

# ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ UNIVERSITY EDUCATION PROBLEMS

УДК 621.37

DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-4-410-419

## Систематизация подходов к анализу и разработке аналоговых электронных схем

*А.А. Балабанов, А.Л. Переверзев, Д.В. Стрекопытов*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
г. Москва, Россия*

*baa@miee.ru*

Результативность подготовки разработчиков аналоговой аппаратуры может быть существенно повышена за счет установления логически обоснованных связей между предметами, входящими в учебные программы схемотехнического цикла. В настоящее время эти предметы не связаны в единый комплекс. Так, в курсах «Аналоговая схемотехника» при расчетах выходных сопротивлений усилителей практически не применяется теорема об эквивалентных генераторах, изучаемая в курсе «Теоретические основы электротехники». В свою очередь, в последнем недостаточное внимание уделяется расчетам схем, содержащих управляемые источники энергии, в то время как это является основой для проектирования аналоговых узлов на усилительных элементах. В работе предложен ряд альтернативных подходов, позволяющих улучшить наглядность процессов анализа и проектирования аналоговых устройств, сделать их системными и алгоритмическими. Разработанные методики обеспечивают оперативность процессов анализа и проектирования схем, повышают надежность полученных результатов. Эффективность новых подходов подтверждается конкретными примерами.

**Ключевые слова:** теорема об эквивалентном генераторе; метод узловых потенциалов; конверторы сопротивлений; негатроны; импедансный метод анализа

**Для цитирования:** Балабанов А.А., Переверзев А.Л., Стрекопытов Д.В. Систематизация подходов к анализу и разработке аналоговых электронных схем // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 4. – С. 410–419. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-4-410-419

## Systematization of Approaches to the Analysis and Design of Analog Electronic Circuits

A.A. Balabanov, A.L. Pereverzev, D.V. Strekopytov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

baa@miee.ru

**Abstract:** The effectiveness of training the developers of the analog equipment can be significantly enhanced by establishing the logically grounded connections between the subjects, which are a part of the circuitry program. Currently, these items are not connected in a single complex. A number of the alternative approaches, which make it possible to increase the visualization of the analysis and design of the analog devices, making them systemic and algorithmic ones, have been proposed. It has been shown, that the developed methods ensure the efficiency of the analysis and design of the schemes, improve the reliability of the results obtained. The essence of the proposals has been illustrated on concrete examples. The developed complex of approaches permits to improve the efficiency of the processes of analysis and design of the analog circuits, to make them more formalized and visual.

**Keywords:** equivalent generator theorem; nodal potential method; resistance converters; negatrons; analysis impedance method

**For citation:** Balabanov A.A., Pereverzev A.L., Strekopytov D.V. Systematization of approaches to the analysis and design of analog electronic circuits. *Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 4, pp. 410–419. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-4-410-419

**Введение.** В связи с интенсивным внедрением в обработку сигналов цифровых методов наблюдается снижение интереса к аналоговой схемотехнике. Анализ и проектирование аналоговых устройств предполагают наличие знаний из целого комплекса областей: физики, теории электрических цепей, математики, что связано со значительными интеллектуальными затратами.

Разработчики все чаще используют готовые схемы функциональных узлов из обширных литературных и интернет-источников. Анализ спроектированных устройств осуществляется с помощью программ численного моделирования (MultiSim, ADS, ElectronicWorkBench и др.) [1–6]. При их использовании конечные результаты отображаются в численном или графическом виде. Вследствие этого разработчик не знает аналитических выражений, описывающих зависимости анализируемых параметров от конкретных факторов, и лишается возможности применять хорошо разработанный математический аппарат для оптимизации полученного решения и детального изучения явлений и процессов. Принципиальные схемы отдельных функциональных узлов, взятые из справочников, плохо понимаются и не запоминаются. Система подготовки разработчиков базируется на анализе готовых решений, полученных авторами интуитивно [4]. Затем в результате анализа происходит подтверждение заявленных функциональных возможностей схемы. При этом с целью упрощения этого процесса используется аппарат невысокого уровня. Обычно ограничиваются законами Ома и Кирхгофа, особенностями ВАХ элементов, а анализ выражается в длинной последовательности выкладок. При этом разрывается предметно-логическая связь между курсами «Теория электрических цепей» и «Аналоговая схемотехника».

