

АНАЛИЗ F-МЕТРА С УПРАВЛЯЕМОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ К ПРИРАЩЕНИЮ РЕАКТАНСА ИНДУКТИВНОГО ДАТЧИКА

Аннотация. Цель работы – повышение чувствительности F-метрического преобразователя индуктивности. Найдены условия управления крутизной характеристики преобразования измерительного генератора на основе комбинированной операционной схемы путем изменения степени компенсации начальной индуктивности параметрического датчика, включенного в резонансный контур генератора.

Ключевые слова: индуктивность, сопротивление, импеданс, датчик, генератор, комбинированная операционная схема, приращение частоты, компенсация, чувствительность, F-метр.

Введение. В современных устройствах измерения и контроля широко используют метод F-метра, позволяющий довольно просто преобразовывать реактанс датчика в частоту гармонических колебаний [1]. Недостатком метода является его ограниченная чувствительность к изменению контролируемого параметра. Поэтому актуальным является создание средств, позволяющих увеличить чувствительность контроля методом F-метра.

В работах [2,3] заложены основы синтеза преобразователей импеданса на операционных усилителях. Выводы из [4] указывают на целесообразность использования комбинированной операционной схемы для создания измерительного генератора с управляемой чувствительностью.

Постановка задачи. Целью работы является разработка F-метра с повышенной чувствительностью к изменению индуктивности параметрического датчика.

Основная часть. Измерительный генератор на основе линейной комбинированной операционной схемы (ЛКОС) показан на рис. 1.

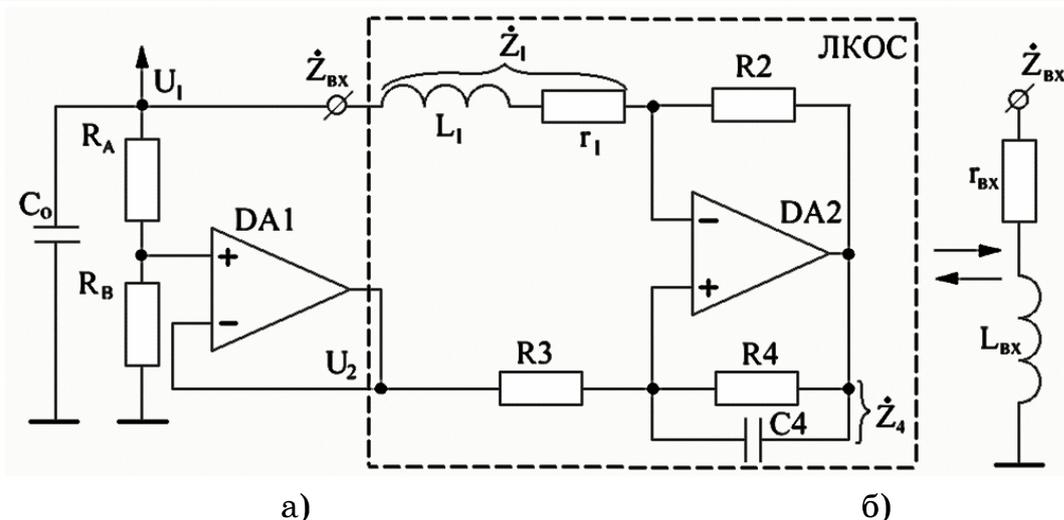


Рисунок 1 – Измерительный генератор на основе ЛКОС (а); эквивалентное представление ЛКОС (б)

В линейной комбинированной операционной схеме с индуктивным импедансом в цепи отрицательной обратной связи характерным является наличие комбинированной обратной связи, а также то, что внешние сигналы возбуждения U_1 и U_2 поступают синфазно на оба входа операционного усилителя DA2. Из выводов к работе [4] следует, что входной импеданс ЛКОС равен

$$\dot{Z}_{вх} = (\dot{Z}_1 - R_2 R_3 / \dot{Z}_4) / (1 - n), \quad (1)$$

где $\dot{Z}_1 = r_1 + j\omega L_1$ – комплексный импеданс индуктивности L_1 с активным сопротивлением r_1 ; R_2, R_3 – активные сопротивления цепи комбинированной обратной связи усилителя DA2; $\dot{Z}_4 = R_4 / (1 + j\omega C_4 R_4)$ – комплексный импеданс параллельно соединенных сопротивления R_4 и емкости C_4 ; $n = U_2 / U_1$, U_1 и U_2 – напряжения сигналов возбуждения. Повторитель на усилителе DA1 с резистивным делителем R_A, R_B представляет собой источник напряжения возбуждения U_2 , синфазного входному напряжению U_1 . Отношение n напряжений возбуждения можно представить через отношение сопротивлений делителя в виде

$$n = R_B / (R_A + R_B), \quad (2)$$

тогда входной импеданс $\dot{Z}_{вх}$, выраженный через параметры схемы, будет

$$\dot{Z}_{вх} = (1 + R_B / R_A)(r_1 + j\omega L_1 - R_2 R_3 / R_4 - j\omega C_4 R_2 R_3). \quad (3)$$

