

УДК 520.2.064.4 EDN RONIQU

Оценка влияния обратной связи на характеристики фильтров в системах космической связи

В. В. Крутских, к. т. н., *KrutskikhVV@mpei.ru*

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»», Москва, Российская Федерация

А. Ю. Сизякова, к. т. н., *SiziakovaAY@mpei.ru*

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»», Москва, Российская Федерация

А. Н. Ушков, *UshkovAN@mpei.ru*

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»», Москва, Российская Федерация

Д. Ю. Фролов, *FrolovDmY@mpei.ru*

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»», Москва, Российская Федерация

Д. С. Чукашов, *ChukashovDS@mpei.ru*

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»», Москва, Российская Федерация

А. Ю. Трофимов, *TrofimovAnY@mpei.ru*

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»», Москва, Российская Федерация

Д. С. Селин, *cellarbo@yandex.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Э. Мирзоян, *m.artavazd@yandex.ru*

АО «НПК «СПП»», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В настоящей статье предложено исследование влияния дестабилизирующих внешних факторов на характеристики фильтров систем связи, синтезируемых на базе многокаскадных конструкций с однородным базисом. В качестве исследуемых характеристик в работе приводятся графики стабильности АЧХ полосового фильтра при изменении рабочей температуры и величины разброса номиналов пассивных компонентов схемы устройства. На основе анализа и исследования характеристик двух схем фильтров — с отрицательной обратной связью и без нее — проведена оценка повышения стабильности фильтра в частотной области при рассмотренных неустойчивостях. Для анализа влияния был осуществлен синтез фильтра Баттерворта восьмого порядка, а также проведен анализ характеристик при помощи пакетов численного моделирования. В ходе исследования показано, что применение однородного базиса в сочетании с обратными связями позволяет достичь значительного снижения температурной неустойчивости и влияния разбросов номиналов элементов на центральную частоту и ширину полосы пропускания фильтра. Полученные результаты подтверждают эффективность применения узлов с обратной связью с целью повышения надежности малошумящих приемников сигналов систем космической связи и в других областях, требующих высокой стабильности параметров.

Ключевые слова: активный полосовой фильтр, полосовой фильтр с обратной связью, амплитудно-частотная характеристика, температурная стабильность, проектирование фильтров, однородный базис

Для цитирования: Крутских В. В., Сизякова А. Ю., Ушков А. Н., Фролов Д. Ю., Чукашов Д. С., Трофимов А. Ю., Селин Д. С., Мирзоян А. Э. Оценка влияния обратной связи на характеристики фильтров в системах космической связи. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2025. Т. 12. № 1. С. 52–63.

Evaluation of the Feedback Effect on Filter Characteristics in Space Communication Systems

V. V. Krutskikh, *Cand. Sci. (Engineering), KrutskikhVV@mpei.ru*
NRU “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation

A. Yu. Sizyakova, *Cand. Sci. (Engineering), SizyakovaAY@mpei.ru*
NRU “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation

A. N. Ushkov, *UshkovAN@mpei.ru*
NRU “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation

D. Yu. Frolov, *FrolovDmY@mpei.ru*
NRU “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation

D. S. Chukashov, *ChukashovDS@mpei.ru*
NRU “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation

A. Yu. Trofimov, *TrofimovAnY@mpei.ru*
NRU “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation

D. S. Selin, *cellarbo@yandex.ru*
Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

A. E. Mirzoyan, *m.artavazd@yandex.ru*
Joint-Stock Company “Research and Production Corporation” Precision Instrument Systems”,
Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper proposes a study of the influence of destabilizing external factors on the characteristics of communication system filters synthesized based on multistage structures with a homogeneous basis. As the studied characteristics, the paper provides stability graphs of the frequency response of a bandpass filter with a change in the operating temperature and magnitude of the range of ratings of the passive components of the device circuit. Based on the analysis and study of the characteristics of two filter circuits: with and without negative feedback, an evaluation was made considering the increase in the stability of the filter in the frequency domain with the instabilities considered. To analyze the effect, an eighth-order Butterworth filter was synthesized, and the characteristics were analyzed using numerical modeling packages. The study shows that using a homogeneous basis in combination with feedback makes it possible to achieve a significant reduction both in temperature instability and the effect of variations in element ratings on the central frequency and bandwidth of the filter. The results obtained confirm the effectiveness of using feedback nodes in order to increase the reliability of low-noise signal receivers in space communication systems and other areas requiring high parameter stability.

