

5. Malek Z.B.A. Design and construction of a new coaxial high voltage fast impulse current transducer // Research Report № 71586. – Malaysia University of Technology, 2003.
6. Johnson C.M., Palmer P.R. Current measurement using compensated coaxial shunts // Science, Measurement and Technology: IEE Proceedings. – 1994. – V. 141. – № 6. – P. 471–480.
7. Malewski R. Micro-ohm shunts for precise recording of short circuit currents // IEEE transactions on Power Apparatus and Systems. – 1977, March/April. – V. 96. – № 2. – P. 579–585.
8. Векслер М.С., Теплинский А.М. Шунты переменного тока. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 123 с.
9. Silsbee F.B. A study of the inductance of four-terminal resistance standards // NBS Scientific Paper. – 1916, July. – № 281. – P. 375–422.
10. Park J.H. Shunts and inductors for surge-current measurements // Part of Journal of the National Bureau of Standards. – 1947, September. – V. 39. – P. 191–212.

Поступила 18.02.2013 г.

УДК 621.373.1

СИНТЕЗ СТРУКТУР ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ СИММЕТРИИ И ОТРАЖЕНИЯ

Ю.К. Рыбин

Томский политехнический университет

E-mail: rybin@tpu.ru

Обсуждается возможность применения принципов симметрии и отражения при анализе и синтезе генераторов импульсных сигналов. Установлено, что принцип симметрии лучше применять для синтеза колебательных систем на основе четырёхполюсных элементов, а принцип отражения – для синтеза на двухполюсных элементах. Показано, что синтез колебательных систем с помощью принципа симметрии выполняется путём обращения амплитудных характеристик четырёхполюсников. Синтез колебательных систем с помощью принципа отражения выполняется путём зеркального отражения амплитудной характеристики проводимости линейного двухполюсника на амплитудную характеристику проводимости нелинейного двухполюсника. Предлагаемый подход продемонстрирован для синтеза колебательных систем генераторов электрических сигналов, однако он может найти применение при анализе любых циклических процессов изменяющихся скачкообразно.

Ключевые слова:

Принцип симметрии, принцип отражения, обратное преобразование, колебательная система, активный нелинейный элемент, условия баланса амплитуд и баланса фаз.

Key words:

Symmetry principle, principle of reflection, inverse transformation, oscillating system, active nonlinear element, balances of amplitude and phase.

Введение

Проблема анализа, синтеза и проектирования генераторов электрических сигналов несинусоидальной формы заключается в том, что колебательные системы (КС) этих генераторов являются принципиально нелинейными системами, процессы в которых описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. Исследование таких уравнений аналитическими методами невозможно именно в силу их нелинейного характера. Конечно, их можно исследовать численными методами, но для этого уравнения должны быть как минимум известны. Для получения этих уравнений и используются различные методы их синтеза. Одним из эффективных методов синтеза является метод, основанный на принципе симметрии. Принцип симметрии нашёл широкое применение в геометрии, механике, физике [1–5] и т. д. На основе принципа симметрии в [6] проведён синтез генераторов импульсных сигналов на основе четырёхполюсных линейной частотно-задающей цепи (ЛЧЗЦ) и активного нелинейного элемента (АНЭ).

В [7] приведены и доказаны две теоремы, устанавливающие связь амплитудных характеристик ЛЧЗЦ и АНЭ. В этой статье принцип симметрии распространён на КС четырёхполюсными нелинейными элементами с двунаправленной передачей сигналов, а к КС с двухполюсными элементами применён принцип отражения.

Синтез структур генераторов на основе принципа симметрии

КС большинства известных генераторов можно представить в виде блок-схем на рис. 1. Первая из них показывает обычную КС на RC- или LC-цепи и АНЭ типа усилителя с однонаправленной передачей сигнала. Две другие схемы относятся к КС на АНЭ с двунаправленной передачей сигнала на двухполюсном и четырёхполюсном АНЭ.

На рис. 1, а представлена классическая структура генератора на активном нелинейном элементе (АНЭ1) типа источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН) и линейной частотно-задающей цепи (ЛЧЗЦ).

