



УДК 621.372.55

Ю. М. Иншаков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

А. В. Белов

ФГБНУ "Институт экспериментальной медицины" (Санкт-Петербург)

## Перестраиваемый активный амплитудный RC-корректор

*Предложена схема активного амплитудного RC-корректора с независимой перестройкой резонансной частоты, подъема усиления на резонансной частоте и добротности комплексно-сопряженных нулей и полюсов. Резонансная частота изменяется с помощью первого переменного резистора при сохранении подъема усиления. Подъем усиления регулируется с помощью потенциометра при сохранении неизменной резонансной частоты. Добротность комплексно-сопряженных нулей и полюсов регулируется с помощью второго переменного резистора.*

### **Активный амплитудный RC-корректор, добротность комплексно-сопряженных нулей и полюсов, резонансная частота, коэффициент передачи**

При разработке аппаратуры связи возникает необходимость применения перестраиваемых активных амплитудных RC-корректоров (далее – активный амплитудный корректор – ААК). В системах связи коррекция амплитудных искажений относится к эффективным и в то же время сравнительно простым средствам повышения их качественных показателей [1]. Системы связи вносят амплитудно-частотные искажения в передаваемые через них сигналы, так как затухание сигналов в рабочем диапазоне частот систем связи не постоянно. Амплитудное корректирование в каналах связи применяется с целью уменьшения амплитудно-частотных искажений сигналов, т. е. обеспечения заданного значения неравномерности затухания в полосе пропускания.

Вопросы проектирования перестраиваемых схем активных амплитудных RC-корректоров являются актуальными. Общим вопросам проектирования ААК уделено внимание в [1]–[3], где рассмотрены схемы с использованием одного или нескольких операционных усилителей (ОУ). В схемах на основе одного ОУ используются многопетлевые обратные связи для обеспечения устойчивой работы корректора при воздействии

различных дестабилизирующих факторов (температуры, старения и т. д.). Реализация ААК на двух и более ОУ позволяет получить больший запас устойчивости схем, а также низкую чувствительность параметров корректора к изменениям коэффициентов усиления активных элементов [3]. Перестройка таких схем с помощью одного регулируемого элемента обеспечивает сравнительно небольшой диапазон изменения частоты. Для расширения этого диапазона используют два одновременно регулируемых элемента, что значительно усложняет использование схемы.

Интерес разработчиков электронной аппаратуры к аналоговым RC-фильтрам в последнее время значительно ослаб, их можно заменить широко распространенными цифровыми фильтрами. Однако следует отметить, что себестоимость перестраиваемых цифровых фильтров и сложность их эксплуатации существенно превосходят аналогичные параметры перестраиваемых активных RC-фильтров. Кроме того, частотный диапазон работы аналоговых активных RC-фильтров может быть значительно шире диапазона цифровых фильтров. Таким образом, задача проектирования таких фильтров сохраняет свою актуальность.

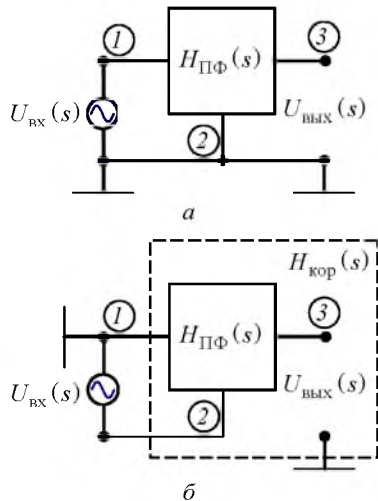


Рис. 1

В настоящей статье предложена схема перестраиваемого ААК с независимой перестройкой резонансной частоты, подъема усиления на резонансной частоте и добротности комплексно-сопряженных нулей и полюсов (КСНП).

