

УДК 621.37 (075.5)

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

В. И. Кошелев, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой РТС РГРТУ; koshelev.v.i@rsreu.ru

Рассматривается задача анализа частотных характеристик фильтров при незавершенных переходных процессах (динамических частотных характеристик). Такие задачи характерны как для БИХ-фильтров, в том числе основанных на авторегрессионных моделях, так и для КИХ-фильтров, в частности фильтров скользящего среднего. Особенно важно применение изложенного подхода для каскадно включенных фильтров. Анализируются методы сокращения длительности переходных процессов улучшающих динамические частотные характеристики фильтров.

Целью работы является анализ степени соответствия статических и динамических частотных характеристик фильтров в зависимости от длины выборки и методов ускорения переходных процессов в БИХ-фильтрах.

Ключевые слова: динамические частотные характеристики фильтров, сокращение длительности переходных процессов.

DOI: 10.21667/1995-4565-2017-60-2-27-32

Введение

Одной из основных характеристик цифровых фильтров, используемых для фильтрации сигналов и в качестве фильтров, моделирующих случайные процессы с заданными свойствами, является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), имеющая следующий вид:

$$S(f) = |B(f) / A(f)|$$

где полиномы $A(f)$ и $B(f)$ определяются как:

$$A(f) = 1 + \sum_{j=1}^p a(j) \exp\{-i2\pi f j T\},$$

$$B(f) = 1 - \sum_{j=1}^q b(j) \exp\{-i2\pi f j T\}.$$

Как известно, для параметрических моделей авторегрессии и скользящего среднего (АРСС) и используемых при этом АРСС-фильтров оценка спектральной плотности мощности (СПМ), связанная с АЧХ, выражается аналитически и зависит от коэффициентов авторегрессии $a(j)$, коэффициентов скользящего среднего $b(j)$, T – интервала отсчетов, g – дисперсии белого гауссовского возбуждающего шума согласно формуле

$$P(f) = Tg \frac{1 + \sum_{j=1}^q b(j) \exp\{-i2\pi f j T\}}{1 + \sum_{j=1}^p a(j) \exp\{-i2\pi f j T\}}. \quad (1)$$

Структура фильтра соответствует рисунку 1.

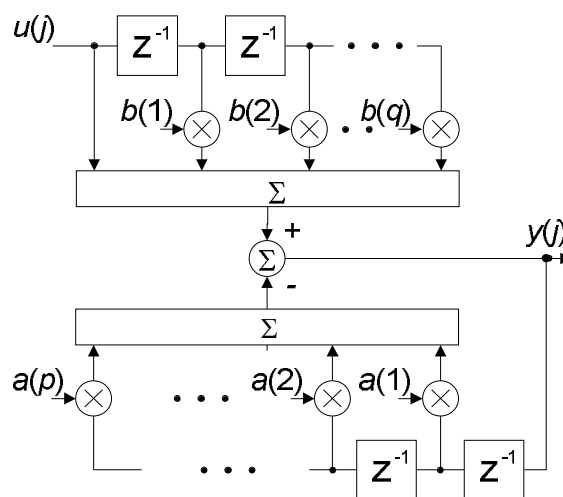


Рисунок 1 – Структурная схема авторегрессионного фильтра

Частотную характеристику фильтра определяют как зависимость коэффициента передачи фильтра (по амплитуде или мощности) от частоты входного сигнала, что подразумевает завершенность переходных процессов в фильтре, вызванных наличием обратных связей. Аналитически расчет СПМ может быть выполнен согласно выражению (1). В то же время СПМ или АЧХ могут быть определены из отношения СПМ или амплитудного спектра выходного сигнала к СПМ или амплитудному спектру входного сигнала. При бесконечной выборке такая методика расчета будет эквивалентна классической методике. Применение последнего определения ча-

стотных характеристик при искусственно ограниченной выходной выборке приводит к другим результатам из-за зависимости спектра выходного сигнала от длины выборки. Поэтому такие характеристики можно рассматривать в качестве приближенных к аналитически вычисляемым частотным характеристикам. Кроме того, во многих задачах радиотехники приходится оперировать как ограниченной выборкой выходного сигнала, используемой для последовательной обработки информации, так и фильтрами с динамически изменяемыми параметрами. Поэтому представляет интерес анализ частотных характеристик, перестраиваемых в процессе обработки, цифровых фильтров при переменной или ограниченной выборке выходного сигнала, которые становятся зависимыми и от параметров фильтра, и от длины выборки. В отличие от предельных статических характеристик такие характеристики будем называть, используя терминологию, принятую в системах автоматического управления, динамическими частотными характеристиками (ДЧХ) [1]. Принципиальным при синтезе цифровых фильтров является выбор порядка фильтра, который влияет на длительность переходных процессов и его динамическую частотную характеристику.

