

УДК 681.58

В. А. Панов, кандидат технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

## МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АНАЛОГОВЫХ ФИЛЬТРОВ НА ФУНКЦИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ

Предложена методика автоматизированного проектирования фильтров низкой частоты (ФНЧ) на примере фильтра Баттерворта. Для верификации результатов проектирования использован пакет MatLab. В методике объединены процедуры структурного и параметрического синтеза ФНЧ на функциональном уровне.

**Ключевые слова:** фильтр, проектирование, функциональный уровень, MatLab.

Существующие методики проектирования фильтров низкой частоты на функциональном уровне [1, 2] представляют собой либо расчет параметров готовых структур по определенным формулам, либо моделирование готовых решений с помощью автоматизированных пакетов. В данной работе предложена методика автоматизированного проектирования ФНЧ на функциональном уровне, которая позволяет объединить процедуры синтеза и анализа в единый процесс.

Блок-схема алгоритма процесса проектирования представлена на рис. 1.

Методика рассмотрена на примере фильтра Баттерворта, однако может быть применима и для проектирования фильтров других типов. Процесс проектирования состоит из следующих этапов.

1. Первая стадия проектирования – формулировка технического задания (ТЗ). В ТЗ на проектирование ФНЧ на функциональном уровне задаются следующие параметры:

$a_{з\text{дБ}}$  – параметр, характеризующий ослабление в полосе задерживания (в дБ);

$\Omega_3$  – нормированная частота, на которой обеспечивается ослабление  $a_{з\text{дБ}}$ .

Требуется определить порядок и параметры передаточной функции фильтра.

2. С целью унификации процесса проектирования следующим этапом является нормирование исходных характеристик фильтра.

Правило нормирования требует, чтобы амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ФНЧ пересекла уровень затухания 3 дБ на нормированной частоте  $\Omega_{\text{среза}} = 1$  рад (рис. 2). Такой фильтр и его АЧХ называются нормированными к одному радиану. При этом значение параметра  $a_3$  переводится из дБ в безразмерные единицы по формуле  $a_3 = 10^{\frac{a_{з\text{дБ}}}{20}}$ .

3. На следующем этапе определяется порядок фильтра  $n$  [3]:

$$n = \text{int} \left\{ \frac{\lg(a_3^2 - 1)}{2 \lg(\Omega_3)} \right\},$$

где  $\text{int}\{N\}$  – наименьшее целое число, большее или равное  $N$ .