Схема ААК получена в результате дополнительного преобразования схемы перестраиваемого активного полосового фильтра (ПФ) [5]. Топологическое преобразование [4] заключается в переносе в исходной схеме ПФ (рис. 1, а) общего провода входного сигнала  $U_{вх}(s)$  с вывода 2 к выводу 1 и обратном (с вывода 1 на вывод 2) переносе сигнального провода при сохранении вывода выходного сигнала  $U_{вых}(s)$  3.

При этом передаточные функции исходного ПФ  $H_{ПФ}(s)$  и проектируемого ААК  $H_{кор}(s)$  связаны соотношением  $H_{ПФ}(s) + H_{кор}(s) = 1$ .

Тогда передаточная функция ААК имеет вид

$$H_{кор}(s) = 1 - H_{ПФ}(s). \quad (1)$$

Для преобразования ПФ с передаточной функцией  $H_{ПФ}(s)$  в ААК с передаточной функцией  $H_{кор}(s)$  необходимо, чтобы ПФ был инвертирующим.

Передаточная функция инвертирующего ПФ (рис. 1, а) [5]:

$$H_{ПФ}(s) = \frac{U_{вых}(s)}{U_{вх}(s)} = -\frac{sh_m\omega_0/Q_0}{s^2 + s\omega_0/Q_0 + \omega_0^2}, \quad (2)$$

где  $h_m > 1$  – коэффициент передачи ПФ на резонансной частоте  $\omega_0$ ;  $Q_0$  – добротность комплексных полюсов.

Подставив (2) в (1), получим передаточную функцию неинвертирующего ААК (рис. 1, б):

$$\begin{aligned} H_{кор}(s) &= 1 + \frac{sh_m\omega_0/Q_0}{s^2 + s\omega_0/Q_0 + \omega_0^2} = \\ &= \frac{s^2 + s(1+h_m)\omega_0/Q_0 + \omega_0^2}{s^2 + s\omega_0/Q_0 + \omega_0^2} \Big|_{h_m > 1} = \\ &= \frac{s^2 + s\omega_0/Q_H + \omega_0^2}{s^2 + s\omega_0/Q_0 + \omega_0^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$Q_H = Q_0/(1+h_m) \quad (4)$$

– добротность комплексных нулей.

Из (3) следует, что при проведении топологического преобразования частоты нулей и полюсов передаточной функции ААК соответствуют резонансной частоте  $\omega_0$  ПФ, а добротность комплексных полюсов ААК равна добротности комплексных полюсов ПФ. Соотношение добротностей комплексных нулей и полюсов определяется выражением (4), а коэффициент передачи ААК на резонансной частоте

$$H_{кор}(\omega_0) = Q_0/Q_H = (1+h_m) > 1.$$

Схема перестраиваемого ААК (рис. 2) представляет собой каскадное соединение двух интеграторов на ОУ У1, У2 и масштабирующего ОУ У3, охваченных общей отрицательной связью.

Независимая перестройка подъема усиления на резонансной частоте обеспечивается заземленным потенциометром  $R_3$ , включенным в цепь отрицательной обратной связи ОУ У2. Независимая перестройка резонансной частоты ААК выполняется переменным резистором  $R_5$  в цепи обратной связи ОУ У3. Изменение добротности КСНП обеспечивается переменным резистором  $R_4$ .

В схеме перестраиваемого корректора (рис. 2) использованы резисторы одинакового сопротивления  $R_1 = R_2 = R_3 = R_6 = R$  и конденсаторы одинаковой емкости  $C_1 = C_2 = C$ , что определило технологичность схемы и удобство перестройки ее параметров. Введем также следующие параметры, характеризующие схему:

$$\begin{aligned} R_3 &= R_{31} + R_{32} = R, \\ G_{31} &= 1/R_{31} = 1/(\alpha R_3), \\ G_{32} &= 1/R_{32} = 1/[(1-\alpha)R_3] \end{aligned}$$

– проводимости составляющих потенциометра  $R_3$ , где

$$\alpha = R_{31}/R \quad (5)$$

– коэффициент перестройки подъема усиления.