Цель настоящей работы – предложить иные принципы анализа и проектирования аналоговых схем с использованием методов более высокого уровня [7, 8]. При расчетах токов, напряжений, сопротивлений, передаточных функций рационально применять теоремы об эквивалентных источниках, метод узловых потенциалов, метод двух узлов, готовые формульные соотношения для схем с управляемыми источниками и т.д. Уровень компонентной базы можно поднять до таких понятий, как конверторы сопротивлений, гираторы и др. В начале изучения устройств заданного класса (например, интеграторов или преобразователей напряжение-ток) полезно попытаться разработать конкретную схему на основании выполняемой функции или компонентного уравнения, связывающего входные и выходные токи и напряжения.

Эффективность предлагаемых идей подтверждается конкретными схемами.

**Анализ схем на операционных усилителях.** В качестве первого примера рассмотрим базовый функциональный узел аналоговой схемотехники – инвертирующий усилитель (ИУ), реализованный на операционном усилителе (ОУ) [1–4]. Как правило, эту схему рассматривают на основе понятия идеального ОУ. Этот подход не отличается строгостью, так как применение такой упрощенной модели ОУ не обосновано.

С целью эффективного анализа представим данный усилитель в виде усилителя с параллельной отрицательной обратной связью (ОС) по напряжению (ОУ и  $R_2$ ) с подключенным к его входу резистором  $R_1$  (рис.1).

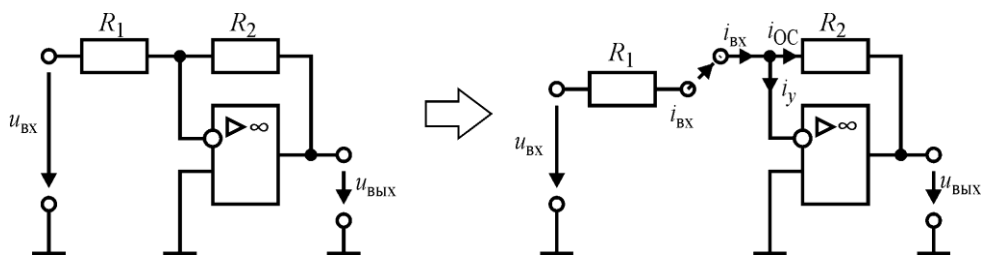


Рис.1. Функциональная декомпозиция инвертирующего усилителя  
Fig.1. Functional decomposition of the inverting amplifier

На рис.2 представлена модель усилителя с параллельной отрицательной ОС по напряжению.

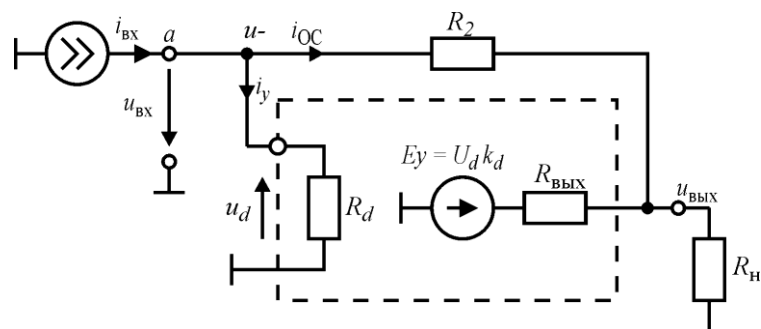


Рис.2. Модель усилителя с параллельной отрицательной ОС по напряжению  
Fig.2. Amplifier model with parallel negative voltage feedback

