

Динамические погрешности полосовых фильтров Бесселя, включаемых на входе АЦП

Л.К. Самойлов¹, Д.Ю. Денисенко^{1,2}, Н.Н. Прокопенко^{2,3}

¹Южный Федеральный Университет, г. Ростов-на-Дону, lksamoilov@sfnu.ru

²Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, d.u.denisenko@gmail.com

³Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, г. Москва, prokopenko@sssu.ru

Аннотация — Исследуются полосовые фильтры (ПФ) n -го порядка, состоящие из последовательно соединенных фильтров нижних частот (ФНЧ) Бесселя n -го порядка с частотой среза амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра ω_{SH} и фильтров верхних частот (ФВЧ) Бесселя n -го порядка с частотой среза АЧХ фильтра ω_{SB} , включаемые во входных цепях АЦП для выделения заданного спектра сигналов до его аналого-цифрового преобразования. Показано, что динамические погрешности ПФ n -го порядка определяются динамической погрешностью ФНЧ n -го порядка с частотой среза ω_{SH} и отношением частот ω_{SB}/ω_{SH} . В результате моделирования получены времена задержки ПФ для разных порядков фильтров ($n=1, 2, 3$).

Анализ полученных результатов показал, что для рассматриваемых фильтров существует экспоненциальная зависимость (отрицательная экспонента) величины максимальной динамической погрешности ПФ от отношения частот ω_{SB}/ω_{SH} . Это позволило получить аналитические выражения для оценки величины максимальной динамической погрешности ПФ при $n=1,2,3$, а также для произвольного порядка n . Приводится оценка погрешности предлагаемой аппроксимации. Результаты исследований ориентированы на разработчиков аналого-цифровых систем автоматического управления, устройств радиотехники, измерительной техники и связи.

Ключевые слова — динамические погрешности, задержка сигнала по времени, полосовые фильтры Бесселя, ФНЧ, ФВЧ.

I. ВВЕДЕНИЕ

Задержка сигнала по времени [1], например, пьезодатчика [2], в полосовом фильтре (ПФ) [3], [4], включаемом на входе АЦП [5]-[7], является причиной появления динамической погрешности [8], которая добавляется к статической погрешности и фактически уменьшает эффективную разрядность АЦП [8], [9].

Цель и новизна настоящей статьи состоит в оценке динамической погрешности ограничителей спектра в виде полосовых фильтров Бесселя, а также в исследовании зависимости величины максимальной динамической погрешности (γ_n^{max}) ПФ от отношения частоты среза АЧХ фильтра верхних частот Бесселя

(ω_{SB}) к частоте среза АЧХ (ω_{SH}) фильтра нижних частот Бесселя n -ых порядков. Выполненные исследования дополняют более ранние публикации авторов, в которых рассмотрены динамические погрешности ПФ Чебышева и Баттерворта.

II. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПФ

Рассмотрим ПФ, который состоит из последовательно соединенных звеньев ФНЧ и ФВЧ (рисунок 1).

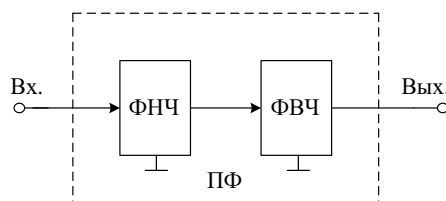


Рис. 1. Типовая структурная схема полосового фильтра

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтров, входящих в ПФ, и сам ПФ характеризуются частотами среза АЧХ на уровне 0,707: ФНЧ имеет частоту ω_{SH} , ФВЧ имеет частоту ω_{SB} и ПФ имеет частоты ω_{SH} и ω_{SB} (рисунок 2).

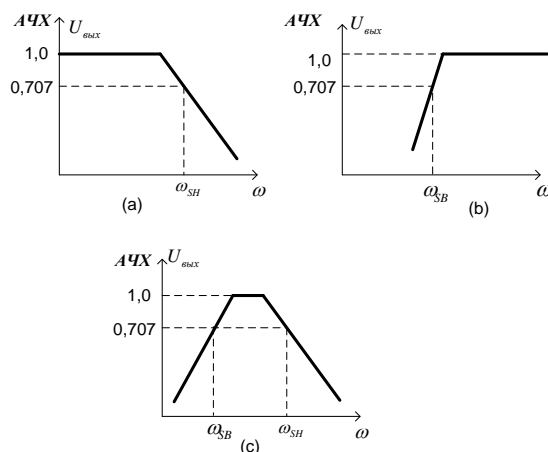


Рис. 2. АЧХ используемых фильтров: (а) ФНЧ; (б) ФВЧ; (с) ПФ

Как показано в работах [8], [10]-[14], максимальная динамическая погрешность ФНЧ, в т.ч. с дифференциальным входом [1], определяется круговой частотой среза АЧХ фильтра (ω_{SH}) и временем задержки информации в ФНЧ ($t_{пф}$):

