

**Синтез электрического фильтра для системы автоматического регулирования**

**Synthesis of the electric filter for the system of automatic regulation**

Исмаилов Ж.Т.<sup>1</sup>, Шелухин Е.Н.<sup>2</sup>, Сериков Т.М.<sup>1</sup>, Закиев Д.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: ismailov.zharaskan@mail.ru);

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, Россия

Мақалада сызықты функцияларымен берілген математикалық модельдер негізінде актив электр сүзгілерінің синтездеу сұлбасы ұсынылған. Әр сүзгі операциондық күшейткіштер, резисторлар мен конденсаторлар негізінде жиналған. Сүзгілердің барлық элементтері — сызықты, уақыт бойынша инвариантты болып келеді. Сүзгілердің синтезін жүргізу үшін типтік динамикалық буындардың амплитуда-жиіліктік сипаттамаларының қиылу жиіліктер мәндері мен олардың жиіліктер осіне көлбеулік бұрыштары (дБ/дек) беріледі. Сүзгілерді есептеу үшін бастапқы мәліметтер ретінде сәйкес файлда сақталған конденсаторлардың номиналдық мәндері қолданылады. Құрастырылып отырған жүйе актив сүзгілерінің элементар ұяшықтарының принципалдық сұлбалары мен конденсаторлар сыйымдылығының номиналдық шамаларын қамтитын файлдарды жанарту арқылы кеңейту мүмкіндігі бар.

The article presents a synthesis system of active electric filters on the basis of their mathematical models provided by the linear transfer functions. Each filter is implemented with operational amplifiers, resistors and capacitors. All filter elements are linear, concentrated and invariant over time. The initial data for the synthesis filters are the cut-off frequency response model of dynamic links and angles of inclination to the axis (dB/decade). Initial data for calculation of filters are the nominal values of capacitors stored in the corresponding file. The developed system has the ability to be expanded by updating files that contain the concepts of the unit cells of active filters and nominal values of capacitors.

Обеспечение электромагнитной совместимости электронных средств представляет собой сложную техническую задачу, для решения которой не существует универсальных приемов. Более того, ввиду комплексного характера проблемы в целом эту задачу можно эффективно решить только одновременным применением системотехнических, схмотехнических, конструкторских и технологических приемов, направленных на совершенствование характеристик радиоэлектронных и электротехнических средств.

При обеспечении электромагнитной совместимости важную роль играет фильтрация. В источниках помех фильтрация осуществляется с целью предотвращения распространения нежелательных электромагнитных колебаний за пределы устройства — источника помех в любых внешних соединениях. Особенностью фильтрации являются широкий частотный диапазон возможных помех и связанные с этим трудности реализации фильтров. Успехи технологии микроминиатюризации радиоэлектронных устройств обусловили смещение интересов разработчиков аппаратуры от обычных пассивных фильтров к активным, реализуемым, как правило, на базе операционных усилителей, что обеспечивает большую точность и помехоустойчивость аппаратуры и позволяет достигнуть существенного выигрыша в ее объемно-массовых характеристиках.

Как известно, электрический фильтр проектируется для выделения и пропускания требуемого сигнала из смеси полезных и нежелательных сигналов. Фактически электрические фильтры распро-

странены в современной технике настолько, что невозможно представить любой электронный прибор средней сложности, в котором бы не использовался фильтр в том или ином виде.

Проектирование и разработка фильтра в значительной мере зависят от того, какие его характеристики необходимо получить, в особенности частотные. Реально достижимая амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) обязательно должна быть гладкой, без разрывов и без строго горизонтальных участков, в том числе и нулевых.

Решение задачи синтеза фильтра было разбито на два этапа [1]:

- нахождение передаточной функции  $W(s)$  реализуемого фильтра, обеспечивающего заданные требования к АЧХ;
- разработка структуры и самой принципиальной схемы фильтра.

Второй этап значительно сложнее, и, кроме того, он неоднозначен. Одной и той же передаточной функции соответствует множество структур фильтров, основанных на тех или иных схемотехнических идеях и использующих разные элементные базы [2].

