

УДК 621.3.011.7

**А. А. Лазарев, к. т. н., доц.; К. В. Огородник, к. т. н., доц.; Р. Ю. Чехместрук;
Н. А. Филинюк, д. т. н., проф.**

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕАЛИЗАЦИЙ С-НЕГАТРОНОВ НА КОНВЕРТОРАХ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

В работе рассмотрены четыре основные схемы С-негатронов на конверторах отрицательного сопротивления на операционных усилителях (ОУ). Показано, что при использовании положительной обратной связи по напряжению реализуется активный С-негатрон, по току – пассивный С-негатрон. Наибольшие максимальные рабочие частоты имеют схемы на U-ПИ-конверторах. Преимуществом схем С-негатронов на ОУ является простота, высокая точность, реализация значения отрицательной ёмкости, широкий частотный диапазон работы.

Ключевые слова: С-негатрон, операционный усилитель, конвертор, отрицательное сопротивление.

Введение

Перспективным путем повышения эффективности современных электронных устройств является использование новой элементной базы, в частности С-негатронов – электронных приборов, которые в определенном режиме работы имеют отрицательное значение дифференциальной ёмкости [1, 2].

В основе схемотехнических реализации С-негатронов лежат преобразователи импеданса (ПИ), обеспечивающие необходимый фазовый сдвиг между напряжением и током и преобразования положительной ёмкости (индуктивности) нагрузки в отрицательную входную ёмкость. Преобразователи отрицательного импеданса строят на активном приборе – усилителе, охваченном положительной обратной связью. В качестве усилителя в ПИ могут использоваться различные активные приборы, однако операционные усилители (ОУ) являются универсальными и удобными приборами, позволяющими строить ПИ, параметры которых не зависят от передаточной характеристики активных приборов, а определяются параметрами элементов цепей обратной связи, обеспечивающих схемотехническую простоту реализации, широкий частотный диапазон работы от 0 до сотен МГц, поскольку частота единичного усиления современных высокоскоростных ОУ достигает 1,5 ГГц [3].

Основы построения преобразователей импеданса на операционных усилителях заложены в монографиях Ф. Бенинга [4], Ж. Марше [5], И. М. Филановского и других [6], в них обобщены и систематизированы собственные наработки, а также других ученых. Необходимо заметить, что схемы ПИ на базе ОУ позволяют реализовать как отрицательное активное сопротивление, так и отрицательную ёмкость и отрицательную индуктивность, что будет определяться только типом импеданса нагрузки. Однако математические модели реализованных негатронов при этом будут разными.

Цель работы

Целью работы является определение математических моделей и основных параметров схемотехнических негатронов на ОУ.

Теоретическое обоснование построения С-негатронов на ОУ

Преобразователи отрицательного импеданса строят на активном приборе – усилителе, охваченном положительной обратной связью. При этом при использовании положительной последовательной обратной связи по напряжению или параллельной обратной связи по току

реализуются конверторы отрицательного сопротивления, для которых отрицательный входной импеданс Z_{ex} пропорционален импедансу нагрузки Z_n . При использовании положительной параллельной обратной связи по напряжению или последовательной обратной связи по току инверторы (гираторы) имеют отрицательное сопротивление, для которого отрицательный входной импеданс Z_{ex} обратно пропорционален импедансу нагрузки Z_n [4].

Преобразователи отрицательного импеданса делят на преобразователи импеданса с изменением направления тока (I-Π) и на преобразователи импеданса с изменением знака напряжения (U-ΠИ).

ΠИ на ОУ относят к мостовым ΠИ [4]. Схемы ΠИ на ОУ можно в общем случае представить в таком виде (рис. 1). На рис. 1а – схема, входом которой является неинвертирующий вход ОУ, на рис. 1б – схема, входом которой является инвертирующий вход ОУ.

