

Н.И. Твердоступ

АКТИВНЫЙ ИНДУКТИВНЫЙ ДАТЧИК НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОПЕРАЦИОННОЙ СХЕМЫ

Аннотация. Исследован входной импеданс линейной комбинированной операционной схемы с индуктивным датчиком в цепи обратной связи усилителя. Разработана схема, в которой реализуется эффект умножения индуктивности датчика с частичной компенсацией ее величины, что позволяет управлять чувствительностью датчика.

Ключевые слова: операционная схема, комбинированная обратная связь, умножитель, импеданс, индуктивность, датчик, чувствительность.

Актуальность. Применение индуктивных датчиков в низкочастотных резонансных устройствах измерения и контроля в ряде случаев ограничивается малыми значениями их собственных индуктивности, добротности и невысокой чувствительностью к контролируемому параметру. Поэтому актуальным является создание устройств, позволяющих увеличивать индуктивность датчика до необходимого значения с одновременным повышением чувствительности контроля.

Анализ исследований. В работах [1, 2, 3] заложены основы синтеза преобразователей импеданса на операционных усилителях, частные схемотехнические решения умножителей индуктивности рассмотрены в [4, 5, 6]. Анализ результатов, полученных в [7], обосновывает целесообразность использования комбинированной операционной схемы для создания умножителей индуктивности.

Постановка задачи. Целью работы является разработка умножителя индуктивности параметрического датчика с регулируемой чувствительностью на основе комбинированной операционной схемы.

Основная часть. Линейная комбинированная операционная схема (ЛКОС) [7] обладает свойством масштабирования импеданса с сохранением знака, что дает возможность на ее основе создавать умножители реактансов. В работе [6] на основе ЛКОС был разработан высокодобротный умножитель индуктивного импеданса, в котором увеличение индуктивности сопровождалось компенсацией ее активно-

го сопротивления, что приводило к повышению добротности. Для создания умножителя индуктивности датчика с высокой чувствительностью к контролируемому параметру следует учесть, что входной импеданс ЛКОС состоит из положительной и отрицательной частей, которые целесообразно использовать следующим образом: положительную часть для умножения реактанса индуктивности, а отрицательную – для компенсации определенной части умноженного реактанса, что должно привести к увеличению чувствительности индуктивного датчика.

В линейной комбинированной операционной схеме (рис.1) с индуктивным импедансом в цепи отрицательной обратной связи характерным является наличие комбинированной обратной связи, а также то, что внешние сигналы возбуждения поступают синфазно на оба входа операционного усилителя. Из выводов к работе [7] следует, что входной импеданс такой схемы равен

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

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; $\dot{Z}_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}$ – 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 .

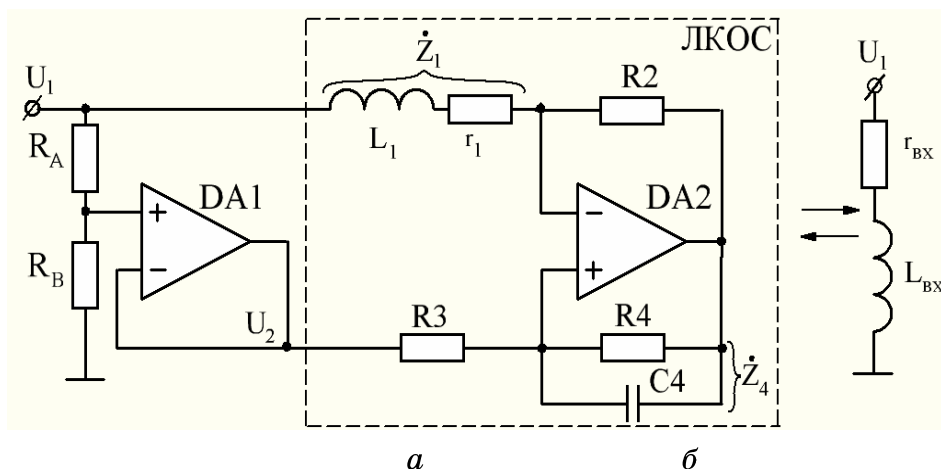


Рисунок 1 – Линейная комбинированная операционная схема (а) и ее эквивалент (б)