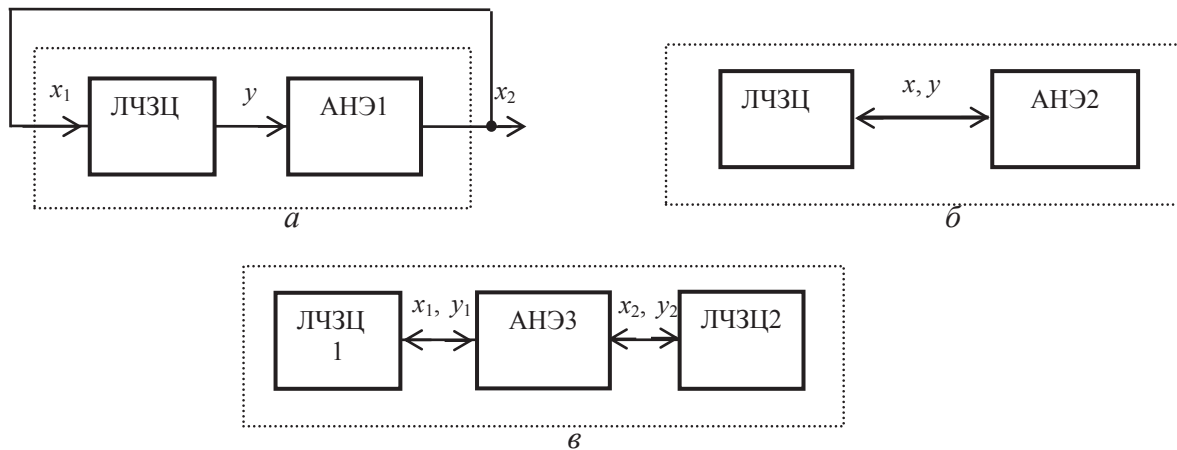


Рис. 1. Блок-схемы КС на активных нелинейных элементах с а) однонаправленной б, в) двунаправленной передачей сигнала

Будем полагать, что формы входного $x_1(t)$ и выходного $y(t)$ сигналов цепи уже известны. Тогда характеристику преобразования ЛЧЗЦ можно описать уравнением $y(x_1)=y$. Она отображает зависимость мгновенных значений выходного сигнала цепи от мгновенных значений входного сигнала. Её будем называть амплитудной характеристикой. Понятно, что амплитудная характеристика зависит от формы сигнала и может быть представлена уравнением в явном или неявном виде, а также может быть изображена на плоскости (x, y) графически. В последнем случае в стационарном режиме периодических колебаний она представляется замкнутой линией. Аналогично амплитудную характеристику АНЭ можно представить другим уравнением $K(y)=x_2$. Тогда, обращая второе уравнение, получим $K^{-1}(x_2)=y$. Учитывая, что в стационарном режиме при формировании периодических колебаний $x_1=x_2=x$, получим соотношение амплитудных характеристик ЛЧЗЦ и АНЭ

$$K^{-1}(x) = \gamma(x). \quad (1)$$

Из (1) следует, что амплитудные характеристики ЛЧЗЦ и АНЭ при формировании колебаний заданной периодической формы должны быть взаимно обратными друг другу. В уравнении (1) сигналы $x(t)$ и $y(t)$ представлены напряжениями, поэтому АНЭ может быть реализован на источниках напряжения управляемых напряжениями (ИНУН). Однако такие же уравнения можно записать и в случае других управляемых источников, например: $K_i^{-1}(x)=\gamma(x)$ — для источников тока управляемых током (ИТУТ), $Z^{-1}(x)=g(x)$ — для источников напряжения управляемых током (ИНУТ) и $G^{-1}(y)=z(y)$ — для источников тока управляемых напряжениями (ИТУН).

В [6] введены и доказаны две теоремы, устанавливающие условия, необходимые для воспроизведения периодических колебаний заданной формы в КС из четырёхполюсных ЛЧЗЦ и АНЭ, включенных в кольцо. Приведём их здесь для справки.