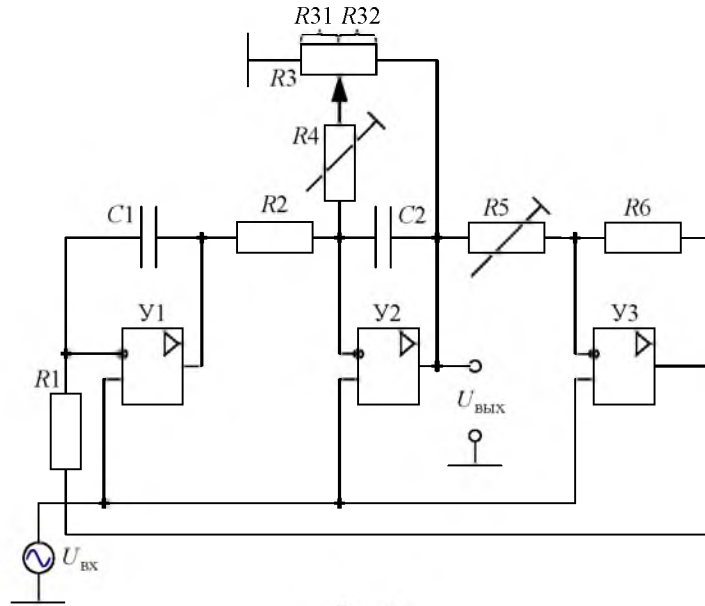


Рис. 2

С учетом выбранных условий передаточная функция ААК (3) примет вид

$$H_{\text{кор}}(s) = -\frac{s^2 + a_1s + \omega_0^2}{s^2 + b_1s + \omega_0^2}, \quad (6)$$

где

$$\begin{cases} a_1 = \frac{G_4(G_{31} + G_{32})}{C_2(G_4 + G_{31} + G_{32})} = \frac{1}{RC[\alpha(1-\alpha) + \lambda]}, \\ b_1 = \frac{G_4G_{32}}{C_2(G_4 + G_{31} + G_{32})} = \frac{\alpha}{RC[\alpha(1-\alpha) + \lambda]}, \end{cases} \quad (7)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_6}{C_1C_2R_1R_2R_5}} = \frac{1}{RC\sqrt{\beta}} \quad (8)$$

– частоты КСНП;

$$\beta = R_5/R$$

– коэффициент перестройки частот;

$$\lambda = R_4/R$$

– коэффициент перестройки добротности КСНП.

Найдем выражения для добротностей комплексно-сопряженных нулей  $Q_0$  и полюсов  $Q_{\text{п}}$ :

$$Q_0 = \frac{\omega_0}{a_1} = \frac{\alpha(1-\alpha) + \lambda}{\sqrt{\beta}}; \quad Q_{\text{п}} = \frac{\omega_{\text{п}}}{b_1} = \frac{\alpha(1-\alpha) + \lambda}{\alpha\sqrt{\beta}}. \quad (9)$$

Покажем на основании (7) и (9), что полоса пропускания амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) корректора зависит от параметров  $\alpha$  и  $\lambda$ :

$$\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q_0} = \frac{1}{RC[\alpha(1-\alpha) + \lambda]}.$$

Из (6) найдем АЧХ ААК:

$$|H(j\omega)| = H(\omega) = \sqrt{\frac{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (a_1\omega)^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (b_1\omega)^2}}.$$

Тогда с учетом (5) и (9) определим значение подъема усиления на резонансной частоте  $\omega_0$ , т. е. максимум АЧХ ААК:

$$H_{\text{кор}}(\omega_0) = \frac{a_1}{b_1} = \frac{Q_0}{Q_{\text{п}}} = \frac{1}{\alpha}. \quad (10)$$

Отсюда следует, что подъем усиления на резонансной частоте в широких пределах можно независимо регулировать с помощью потенциометра  $R_3$ . На рис. 3 показаны АЧХ корректора с изменяемым подъемом усиления. Следует отметить, что при перестройке подъема усиления (10) резонансная частота контура не изменяется.