Целью работы является анализ динамических характеристик на примере фильтров с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ фильтров), а также авторегрессионных фильтров, имеющих бесконечную импульсную характеристику. Проанализирован метод инициализации памяти фильтров, позволяющий ускорить переходные процессы в фильтрах с бесконечной импульсной характеристикой.

Динамические частотные характеристики фильтров

При спектральном анализе случайных процессов и их имитационном моделировании спектральная плотность мощности (СПМ) процесса на выходе фильтра достигается в условиях, при которых число отсчетов фильтруемого процесса стремится к бесконечности. Для спектрального анализа и контроля качества параметрической модели случайного процесса при ограниченной выборке целесообразно использовать аппарат динамических частотных характеристик. При ограниченной выборке АЧХ и СПМ не будут совпадать с соответствующими статическими характеристиками.

Расчет СПМ в установившемся режиме можно выполнить: аналитически согласно (1); а в переходном режиме по методике предельных частотных характеристик, предложенной в [2],

или как АЧХ, полученные преобразованием Фурье от ограниченной импульсной характеристики фильтра (метод ОБИХ) [3].

Методика вычисления ДЧХ по первому методу соответствует определению АЧХ и состоит в подаче на вход фильтра испытательного гармонического сигнала, имеющего N отсчетов $x(j)$ последовательно изменяемой частоты. После усреднения амплитуда сигнала на выходе будет соответствовать коэффициенту передачи фильтра на данной частоте. Для всех других длительностей испытательного гармонического сигнала эксперимент повторяется. В методе ОБИХ ДЧХ $p_N(l)$ определяется вычислением дискретного преобразования Фурье от усеченной импульсной характеристики (ИХ) анализируемого фильтра следующим образом:

$$p_N(l) = \sum_{j=0}^{N-1} y(j) \exp(i2\pi jl / N) = \sum_{j=0}^{N-1} \left[\sum_{i=1}^p a(i)y(j-i) + \sum_{i=0}^q b(i)u(j-i) \right] \times \exp(i2\pi jl / N),$$

где $y(j)$ – отсчеты выходного сигнала, $u(j)$ – отсчеты возбуждающего шума.

Степень соответствия ДЧХ статической частотной характеристике зависит от числа $N < L$ используемых в расчетах отсчетов ИХ:

$$p_N(l) = \sum_{j=0}^{L-1} x(j)h(j) \exp(i2\pi jl / L),$$

где

$$h(j) = \begin{cases} 1, & \text{при } j = 0 \\ 1 + \sum_{i=1}^p a(i)h(j-i), & \text{при } j \leq N \\ 0, & \text{при } N < j < L \end{cases}$$

ДЧХ фильтра, формирующего сигнал с тремя модами на относительных (по отношению к частоте дискретизации) частотах при различной длине выборки N , представлены на рисунке 2.

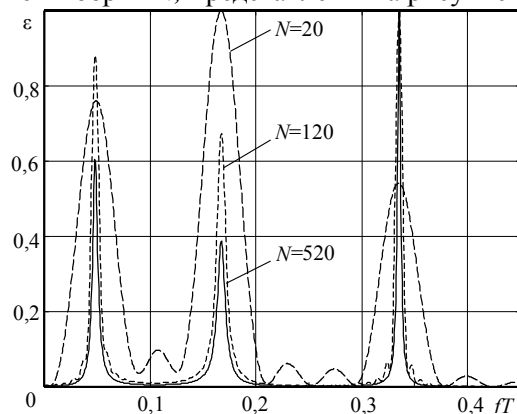


Рисунок 2 – Динамические частотные характеристики

Ниже проводится сравнительный анализ двух способов получения характеристик в переходном режиме: методом, предложенным Флетчером, и методом ограничения бесконечной импульсной характеристики. В качестве примера при имитационном моделировании использовалась последовательность длиной 100 отсчетов, полученная сложением трех комплексных экспонент.

