зависеть от частоты входного активного воздействия. Как видно из графиков рис. 3, б, по мере увеличения Ω возрастает чувствительность преобразования и появляется погрешность нелинейности, результаты расчета которой представлены на рис. 3, в.

Соответствующие приведенные погрешности нелинейности принимают значения, в %

$$\gamma(\Omega, i) := \frac{(100 \cdot \Delta(\Omega, i))}{|H(j \cdot \Omega, 10)|} \quad \Gamma_{1i} := |\gamma(10, i)| \quad \Gamma_{2i} := |\gamma(50, i)| \quad \Gamma_{3i} := |\gamma(100, i)|$$

$$\max(\Gamma_1) = 0.216$$

$$\max(\Gamma_2) = 4.32$$

$$\max(\Gamma_3) = 11.459$$

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1) Для получения приемлемых погрешностей, обусловленных влиянием изучаемого фактора, следует рационально выбирать рабочую частоту, верхняя граница которой определяется допустимым значением погрешности нелинейности.

2) Для реальных значений параметров РЕД анализ следует проводить в области до 10 МГц.

Из приведенного исследования видно (см. рис. 3, а), что при больших значениях паразитных емкостей C_1 и C_2 АЧХ РЕД на высоких частотах имеет спад. С целью уменьшения их паразитного влияния можно корпус РЕД соединить с источником входного воздействия. ОСГ, учитывающий такое изменение ИЦ, показан на рис. 4.

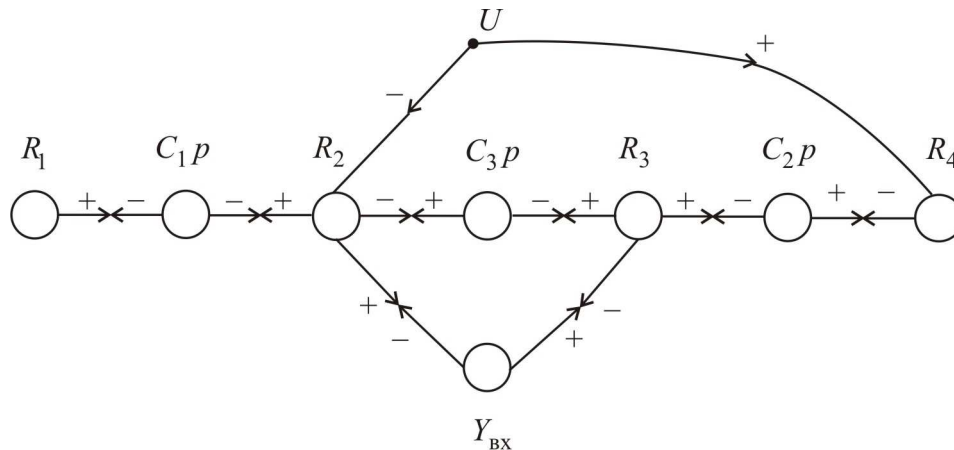


Рис. 4. ОСГ для варианта ИЦ с подключением корпуса РЕД к общему выходу ФОВ

Полученный однородный ОСГ изоморфен графу рис. 2, следовательно, для расчета можно пользоваться формулой (2) и порожденными ею формулами. Для анализа динамики предположим, что $Y_{BX} = 0$, и выведем выражение для передаточной функции:

$$\hat{H}(p) = \frac{1}{Q(p)} [(R_1 C_1 p + 1) [(R_3 C_3 p + 1)(R_4 C_2 p + 1) + R_4 C_3 p - (R_4 C_2 p + 1) + 1]]. \quad (7)$$

Сравнивая полученное выражение с формулой (6), можно сделать вывод, что объединение корпуса с источником входного воздействия позволяет улучшить динамические свойства ИЦ, поскольку в таком включении паразитные емкости работают как форсирующие.

Для анализа влияния входного импеданса ИН зададимся $C_1 = C_2 = 0$ и будем считать, что Z_{BX} представляет собой параллельно соединенные резистор R_{BX} и конденсатор C_{BX} , т.е.

$$Y_{\text{ВХ}} = \frac{1}{R_{\text{ВХ}}} + C_{\text{ВХ}} p = g_{\text{ВХ}} + C_{\text{ВХ}} p. \quad (8)$$

При подобных ограничениях найдем определитель ОСГ:

$$\Delta(p) = Y_{\text{ВХ}} [rC_3 p + 1] R_0 + R_0 C_3 p + 3 \quad (9)$$

и найдем с учетом (7) передаточную функцию тракта измерения выходного напряжения РЕД:

$$H_{\text{ИН}}(p) = \frac{R_x}{R_0} \cdot \frac{1}{rC_{\text{ВХ}}} \cdot \frac{p}{\left(p^2 + \left[\frac{R_0(C_{\text{ВХ}} + C_3) + r(R_0/R_{\text{ВХ}})C_3}{rR_0C_{\text{ВХ}}C_3} \right] p + \frac{(3 + R_0/R_{\text{ВХ}})}{rR_0C_{\text{ВХ}}C_3} \right)}, \quad (10)$$

где:

$$R_x = R_3 + R_4; \quad (11)$$

$$R_0 = R_1 + R_2 + R_3 + R_4; \quad (12)$$

$$r = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}. \quad (13)$$

Анализ динамических характеристик тракта измерения проведен численными методами при помощи MathCAD-программы Анализ-2.