В качестве активного элемента используется ОУ, имеющий коэффициент усиления дифференциального сигнала  $k_d$ , входное  $R_d$  и выходное  $R_{\text{ВЫХ}}$  сопротивления соответственно. Цепь ОС представлена резистором  $R_2$ . Выходным сигналом этой цепи является

ся выходное напряжение  $u_{\text{ВЫХ}}$ , поэтому ОС по напряжению. Во входной цепи усилителя из входного тока происходит вычитание тока обратной связи:  $i_y = i_{\text{ВХ}} - i_{\text{ОС}}$ . Согласно положениям теории ОС, в этом случае следует ожидать нулевых предельных значений входного и выходного сопротивлений. Следовательно, данный усилитель следует характеризовать не коэффициентом усиления по напряжению, а коэффициентом преобразования входного тока в выходное напряжение:

$$R_{\text{пр}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{i_{\text{ВХ}}}.$$

Этот коэффициент имеет размерность сопротивления. Для его расчета в качестве входной величины в модели выбран входной ток. В пределе к входу этой схемы нельзя подключать идеальный источник ЭДС, так как входное сопротивление схемы стремится к нулю. Анализируемая схема является преобразователем ток-напряжение (условно  $I \rightarrow U$ ).

Расчет модели проведем на основе системы уравнений, сформированной по методу узловых потенциалов [9, 10]:

$$\begin{cases} u_{-}(g_d + g_2) + u_{\text{ВЫХ}}(-g_2) = i_{\text{ВХ}}, \\ u_{-}(-g_2) + u_{\text{ВЫХ}}(g_2 + g_{\text{ВЫХ}} + g_{\text{Н}}) = E_y g_{\text{ВЫХ}}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $g_i = \frac{1}{R_i}$  – проводимость резистора  $R_i$ .

Учитывая,  $E_y = u_d k_d = (0 - u_{-})k_d = -u_{-}k_d$ , получаем выражения для коэффициента преобразования  $R_{\text{пр}}$  и входного сопротивления  $R_{\text{ВХ}}$ :

$$R_{\text{пр}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{i_{\text{ВХ}}} = \frac{(-g_2 + k_d g_{\text{ВЫХ}})}{(-g_2)(-g_2 + k_d g_{\text{ВЫХ}}) - (g_d + g_2)(g_2 + g_{\text{ВЫХ}} + g_{\text{Н}})}, \quad (2)$$

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{g_2 + g_{\text{ВЫХ}} + g_{\text{Н}}}{(g_d + g_2)(g_2 + g_{\text{ВЫХ}} + g_{\text{Н}}) + (-g_2 + k_d g_{\text{ВЫХ}})(-g_2)}. \quad (3)$$

Выходное сопротивление преобразователя  $I \rightarrow U$  рассчитывается на основе модели, представленной на рис.3. Резистор  $R_{\Gamma}$  отражает неидеальность входного генератора тока.

Сопротивление двухполюсника относительно выхода определяется выражением, полученным методом расчета схем с управляемыми источниками:

$$R_{\text{ВЫХ}} = (R + R_d \parallel R_{\Gamma}) \parallel R_{\text{ВЫХ}} \left[ 1 + k_d \cdot \frac{R_d \parallel R_{\Gamma}}{R_d \parallel R_{\Gamma} + R_2} \right]^{-1}. \quad (4)$$

Выражения (2)–(4) для основных параметров преобразователя получены в общем виде. Из них следуют предельные (при  $k_d \rightarrow \infty$ ) выражения  $R_{\text{ВХ}} \rightarrow 0$ ,  $R_{\text{пр}} \rightarrow -R_2$ ,  $R_{\text{ВЫХ}} \rightarrow 0$ .

Таким образом, анализ проведен строго. Показана определяющая роль коэффициента усиления  $k_d$ . Если  $k_d \rightarrow \infty$ , можно не учитывать конечные входные и выходные сопротивления ОУ.

