

Для цитирования: Пыльский В.А., Якунин А.Г. Программный комплекс для расчета и проектирования активных фильтров на основе модели ε -слоя. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (3):126-135. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-3-126-135

For citation: Pylsky V.A., Yakunin A.G. Program complex for the calculation and design of active filters based on the ε -layer model. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (3):126-135. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-3-126-135

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.362: 537.322

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-3-126-135

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ε -СЛОЯ

Пыльский В.А.², Якунин А.Г.¹

¹⁻² Алтайский государственный технический университет,

¹⁻² 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, Россия

¹ e-mail: yakunin@agtu.secna.ru, ² e-mail: almpas@list.ru.

Резюме. Цель. Статья посвящена разработке метода проектирования аналоговых, в том числе активных фильтров, отличающегося от известных методов использованием принципиально иного подхода к выбору критериев оптимизации. **Метод.** Большинство современных методов рассчитывают параметры образующих фильтр электронных компонентов исходя лишь из обеспечения требуемых значений коэффициентов полинома передаточной функции. При этом обеспечение требуемой стабильности и воспроизводимости характеристик фильтра достигается преимущественно технологическими приемами, например, за счет использования прецизионных элементов. В то же время достичь аналогичного эффекта можно и иным способом, а именно рациональным выбором значений параметров компонентов схемы. Такой подход возможен в силу того, что при расчете имеется возможность выбирать значения отдельных компонентов схемы произвольным образом, а необходимые значения коэффициентов полинома передаточной функции получать подбором значений оставшихся элементов. Таким образом, решая оптимизационную задачу, можно добиваться наилучших результатов проектирования в соответствии с выбранным критерием качества. **Результат.** В работе предлагается за основу такого критерия выбрать модель ε -слоя, в соответствии с которой отклонения передаточной функции, либо пропускаемого через фильтр сигнала должны минимально отличаться от заданного вида и лежать в пределах заданного слоя либо во всей области определения функции или сигнала, либо в заданном наиболее важном диапазоне. **Вывод.** В соответствии с предложенным подходом был разработан программный комплекс для расчета активных фильтров. Выполненные с его применением расчеты и экспериментальные исследования подтвердили продуктивность применения.

Ключевые слова: аналоговые фильтры, допустимые отклонения параметров электронных компонентов фильтра, оптимизация параметров электронных компонентов фильтра, критерии оптимизации, модель ε -слоя

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

**PROGRAM COMPLEX FOR THE CALCULATION AND DESIGN OF ACTIVE
FILTERS BASED ON THE E-LAYER MODEL**

Vadim A. Pylsky², Alexey G. Yakunin¹

¹⁻²Polzunov Altai State Technical University,

¹⁻²46 Lenina Ave., Barnaul 656038, Russia,

¹e-mail:yakunin@agtu.secna.ru, ²e-mail:almpas@list.ru

Abstract Objectives. The article is devoted to the development of a method for designing analogue filters, including active, which differs from known methods due to the fundamentally different approach taken to the selection of optimisation criteria. **Methods.** Most contemporary methods, as a rule, calculate the parameters of filter forming electronic components based solely on the required values of the transfer function polynomial coefficients. At the same time, the maintenance of the required stability and reproducibility of filter characteristics is achieved primarily by technological methods; for example, by using precision elements. Nevertheless, it is possible to achieve a similar effect in a different way, namely, by appropriate choice of the circuit component parameter values. This approach is possible by selecting the individual circuit component values in an arbitrary manner, while the necessary transfer function polynomial coefficients are obtained by selecting the values of the remaining elements. Thus, having solved the optimisation task, it is possible to achieve optimal design results in accordance with the chosen quality criterion. **Results.** In this paper, the ε -layer model is proposed as the basis for this criterion, according to which either the deviations of the transfer function or the signal passed through the filter should be minimally different from the given type and be located within the given layer, either in the entire domain of the function or signal definition, or in the most significant defined range. **Conclusion.** The software package for the calculation of active filters is developed according to the proposed approach. The productivity of its application is confirmed by experimental studies and the calculations performed using this application.

Keywords: analogue filters, permissible deviations of the parameters of the filter electronic components, optimisation of electronic filter component parameters, optimisation criteria, ε -layer model

Введение. Цифровые технологии и методы расчета цифровых фильтров в наше время развиваются очень быстро. Цифровые фильтры постепенно заменяют аналоговые, однако всё еще остаются области, где существует необходимость использования активных фильтров. Например, если сигнал с ограниченным спектром наблюдается на фоне сильного шума, лежащего в другой спектральной области, аналоговая фильтрация получается более выгодной и экономичной, особенно когда нет необходимости ставить контроллеры для дополнительной цифровой обработки сигнала.