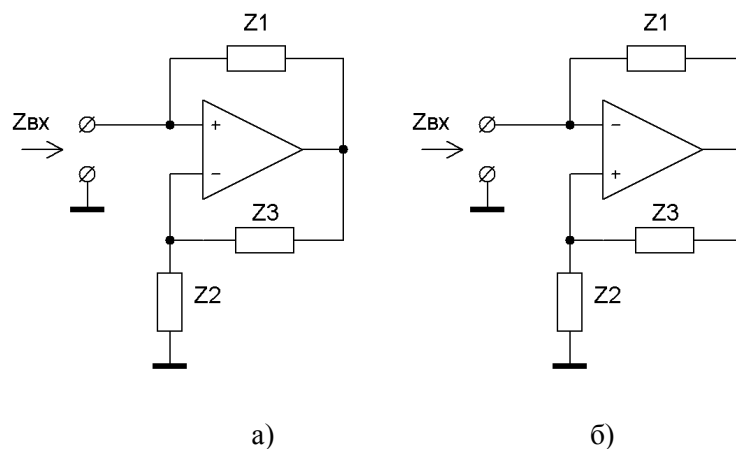


Рис. 1. Схемы ΠИ на ОУ: а) входом является неинвертирующий вход ОУ; б) входом является инвертирующий вход ОУ

Для схем на рис. 1 входной импеданс определяется выражением [7]

$$Z_{ex} = Z2 \cdot Z1 / Z3.$$

Из данного выражения видно, что подставив вместо $Z1$ или $Z2$ в качестве нагрузки положительную ёмкость, на входе получим отрицательную ёмкость. Схема будет работать как конвертор отрицательного сопротивления. Для импеданса $Z3$ схемы работают как инверторы отрицательного сопротивления, поэтому, подставив вместо $Z3$ индуктивность, на входе получим отрицательную ёмкость. Таким образом, общее число возможных схем C-негатрона на базе конвертора отрицательного сопротивления на ОУ составляет 4. Необходимо заметить, что эти схемы позволяют реализовать также R-негатрон и L-негатрон, что будет определяться только типом импеданса нагрузки.

Исследование C-негатрона на конверторе отрицательного сопротивления на ОУ

Обобщенные схемы C-негатрона на конвертере отрицательного сопротивления приведены на рис. 2 [5, 7]. В схеме рис 2а резисторы $R1$, $R2$ образуют цепь отрицательной обратной связи, определяющий коэффициент усиления $K_y = \frac{R1 + R2}{R2}$. Коэффициент конверсии

импеданса определяют выражением $K_x = \frac{1}{1 - K_y} = -\frac{R2}{R1}$. При условии, что $K_y > 1$, т. е. если

$R1 > 0$, коэффициент конверсии является отрицательным $K_x < 0$. Ёмкость C_n является

нагрузкой конвертора и образует кольцо положительной обратной связи по напряжению. Входной импеданс схемы $Z_{ex} = K_{\kappa} Z_{\eta} = \left(-\frac{R2}{R1} \right) \frac{1}{j\omega C_{\eta}}$. Ёмкость на входе конвертора определяют выражением $C_{ex} = \frac{1}{K_{\kappa}} C_{\eta}$. Если $R1 = R2$, то коэффициент усиления $K_y = 2$, коэффициент конверсии $K_{\kappa} = -1$, ёмкость на входе $C_{ex} = -C_{\eta}$. Схема на рис. 2 работает как У-ПИ.

В литературе данная схема получила также название конвертора отрицательного сопротивления с незаземленной нагрузкой [5], а также – схемотехнической реализации отрицательной ёмкости на эффекте Миллера [8, 9].

Эффект Миллера состоит в том, что входная ёмкость инвертирующего усилителя напряжения равна $C_{ex} = C(1 + K)$, где K – коэффициент усиления, C – проходная ёмкость. При использовании неинвертирующего усилителя с коэффициентом усиления $K > 1$ получаем отрицательную ёмкость $C_{ex} = -C(K - 1)$.

В рассмотренной схеме ёмкость C_{η} является проходной ёмкостью неинвертирующего усилителя. Если $K = 2$, то $C_{ex} = -C_{\eta}$.

На рис. 2б приведена схема С-негатрона на I-ПИ [5, 7]. Коэффициент конверсии импеданса определяют выражением $K_{\kappa} = -\frac{R1}{R2}$. Ёмкость на входе $C_{ex} = \frac{1}{K_{\kappa}} C_{\eta} = -\frac{R2}{R1} C_{\eta}$. Если $R1 = R2$, то коэффициент конверсии $K_{\kappa} = -1$, ёмкость на входе $C_{ex} = -C_{\eta}$. В схеме используют положительную обратную связь по току.