Из (1) следует, что отношение n напряжений возбуждения оказывает основное влияние на величину \dot{Z}_{ex} , а именно: при $n \rightarrow 1$ и $U_2 < U_1$ значение входного импеданса \dot{Z}_{ex} существенно увеличивается. Можно считать, что значение n определяет величину коэффициента преобразования индуктивного импеданса \dot{Z}_1 во входной импеданс \dot{Z}_{ex} .

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}_{ex} , 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

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

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

$$r_{вх} = (1 + R_B/R_A)(r_1 - R_2 R_3/R_4), \quad (5)$$

$$L_{вх} = (1 + R_B/R_A)(L_1 - C_4 R_2 R_3), \quad (6)$$

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

$$m = \left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right), \quad (7)$$

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

$$R_{(-)} = -\frac{R_2 R_3}{R_4}. \quad (8)$$

При $|R_{(-)}| \rightarrow r_1$ входное сопротивление $r_{вх} \rightarrow 0$, что указывает на возможность повышения добротности индуктивности. Более детально

о повышении добротности умноженной индуктивности рассмотрено в [6].

Из (6) следует, что умножение индуктивности датчика L_1 на коэффициент m происходит одновременно с уменьшением ее начального значения на величину $C_4 R_2 R_3$, имеющей размерность индуктивности. Эту величину будем называть компенсирующей индуктивностью L_k , она является результатом преобразования емкости C_4 в отрицательную индуктивность с коэффициентом преобразования $R_2 R_3$. Выражение (6) представим в виде

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

Допустим, что под воздействием контролируемого параметра индуктивность датчика L_1 изменится на величину ΔL_1 , тогда входная индуктивность станет

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

Из (9), (10) следует, что абсолютное приращение входной индуктивности составит

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

а относительное приращение

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

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

Умножитель индуктивности по схеме на рис.1 был построен на операционных усилителях МСР604, в качестве умножаемого импеданса использовался датчик с индуктивностью $L_1 = 21,06$ мГн и активным сопротивлением $r_1 = 5,4$ Ом, исследования проводились на частоте 1 кГц при $R_4 = \infty$.

Результаты исследования возможности умножения индуктивного импеданса с компенсацией его начального реактанса показаны на рис. 2 в виде экспериментальных зависимостей (в логарифмическом масштабе) входной индуктивности $L_{\text{вх}}$ (в мГн) от компенсирующей

щей индуктивности L_k при различных коэффициентах умножения m . Видно, что без компенсации начальной реактанса индуктивности L_1 (при $L_k=0$) входная индуктивность $L_{вх}$ в зависимости от коэффициента умножения m изменяется на два порядка и достигает значения 2,12 Гн при $m=119,6$. При увеличении компенсирующей индуктивности L_k входная индуктивность уменьшается от максимальной величины до значений меньших начального L_1 . Эксперимент подтверждает возможность управления величиной входной индуктивности в широких пределах с помощью параметров m и L_k согласно выражению (9).