Аналоговые фильтры нижних частот незаменимы для подавления пульсаций напряжения на выходе выпрямителей переменного тока, для разделения частотных полос в акустических системах, в системах передачи данных для подавления высокочастотных помех и ограничения спектра сигнала, для выделения электрофизиологических сигналов при медицинской диагностике кардиограмм, реограмм, миограмм [1], селекции сигнала в радиочастотных диапазонах [2], подавления шумов на входе аналого-цифровых преобразователей [3], при обработке сейсмологических сигналов [4] а также для ряда других применений [5].

Таким образом, использование аналоговых фильтров всё еще остается актуальным и, соответственно, сохраняют актуальность и методы, используемые для их расчета и проектирования. В настоящее время существует большое разнообразие таких методов, рассматривающих самые различные аспекты, связанные с применением разрабатываемых устройств [4-15].

Наряду с универсальными методиками разработчики компонентов радиоэлектронной аппаратуры предлагают конкретные инструкции, ориентированные на выпускаемые микросхемы фильтров [16-17]. Однако анализ таких методов, показал, что при расчете фильтров все еще остаются отдельные нерешенные проблемы. Остановимся на них более подробно.

Первой из них можно назвать отсутствие в этих методах учета дискретного характера номинальных значений, используемых в фильтрах величин сопротивлений резисторов и емкостей и конденсаторов. Это не позволяет задавать эти значения в точном соответствии с результатами расчета, что может привести к отклонению формы амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) от требуемого вида. Можно, конечно, ввести в схему фильтра множество подстроечных элементов, но это приведет к существенному ухудшению массогабаритных и экономических показателей проектируемого устройства.

Другой проблемой, тесно связанной с предыдущей, является отсутствие в известных методиках оценки влияния на форму АЧХ допустимых отклонений, использованных в фильтре элементов от их номинальных значений, а также от флуктуации фактических значений из-за физических процессов старения, температурных и иных факторов. Использование элементов с минимальным допуском, особенно конденсаторов для уменьшения отклонения АЧХ от расчетной формы может существенно повысить стоимость устройства, хотя, вполне возможно, необходимости в применении высокоточных элементов вовсе и не требуется, во всяком случае, для части из электронных компонентов.

Одним из путей решения данных проблем является применение методов оптимизации. Из теории проектирования электронных фильтров известно, что как минимум один параметр в схеме фильтра всегда остается свободным [15] и его значение можно выбирать произвольным, исходя не из обеспечения заданных значений коэффициентов полинома, а из каких-либо иных соображений. Очевидно, в данном случае можно потребовать, например, подбора таких значений свободных элементов, чтобы минимизировать степень отклонения практически реализуемой АЧХ от ее расчетного вида.

Совершенно очевидно также и то, что отклонение формы АЧХ на разных участках спектрального диапазона, равно как и отклонение фазочастотной характеристики и группового времени запаздывания, может по-разному повлиять на качество обработки сигнала. Более того, характер вносимых фильтром искажений будет зависеть от формы самого сигнала и свойств сопровождающих сигнал шумов и помех. Отсюда следует, что для правильного решения оптимизационной задачи нужно верно выбрать критерий оценки качества работы фильтра.

Постановка задачи. Таким образом, целью данной работы является выбор критерия оптимизации для подбора свободных элементов фильтра; создание на его основе метода и реализующего его программного комплекса для расчета и подбора номинальных значений и всех элементов активного фильтра в соответствии с выбранным критерием.

Методы исследования. Разработка метода расчета активных фильтров на основе ϵ -слоя.

Как известно, однопараметрические критерии имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что оптимизация при их применении выполняется по одному, или заданному набору выделенных показателей АЧХ или фазочастотной характеристики (ФЧХ). Однако, зачастую более важным является сохранение формы кривой АЧХ в рабочей зоне или сохранение формы отдельных составляющих отфильтрованного сигнала. В этом случае имеется непрерывный набор параметров для оптимизации.

Одним из наиболее перспективных подходов к решению задачи оптимизации в такой постановке является метод ϵ -слоя, который уже хорошо зарекомендовал себя при решении подобных задач, когда имеется некоторая функция, заданная с точностью до некоторого слоя ее неопределенности [18-21]. Изначально метод был разработан для оценки потенциальной точности измерительных устройств.

