

## СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМОБИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

**И.Е. Александрова, профессор, д.т.н., МАДИ, Т.Е. Александрова, доцент, к.т.н.,  
В.А. Кононенко, к.т.н., ст. научн. сотр., НТУ «ХПИ»**

*Аннотация.* Предложена методика выбора параметров цифровых нерекурсивных фильтров для систем автомобильной электроники, основанная на оптимизации амплитудно-частотных характеристик фильтров.

*Ключевые слова:* цифровые электронные системы диагностики и управления, нерекурсивный низкочастотный фильтр, амплитудно-частотная характеристика, варьируемые параметры, оптимизация.

## СИНТЕЗ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМОБІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

**І.Є. Александрова, професор, д.т.н., МАДІ, Т.Є. Александрова, доцент, к.т.н.,  
В.А. Кононенко, к.т.н., ст. наук. співр., НТУ «ХПІ»**

*Анотація.* Запропоновано методику вибору параметрів цифрових нерекурсивних фільтрів для систем автомобільної електроніки, що заснована на оптимізації амплітудно-частотних характеристик фільтрів.

*Ключові слова:* цифрові електронні системи діагностики та управління, нерекурсивний низькочастотний фільтр, амплітудно-частотна характеристика, варійовані параметри, оптимізація.

## SYNTHESIS OF DIGITAL FILTERS FOR SYSTEMS AUTOMOBILE ELECTRONICS

**I. Alexandrova, professor, dr. eng. sc., MADI, T. Alexandrova, assistant professor, cand. eng. sc., V. Kononenko, cand. eng. sc., senior research worker, NTU "KPI"**

*Abstract.* The technique of selecting parameters of digital FIR filters for automobile electronics systems, based on the optimization of the amplitude-frequency characteristics of filters.

*Keywords:* digital electronic systems for diagnosis and management, non-recursive low-pass filter frequency response, variable parameters, optimization.

### Введение

Системы автомобильной электроники работают в условиях высокочастотных вибраций, источником которых являются: работа энергетической установки, микропрофиль дорожного покрытия, упругие колебания валов трансмиссии, работа вспомогательных агре-

гатов. Эти вибрации оказывают влияние на выходные сигналы датчиков электронных систем диагностики и управления автомобиля, «зашумляют» выходные сигналы датчиков. В этой связи, в системах автомобильной электроники широкое использование получили цифровые низкочастотные фильтры, пропускающие низкочастотные составляю-

щие выходных сигналов датчиков и подавляющие высокочастотные помехи. Одной из основных проблем при разработке таких фильтров является проблема выбора варьируемых параметров, доставляющих фильтру необходимые свойства.

### Анализ публикаций

Проблеме создания цифровых фильтров посвящены работы Г.Ф. Зайцева [1], Е.Е. Александрова, Э.П. Козлова и Б.И. Кузнецова [2], Ю. Ту [3], Э. Джури [4]. Наиболее фундаментальной является монография Р.В. Хемминга [5], в которой впервые поставлена проблема параметрического синтеза цифровых фильтров.

### Цель и постановка задачи

Целью настоящей работы является разработка методики синтеза цифровых нерекурсивных низкочастотных фильтров с заданными характеристиками.

### Параметрический синтез цифровых нерекурсивных фильтров

В работе [6] показано, что амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) цифрового нерекурсивного фильтра, описываемого уравнением

$$y[nT] = \sum_{k=0}^m c_k x[(n-k)T], \quad (1)$$

может быть при  $m = 4$  представлена в виде

$$M(\omega) = |2a \cos 2\omega T + 2b \cos \omega T + c|, \quad (2)$$

где  $m$  – порядок фильтра (1),  $c_k (k = \overline{0, m})$  – параметры фильтра, связанные с коэффициентами АЧХ  $a$ ,  $b$  и  $c$  соотношениями:  $c_0 = a$ ;  $c_1 = b$ ;  $c_2 = c$ ;  $c_3 = b$ ;  $c_4 = a$ .

Для отыскания значений параметров фильтра (1) зададимся на интервале  $\omega T = 0 \div \pi$  следующими условиями:

- при  $\omega T = 0$  амплитуда АЧХ должна быть равна единице  $M(0) = 1$ ;
- при  $\omega T = \pi$  амплитуда АЧХ должна быть равна нулю  $M(\frac{\pi}{T}) = 0$ .

Эти условия эквивалентны выполнению двух уравнений

$$2a + 2b + c = 1; \quad (3)$$

$$2a - 2b + c = 0. \quad (4)$$

Из уравнений (3) и (4) получаем  $b = 0,25$ ;  $c = 0,5 - 2a$ . Тогда соотношение (2) принимает следующий вид

$$M(\omega) = |2a \cos 2\omega T + 0,5 \cos \omega T + 0,5 - 2a|, \quad (5)$$

Теперь задача отыскания параметров фильтра (1) становится однопараметрической, зависящей только от одного коэффициента  $a$ , для отыскания которого зададим еще одно условие, а именно, АЧХ фильтра должна пересекать ось абсцисс еще в одной точке, определяющей полосу пропускания. Обозначим эту точку через  $\omega^* \in (0 \div \frac{\pi}{T})$ . Математически это условие записывается в виде

$$2a \cos 2\omega^* T + 0,5 \cos \omega^* T + 0,5 - 2a = 0. \quad (6)$$

Из условия (6) получаем

$$a = 0,25 \frac{1 + \cos \omega^* T}{1 - \cos \omega^* T}. \quad (7)$$

Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $c$  для различных значений  $\omega^* T$  приведены в табл. 1

Таблица 1 Значения коэффициентов АЧХ нерекурсивных фильтров

$\omega^* T$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{5\pi}{8}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{7\pi}{8}$
$a$	0,125	0,0904	0,0732	0,065
$b$	0,25	0,25	0,25	0,25
$c$	0,25	0,3192	0,3536	0,37

На рис.1 приведены АЧХ цифровых нерекурсивных фильтров для различных частот пропускания, соответствующих таблице 1. Анализ рисунка позволяет сделать вывод о том, что с уменьшением полосы пропускания фильтра наблюдается ухудшение его фильтрующих свойств.