Keywords: active bandpass filter, bandpass filter with feedback, frequency response, temperature stability, filter design, homogeneous basis

For citation: Krutskikh V. V., Sizyakova A. Yu., Ushkov A. N., Frolov D. Yu., Chukashov D. S., Trofimov A. Yu., Selin D. S., Mirzoyan A. E. Evaluation of the Feedback Effect on Filter Characteristics in Space Communication Systems. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2025. Vol. 12. No. 1. P. 52–63. (in Russian)

Введение

В настоящее время проектирование узлов для систем связи с целью повышения надежности и функциональной стабильности при условии внешнего воздействия на систему представляет важную область исследования [1]. При этом особое внимание заслуживают методы и методики, позволяющие повысить качество работы устройства [2]. Так, в радиоприемниках особое внимание отводится разработке фильтров, спроектированных, как правило, на базе активных элементов [3], таких как операционные усилители [4]. Одним из ключевых преимуществ активных фильтров перед пассивными является возможность регулировки неравномерностей частотной характеристики, а также снижение массогабаритных характеристик за счет использования полупроводниковых элементов вместо индуктивных [5]. При проектировании избирательных устройств возникает задача обеспечения стабильной формы АЧХ во всей рабочей области, которая существенно зависит от разброса номиналов параметров компонентов и температурных флуктуаций, связанных с рабочими условиями устройства. Указанный фактор применения конструкций устройств требует использования технических решений, минимизирующих чувствительность функциональных узлов к внешним факторам [6].

В рамках настоящей работы предложена оценка влияния температурной нестабильности и разброса номиналов компонентов обвязки активных фильтров в системах связи. При этом в работе предлагается опираться на многокаскадную избирательную систему, использующую однородный базис, что позволяет упростить процесс разработки фильтра под заданные условия задачи характеристики [7].

Таким образом, целью работы является оценка влияния обратной связи в схемах многокаскадных фильтров на амплитудно-частотную характеристику при различных условиях нестабильности.

В качестве анализируемых параметров в работе исследуются центральная частота фильтра и полоса пропускания. Также для качественной оценки необходимо исследовать вид АЧХ и ее искажений.

Синтез фильтра на базе однородных звеньев

При проектировании приемной части системы связи с целью уменьшения влияния синфазной помехи используют, как правило, схему полосового фильтра (ПФ) с дифференциальным подключением сигналов, которая показана на рис. 1.

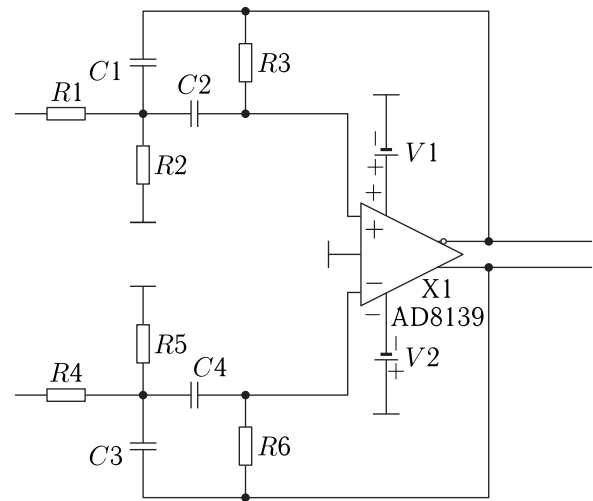


Рис. 1. Базовое звено полосно-пропускающего фильтра
Fig. 1. Basic section of the bandpass filter

В этом случае приходится настраивать каждое из плеч, точно подбирая параметры пассивных элементов обвязки звеньев. В этой связи оценка чувствительности характеристик полосового фильтра к разбросу параметров элементов становится актуальной задачей, поскольку требуется не только подобрать элементы из заданного ряда номиналов, но и обеспечить наиболее близкое соответствие для каждого из плеч схемы. Достоинствами такого решения, опирающегося на активный RC -фильтр на основе однородного базиса элементов, является удобство в перестройке, простота настройки и высокая стабильность частотных характеристик [8].

Для задач нашего исследования, а именно оценке влияния температурной стабильности характеристик фильтра и влияния разброса номиналов будем опираться на многокаскадную схему с однородными звеньями, где первый каскад будет выполнен на основе схемы с дифференциальным подключением каналов. Расчет базисного звена опирается на схему полосового фильтра,

синтезируемого на основе НЧ-прототипа с полиномиальной аппроксимацией 8-го порядка по Баттерворту при неравномерности затухания в полосе пропускания 3 дБ. Выбранная схема обеспечивает частотную стабильность с минимальными искажениями сигнала в рабочей полосе и именно на ней целесообразно рассматривать исследуемые неустойчивости.

Для синтеза требуемого фильтра на первом этапе происходит поиск НЧ-прототипа фильтра [9]:

$$T_H(s) = \frac{1}{s^4 + 2,613s^3 + 3,414s^2 + 2,613s + 1}, \quad (1)$$

где s — операторный коэффициент преобразования Лапласа.

Следующим этапом проектирования фильтра будет расчет общей передаточной характеристики [10]

$$T(s) = T_0 T_H(s), \quad (2)$$

где T_0 — максимальный модуль коэффициента передачи синтезируемого фильтра для ФВЧ или ФНЧ, $T_H(s)$ — нормированный НЧ-прототип, определяет форму АЧХ, ФЧХ синтезируемого фильтра.

Опираясь на работы [11] и [12], выбрали тип базового звена с требуемой частотной характеристикой и предложили частотное преобразование для ПФ:

$$s(p) = \frac{p^2 + \omega_p^2}{\Delta\omega p}, \quad (3)$$

где ω_p — средняя частота синтезируемого фильтра, $\Delta\omega$ — полоса пропускания синтезируемого фильтра.