Обе рассмотренные выше схемы конверторов на ОУ позволяют реализовать отрицательную ёмкость, однако они не являются равнозначными, поскольку эквивалентные схемы реализованных С-негатронов будут разными, что определяется типом используемой положительной обратной связи. При использовании положительной обратной связи по напряжению реализуется С-негатрон N-типа, который является активным прибором [10, 11], и его эквивалентная схема состоит из последовательно соединенных отрицательной ёмкости $C^{(-)}$ и отрицательного активного сопротивления $R^{(-)}$. При использовании положительной обратной связи по току реализуется С-негатрон S-типа, который является пассивным прибором, и его эквивалентная схема состоит из последовательно соединенных отрицательной ёмкости $C^{(-)}$ и положительного активного сопротивления R . Для разных типов С-негатронов действительны разные условия устойчивости [12].

Для проверки адекватности полученных теоретических положений проведем компьютерное моделирование данных схем. Схема для моделирования С-негатрона на конверторе отрицательного сопротивления на ОУ с положительной обратной связью по напряжению показана на рис. 3.

На рис. 4 показаны графики частотной зависимости активной и реактивной составляющих входного сопротивления и значения ёмкости этой схемы.

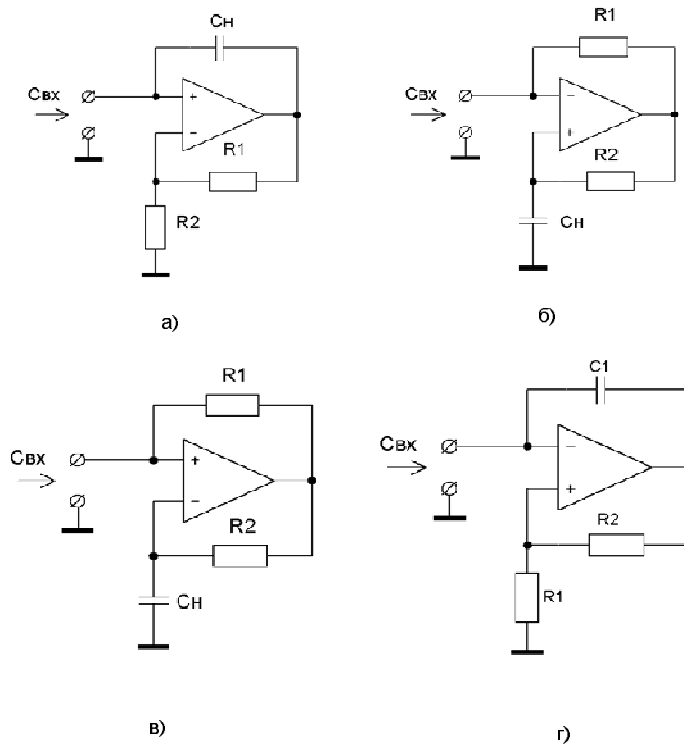


Рис. 2. Схемотехнические С-негатроны на конвертере отрицательного сопротивления на ОУ:
 а) с положительной обратной связью по напряжению; б) с положительной обратной связью по току; в) с положительной обратной связью по напряжению; г) с положительной связью по току на У-ПИ

Из графиков видно, что ёмкость является отрицательной и ее значение на низких частотах составляет -100 нФ. Максимальная частота реализации отрицательной емкости составляет 564 кГц. Под максимальной частотой в данном случае понимаем частоту, на которой значение емкости переходит в положительное значение. Активное сопротивление является отрицательным и составляет на низких частотах $0,318$ Ом. Максимальная частота, с которой активное сопротивление является отрицательным, составляет 705 кГц.

Необходимо заметить, что данное значение отрицательного активного сопротивления возникает вследствие частотной зависимости коэффициента усиления и не учитывает активное сопротивление выводов конденсатора и соединений, которые также будут конвертироваться в отрицательное значение. При условии их учета, значение отрицательного активного сопротивления будет соответственно больше. Так, если при моделировании учесть сопротивление выводов, например 1 Ом, то значение отрицательного активного сопротивления составит $-1,318$ Ом.

