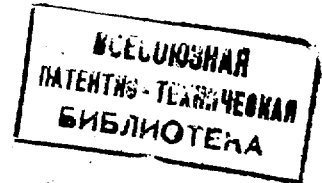




(51)5 Н 03 Н 11/12

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ  
ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ  
ПРИ ГИИТ СССР

# ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ



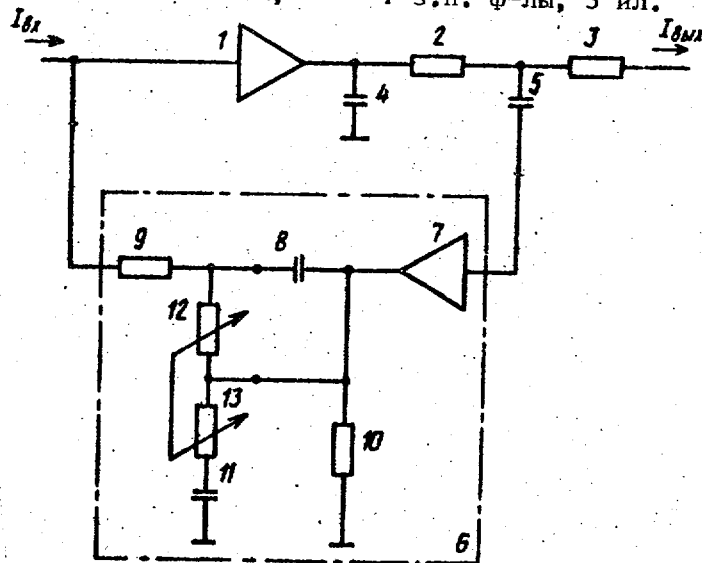
- (21) 4343188/24-09
- (22) 30.10.87
- (46) 07.06.90. Бюл. № 21
- (71) Минский радиотехнический институт
- (72) А.Е. Курочкин
- (53) 621.372.54(088.8)
- (56) Знаменский А.Е., Теплюк И.Н. Активные RC-фильтры. - М.: Связь, с. 91, рис. 3, 6а.

(54) ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ АКТИВНЫЙ RC-ФИЛЬТР

(57) Изобретение относится к радиотехнике и может быть использовано в частотно-избирательных устройствах. Целью изобретения является повышение крутизны спада амплитудно-частотной характеристики. Перестраиваемый активный RC-фильтр (АФ) содержит источник  $I$  тока, управляемый током,

резисторы 2 и 3, конденсаторы 4 и 5, регулируемое фазосдвигающее звено 6, содержащее усилитель 7 тока, конденсаторы 8 и 11, резисторы 9 и 10, переменные резисторы 12 и 13. За счет изменения параметров регулируемого фазосдвигающего звена 6 происходит образование дополнительных нулей и полюсов передаточной функции, изменение положения которых приводит к изменению частоты среза и ее крутизны. В случае использования устройства, имеющего АЧХ пятого порядка, на выходе АФ установлен преобразователь тока в напряжение для осуществления снятия выходного сигнала по напряжению. Перестраиваемые активные RC-фильтры легко каскадируются для получения АЧХ высоких порядков подключением выхода предыдущего к входу последующего.

1 з.п. ф-лы, 3 ил.



Фиг. 1

Изобретение относится к радиоэлектронике и может быть использовано в частотно-избирательных устройствах.

Цель изобретения - повышение крутизны спада амплитудно-частотной характеристики.

На фиг.1 приведена принципиальная электрическая схема перестраиваемого активного RC-фильтра; на фиг.2 - амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) при различных положениях переменных резисторов; на фиг.3 - фильтр, имеющий АЧХ пятого порядка.

Перестраиваемый активный RC-фильтр содержит источник 1 тока, управляемый током, первый 2 и второй 3 резисторы, первый 4 и второй 5 конденсаторы, регулируемое фазосдвигающее звено 6, содержащее усилитель 7 тока, третий конденсатор 8, третий 9 и четвертый 10 резисторы, четвертый конденсатор 11, первый 12 и второй 13 переменные резисторы.

Перестраиваемый активный RC-фильтр работает следующим образом.