Следующим этапом производится расчет ненормированного прототипа базового звена:

$$k(s) = k_0 k_H(s). \quad (4)$$

В качестве базового звена выберем полосовой фильтр 2-го порядка с передаточной функцией следующего в формуле 5-го вида:

$$k(p) = k_0 \frac{\Delta\Omega p}{p^2 + \Delta\Omega p + \omega_p^2}, \quad (5)$$

где k_0 — максимальный модуль коэффициента передачи БЗ, ω_p — средняя частота синтезируемого фильтра, $\Delta\Omega = \Delta\omega$, т. е. полосы БЗ и синтезируемого фильтра совпадают.

В соответствии с полученной передаточной характеристикой фильтра базовое звено будет реали-

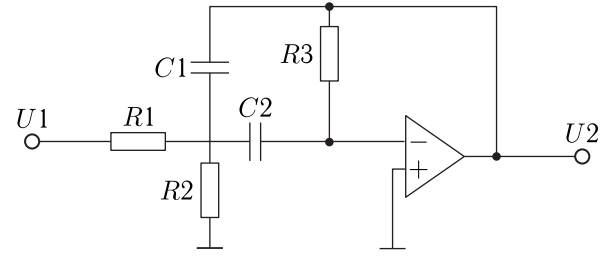


Рис. 2. Схема базового звена ПФ 2-го порядка на одном операционном усилителе

Fig. 2. Circuit of the basic link the 2nd order bandpass filter on one operational amplifier

зовано на полосовом фильтре Баттерворта 2-го порядка, который показан на рис. 2.

Проведем расчет параметров для базового звена, представленного на рис. 2. При заданных параметрах ω_0 , ρ , β , γ значения сопротивлений в схеме определяются из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{\rho\omega_0 C_1}, \\ R_2 &= \frac{\beta}{(C_1[\gamma - \rho\beta] + \gamma C_2)\omega_0}, \\ R_3 &= \frac{1}{\beta\omega_0} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где C_1 , C_2 имеют произвольные значения.

Предпочтительно выбрать значения емкостей C_1 (близкое к значению $\frac{10}{f_0}$ мкФ), C_2 так, чтобы $R_2 > 0$, и определить значения сопротивлений. Значение емкости из условия:

$$C_2 > \frac{C_1(\rho\beta - \gamma)}{\gamma}. \quad (7)$$

В качестве примера предположим, что необходимо реализовать ППФ восьмого порядка.

Исходя из справочника [3] полосно-пропускающий фильтр реализуется в виде последовательного соединения ФВЧ и ФНЧ второго порядка. Типовая передаточная функция ППФ второго порядка Баттерворта записывается в виде:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{K}{Q}\omega_0 s}{s^2 + \frac{1}{Q}\omega_0 s + \omega_0^2}, \quad (8)$$

где Q — добротность фильтра, ω_0 — частота среза синтезируемого фильтра для ПФ $K = 1$.

Из работы [3] определяются коэффициенты ФНЧ и ФВЧ Баттерворта 2-го порядка: $B = 1,414214$, $C = 1$. Коэффициенты E и D находятся по соотношениям:

$$E = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{C + 4Q^2 + \sqrt{(C + 4Q^2)^2 - (2BQ)^2}}{2}}. \quad (9)$$

Определим коэффициент D :

$$D = \frac{1}{2} \left[\frac{BE}{Q} + \sqrt{\left(\frac{BE}{Q}\right)^2 - 4} \right]. \quad (10)$$

Таким образом, для каждого сомножителя второго порядка в соответствующем фильтре нижних частот и верхних частот передаточная функция полюсно-пропускающего фильтра Баттерворта будет содержать рассчитанные выше коэффициенты.

После преобразования получим итоговую формулу:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\rho\omega_0 s}{s^2 + \beta\omega_0 s + \gamma\omega_0^2}. \quad (11)$$

Емкость первого конденсатора C_1 находится из выражения

$$C_1 = \frac{10 \text{ мкФ}}{f_0}. \quad (12)$$

Заметим, что все номиналы емкостей и сопротивлений в работе берутся по ряду E96.

Теперь перейдем к синтезу первого входного каскада, который проводится по аналогичной методике с синтезом базового звена. Здесь нормированный коэффициент передачи находится по соотношению

$$T(s) = T_0 \frac{1}{s^4 + 2,613s^3 + 3,414s^2 + 2,613s + 1}, \quad (13)$$

где T_0 — максимальный модуль коэффициента передачи синтезируемого фильтра.

Нормированная передаточная функция прототипа будет равна:

$$k_H(s) = \frac{1}{1 + as}, \quad (14)$$

где a — параметр соотношения полос БЗ и синтезируемого фильтра.

В нашем случае полагаем равенство полос БЗ и синтезируемого фильтра, поэтому

$$a = \frac{\Delta\Omega}{\Delta\omega} = 1, \quad (15)$$

где $\Delta\Omega$ — полоса пропускания синтезируемого звена, $\Delta\omega$ — полоса пропускания синтезируемого фильтра.

Отсюда ненормированная передаточная характеристика прототипа примет вид:

$$k(s) = \frac{k_0}{1 + s}, \quad (16)$$

где k_0 — максимальный модуль коэффициента передачи звена.