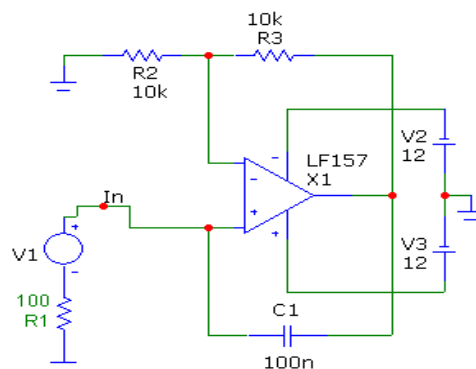


Рис. 3. Электрическая схема С-негатрона на ОУ для моделирования в MicroCap 8.0

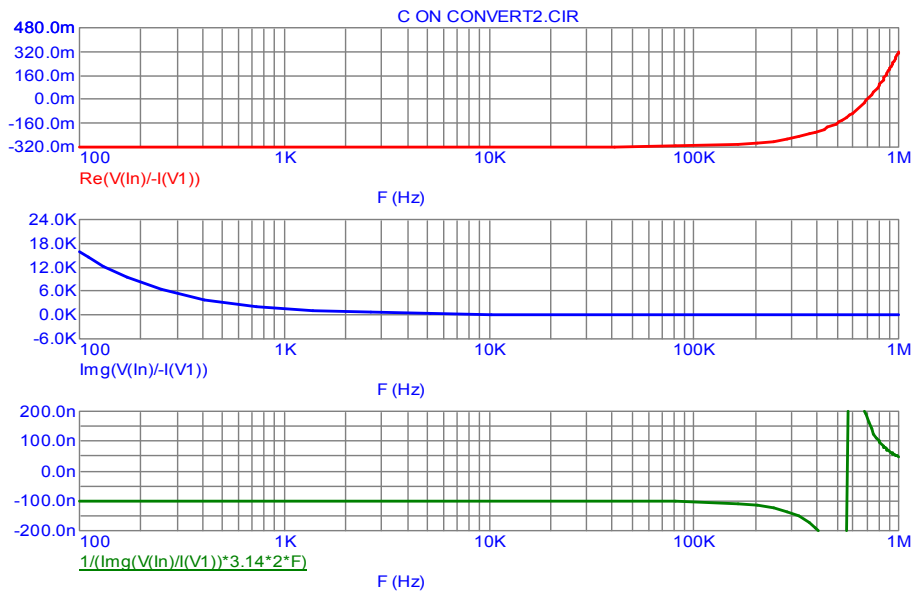


Рис. 4. Частотные зависимости активной и реактивной составляющих входного сопротивления и значения ёмкости С-негатрона, представленного на рис. 3

Для теоретического расчета значение отрицательного сопротивления и описания частотной зависимости отрицательной емкости используем однополкусную аппроксимацию частотной зависимости коэффициента усиления [13]:

$$K_{\kappa} = \frac{K_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_1} K_0},$$

где K_0 – коэффициент усиления схемы на низких частотах, ω_1 – угловая частота единичного усиления.

Входной импеданс схемы определяют выражением:

$$Z_{ex} = \frac{1}{1 - K_y} Z_u = \frac{Z_u}{1 - \frac{K_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_1} K_0}}.$$

Откуда активная составляющая входного импеданса:

$$\text{Re}(Z_{ex}) = -\frac{K_0^2 \omega_1}{C(K_0^2 \omega^2 + K_0^2 \omega_1^2 - 2K_0^2 \omega_1^2 + \omega_1^2)},$$

реактивная составляющая входного импеданса:

$$\text{Im}(Z_{ex}) = -\frac{K_0^2 \omega^2 - K_0^2 \omega_1^2 + \omega_1^2}{\omega C(K_0^2 \omega^2 + K_0^2 \omega_1^2 - 2K_0^2 \omega_1^2 + \omega_1^2)}.$$

На низких частотах $\omega \rightarrow 0$ данные выражения можно упростить и представить в виде:

$$\text{Re}(Z_{ex}) = -\frac{K_0^2}{\omega_1 C (K_0 - 1)^2},$$

$$\text{Im}(Z_{ex}) = \frac{1}{\omega C (K_0 - 1)}.$$

Для операционного усилителя LF157, используемого для моделирования, $f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = 20$ МГц. По полученному выражению рассчитано значение отрицательного активного сопротивления С-негатрона (рис. 3), которое на низких частотах составляет $-318,3$ мОм, что согласуется с результатами моделирования.

Из полученных выражений для частотной зависимости входного импеданса видно, что с увеличением частоты значение отрицательного активного сопротивления и емкости с модулем будут уменьшаться, но определить максимальные частоты для отрицательного активного сопротивления и отрицательной емкости однополюсная аппроксимация коэффициента усиления не позволяет (необходимо использовать аппроксимации более высоких порядков). Из полученных выражений следует, что максимальная частота зависит не только от f_1 , а также и от K_0 и значения емкости нагрузки, что подтверждается результатами моделирования.

