

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.

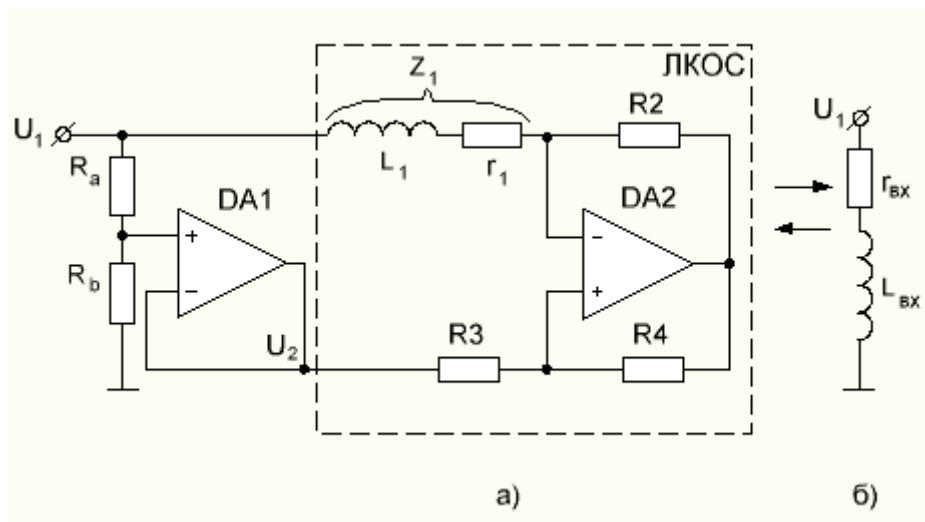


Рисунок 1 – Линейная комбинированная операционная схема (а), ее эквивалент (б)

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

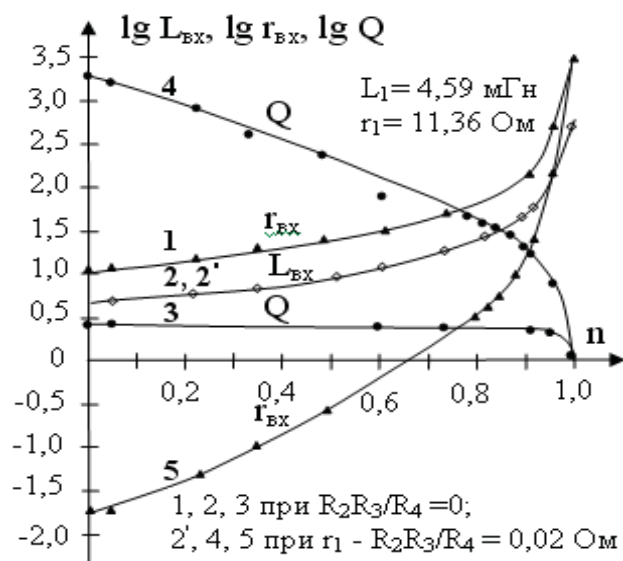


Рисунок 2 – Входные индуктивность  $L_{вх}$ , сопротивление  $r_{вх}$  и добротность  $Q$  как функции отношения  $n$  напряжений возбуждения

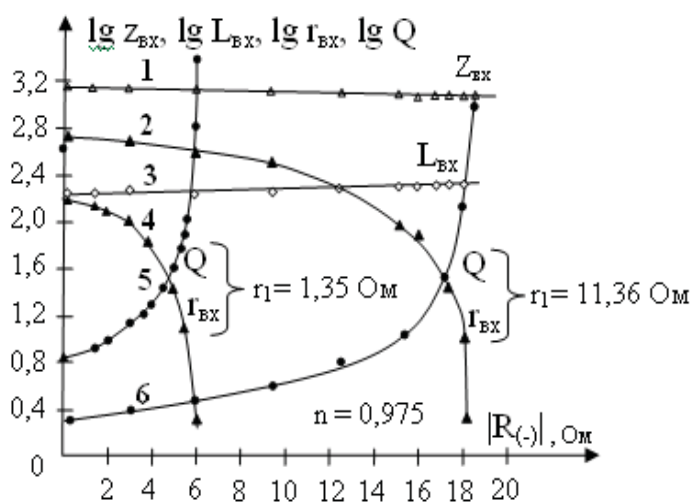


Рисунок 3 – Влияние компенсирующего сопротивления  $|R_{(-)}|$  на добротность  $Q$ , входной импеданс  $Z_{вх}$  и его составляющие  $L_{вх}$ ,  $r_{вх}$

$|R_{(-)}|$  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.