После частотного преобразования итоговое выражение принимает вид:

$$T(k) = T_0 \left(\frac{k}{k_0} \right)^4 / \left(0,188 \left(\frac{k}{k_0} \right)^4 - 0,376 \left(\frac{k}{k_0} \right)^3 + 1,575 \left(\frac{k}{k_0} \right)^2 - 1,387 \frac{k}{k_0} + 1 \right), \quad (17)$$

где T_0 — максимальный модуль коэффициента передачи синтезируемого фильтра.

Зная выражение $T(k)$, можно определить сопротивления в цепи обратной связи активного фильтра Баттерворта 8-го порядка. Номиналы сопротивлений будем определять путем деления зафиксированного сопротивления на каждый коэффициент знаменателя.

Одной из существенных проблем, возникающих при эксплуатации полосового фильтра, является изменение его ключевых характеристик, таких как центральная частота и полоса пропускания при изменении рабочей температуры и разброса номиналов элементов. Для решения данной проблемы предлагается использовать отрицательные обратные связи, которые способны уменьшить влияние параметров фильтра в условиях температурных колебаний и разброса номиналов компонентов.

Расчет ООС производится из условий обеспечения единичного коэффициента усиления у суммирующего элемента по соотношениям:

$$\begin{aligned} R_{oc1} &= \frac{R_{1,2}}{1,387}, & R_{oc2} &= \frac{R_{1,2}}{1,575}, \\ R_{oc3} &= \frac{R_{1,2}}{0,376}, & R_{oc4} &= \frac{R_{1,2}}{0,188}. \end{aligned} \quad (18)$$

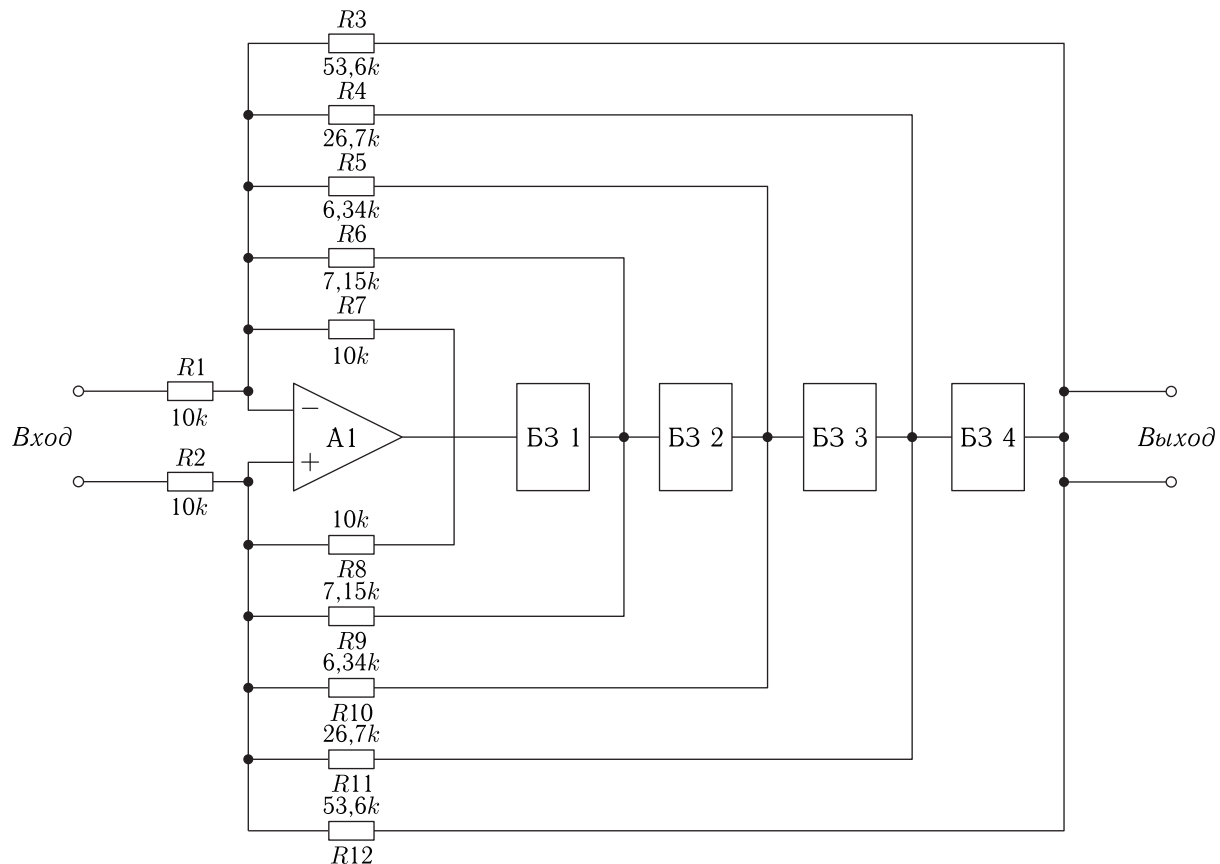


Рис. 3. Схема ПФ Баттерворта 8-го порядка с отрицательными обратными связями
 Fig. 3. Circuit of the 8th order Butterworth bandpass filter with negative feedbacks

Для создания полосового фильтра Баттерворта 8-го порядка в работе необходимо каскадно подключить базовые звенья, и добавить дополнительный суммирующий элемент для подключения обратных связей (ОС) элементов фильтра, как показано на рис. 3.