Если резисторами R_2 , R_3 в схеме, представленной на рис. 3, обеспечить коэффициент усиления 100, т. е. в 50 раз больше, то по результатам моделирования значения реализованной отрицательной емкости увеличится до $-9,9$ мкФ, а максимальная частота уменьшится до 80 кГц, что примерно в $\sqrt{50}$ раз меньше предыдущего значения. Значение отрицательного активного сопротивления уменьшится до -81 мОм, а максимальная частота уменьшится до 639 кГц. Таким образом, увеличение коэффициента усиления приводит к увеличению значения реализованной отрицательной емкости и к уменьшению максимальной частоты.

Если для схемы на рис. 3 емкость нагрузки уменьшить до $C_1=1$ нФ, то значение реализованной отрицательной емкости будет -1 нФ, а максимальная частота возрастет до 4,95 МГц. Значение отрицательного активного сопротивления уменьшается до $-31,8$ мОм, а максимальная частота возрастает до 6,86 МГц. Т. е. уменьшение емкости нагрузки в 100 раз приводит к увеличению максимальной частоты примерно в 10 раз.

Результаты моделирования показали, что увеличение f_1 в k раз приводит к увеличению максимальной частоты примерно в \sqrt{k} раз. Так, при увеличении f_1 ОУ в 5 раз до значения 100 МГц для схемы на рис. 3 получим максимальную частоту отрицательной ёмкости 1,263 МГц, что в 2,24 раза больше предыдущего значения.

Проведенный анализ работы схемы позволяет определить основные параметры реализованного С-негатрона и частотный диапазон его работы, используя эмпирическое выражение $f_{\max} \approx 1,77 \sqrt{\frac{f_1}{20} \cdot \frac{C_n}{10} \cdot \frac{K_0}{2}}$ [МГц], где f_1 – частота единичного усиления ОУ в МГц, C_n – емкость нагрузки в нФ, K_0 – коэффициент усиления схемы на низких частотах. Так, например, если реализовать отрицательную ёмкость -100 пФ, используя ОУ $f_1 = 1000$ МГц, $K_0 = 2$, $C_n = 100$ пФ, то максимальная частота реализованной отрицательной емкости $f_{\max} \approx 125$ МГц.

Схема для моделирования С-негатрона на конверторе отрицательного сопротивления на ОУ с положительной обратной связью по току показана на рис. 5.

На рис. 6 показаны графики частотной зависимости активной и реактивной составляющих сопротивления и значения емкости этой схемы. Из графиков видно, что емкость является отрицательной и ее значение на низких частотах -100 нФ, что согласуется с полученными выше теоретическими выражениями. Максимальная частота реализации отрицательной емкости равна 52 кГц. На больших частотах реактивное сопротивление начинает увеличиваться и принимать характер индуктивности. Активное сопротивление является положительным и составляет 324 Ом на частоте 10 кГц. Результаты моделирования подтверждают полученные выше теоретические положения.

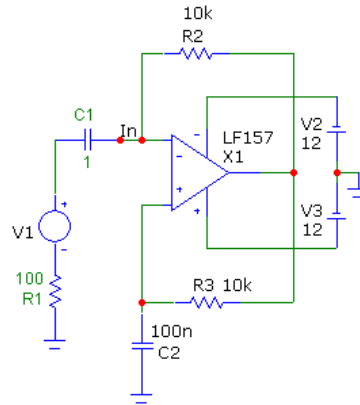


Рис. 5. Схема С-негатрона на ОУ с положительной обратной связью по току для моделирования в MicroCap 8.0

Таким образом, рассмотренная схема реализует пассивный С-негатрон. Максимальная частота для С-негатрона данной схемы на порядок меньше, чем для схемы на рис. 3. Значения сопротивлений в цепях обратной связи влияют на максимальную частоту С-негатрона данной схемы. Так, при уменьшении сопротивлений до $R_2 = R_3 = 100$ схема реализует такую же отрицательную ёмкость -100 нФ, но максимальная частота возрастает до 425 кГц.

На рис. 2в показана схема С-негатрона на конверторе отрицательного сопротивления с положительной связью по напряжению на I-ПИ [7]. Входное сопротивление схемы $Z_{ex} = K_k Z_n = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{j\omega C_n}$, где $C_n = C_1$. Ёмкость на входе $C_{ex} = \frac{C_n}{K_k} = -\frac{R_1}{R_2} C_n$. Если $R_1 = R_2$, то коэффициент конверсии $K_k = -1$, ёмкость на входе $C_{ex} = -C_n$. В схеме используют положительную обратную связь по напряжению.