Суть метода заключалась в том, что, полагалось, что наблюдаемый квазидетерминированный сигнал из-за влияния шумов, помех и неизвестных параметров сопровождения может лежать относительно идеальной модельной функции в пределах некоторого ϵ -слоя. Тогда, по-

лагая, что вариации неизвестного контролируемого параметра сигнала не должны приводить к выходу сигнала за данный слой, можно определить интервал значений, в которых должен лежать этот параметр.

Аналогично, наблюдая конкретную реализацию сигнала, можно, зная толщину ε -слоя, можно рассчитать интервальную оценку контролируемого параметра, при которой может наблюдаться данная реализация. Применительно к решению задачи расчета фильтров ε -слой может описывать вариации какой-либо описывающей его функции, например, АЧХ. Тогда при расчете фильтра нужно будет подобрать параметры его компонентов так, чтобы при их возможных допустимых вариациях АЧХ не вышла за границы заданного слоя. Можно также усилить постановку задачи, потребовав, чтобы при заданных допустимых вариаций параметров компонентов фильтра минимизировать толщину слоя, в которой могут наблюдаться вариации АЧ относительно ее идеального вида. Таким образом, метод ε -слоя позволяет свести задачу к однопараметрической путем построения функционала на пространстве непрерывных функций и последующей его минимизации. Рассмотрим особенности применения метода для оптимального проектирования активных фильтров.

Пусть $F(x, v)$ – функция, сохранение формы участков которой на оси ОХ составляет суть задачи оптимизации. Это может быть АЧХ, ФЧХ или модель фильтруемого сигнала. Соответственно, аргумент x может быть либо частотой, либо временем, а v – параметры формы частотной характеристики или обрабатываемого сигнала.

Построим семейство параметрических функций $F'(x, v, \varepsilon)$, зависящих от скалярного вещественного параметра ε , удовлетворяющих условию монотонности:

$$F'(x, v, \varepsilon_1) > F'(x, v, \varepsilon_2), \text{ при } \varepsilon_1 > \varepsilon_2. \quad (1)$$

При этом логично потребовать, чтобы $F(x, v) = F'(x, v, 0)$. Наиболее просто функцию $F'(x, v, \varepsilon)$, удовлетворяющую таким требованиям можно задать в виде

$$F'(x, v, \varepsilon) = F(x, v) + \varepsilon \quad (2)$$

В зависимости от характера решаемой задачи, наряду с (2), возможны и другие семейства параметрических функций $F'(x, v, \varepsilon)$. Например, при проектировании активных фильтров по минимуму отклонений ее передаточной функции можно использовать семейство функций вида

$$F'(x, v, \varepsilon) = F(x, v) + \varepsilon \text{ при } x \in X_0, \quad (3a)$$

$$F'(x, v, \varepsilon) = F(x, v) + \varepsilon \cdot k \cdot |x - x_0| \text{ при } x \in \text{not} X_0 \quad (3b)$$

где X_0 , - полоса пропускания фильтра, $k > 1$ – некоторый постоянный коэффициент.

Для произвольного малого смещения вектора параметров $v' = (v_1 + \Delta v_1, \dots, v_n + \Delta v_n)$ в области допустимых значений определим минимальное значение ε , для которого выполнено условие:

$$|F(x, v') - F(x, v)| < |F'(x, v, \varepsilon') - F(x, v)| \quad (4)$$

Целью оптимизации является определение точки оптимума v , для которой параметр ε' достигает минимального значения. Дополнительными ограничениями оптимизации могут быть условия вида:

$$\Delta v_i / v_i > \delta_{i, \min}, \text{ где } i \in 1 \dots n \quad (5)$$

При такой модификации метода ε -слоя возможно использование существующих методов оптимизации, поскольку, несмотря на сложный характер зависимости, величина ε является непрерывной функцией от параметров v_1, \dots, v_n . Для ускорения вычисления значения целевой

функции в одной точке был предложен алгоритм нахождения значения ε' , удовлетворяющего условию (4).

Алгоритм содержит следующие этапы:

1. Определяется исходный интервал $[\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}]$, на левом конце которого условие (4) заведомо не выполняется. Для этого достаточно положить начальное значение ε_{\min} равным 0.
2. Вычисляется середина интервала $\varepsilon_{\text{cp}} = (\varepsilon_{\min} + \varepsilon_{\max}) / 2$.
3. Если для значения ε_{cp} выполняется условие (4), полагаем $\varepsilon_{\min} = \varepsilon_{\text{cp}}$, в противном случае $\varepsilon_{\max} = \varepsilon_{\text{cp}}$.
4. Если разность $\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}$ больше заданной точности решения, выполняется переход к пункту 2.