Резонансная частота контура (частота КСНП), как следует из (8), обратно пропорциональна  $\sqrt{\beta}$ . Следовательно, резонансную частоту можно неза-

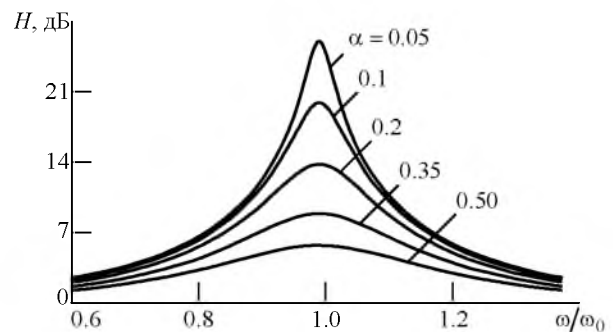


Рис. 3

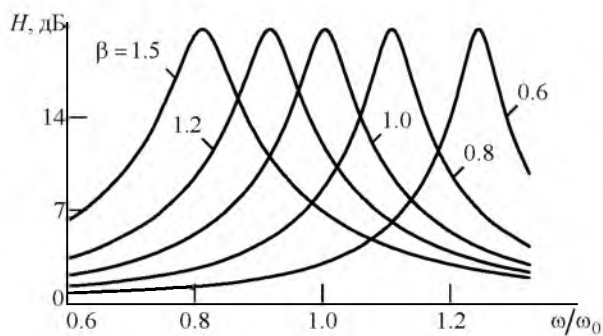


Рис. 4

висимо изменять с помощью переменного резистора  $R5$ . На рис. 4 представлены АЧХ ААК с изменяемой резонансной частотой. Диапазон перестройки резонансной частоты составляет одну октаву.

Необходимо отметить, что при перестройке резонансной частоты ААК подъем усиления на этой частоте и полоса пропускания не изменяются, а добротность при увеличении резонансной частоты увеличивается, что следует из (8) и (9). Добротность КСНП ААК (9), определяемую параметром  $\lambda$ , можно изменять в широких пределах с помощью переменного резистора  $R4$ . На рис. 5 представлены АЧХ при различных значениях параметра  $\lambda$ . При этом подъем усиления на резонансной частоте сохраняется неизменным, а коэффици-

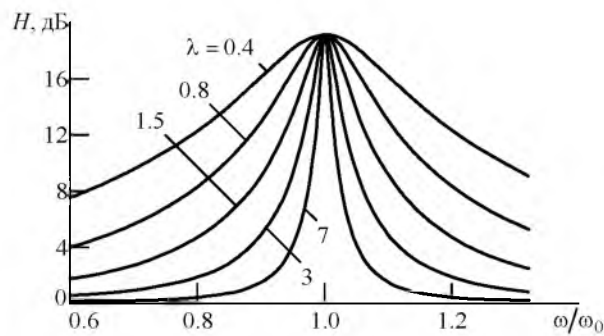


Рис. 5

ент усиления ААК на низких и высоких частотах уменьшается до единицы.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что преимуществом рассмотренной схемы перестраиваемого ААК является возможность независимой перестройки резонансной частоты, добротности КСНП, а также подъема усиления на резонансной частоте. Резонансная частота ААК и добротности его КСНП перестраиваются переменными резисторами, а подъем усиления – потенциометром. Для ограничения максимума подъема усиления на резонансной частоте необходимо последовательно с потенциометром  $R3$  включить ограничительный резистор  $R_{огр} \approx 0.05R_3$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кисель В. А. Аналоговые и цифровые корректоры: справ. М.: Радио и связь, 1986. 184 с.
2. А. с. SU 1837382 A1 H03H11/00 (2000.01). ARC-корректор амплитудно-частотных искажений / А. Ю. Демин. Опубл. 30.08.93. Бюл. № 32.
3. Сильвинская К. А., Голышко З. И. Расчет фазовых и амплитудных корректоров: справ. 2-е изд. М.: Связь, 1980. 104 с.
4. Hilberman D. Input and Ground as Complements in Active Filters // IEEE Trans. on Circuit Theory. 1973. СТ-20, № 2. P. 540–547.
5. Иншаков Ю. М., Белов А. В. Перестраиваемый полосовой активный RC-фильтр // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2013. Вып. 2. С. 66–70.

