

УДК 620.179 (031)

Н.И. Твердоступ

АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗОНАНСНОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Актуальность. Повышение чувствительности индуктивных (емкостных) датчиков к контролируемому параметру, расширение динамического диапазона измеряемой величины является актуальным при создании устройств измерения и контроля.

Анализ известных решений. В основу работы ряда приборов неразрушающего контроля с индуктивными (емкостными) датчиками положен Z-метрический метод, позволяющий определять приращение модуля комплексного сопротивления датчика, индуктивность (емкость) которого является элементом колебательного контура, расстроенного в пределах полосы пропускания относительно частоты питающего контур внешнего задающего генератора [1]. Устройства на основе Z-метра имеют невысокую чувствительность к контролируемому параметру [2]. Попытки повысить чувствительность за счет увеличения крутизны склона амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) контура неизбежно сопровождаются уменьшением динамического диапазона измерений [3].

Постановка задачи. Целью работы является анализ АЧХ резонансного делителя напряжения для обоснования возможности повышения чувствительности и расширения динамического диапазона измеряемого импеданса датчика.

Основная часть. Схема Z-метра (рис.1а) представляет собой частотно-зависимый делитель напряжения, состоящий из активного сопротивления R и LC-контура, расстроенного в пределах полосы пропускания относительно частоты колебаний задающего генератора. Здесь изменение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ как функции импеданса LC-контура определяется крутизной склона его АЧХ. При этом динамический диапазон изменения импеданса контура ограничивается шириной АЧХ.

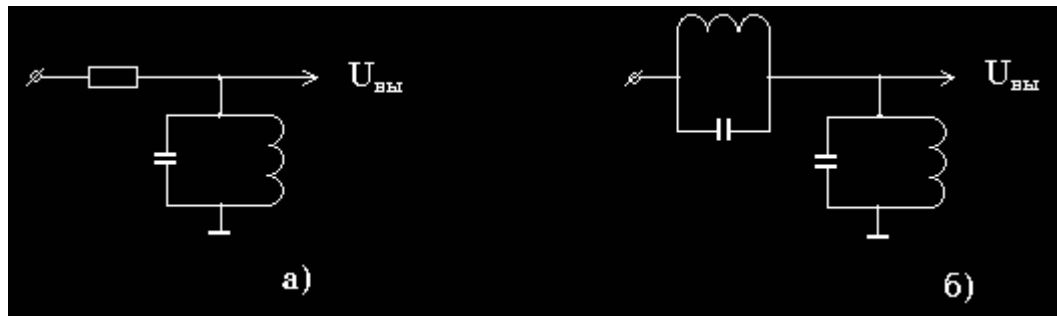


Рисунок 1 - Электрические схемы Z-метра (а) и резонансного делителя (б)

В схеме резонансного делителя напряжения вместо сопротивления R включен дополнительный колебательный контур L_1C_1 (рис.1б) с расстройкой, противоположной расстройке основного контура L_2C_2 .

Для схемы резонансного делителя напряжения (рис.1б) комплексный коэффициент передачи

$$K(j\omega) = \dot{Z}_2 / (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2), \quad (1)$$

где \dot{Z}_1, \dot{Z}_2 - импедансы контуров, которые соответственно равны

$$\dot{Z}_1 = \frac{r_1 + j\omega L_1}{j\omega C_1(r_1 + j\omega L_1 + 1/j\omega C_1)} \quad (2)$$

$$\dot{Z}_2 = \frac{r_2 + j\omega L_2}{j\omega C_2(r_2 + j\omega L_2 + 1/j\omega C_2)} \quad (3)$$

Обозначим

$$A_1 = \frac{\omega L_1}{r_1} \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{01}} \right)^2 \right] - \omega C_1 r_1; \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{\omega L_2}{r_2} \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{02}} \right)^2 \right] - \omega C_2 r_2; \quad (5)$$

$$B_1 = \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{01}} \right)^2 \right]^2 + \omega^2 C_1^2 r_1^2; \quad (6)$$

$$B_2 = \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{02}} \right)^2 \right]^2 + \omega^2 C_2^2 r_2^2; \quad (7)$$