Несмотря на большой объем существующих программных продуктов, направленных на облегчение деятельности разработчика электронных устройств, разработка электрических фильтров до настоящего времени не автоматизирована, требует значительных временных затрат и ведется, как правило, методом анализа, при котором разработчик принимает за основу некоторую базовую схему, анализирует ее характеристики и, внося последовательно определенные корректировки, добивается, в конечном итоге, требуемого результата.

В связи с этим задача разработки системы синтеза электрических фильтров, обеспечивающей получение необходимой электронной схемы по ее математической модели, продолжает оставаться актуальной и требует своего решения. Именно она и является предметом исследования данной статьи, в результате которого должна быть разработана автоматическая система синтеза активных электрических фильтров на основании их математических моделей, предоставленных линейными передаточными функциями, удобными для алгоритмической реализации. Каждый фильтр должен быть реализован на операционных усилителях, резисторах и конденсаторах. Все элементы фильтров должны быть линейными, сосредоточенными и инвариантными во времени. Для достижения указанной цели были разработаны:

- модуль синтеза принципиальной схемы фильтра;
- модуль расчета параметров элементов фильтра;
- руководство пользователя системой.

Математическая модель фильтра представлена в виде двух систем уравнений. Первая система является собственно математической моделью проектируемого фильтра в виде линейных дифференциальных уравнений. Ее решение позволяет определить действующие в схеме фазовые переменные. Вторая система уравнений определяет зависимость выходных параметров фильтра от фазовых переменных [3].

Базовые элементы электрических типовых динамических звеньев приведены в таблице.

Передаточную функцию фильтра  $W_0$  представляем в виде

$$W_0(s) = W_1(s) * W_2(s) * \dots * W_n(s), \quad (1)$$

где  $W_i(s)$  — передаточная функция  $i$ -того типового динамического звена.

При синтезе фильтра используется не АЧХ фильтра, а логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ), единицей измерения в которой является децибел (дБ).

ЛАЧХ фильтра выражается через ЛАЧХ типовых динамических звеньев в виде

$$20 \lg |W_0(j\omega)| = 20 \lg |W_1(j\omega)| + 20 \lg |W_2(j\omega)| + \dots + 20 \lg |W_n(j\omega)|. \quad (2)$$

Calculations			1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0
C1	3.нФ	(556К)1/с	3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1	5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1
C2	1.нФ	(556К)1/с	10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30
C3	5.6мкФ	(234)1/с	33	36	39	43	47	51	56	62	68	75	82	91
C5	2.2мкФ	(234)1/с	100	110	120	130	150	160	180	200	220	240	270	300
			330	360	390	430	470	510	560	620	680	750	820	910

мкФ (1-10К)1/с   
 нФ (10К-1М)1/с   
 пФ Более (1М)1/с

Расчет

Вхождение тех или иных типовых динамических звеньев в состав математической модели фильтра определяется по углам наклона  $\alpha$  (дБ/дек.) ЛАЧХ типовых динамических звеньев к оси частот, частотам среза  $\omega_{ср}$  (точкам излома ЛАЧХ типовых динамических звеньев) и общему коэффициенту усиления фильтра  $K$ , являющимися входными параметрами математической модели.

Используя полулогарифмическую плоскость с частотной осью — осью абсцисс и амплитудной осью — осью ординат, разбиваемой на поддиапазоны в заданных частотах среза, и проводя на ней геометрическое сложение ЛАЧХ типовых динамических звеньев, получаем ЛАЧХ всего фильтра [4].

Расчет параметров элементов, образующих фильтр, осуществляется в соответствии с принципиальной схемой фильтра, синтезированного на базе принципиальных схем элементарных ячеек. После запуска приложения FilterSyntesis на экране монитора появится главное окно программы, представленное на рисунке 1.

