

Н.И. Твердоступ

## ГЕНЕРАТОР ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОПЕРАЦИОННОЙ СХЕМЫ

*Аннотация. Определены условия реализации низкочастотного (0,5-10 кГц) гармонического автогенератора с плавной перестройкой частоты на основе комбинированной операционной схемы, которая обеспечивает существование гармонических колебаний с одновременным умножением индуктивного импеданса резонансного контура, что позволяет использовать катушки с малыми индуктивностью, массой и габаритами.*

*Ключевые слова: гармонический генератор, операционная схема, комбинированная обратная связь, умножитель, импеданс, индуктивность, частота.*

**Актуальность.** Создание низкочастотных гармонических генераторов ограничивается массогабаритными показателями катушки индуктивности, входящей в состав резонансного контура. Известно, что уменьшение рабочей частоты требует увеличения собственной индуктивности контура, а это приводит к росту габаритов и массы катушки. Актуальным для построения низкочастотных генераторов является создание устройств, позволяющих увеличить индуктивность катушки без увеличения ее массогабаритных показателей.

**Анализ исследований.** В работах [1, 2, 3] приведены схемотехнические решения умножителей импеданса, в которых увеличение индуктивности сопровождается пропорциональным увеличением ее активного сопротивления, что вызывает снижение добротности. В [4] показана реализация высокодобротного умножителя индуктивности на основе линейной комбинированной операционной схемы (ЛКОС).

**Постановка задачи.** Целью настоящей работы является создание низкочастотного гармонического генератора с использованием умножителя импеданса катушки, имеющей небольшую собственную индуктивность.

**Основная часть.** В [5] показано, что ЛКОС обладает свойством масштабирования импеданса. Это позволяет на ее основе создавать

умножители импеданса с заданными параметрами. Примером такого умножителя является схема ЛКОС (рис. 1) с индуктивным импедансом  $\dot{Z}_1$  в цепи отрицательной обратной связи. Для этой схемы характерным является наличие комбинированной обратной связи, образованной сопротивлениями  $R_2$  и  $Z_1$  (отрицательная обратная связь) и  $R_3, R_4$  (положительная обратная связь). Особенностью схемы также является то, что внешние сигналы возбуждения  $U_1$  и  $U_2$  поступают синфазно на оба входа операционного усилителя DA2.

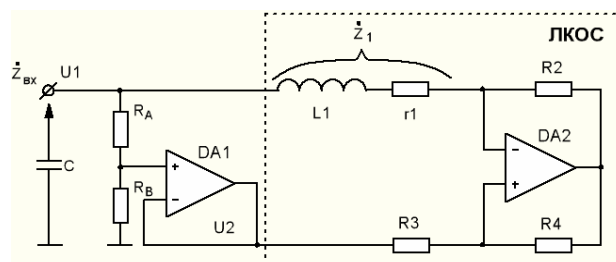


Рисунок 1 – Линейная комбинированная операционная схема как умножитель индуктивного импеданса  $\dot{Z}_1$

Из выводов к работе [5] 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 велителем  $R_A, R_B$  представляет собой источник напряжения возбуждения  $U_2$ , синфазного входному напряжению  $U_1$ .

Из (1) следует, что отношение  $n$  напряжений возбуждения оказывает основное влияние на величину  $\dot{Z}_{\text{вх}}$ , а именно: при  $n \rightarrow 1$  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

$$n = \frac{R_B}{R_A + R_B}, \quad (2)$$

а входной импеданс  $\dot{Z}_{ex}$ , выраженный через параметры схемы, будет

$$\dot{Z}_{ex} = \left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right) \left(r_1 + j\omega L_1 - \frac{R_2 R_3}{R_4}\right). \quad (3)$$

Справедливо также, что  $\dot{Z}_{ex}$ , 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

$$r_{ex} = \left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right) \left(r_1 - \frac{R_2 R_3}{R_4}\right), \quad (5)$$

$$L_{ex} = \left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right) L_1, \quad (6)$$

показывающие, что в настоящей схеме индуктивность  $L_1$  с активным сопротивлением  $r_1$  преобразуются во входные индуктивность  $L_{ex}$  и сопротивление  $r_{ex}$  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  $r_{ex} \rightarrow 0$ .

Таким образом, рассмотренная схема позволяет увеличить значение индуктивности в  $m$  раз с одновременным уменьшением ее активного сопротивления  $r_1$ . Это дает возможность реализовать высокодобротную индуктивность большой величины на основе катушки с малой собственной индуктивностью.