В противном случае полагается, что $\varepsilon = \varepsilon_{\text{cp}}$ и поиск решения завершается.

Для ускорения проверки условия (4) можно воспользоваться свойством гладкости функции $F'(x, v, \varepsilon)$, что позволяет проверять это условие с большим шагом по x , или даже всего при нескольких значениях x , при которых левая часть неравенства принимает максимальные значения. Если же $F'(x, v, \varepsilon)$ описывается выражением (2), то есть полагается, что не имеет значения, при каких значениях x отклонения функции $F(x, v)$ от заданного вида из-за отклонений значений v максимальны, неравенство (4) примет вид:

$$|F(x, v') - F(x, v)| < \varepsilon. \quad (6)$$

В этом случае для нахождения величины ε достаточно найти экстремум левой части неравенства (6). Для еще большего ускорения поиска оптимума можно искать для (4) или (6) величину максимального отклонения не во всем диапазоне изменения x , а лишь в полосе пропускания фильтра, справедливо предполагая, что вне этой полосы любые отклонения передаточной функции в пределах допустимых вариаций v не окажут существенного влияния на свойства фильтра.

Рассмотрим теперь общую методику расчета активных фильтров с использованием модели ε -слоя. Для ее применения сначала нужно произвести расчет параметров элементов схемы фильтра с произвольным значением параметра любого из входящих в схему «свободных» элементов. Наиболее удобно в качестве такого элемента выбирать конденсаторы с емкостью, равной одному из значений емкости имеющейся в распоряжении разработчика номенклатуры конденсаторов. Если схема имеет высокий порядок, то таких элементов может оказаться несколько. После этого находятся значения параметров всех остальных элементов схемы без учета номенклатурного ряда, и запоминается функция $F(x, v)$, вид которой, по определению, не должен зависеть от величины параметров «свободных» элементов.

На следующем шаге выполняется собственно процедура оптимизации. В процессе оптимизации подбираются емкости «свободных» конденсаторов и рассчитываются соответствующие им значения параметров остальных элементов схемы (с учетом выбора их номиналов из соответствующего допуску номенклатурного ряда), чтобы обеспечить в при произвольном изменении этих параметров в пределах допуска минимальное отклонение $F(x, v)$ от ее исходного вида, задаваемое неравенством (6).

При выполнении процедуры оптимизации нужно учитывать тот факт, что стоимость конденсаторов с малым допуском существенно выше стоимости резисторов с аналогичным, или даже меньшим допуском. Если при расчете отклонение формы функции $F(x, v)$ от заданного вида окажется слишком велико, может потребоваться пересчет фильтра для меньших значений допустимых отклонений параметров резисторов и конденсаторов. И наоборот, если отклонения окажутся пренебрежимо малы, можно увеличить допуск на величины используемых в схеме емкостей, так как это приведет к удешевлению стоимости электронных компонентов фильтра в целом.

Обсуждение результатов. В соответствии с изложенной методикой был разработан программный комплекс для расчета и проектирования активных фильтров. Комплекс позволяет производить расчет в соответствии с выбранным типом фильтра, видом его передаточной

функции и ее параметров, а также схемной реализацией звеньев фильтра. Экранная форма для задания перечисленных параметров приведена на рис.1.

Помимо перечисленных выше параметров, в ней дополнительно задается: толщина слоя, то есть пределы, в которых может находиться отклонение АЧХ фильтра от требуемого вида; начальная емкость используемых в схеме конденсаторов; минимально допустимое отклонение сопротивлений, используемых в схеме резисторов от их номинальных значений; минимально допустимое отклонение емкостей, используемых в схеме конденсаторов от их номинальных значений.

The screenshot shows a software interface for configuring a filter. It includes a dropdown menu for 'Тип фильтра' (Filter Type) set to 'Фильтр низких частот' (Low-pass filter). Under 'Характеристика фильтра' (Filter Characteristic), the 'Баттерворт' (Butterworth) option is selected. The 'Параметры' (Parameters) section contains: 'Порядок фильтра' (Filter Order) set to 2, 'Толщина слоя' (Layer Thickness) set to 3 dB, 'Начальная емкость C' (Initial Capacitance C) set to 1 microfarad, 'Допуск конденсатора' (Capacitor Tolerance) set to 10%, and 'Допуск резистора' (Resistor Tolerance) set to 2%.

