

УДК 621.396

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-135-141

Влияние режекторного фильтра на эффективность линейаризации фазочастотной характеристики аналогового полосового фильтра

Ю.А. Гребенко, Р.И. Поляк

В опубликованных ранее работах по этой теме рассмотрены методы линейаризации фазочастотных характеристик аналоговых фильтров с использованием цифровых линейаризующих КИХ-фильтров. При наличии узкополосных помех в рабочей полосе частот возникает необходимость их подавления с помощью узкополосного аналогового режекторного фильтра (РФ). При последовательном включении РФ линейаризованная фазочастотная характеристика (ФЧХ) может исказиться.

В статье проанализировано влияние аналогового узкополосного РФ на эффективность процедуры линейаризации фазочастотных характеристик аналогового комплексного полосового фильтра с помощью комплексного линейаризующего полосового цифрового КИХ-фильтра. Исследование проводили с использованием программы схемотехнического моделирования на базе модели, состоящей из следующих модулей: аналогового комплексного полосового фильтра с НЧ-прототипом Баттерворта 6-го порядка, узкополосного аналогового комплексного режекторного фильтра с НЧ-прототипом Баттерворта 3-го порядка и цифрового комплексного полосового линейаризующего КИХ-фильтра. Приведены результаты исследования диапазона частот, в котором происходит приемлемое нарушение линейности фазочастотной характеристики. В окрестности частот режекции имеет место резкое изменение уровня группового времени запаздывания (ГВЗ). Частотным диапазоном потери эффекта линейаризации называется диапазон частот, в котором неравномерность ГВЗ больше чем неравномерность ГВЗ до линейаризации. В том случае если разность граничных частот полосы пропускания РФ много меньше полосы комплексного полосового фильтра (десять раз) эффект линейаризации сохраняется в большей части полосы пропускания. При выбранных порядках и параметрах аналогового комплексного и режекторного фильтров диапазон частот, в котором исчезает эффект линейаризации, примерно в 7 раз превышает разность граничных частот полосы пропускания РФ. Подобный подход актуален при фильтрации узкополосных помех в полосе широкополосных сигналов.

Ключевые слова: комплексные полосовой и режекторный фильтры, линейаризация фазочастотной характеристики.

Для цитирования: Гребенко Ю.А., Поляк Р.И. Влияние режекторного фильтра на эффективность линейаризации фазочастотной характеристики аналогового полосового фильтра // Вестник МЭИ. 2017. № 4. С. 135—141. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-135-141.

The Influence of a Band-Stop Filter on the Effectiveness of Linearizing the Analog Band-Pass Filter Phase Frequency Response

Yu.A. Grebenko, R.I. Polyak

The previously published works of the authors dealt with methods aimed at linearizing the phase frequency responses of analog filters using digital linearizing finite impulse response (FIR) filters. If the operating frequency band contains narrow-band interference, such interference often needs to be suppressed by using a narrow-band analog band-stop filter. However, when a band-stop filter is connected in series, the linearized phase frequency response may become distorted.

The article examines the influence of a narrow-band analog band-stop filter on the effectiveness of linearizing the phase frequency responses of a complex analog band-pass filter using a complex band-pass linearizing digital FIR filter. The study was conducted using a circuit simulation program based on a model consisting of the following modules: a complex analog band-pass filter with a sixth-order Butterworth low-pass filter prototype, a narrow-band complex analog band-stop filter with a third-order Butterworth low-pass filter prototype, and a complex digital band-pass linearizing FIR filter. The article presents the results from studying the frequency band in which the phase frequency response linearity is distorted to an acceptable degree. A sharp change in the group delay time level takes place in the stopband vicinity. The frequency band in which the group delay ripple is larger than the pre-linearization group delay ripple is referred to as the linearization effect loss band. If the difference between the band-stop filter's passband boundary frequencies is much (by dozens of times) smaller than the band of the complex band-pass filter, the linearization effect is retained over most of the passband. With the selected parameters and orders of the complex analog filter and band-stop filter, the frequency band in which the linearization effect vanishes is approximately seven times greater than the difference between the band-stop filter's passband boundary frequencies. Such an approach is relevant in filtering narrow-band interference within the frequency band of broadband signals.

Key words: complex band-pass filter, complex band-stop filter, linearization of phase frequency response.

For citation: Grebenko Yu.A., Polyak R.I. The Influence of a Band-Stop Filter on the Effectiveness of Linearizing the Analog Band-Pass Filter Phase Frequency Response. MPEI Vestnik. 2017; 4: 135—141. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-135-141.