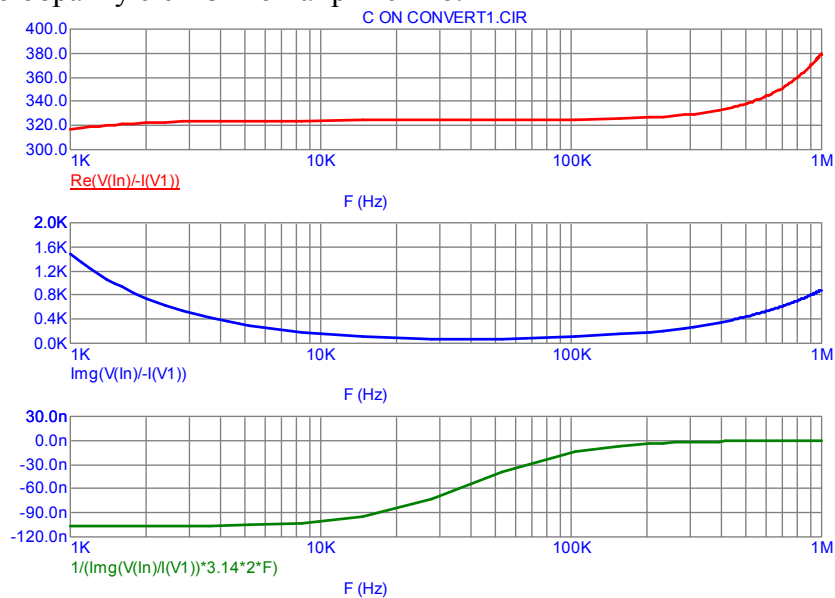


Рис. 6. Частотные зависимости активной и реактивной составляющих сопротивления и значения емкости С-негатрона, представленного на рис. 5

Для моделирования используют схему, показанную на рис. 7.

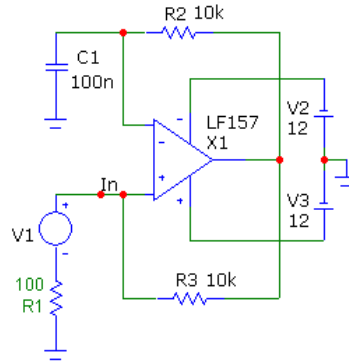


Рис. 7. Электрическая схема С-негатрона на I-ПИ с положительной обратной связью по напряжению

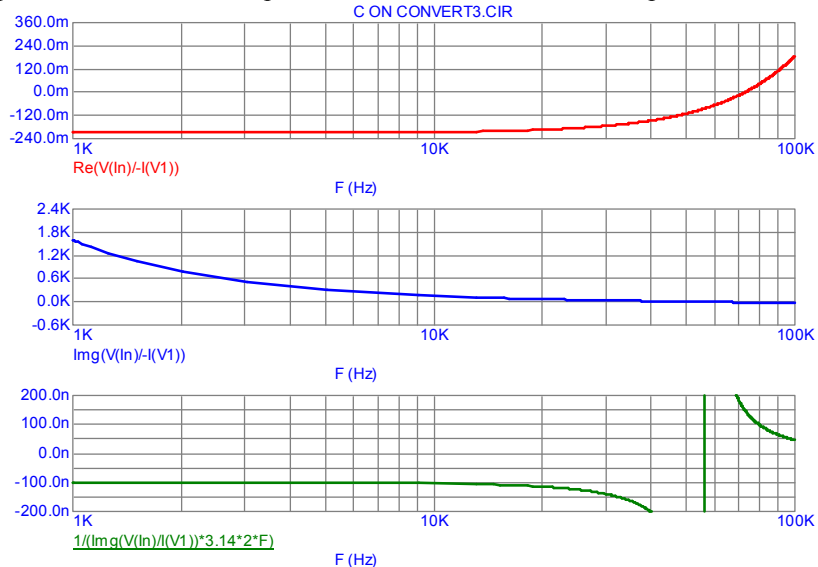


Рис. 8. Частотные зависимости активной и реактивной составляющих входного сопротивления и значения ёмкости С-негатрона, представленного на рис. 7

Из графиков (рис. 8) следует, что схема реализует активный С-негатрон. Значение отрицательного активного сопротивления равно -209 мОм, значение отрицательной ёмкости -100 нФ, максимальная частота отрицательной ёмкости 56 кГц. Частотные характеристики схемы, как и в предыдущем случае, зависят от значений резисторов в цепях обратной связи. Так, при $R_2 = R_3 = 100$ схема реализует отрицательную ёмкость -100 нФ, максимальная частота 399 кГц. Частотные свойства схемы, как и предыдущей, на порядок хуже, чем у схемы на рис. 3.