Рис.1. Главная экранная форма для ввода входных данных

Fig.1. Main screen form for input of input data

После выполнения расчета в отдельное окно выводятся графики АЧХ фильтра (рис. 1), а также номинальные значения для всех входящих в схему пассивных элементов (рис. 3)

На графике АЧХ (рис. 2) приводится характеристика фильтра для идеальных значений параметров, использованных в его схеме элементов, а также максимально возможные границы положительного и отрицательного отклонений АЧХ от идеального случая, вызванные максимально допустимыми совокупными отклонениями емкостей и сопротивлений резисторов и конденсаторов от их номинальных значений.

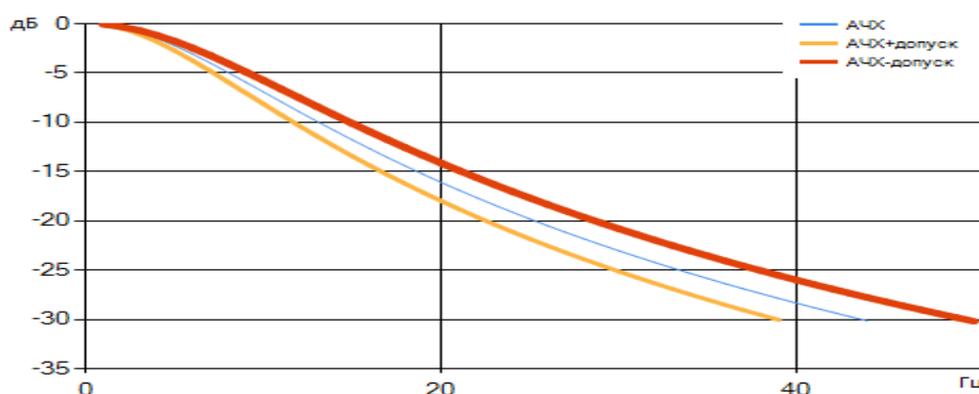


Рис. 2. Результаты расчета АЧХ по исходным данным, приведенным на рис. 1

Fig. 2. Results of the AFC calculation from the initial data given in Fig. 1

The screenshot displays the calculated component values for the filter. It shows: R1 = 100 Ом, R2 = 70 Ом, C1 = 1.1 мкФ, and C2 = 0.8 мкФ.

Рис.3. Результаты расчета фильтра по исходным данным, приведенным на рис.1.

Fig.3. Results of calculation of the filter according to the initial data given in Fig. 1

На рисунках 4-6 приведен другой пример использования разработанного комплекса для расчета низкочастотного фильтра Чебышева четвертого порядка. Фильтр содержал два идентичных звена с коэффициентом передачи, равным двум ($K=2$, $R=10k$).

Принципиальная электрическая схема звеньев, взятая из [22 - 23], приведена на рис. 7. Для приведенных на рис. 2-3 данных схема фильтра содержала одно такое же звено с таким же коэффициентом передачи.

Рис. 4. Входные данные для расчета низкочастотного фильтра Чебышева четвертого порядка
 Fig.4. Input data for the calculation of the Chebyshev low-frequency filter of the fourth order

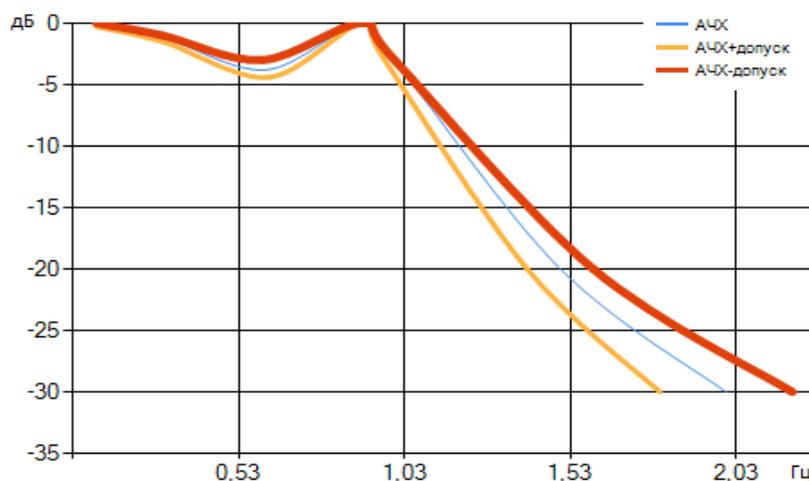


Рис. 5. Результаты расчета АЧХ фильтра по исходным данным, приведенным на рис. 4
 Fig. 5. The results of calculating the frequency response of the filter from the initial data shown in Fig. 4