Попытаемся оптимизировать АЧХ нерекурсивного фильтра (1) в смысле улучшения его фильтрующих свойств. Введем в рассмотрение интегральный квадратичный функционал

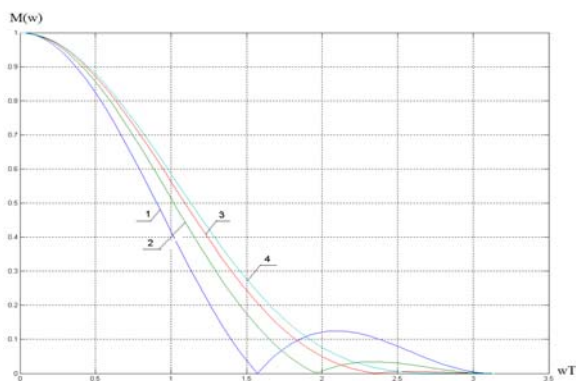


Рис 1. АЧХ фильтров с различными частотами пропускания

$$J(\omega) = \int_{\omega_1 T}^{\pi} M^2(\omega) d\omega T \quad (8)$$

и выберем коэффициент  $a$  из условия его минимума при различных значениях  $\omega_1 T$ . Подставляя соотношение (5) в функционал (8), получаем в результате интегрирования

$$J(\omega_1) = [4a^2(1,5\omega T - \sin 2\omega T + 0,125 \sin 4\omega T) + 2a(0,166 \sin 3\omega T + 0,5 \sin 2\omega T - 0,5 \sin \omega T - \omega T) + 0,25(0,25 \sin 2\omega T + 2 \sin \omega T + 1,5\omega T)]_{\omega_1 T}^{\pi} \quad (9)$$

Запишем условие минимума по  $a$  функции (9)

$$\frac{\partial J(\omega_1)}{\partial a} = [8a(1,5\omega T - \sin 2\omega T + 0,125 \sin 4\omega T) + 2(0,166 \sin 3\omega T + 0,5 \sin 2\omega T - 0,5 \sin \omega T - \omega T)]_{\omega_1 T}^{\pi} = 0 \quad (10)$$

Значения оптимальных значений коэффициентов АЧХ, полученные из уравнения (10) при различных значениях  $\omega_1 T$  приведены в табл.2.

Таблица 2 Значения коэффициентов АЧХ нерекурсивных фильтров

$\omega_1 T$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{8}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{5\pi}{8}$
$a$	0,1444	0,1185	0,09594	0,0795
$b$	0,25	0,25	0,25	0,25
$c$	0,2111	0,2629	0,3081	0,341

На рис.2 приведены АЧХ цифровых нерекурсивных фильтров для различных значений  $\omega_1 T \in (0 \div \pi)$ . Сравнение рис.1 и рис.2

позволяет сделать вывод о том, что оптимальные фильтры обладают более высокими фильтрующими свойствами при сравнимых полосах пропускания.

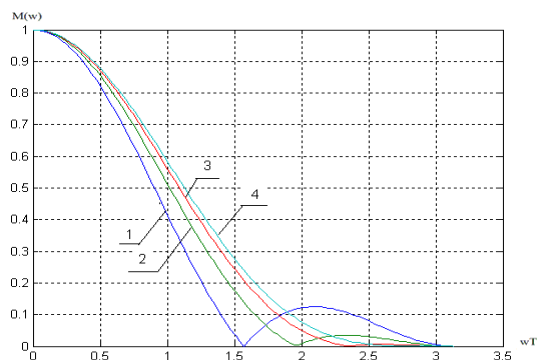


Рис 2. АЧХ оптимальных фильтров

### Выводы

Фильтрующие свойства нерекурсивных фильтров могут быть усилены путем оптимального выбора коэффициентов АЧХ этих фильтров. Сужение полосы пропускания нерекурсивных фильтров приводит к значительному ухудшению их фильтрующих свойств.

### Литература

1. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования. – К.: Вища школа, 1989. – 431с.
2. Александров Є.Є., Козлов Е.П., Кузнецов Б.І. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. Т.1. Теорія автоматичного керування. – Харків: НТУ «ХП», 2002, – 490с.
3. Ту Ю. Цифровые и импульсные системы автоматического управления. – М.: Машиностроение, 1964. – 703с.
4. Джури Э. Импульсные системы автоматического регулирования. – М.: Физматгиз, 1963. – 456с.
5. Хэмминг Р.В. Цифровые фильтры. – М.: Недра, 1984. – 221с.
6. Александров Е.Е., Александрова Т.Е., Кононенко В.А. Синтез цифровых нерекурсивных фильтров для информационно-управляющих систем // Техническая электродинамика. Специальный выпуск. – 2011. – С. 29-35.

Рецензент: А.В. Бажинов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 11.10.2011.