Передаточная функция устройства описывается выражением

$$T(p) = \frac{K_I}{p^2 \hat{c}^2 + p \hat{c} \left[ 3 - K_I \frac{(R_{инт} + pR_2 \hat{c}_{инт}) (1 + pR_4 \hat{c}_{диф})}{(1 + pR_2 \hat{c}_{инт} + p \hat{c}_{инт}) (R_1 + R_{диф} + p R_1 \hat{c}_{диф})} \right] + 1} \quad (1)$$

где  $K$  - коэффициент передачи по току источника 1 тока;

$$\hat{c}_{диф} = R_9 C_8;$$

$$\hat{c}_{инт} = R_{10} C_{11}; R_{12} = R_{13};$$

$$\hat{c}_1 = \hat{c}_2 = \hat{c} = C_4 R_2 = C_5 R_3.$$

Рассмотрим два случая:  $R_{12} = R_{13}$ ; и  $R_{13} = R_{12} = R_{max}$ , причем  $R_{max} \gg R_9$  и  $R_{max} \gg R_{10}$ .

При  $R_{13} = R_{12} = 0$  из (1) получают

$$T(p) = \frac{K_I}{p^2 \hat{c}^2 + p \hat{c} \left( 3 - \frac{K_{I_0}}{1 + p \hat{c}_{инт}} \right) + 1}, \quad (2)$$

где

$$\tilde{T}(p) = \frac{1 + p \hat{c}_{инт}}{p^3 \hat{c}^2 \hat{c}_{инт} + p^2 (\hat{c}^2 + 3 \hat{c} \hat{c}_{инт}) + p [\hat{c}_{инт} + \hat{c} (3 - K_{I_0})] + 1} \quad (5)$$

Как показывает анализ, знаменатель выражения 5 имеет один действительный корень и два комплексно-сопряженных корня, причем действительный корень лежит далеко от мнимой оси, что позволяет пренебречь им при анализе работы устройства в пределах полосы пропускания.

Обозначают

$$\omega_p^2 + \sigma_1^2 = a; \quad (6)$$

$$\omega_p^2 - \sigma_1^2 = b. \quad (7)$$

При таком расположении полюсов и нуля можно записать выражение для АЧХ устройства в виде

$$\left| \tilde{T}(p) \right| = \frac{\sqrt{\sigma_2^2 + \omega^2}}{\omega^2 + \sigma_1^2} \times \frac{1}{\sqrt{[(\omega_p - \omega)^2 + \sigma_1^2][(\omega_p + \omega)^2 + \sigma_1^2]}}, \quad (8)$$

где  $\omega$  - текущая частота.

$$K_{I_0} = K_I (R_{10}/R_9). \quad (3)$$

Как видно из (3)

$$K_I = K_{I_0} \frac{R_9}{R_{10}}, \quad (4)$$

т.е. при  $R_9 \gg R_{10}$  значение  $K_I \gg 1$ . Таким образом, устройство позволяет иметь значения коэффициента передачи по току  $K_I \gg 1$ .

Будем рассматривать  $T(p)$ , нормированную по уровню:

$$\tilde{T}(p) = \frac{T(p)}{T(p=0)};$$

С учетом (6) и (7) можно записать

$$\left| \tilde{T}(p) \right| = \frac{\sqrt{\sigma_2^2 + \omega^2}}{\sigma_1^2} \frac{a}{\sqrt{\omega^2 - 2\omega^2 b + a^2}}. \quad (9)$$

Приравняв выражение (9) к единице, получим выражение для частоты среза

$$\omega_c = \sqrt{\frac{a^2}{\sigma_2^2} + 2b}. \quad (10)$$

Приближенные выражения  $\omega_p$  для и  $\sigma_1$  можно получить из (5)

$$\sigma_1 = \frac{\hat{c}_{инт} + \hat{c} (3 - K_{I_0})}{2(\hat{c}^2 + 3\hat{c}\hat{c}_{инт})}; \quad (11)$$

$$\omega_p = \frac{\sqrt{4(\hat{c}^2 + 3\hat{c}\hat{c}_{инт}) - [\hat{c}_{инт} + \hat{c}(3 - K_{I_0})]^2}}{2(\hat{c}^2 + 3\hat{c}\hat{c}_{инт})} \quad (12)$$

$$\sigma_2 = -\frac{1}{\hat{c}_{инт}}. \quad (13)$$

Тогда выражение для  $\omega_c$  имеет вид

$$\omega_c = \frac{\sqrt{2\hat{c}_{\text{инт}}K_{I0} + 7\hat{c}^2 + 6\hat{c}^2K_{I0} - \hat{c}^2K_{I0}^2}}{\hat{c}_2 + 3\hat{c}\hat{c}_{\text{инт}}} \quad (14)$$

При  $\hat{c}_{\text{инт}} \gg 1$  можно записать приближенное выражение

$$\omega_c \approx 0,47 \sqrt{\frac{K_{I0}}{\hat{c}\hat{c}_{\text{инт}}}} \quad (15)$$

$$\bar{T}(p) = \frac{1 + p\hat{c}_{\text{АиФ}}}{p^{3\hat{c}_{\text{АиФ}} + p^2[\hat{c}^2 + \hat{c}\hat{c}_{\text{АиФ}}(3 - K_{I0})] + p(3\hat{c} + \hat{c}_{\text{АиФ}}) + 1} \quad (17)$$

Выражение (17) имеет расположение полюсов и нуля, причем нуль  $\sigma_2$  расположен далеко от мнимой оси, что позволяет пренебречь им при расчетах в пределах полосы пропускания.