Теорема 1. Для воспроизведения периодических колебаний в колебательной системе, содержащей последовательно соединённые ЛЧЗЦ и АНЭ, необходимо, чтобы комплексный коэффициент передачи

по контуру обратной связи был равен единице на частоте каждой гармоники разложения выходного сигнала в тригонометрический ряд Фурье.

Теорема 2. Для существования в КС колебаний с заданной формой необходимо, чтобы амплитудная характеристика АНЭ была бы обратной амплитудной характеристикой ЛЧЗЦ (без особых точек на амплитудной характеристике).

Для проверки применения этих теорем к КС в работах [7, 8] были исследованы схемы, где показано выполнение принципа симметрии.

Синтез структур колебательных систем на основе принципа отражения

Рассмотрим процессы в структурах КС на рис. 1, б и 1, в, которые выполнены на активном двухполюсном и активном четырёхполюсном элементах с двунаправленной передачей сигнала.

В первой структуре схема содержит только двухполюсные элементы: линейную частотно-зависимую RLC -цепь (ЛЧЗЦ) и активный двухполюсный элемент (АНЭ2) (например туннельный диод, диностор или однопереходный транзистор).

Во второй использованы двухполюсные элементы: линейные частотно-зависимые RLC -цепи (ЛЧЗЦ1 и ЛЧЗЦ2) и активный четырёхполюсный нелинейный элемент (АНЭ3) «отражатель» (например конвертор отрицательного сопротивления (КОС) или гиратор). Отражатель отображает (преобразует) сигналы $x_1(t)$ одной ЛЧЗЦ в сигналы $x_2(t)$ другой ЛЧЗЦ так, чтобы в системе могли выполняться условия воспроизведения периодических колебаний. Рассмотрим эти КС отдельно.

Синтез КС на двухполюсных пассивных и активных нелинейных элементах

Хорошо известно, что в системах на рис. 1, б и 1, в возможны периодические колебательные процессы. Особенностью рассматриваемых систем является то, что к обеим системам невозможно применить критерий стабильности Баркгаузена, т. к. сам Генрих Баркгаузен в известных работах не рассматривал колебательные системы на двухполю-

сных элементах. В них нет четырёхполюсной RLC -цепи. Её роль выполняют одна или две двухполюсные RLC -цепи. Активный нелинейный элемент вместо однонаправленной передачи обладает свойством двунаправленной передачи сигнала. Поэтому нет возможности определить петлевое усиление в системе и приравнять его единице. Тем не менее, попытки применения аналога критерия Баркгаузена известны. Например, предложено [8] в качестве такого критерия использовать равенство нулю суммы сопротивлений или проводимостей ЛЧЗЦ и АНЭ. Однако эти критерии относятся только к линеаризованным колебательным системам при воспроизведении ими почти синусоидальных колебаний. Для колебаний других форм эти условия неизвестны. Более того, даже для известных КС на туннельных диодах неизвестны условия генерирования колебаний импульсной формы.

Попробуем разобраться с вопросом, при каких параметрах или характеристиках двухполюсных пассивной и активной цепей можно создать условия для возбуждения в системах колебаний несинусоидальных форм.

Особенностью любого двухполюсника по сравнению с четырёхполюсником является то, что основной его функцией является проводимость или сопротивление, а не коэффициент передачи, поэтому для их однозначного описания должны быть известны две величины: ток и напряжение. Рассмотрим вначале систему с двухполюсными ЛЧЗЦ и АНЭ2 на рис. 1, б. Введём по аналогии с рассмотренными выше колебательными системами на четырёхполюсниках понятие амплитудной характеристики проводимости двухполюсника. Для двухполюсника это зависимость мгновенного значения тока от мгновенного значения напряжения в каждый момент времени, отображаемая на плоскости (x, y) . При периодическом изменении напряжения и тока эта зависимость представляет собой замкнутую линию,