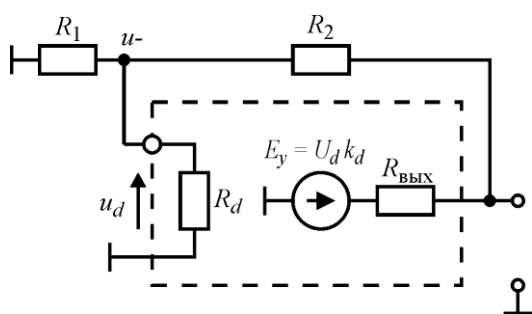


Рис.3. Модель для расчета выходного сопротивления преобразователя  $I \rightarrow U$   
 Fig.3. Model for calculating the output resistance of the converter

С этой точки зрения процесс преобразования сигналов описывается системой соотношений

$$U_{\text{ВХ}} \rightarrow i_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1},$$

$$i_{\text{ВХ}} \rightarrow U_{\text{ВЫХ}} = i_{\text{ВХ}}(-R_2) = U_{\text{ВХ}} \left( -\frac{R_2}{R_1} \right).$$

Таким образом, коэффициент усиления по напряжению ИУ определяется формулой

$$K_{\text{ИУ}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{ВХ}}} = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (5)$$

Входное сопротивление ИУ равно  $R_1$ , так как входное сопротивление преобразователя  $I \rightarrow U$  равно нулю. ИУ можно проанализировать в целом, не выделяя в его структуре идеализированные функциональные элементы.

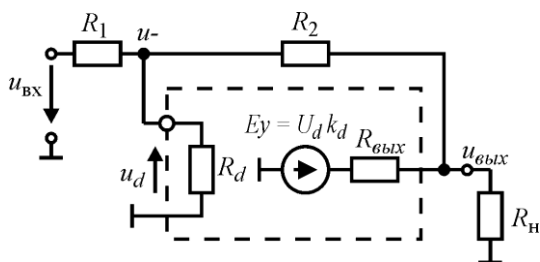


Рис.4. Модель для расчета параметров ИУ  
 Fig.4. Model for calculating the parameters of the inverting amplifier

$I \rightarrow U$ . Последний при замене резистора на конденсатор становится интегратором входного тока с нулевым входным сопротивлением:

$$Z_{\text{пр}}(p) = -\frac{1}{Cp}, \quad u_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{C} \int_0^t i_{\text{ВХ}} d\tau + u_{\text{ВЫХ}}(0). \quad (6)$$

Из (6) с очевидностью следует схема инвертирующего интегратора напряжения.

Схема на рис.5. представляет собой каскадное соединение преобразователя напряжение-ток (резистора  $R$ ) и интегратора тока.

В классическом подходе логика рассуждений обратная. Вначале получают предельные значения параметров преобразователя, из которых следует, что если  $k_d \rightarrow \infty$ , то входное сопротивление ОУ можно принять равным бесконечности, а выходное – нулю.

ИУ формируется подключением к входу преобразователя  $I \rightarrow U$  сопротивления  $R_1$ . Так как входное сопротивление преобразователя равно нулю, то добавленное сопротивление осуществляет функцию преобразования входного напряжения в ток, который затем преобразуется в выходное напряжение.

Расчетная модель представлена на рис.4. Как и в предыдущем случае, расчеты проводятся на основе системы уравнений по методу узловых потенциалов. Результаты анализа и в данном случае совпадают с аналитическими выражениями, полученными при функциональном разложении. Однако первый подход следует признать предпочтительным, так как выявляет параметры часто применяемого функционального узла – преобразователя

Итак, один из базовых узлов достаточно детально проанализирован на основе многофакторной модели ОУ. Учтены конечные величины параметров ОУ: коэффициент усиления дифференциального сигнала  $k_d$ , входное  $R_d$  и выходное  $R_{\text{вых}}$  сопротивления, а также сопротивление нагрузки  $R_n$ . Во многих источниках инвертирующий и неинвертирующий усилители анализируются на основе понятия идеального ОУ. Влияние реальных параметров ОУ затем оценивается в отдельности. В данном случае весь комплекс параметров учтен в одной системе уравнений. Второй порядок системы (1) позволил получить основные формульные соотношения весьма оперативно. Такой подход позволяет глубже понять основополагающее влияние коэффициента усиления  $k_d$  на асимптотические параметры инвертирующего и неинвертирующего усилителей.