где $\omega_{01} = 1/\sqrt{L_1C_1}$, $\omega_{02} = 1/\sqrt{L_2C_2}$ - резонансные частоты контуров, r_1, r_2 - активные сопротивления контуров. Найдем выражение комплексного коэффициента передачи резонансного делителя напряжения в виде

$$K(j\omega) = \frac{B_1[B_1 + B_2 + A_2(A_1B_2 + A_2B_1) + jB_2(A_2 - A_1)]}{(B_1 + B_2)^2 + (A_1B_2 + A_2B_1)^2}. \quad (8)$$

Амплитудно-частотная характеристика делителя определяется модулем коэффициента передачи

$$|K(j\omega)| = \frac{B_1 \sqrt{[B_1 + B_2 + A_2(A_1 B_2 + A_2 B_1)]^2 + [B_2(A_2 - A_1)]^2}}{(B_1 + B_2)^2 + (A_1 B_2 + A_2 B_1)^2}, \quad (9)$$

а фазо-частотная характеристика

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{B_2(A_2 - A_1)}{B_1 + B_2 + A_2(A_1 B_2 + A_2 B_1)}. \quad (10)$$

Для упрощения анализа считаем, что $L_1 = L_2 = L$, $r_1 = r_2 = r$. Качественный анализ выражения (9) показывает, что при $\omega_{02} < \omega_{01}$ зависимость $|K(j\omega)|$ имеет вид, приведенный на рис.2. С ростом частоты ω задающего генератора при $\omega = \omega_{02}$ наступает резонанс токов в параллельном контуре $L_2 C_2$ нижнего плеча делителя, при этом $|K(j\omega)| = 1$.

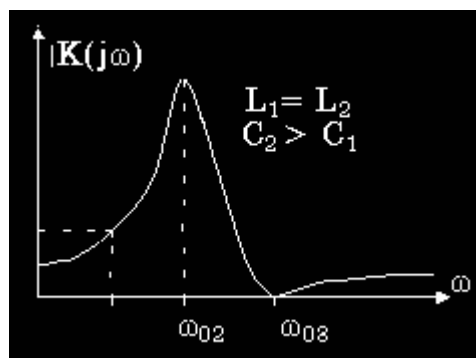


Рисунок 2 - Амплитудно-частотная характеристика резонансного делителя

При дальнейшем увеличении частоты ω в диапазоне $\omega_{02} < \omega < \omega_{01}$ импеданс верхнего контура $L_1 C_1$ еще сохраняет индуктивный характер, а импеданс контура $L_2 C_2$ уже становится емкостным, следовательно, резонансный делитель можно считать последовательным контуром с резонансной частотой $\omega_{03} = \sqrt{2/L(C_1 + C_2)}$. В таком последовательном контуре при $\omega = \omega_{03}$ наблюдается резонанс напряжений, вызывающий существенное увеличение $|K(j\omega)|$. Дальнейшее увеличение ω приводит к резонансу токов в контуре $L_1 C_1$ на частоте $\omega = \omega_{01}$, при этом $|K(j\omega)| \rightarrow 0$. Рабочими участками могут быть диапазоны частот $\omega_{03} < \omega < \omega_{01}$ или $\omega_{02} < \omega < \omega_{03}$, в которых протяженность и крутизна АЧХ определяются разностью частот ω_{03} и ω_{01} или ω_{03} и ω_{02} . По сравнению с Z-метром у резонансного делителя есть очевидное преимущество - резонансное усиление напряжения, т.к. в рабочем диапазоне $|K(j\omega)|$ преимущественно больше единицы. У Z-метра коэффициент передачи всегда меньше единицы.