Выражение для АЧХ имеет вид

$$|\bar{T}(p)| = \frac{\sigma_3}{\sqrt{\sigma_3^2 + \omega^2}} \cdot \frac{a}{\sqrt{\omega^4 - 2b\omega^2 + a^2}} \quad (18)$$

$$\bar{T}(p) = \frac{1}{p^{3\hat{c}_{\text{АиФ}} + p^2[\hat{c}^2 + \hat{c}\hat{c}_{\text{АиФ}}(3 - K_{I0})] + p(3\hat{c} + \hat{c}_{\text{АиФ}}) + 1} \quad (20)$$

то в пределах полосы пропускания  $\bar{T}(p)$  фактически описывает фильтр третьего порядка с заданным значением.

Таким образом, за счет изменения параметров регулируемого фазосдвигающего звена  $\delta$  происходит образование дополнительных нулей и полюсов передаточной функции, изменение положения которых приводит к изменению частоты среза и ее крутизны, что видно из выражений (14) и (19).

На фиг. 2 приведены зависимости, рассчитанные по выражениям (5) и (17) для  $\hat{c} = 1$ ,  $\alpha = 3$  дБ при различных значениях  $R_{13} = R_{12}$ . Из зависимостей видно, что дальнейшее уменьшение  $\hat{c}_{\text{АиФ}}$  нецелесообразно, так как оно связано с ростом дополнительной неравномерности АЧХ (кривая III). При  $\hat{c}_{\text{АиФ}} = 2$  составляет 4,5 дБ на частоте  $\omega = 0,57$ , значение  $\omega_{c \text{ max}}$  при этом равно 1,73;  $K_{I0} = 2,8$ . При  $\hat{c}_{\text{инт}} = 4$  значение  $\omega_{c \text{ min}}$  составляет 0,42 (кривая I), при этом  $K_{I0} = 2,8$ . Дальнейшее повышение значения  $\hat{c}_{\text{инт}}$ , как показал анализ, ведет к неопределенному росту  $K_{I0}$ , необходимого для поддержания заданного значения  $\alpha$ , а следовательно, и к росту общего  $K_T$ . При необходимости можно ввести дополнительную регулировку  $K_{I0}$  за счет изменения соотношения резисторов  $R_9$  и  $R_{10}$  и стабилизировать об-

При  $R_1 = R_2 = R_{\text{max}}$  выражение для  $T(p)$  имеет вид

$$T(p) = \frac{K_T}{p^2\hat{c}^2 + p\hat{c}(3 - K_{I0} \frac{p\hat{c}_{\text{АиФ}}}{1 + p\hat{c}_{\text{АиФ}}}) + 1} \quad (16)$$

Выражение  $T(p)$ , нормированное относительно  $T(p=0)$ , можно записать в следующем виде:

$$\omega_c = \frac{\sqrt{(\sigma_3^2 + 2b)^2 - 4a^2 - (\sigma_3^2 - 2b)}}{2} \quad (19)$$