$$\gamma_{зад}(\omega_{SH}) = \omega_{SH} \cdot t_{пф} \cdot \quad (1)$$

Анализируя предварительные результаты моделирования, можно утверждать, что величина максимальной динамической погрешности ПФ будет равна или близка к величине динамической погрешности ФНЧ, входящего в ПФ.

Рассмотрим ПФ Бесселя [15]-[21] первого, второго и третьего порядков, а затем полученные результаты обобщим на ПФ произвольного порядка.

Для каждого порядка полосового фильтра в среде Micro-Cap 12 исследованы 5 вариантов схем ПФ, частотозадающие элементы которых определяются отношением частот ω_{SB}/ω_{SH} : $\omega_{SB}/\omega_{SH} = 0$; $\omega_{SB}/\omega_{SH} = 0,25$; $\omega_{SB}/\omega_{SH} = 0,5$; $\omega_{SB}/\omega_{SH} = 0,75$; $\omega_{SB}/\omega_{SH} = 1,0$. При этом на вход ПФ подается перепад напряжения и фиксируется задержка $t_{пф}$ на уровне 0,5. Для моделирования выбраны фильтры с круговой частотой $\omega_{SH} = 2\pi \cdot 50\text{Гц}$.

III. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПФ БЕССЕЛЯ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Схемы исследуемых ПФ Бесселя первого порядка (ПФ1) с величинами частотозадающих элементов в формате прикладной программы Micro-Cap 12 приведены на рисунке 3.

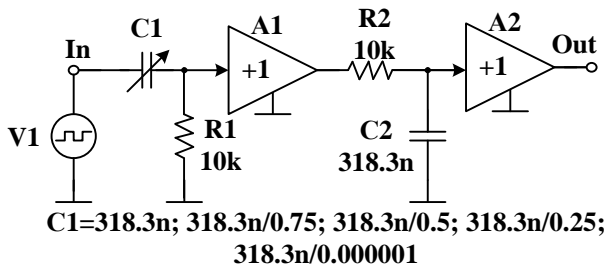


Рис. 3. Схемы полосовых фильтров первого порядка с пятью различными значениями ω_{SB}/ω_{SH} , которые для каждого моделирования устанавливались конденсатором C1

На рис. 4 приведены временные диаграммы переходных процессов в ПФ1 при заданных значениях ω_{SB}/ω_{SH} . Временная диаграмма «0» (Out4) получена при $\omega_{SB}/\omega_{SH} = 0$; «0,25» (Out3) при $\omega_{SB}/\omega_{SH} = 0,25$; «0,5» (Out2) при $\omega_{SB}/\omega_{SH} = 0,5$; «0,75» (Out1) при $\omega_{SB}/\omega_{SH} = 0,75$; «1» (Out) при $\omega_{SB}/\omega_{SH} = 1,0$.

Для получения аналитического выражения времени задержки ПФ1 ($t_{зад}(1)$) была выбрана аппроксимирующая экспоненциальная функция (отрицательная экспонента):

$$t_{зад}(1) = t_0(1) \cdot e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}} \quad (2)$$

где $t_0(1)$ (мс) - время задержки входного импульса в ПФ1 при $\omega_{SB}/\omega_{SH} = 0$.

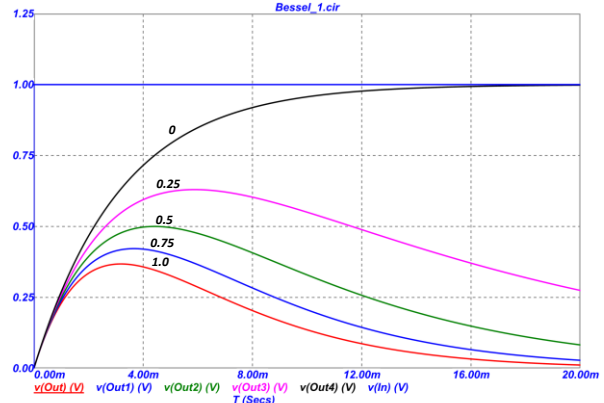


Рис. 4. Временные диаграммы переходных процессов в ПФ1 для пяти отношений частот ω_{SB}/ω_{SH} (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0)