**Проектирование преобразователей напряжение-ток на основе конвертора отрицательного сопротивления.** Другой областью приложения предложенной методики являются преобразователи напряжение-ток.

В [3] представлена схема преобразователя напряжение-ток, в которой ОУ работают в инвертирующем включении, т.е. с нулевым синфазным сигналом (рис. 6).

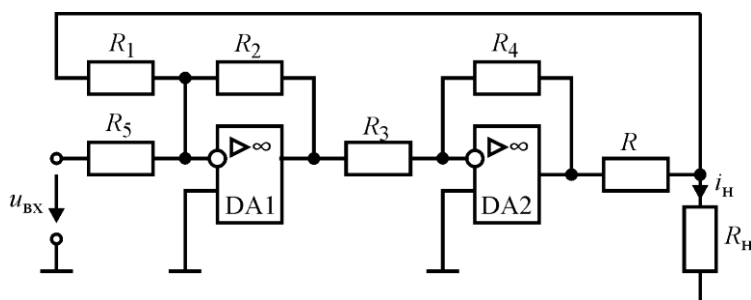


Рис.6. Схема преобразователя напряжение-ток  
Fig.6. Diagram of a voltage-to-current converter

Схема, приведенная на рис.6, дана в готовой форме. На основании анализа системы уравнений, составленной по правилу узлов для идеальных ОУ, получено условие независимости выходного тока от напряжения на нагрузке:  $(R_1 + R)R_3 = R_2R_4$ . Запомнить данную схему и методику расчета довольно сложно. Однако на основании понятия конвертора отрицательного сопротивления схема данного преобразователя может быть получена (или даже синтезирована) формализованным методом.

Отправной точкой проектирования является схема конвертора отрицательного сопротивления на основе двух инвертирующих усилителей (рис.7).

Входное сопротивление  $R_{ab}$  двухполюсника на рис. 7 определяется формулой

$$R_{ab} = R_1 \parallel \frac{R}{1 - \left(-\frac{R_2}{R_1}\right)\left(-\frac{R_4}{R_3}\right)} = R_1 \parallel \frac{R}{1 - \frac{R_2R_4}{R_1R_3}}. \quad (7)$$

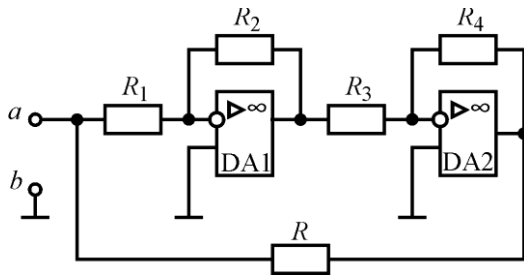


Рис.7. Схема конвертора отрицательного сопротивления на основе двух инвертирующих усилителей  
 Fig.7. Diagram of the negative resistance converter based on two inverting amplifiers

Первое сопротивление в параллельном соединении – входное сопротивление  $R_1$  первого инвертирующего усилителя, второе – сопротивление конвертора на резисторе  $R$  и двух инвертирующих усилителях. Сопротивление  $R_{ab}$  может менять знак. В результате анализа последнего выражения имеем

$$R_{ab} = \begin{cases} > 0, & (R_1 + R)R_3 > R_2R_4, \\ \rightarrow \infty, & (R_1 + R)R_3 = R_2R_4, \\ < 0, & (R_1 + R)R_3 < R_2R_4. \end{cases} \quad (8)$$

Выходное  $R_{\text{вых}}$  сопротивление преобразователя напряжение – ток в идеальном случае должно быть бесконечным. Значит, входные узлы анализируемого двухполюсника при выполнении второго условия в (8) являются выходными узлами проектируемого преобразователя.