Для построения гармонического генератора ко входу ЛКОС следует подключить емкость  $C$  (рис.1), которая совместно со входной индуктивностью  $L_{ex}$  образует последовательный колебательный кон-

тур; очевидно, что резонансная частота такого контура будет определяться с учетом умноженной, согласно (6), индуктивности  $L_1$ :

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{\left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right) L_1 C}}. \quad (9)$$

Гармонические колебания в схеме возникают при выполнении известных условий для автоколебательных систем с внутренней положительной обратной связью [6], которые для рассматриваемой схемы генератора на основе ЛКОС имеют следующий вид:

$$r_1 < \frac{R_2 R_3}{R_4}, \quad (10)$$

$$\left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right) \frac{R_2 R_3}{R_4} < \frac{L_1}{C r_1}. \quad (11)$$

Здесь выполнение условия (10) гарантирует наличие в колебательном контуре отрицательного активного сопротивления, приводящего к неустойчивости схемы по постоянному току; выражение (11) является условием возникновения в схеме гармонических колебаний; при стационарной амплитуде колебаний неравенство (11) становится равенством.

Особенностью схемы генератора является то, что ЛКОС наряду с обеспечением выполнения условий существования стационарных колебаний также производит умножение импеданса индуктивной ветви колебательного контура. В отличие от известных схем гармонических генераторов в автогенераторе на основе ЛКОС плавное изменение частоты колебаний можно реализовать без изменения значений индуктивности  $L_1$  и емкости  $C$ . Из (9) следует, что регулировку частоты можно производить величиной коэффициента умножения  $m$ , изменяя соотношение между величинами сопротивлений  $R_A$  и  $R_B$ .

Для проведения исследований генератор по схеме на рис.1 был собран на операционном усилителе МСР602. На рис.2 представлены экспериментальные зависимости частоты  $f$  гармонических колебаний от коэффициента умножения  $m$  для трех значений индуктивности  $L_1$  колебательного контура (0,22; 0,732; 2,01 мГн) при емкости контура  $C = 1$  мкФ. Значение коэффициента умножения  $m$  изменяли в пределах от 1 до 360 путем выбора соотношений между сопротивлениями  $R_A$  и  $R_B$  согласно (7). Из зависимостей видно, что увеличение  $m$  позволяет уменьшить частоту колебаний примерно в 19 раз при неизменной ин-

дуктивности  $L_1$  катушки сравнительно малой величины. В рассматриваемой схеме генератора для получения частоты колебаний 560 Гц потребовалась катушка с индуктивностью величиной 0,22 мГн вместо необходимой, согласно расчету, 79 мГн (при отсутствии умножения индуктивности). При замене резисторов  $R_A$  и  $R_B$  на потенциометр в схеме реализуется возможность плавной перестройки частоты в диапазоне 0,5 – 10 кГц.

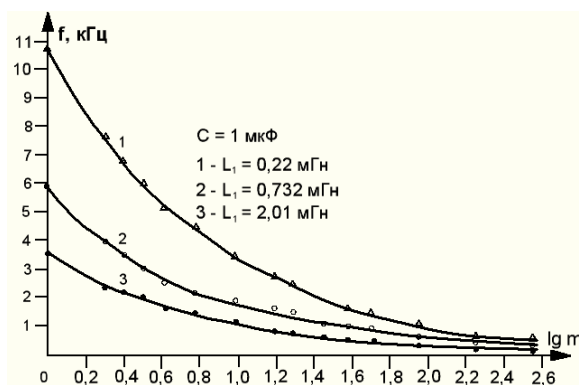


Рисунок 2 – Экспериментальные зависимости частоты колебаний  $f$  автогенератора от коэффициента умножения  $m$  для разных индуктивностей  $L_1$

**Вывод.** Использование линейной комбинированной операционной схемы целесообразно для реализации низкочастотных перестраиваемых гармонических автогенераторов, в которых необходимо использовать катушки с малой индуктивностью и небольшими массой и габаритами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. / Ж. Марше – Л.: Энергия, 1974. – 216 с.
2. А.с. 813696 СССР. Индуктивный двухполюсник / А.Ф. Гришков, А.Н. Гуляев, И.Г.Дорох, А.В. Маргелов. – Бюл. №10, 1981.
3. А.с. 836784 СССР. Преобразователь сопротивления / С.А. Новосельцева, М.З. Чаповский. Бюл. №21, 1981.
4. Твердоступ Н.И. Высокодобротный умножитель индуктивности / Н.И. Твердоступ // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 1 (78). – Дніпропетровськ, 2012. – С. 100 – 105.
5. Твердоступ Н.И. Обобщенная модель преобразователей импеданса / Н.И. Твердоступ // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Фізика. Радіоелектроніка. – 2010. – вип.17, №2. – С.103 – 108.
6. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей. / В.С. Андреев – М.: Радио и связь, 1982. – 280 с.