Таким образом были получены исследуемые схемы, без обратной связи и с обратной связью, изображенные на рис. 4. Для этих схем были разработаны численные модели описывающие передаточную характеристику фильтра при помощи отношений напряжений на выходе и на входе узла.

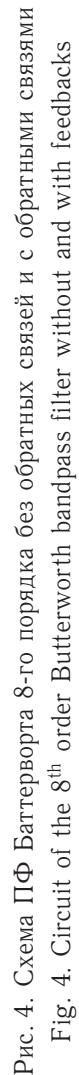
Проверка корректности модели и расчетов фильтра осуществлялась путем сравнения передаточных характеристик, которые совпали с точностью до 1 %, что отражено на рис. 5.

Дальнейшее исследование поведения при изменении рабочих условий проводилось на базе разработанной модели.

Влияние разброса номиналов элементов на характеристики фильтра

Одним из наиболее важных влияний на характеристики устройств, рабочие режимы и состояния оказывают нестабильности, связанные с изменением номиналов элементов. Изменения могут быть связаны с отсутствием теоретически рассчитанных значений в таблице стандартных элементов, что приводит к изменению характеристик фильтра и оказывает влияние на работу всей системы. Так, на рис. 6 показан случай изменения АЧХ синтезированного фильтра для схемы с обратной связью и без нее.

Необходимо отметить, что схема без обратной связи показала значительный уход характеристик фильтра и рост искажений, более выделенный на низких частотах. Для схемы с обратной связью



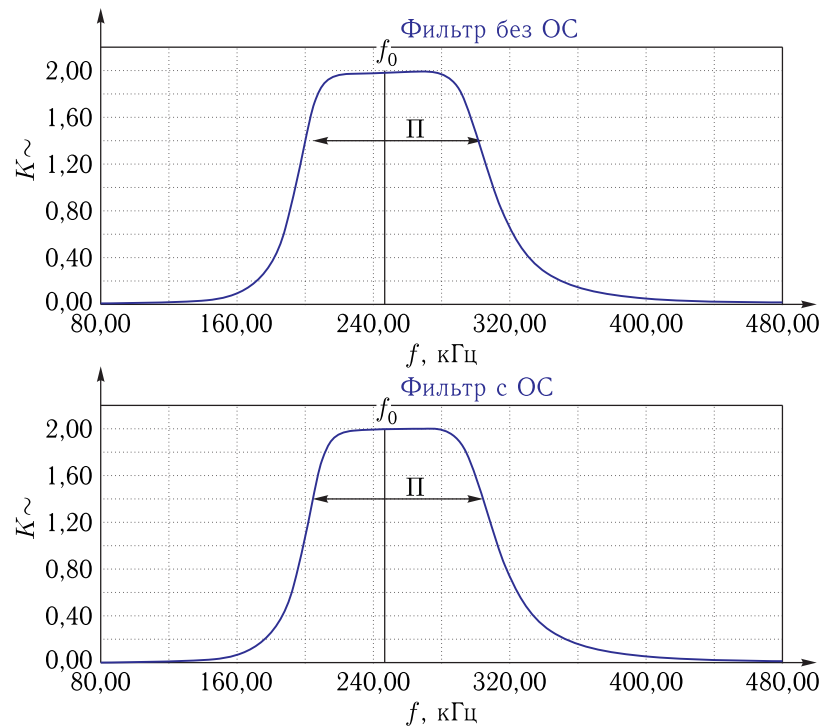


Рис. 5. Семейство АЧХ полосовых фильтров: без обратной связи (вверху) и с обратной связью (внизу)
 Fig. 5. Family of bandpass filters: without feedback (top) and with feedback (bottom)