АНАЛИЗ-2: MathCAD-программа для исследования влияния входного импеданса измерителя выходного напряжения РЕД

Зададим значения входных независимых переменных:

$$\begin{aligned} R_0 &:= 1000 \text{ Ом} & i &:= 0..9 & R_{x_i} &:= R_0 \cdot \frac{i}{10} \text{ Ом} \\ R_{\text{ин}} &:= 10^3 \text{ Ом} & r_i &:= \frac{(R_0 - R_{x_i}) \cdot R_{x_i}}{R_0} \text{ Ом} \\ C_{\text{ин}} &:= 100 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} & C_3 &:= 10 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \end{aligned}$$

Для вычислений с приемлемой точностью зададим значения емкостей в относительных координатах:

$$K_n := 10^6 \quad C_{\text{ин}} := C_{\text{ин}} \cdot K_n \quad C_3 := C_3 \cdot K_n$$

Зададим передаточную функцию $H(s,i)$ согласно выражению (10) и построим нормированные амплитудно-частотные характеристики (рис. 5).

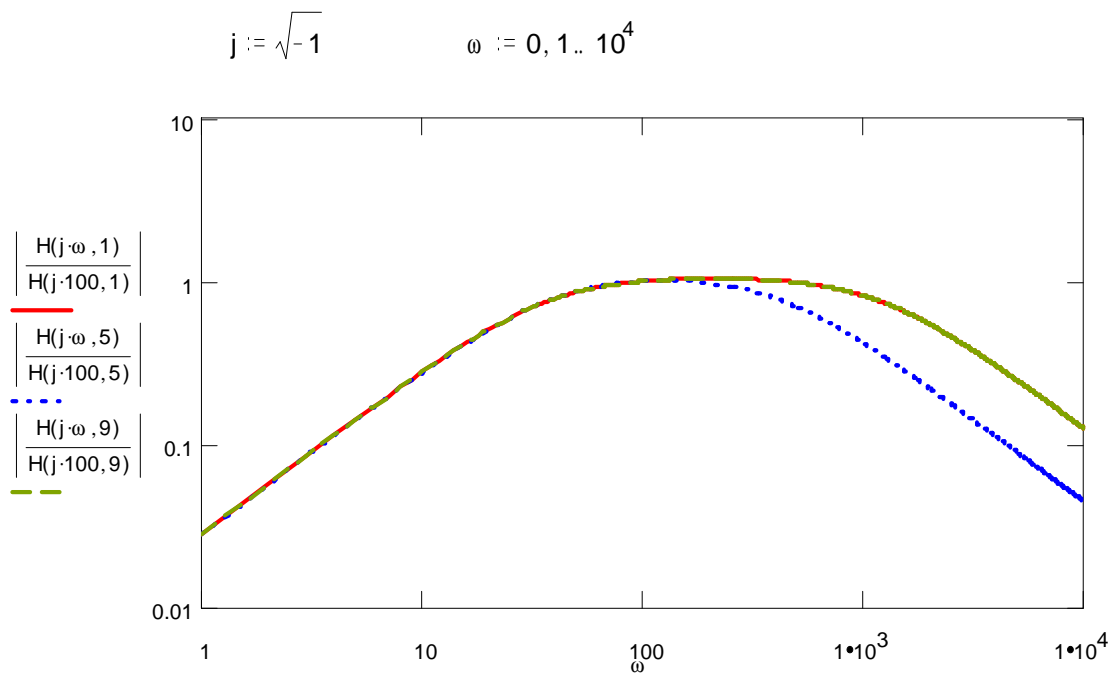


Рис. 5. Анализ динамических характеристик тракта измерения: АЧХ для РЕД при различных частотах
 В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Погрешность нелинейности существенно зависит от рабочей частоты.
2. Для уменьшения погрешности от нелинейности следует уменьшать значение входной емкости измерителя, а от входного сопротивления погрешность практически не зависит.
3. Для уменьшения погрешности от нелинейности следует осуществлять оптимизацию по частоте, так как на характеристике имеются как локальные минимумы, так и максимумы.

Исследования проводятся в ходе выполнения поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы "Графоаналитические методы анализа электрических цепей".

Список литературы

1. Анализ электрических цепей методом сигнальных графов: учебное пособие / Под. ред. В. И. Чернецова / А. Н. Андреев, С. Н. Медведева, В. Д. Михотин, С. П. Пискарев. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002. – 114 с.
2. Анисимов В. И. Топологический расчет электронных схем. – Л.: Энергия, 1977. – 240 с.
3. Куроедов С. К. Разработка и исследование методов и средств измерения параметров сложных электрических цепей: Дис. ... канд. техн. наук. – Пенза: ППИ, 1981. – 193 с.
4. Мартяшин А. И., Орлова Л. В., Шляндин В. М. Преобразователи параметров многополюсных электрических цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 151 с.

5. Чернецов М. В. Унифицирующие измерительные преобразователи физических величин на базе резистивно-емкостных датчиков: Дис. ... канд. техн. наук. – Пенза: ПГУ, 2001. – 215 с.

Рецензенты:

Печерская Р. М., д.т.н., профессор кафедры нано- и микроэлектроники, декан факультета «Естественные науки, нанотехнологии и радиоэлектроника» ФГБОУ ВПО Пензенский государственный университет, г. Пенза.

Чураков П. П., д.т.н., профессор кафедры радиотехники и радиоэлектронных систем, декан факультета приборостроения, информационных технологий и систем ФГБОУ ВПО Пензенский государственный университет, г. Пенза.