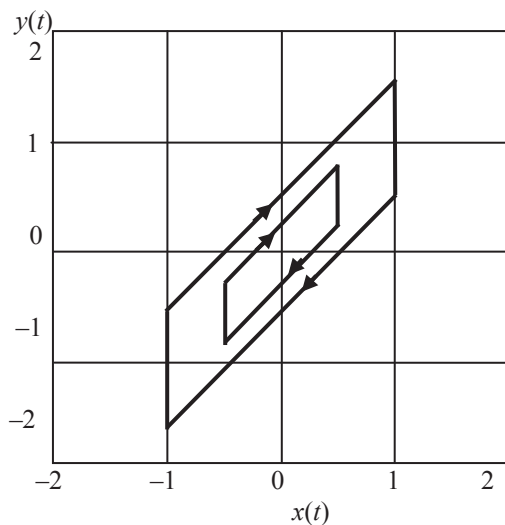
образованную последовательным перемещением изображающей точки по плоскости при изменении времени. Очевидно, что напряжение на выводах двухполюсников в этой КС равны, а токи равны по значению, но противоположны по направлению. Изменение направления тока при одном и том же напряжении указывает на то, что один из двухполюсников в каждый момент является пассивным элементом (потребителем энергии), а другой – активным (источником энергии). Поэтому здесь речь идёт об отражении токов при равных напряжениях. Отсюда следует, что для воспроизведения периодических колебаний необходимо (но не достаточно) при равенстве напряжений на двухполюсниках обеспечить равенство и противоположное направление их токов. Сказанное можно представить формулой, связывающей проводимости двухполюсников

$$G_{\text{АНЭ}}(x) = -G_{\text{ЛЧЗЦ}}(x). \quad (2)$$

Продemonстрируем это на следующем примере.

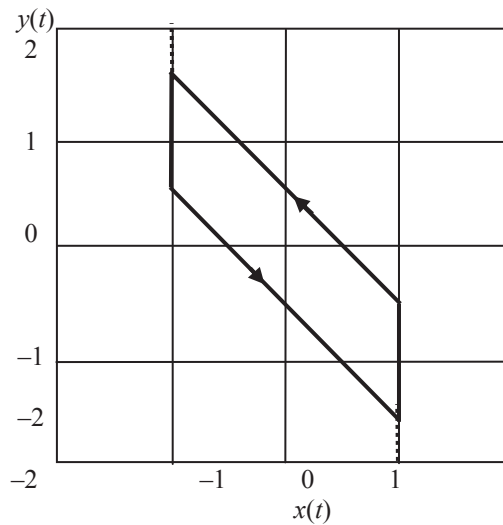
Пусть в качестве двухполюсной линейной цепи используется пассивная RC -цепь из последовательно-включенных резистора и конденсатора. Зададим на двухполюснике прямоугольную форму напряжения $x(t)$, как и в работе [7]. В соответствии с изменениями напряжения и тока на рис. 2, а построена амплитудная характеристика двухполюсника ЛЧЗЦ при разной амплитуде прямоугольного напряжения на нём.

Используя свойство изменения направления тока в двухполюсниках при одном и том же напряжении $x(t)$ на них, характеристику АНЭ легко получить из характеристики ЛЧЗЦ изменением знака тока. На рис. 2, б показана амплитудная характеристика АНЭ2, в которой изменены направления тока при тех же полярностях и значениях напряжений, что и на рис. 2, а. Здесь представлены характеристики проводимости, а не амплитудные характеристики передаточных функций, поэтому по оси ор-



ЛЧЗЦ

а



АНЭ

б

Рис. 2. Графики амплитудных характеристик проводимости двухполюсников: а) пассивного; б) активного