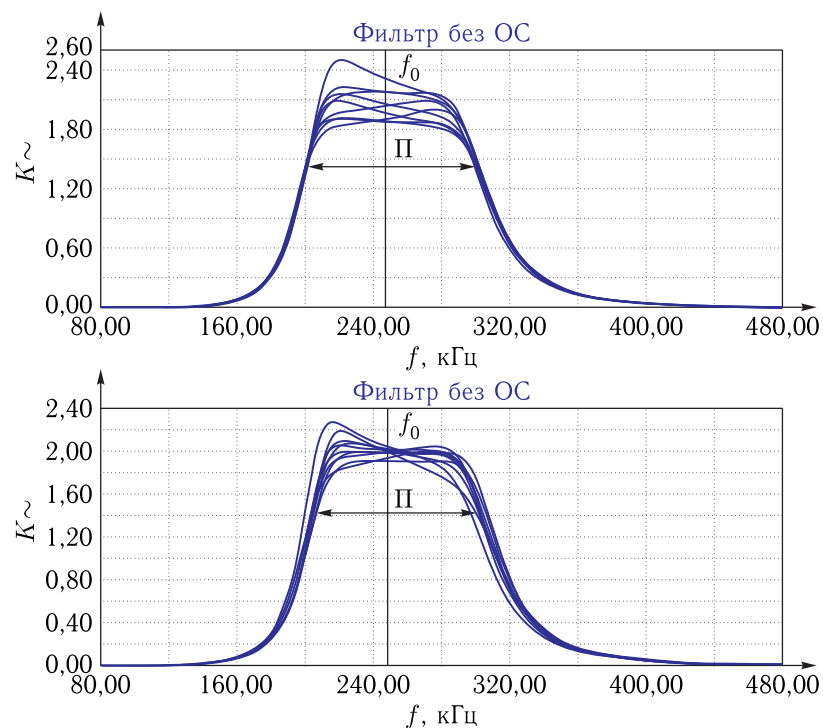


Рис. 6. Семейство АЧХ полосовых фильтров при изменении разброса номиналов элементов: без обратной связи (вверху) и с обратной связью (внизу)
 Fig. 6. Family of bandpass filters when changing in the range of element ratings: without feedback (top) and with feedback (bottom)

характер поведения АЧХ имеет схожий вид, но обладает меньшими значениями. Так, на графике зависимостей центральной частоты и полосы пропускания фильтра, изображенного на рис. 7, видно, что в схеме с обратной связью наблюдается сохранение рассчитанных значений характеристик при изменении номиналов емкостей и сопротивлений до 5 %.

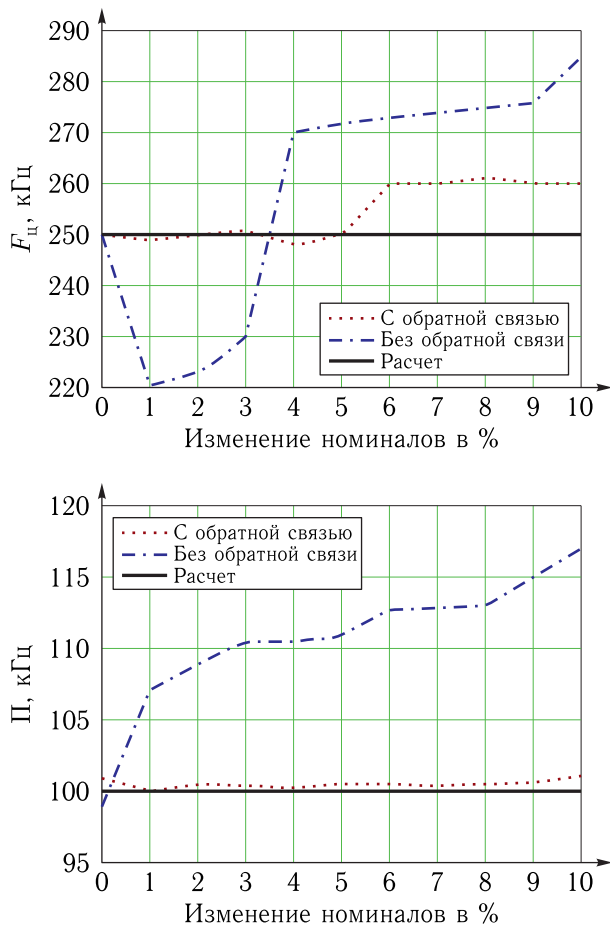


Рис. 7. Оценка изменения центральной частоты фильтра и его полосы пропускания от изменения номиналов элементов

Fig. 7. Evaluating the change in the filter center frequency and its bandwidth from the change in element ratings

На дальнейшем участке наблюдается изменение центральной частоты на 4 % с дальнейшей стабилизацией. При этом полоса пропускания фильтра остается близкой к рассчитанному значению и ее погрешность не превышает 1 %. В случае когда обратная связь отсутствует и искажения имеют более резкий вид, изменение центральной частоты

составляет 16 % при 10 % изменении номиналов пассивных элементов и на 18 % происходит увеличение полосы пропускания, что снижает устойчивость узла и понижает характеристику отношения мощности сигнала к мощности шума. Последнее происходит из-за увеличения полосы пропускания фильтра при сохранении рабочего частотного диапазона, связанного со спектром сигнала.

Влияние разброса номиналов и изменения температуры на характеристики фильтра

В качестве второго эксперимента была исследована температурная нестабильность схем в диапазоне от -40°C до 100°C с шагом 5°C . При этом обе схемы показали высокую стабильность и надежность. Это проявилось в изменении центральной частоты и полосы пропускания фильтра не более чем на 1 %. При этом на АЧХ фильтра были заметны искажения в области высоких частот полосы пропускания фильтра.

В связи с незначительными изменениями характеристик при изменении температуры третьим экспериментом было решено рассмотреть наихудший вариант, когда присутствуют обе нестабильности. А именно изменение номиналов и температуры. Указанные зависимости показаны на рис. 8, где характерным отличием является то, что АЧХ схемы с обратными связями демонстрирует сохранение значений вблизи центральной частоты и незначительное изменение полосы. Указанный характер важен, так как при передаче и приеме сигналов на центральной частоте находится основная мощность сигнала и, соответственно, заложенная информация. Поэтому для обработки сигналов и выделения информационной составляющей важно сохранение значения центральной частоты. Оценка изменения центральной частоты и полосы пропускания фильтров от изменения температуры при номиналах пассивных элементов, близких к рассчитанным, показана на рис. 9.

