УДК 621.375:621.382

В.А. Рыжов, А.В. Смуров

Использование условий инвариантности схемных функций для синтеза активных цепей

Использование свойств инвариантности при синтезе активных цепей широко применяется в схемотехнике. Наибольшее распространение данный способ приобрел в цепях с операционными усилителями. В работе представлено несколько реализаций корректоров и гармонических генераторов, которые по ряду свойств расширяют возможности разработчика радиоэлектронных средств.

Ключевые слова: многополюсный операционный усилитель, свойства инвариантности, модели активных цепей, регулируемые гармонические генераторы.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-55-58

Свойства инвариантности схемных функций активных цепей позволяют создавать перспективные модели и технические решения, обеспечивающие уникальные характеристики. Использование данного метода позволило разработать специализированные схемные реализации, которые могут быть использованы в современной схемотехнике и радиотехнике. Несмотря на достаточно глубокие исследования в этом направлении, и в настоящее время данная тема является актуальной [1–3]. В работе представлены несколько полезных моделей, которые обладают принципиально новыми возможностями.

Инвариантность рассматривается как свойство цепей, в которых схемные функции определенного вида не зависят от ряда параметров (элементов или многополюсников), входящих в общую схему активной цепи. К основному критерию обеспечения инвариантности относят предельные параметры активных элементов. К ним относят коэффициенты передачи многополюсных операционных усилителей по напряжению MOYU или току MOYI, входные или выходные сопротивления усилителей. Как правило, коэффициенты усиления принимаются за бесконечные значения.

Для общности результатов рассмотрим модель цепи с МОУ, которая представлена на рис. 1.

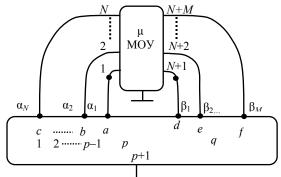


Рис. 1. Общая схема активной цепи с многополюсным операционным усилителем с коэффициентом передачи µ

Выходные токи МОУI и напряжения МОУU в общем случае не определены и зависят от параметров внешней цепи, к которой подключен МОУ. Коэффициенты α_i , β_i (i=1, 2, ..., N; j=N+1, N+2,

..., N+M) в принципе могут иметь различную физическую интерпретацию. В простейшем случае они могут учитывать знак преобразования в суммах либо принимать значение ноль, что соответствует отсутствию входной или выходной переменной (отсутствие входного или выходного узла). В данной работе рассматривается цепь, в которой, пассивная подсхема разбита на два многополюсника A и D. От характера соединения последних с МОУ возникает несколько свойств инвариантности.

Предположим, что MOУ обладает бесконечным коэффициентом преобразования — усиления ($\mu \rightarrow \infty$), тогда для схемы, представленной на рис. 2, параметры дополнительного многополюсника D не войдут в выражения для передаточных функций.

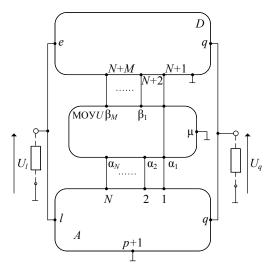


Рис. 2. Схема МОУ с основным – A и D – дополнительным многополюсниками

Действительно, по формуле Мезона [4] для направленных графов можно записать:

$$K_{lq} = \frac{K_{lq}^{A} + K_{lq}^{D} + \sum_{i=1}^{N} K_{li} + \mu \times \sum_{i=1}^{N} \alpha_{i} K_{li}^{A} \times \sum_{j=1}^{M} \beta_{j} K_{(N+j)q}^{D}}{1 - \sum_{i=1}^{N} K_{qi}^{A} - \mu \times \sum_{i=1}^{N} \alpha_{i} K_{qi}^{A} \times \sum_{j=1}^{M} \beta_{j} K_{(N+j)q}^{D}};$$

$$K_{ql} = \frac{K_{ql}^{A} + K_{ql}^{D} + \sum_{i=1}^{N} K_{qi} + \mu \times \sum_{i=1}^{N} \alpha_{i} K_{qi}^{A} \times \sum_{j=1}^{M} \beta_{j} K_{(N+j)l}^{D}}{1 - \sum_{i=1}^{N} K_{li}^{A} - \mu \times \sum_{i=1}^{N} \alpha_{i} K_{li}^{A} \times \sum_{j=1}^{M} \beta_{j} K_{(N+j)l}^{D}}.$$

При $\mu \rightarrow \infty$ получаем:

$$K_{lq} = -\frac{\sum_{i=1}^{N} \alpha_{i} K_{li}^{A}}{\sum_{i=1}^{N} \alpha_{i} K_{qi}^{A}}; \quad K_{ql} = -\frac{\sum_{i=1}^{N} \alpha_{i} K_{qi}^{A}}{\sum_{i=1}^{N} \alpha_{i} K_{li}^{A}}$$

т.е. коэффициенты передачи взаимообратны, не зависят от параметров нагрузок как по току, напряжению, так и по мощности.

