

Н.И. Твердоступ

ВЫСОКОДОБРОТНЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ ИНДУКТИВНОСТИ

Аннотация. Проведены исследования входного импеданса линейной комбинированной операционной схемы с индуктивностью в цепи обратной связи усилителя. Разработана схема, в которой реализуется эффект увеличения входного индуктивного импеданса с одновременным ростом его добротности за счет компенсации активного сопротивления умножаемой индуктивности.

Ключевые слова: импеданс, операционная схема, индуктивность, добротность, активное сопротивление, усилитель, обратная связь.

Актуальность. Применение индуктивных датчиков в резонансных измерительных устройствах на низких частотах ограничивается малыми значениями их собственных индуктивности и добротности. Поэтому актуальным является создание устройств, позволяющих увеличивать индуктивность датчика до необходимого значения с одновременным повышением ее добротности.

Анализ исследований. Общим вопросам синтеза преобразователей реактанса посвящены работы [1, 2, 3], 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 высокодобротного умножителя индуктивности 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 реактанса. В работе [6], на основе ЛКОС был разработан умножитель импеданса, в котором увеличение индуктивности сопровождалось пропорциональным увеличением ее активного сопротивления, что приводило к снижению добротности. Для реализаци-

высокодобротного умножителя индуктивности следует учесть, что входной импеданс ЛКОС состоит из положительной и отрицательной частей, которые целесообразно использовать следующим образом: положительную часть для умножения импеданса индуктивности, а отрицательную – для компенсации активной составляющей умноженного импеданса, что должно привести к увеличению добротности входной индуктивности.

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.

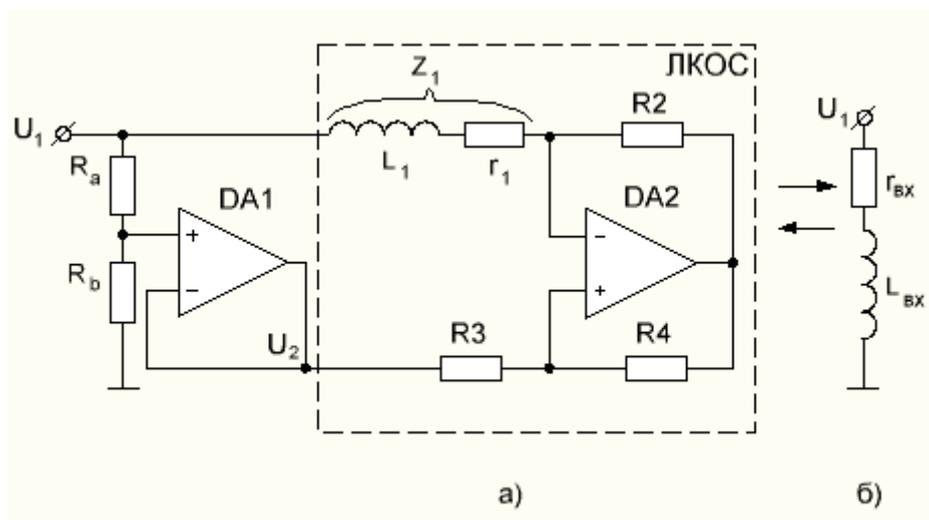


Рисунок 1 – Линейная комбинированная операционная схема (а), ее эквивалент (б)

Из выводов к работе [7] следует, что входной импеданс такой схемы равен

$$\dot{Z}_{\text{вх}} = \frac{\dot{Z}_1 - \frac{R_2 R_3}{R_4}}{1 - n}, \quad (1)$$

где $\dot{Z}_1 = r_1 + j\omega L_1$ – комплексный импеданс индуктивности L_1 с активным сопротивлением r_1 ; R_2 , R_3 , R_4 – активные сопротивления цепи комбинированной обратной связи усилителя DA2; $n = U_2/U_1$, 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 U_1 .

Из (1) следует, что отношение n напряжений возбуждения оказывает основное влияние на величину $\dot{Z}_{\text{вх}}$, а именно: при $n \rightarrow 0$ и $U_2 < U_1$ значение входного импеданса $\dot{Z}_{\text{вх}}$ существенно увеличивается. Можно считать, что значение n определяет величину коэффициента преобразования индуктивного импеданса \dot{Z}_1 во входной импеданс $\dot{Z}_{\text{вх}}$.