Схема на рис. 7 является пассивной эквивалентной схемой для расчета выходного сопротивления преобразователя. В терминах теории электрических цепей эта схема применима для расчета внутреннего сопротивления эквивалентного генератора тока. Подобные схемы получают из полной структуры генератора путем обнуления источников ЭДС [9, 10]. Для активизации преобразователя в схему необходимо внедрить источники ЭДС таким образом, чтобы не изменить эквивалентной схемы для расчета внутреннего сопротивления. Такими точками подключения являются инвертирующие входы ОУ, имеющие нулевые сопротивления относительно общего провода (земли). Поэтому подключение к ним цепей с конечными сопротивлениями не повлияет на выходное сопротивление  $R_{ab}$ . В результате формируется схема, приведенная на рис.8.

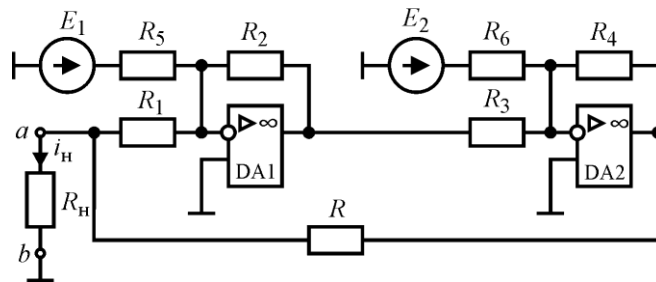


Рис.8. Схема дифференциального преобразователя  $U \rightarrow I$   
 Fig.8. Differential converter circuit

Расчет выходного тока при данном подходе не вызывает затруднений. Согласно (8) выходное сопротивление схемы бесконечно при выполнении условия  $(R_1 + R)R_3 = R_2R_4$ . Это означает, что ток можно рассчитывать при любой величине нагрузки, в том числе и в режиме короткого замыкания. В этом случае точка  $a$  заземляется, обратная связь через нее разрывается, и выражение для тока нагрузки  $i_n$  принимает вид

$$i_n = E_1 \left( -\frac{R_2}{R_5} \right) \left( -\frac{R_4}{R_3} \right) \frac{1}{R} + E_2 \left( -\frac{R_4}{R_6} \right) \frac{1}{R}. \quad (9)$$

При выполнении условий  $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6$  и  $R_1 = R_2 - R$  формула упрощается:

$$i_n = \frac{E_1 - E_2}{R}.$$

Схема на рис.8, являющаяся обобщением преобразователя с одним входным напряжением, представленного в [3], синтезирована на основе конвертора отрицательного сопротивления и метода расчета выходного сопротивления теоремы об эквивалентном генераторе. Процесс проектирования направлен от выхода схемы к входам, в этом его оригинальность. Профессиональные разработчики получают возможность оценить работу известных им схем с другой точки зрения: с позиции компенсации потерь в колебательном контуре и перейти к безындуктивной реализации [7].

**Проектирование конвертора индуктивности.** Конвертор индуктивности может служить примером проектирования схемы на основе компонентного уравнения

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}. \quad (10)$$

Переходя к интегральной форме, получаем

$$i_L = \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt + i_L(0). \quad (11)$$

Выражение (11) предпочтительнее, так как схемы на интеграторах устойчивы. Из него следует, что со стороны выводов конвертор представляет собой преобразователь напряжение-ток. Причем управляющим является напряжение, пропорциональное интегралу напряжения на выводах. Таким образом, функциональная схема конвертора индуктивности представляет собой каскадное соединение усилителя с бесконечным входным сопротивлением, интегратора и преобразователя напряжение-ток, выход которого подключен к входу конвертора [8].