Проведенные расчеты показали, что коррекция аналитического выражения (2) с помощью дополнительной синусоидальной функции ($0,25 \cdot \sin(\pi \cdot \omega_{SB}/\omega_{SH})$) позволяет уменьшить погрешность аппроксимации. Поэтому

$$t_{зад}(1) = t_0(1) \cdot (e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}} - 0,25 \sin \pi \cdot \omega_{SB}/\omega_{SH}) \quad (3)$$

График относительной задержки $\frac{t_{зад}(1)}{t_0(1)} = f(\omega_{SB}/\omega_{SH})$ приведен на рисунке 5, где обозначено $t_{зад}(1)/t_0(1)$ - расчетные значения относительной величины времени задержки в ПФ1; $e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}}$ - расчетные значения экспоненциальной функции; $0,25 \cdot \sin(\pi \cdot \omega_{SB}/\omega_{SH})$ - расчетные значения дополнительной корректирующей синусоидальной функции.

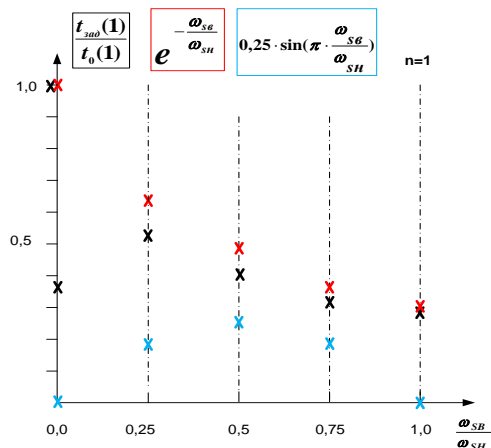


Рис. 5. Точки отсчета значений трех функций при разных отношениях частот ω_{SB}/ω_{SH}

Как показано в таблице 1, при использовании формулы (3) для ПФ1 средняя погрешность аппроксимации $t_{зад}(1)$ равна 8,54% при максимальной погрешности 20%, которая возникает при $\omega_{SB}/\omega_{SH} = 0,25$.

Результаты измерений и расчетов для ПФ1 сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Основные расчетные значения в формуле (3) для ПФ1

$\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}$	$0,5 U_{ВЫХ}^{max}$	Задер. на уровне $0,5 U_{ВЫХ}^{max}$. $t_{зад}(1)$ (мс)	Относ. задер. $\frac{t_{зад}(1)}{t_0(1)}$	$e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}}$	$e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}} - 0,25 \sin$	Погреш. аппрок. в %.
0	0,5	$t_0(1) = 2,201$	1,00	1,00	1,00	0
0,25	0,314	1,254	0,570	0,780	0,684	20,0
0,5	0,250	1,000	0,454	0,607	0,357	-10,3
0,75	0,211	0,856	0,388	0,473	0,377	2,3
1,0	0,184	0,739	0,335	0,369	0,369	10,1

В этой таблице $0,5 U_{ВЫХ}^{max}$ - 0,5 максимального значения графика из рисунка 5; $t_{зад}(1)$ (мс) - время задержки входного импульса в ПФ1 на уровне $0,5 U_{ВЫХ}^{max}$; $t_0(1)$ (мс) - время задержки входного импульса в ПФ1 при $\omega_{SB}/\omega_{SH} = 0$.

Величину максимальной задержки информации в ФНЧ Бесселя ($t_0(1)$) можно определить по известной формуле [8], [10]:

$$t(n, \omega_{SH}) = \frac{2\pi(0,122132 \cdot n + 0,004417)}{\omega_{SH}}, \quad (4)$$

где n - порядок фильтра. При n=1 находим, что

$$t_0(1) = \frac{0,7947}{\omega_{SH}}. \quad (5)$$

Величина динамической погрешности ПФ1 Бесселя для сигнала с круговой граничной частотой ω_s (при $\omega_{SB} \leq \omega_s \leq \omega_{SH}$) будет равна:

$$\gamma_1(\omega_s) = \omega_s \cdot t_0(1) = \frac{\omega_s}{\omega_{SH}} \cdot 0,7947 \left(e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}} - 0,25 \sin \pi \cdot \frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}} \right) \cdot 100\%. \quad (6)$$