Введение

В [1, 2] рассмотрены методы линеаризации фазочастотных характеристик аналоговых фильтров с использованием цифровых линеаризующих КИХ-фильтров. При наличии узкополосных помех в рабочей полосе частот возникает необходимость их подавления с помощью узкополосного аналогового РФ. При последовательном включении режекторного фильтра линеаризованная ФЧХ может исказиться. Приведены результаты исследования диапазона частот, в котором происходит приемлемое нарушение линейности ФЧХ.

Описание модели

Исследование проводили с использованием программы схемотехнического моделирования на базе мо-

дели, состоящей из следующих модулей: аналогового комплексного полосового фильтра с НЧ-прототипом Баттерворта 6-го порядка, узкополосного аналогового комплексного РФ с НЧ-прототипом Баттерворта 3-го порядка и цифрового комплексного полосового линеаризующего КИХ-фильтра. Режекторный аналоговый комплексный фильтр рассчитан по методике, изложенной в [3].

Модель комплексного полосового фильтра с НЧ-прототипом Баттерворта 6-го порядка [2] представлена на рис. 1.

Модель аналогового комплексного РФ с НЧ-прототипом Баттерворта 3-го порядка [3] показана на рис. 2.

В представленных на рис. 1, 2 моделях базовые идентичные комплексные звенья реализованы в виде макросов. Схема макроса представлена на рис. 3.

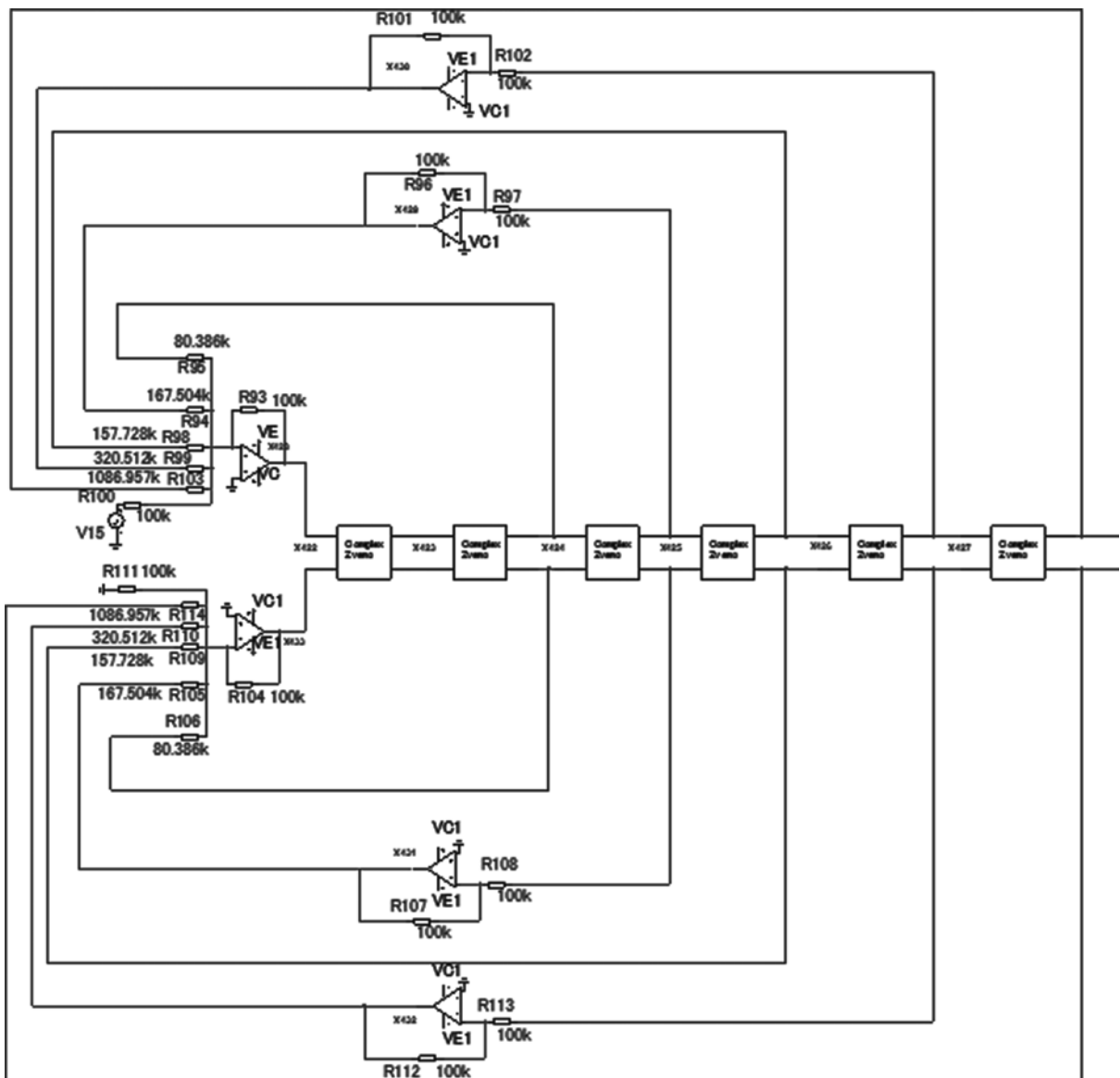


Рис. 1. Модель комплексного полосового фильтра с НЧ-прототипом Баттерворта 6-го порядка