Критериями близости статической и динамических характеристик являются среднеквадратическое отклонение (СКО) ε и модуль максимального отклонения (ММО) η [3]. В частном случае авторегрессионного фильтра критерии принимают следующий вид:

$$\varepsilon = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} \left[\frac{1}{1 + \sum_{i=1}^p a(i) \exp\left(\frac{-i2\pi li}{L}\right)} - \sum_{j=0}^{N-1} h(j) \exp\left(\frac{-i2\pi lj}{L}\right) \right]^2 \rightarrow \min,$$

$$\varepsilon = \max \left| \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^p a(i) \exp\left(\frac{-i2\pi li}{L}\right)} - \sum_{j=0}^{N-1} h(j) \exp\left(\frac{-i2\pi lj}{L}\right) \right| \rightarrow \min.$$

Экспериментально подтверждается, что при объемах выборки N , значительно превышающих длительность переходных процессов, характеристики, полученные сравниваемыми методами, стремятся к статической характеристике, вычисляемой по формуле (1). В то же время при значениях N в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен отсчетов рассматриваемые методы приводят к различным результатам, что является следствием различия в методиках вычисления ДЧХ по методу Флетчера - Барлейджа и методу ОБИХ. Особенно большие отличия наблюдаются в значениях по критерию ММО. Следует отметить, что время вычисления ДЧХ по методу ОБИХ в несколько раз меньше, чем при вычислении по методу [2]. Сравнение ДЧХ по критериям качества показывает, что метод ОБИХ при эквивалентной длине последовательности приводит к меньшей величине СКО и ММО, и частотная характеристика при этом оказывается ближе к статической СПМ (см. рисунки 3 и 4). Какой из двух методов больше отвечает условиям работы реальных фильтров с ограниченными количеством отсчетов последовательностями сигналов? Так как ограниченное число выборок сигнала подвергается фильтрации с использованием ограниченного количества коэффициентов импульсной характеристики БИХ фильтра, то результат расчета по методу ОБИХ больше соответствует фильтрации в реальном фильтре, имеющем тот же набор коэффициентов импульсной характеристики, что и в расчетах. В то же время необходимо отметить, что

метод, предложенный в [2], ближе к классическому определению частотной характеристики.