Наибольшее значение максимальной динамической погрешности для ПФ1 Бесселя будет при $\omega_s = \omega_{SH}$:

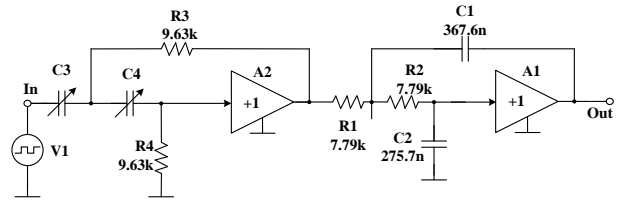
$$\gamma_1^{max} = 0,7947 \left(e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}} - 0,25 \sin \pi \cdot \frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}} \right) \cdot 100\% = 76\%. \quad (7)$$

IV. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПФ БЕССЕЛЯ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Схемы исследуемых ПФ Бесселя второго порядка (ПФ2) с величинами входящих элементов в формате прикладной программы Micro-Cap 12 приведены на рис. 6.

Для получения аналитического выражения времени задержки ПФ2 ($t_{зад}(2)$) была выбрана, как и для ПФ1, экспоненциальная аппроксимирующая функция (отрицательная экспонента):

$$t_{зад}(2) = t_0(2) \cdot e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}}. \quad (8)$$



$$C3, C4 = 367.6n; 367.6n/0.75; 367.6n/0.5; 367.6n/0.25; 367.6n/0.000001$$

Рис. 6. Схемы полосовых фильтров Бесселя второго порядка (ПФ2) при различных значениях ω_{SB}/ω_{SH} , которые устанавливались конденсаторами C3 и C4

Проведенные расчеты показали, что коррекция аналитического выражения (8) с помощью синусоидальной функции позволяет уменьшить погрешность аппроксимации. Поэтому

$$t_{зад}(2) = t_0(2) \cdot \left(e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}} - 0,1 \sin \pi \cdot \frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}} \right). \quad (9)$$

Как показано в таблице 2, при использовании формулы (9) для ПФ2 средняя погрешность аппроксимации $t_{зад}(2)$ равна 7,74% при максимальной погрешности 13,7%, которая наступает при $\omega_{SB}/\omega_{SH} = 0.75$.

Результаты измерений и расчетов для ПФ2 сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Расчетные значения для ПФ2

$\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}$	$0,5 U_{ВЫХ}^{max}$	Задер. на уровне $0,5 U_{ВЫХ}^{max}$. $t_{зад}(2)$ (мс)	Относ. задер. $\frac{t_{зад}(2)}{t_0(2)}$	$e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}} - 0,1 \sin$	Погреш. аппрок. в %.
0	0,500	$t_0(2) = 3,868$	1,00	1,00	0
0,25	0,284	2,704	0,699	0,742	6,1
0,5	0,201	2,231	0,567	0,507	-10,5
0,75	0,154	1,938	0,501	0,435	-13,7
1,0	0,123	1,718	0,444	0,369	-8,4

Величину максимальной задержки информации в ФНЧ Бесселя ($t_0(2)$) можно определить по формуле (5) при n=2:

$$t_0(2) = \frac{1,561}{\omega_{SH}}. \quad (10)$$

Таким образом, при $\omega_{SB} \leq \omega_s \leq \omega_{SH}$ величина динамической погрешности ПФ2 для сигнала с круговой граничной частотой ω_s ($\gamma_2(\omega_s)$) будет равна:

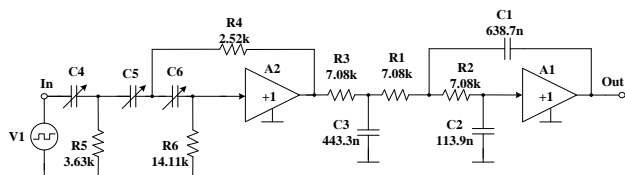
$$\gamma_2(\omega_s) = \omega_s \cdot t_0(2) = \frac{\omega_s}{\omega_{SH}} \cdot 1,561 \left(e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}} - 0,1 \sin \pi \cdot \frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}} \right) \cdot 100\%. \quad (11)$$

Наибольшее значение максимальной динамической погрешности для ПФ2 Бесселя будет при $\omega_s = \omega_{SH}$:

$$\gamma_2^{max} = 1,561 \left(e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}} - 0,1 \sin \pi \cdot \frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}} \right) = 156\%. \quad (12)$$

V. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПФ БЕССЕЛЯ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

Схемы исследуемых ПФ Бесселя третьего порядка (ПФ3) с величинами входящих частотозадающих элементов в формате прикладной программы Micro-Cap12 приведены на рисунке 7.