На рис. 3 отображена упрощенная модель, реализующая передачу энергии в двух направлениях — от узла l к узлу q и наоборот.

$$K_{lq} = -\frac{Y_{12}^1}{Y_{21}^2}, \quad K_{ql} = -\frac{Y_{21}^2}{Y_{12}^1}.$$

Рис. 3. Практическая схема корректора-компенсатора

Обратимость предполагает выполнение условий $Y_{12}^1 = Y_{21}^2$, цепь в целом симметрична и не создает затухания. Данный факт позволяет проектировать корректоры-компенсаторы АЧХ- и ФЧХ-искажений, в которых используются одинаковые четырехполюсники 1 и 2, и в зависимости от направления передачи цепь обратной связи компенсирует цепь прямого включения. Таким образом, для обеспечения функций коррекции достаточно в цепь обратной связи добавить такой же четырехполюсник, что удобно для практического использования. Следует отметить, что предложенный способ отличается от классического принципа коррекции, когда корректор подключается к искажающей цепи каскадно и при этом исчезает необходимость синтеза (не всегда возможного) схемы корректора [6].

В реальных случаях, с учетом возможностей современной микроэлектроники, необходима проверка устойчивости, а практическое приложение последних может быть расширено при использовании широкополосных ОУ [2–5].

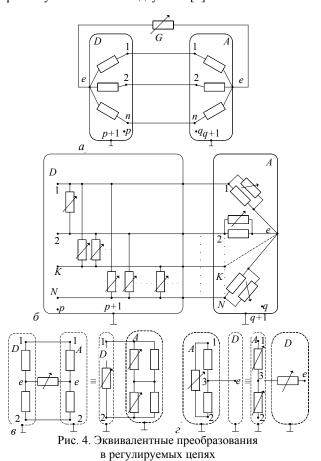
Разработка моделей с переменными параметрами

В данных реализациях основная цель — уменьшение количества ОУ и регулирующих элементов. Модификации реализаций в общем случае рассмотрены на рис. 4, a, δ .

Частные решения представлены схемными преобразованиями на рис. 4, β , ε , в которых между двумя многополюсниками A и D подключен простейший трехполюсник. В результате простейших преобразований один из побочных элементов «переносится» в дополнительный многополюсник и, как было показано выше, не окажет влияния на схемные функции цепи в целом.

Данное свойство позволило разработать новые модели гармонических генераторов на мосте Вина с одним ОУ, в которых возникает возможность регулировки смежных проводимостей моста с помощью

одного резистора. Заметим, что схемы, известные авторам, обладающие подобными возможностями, реализуются только на двух ОУ [7].



Рассмотрим общую модель активного моста с дифференциальным ОУ, изображенную на рис. 5.

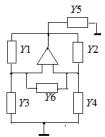


Рис. 5. Иллюстрация преобразований регулирования

Использование свойств инвариантности при синтезе подобных решений сводится к рациональному подключению переменного резистора, в этом случае возникает возможность регулировки смежных проводимостей моста при соблюдении баланса характеристического многочлена.

Характеристический многочлен данной цепи, при $\mu \to \infty$ определяется выражением

$$D = Y_2 Y_3 - Y_1 Y_4$$
.

В силу свойств инвариантности в это выражение не входят проводимости Y_5 и Y_6 . Данное свойство можно использовать для одновременного управления двумя сопряженными плечами моста с

помощью одного элемента. Для этого достаточно к любым трем узлам моста подключить трехполюсник с одним управляющим резистором, представленным на рис. 4, 6.

Очевидно, что один из регулируемых параметров данной схемы войдет в состав Y_5 или Y_6 , а два других обеспечат синхронное управление плечами моста. Схемы, полученные таким образом, представлены на рис. 6, N 1–4.

Генераторы (на одном ОУ с регулировкой одним резистором) удовлетворяют важным требованиям, предъявляемым, в частности, к автономным радиотехническим средствам по минимизации энергетических затрат и количества органов управления.