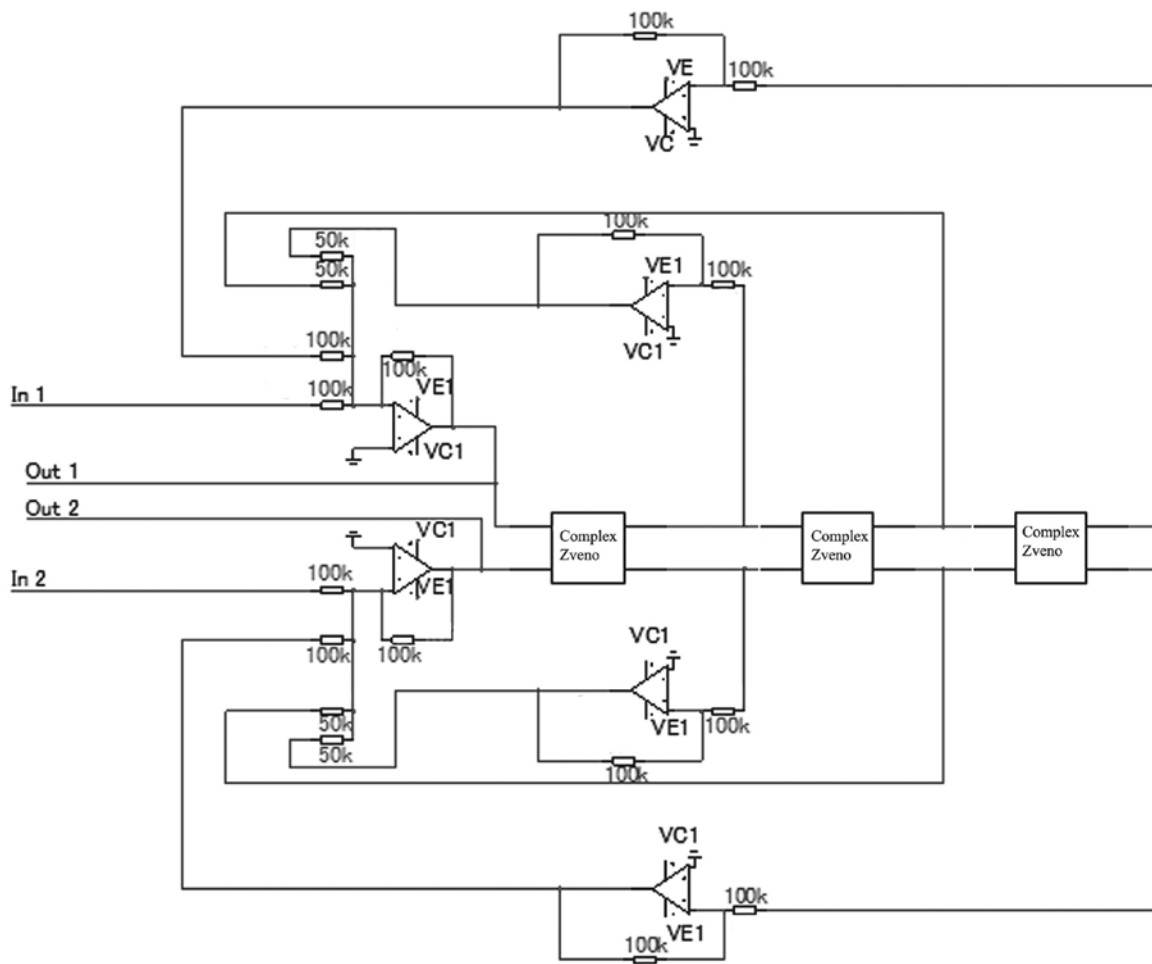


Рис. 2. Модель аналогового комплексного режекторного фильтра с НЧ-прототипом Баттерворта 3-го порядка