Выражение (9) было протабулировано для значений $L = 12$ мГ, $r = 10$ Ом и различных соотношений между C_1 и C_2 . На рис.3 представлены графические зависимости модуля коэффициента передачи $|K(j\omega)|$. Если датчик (индуктивный или емкостной) включить в качестве элемента нижнего контура L_2C_2 , то при его расстройке за счет увеличения L_2 или C_2 в случае $\omega_{02} < \omega_{01}$ (рис.3а), изменяется частота последовательного резонанса ω_{03} , максимум значения $|K(j\omega)|$, а также крутизна склонов характеристики. Здесь исходную частоту ω внешнего генератора следует выбирать из условия

$$\omega_{02} < \omega < \omega_{03}. \quad (11)$$

Тогда при уменьшении ω_{02} положительное приращение $|K(j\omega)|$ будет обусловлено двумя факторами - сдвигом характеристики влево и увеличением максимума значения $|K(j\omega)|$. В случае $\omega_{02} > \omega_{01}$ (рис.3б) целесообразно условие

$$\omega_{03} < \omega < \omega_{02}, \quad (12)$$

которое обеспечивает отрицательное приращение $|K(j\omega)|$ за счет сдвига характеристики влево и уменьшения максимума $|K(j\omega)|$.

Если датчик включен в верхний контур L_1C_1 и $\omega_{02} < \omega_{01}$ (рис.3в) максимальное приращение $|K(j\omega)|$ (с отрицательным знаком) будет при

$$\omega_{03} < \omega < \omega_{01}. \quad (13)$$

По аналогии, при $\omega_{02} < \omega_{01}$ частота ω должна быть

$$\omega_{01} < \omega < \omega_{03}. \quad (14)$$

Анализируя условия (11), (12), (13) и (14) для резонансного делителя можно сформулировать правила исходной настройки контуров. Если датчик включен в контур с меньшей резонансной частотой, то частота задающего генератора должна быть большей либо равной частоте контура с датчиком, при этом приращение $|K(j\omega)|$ будет положительным. Если датчик включен в контур с большей резонансной частотой, то частота задающего генератора должна быть большей либо равной частоте последовательного резонанса, при этом приращение $|K(j\omega)|$ будет отрицательным. Из зависимостей на рис. 3а,б,в следует также, что максимальная крутизна характеристики и наибольший динамический диапазон измерений наблюдаются при частотах, находящихся между частотой последовательного резонанса ω_{03} и частотой, при которой $|K(j\omega)|=0$.