C4,C5,C6=889.5n; 889.5n/0.75; 889.5n/0.5; 889.5n/0.25; 889.5n/0.000001

Рис. 7. Схемы полосовых фильтров третьего порядка (ПФ3) при различных значениях ω_{SB}/ω_{SH}

Для получения аналитического выражения времени задержки ПФ3 ($t_{зад}(3)$) была выбрана, как и для ПФ1, экспоненциальная функция (отрицательная экспонента):

$$t_{зад}(3) = t_0(3) \cdot e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}} \quad (13)$$

Проведенные расчеты показали, что коррекция аналитического выражения (13) с помощью дополнительной синусоидальной функции позволяет уменьшить погрешность аппроксимации. Поэтому

$$t_{зад}(3) = t_0(3) \cdot \left(e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}} - 0,1 \sin \pi \cdot \frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}} \right) \quad (14)$$

Как показано в таблице 3, при использовании формулы (14) для ПФ3 средняя погрешность аппроксимации $t_{зад}(3)$ (14) равна 8,8% при максимальной погрешности 14,5%, которая наблюдается, когда $\omega_{SB}/\omega_{SH} = 1$.

Таблица 3

Расчетные значения для ПФ3

$\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}$	$0,5 U_{\text{вых}}^{\text{max}}$	Задер. на уровне $0,5 U_{\text{вых}}^{\text{max}}$ $t_{\text{зад}}(3)$ (мс)	Относ. задер. $\frac{t_{\text{зад}}(3)}{t_0(3)}$	$e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}} - 0,1 \sin$	Погреш. аппрок. в %.
0	0,500	$t_0 = 5,326$	1,00	1,00	0
0,25	0,249	3,925	0,737	0,742	0,6
0,5	0,159	3,306	0,620	0,507	-18,2
0,75	0,111	2,601	0,488	0,435	-10,8
1,0	0,082	2,306	0,432	0,369	-14,5

Величину максимальной задержки информации в ФНЧ Бесселя ($t_0(3)$) можно определить по формуле (5) при $n=3$:

$$t_0(3) = \frac{2,3287}{\omega_{SH}} \quad (15)$$

Таким образом, при $\omega_{SB} \leq \omega_s \leq \omega_{SH}$ величина динамической погрешности ПФ для сигнала с круговой граничной частотой ω_s будет равна:

$$\gamma_3(\omega_s) = \omega_s \cdot t_0(3) = \frac{\omega_s}{\omega_{SH}} \cdot 2,3287 \left(e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}} - 0,1 \sin \pi \cdot \frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}} \right) \cdot 100\% \quad (16)$$

Наибольшее значение максимальной динамической погрешности для ПФ3 Бесселя будет при $\omega_s = \omega_{SH}$:

$$\gamma_3^{\text{max}} = 2,3287 \left(e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}} - 0,1 \sin \pi \cdot \frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}} \right) \cdot 100\% = 232\% \quad (17)$$

VI. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПФ БЕССЕЛЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО ПОРЯДКА

Полученные результаты моделирования фильтров при $n=1, 2, 3$ $\omega_{SB} \leq \omega_s \leq \omega_{SH}$ позволяют предложить обобщенное выражение для величины динамической погрешности ПФ n -го порядка (ПФ N) Бесселя ($\gamma_n(\omega_s)$):

$$\gamma_n(\omega_s) = \frac{\omega_s}{\omega_{SH}} \cdot 2\pi \cdot (0,122132 \cdot n + 0,004417) \cdot \left(e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}} - 0,1 \sin \pi \cdot \frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}} \right) \cdot 100\% \quad (18)$$

Наибольшее значение максимальной динамической погрешности для ПФ N Бесселя (γ_n^{max}) будет равно:

$$\gamma_n^{\text{max}} = 2\pi \cdot (0,122132 \cdot n + 0,004417) \cdot \left(e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}} - 0,1 \sin \pi \cdot \frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}} \right) \cdot 100\% \quad (19)$$

Для ПФ1 ($n=1$) в формуле (19) с целью повышения точности результата желательно использовать коэффициент 0,25 при $\sin \pi \cdot \frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}$.