Рис. 6. Результаты расчета фильтра по исходным данным, приведенным на рис. 4
 Fig.6. Results of calculation of the filter from the initial data, shown in Fig. 4

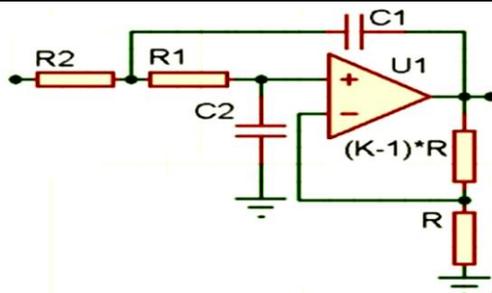


Рис.7. Схема электрическая принципиальная звена низкочастотных фильтров
Fig.7. Schematic diagram of the electrical circuit of low-frequency filters

Как видно из приведенных графиков (рис. 2, 5), использование предложенного в данной работе метода оптимизации обеспечило подбор таких значений параметров пассивных элементов схемы, при которых относительное отклонение формы АЧХ фильтров от ее идеального вида оказалось меньше значений допустимых отклонений входящих в их схему параметров пассивных элементов. При этом допуски на отклонения емкостей конденсаторов от их номинальных значений составляют 10%, что позволяет существенно снизить стоимость электронных компонентов фильтра.

Вывод. В разработанном программном комплексе пока не реализована возможность подбора фактически требуемых допусков для отдельных элементов схемы. Хотя, как показали исследования, отклонения АЧХ, обусловленные отклонениями емкостей и сопротивлений зависят от того, в каком месте схемы установлен тот или иной компонент, а также от того, по какой схеме собраны звенья фильтров.

Кроме того, отклонения различных элементов схем, вызванные температурными изменениями, коррелированы и не являются взаимно независимыми. Поэтому в дальнейшем предполагается учесть данные особенности в алгоритмической и программной реализации предложенного метода и тем самым дополнительно повысить качество расчетов, исключив завышение требований к величине допустимых отклонений параметров, использованных в схеме фильтра пассивных электронных компонентов.

Библиографический список:

1. Тушев А.Н. Методы расчета активных фильтров в медицинских диагностических системах: Дис. /Алт.гос.технолог. ун-т им. И.И. Ползунова. – Брн.,1997. URL: <http://tekhnosfera.com/metody-rascheta-aktivnyh-filtrov-v-meditainskih-diagnosticheskikh-sistemah>.
2. Wang Yu (王彧), Liu Jing (刘静), Yan Na (闫娜), Min Hao (闵昊) A low-noise widely tunable Gm-C filter with frequency calibration// J. Semicond. 2016.- Vol 37.- №9 095002 doi:10.1088/1674-4926/37/9/095002.- URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4926/37/9/095002/pdf> -
3. Wakamatsu T, Yamanashi Yu, Yoshikawa N. High-Speed Superconductive Decimation Filter for Sigma-Delta Analog to Digital Converter // Journal of Physics: Conference Series, 2017 1742-6596 Vol 87, conference 1, 012068 doi:10.1088/1742-6596/871/1/012068.- URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/871/1/012068/pdf>
4. Boustani B., Torabi S., Javaherian A., Mortazavi S.A. Ground roll attenuation using a curvelet-SVD filter: a case study from the west of Iran / J. Geophys. Eng. 2013,10 055006 doi:10.1088/1742-2132/10/5/055006 URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-2132/10/5/055006/pdf>
5. Filters. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-8/what-is-a-filter/>
6. Расчет аналогового фильтра. Постановка задачи и способы аппроксимации АЧХ идеального нормированного ФНЧ. URL: <http://www.dsplib.ru/content/filters/ch2/ch2.html>
7. Second Order Filters. URL: <http://www.electronics-tutorials.ws/filter/second-order-filters.html>
8. Viztmuller, P. RF Design Guide: Systems, Circuits, and Equations. – Artech House, 1995. – С. 81-84.
9. Miroslav D. Lutovac. Filter Design for Signal Processing using MATLAB© and Mathematica©. – New Jersey, USA.: Prentice Hall, 2001
10. Williams Artur B. Analog Filter and Circuit Design Handbook. – NY.: Mc Graw Hill, 2006.-619 с.
11. M.E. Van Valkenburg. Analog Filter Design. – NY.: Oxford University Press, 1982. – 607с.
12. Bowick C. RFCircuit Design. - .UK: Newnes, 2008. – 242 с.
13. Palmer R. An Introduction To RF Circuit Design For Communication Systems. – Canada.: VE7AP, 2016. – 335с.

14. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры. Расчет и реализация. Пер. с англ. Г. Лэм. -М.: Мир, 1982. - 592 с.
15. Мошиц Г., Хорн П. Проектирование активных фильтров. Пер. с англ. -М.: Мир, 1984. -320 с.
16. Karki J. Active Low-Pass Filter Design //Application Report SLOA049A – Texas Instrument, October 2000. 24pp. -URL: <http://www.science.unitn.it/~bassi/Signal/TInotes/sloa049.pdf>
17. Lacanette K. A Basic Introduction to Filters - Active, Passive, and Switched-Capacitor//National Semiconductor Application Note 779, April 1991.-22pp. URL: <http://www.science.unitn.it/~bassi/Signal/TInotes/sloa049.pdf>
18. Сучкова Л.И., Якунин А.Г. Нахождение интервальных оценок параметров квазидетерминированных процессов с применением модели ϵ -слоя//Материалы Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы математики и механики»- Самара, 2013. – С. 151-153.
19. Сучкова Л.И., Якунин А.Г. Прогнозирование нештатных ситуаций в системах контроля и управления на основе модели ϵ -слоя Л.И.//Материалы 10 Международной конференции «Измерение, контроль, информатизация». - Барнаул: АлтГТУ, 2009.- С. 103-105.
20. Сучкова Л.И., Якунин А.Г. Оценка параметров квазидетерминированных информативных сигналов методом ϵ -слоя Л.И.//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. № 4 -2011. - С.11-22.
21. Якунин А.Г. Тищенко А.Н. Применение моделей ϵ -слоев для моделирования сигналов ОЭПП. // Измерения и контроль при автоматизации производственных процессов. Барнаул, АлтГТУ, 1994.
22. Ханзел Г. Е. Справочник по расчету фильтров. Пер. с англ. В.А. Старостина - М.: Советское радио, 1974. - 286 с.
23. Джонсон Д. Справочник по активным фильтрам. Пер с англ. Д. Джонсон. – М. 1983. -128 с.

References:

1. Tushev A.N. Metody rascheta aktivnykh fil'trov v meditsinskikh diagnosticheskikh sistemakh: Dissertatsiya. Altai gos. tekhnolog. un-t im. I.I. Polzunova. Barnaul, 1997. URL: <http://tekhnosfera.com/metody-rascheta-aktivnykh-filtrov-v-meditsinskikh-diagnosticheskikh-sistemah>. [Tushev A.N. Methods of calculation of active filters in medical diagnostic systems: Dissertation. 2Polzunov Altai State Technical University. Barnaul, 1997. URL: <http://tekhnosfera.com/metody-rascheta-aktivnykh-filtrov-v-meditsinskikh-diagnosticheskikh-sistemah>. (In Russ.)]
2. Wang Yu (王彧), Liu Jing (刘静), Yan Na (闫娜), Min Hao (闵昊). A low-noise widely tunable Gm-C filter with frequency calibration. J. Semicond. 2016;37(9):095002 doi:10.1088/1674-4926/37/9/095002. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4926/37/9/095002/pdf>.
3. Wakamatsu T., Yamanashi Yu., Yoshikawa N. High-Speed Superconductive Decimation Filter for Sigma-Delta Analog to Digital Converter. Journal of Physics: Conference Series. 2017; 87:1742-6596.Confrence 1, 012068 doi:10.1088/1742-6596/871/1/012068. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/871/1/012068/pdf>.
4. Boustani B., Torabi S., Javaherian A., Mortazavi S.A. Ground roll attenuation using a curvelet-SVD filter: a case study from the west of Iran. J. Geophys. Eng. 2013;10:055006 doi:10.1088/1742-2132/10/5/055006.URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-2132/10/5/055006/pdf>.
5. Filters. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-8/what-is-a-filter>.
6. Raschet analogovogo fil'tra. Postanovka zadachi i sposoby approksimatsii AChKh ideal'nogo normirovannogo FNCh. URL: <http://www.dsplib.ru/content/filters/ch2/ch2.html>[Calculation of the analog filter. Statement of the problem and methods for approximating the AFC of an ideal normalized LFF (in Russ.)]
7. Second Order Filters. URL: <http://www.electronics-tutorials.ws/filter/second-order-filters.html>
8. Vizmuller P. RF Design Guide: Systems, Circuits, and Equations. Artech House; 1995. P. 81-84.
9. Lutovac M.D. Filter Design for Signal Processing using MATLAB© and Mathematica©. New Jersey, USA: Prentice Hall; 2001.
10. Williams A.B. Analog Filter and Circuit Design Handbook. NY: Mc Graw Hill; 2006. 619 p.
11. Van Valkenburg M.E. Analog Filter Design. NY: Oxford University Press; 1982. 607 p.
12. Bowick C. RFCircuit Design. UK: Newnes; 2008. 242 p.
13. Palmer R. An Introduction to RF Circuit Design For Communication Systems. Canada: VE7AP; 2016. 335 p.
14. Lem G. Analogovye i tsifrovye fil'try. Raschet i realizatsiya. M.: Mir; 1982. 592 s. [Lem G. Analog and digital filters. Calculation and implementation. M.: Mir; 1982. 592 p. (In Russ.)]
15. Moshits G., Khorn P. Design of active filters. M.: Mir; 1984. 320 s. [Moshits G., Khorn P. Proektirovanie aktivnykh fil'trov. M.: Mir; 1984. 320 p. (In Russ.)]
16. Karki J. Active Low-Pass Filter Design. Application Report SLOA049A – Texas Instrument, October 2000. 24p. URL: <http://www.science.unitn.it/~bassi/Signal/TInotes/sloa049.pdf>.
17. Lacanette K. A Basic Introduction to Filters - Active, Passive, and Switched-Capacitor. National Semiconductor Application Note 779, April 1991. 22p. URL: <http://www.science.unitn.it/~bassi/Signal/TInotes/sloa049.pdf>.
18. Suchkova L.I., Yakunin A.G. Nakhozhdenie interval'nykh otsenok parametrov kvazideterminirovannykh protsessov s primeneniem modeli ϵ -sloya. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii "Aktual'nye problemy matematiki i mekhaniki". Samara; 2013. S. 151-153. [Suchkova L.I., Yakunin A.G. Finding interval estimates for