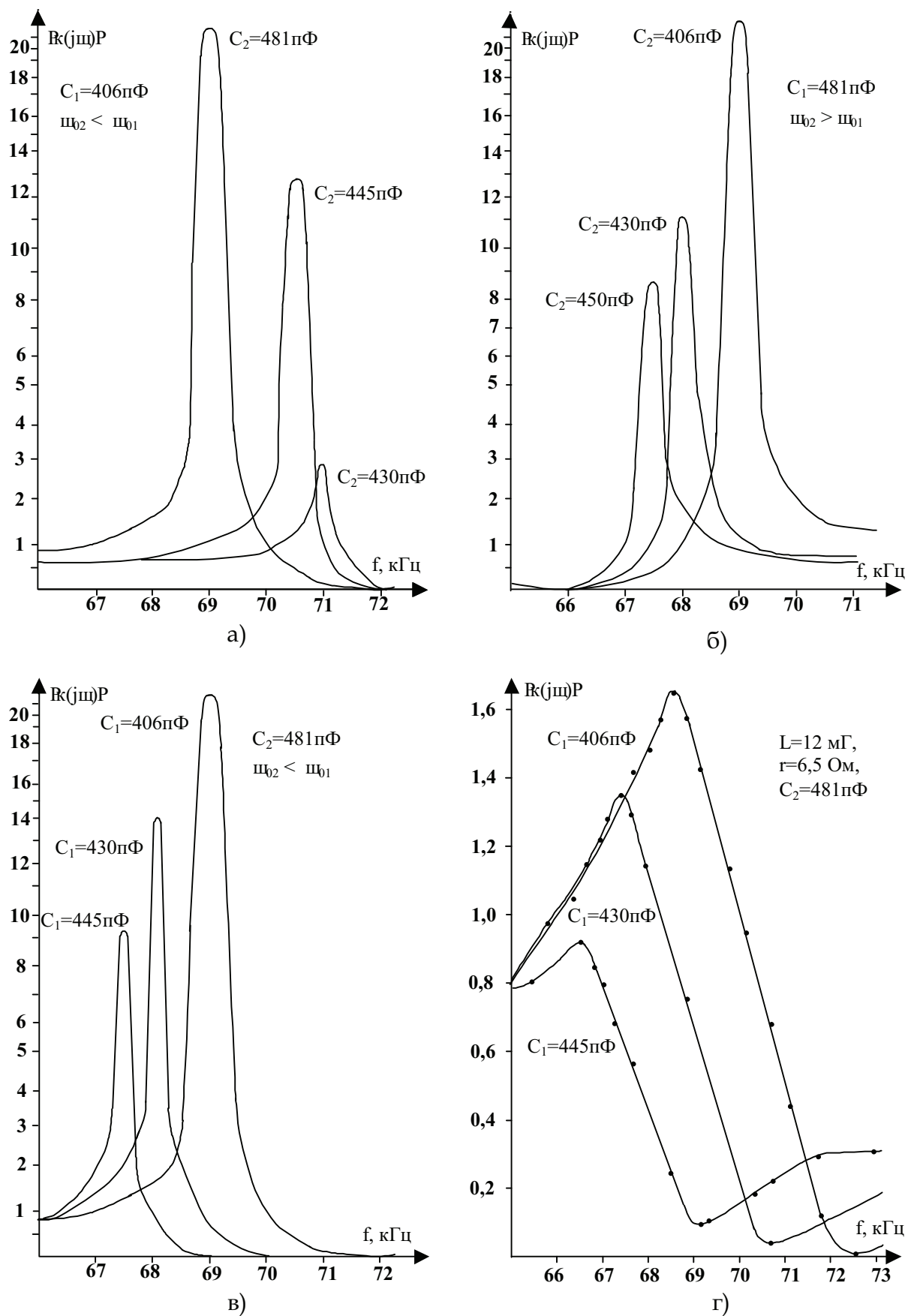


Рис. 3. Расчетные (а,б,в) и экспериментальные (г) амплитудно-частотные характеристики резонансного делителя.

На рис.3г приведены экспериментальные зависимости $|K(j\omega)|$, которые достаточно хорошо совпадают с расчетными данными по форме и значениям резонансных частот. Зависимости подтверждают наличие резонансного усиления, при котором $|K(j\omega)| > 1$. Уменьшение величин максимумов $|K(j\omega)|$ по сравнению с расчетными значениями объясняется шунтирующим влиянием выходного сопротивления задающего генератора.

Выводы. Анализ амплитудно-частотных характеристик резонансного делителя напряжения показал возможность реализации измерителя импеданса индуктивного (емкостного) датчика с высокой чувствительностью к контролируемому параметру при более широком динамическом диапазоне изменения импеданса датчика, чем у измерителей на основе Z-метра. Проведенный анализ позволил сформулировать правила взаимных расстроек контуров, составляющих резонансный делитель, которые позволяют выбрать необходимую чувствительность к контролируемому параметру и требуемый динамический диапазон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник / Под ред. Г.С. Самойловича. - .: Машиностроение, 1976. -456 с.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. Кн.2 / Под ред. В.В. Ключева. - .: Машиностроение, 1986, -352с.
3. Измерения в электронике. Справочник / Под ред. В.А. Кузнецова. - .: Энергоатомиздат, 1987. -512с.

Получено 21.11.06 г.