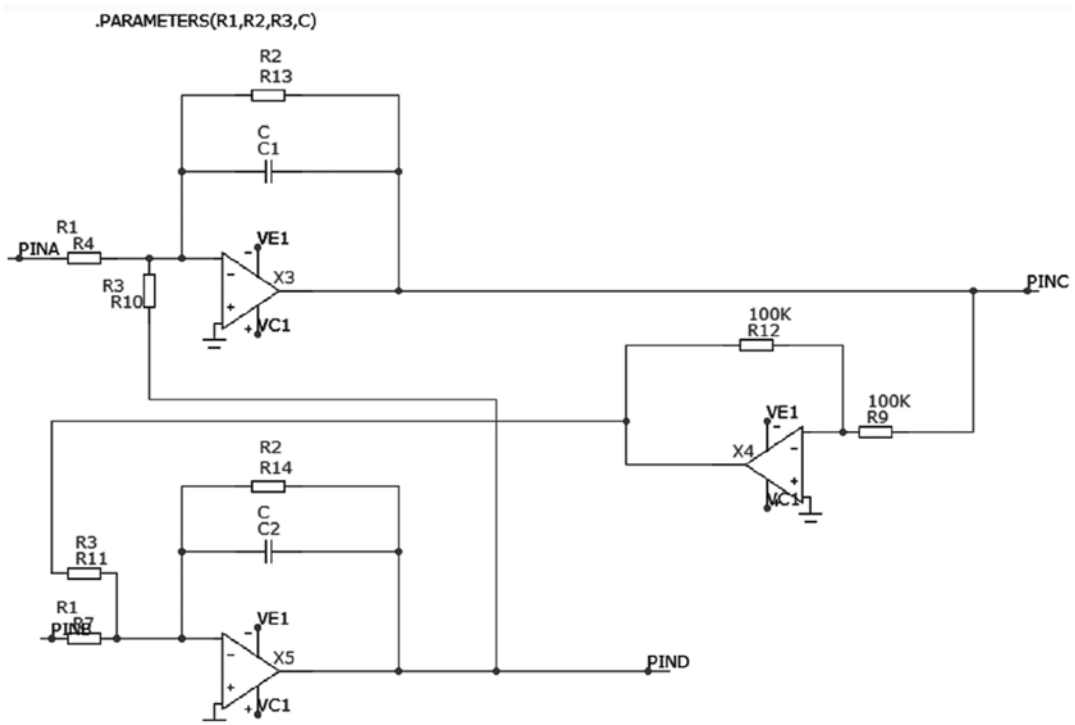


Рис. 3. Базовое комплексное звено

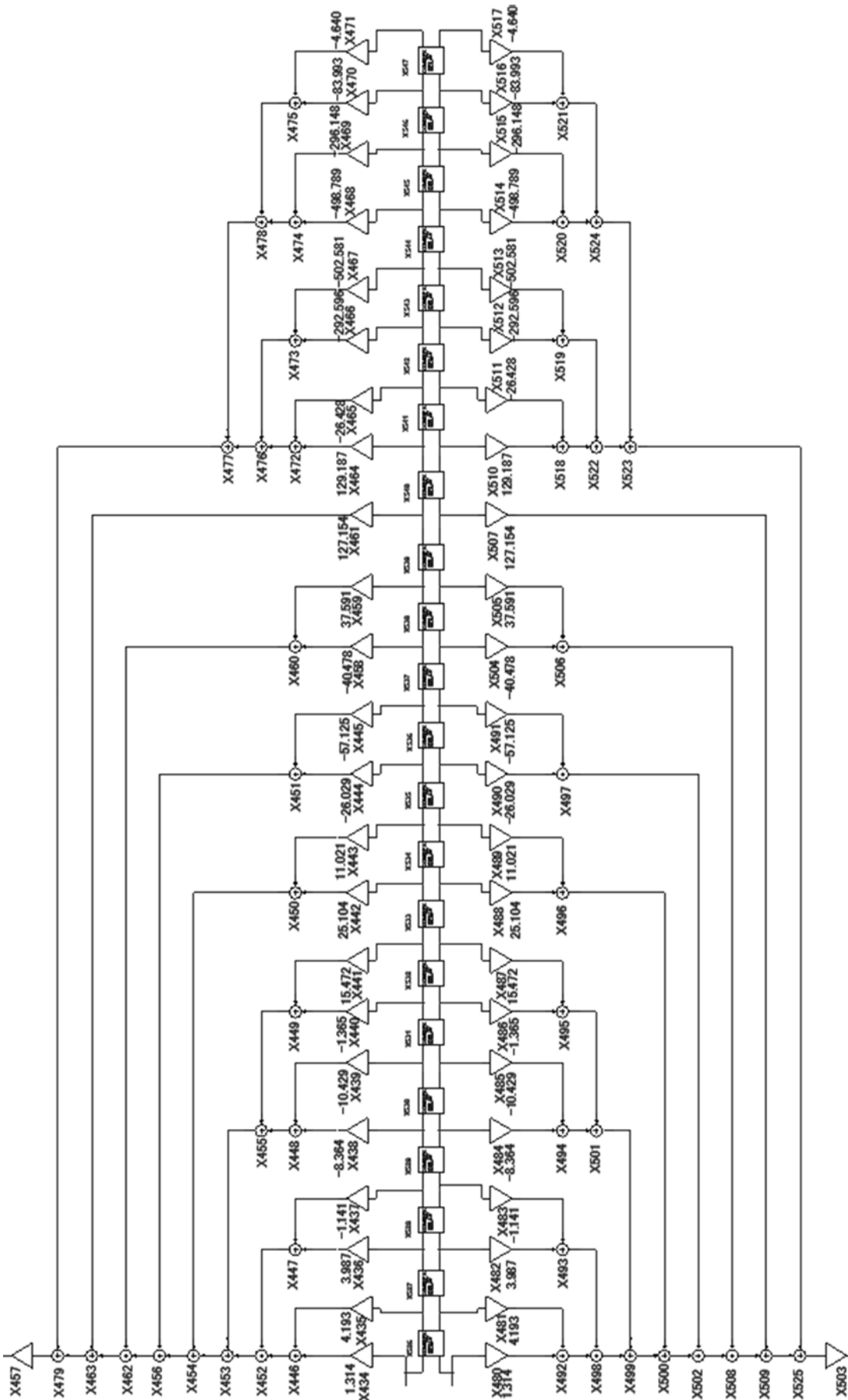


Рис. 4. Модель комплексного КИХ-фильтра, линейзирующего ФЧХ комплексного полосового фильтра

Для разных моделей схемы макросов одинаковые значения параметров элементов задаются: $R1$, $R2$, $R3$ и C .

Меняя параметр $R3$ макросов, можно перестроить центральную частоту идентичных звеньев без изменения полосы пропускания. Величина полосы пропускания варьируется при изменении параметра C .

Известен способ линеаризации ФЧХ путем каскадного соединения комплексного полосового фильтра и комплексного цифрового полосового КИХ-фильтра [2]. Модель комплексного КИХ-фильтра, линеаризующего ФЧХ комплексного полосового фильтра, разработанная в соответствии с методикой, описанной в [2], приведена на рис. 4. Она включает в себя макросы комплексной задержки. Схема макроса комплексной задержки представлена на рис. 5. Параметрами данного макроса являются значение нормированной цифровой частоты смещения w_0 и величина задержки $DELAY2$.