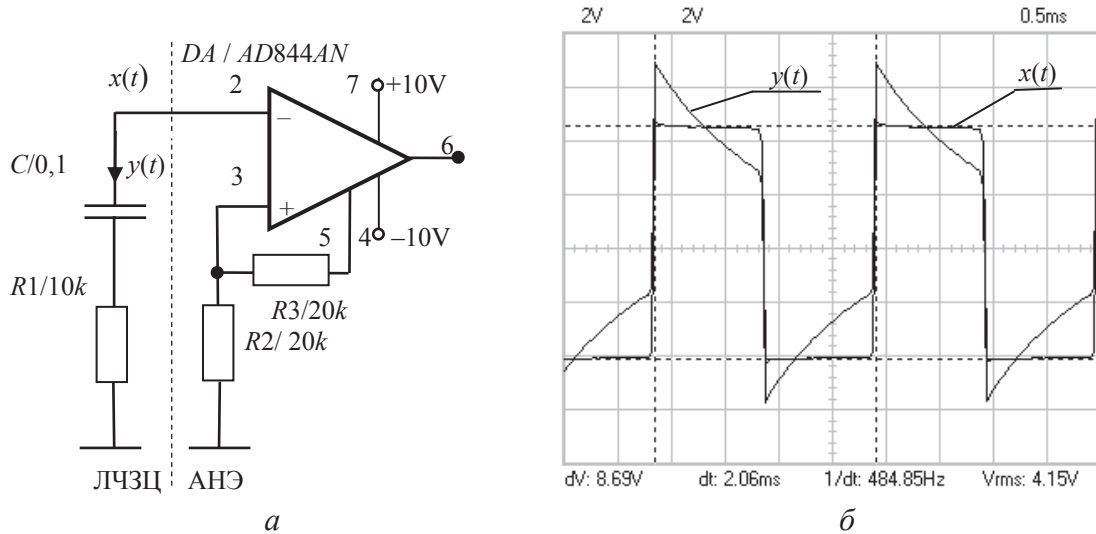


Рис. 3. а) схема генератора; б) осциллограммы напряжения и тока на инвертирующем входе DA типа CFOA (Current feedback operational amplifier)

динат $y(t)$ показаны изменения токов, а по оси абсцисс — изменения напряжений $x(t)$. Видно, что амплитудные характеристики ЛЧЗЦ и АНЭ симметричны относительно вертикальной оси, что соответствует их зеркальному отражению относительно этой оси с изменением направления движения изображающей точки. Поэтому здесь уместно говорить о симметрии и об отражении характеристик. При одинаковых по значению и знаку напряжений $x(t)$ токи в ЛЧЗЦ и АНЭ равны по модулю и противоположны по знаку. Это свойство отражения характерно не только для рассмотренной формы сигнала, но является универсальным свойством амплитудных характеристик проводимости при любой форме сигналов, что даёт основание сформулировать теорему 3.

Теорема 3. Для воспроизведения периодических колебаний заданной формы в КС, состоящей из двухполюсной ЛЧЗЦ и двухполюсного АНЭ, необходимо, чтобы их амплитудные характеристики проводимости (сопротивления) на плоскости были бы отражением относительно оси тока (напряжения).

Для экспериментальной проверки принципа отражения была выбрана схема генератора на рис. 3, а. Эта схема известна и подробно исследована в [9]. Однако здесь она приведена для демонстрации принципа отражения. ЛЧЗЦ здесь выполнена на двухполюснике из последовательно соединённых резистора R и конденсатора C с параметрами $R1=10$ кОм и $C=0,1$ мкФ. Зададим на RC -цепи прямоугольную форму напряжения $x(t)$. В качестве АНЭ в схеме использован двухполюсный элемент на усилителе AD844AN, охваченном обратной связью через $R2$ и $R3$ с токового выхода на неинвертирующий вход. Этот двухполюсник выполняет функции компаратора и обеспечивает необходимые уровни срабатывания и ограничения $x(t)$.

При экспериментальном исследовании схемы на рис. 3, а получены сигналы на рис. 3, б, которые подтверждают положения теоремы 3.

Синтез КС на четырёхполюсных двунаправленных активных нелинейных элементах типа КОС

И, наконец, рассмотрим структуру КС на активном четырёхполюсном элементе с двунаправленной передачей сигнала на конвертере отрицательного сопротивления (КОС). При синтезе КС требуется определить схемы двухполюсников ЛЧЗЦ1 и ЛЧЗЦ2, амплитудную характеристику и схему АНЭ3. Таким образом, и здесь задача синтеза имеет много неизвестных и однозначного её решения не существует. Известной могут быть только формы напряжений на пассивных двухполюсниках, их амплитуды и частоты. Для уменьшения неопределённости можно задать схемы двухполюсников. Тогда неизвестной останется характеристика АНЭ3 и его схема.

В качестве примера для синтеза используем генератор на КОС [10], упрощенная схема которого приведена на рис. 4, а. В этой схеме DA1 и DA2 — это источники тока управляемые напряжениями ИТУН.