На рис. 2г показана схема С-негатрона на конверторе отрицательного сопротивления [7] с положительной связью по току на U-ПИ. Коэффициент конверсии импеданса схемы равен $K_k = -\frac{R_1}{R_2}$. Ёмкость на входе $C_{ex} = \frac{C_n}{K_k} = -\frac{R_2}{R_1} C_n$. Если $R_1 = R_2$, то коэффициент конверсии $K_k = -1$, ёмкость на входе $C_{ex} = -C_n$. Схема, используемая для моделирования, показана на рис. 9.

Результаты моделирования схемы на рис. 9 показаны на рис. 10, из них видно, что схема реализует пассивный С-негатрон. Значение отрицательной ёмкости -100 нФ, значение активного сопротивления -318 мОм, максимальная частота отрицательной ёмкости -574 кГц. На больших частотах реактивное сопротивление начинает увеличиваться и принимает характер положительной индуктивности. Частотные свойства схемы аналогичны схеме С-негатрона, реализованной (рис. 3) также на U-ПИ, но с обратной связью по напряжению.

Проведенный анализ работы четырёх схем С-негатронов показал, что лучшей по

частотным свойствам для реализации активного С-негатрона является схема на рис. 2а, для пассивного – на рис. 2г. Схемы на рис. 2б и 2в также реализуют пассивный и активный С-негатроны соответственно, но имеют меньшие рабочие частоты.

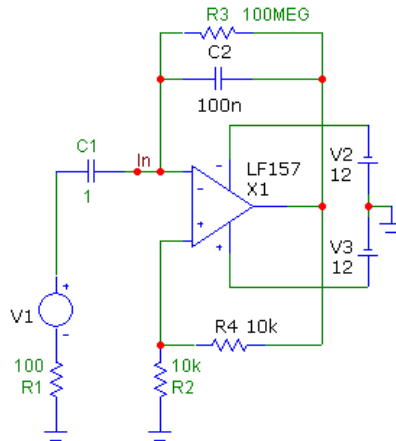


Рис. 9. Схема С-негатрона на ОУ для моделирования в MicroCap

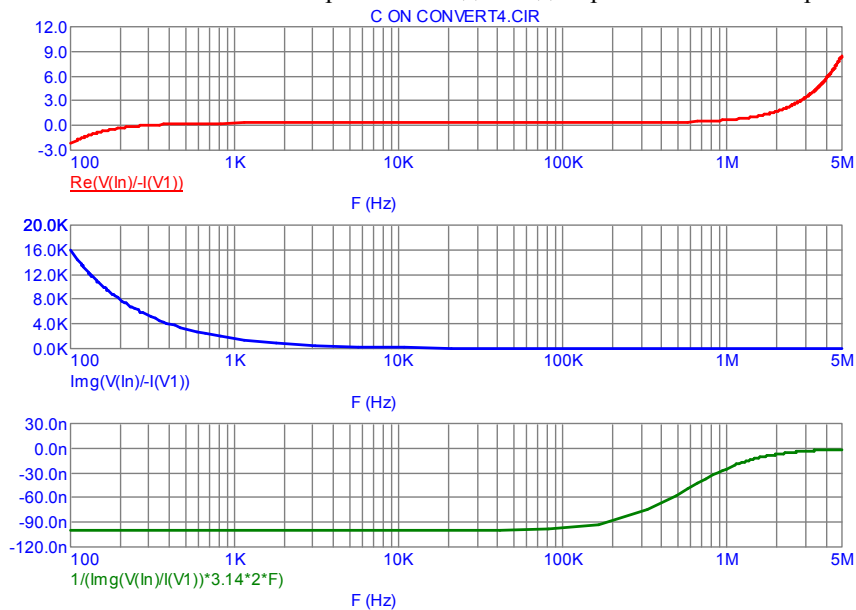


Рис. 10. Частотные зависимости активной и реактивной составляющих входного сопротивления и значения емкости С-негатрона на рис. 9

Выводы

1. В основе схемотехнических С-негатронов на ОУ лежат преобразователи импеданса мостового типа. Для реализации С-негатрона на ОУ существуют четыре основные схемы на конверторах отрицательного сопротивления.