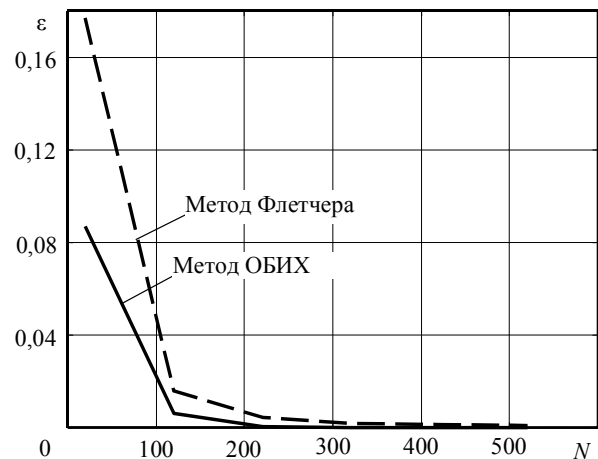


Рисунок 3 – Сравнение методов вычисления ДЧХ по критерию СКО

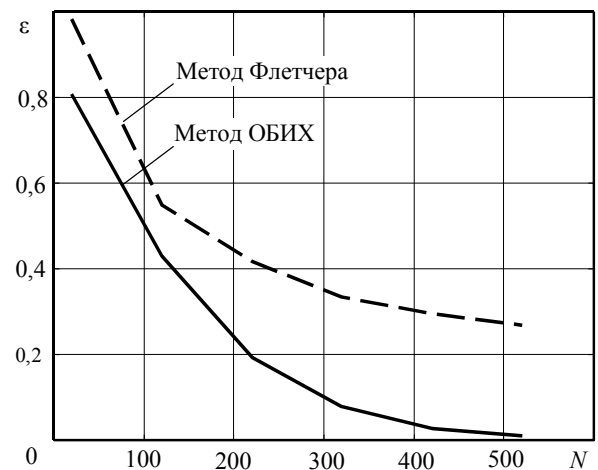


Рисунок 4 – Сравнение методов вычисления ДЧХ по критерию ММО

Таким образом, анализ характеристик авторегрессионных фильтров в условиях ограниченной выборки входного сигнала показал, что принципиально возможно применение двух методик построения ДЧХ. Количественные оценки по критериям среднеквадратического и максимального отклонения ДЧХ от статической СПМ показывают, что метод ОБИХ удобен для предварительной, оперативной оценки частотных характеристик фильтра в случае работы с короткими выборками.

Ускорение переходных процессов

В большинстве задач обработки сигналов с использованием каскадного включения фильтров [4] приходится начинать обработку во втором фильтре после окончания переходных процессов в первом фильтре, что при ограниченном объеме выборки приводит к значительному сокращению числа отсчетов на втором этапе фильтрации. Ти-

пичным примером является первичная обработка радиолокационного сигнала в БИХ фильтре, подавляющем пассивную помеху, и последующем согласованном фильтре (накопления) сигнала на фоне шума и остатков режекции помех.

Для сокращения переходного процесса в БИХ фильтре в [2] предложен эффективный метод инициализации памяти фильтра перед обработкой. Он заключается в предпроцессорной записи начальных условий (начальных значений) в промежуточные элементы памяти фильтра. При этом переходный процесс начинается не с нулевых начальных условий, а с условий, приближенных к окончанию переходного процесса в фильтре. Однако выбор таких условий представляет непростую задачу, так как априорно при фильтрации случайных сигналов входные данные неизвестны. Тем не менее, известны методы инициализации, основанные на записи в промежуточные элементы памяти фильтра взвешенных входных отсчетов или их линейных комбинаций.

Определим дисперсию процесса на выходе такого фильтра, представляющего собой нестационарную случайную последовательность [3, 5–7]. Будем описывать обработку, используя аппарат решения дифференциальных (разностных) уравнений в пространстве состояний [8]. В общем случае БИХ фильтр порядка M описывается разностным уравнением M порядка или системой M уравнений состояния первого порядка вида

$$\mathbf{T}(k+1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{T}(k) + \mathbf{B}(k)\mathbf{X}(k), \quad (2)$$

и уравнением типа вход – состояние – выход

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{T}(k) + \mathbf{F}(k)\mathbf{X}(k), \quad (3)$$

где M -мерная квадратная матрица $\mathbf{A}(k)$, M -мерный вектор $\mathbf{B}(k)$, M -мерный вектор $\mathbf{C}(k)$ и M -мерный вектор $\mathbf{F}(k)$ зависят от k , так как система нестационарна. Рассмотрим в качестве примера структуру БИХ фильтра третьего порядка, реализуемого в форме каскадного включения КИХ фильтра первого порядка и БИХ фильтра второго порядка с элементами инициализации, использующими линейную комбинацию элементов входной выборки, представленную на рисунке 5.

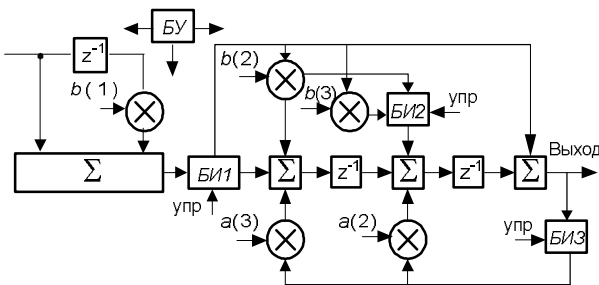


Рисунок 5 – БИХ фильтр с элементами инициализации

На рисунке 5: БУ – блок управления инициализацией, БИ – блоки инициализации, $a(i)$ и $b(i)$ – коэффициенты прямых и обратных связей фильтра. Для такого фильтра уравнение (2) можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} T_1(k+1) \\ T_2(k+1) \\ T_3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1x(k) & 1 & a_1v(k) + a_2v(1-v(k)) \\ b_2(k) & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_1(k) \\ T_2(k) \\ T_3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1v(k) + a_2v(1-v(k)) \\ 1 - b_2x(k) \\ 1 \end{bmatrix} \times x(k),$$