- parameters of quasidetermined processes using the ε -layer model. Materials of the All-Russian scientific conference "Relevant issues of mathematics and mechanics"; 2013. P. 151-153. (In Russ.)]
19. Suchkova L.I., Yakunin A.G. Prognozirovaniye neshtatnykh situatsiy v sistemakh kontrolya i upravleniya na osnove modeli ε -sloya. Materialy 10 Mezhdunarodnoy konferentsii "Izmereniye, kontrol', informatizatsiya". Barnaul: AltGTU; 2009. S. 103-105. [Suchkova L.I., Yakunin A.G. Prediction of abnormal situations in control and management systems based on the ε -layer model. Materials of the 10th International Conference "Measurement, Control, Informatization". Barnaul: AltSTU; 2009. P. 103-105. (In Russ.)]
 20. Suchkova L.I., Yakunin A.G. Otsenka parametrov kvazideterminirovannykh informativnykh signalov metodom ε -sloya. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2011;4:11-22. [Suchkova L.I., Yakunin A.G. Estimation of parameters of quasideterministic informative signals by the ε -layer method. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2011;4:11-22. (In Russ.)]
 21. Yakunin A.G. Tishchenko A.N. Primeneniye modeley ε -sloev dlya modelirovaniya signalov OEPP. Izmereniya i kontrol' pri avtomatizatsii proizvodstvennykh protsessov. Barnaul: AltGTU; 1994. [Yakunin A.G. Tishchenko A.N. The use of ε -layer models for modeling the signals of the OEPP. Measurement and control in the automation of production processes. Barnaul: AltSTU; 1994. (In Russ.)]
 22. Khanzel G.E. Spravochnik po raschetu fil'trov. M.: Sovetskoe radio; 1974. 286 s. [Khanzel G.E. Handbook on the calculation of filters. Moscow: Sovetskoe radio; 1974. 286 p. (In Russ.)]
 23. Dzhonson D. Spravochnik po aktivnym fil'tram. M.: 1983; 128 s. [Dzhonson D. Reference book on active filters. M.: 1983; 128 p. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Пыльский Вадим Андреевич – магистрант.

Якунин Алексей Григорьевич - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики, вычислительной техники и информационной безопасности.

Information about the authors:

Vadim A. Pylsky - Post-graduate student.

Alexey G. Yakunin – Dr. Sci. (Technical), Prof., Head of the Department of Informatics, Computer Science and Information Security.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.08.2017.

Принята в печать 15.09.2017.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 02.08.2017.

Accepted for publication 15.09.2017