VII. ВЫВОДЫ

Полосовые фильтры Бесселя, которые используются на входе АЦП для выделения заданного спектра сигналов до его аналого-цифрового преобразования, оказывают существенное влияние на эффективную разрядность АЦП.

Динамические погрешности ПФ Бесселя n -го порядка определяются динамической погрешностью входящего в ПФ ФНЧ n -го порядка с частотой среза ω_{SH} и отношением частот ω_{SB}/ω_{SH} . Полученные в результате моделирования времена задержки ПФ для трех значений ω_{SB}/ω_{SH} позволили определить максимальную динамическую погрешность ПФ при изменении порядка фильтра от 1 до 3.

Анализ полученных результатов показал, что для фильтров рассматриваемого класса существует экспоненциальная зависимость (отрицательная экспонента) величины максимальной динамической погрешности от отношения частот ω_{SB}/ω_{SH} .

В работе получены конкретные значения максимальных погрешностей для ПФ Бесселя 1,2, и 3-го порядков, а также предложено аналитическое выражение для величины максимальной динамической погрешности при произвольном порядке n .

ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10109-П).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Суэтинов В.И., Шомахмадов Д.П., Силаев А.С. Проектирование экономичной и устойчивой к разбросу по процессу и температуре интегральной микросхемы низкочастотного канала для радиоприемника // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2021. Выпуск 3. С. 195-201. doi:10.31114/2078-7707-2021-3-195-201.
- [2] D.Yu. Denisenko, A.V. Bugakova, N.N. Prokopenko, Y.I. Ivanov, A.S. Vyrodov. Active RC-Filter with Differential Input for Signal Processing of Piezoelectric Sensors // 20th IEEE International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, June 29 - July 3, 2019, pp. 188-193 DOI: 10.1109/EDM.2019.8823386.
- [3] Шарабудинов Р.М., Чинь То Тхань, Малютин Н.Д., Чепко Т.А., Малютин Г.А. Корректирующие звенья полосно-пропускающих фильтров на связанных линиях // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2021. Выпуск 3. С. 175-181. doi:10.31114/2078-7707-2021-3-175-181.
- [4] Денисенко Д.Ю., Прокопенко Н.Н. Низкочувствительный активный RC-фильтр второго порядка с расширенным частотным диапазоном // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2018. Выпуск 4. С. 17-23. doi:10.31114/2078-7707-2018-4-17-23.
- [5] Рыбаков А.А., Сергейчук Д. 14-битный АЦП последовательного приближения с фоновой калибровкой // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2018. Выпуск 4. С. 30-35. doi:10.31114/2078-7707-2018-4-30-35.
- [6] Быкова А.В., Полуниин М.Н. Критерии численной оценки алгоритмов восстановления данных для аналого-информационных преобразователей // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2020. Выпуск 3. С. 224-229. doi:10.31114/2078-7707-2020-3-224-229.
- [7] Скрипниченко М.Н. Разработка алгоритмов калибровки аналого-цифровых преобразователей с использованием математической модели на примере АЦП последовательного приближения // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2020. Выпуск 3. С. 114-119. doi:10.31114/2078-7707-2020-3-114-119.
- [8] Самойлов Л. К., Денисенко Д. Ю., Прокопенко Н. Н. Динамические погрешности процесса ввода аналоговых сигналов датчиков в системах управления и контроля: моногр. / Л. К. Самойлов, Д. Ю. Денисенко, Н. Н. Прокопенко. – М.: СОЛОН-Пресс, 2021. – 240 с. ISBN 978-5-91359-444-0.
- [9] Пилипко М.М., Морозов Д.В. Шифратор термометрического кода в прямой двоичный код для параллельного АЦП в КМОП технологии // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2021. Выпуск 2. С. 55-62. doi:10.31114/2078-7707-2021-2-55-62.
- [10] Самойлов Л.К. Ввод – вывод аналоговых сигналов в системах управления и контроля. Монография. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – 264 с. ISBN 978-5-9275-1692-6 <http://elibrary.ru/item.asp?id=24893396>.
- [11] J. Park, S. Mackay, “Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems,” in Newnes, 2003, p. 408. doi: 10.1016/B978-0-7506-5796-9.X5000-9.
- [12] Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. - М.: Горячая линия - Телеком, 2009.- 608с.,ил.
- [13] J. Fraden, “Handbook of modern sensors. Physics designs and applications,” in Springer-Verlag, 2004, 663 p. doi: 10.1007/978-1-4419-6466-3.
- [14] Самойлов Л.К. Классический метод учета влияния временных задержек сигналов в устройствах систем управления, Известия ЮФУ. Технические науки 2016 №4 с. 40 – 49.
- [15] H. Y-F. Lam, “Analog and digital filters: design and realization,” in Prentice Hall, 1979, 632 p.
- [16] Зеленин А.Н., Костромицкий А.И., Бондарь Д.В. Активные фильтры на операционных усилителях. – Х.: Телетех, 2001. изд. второе, исправ. и доп. – 150 с.: ил.
- [17] W. H. Holmes, and W. E. Heinlein. “Active Filters for Integrated Circuits: Fundamentals and Design Methods,” Prentice Hall, 1974, 668 p.
- [18] А. А. Ланнэ. Справочник по расчету и проектированию АРСсхем. М.: Радио и связь, 1984.
- [19] G. Moschytz, P. Horn, “Active filter design handbook: For use with programmable pocket calculators and minicomputers,” in John Wiley & Sons, 1981, 324 p.
- [20] U. Tietze, Ch. Schenk, E. Gamm, “Halbleiter-Schaltungstechnik,” in Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2019. 1793 p. (In German).
- [21] L. K. Samoylov, D. Yu. Denisenko, N. N. Prokopenko. The Function Approximation of the Signal Delay Time in the Anti-Alias Filter of the A/D Interface of the Instrumentation and Control System // 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech-2018). 22.10.2018 - 23.10.2018. Saint Petersburg, Russia.