Статья поступила в редакцию 06 февраля 2017 г.

**Для цитирования:** Иншаков Ю. М., Белов А. В. Перестраиваемый активный амплитудный RC-корректор // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 4. С. 42–46.

**Иншаков Юрий Михайлович** – кандидат технических наук (1973), доцент (1978), профессор кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 82 научных и методических работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов, исследование цифровых и аналоговых фильтров.  
E-mail: Inshakov40@mail.ru

**Белов Александр Викторович** – кандидат технических наук (1977), ведущий научный сотрудник ФГБНУ "Институт экспериментальной медицины". Автор 65 научных работ. Сфера научных интересов – аналоговая обработка сигналов, исследование аналоговых фильтров.  
E-mail: avbelov1@ya.ru

Yu. M. Inshakov

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

A. V. Belov

FGBNU "Institute of Experimental Medicine" (Saint Petersburg)

### Tunable Active Phase RC-Corrector

**Abstract.** The article describes designing of a simple active filter circuit for an amplitude RC equalizer on three operational amplifiers with reconfigurability of all three main parameters: resonance frequency transfer coefficient and Q.

Reconfigurability of these parameters is carried out by two variable resistors and one potentiometer. To adjust the resonance frequency, a dual potentiometer is not required.

The quality factor and the transmission coefficient are adjusted within one decade. The tuning of the resonance frequency is possible within one octave without a significant effect on the Q-value.

The obtained scheme of a simple tunable amplitude corrector is suitable for working in the range of low frequencies to video frequencies.

**Key word:** Active Amplitude RC-Corrector, Q-Factor of Complex Zero and Poles, Resonance Frequency, Transfer Coefficient

### REFERENCES

1. Kisel V. A. *Analogovye i cifrovye korrektoy: sprav.* [Analog and Digital Correctors]. Moscow, *Radio i svjaz'*, 1986, 184 p. (In Russian)
2. Demin A. Yu. *ARC-korrektor amplitudno-chastotnykh iskazhenii* [ARC-Correction of Amplitude-Frequency Distortions]. Pat. SU, no. 1837382, 1993.
3. Silvinskaya K. A., Golyshko Z. I. *Raschet fazovykh i amplitudnykh korrektorov.* [Calculation of Phase and Amplitude Correctors]. Moscow, *Svjaz'*, 1980, 104 p.
4. Hilberman D. Input and Ground as Complements in Active Filters. *IEEE Trans. on Circuit Theory.* 1973, CT-20, no. 2, pp. 540–547.
5. Inshakov Yu. M., Belov A. V. Tunable Bandpass Active RC Filter. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Ros-sii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2013, no. 2, pp. 66–70.

Received February, 06, 2017

**For citation:** Inshakov Yu. M., Belov A. V. Tunable Active Phase RC-Corrector. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Ros-sii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 3, pp. 42–46. (In Russian)

**Yurii M. Inshakov** – Ph.D. in Engineering (1973), Associate Professor (1978), Professor of the Department of Theoretical Bases of Electrical Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 82 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing; digital and analog filter research.

E-mail: Inshakov40@mail.ru

**Alexander V. Belov** – Ph.D. in Engineering (1977), leading research of the Scientific Research Institute of Experimental Medicine of the RAMS. The author of 65 scientific publications. Area of expertise: analog signal processing; analog filter research.

E-mail: avbelov1@ya.ru