В КС при определённых характеристиках элементов возможны периодические автоколебания заданной формы. Эта КС является замкнутой системой, которую легко мысленно разомкнуть. В разомкнутой системе активные элементы стали однонаправленными, а входной и выходной сигналы стали равными. При линеаризованных элементах условие периодических колебаний почти синусоидальной формы в этой системе имеет вид (3)

$$Z_1(\omega)G_{DA1}Z_2(\omega)G_{DA2}=1, \quad (3)$$

где G_{DA1} , G_{DA2} — передаточные проводимости активных элементов DA1 и DA2; $Z_1(\omega)$, $Z_2(\omega)$ — комплексные передаточные сопротивления двухполюсников ЛЧЗЦ1 и ЛЧЗЦ2.

Однако при формировании периодических колебаний несинусоидальной формы передаточные проводимости активных элементов становятся нелинейными и должны описываться не числами,

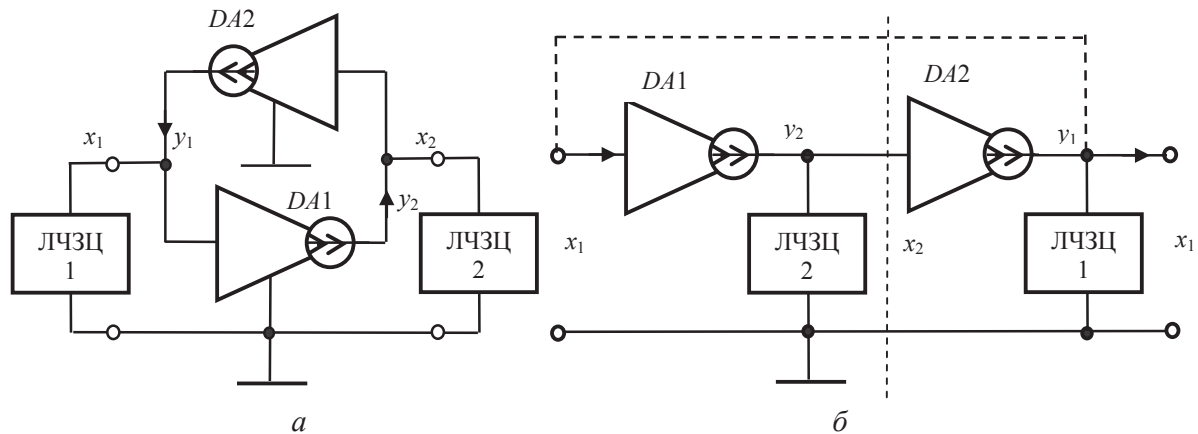


Рис. 4. Упрощенные схемы: а) генератора на КОС; б) его разомкнутый вид

а нелинейными функциями. Применим к активным и пассивным элементам и этой системы введённое выше понятие амплитудных характеристик. Учтём, что напряжение на сопротивлении ЛЧЗЦ1 зависит от выходного тока $DA2$, который, в свою очередь, зависит от напряжения x_2 , тогда можно записать выражения амплитудных характеристик $G_{DA2}(x_2)=y_1$, $G_{DA1}(x_1)=y_2$ и легко понять первое из уравнений (4). Аналогично составлено и второе уравнение (4).

$$Z_1(G_{DA2}(x_2)) = x_1, \quad Z_2(G_{DA1}(x_1)) = x_2, \quad (4)$$

где $G_{DA1}(x_1)$, $G_{DA2}(x_2)$ – передаточные проводимости активных элементов $DA1$ и $DA2$, входящих в состав АНЭЗ; $Z_1(y_1)$, $Z_2(y_2)$ – передаточные сопротивления пассивных ЛЧЗЦ1 и ЛЧЗЦ2 двухполюсников.

Объединяя их, получим уравнения КС в замкнутой форме при нелинейных активных элементах

$$Z_1(G_{DA2}(Z_2(G_{DA1}(x_1)))) = x_1 \\ \text{или } Z_2(G_{DA1}(Z_1(G_{DA2}(x_2)))) = x_2. \quad (5)$$

Полученные условия являются необходимыми для воспроизведения периодических колебаний в КС.