где множители, описывающие функционирование элементов инициализации:

$$x(k) = \begin{cases} 0 & \text{при } k < 3, \\ 1 & \text{при } k > 3. \end{cases}$$

$$v(k) = \begin{cases} 0 & \text{при } k \leq 2, \\ 1 & \text{при } k > 2. \end{cases}$$

Уравнение вход – состояние – выход определяется как

$$\mathbf{Y}(k) = [x(k) \quad 0 \quad x(k)] \times \begin{bmatrix} T_1(k) \\ T_2(k) \\ T_3(k) \end{bmatrix} + x(k)x(k).$$

Изменение состояния фильтра от отсчета к отсчету определяется переходной матрицей состояния $\Phi(k)$, используя которую и уравнения (2, 3), можно перейти к следующей форме уравнений состояния.

$$\mathbf{T}(k) = \Phi(k)\mathbf{T}(0) + \sum_{j=0}^{k-1} \Phi(k-j-1)\mathbf{B}(j)x(j),$$

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{C}(k)\Phi(k)\mathbf{T}(0) + \sum_{j=0}^{k-1} \mathbf{C}(k)\Phi(k-j-1)\mathbf{B}(j)x(j) + \mathbf{F}(k)x(k),$$

где $\Phi(k) = \prod_{j=0}^{k-1} \mathbf{A}(j)$. Из последнего выражения

следует, что компоненты вектора весовых коэффициентов нестационарного БИХ фильтра определяются как $\mathbf{G}(k) = \mathbf{Y}(k)|_{x(j) = \delta_{j0}}$. Тогда

$$\mathbf{G}(k) = \mathbf{C}(k)\Phi(k)\mathbf{T}(0) + \mathbf{C}(k)\Phi(k-1)\mathbf{B}(0) + \mathbf{F}(0)\delta_{k0} = \mathbf{C}(k)\Phi(k-1) \times [\mathbf{A}(k-1) \quad \mathbf{T}(0) \quad \mathbf{B}(0)] + \mathbf{F}(0)\delta_{k0},$$

а дисперсия процесса на выходе фильтра имеет квадратичную форму вида

$$\sigma^2(k) = \mathbf{G}^T(k)\mathbf{R}\mathbf{G}(k),$$

где \mathbf{R} – k -мерная корреляционная матрица процесса на входе фильтра. Корреляционная матрица процесса на выходе фильтра $\mathbf{R}_v(k) = \mathbf{D}^T(k)\mathbf{R}\mathbf{D}(k)$, где $\mathbf{D}(k)$ – матрица обработки верхней треугольной формы с элементами $D_{jl}(k) = G_{l-j}(k)$. Заметим, что ДЧХ может быть

определена и как преобразование Винера - Хинчина от зависящей от номера k отсчета корреляционной матрицы $\mathbf{R}_v(k)$.

В КИХ фильтрах длительность переходных процессов определяется порядком фильтра, и они завершаются к номеру отсчета, соответствующему полному заполнению фильтра входными отсчетами. Переходные процессы в БИХ фильтрах приводят к значительным отклонениям ДЧХ от статической АЧХ ввиду постепенного затухающего (при условии устойчивости фильтра) влияния обратных связей. Применение аппарата ДЧХ позволяет выбрать оптимальный порядок фильтра (количество его прямых и обратных связей) для обработки сигнала с ограниченным числом отсчетов. Таким образом, удается частично скомпенсировать ограниченность длины обрабатываемой последовательности ее учетом при оптимизации порядка и параметров фильтра.

Аппарат анализа динамических систем в пространстве состояний можно успешно применить и для анализа работы АРСС фильтра при ограниченном объеме выборки. Алгоритм фильтрации в АРСС фильтре может быть описан разностным уравнением p -го порядка или системой r уравнений состояния первого порядка:

$$\mathbf{T}(j+1) = \mathbf{A}(j)\mathbf{T}(j) + \mathbf{B}(j)\mathbf{x}(j),$$

$$\mathbf{y}(j) = \mathbf{C}(j)\mathbf{t}(j) + \mathbf{D}(j)\mathbf{x}(j),$$

где $\mathbf{T}(j)$ – вектор переменных состояния, $\mathbf{x}(j)$ – вектор возбуждающего воздействия, $\mathbf{y}(j)$ – вектор выходных значений. Матрицы \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} учитывают структуру фильтра и зависят от j для нестационарных систем.