2. Рассмотренные схемы С-негатронов на ОУ работают в диапазоне частот 0,01 Гц ... 100 МГц и позволяют реализовать отрицательную емкость в диапазоне значений $-0,1$ пФ ... -1 Ф. Максимальные рабочие частоты С-негатрона зависят от параметров схемы и составляют около $0,1 f_1$, где f_1 – частота единичного усиления ОУ.

3. Тип положительной обратной связи, который используют в схеме ПИ, определяет тип С-негатрона. Схемы, в которых используют положительную обратную связь по напряжению, реализуют активный С-негатрон (или С-негатрон N-типа), эквивалентная схема которого состоит из последовательно соединенной отрицательной емкости и отрицательного активного сопротивления. Схемы, в которых используют положительную обратную связь по току, реализуют пассивный С-негатрон (или С-негатрон S-типа), эквивалентная схема

которого состоит из последовательно соединенной отрицательной емкости и положительного активного сопротивления. Полученные результаты согласуются с полученными ранее теоретическими выводами, приведёнными в [10, 11].

4. Лучшими по частотным свойствам для реализации активного С-негатрона является схема на рис. 2а на U-ПИ с положительной обратной связью по напряжению, для реализации пассивного С-негатрона – схема на рис. 2г на U-ПИ с положительной обратной связью по току.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Філінюк М. А. Основи негatronіки. Т.1. Теоретичні і фізичні основи негatronіки / М. А. Філінюк. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 456 с.
2. Філінюк М. А. Основи негatronіки. Т.2. Прикладні аспекти негatronіки / М. А. Філінюк. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 306 с.
3. AD8003. Triple, 1.5 GHz Op Amp. Analog Devices, Inc. One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A. – 2008. – 16 p.
4. Бенинг Ф. Отрицательное сопротивление в электронных схемах / Ф. Бенинг. – М.: Сов. радио, 1975. – 286 с.
5. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. Пер. с франц. / Ж. Марше. – Л.: Энергия, 1974. – 216 с.
6. Филановский И. М. Схемы с преоб-разователями сопротивления. / И. М. Филановский, А. Ю. Персианов, В. К. Рыбин. – Л.: Энергия, 1973. – 192 с.
7. Patent USA № 29,080. Int. Cl.2 H03H 7/00, H03H 11/00. Compensated transformer circuit utilizing negative capacitance simulating circuit / F. J. Kiko, USA. Claimer and patent holder F. J. Kiko. – № 426826; published 17.12.76.
8. Säckinger E. Broadband circuits for optical fiber communication / E. Säckinger. – John Wiley and Sons. 2005. – 436 p.
9. Shem-Tov B. “A high-speed CMOS Op-Amp design technique using negative Miller capacitance,” / B. Shem-Tov, M. Kozak, E. G. Friedman // in Proceedings of 2004 11th IEEE International Conference of Electronics, Circuits and Systems. – December 2004. – P. 623 – 626.
10. Філінюк М. А. Дослідження енергетичних властивостей нелінійної ємності / М. А. Філінюк, О. О. Лазарев // Вісник ВПІ. – 2000. – № 4. – С. 94 – 97.
11. Лазарев О. О. Взаємозв'язок типу внутрішнього зворотного зв'язку з типом С-негатрона / О. О. Лазарев, М. А. Філінюк // Вісник ВПІ. – 2009. – № 5. – С. 127 – 133.
12. Філінюк М. А. Дослідження стійкості навантажених С-негатронів / М. А. Філінюк, О. О. Лазарев // Вісник ВПІ. – 2003. – № 3. – С. 90 – 96.
13. Бесонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. / Л. А. Бесонов. – М.: Высшая школа, 1996. – 625 с.

Лазарев Александр Александрович – доцент кафедры проектирования компьютерной и телекоммуникационной аппаратуры.

Огородник Константин Владимирович – доцент кафедры проектирования компьютерной и телекоммуникационной аппаратуры.

Чехместрук Роман Юрьевич – магистрант кафедры проектирования компьютерной и телекоммуникационной аппаратуры.

Філінюк Николай Антонович – заведующий кафедрой проектирования компьютерной и телекоммуникационной аппаратуры.

Винницкий национальный технический университет.