Dynamic Errors of Band-pass Bessel Filters Switched on at the ADC Input.

L.K. Samoylov¹, D.Y. Denisenko^{1,2}, N.N. Prokopenko^{2,3}

¹ Southern Federal University, Rostov-on-Don, lksamoilov@sfedu.ru

² Don State Technical University, Rostov-on-Don, d.u.denisenko@gmail.com

³ Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS, Moscow, prokopenko@ssu.ru

Abstract — The band-pass filters (BPF) of the n-th order, consisting of series-connected n-th order Bessel low-pass filters (LPF) with a cutoff frequency of the amplitude-

frequency characteristic (AFC) of the filter ω_{SH} and n-th order Bessel high-pass filters (HPF) with a cutoff frequency of the frequency response of the filter ω_{SB} , included in the

input circuits of the ADC to select a given spectrum of signals before its analog-to-digital conversion. It is shown that the dynamic errors of the n -th order BPF are determined by the dynamic error of the n -th order low-pass filter with a cutoff frequency ω_{SH} and a frequency ratio ω_{SB}/ω_{SH} . As a result of the simulation, the PF delay times for different filter orders ($n=1, 2, 3$) were obtained.

The analysis of the obtained results showed that Bessel band-pass filters, which are used at the input of the ADC to isolate a given spectrum of signals before its analog-to-digital conversion, have a significant impact on the effective bit depth of the ADC. For the filters under consideration, there is an exponential dependence (negative exponent) of the maximum dynamic error of the BPF on the frequency ratio ω_{SB}/ω_{SH} . This made it possible to obtain analytical expressions for estimating the magnitude of the maximum dynamic error of the BPF at $n=1,2,3$, as well as for an arbitrary order of n . An estimate of the error of the proposed approximation is given.

The research results are aimed at developers of analog-digital automatic control systems, radio-engineering devices, measuring equipment and communications.

Keywords — dynamic errors, time delay, Bessel band-pass filters, LPF, HPF.