Здесь характерно, что в нормальных условиях или близких к ним ($0-20^{\circ}\text{C}$) характеристики обеих схем незначительно отличаются от рассчитанного значения. С увеличением отклонения температуры

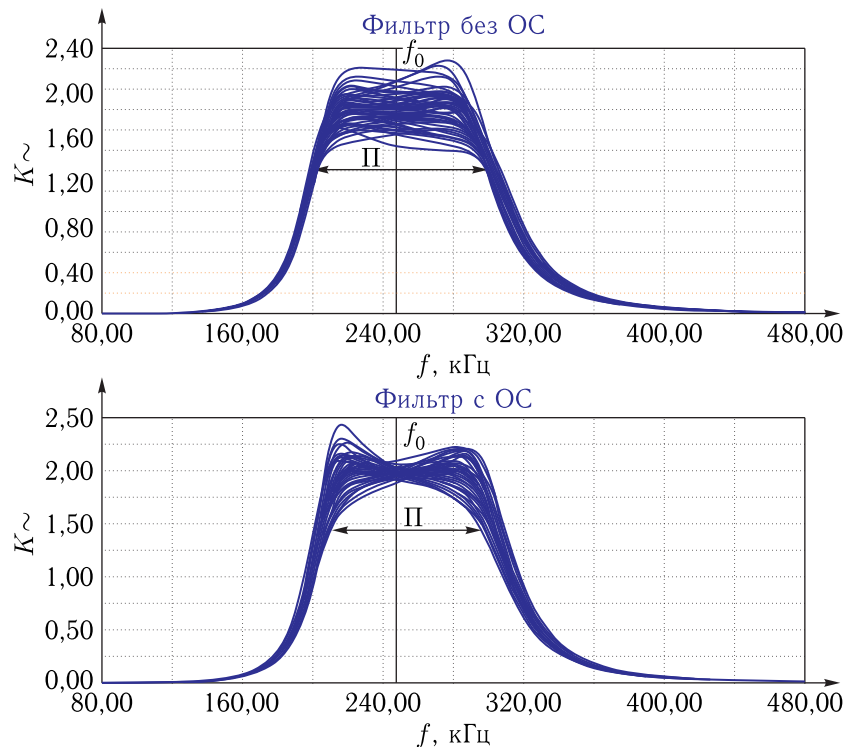


Рис. 8. Семейство АЧХ полосовых фильтров при изменении разброса номиналов элементов и температуры: без обратной связи (вверху) и с обратной связью (внизу)

Fig. 8. Family of bandpass filters when changing in the range of element ratings and temperature: without feedback (top) and with feedback (bottom)

схема с обратной связью позволяет сохранить заданные характеристики, и погрешность не превышает 0,5%. В то время как схема без обратной связи имеет максимальное отклонение центральной частоты на 8% и 1% отклонение полосы пропускания.

При увеличении разброса номиналов ситуация ухудшается в 2–3 раза, что практически не заметно при проектировании системы с отрицательными обратными связями, где нестабильность характеристик не превышает 5%.

Результаты

1. Полученные результаты показывают, что системы, построенные на базе идентичных звеньев, являются устойчивыми при нормальных температурных условиях, но при их изменении более чем на 20 °C происходят искажения АЧХ и изменение характеристик фильтра, что требует введения отрицательной обратной связи или введения температурных ограничений применения устройства.

2. В рамках работы была изучена эффективность использования полосовых активных фильтров на основе многокаскадной системы с однородным базисом. Анализ показал, что использование отрицательных обратных связей обеспечивает сохранение стабильности АЧХ при изменении температуры и разбросе параметров элементов и гарантирует ее отклонение не более чем на 5%.

3. Фильтры без обратных связей продемонстрировали выраженные искажения АЧХ, проявляющиеся в изменении центральной частоты и расширении полосы пропускания. Отметим, что наибольший практический вред наносит уход центральной частоты, который в рамках работы изменялся на 8%, что недопустимо для систем космической связи.

4. Фильтры с обратными связями сохранили стабильность характеристик даже при существенных изменениях номиналов и температурной нестабильности. Максимальный уход центральной частоты и увеличение полосы пропускания не превысили 1%.