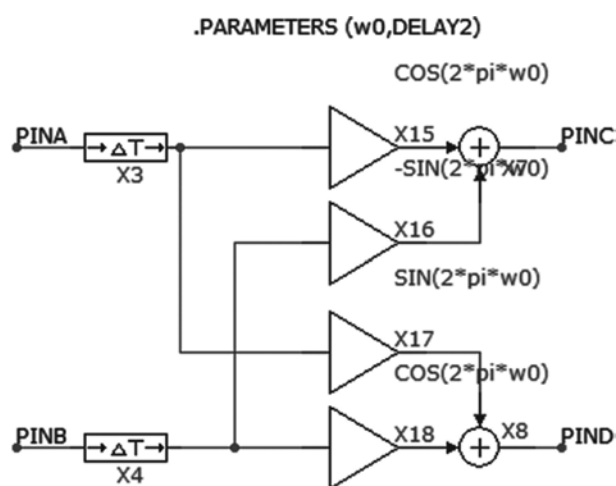


Рис. 5. Схема макроса комплексной задержки

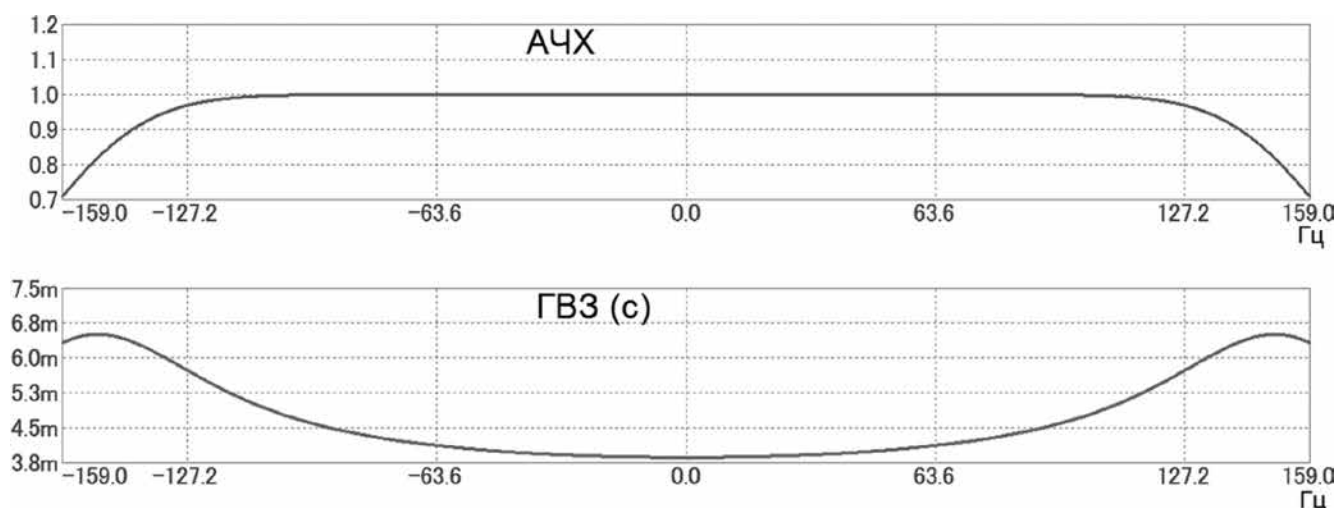


Рис. 6. АЧХ и зависимость ГВЗ от частоты аналогового комплексного фильтра с НЧ-прототипом Баттерворта 6-го порядка и нулевой центральной частотой

Результаты моделирования

На рис. 6 отражены результаты моделирования. Представлены АЧХ и зависимость ГВЗ от частоты аналогового комплексного фильтра с НЧ-прототипом Баттерворта 6-го порядка и нулевой центральной частотой (ФНЧ).

На рис. 7 приведены графики АЧХ и зависимости ГВЗ от частоты для последовательного соединения аналогового комплексного фильтра и цифрового комплексного линеаризующего фильтра.

Из рис. 7 следует, что неравномерность ГВЗ в полосе пропускания уменьшилась со значения 2,634 мс до 0,170 мс, т. е. более чем в 15 раз.

Влияние режекторного фильтра

Изучим влияние введения РФ на эффективность линеаризации ФЧХ комплексного полосового фильтра.

В рассматриваемом случае модель будет состоять из модели аналогового комплексного фильтра с нулевой центральной частотой (см. рис. 1), модели комплексного режекторного фильтра (см. рис. 2) и модели цифрового линеаризующего КИХ-фильтра (см. рис. 4). Модели соединены последовательно; АЧХ и ГВЗ этого соединения представлены на рис. 8.

В данном случае в окрестности частот режекции имеет место резкое изменение уровня ГВЗ. Частотным диапазоном потери эффекта линеаризации будем считать диапазон частот, в котором неравномерность ГВЗ больше, чем неравномерность ГВЗ до линеаризации (2,634 мс). Для оценки диапазона изменим частотные границы графика ГВЗ (рис. 9).

Из рис. 9 видно, что при приближении к частоте режекции ГВЗ увеличивается относительно минимального значения. Без РФ неравномерность ГВЗ исходного аналогового комплексно-