REFERENCES

- [1] Suetin V.I., Shomahmadov D.P., Silaev A.S. Design of Cost-effective IF Channel Chip with Tolerance to Process and Temperature Variations for RF Receiver // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2021. Issue 3. P. 195-201. doi:10.31114/2078-7707-2021-3-195-201 (in Russian).
- [2] D.Yu. Denisenko, A.V. Bugakova, N.N. Prokopenko, Y.I. Ivanov, A.S. Vyrodov. Active RC-Filter with Differential Input for Signal Processing of Piezoelectric Sensors // 20th IEEE International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, June 29 - July 3, 2019, pp. 188-193 DOI: 10.1109/EDM.2019.88233862021. Vypusk 3. S. 195-201. doi:10.31114/2078-7707-2021-3-195-201.
- [3] Sharabudinov R.M., Trinh To Thanh, Malyutin N.D., Chepko T.A., Malyutin G.A. Corrective Circuits of Bandpass Filters on Coupled Lines // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2021. Issue 3. P. 175-181. doi:10.31114/2078-7707-2021-3-175-181 (in Russian).
- [4] Denisenko D.Yu., Prokopenko N.N. Low-Sensitivity Active RC-filter of the Second Order with an Extended Frequency Range // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2018. Issue 4. P. 17-23. doi:10.31114/2078-7707-2018-4-17-23 (in Russian).
- [5] Rybakov A.A., Sergeychuk D. 14b SAR ADC with ODC Background Calibration // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2018. Issue 4. P. 30-35. doi:10.31114/2078-7707-2018-4-30-35 (in Russian).
- [6] Bykova A.V., Polunin M.N. Criteria for the numerical evaluation of data recovery algorithms for analogue-information converters // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2020. Issue 3. P. 224-229. doi:10.31114/2078-7707-2020-3-224-229 (in Russian).
- [7] Skripnichenko M.N. High-level model based calibration technique design for SAR ADC // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2020. Issue 3. P. 114-119. doi:10.31114/2078-7707-2020-3-114-119 (in Russian).
- [8] Samojlov L. K., Denisenko D. YU., Prokopenko N. N. Dinamicheskie pogreshnosti processa vvoda analogovykh signalov datchikov v sistemah upravleniya i kontrolya: monogr. (Dynamic errors in the process of inputting analog signals of sensors in control and monitoring systems: monograph) / L. K. Samojlov, D. YU. Denisenko, N. N. Prokopenko. – M.: SOLON-Press, 2021. – 240 s. ISBN 978-5-91359-444-0 (in Russian).
- [9] Pilipko M.M., Morozov D.V. A CMOS Thermometer-to-Binary Encoder for a Flash ADC // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2021. Issue 2. P. 55-62. doi:10.31114/2078-7707-2021-2-55-62 (in Russian).
- [10] Samojlov L.K. Vvod – vyvod analogovykh signalov v sistemah upravleniya i kontrolya. (Input - output of analog signals in control and monitoring systems.) Monografiya. Taganrog: Izd-vo YUFU, 2015. – 264 s. ISBN 978-5-9275-1692-6 <http://elibrary.ru/item.asp?id=24893396> (in Russian).
- [11] J. Park, S. Mackay, “Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems,” in Newnes, 2003, p. 408. doi: 10.1016/B978-0-7506-5796-9.X5000-9.
- [12] Denisenko V.V. Komp'yuternoe upravlenie tekhnologicheskim processom, eksperimentom, oborudovaniem. (Computer control of technological process, experiment, equipment) - M.: Goryachaya liniya - Telekom, 2009.-608s.,il. (in Russian).
- [13] J. Fraden, “Handbook of modern sensors. Physics designs and applications,” in Springer-Verlag, 2004, 663 p. doi: 10.1007/978-1-4419-6466-3.
- [14] Samojlov L.K. Klassicheskij metod ucheta vliyaniya vremennykh zaderzhek signalov v ustrojstvakh sistem upravleniya (Classical method for taking into account the influence of signal time delays in control system devices), Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki 2016 №4 s. 40 – 49 (in Russian).
- [15] H. Y-F. Lam, “Analog and digital filters: design and realization,” in Prentice Hall, 1979, 632 p.
- [16] Zelenin A.N., Kostromickij A.I., Bondar' D.V. – Aktivnye fil'try na operacionnykh usilitelyah. (Active filters on operational amplifiers) – H.: Teletekh, 2001. izd. vtoroe, isprav. i dop. – 150 s.: il.
- [17] W. H. Holmes, and W. E. Heinlein. “Active Filters for Integrated Circuits: Fundamentals and Design Methods,” Prentice Hall, 1974, 668 p.
- [18] A. A. Lanne, Spravochnik po raschetu i proektirovaniyu ARCskhem (Handbook for the calculation and design of ARC schemes) / M.: Radio i svyaz', 1984. (in Russian).
- [19] G. Moschytz, P. Horn, “Active filter design handbook: For use with programmable pocket calculators and minicomputers,” in John Wiley & Sons, 1981,324 p.
- [20] U. Tietze, Ch. Schenk, E. Gamm, “Halbleiter-Schaltungstechnik,” in Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2019. 1793 p. (In German)
- [21] L. K. Samoylov, D. Yu. Denisenko, N. N. Prokopenko. The Function Approximation of the Signal Delay Time in the Anti-Alias Filter of the A/D Interface of the Instrumentation and Control System // 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech-2018). 22.10.2018 - 23.10.2018. Saint Petersburg, Russia.