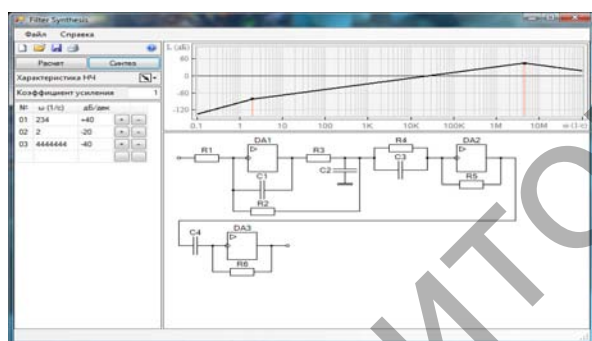


Рис. 1. Главное окно программы

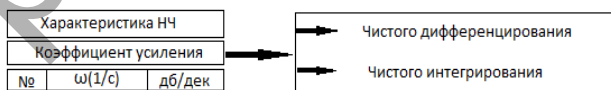


Рис. 2. Выпадающий список характеристик на нижних частотах

На начальном этапе проектирования пользователю предлагается ввести следующие исходные данные:

- наличие в передаточной функции фильтра звеньев чистого дифференцирования или чистого интегрирования (опция может быть выбрана из выпадающего списка, представленного на рис. 2);
- коэффициент усиления фильтра (рис. 3), причем вводимое значение должно лежать в диапазоне от 0.1 до 10;
- частоты среза и углы наклона логарифмических амплитудно-частотных характеристик типовых динамических звеньев, образующих передаточную функцию фильтра (рис. 4). При этом частота среза каждого последующего введенного звена должна быть больше частоты предыдущего (исключение составляют звенья чистого дифференцирования и чистого интегрирования, которые вводятся в первую очередь), а суммарный угол наклона не может быть больше нуля.

После того как все параметры введены, можно приступить непосредственно к синтезу фильтра. Для этого необходимо нажать кнопку «Синтез» (рис. 1).

Характеристика НЧ				
Коэффициент усиления				1
№	$\omega$ (1/с)	дБ/дек		
01	234	+40	+	-
02	1000	-20	+	-
03	555555	-40	+	-

Рис. 3. Ввод параметров передаточной функции синтезируемого фильтра

В случае некорректно введенных данных на экране монитора появится диалоговое окно «Ошибка» с описанием ошибки. Для простоты исправления неправильно введенные данные будут выделены красным цветом. Если исходные данные верны и фильтр реализуем, то инструментальная среда синтезирует фильтр и выводит полученные результаты на экран монитора в виде принципиальной электрической схемы фильтра и его логарифмической амплитудно-частотной характеристики (вид выводимой информации представлен на рис. 4, 5).