Отношение n напряжений возбуждения можно представить через отношение сопротивлений делителя в виде

$$n = \frac{R_b}{R_a + R_b}, \quad (2)$$

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

$$\dot{Z}_{\text{вх}} = \left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) \left(r_1 + j\omega L_1 - \frac{R_2 R_3}{R_4}\right), \quad (3)$$

Справедливо также, что $\dot{Z}_{\text{вх}}$ равен

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

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

$$r_{\text{вх}} = \left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) \left(r_1 - \frac{R_2 R_3}{R_4}\right), \quad (5)$$

$$L_{\text{вх}} = \left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) L_1, \quad (6)$$

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

$$m = 1 + \frac{R_b}{R_a}, \quad (7)$$

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

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

Очевидно, что при $|R_{(-)}| \rightarrow r_1$ входное сопротивление $r_{вх} \rightarrow 0$.

Таким образом, в рассмотренной схеме возможно умножение индуктивности с компенсацией ее активного сопротивления. Это дает возможность реализовать индуктивность большой величины с высокой добротностью.

Умножитель индуктивности по схеме на рис.1 был построен на операционных усилителях с большим коэффициентом усиления дифференциального сигнала. (Последовательно испытывались усилители типов К140УД17, МСР604, ICL7650), в качестве умножаемого импеданса использовалась катушка с индуктивностью $L_1=4,59$ мГн и активным сопротивлением r_1 равным в одном случае 11,36 Ом и в другом – 1,35 Ом. Исследования проводились на частоте 1 кГц.

Результаты исследования возможности умножения индуктивного импеданса показаны на рис.2 в виде экспериментальных зависимостей (в логарифмическом масштабе) входных индуктивности $L_{вх}$, сопротивления $r_{вх}$ и добротности Q (здесь $Q = \omega L_{вх} / r_{вх}$) от отношения n напряжений возбуждения; зависимости 1, 2, 3 получены при отсутствии компенсации сопротивления r_1 (условие $R_2 R_3 / R_4 = 0$), а зависимости 2', 4, 5 — при наличии компенсации до значения $r_1 - R_2 R_3 / R_4 = 0,02$ Ом.

Видно, что без компенсации активного сопротивления катушки (см. зависимости 1, 2 и 3) изменение n от 0 до 0,99 приводит к росту $L_{вх}$ и $r_{вх}$ от начальных значений L_1, r_1 до $L_{вх} = 500$ мГн и $r_{вх} = 2600$ Ом. Это подтверждает наличие в схеме эффекта умножения индуктивности; из-за большого активного сопротивления добротность Q входной индуктивности здесь невелика, около 3,2. При наличии компенсации r_1 добротность Q (зависимость 4) принимает значение 1450 при $n = 0$, которое затем уменьшается с увеличением n , что объясняется ростом входного сопротивления $r_{вх}$ (зависимость 5); зависимость $L_{вх}(n)$ практически остается без изменений (см. 2') следовательно, эффект умножения индуктивности не зависит от величины ком-

пенсации ее активного сопротивления, что подтверждает справедливость выражений (5) и (6).

Результаты исследования возможности повышения добротности умноженной индуктивности путем компенсации ее активного сопротивления показаны на рис.3.

Для индуктивности L_1 с $r_1 = 11,36$ Ом при отсутствии компенсации ($|R_{(-)}| = 0$) активное входное сопротивление $r_{вх} = 570$ Ом, начальная входная добротность $Q = 2$ (см. зависимости 2, 6); при увеличении компенсирующего отрицательного