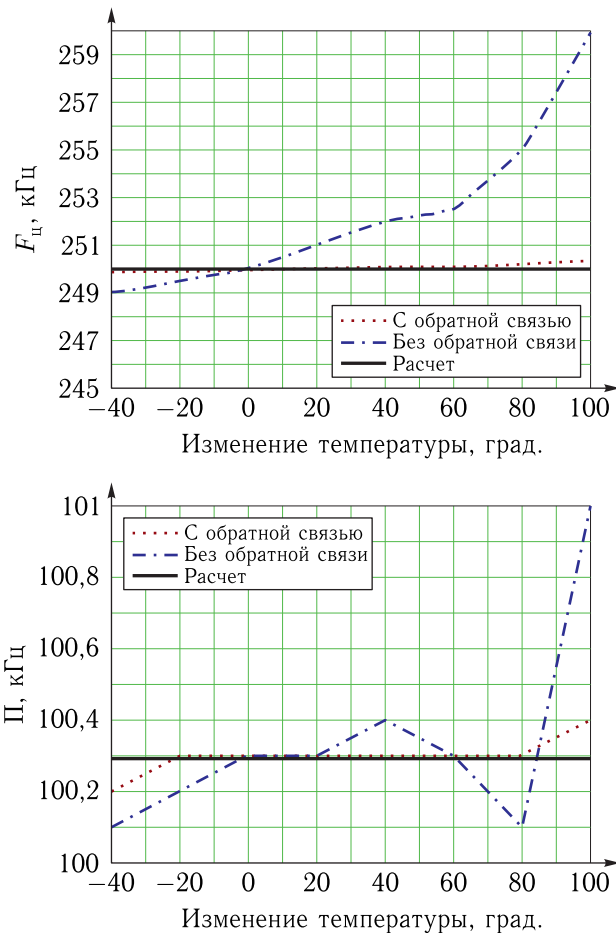


Рис. 9. Оценка изменения центральной частоты фильтра и его полосы пропускания от температуры
Fig. 9. Evaluating the change in the filter center frequency and its bandwidth from temperature

5. Температурная нестабильность фильтров была практически полностью устранена при использовании дополнительных обратных связей. Оценка влияния обратной связи показала перспективность использования фильтров на базе идентичных звеньев в приемниках сигналов, где требуется высокая точность обработки, в частности, в системах космической и гидроакустической связи и подводной навигации.

Заключение

Изменение температурных режимов работы устройств и отличие номиналов элементов от теоретически рассчитанных является наиболее рас-

пространенными факторами изменения характеристик узлов, что требует своего анализа и учета, особенно в высокоточных системах связи. Представленная работа подчеркивает важность исследования устойчивости функциональных узлов к внешним воздействиям и нестабильностям с целью оценки уровня влияния технических решений для борьбы с ними. Повышение надежности систем и качества их работы является стратегически важным направлением отрасли, опирается на современные методы проектирования высокостабильных устройств и их эксплуатации в сложных условиях. Также для систем космической связи стабильность фильтров в приемных устройствах представляет особое значение, так как повышает отношение мощности сигнала к шуму и снижает уровень искажений.

Список литературы

1. Vytovtov K. *et al.* Local Radar Navigation System for Tethered High-Altitude Platforms / 2023 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). IEEE, 2023. P. 1–5.
2. Bogdanovich B. Y., Buyanov G. O., Nesterovich A. V. Calculation of a system for forming a bremsstrahlung beam in discretely falling magnetic field // Atomic Energy, 2022, vol. 131, № 6. P. 348–353.
3. Kumar V. A. *et al.* Flexible and High Throughput Designs of Operational Amplifiers / 2024 IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI). IEEE, 2024, vol. 2. P. 1–6.
4. Kaushik R., Kaur J. Design of folded cascode op amp and its application–bandgap reference circuit // Circuit World, 2024, vol. 50, № 1. P. 9–17.
5. Krutskikh V. V. *et al.* Industrial Internet of Things Algorithms for Fire Safety System Control / 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2024. P. 853–858.
6. Ushkov A. N. *et al.* Radio Navigation Algorithms for Tasks of Industrial Internet of Things / 2024 International Russian Smart Industry Conference (Smart-IndustryCon). IEEE, 2024. P. 592–598.
7. Rukovishnikov N. N., Malyshev A. P., Brovko T. A., Evseev A. D., Kulikov R. S. and Afinogenov A. E.

- Investigation the UWB Local Navigation System Relative Positioning Error for UAV / 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Novosibirsk, Russian Federation, 2023, p. 620–623.
8. *Chugunov A., Kulikov R., Malyshev A., Petukhov N., Brovko T. and Savin M.* Experimental Evaluation of Positioning Efficiency in TDoA Navigation System Based on UWB / 2022 Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), Yekaterinburg, Russian Federation, 2022, p. 171–174, bdoi: 0.1109/USBREIT56278.2022.9923331.
 9. *Школьный В.Н., Сунцов С.Б., Кондратенко А.В., Шишкин Д.А., Алексеев К.А., Карабан В.М.* Проектирование и испытания рНЕМТ GaAs МИС коммутируемого по входу МШУ собственного производства для аппаратуры автономной радионавигации КА // Вестник Сибирского федерального университета. Инженерия и технологии, 2016, т. 9, № 2. С. 204–213.
 10. *Карабан В.М., Зырин И.Д., Сунцов С.Б., Школьный В.Н.* Физическое проектирование пассивных интегральных компонентов приемника ГНСС-сигналов на основе технологии низкотемпературной керамики // Вестник Сибирского федерального университета. Инженерия и технологии, 2016, т. 9, № 4. С. 513–522.
 11. *Гусев С.Н., Миклин Д.В., Мороз А.В., Сахно И.В., Шерсток А.В.* Полунатурное моделирование цифрового канала передачи данных в ультразвуковом диапазоне длин волн // Труды МАИ, 2020, № 113.
 12. *Исса М., Суханов Д.Я.* Разработка и анализ системы с множеством излучателей и множеством приемников для исследовательских целей // Доклады ТУСУР, 2022, т. 25, № 2. С. 22–28.
- Дата поступления рукописи
в редакцию 16.01.2025
Дата принятия рукописи
в печать 26.02.2024