Справедливо также, что \dot{Z}_{ex} , представленный через входные параметры, равен

$$\dot{Z}_{ex} = r_{ex} + j\omega L_{ex}, \quad (4)$$

где r_{ex} , L_{ex} – входные активное сопротивление и индуктивность. Тогда из (3) и (4) следуют выражения активной и индуктивной составляющих входного импеданса ЛКОС

$$r_{ex} = (1 + R_B/R_A)(r_1 - R_2R_3/R_4), \quad (5)$$

$$L_{ex} = (1 + R_B/R_A)(L_1 - C_4R_2R_3), \quad (6)$$

показывающие, что в настоящей схеме индуктивность L_1 с активным сопротивлением r_1 преобразуются во входные индуктивность $L_{вх}$ и сопротивление $r_{вх}$ с коэффициентом умножения равным

$$m = (1 + R_B/R_A), \quad (7)$$

который, при $R_B \gg R_A$, может принимать большие значения. Из (5) следует, что умножение активного сопротивления r_1 сопровождается его компенсацией отрицательной активной составляющей входного импеданса ЛКОС равной

$$R_{(-)} = -R_2R_3/R_4, \quad (8)$$

при $|R_{(-)}| \rightarrow r_1$ входное сопротивление $r_{ex} \rightarrow 0$, что указывает на возможность существенного повышения добротности индуктивности.

Из (6) следует, что умножение индуктивности L_1 на коэффициент m происходит одновременно с уменьшением ее начального значения на величину $C_4R_2R_3$, которую будем называть компенсирующей индуктивностью L_k . Выражение (6) представим в виде

$$L_{ex} = m(L_1 - L_k). \quad (9)$$

Допустим, что под воздействием контролируемого параметра индуктивность датчика L_1 изменяется на величину ΔL_1 , тогда входная индуктивность ЛКОС становится

$$L_{ex} + \Delta L_{ex} = m(L_1 + \Delta L_1 - L_k). \quad (10)$$

Из (9), (10) следует, что абсолютное и относительное приращение входной индуктивности составляют

$$\Delta L_{ex} = m\Delta L_1, \quad (11)$$

$$\Delta L_{ex}/L_{ex} = \Delta L_1/(L_1 - L_k), \quad (12)$$

причем, при $L_k \rightarrow L_1$ $\Delta L_{ex}/L_{ex} \rightarrow \infty$. Видно, что абсолютное приращение входной индуктивности определяется коэффициентом умножения m , а относительное приращение – величиной компенсирующей индуктивности L_k . Это показывает, что в ЛКОС возможно масштабирование индуктивности датчика с управлением величины чувствительности к контролируемому параметру.

К входу ЛКОС подключена емкость C_0 , которая с входной индуктивностью L_{ex} образует колебательный контур с резонансной частотой

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{ex}C_0}}. \quad (13)$$

Из (5) следует, что при выполнении условия $r_1 < R_2R_3/R_4$ в контуре присутствует отрицательная активная составляющая входного сопротивления ЛКОС, компенсирующая активные потери в контуре и обеспечивающая стационарные гармонические колебания на резонансной частоте (13), которая с учетом (9) имеет вид

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{m(L_1-L_k)C_0}}. \quad (14)$$

При изменении индуктивности датчика L_1 приращение частоты можно определить в виде

$$\Delta f = \frac{df}{dL_{ex}} \Delta L_{ex} = - \frac{1}{4\pi\sqrt{m(L_1-L_k)C_0}} \frac{\Delta L_1}{(L_1-L_k)}. \quad (15)$$

Из (15) видно, что приращение частоты существенно увеличивается при $L_k \rightarrow L_1$. Последнее обосновывает возможность повышения чувствительности F -метра на основе ЛКОС к изменению индуктивности L_1 параметрического датчика.

Экспериментальная проверка выражений (14) и (15) была проведена на измерительном генераторе (рис.1), собранном на операционных усилителях ICL7650 с индуктивностью $L_1 = 21$ мГн, емкостью $C_0 = 1,106$ мкФ и начальной частотой 460 Гц. На рис. 2 показаны экспериментальные зависимости модуля приращения частоты Δf генератора от приращения индуктивности ΔL_1 датчика при вариации значений компенсирующей индуктивности L_k от 0 до 17,23 мГн. Экспериментальные данные показывают, что зависимости $\Delta f(\Delta L_1)$ линейны; при компенси-

рующей индуктивности $L_k = 0$ (зависимость 5) чувствительность к ΔL_1 минимальная и составляет 7,5 Гц/мГн, при увеличении значения L_k чувствительность возрастает (зависимости 1–4), так при $L_k = 17,23$ мГн (зависимость 1) чувствительность увеличивается в пять раз до 39,2 Гц/мГн. Это подтверждает, что величиной компенсирующей индуктивности L_k , относительно начальной индуктивности датчика L_1 , можно управлять чувствительностью измерительного генератора в пределах условия $L_1 - L_k > 0$.