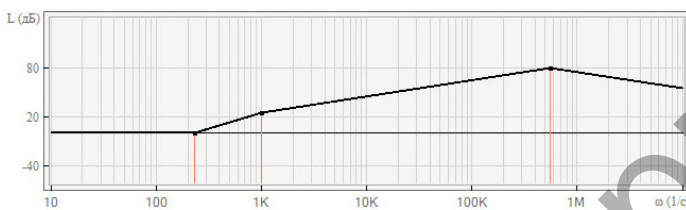


Рис. 4. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика фильтра

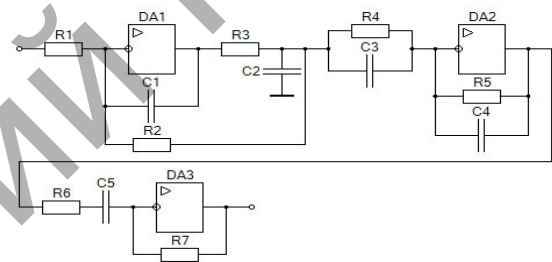


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема фильтра

После завершения синтеза фильтра пользователь имеет возможность произвести расчет параметров элементов, входящих в его состав. Для этого необходимо нажать кнопку «Расчет» (рис. 1). В этом случае на экране монитора появляется окно ввода номиналов конденсаторов, относительно которых осуществляется расчет параметров остальных элементов схемы. В таблице, расположенной в левой части окна, указаны порядковые номера конденсаторов синтезированной схемы, необходимые для ввода с частотами среза ячеек, в состав которых они входят. Номиналы конденсаторов можно ввести вручную непосредственно в таблицу либо двойным щелчком мыши выбрать из таблицы номиналов, представленной в правой части окна. При этом рекомендуемые номиналы конденсаторов для частот среза в диапазоне  $(1-10\text{к})1/\text{с}$  составляют мкФ, для частот среза  $(10\text{к}-1\text{М})1/\text{с}$  — нФ, а для частот среза  $>1\text{М}/\text{с}$  — пФ.

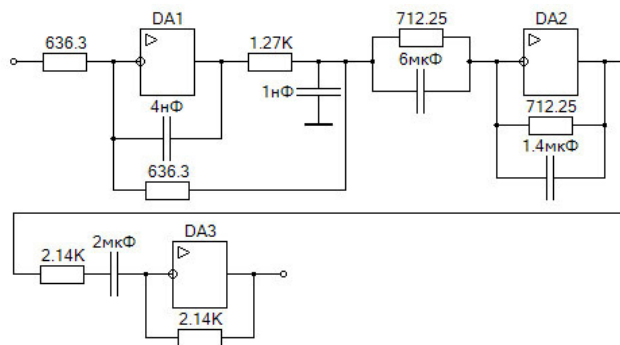


Рис. 6. Принципиальная схема фильтра с указанием параметров элементов

После нажатия кнопки «Расчет» инструментальная среда вычисляет параметры остальных элементов фильтра и выводит их на ранее полученную принципиальную схему (рис. 6).

В соответствии с поставленной задачей в процессе выполнения данной работы была разработана инструментальная среда, предназначенная для автоматизации процесса синтеза линейных активных электрических фильтров по заданным передаточным функциям, т.е. по их частотам среза, углам наклона логарифмических амплитудно-частотных характеристик и коэффициентам усиления.

Разработанная инструментальная среда позволяет в автоматическом режиме:

- строить амплитудно-частотные характеристики проектируемых фильтров;
- получать схемные решения фильтров;
- осуществлять расчет параметров элементов фильтра.

В результате проведенного литературного обзора прямых аналогов разрабатываемой инструментальной среды выявлено не было. Работа большинства из наиболее близких к разрабатываемой инструментальных сред — Electronic Workbench, MATLAB, DesignLab 8,0, Super-Compact, APLAC 7.0, Micro-Cap — основана на анализе хранящихся в библиотеках готовых схемных решений и по решаемым задачам не обеспечивает достижения целей, поставленных в начале данной статьи.

Представленный в работе алгоритм позволяет синтезировать RC-фильтры, но при дальнейшем расширении базы элементарных ячеек появится возможность реализовывать схемные решения фильтров любой структуры, как активных, так и пассивных.

В качестве языка программирования использован язык C#, характеризующийся широкими функциональными возможностями и доступностью.

Реализация решений не требует использования специального дорогостоящего оборудования, а достигается на персональном компьютере стандартной конфигурации с использованием операционной системы Microsoft Windows XP SP2 и базового программного обеспечения Visual Studio 2008 Professional Edition, позволяющего быстро создавать подключенные приложения и обеспечивающего широкие возможности для работы пользователя.

Разработанная инструментальная среда проста в использовании и не требует от пользователя глубоких специальных знаний в области схемотехники электронных устройств.

#### References

1. *Volovich G.I.* Circuit design of analog and mixed-signal devices. — М.: Publishing house «Dodeka-XXI», 2005.
2. *Lamb G.* Analog and digital filters. — М.: Publishing house «Mir», 1983.
3. *Ivashchenko N.N.* Automatic regulation. Theory and elements of systems. — М.: Engineering, 1973.
4. *Tronin Yu.V., Gursky O.V.* Synthesis filters. — М.: Moscow Aviation Institute Publ., 1990.