Принципиальная схема конвертора индуктивности представлена на рис.9. Конвертор практически синтезирован, логика его схемотехнического воплощения понятна разработчику.

Для напряжений и токов в схеме на рис.9 справедлива система уравнений, в которой индексы напряжений соответствуют номерам ОУ:

$$\begin{cases} u_1 = u \frac{R_1 + R_2}{R_1}, \\ u_2 = -\frac{1}{R_3 C_3} \int_0^t u_1 dt + u_2(0) = -\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_3 C_3} \int_0^t u dt + u_2(0), \\ i = -\frac{u_2}{R_4} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_3 C_3 R_4} \int_0^t u dt - \frac{u_2(0)}{R_4} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_3 C_3 R_4} \int_0^t u dt + i(0). \end{cases} \quad (12)$$

Последнее равенство в системе (12) имеет структуру компонентного уравнения индуктивности. Тогда величина эквивалентной индуктивности описывается соотношением

$$L_{\text{экв}} = \frac{R_1 R_3 C_3 R_4}{R_1 + R_2}.$$

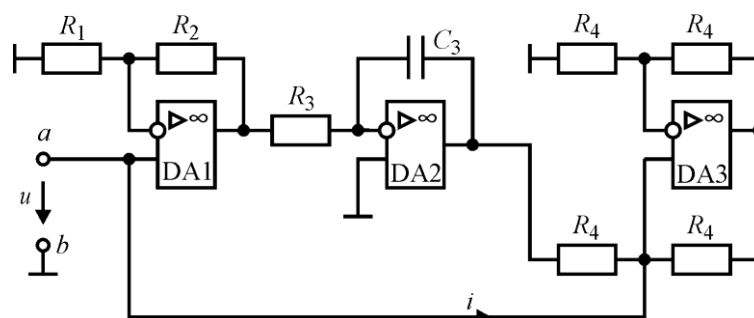


Рис.9. Схема конвертора индуктивности  
Fig.9. Inverter circuit inductance

Рассмотренный пример иллюстрирует случай, когда первичен математический подход, а не качественный или интуитивный.

**Заключение.** Разработанный комплекс подходов позволяет повысить оперативность процессов анализа и проектирования аналоговых схем, сделать их более формализованными и вместе с тем наглядными. Их применение повышает надежность результатов, придает полученным аналитическим выражениям физически понятный смысл. Большинство формульных соотношений студенты получают почти автоматически, не тратя много времени на громоздкие выкладки. Это делает более обоснованными основные положения изучаемых курсов и в итоге повышает эффективность процесса подготовки разработчиков аналоговой аппаратуры.

Описанные методики на протяжении ряда лет используются в курсах лекций «Радиоэлектроника», «Аналоговая схемотехника» и «Импульсная техника» в Национальном исследовательском университете «МИЭТ».

### Литература

1. Sedra A.S., Smith K. Microelectronic circuits. – 5th ed. – New York: Oxford University Press, 2004. – 1283 p.
2. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – 3-е изд. – М.: Додэка-XXI, 2011. – 528 с.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: в 2 т. Т. 2: пер. с нем. – М.: Додэка – XXI, 2008. – 832 с.
4. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: пер. с англ. – 7-е изд. – М.: БИНОМ, 2014. – 704 с.
5. Борисенко А.Л. Схемотехника аналоговых электронных устройств. Функциональные узлы аналоговых устройств: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 453 с.
6. Галочкин В.А. Схемотехника аналоговых и цифровых устройств: учеб. пособие / под ред. С.Н. Елисеева. – Самара: ФГОБУ ВПО ПГУТИ, 2016. – 441с.
7. Балабанов А.А., Кузнецов С.Н. Схемотехника генераторов синусоидальных сигналов: многообразие и взаимосвязь точек зрения // Электронные информационные системы. – 2016. – № 2(9). – С. 23–46.
8. Балабанов А.А., Бирюлина Р.М., Орлова Д.А., Устинов Ю.А. Импедансный метод исследования электронных функциональных узлов // Электронные информационные системы. – 2017. – № 1(12). – С. 31–49.
9. Мурзин Ю.М., Волков Ю.И. Электротехника: учеб. пособие. – СПб.: Питер, 2007. – 443 с.
10. Теория электрических цепей / А. Сапсалева, В. Богданов, В. Чуркин и др. – URL: [https://www.litres.ru/anatoliy-sapsalev/teoriya-elektricheskikh-cepey-32499806/?utm\\_medium=cpc&utm\\_source=google&utm\\_campaign=Tovarnaya1%7C184350330&utm](https://www.litres.ru/anatoliy-sapsalev/teoriya-elektricheskikh-cepey-32499806/?utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_campaign=Tovarnaya1%7C184350330&utm) (дата обращения: 15.05.2018).