Так как выражение 17 в пределах полосы пропускания можно записать в виде

щий коэффициент передачи  $K_T$ . При этом пределы регулирования частоты среза могут быть значительно расширены. В данном случае изменение частоты среза  $\omega_{c \text{ max}} / \omega_{c \text{ min}} = 1,73 / 0,42 \approx 4,1$  раза. Если в процессе регулирования  $\omega_c$  не изменять значения  $K_{I0}$ , а следовательно, и общий  $K_T$ , то процесс сопровождается изменением  $\alpha$ . При этом существует оптимальное значение  $\hat{c}_{\text{АиФ}}$ ; при котором частота  $\omega_c$  максимальна,  $\omega_{c \text{ min}}$  ограничивается уменьшением крутизны спада АЧХ, поскольку из-за снижения  $\alpha$  уменьшение крутизны спада зависит от  $\hat{c}_{\text{инт}}$  в большей степени (происходит более быстрое превращение комплексно-сопряженных полюсов в действительные, что видно из выражения (3), которое при  $\hat{c}_{\text{инт}} \gg 1$  фактически описывает передаточную функцию пассивного RC-фильтра второго порядка). При  $K_T = 2,23$ , что соответствует  $\omega_c = 1,18$ ,  $\alpha = 3$   $R_{13} = R_{12} = R_{\text{max}}/2$ , получены следующие значения  $\omega_c$  и  $\alpha$ : при  $\hat{c}_{\text{инт}} = 4$  ( $R_{13} = R_{12} = 0$ )  $\omega_{c \text{ min}} = 0,42$  и  $\alpha = 3$  дБ, при  $\hat{c}_{\text{АиФ опт}} = 8$  ( $R_{13} = R_{12} = R_{\text{max}}$ )  $\omega_{c \text{ max}} = 1,28$  и  $\alpha = 2$  дБ. При изменении  $\omega_c$  от 0,42 до 1,28 значение  $\alpha$  не превышает 5 дБ, дополнительная неравномерность  $\alpha_i$  при этом не превышает 3 дБ. При перестройке АФ изменяется крутизна спада АЧХ, что видно из выраже-

ний (3) и (16), так как порядок АФ в районе  $\omega_c$  в пределе стремится либо к  $n=1$  (-6 дБ/октаву), либо к  $n=3$  (-18 дБ/октаву). Однако, так как реальный диапазон перестройки далеко не достигает возможных значений из-за роста  $K_0$  и появления дополнительной неравномерности АЧХ.

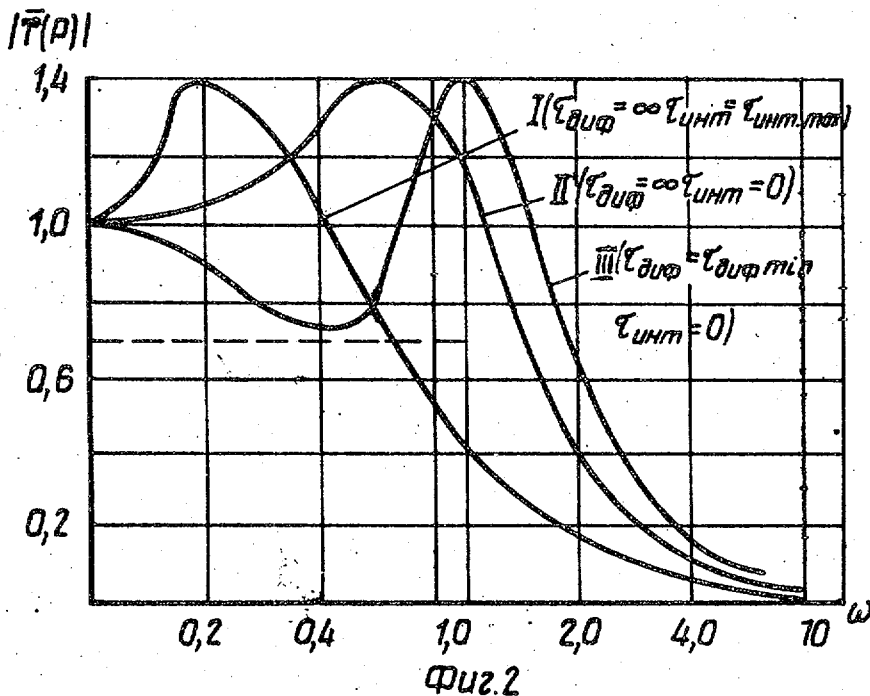
На выходе фильтра (фиг.3), имеющего АЧХ пятого порядка, установлен преобразователь 14 тока в напряжение, для осуществления снятия выходного сигнала по напряжению. Перестраиваемые активные RC-фильтры легко каскадируются для получения АЧХ высоких порядков простым подключением выхода к входу последующего каскада.