Для АРСС фильтра постоянной структуры уравнения принимают вид

$$\mathbf{T}(j+1) = \mathbf{A}\mathbf{T}(j) + \mathbf{B}\mathbf{x}(j),$$

$$\mathbf{Y}(j) = \mathbf{T}(j),$$

где матрица \mathbf{A} выражается через АР-коэффициенты, \mathbf{B} – через СС-коэффициенты:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{p-1} & -a_p \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_0 & b_1 & \dots & b_{q-1} & b_q \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = [1; 0; \dots; 0; 0], \mathbf{D} = 0.$$

Таким образом, задав вектор состояния \mathbf{T} , который формируется в установившемся режиме, можно сократить длительности переходного процесса и улучшить качество обработки сигналов малой длительности. В машинных экспериментах (рисунок 6) вектор состояния запоминался после прохождения 100 отсчетов последовательности, соответствующей контрольной СПМ, и в последующей выборке инициализировал фильтр. Зависимость эффективности инициализации от длины входной последовательности для сигнала с нулевым средним при условии синхронизации иллюстрирует рисунок 6.

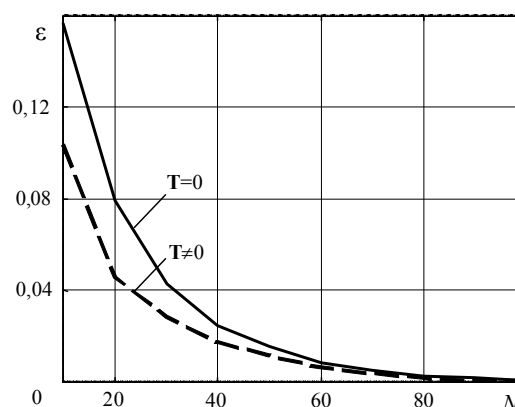


Рисунок 6 – Эффективность по критерию СКО метода инициализации

Необходимо отметить сравнительно невысокую эффективность методики инициализации для сигнала с нулевым средним. Достижимый по критерию СКО выигрыш составляет около 10-20 %, и имеет место существенная зависимость положительного эффекта от синхронизации инициализирующего и входного сигналов. Такую синхронизацию сложно обеспечить для квазидетерминированного сигнала и невозможно – для случайного сигнала. Для сигнала с ненулевым средним инициализация весьма эффективна.

Таким образом, проанализировано применение оптимизации порядка фильтра и инициализации его памяти в целях повышения эффективности рекурсивных фильтров. Инициализация эффективна при ненулевом среднем входного сигнала или при возможности синхронизации инициализирующего и входного сигналов. Используя приведенные результаты анализа, удается точнее оценивать характеристики АРСС фильтра при ограниченной выборке данных, сократить переходный процесс и в итоге улучшить качество обработки сигналов.

Заключение

В статье проанализированы методики расчета частотных характеристик фильтра при незавершенных переходных процессах. Показано,

что известные методики расчета ДЧХ БИХ фильтров в неустановившемся (переходном) режиме при увеличении объема выборки дают близкие по критерию СКО результаты, однако по критерию ММО они отличаются существенно. В целом метод ОБИХ при эквивалентной длине последовательности приводит к меньшим значениям СКО и ММО, и частотная характеристика при этом оказывается ближе к статической СПМ. Метод инициализации позволяет приблизить ДЧХ к статическим и существенно сократить длительность переходных процессов в фильтре.

Работа поддержана проектом, выполненным по государственному заданию № 8.8445.2017/БЧ Минобрнауки на 2017-2019 гг. высшим учебным заведениям и научным организациям в сфере научной деятельности.

Библиографический список

1. Бесекерский В. А., Попов Е. П. 4-е изд // Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
2. Флетчер-мл. Р., Барлейдж Д. Метод предва-

рительной обработки сигналов для улучшения работы устройства селекции движущихся целей в радиолокаторах с ФАР // ТИИЭР. – 1972. – №12. – С. 137-138.