Поступила 08.02.2018 г.; принята к публикации 24.04.2018 г.

**Балабанов Анатолий Андреевич** – кандидат технических наук, доцент Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), baa@miee.ru

**Переверзев Алексей Леонидович** – доктор технических наук, доцент, директор Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), pal@olvs.miee.ru

**Стрекопытов Дмитрий Викторович** – аспирант Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), mysteryst@mail.com

### **References**

1. Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith. *Microelectronic circuits. 5th ed.* New York, Oxford, Oxford University Press, 2004. 1283 p.
2. Volovich G.I. *Circuitry of analog and analog-digital electronic devices. 3rd ed.* Moscow, Dodeca-XXI Publ., 2011. 528 p. (in Russian).
3. Titze U., Shenk K. *Semiconductor circuitry: in 2 vol. trans. Vol. 2.* Moscow, Dodeca-XXI Publ., 2008. 832 p. (in Russian).
4. Horowitz P., Hill U. *The art of circuitry. Trans. with English. 7rd ed.* Moscow, Izdatel'stvo BINOM, 2014. 704 p. (in Russian).
5. Borisenko A.L. *Circuitry of analog electronic devices. Functional knots of analog devices.* St. Petersburg, Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta, 2016. 453 p. (in Russian).
6. Galochkin V.A. *Circuitry of analog and digital devices.* Ed. by Dr. of Tech. Sci., Prof. Eliseev S.N. Samara, FSBU VPO PGUTI Publ., 2016. 441 p. (in Russian).
7. Balabanov A.A, Kuznetsov S.N. Circuitry of generators of sinusoidal signals: the diversity and interrelation of points of view. *Electronic Information Systems*, 2016, no. 2 (9), pp. 23–46. (In Russian).
8. Balabanov A.A, Biryulina R.M, Orlova D.A, Ustinov Yu.A. Impedance method of investigation of electronic functional units. *Electronic information systems*, 2017, no. 1 (12), pp. 31–49. (in Russian).
9. Murzin Yu.M., Volkov Yu.I. *Electrical Engineering: Textbook.* St. Petersburg, Peter Publ., 2007. 443 p. (in Russian).
10. Sapsalyov A., Bogdanov V., Churkin V., Kasatkina Ye.G., Algazin E., Davydenko O. *Theory of electrical circuits. E-book*, 2018. 260 p. Available at: [https://www.litres.ru/anatoliy-sapsalev/teoriya-elektricheskikh-cepey-32499806/?utm\\_medium=cpc&utm\\_source=google&utm\\_campaign=Tovarnaya1%7C184350330&utm](https://www.litres.ru/anatoliy-sapsalev/teoriya-elektricheskikh-cepey-32499806/?utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_campaign=Tovarnaya1%7C184350330&utm) (accessed 05.15.2018). (in Russian).

Submitted 08.02.2018; Accepted 24.04.2018.

### **Information about the authors:**

**Anatoly A. Balabanov** – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1), baa@miee.ru

**Alexey L. Pereverzev** – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Director of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1), pal@olvs.miee.ru

**Dmitry V. Strekopytov** – PhD student of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1), mysteryst@mail.com