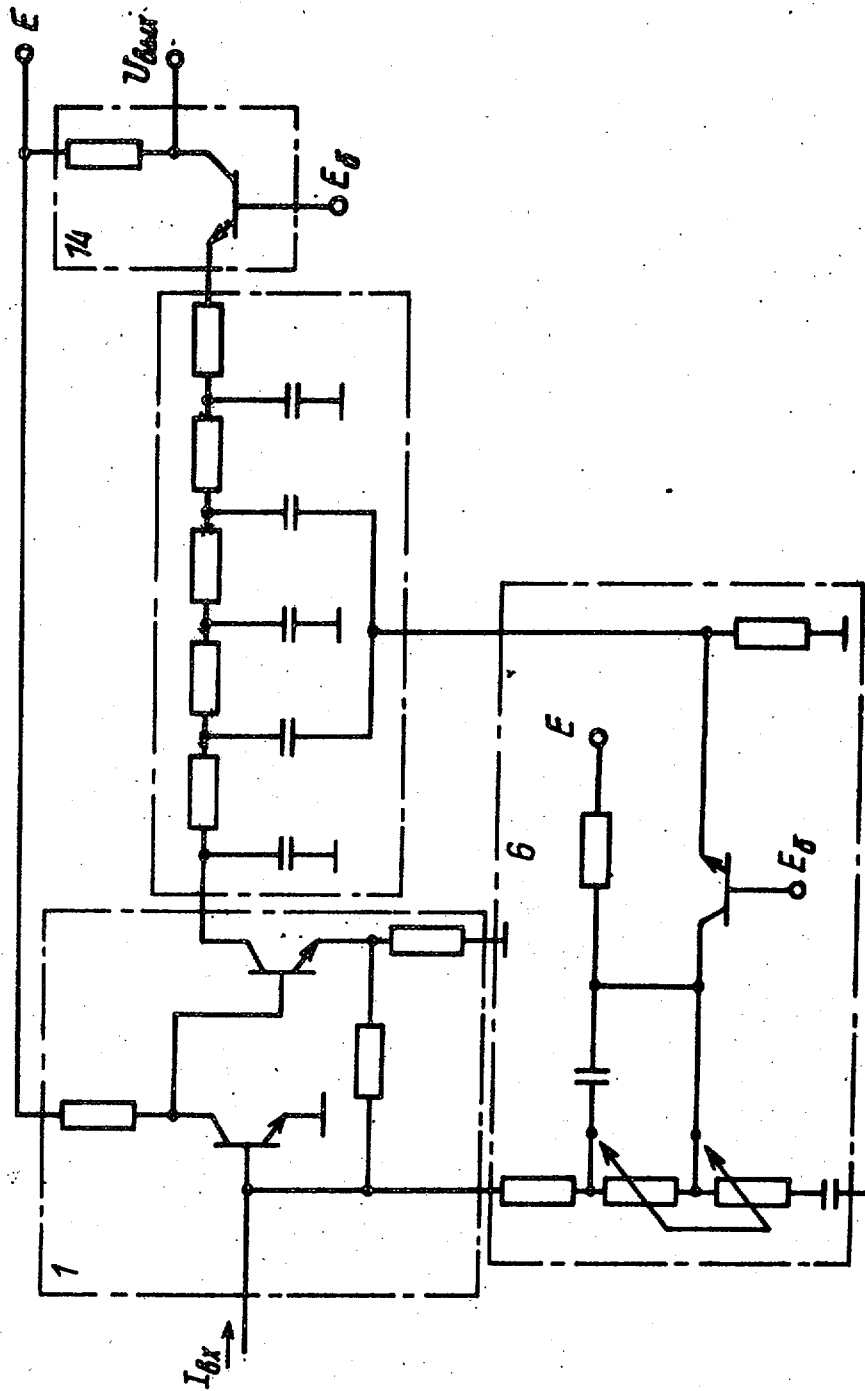
Формула изобретения

1. Перестраиваемый активный RC-фильтр, содержащий последовательно соединенные источник тока, управляемый ток, первый и второй резисторы, вход источника тока, управляемого ток, является входом перестраиваемого активного RC-фильтра, первый вывод первого резистора через первый кон-

денсатор соединен с общей шиной, а второй вывод первого резистора соединен с первым выводом второго конденсатора, отличающийся тем, что, с целью повышения крутизны спада амплитудно-частотной характеристики, введено регулируемое фазосдвигающее звено, выход которого соединен с входом источника тока, управляемого ток, а вход регулируемого фазосдвигающего звена соединен с вторым выводом второго конденсатора.

2. Активный RC-фильтр по п. 1, отличающийся тем, что регулируемое фазосдвигающее звено выполнено в виде последовательно соединенных усилителя тока, третьего конденсатора и третьего резистора, выход усилителя тока соединен через четвертый резистор с общей шиной, а второй вывод третьего конденсатора через последовательно соединенные первый и второй переменные резисторы и четвертый конденсатор соединен с общей шиной, а точка соединения первого и второго переменного резисторов соединена с выходом усилителя тока.





Фиг. 3

Редактор О. Головач      Составитель Ю. Чернышов      Корректор Т. Палий  
 Техред М. Дидык

Заказ 1456      Тираж 655      Подписное

ВНИИПИ Государственного комитета по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР  
 113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., д. 4/5

Производственно-издательский комбинат "Патент", г. Ужгород, ул. Гагарина, 101