Обратим внимание, что на рис. 4, б также видна симметрия схемы относительно вертикальной пунктирной линии, которая позволяет поделить схему на две части: левую и правую. Поэтому амплитудная характеристика правой части схемы, включающей $DA2$ и ЛЧЗЦ1, должна быть обратной амплитудной характеристике левой части схемы из $DA1$ и ЛЧЗЦ2. Записывая уравнения прямого и обратного преобразователей и учитывая обратный порядок вложения операторов, можно получить уравнения связи амплитудных характеристик сопротивлений двухполюсных элементов и амплитудных характеристик проводимостей передачи четырёхполюсника в каждом направлении

$$G_{DA1}(x_1) = Z_{\text{ЛЧЗЦ2}}^{-1}(x_2) \quad \text{и} \quad G_{DA2}(x_2) = Z_{\text{ЛЧЗЦ1}}^{-1}(x_1). \quad (6)$$

Первое уравнение в (6) устанавливает связь между известной обратной амплитудной характеристикой сопротивления двухполюсника ЛЧЗЦ2 и

неизвестной амплитудной характеристикой проводимости четырёхполюсника $DA1$.

Второе уравнение в (6) определяет амплитудную характеристику проводимости четырёхполюсника $DA2$ через обратную амплитудную характеристику сопротивления двухполюсника ЛЧЗЦ1.

При синтезе амплитудной характеристики АНЭЗ должны быть выбраны схемы двухполюсников ЛЧЗЦ1 и ЛЧЗЦ2 и, конечно, заданы напряжения и определены токи в них. Поэтому формы напряжений и токов в двухполюсниках $x_1(t)$, $y_1(t)$, $x_2(t)$ и $y_2(t)$ предварительно известны и рассчитаны, следовательно, амплитудные характеристики передаточных сопротивлений ЛЧЗЦ1 и ЛЧЗЦ2 предполагаются также известными. Определению подлежат только передаточные проводимости активных элементов $DA1$ и $DA2$. Их можно выразить аналитически на основе (6) или построить графически.

На рис. 5 показана схема генератора для экспериментальной проверки принципа отражения и симметрии и осциллограммы её работы.

На схеме в качестве активного элемента АНЭЗ использованы два усилителя типа $AD844AN$, в качестве двухполюсника ЛЧЗЦ1 использован конденсатор C с ёмкостью $0,1 \mu F$, а в качестве двухполюсника ЛЧЗЦ2 два последовательно соединённых резистора $R1$ и $R2$ с сопротивлением по $20 k$. Осциллограммы напряжений на выходах $x_1(t)$ и $x_2(t)$ с точностью до масштаба соответствуют теоретическим.

На основании уравнений (6) можно сформулировать теорему 4.

Теорема 4. Для воспроизведения периодических колебаний заданной формы в колебательной системе, состоящей из двухполюсных и четырёхполюсного элементов с двунаправленной передачей сигнала, необходимо, чтобы амплитудная характеристика проводимости четырёхполюсного активного элемента в каждом направлении передачи сигнала была бы обратной амплитудной характеристике сопротивления двухполюсного элемента, подключенного к соответствующему токовому выходу.

Аналогичный подход можно применить к синтезу генераторов на основе гираторов.