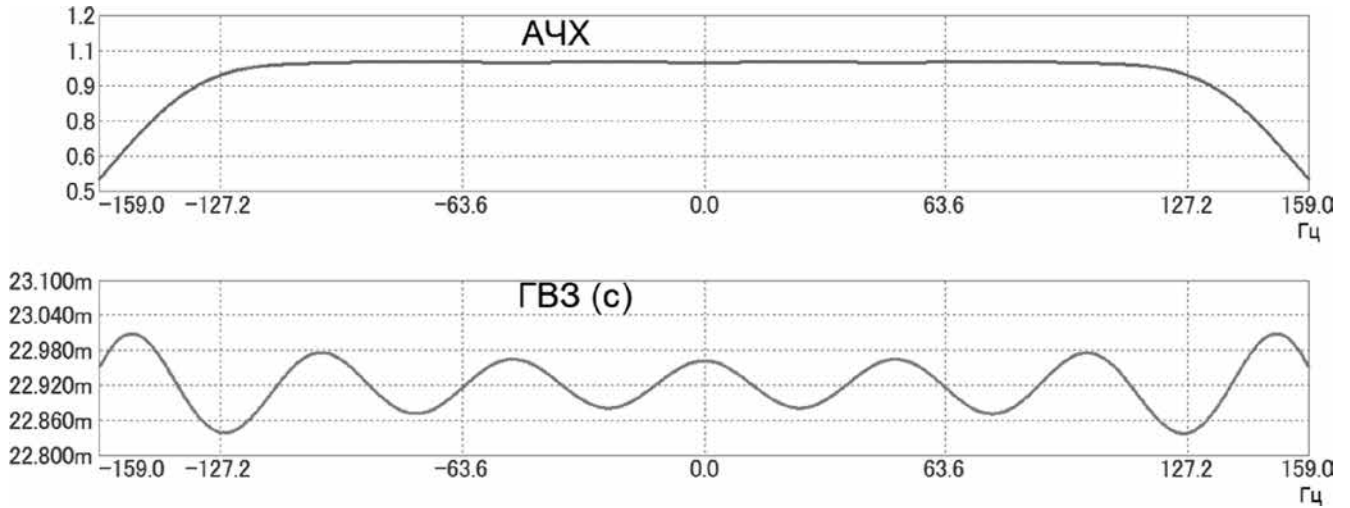


Рис. 7. АЧХ и зависимость ГВЗ от частоты для последовательного соединения аналогового комплексного фильтра и цифрового комплексного линейризирующего фильтра

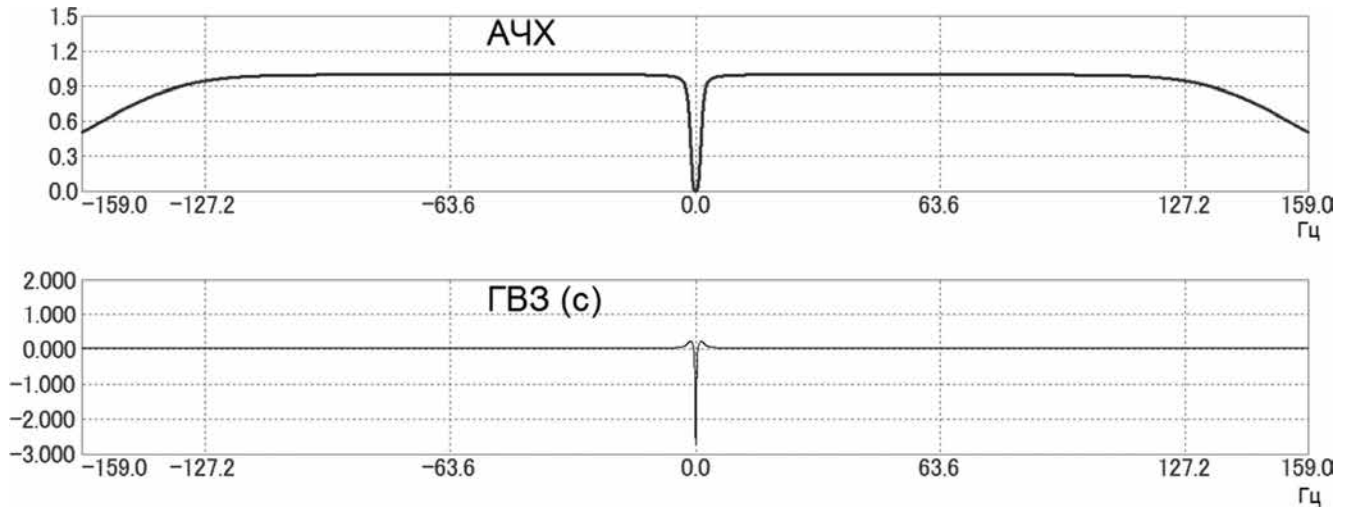


Рис. 8. АЧХ и ГВЗ последовательного соединения аналогового комплексного фильтра с нулевой центральной частотой, модели комплексного РФ и цифрового линейризирующего КИХ-фильтра