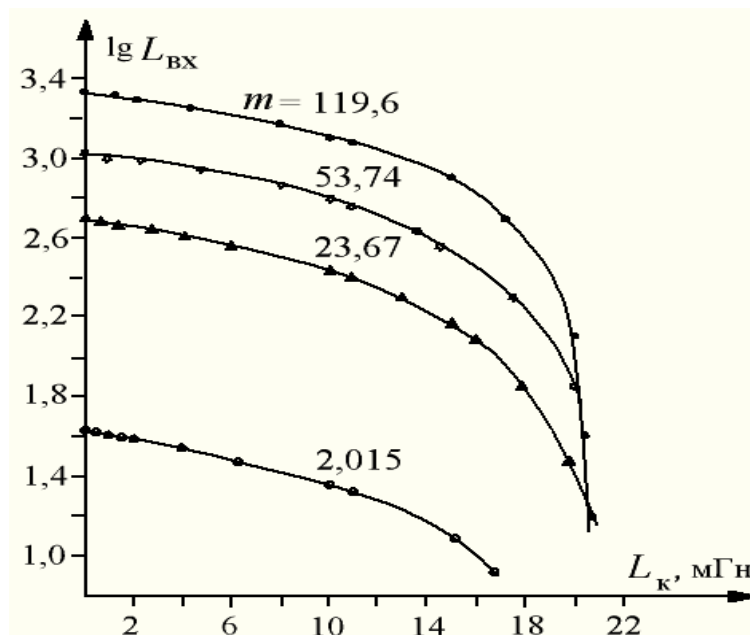


Рисунок 2 – Входная индуктивность $L_{вх}$ как функция компенсирующей L_k для различных коэффициентов умножения m

Увеличение абсолютного приращения входной индуктивности $L_{вх}$ от коэффициента умножения m согласно (11) подтверждается экспериментальными зависимостями на рис. 3. Здесь при изменении индуктивности датчика L_1 на величину $\Delta L_1 = 0,71$ мГн абсолютное приращение входной индуктивности $\Delta L_{вх}$ возрастает на два порядка при $m \geq 100$. Вотличие от (11) экспериментально наблюдается зависимость $\Delta L_{вх}$ от параметра L_k в виде систематического отклонения, имеющего мультипликативный характер. Это отклонение достигает до 20% и объясняется тем, что исходное выражение (1) было получено для идеальной модели операционного усилителя.

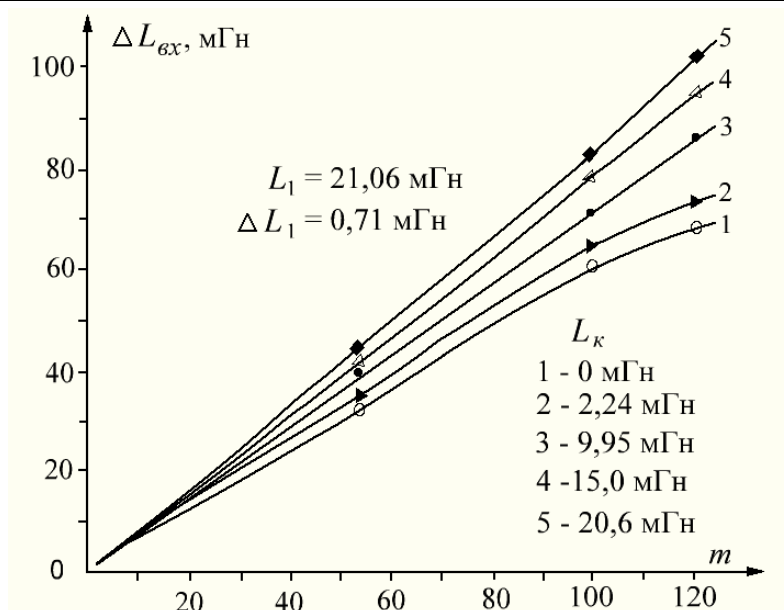


Рисунок 3 – Зависимости приращения входной индуктивности $\Delta L_{вх}$ от коэффициента умножения m для разных значений компенсирующей индуктивности $L_к$

На рис. 4 показаны зависимости относительного приращения (в процентах) $\Delta L_{вх}/L_{вх}$ входной индуктивности от компенсирующей $L_к$.