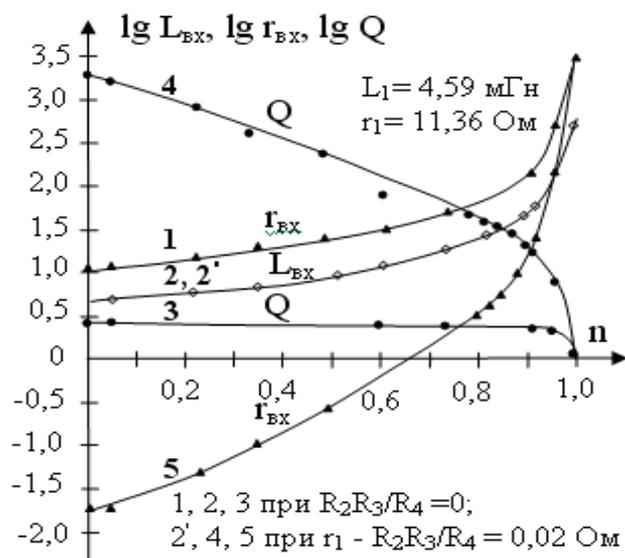


Рисунок 2 – Входные индуктивность $L_{вх}$, сопротивление $r_{вх}$ и добротность Q как функции отношения n напряжений возбуждения

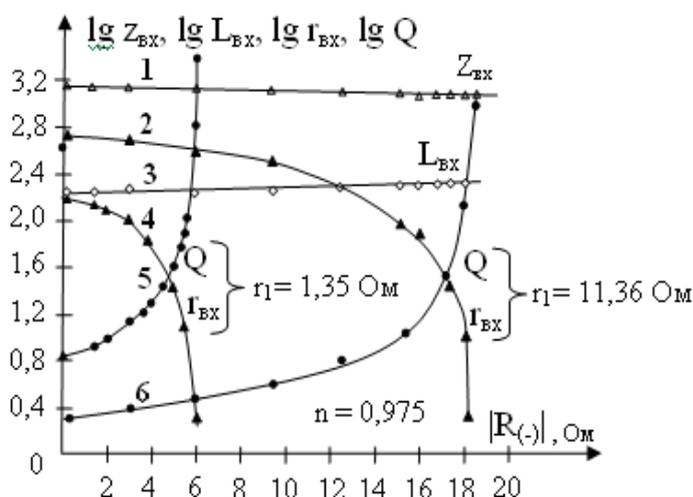


Рисунок 3 – Влияние компенсирующего сопротивления $|R_{(-)}|$ на добротность Q , входной импеданс $Z_{вх}$ и его составляющие $L_{вх}$, $r_{вх}$

$|R_{(-)}|$ до 18,2 Ом $r_{вх}$ уменьшается до 0,3 Ом, входная добротность увеличивается более чем в 500 раз и становится равной 1100. Для индуктивности с меньшим активным сопротивлением $r_1 = 1,35$ Ом (зависимости 4, 5) при увеличении $|R_{(-)}|$ до 6 Ом входная добротность возрастает от 7,4 до 2500 (увеличивается в 330 раз). Компенсация входного сопротивления, при выбранных значениях L_1 и r_1 , незначительно влияет на входной импеданс $Z_{вх}$ схемы и величину умноженной индуктивности $L_{вх}$ (см. зависимости 1, 3).

Экспериментальные исследования показали, что в ЛКОС путем выбора отношений амплитуд напряжений возбуждения $n = 0,99$ получено увеличение входной индуктивности более чем в 100 раз; компенсация активного сопротивления позволила увеличить добротность входной индуктивности более чем в 500 раз на частоте 1 кГц.

Вывод. На основе линейной комбинированной операционной схемы возможна реализация высокодобротных умножителей индуктивности на низких рабочих частотах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпов Е.А., Марунчак Л.В., Рядинских А.С. Синтез нелинейных преобразователей. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
2. Кустов О.В., Лундин В.З. Операционные усилители в линейных цепях. – М.: Связь, 1978. – 144 с.
3. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. Л.: Энергия, 1974. – 216 с.
4. А.с. 813696 СССР Индуктивный двухполюсник/ А.Ф. Гришков, А.Н. Гуляев, И.Г. Дорух, А.В. Маргелов. Бюл. №10, 1981.
5. А.с. 836784 СССР. Преобразователь сопротивления/ С.А.Новосельцева, М.З. Чаповский. Бюл. №21, 1981.
6. Твердоступ Н.И. Умножитель индуктивности // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Выпуск 1(60). – Днепропетровск, 2009. - с.82 – 87.
7. Твердоступ Н.И. О функционально полном наборе входных импедансов комбинированной операционной системы // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Выпуск 6(41). – Днепропетровск, 2005. - с.47 – 53.