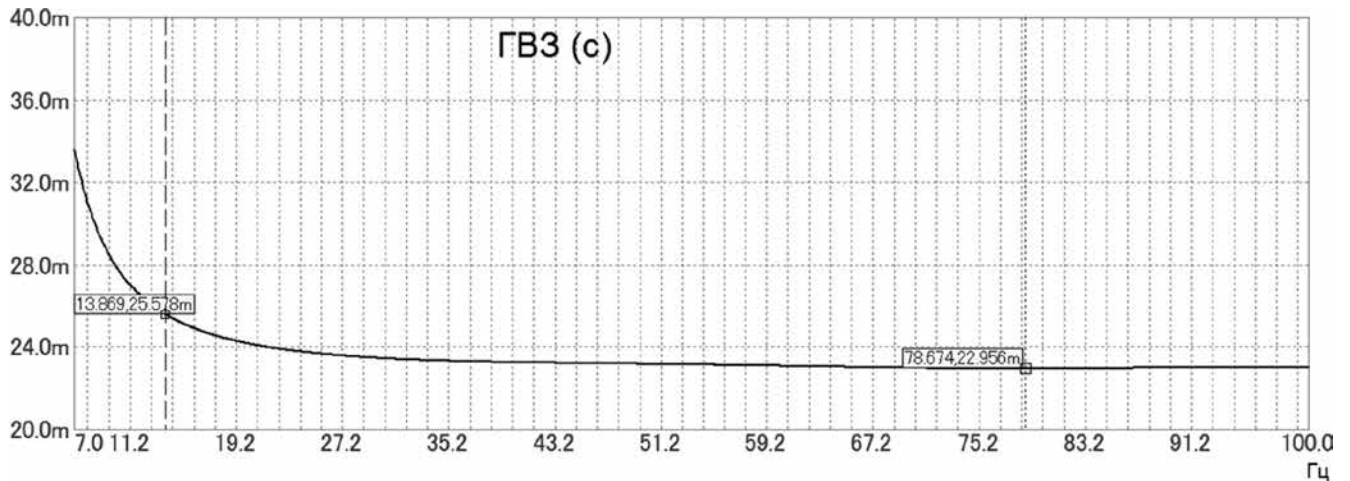


Рис. 9. ГВЗ последовательного соединения аналогового комплексного фильтра с нулевой центральной частотой, модели комплексного РФ и цифрового линейризирующего КИХ-фильтра

го фильтра в полосе пропускания до линейризации составляла 2,634 мс. При введении РФ неравномерность ГВЗ будет обеспечиваться на частоте 13,9 Гц. При выбранных порядках и параметрах аналогового комплексного и режекторного фильтров диапазон частот, в котором исчезает эффект линейризации, примерно в 7 раз превышает разность значений граничных частот полосы пропускания РФ.

При условии того, что разность значений граничных частот полосы пропускания РФ много меньше полосы пропускания аналогового комплексного фильтра, частотный диапазон потери эффекта линейризации не зависит от частоты режекции.

Моделирование показало, что при перемещении полосы режекции в пределах полосы пропускания комплексного аналогового фильтра частотный диапазон потери эффекта линейризации существенно не меняется.

Заключение

Проведенные исследования подтвердили целесообразность использования для уменьшения неравномерности ГВЗ аналогового комплексного фильтра дополнительного цифрового линейрирующего комплексного КИХ-фильтра. В том случае, если разность значений граничных частот полосы пропускания режекторного фильтра много меньше полосы комплексного полосового фильтра (десятки раз), эффект линейризации сохраняется в большей части полосы пропускания. Такой подход актуален при фильтрации узкополосных помех в полосе широкополосных сигналов.

Литература

1. Гребенко Ю.А., Поляк Р.И. Линейризация фазочастотной характеристики фильтра нижних частот // Вестник МЭИ. 2015. № 3. С. 90—94.
2. Гребенко Ю.А., Поляк Р.И. Линейризация фазочастотной характеристики комплексного аналого-

вого полосового фильтра // Вестник МЭИ. 2015. № 4. С. 79—85.

3. Гребенко Ю.А., Кью Тхиха. Режекторные комплексные активные RC-фильтры на идентичных звеньях // Вестник МЭИ. 2013. № 2. С. 54—59.

References

1. Grebenko Yu.A., Polyak R.I. Linearizatsiya Fazochastotnoy Harakteristiki Fil'tra Nizhnih Chastot. MPEI Vestnik. 2015;3:90—94. (in Russian).
2. Grebenko Yu.A., Polyak R.I. Linearizatsiya Fazochastotnoy Harakteristiki Kompleksnogo Analogovogo Polosovogo Fil'tra. MPEI Vestnik. 2015;4:79—85. (in Russian).
3. Grebenko Yu.A., K'yu Thiha. Rezhektornye Kompleksnye Aktivnye RC-fil'try na Identichnyh Zven'yah. MPEI Vestnik. 2013;2:54—59. (in Russian).

Сведения об авторах

Гребенко Юрий Александрович — доктор технических наук, заведующий кафедрой формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», e-mail: grebenkoya@mpei.ru

Поляк Роман Игоревич — старший преподаватель кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», e-mail: Poliakri@mpei.ru

Information about authors

Grebenko Yuriy A. — Dr.Sci. (Techn.), Head of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, e-mail: grebenkoya@mpei.ru

Polyak Roman I. — Senior Lecturer of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, e-mail: Poliakri@mpei.ru

Статья поступила в редакцию 29.12.2016