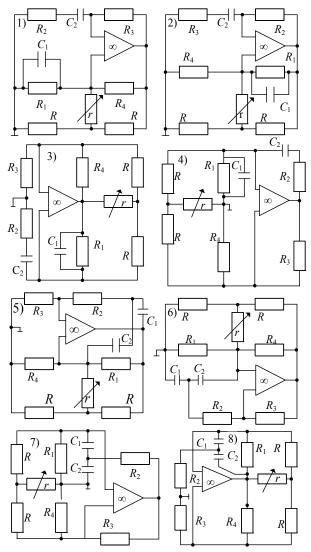


Рис. 6. Схемы генераторов с одним управляющим резистором

Для реализаций, представленных на рис. 6, схемы № 1–4, справедливо выражение

$$D(\rho) = p^2 + p \left[\frac{G_1'}{C_1} + \frac{G_2}{C_2} - \frac{G_2 G_4'}{G_3 C_2} \right] + \frac{G_2 G_1'}{C_1 C_2},$$

$$G'_1 = G_1 + \left(\frac{G}{r}\right) / \left(\frac{1}{r} + 2G\right); \quad G'_4 = G_4 + \left(\frac{G}{r}\right) / \left(\frac{1}{r} + 2G\right).$$

Очевидно, что при $G_4-G_1=G_2$; $C_1=C_2$ все эти схемы обеспечивают генерацию гармонических колебаний с частотой

$$\omega_0^2 = \frac{1}{C^2} G \left(G_1 + \frac{G/r}{1/r + 2G} \right).$$

В данных схемах обеспечивается перестройка частоты генерации, при постоянном, не зависящем от параметров дополнительной трехполюсной цепи условии стационарности.

Вышеописанный метод можно использовать и для регулировки основных проводимостей моста. Реализации, полученные таким образом, представлены на рис. 6, № 5–8. Для этих схем

$$D(\rho) = p^2 + p \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} G_1' - \frac{G_2 G_4'}{G_3 C_2} \right] + \frac{G_1' G_2}{C_1 C_2}.$$

При $\frac{G_2}{G_3} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$ получаем условие стационар-

При экспериментальной проверке выше проделанного анализа была выбрана схема № 4 рис. 6. В качестве ОУ использовался усилитель LM318N8.

Схема без дополнительных настроек обеспечила трехкратную перестройку частоты при стабильной амплитуде и коэффициенте нелинейных искажений, не превышающем 5–8%.

Представленные схемные решения генераторов (на одном ОУ с регулировкой одним резистором) не имеют аналогов и удовлетворяют важным требованиям, которые предъявляются, в частности, к автономным радиотехническим средствам.

Рассмотренные способы использования свойств инвариантности схемных функций активных цепей и получение новых технических решений расширяют возможности разработчика радиоэлектронных средств.

Литература

- 1. Prokopenko N.N. The Multifunctional Programmable Multiplexer of Potential Signals of Sensors / N.N. Prokopenko, N.V. Butyrlagin, A.V. Bugakova, I.V. Pakhomov // International Conference on Signals and Electronic Systems (ICSES-2016). Krakow, Poland, 2016. P. 261–264.
- 2. Прокопенко Н.Н. Мультидифференциальные операционные усилители в прецизионных аналого-цифровых интерфейсах нового поколения: основные свойства, параметры и характеристики / Н.Н. Прокопенко, А.И. Серебряков, Н.В. Бутырлагин // Инновации, экология и ресурсосберегающие технологии (ИнЭРТ–2014). Ростов н/Д.: ДГТУ, 2014. С. 1275–1283.
- 3. Каталог разработок Российско-Белорусского центра аналоговой микросхемотехники / под ред. С.Г. Крутчинского. Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2006. 96 с.
- 4. Мезон С. Электрические цепи, сигналы и системы / С. Мезон, Г. Циммерман. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963.-619 с.
- 5. Широкополосные усилители [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.analog.com/ru/products/

где

broadband/broadband-amplifiers.html, свободный (дата обращения: 10.01.2017).

- 6. А.с. СССР, № 951651, МКЛ Н03 Н11/12, Н04 В3/04. Корректор амплитудно-частотных искажений / В.А. Рыжов (СССР). № 3210878/18-09; заявл. 03.12.80; опубл. 15.08.82. Бюл. № 30. 2 с.
- 7. Управляемые гармонические генераторы [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://zpostbox.ru/g3.htm, свободный (дата обращения: 10.01.2017).

Рыжов Владимир Анатольевич

Канд. техн. наук, доцент каф. информационной безопасности (ИБ) Новосибирского государственного университета экономики и управления (НГУЭУ) Тел.: +7-951-381-59-27

Эл. почта: varann77@yandex.ru

Смуров Александр Владимирович

Инженер каф. ИБ НГУЭУ Тел.: +7-913-018-80-56 Эл. почта: zevsthebest@mail.ru

Rizhov V.A., Smurov A.V.

Conditions of functions invariance for the synthesis of active circuits

The properties invariance of circuit functions in active circuit allows to create advanced models and technical solutions that provide a unique characteristics. This method allows to generate a large number of technical solutions that are used in modern circuit design and radio electronics.

Keywords: invariance, component, active circuits.