3. Кошелев В. И. АРСС модели случайных процессов. Прикладные задачи синтеза и оптимизации. – М: Радио и связь, 2002. – 116 с.

4. Витязев В. В. Многоскоростная обработка сигналов. – М.: Горячая линия -телеком, 2017. – 336 с.

5. Кошелев В. И., Андреев В. Г. Оптимизация авторегрессионных моделей процессов с полимодальным спектром // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1996. Т. 39. № 5. С. 43-48.

6. Кошелев В. И. Оценка качества моделей случайных процессов при короткой выборке // Вестник РГРТА. – Рязань, 2001. – Вып. 8. – С. 31-35.

7. Кошелев В. И., Андреев В. Г. Адаптивная обработка сигналов в фильтрах с перестраиваемыми порядками // СВЧ-техника и спутниковый прием: материалы 3-ей Крымской конференции: В 6-ти т., г. Севастополь, 20-23 сентября 1993 г. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 1993. – Т.3. – С. 285-287.

8. Директор С., Рорер Р. Введение в теорию систем. / пер. с англ. под ред. Н.П. Бусленко. – М.: Мир, 1974. – 464 с.

UDC 621.37 (075.5)

ANALYSIS OF FILTER AND PROCESS PARAMETRIC MODELS CHARACTERISTICS IN FREQUENCY DOMAIN

V. I. Koshelev, PhD (in technical sciences), head of the department of radioengineering systems, full professor, koshelev.v.i@rsreu.ru

*The problem of analyzing the frequency characteristics of filters in unfinished transient processes (dynamic frequency characteristics) is considered. Such problems are typical both for IIR-filters including the ones based on auto regression models and for FIR-filters, viz. moving average filters. The application of a given approach is especially important for concatenated filters. The methods to reduce the length of transient processes improving dynamic frequency characteristics of filters are analyzed. **The aim of the work** is to analyze the degree of static and dynamic frequency filter characteristics correspondence depending on the length of the sample and techniques to accelerate transient processes in IIR filters.*

Key words: dynamic frequency characteristics of filters, transient process length reduction.

DOI: 10.21667/1995-4565-2017-60-2-27-32

References

1. Besekerskij V. A., Popov E. P. 4-e izd. Teorija sistem avtomaticheskogo upravlenija. SPb.: Professija, 2003. P. 752. (in Russian).
2. Fletcher ml. R., Barlejdzh D. Metod predvaritel'noj obrabotki signalov dlja uluchshenija raboty ustrojstva selekcii dvizhushhihsja celej v radiolokatorah s FAR. TIIEr. 1972. No. 12. pp. 137 138. (in Russian).
3. Koshelev V. I. ARSS modeli sluchajnyh processov. Prikladnye zadachi sinteza i optimizacii. M: Radio i svjaz', 2002. P. 116. (in Russian).
4. Vitjazev V. V. Mnogoskorostnaja obrabotka signalov. M.: Gorjachaja linija telekom, 2017. P. 336.
5. Koshelev V. I., Andreev V. G. Optimizacija avto-regressionnyh modelej processov s polimodal'nym

spektrum. Izvestija vuzov. Radioelektronika. 1996. Vol. 39. No. 5. pp 43-48. (in Russian).

6. Koshelev V. I. Ocenka kachestva modelej sluchajnyh processov pri korotkoj vyborke. Vestnik RGR-TA. Rjazan', 2001. No. 8. pp. 31 35. (in Russian).

7. Koshelev V. I., Andreev V. G. Adaptivnaja obrabotka signalov v fil'trah s perestraivaemymi porjadkami. SVCh-tehnika i sputnikovyj priem: materialy 3-ej Krymskoj konferencii: V 6-ti t., g. Sevastopol', 20-23 sentjabrja 1993 g. Sevastopol': JeKOSI Gidrofizika, 1993. Vol. 3. pp. 285–287. (in Russian).

8. Direktor S., Rorer R. Vvedenie v teoriju sistem. per. s angl. pod red. N.P. Buslenko. M.: Mir, 1974. P. 464. (in Russian).