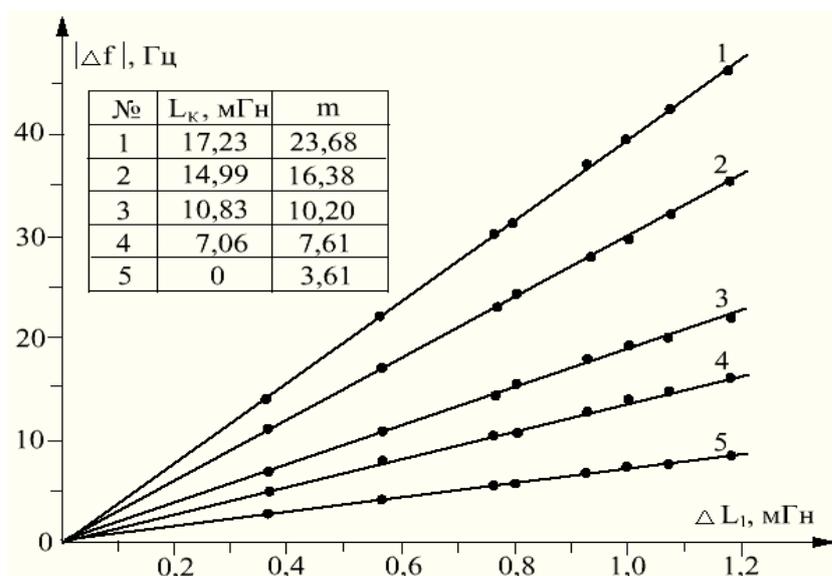


Рисунок 2 – Приращение частоты Δf генератора как функция индуктивности датчика L_1 для разных значений компенсирующей индуктивности L_k

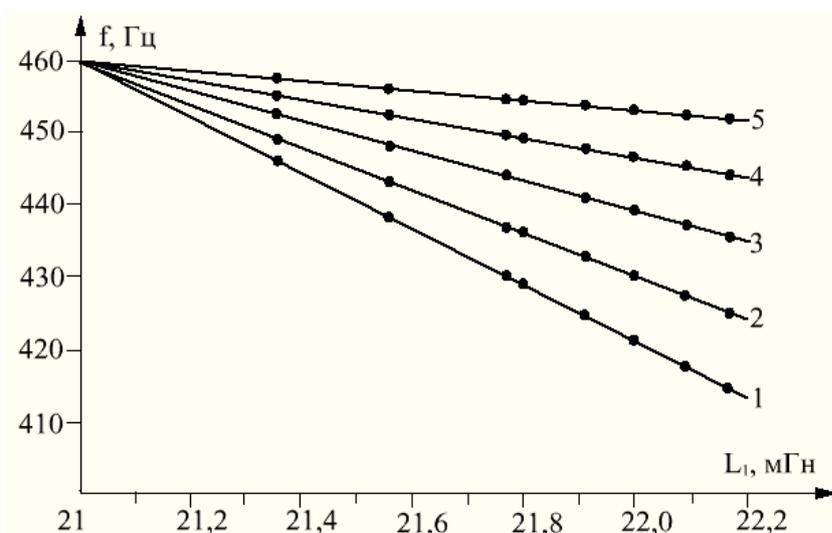


Рисунок 3 – Характеристики преобразования измерительного генератора

Экспериментальное семейство характеристик преобразования (рис.3) при изменении компенсирующей индуктивности от 0 (зависимость 5) до 17,23 мГн (зависимость 1) также подтверждают увеличение крутизны характеристики преобразования при $L_k \rightarrow L_1$.

Расчетные зависимости (14) и (15) достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными, отличие (из-за неидеальности операционных усилителей и погрешности измерительных приборов) не превышает 5%.

Вывод. Проведенные исследования измерительного генератора на основе линейной комбинированной операционной схемы показали следующее:

- компенсация начальной индуктивности датчика с одновременным умножением ее приращения позволяют управлять изменением частоты колебаний измерительного генератора;

- чувствительность изменения частоты измерительного генератора существенно определяется величиной компенсирующей индуктивности;

- использование измерительного генератора на основе линейной комбинированной операционной схемы позволяет повысить чувствительность F -метра к изменению индуктивности параметрического датчика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Измерения в электронике: Справочник [Текст] / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Колесник и др. / Под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.
2. Филановский, И.М. Схемы с преобразователями сопротивления [Текст] / И.М. Филановский, А.Ю. Персианов, В.К. Рыбин. – Л.: Энергия, 1973. – 192 с.
3. Марше, Ж. Операционные усилители и их применение [Текст] / Ж. Марше. – Л.: Энергия, 1974. – 216 с.
4. Твердоступ Н.И. Обобщенная модель преобразователей импеданса [Текст] / Н.И. Твердоступ // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Фізика. Радіоелектроніка. – 2010. – Вип. 17, №2. – С. 103 - 108.