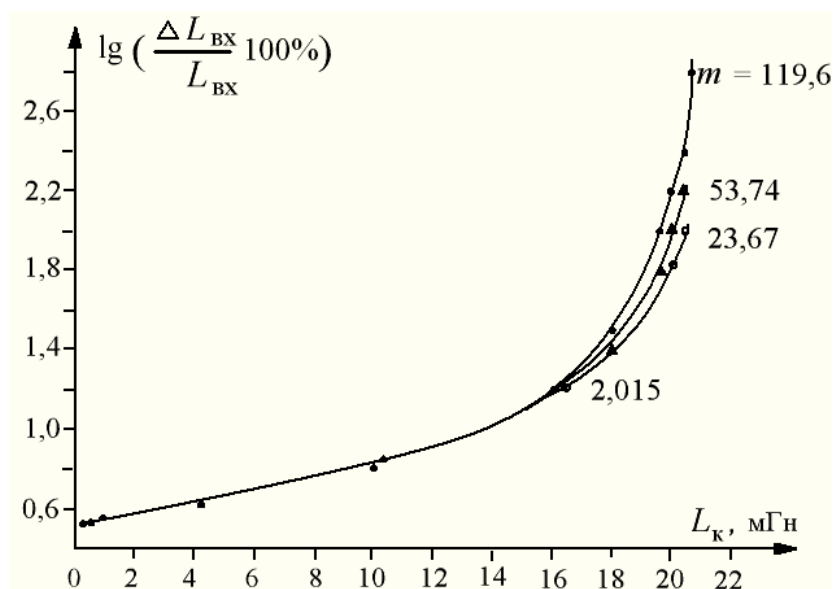


Рисунок 4 – Зависимости относительного приращения $\Delta L_{вх}/L_{вх}$ входной индуктивности от компенсирующей $L_к$ для разных значений коэффициента умножения m

Видно, что значение $L_к$ существенно влияет на относительное приращение, так, при $L_к = 0$ $\Delta L_{вх}/L_{вх} = 3,37\%$, а при возрастании $L_к$ до 20,44 мГн $\Delta L_{вх}/L_{вх}$ увеличивается до 270%. Здесь при $L_к \square 0,5L_1$

наблюдается влияние коэффициента умножения m на $\Delta L_{\text{вх}}/L_{\text{вх}}$, выражающееся в отклонении до 20% экспериментальных данных от расчетных по выражению (12).

Вывод. Исследованиекомбинированной операционной схемы с пассивным индуктивным датчиком в цепи обратной связи позволило установить следующее:

– применение умножителя индуктивности позволяет в широких пределах (в настоящем эксперименте на два порядка) изменять собственную индуктивность активного датчика, что дает возможность использовать его в низкочастотном диапазоне;

– умножение реактанса пассивного датчика увеличивает абсолютное приращение индуктивности активного датчика пропорционально коэффициенту умножения, что свидетельствует об увеличении абсолютной чувствительности контроля;

– наличие цепи частичной компенсации реактанса позволяет увеличивать относительное приращение индуктивности активного датчика почти на два порядка;

– неидеальность использованных операционных усилителей приводит к отклонению до 20% экспериментальных данных от расчетных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филановский И.М., Персианов А.Ю., Рыбин В.К. Схемы с преобразователями сопротивления. – Л.: Энергия, 1973. – 192 с.
2. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. Л.: Энергия, 1974. – 216 с.
3. Кустов О.В., Лундин В.З. Операционные усилители в линейных цепях. – М.: Связь, 1978. – 144 с.
4. А.с. 813696 СССР. Индуктивный двухполюсник/ А.Ф. Гришков, А.Н. Гуляев, И.Г. Дорух, А.В. Маргелов. Бюл. №10, 1981.
5. Войцеховская Е.В., Лищинская Л.Б., Лазарев А.А. Индуктивный негасенсор // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - №3, 2011. – С. 20 – 22.
6. Твердоступ Н.И. Высокодобротный умножитель индуктивности // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 1(72). – Дніпропетровськ, 2012. - С. 100 – 105.
7. Твердоступ Н.И. Обобщенная модель преобразователей импеданса // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Фізика. Радіоелектроніка. – 2010. – Вип. 17, №2. – С. 103 - 108.