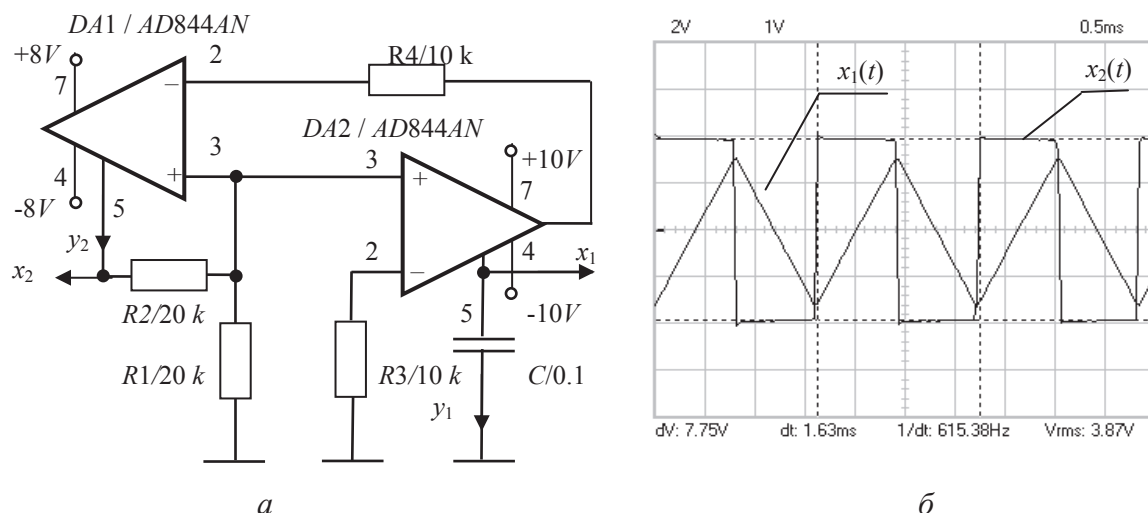


Рис. 5. а) схема генератора на КОС; б) графики напряжений на выходах x_1 и x_2

Выводы

Установлено, что основные структурные схемы генераторов электрических сигналов построены на основе принципов симметрии и отражения. Это даёт возможность синтезировать характеристики элементов схемы по заданным формам периодических колебаний.

При анализе генератора, выполненного по классической схеме с контуром на активном элементе с однонаправленной передачей сигнала и линейной частотнозадающей цепи, установлено, что при мысленном разрыве контура обратной связи в некотором промежуточном узле этот промежуточный узел системы может служить осью симметрии, которая поделит её на две части: левую и правую. Поэтому при равенстве входного сигнала левой части и выходного сигнала правой части от промежуточного узла их параметры или характеристики оказываются взаимно обратными друг другу.

Для генераторов на двухполюсных активных и пассивных элементах получено условие, когда амплитудные характеристики проводимостей (сопротивлений) двухполюсников согласно принципу отражения должны быть симметричными относительно токов (напряжений).

Амплитудная характеристика проводимости передачи активного элемента в генераторах на активном четырёхполюсном элементе с двунаправленной передачей энергии типа конвертора отрицательного сопротивления должна быть обратной амплитудной характеристике проводимости пассивного двухполюсника, подсоединённого к соответствующему выходу активного элемента.

Формулы (1), (2) и (5) представляют новые общие критерии Баркгаузена для колебательных систем генераторов на однонаправленных и двунаправленных четырёхполюсных, а также и двухполюсных активных элементах при воспроизведении колебаний не только синусоидальной, но и другой заданной формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Weyl H. Symmetry. – Princeton, New Jersey: University Press Princeton, 1952. – 168 p.
2. Wigner E. Symmetries and Reflections. – Indiana: Indiana University Press, 1967. – 280 p.
3. Рыбин Ю.К. Формализованные методы проектирования структур измерительных преобразователей на основе принципа симметрии // ИИС-89: Труды Всесоюзной научно-техн. конф. – Ульяновск, 1989. – Т. 2. – С. 239.
4. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
5. Туз Ю.М. Структурные методы повышения точности измерительных устройств. – Киев: Вища школа, 1976. – 256 с.
6. Rybin Yu.K. Barkhausen Criterion for Pulse Oscillators // International Journal of Electronics. – 2012. – V. 99. – № 11. – С. 1547–1556.
7. Рыбин Ю.К. Условия воспроизведения в генераторах периодических колебаний заданной формы // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 136–140.
8. Rybin Yu.K. Electronic Devices for Analog Signal Processing. – Heidelberg; London; New York; Dordrecht: Springer, 2011. – 257 p.
9. Abuelma'atti M.T., Al-Shahrani S.M. New CFOA-based triangular/square wave generator // International Journal of Electronics. – 1998. – № 84. – P. 583–588.
10. Филановский И.М., Персианов А.Ю., Рыбин В.К. Схемы с преобразователями сопротивлений. – М.: Энергия, 1973. – 191 с.

Поступила 05.03.2013 г.