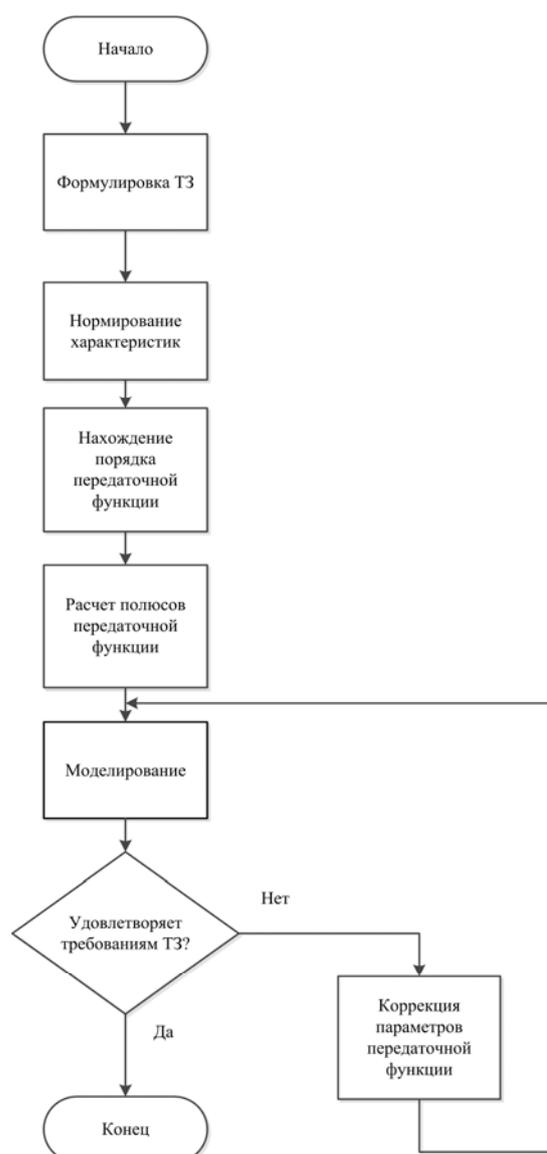


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

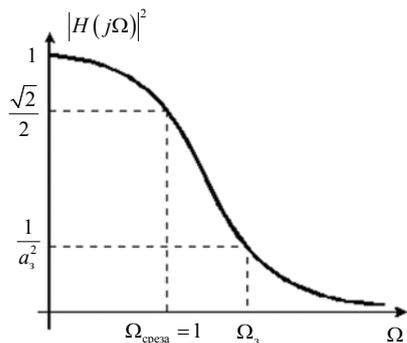


Рис. 2. Идеальная характеристика фильтра Баттерворта

4. Находятся полюса передаточной функции, расположенные в левой полуплоскости на окружности единичного радиуса [3]:

$$p_{pk} = \exp\left\{\frac{j\pi}{2}\left[1 + \frac{2k-1}{n}\right]\right\}, \quad k = \overline{1, n}.$$

Расчет полюсов передаточной функции можно произвести, например, с помощью программы, написанной в системе Mathcad.

5. Записывается передаточная функция фильтра:

$$H(p) = \frac{k_0}{\prod_{k=1}^n (p - p_{pk})},$$

где  $k_0$  – константа нормирования;

$$H(p) = \frac{k_0}{\Sigma_0(p)} \cdot \prod_{k=1}^r \frac{1}{p^2 + B_{1k}p + B_{0k}},$$

$$\Sigma_0(p) = \begin{cases} p, & -n - \text{четное}, \\ p+1, & -n - \text{нечетное}, \end{cases}$$

$$r = \begin{cases} \frac{n+1}{2}, & -n - \text{нечетное}, \\ \frac{n}{2}, & -n - \text{четное}, \end{cases}$$

$$B_{1k} = -(p_{pk} + p_{pk}^*) = -2 \operatorname{Re}\{p_{pk}\},$$

$$B_{0k} = p_{pk} \cdot p_{pk}^* = |p_{pk}|^2.$$

Нормирующий множитель  $k_0$  можно найти из условия нормировки:

$$H(p)|_{p=0} = 1; \quad k_0 = \prod_{k=1}^r B_{0k}.$$

6. После определения передаточной функции проводится моделирование в пакете MatLab для получения вида АЧХ нормированного фильтра Баттерворта.

7. За моделированием следует верификация проекта. Верификация заключается в сравнении значений параметров, заданных в ТЗ, со значениями, полученными с помощью моделирования. Для этого полученная АЧХ сравнивается с идеальной характеристикой фильтра Баттерворта (рис. 2). Значение

АЧХ на частоте среза, равной 1, должно соответствовать значению коэффициента усиления  $\frac{\sqrt{2}}{2}$ , а на частоте  $\Omega_3$  – значению  $1/a_3^2$ .

8. Если полученные в результате моделирования характеристики не удовлетворяют требованиям ТЗ, то требуется коррекция результатов, после чего процесс моделирования повторяется. Если результат удовлетворяет требованиям ТЗ, то процесс проектирования закончен.

Рассмотрим предложенную методику на примере.

1. ТЗ на проектирование ФНЧ:

$$a_{3\text{дБ}} = 40 \text{ дБ}; \quad \Omega_3 = 3.$$

2. Нормирование характеристик фильтра. Для этого  $a_{3\text{дБ}}$  переводится из дБ в безразмерные единицы:

$$20 \lg a_3 = 40; \quad a_3 = 100.$$

3. Находится порядок фильтра:

$$n = \operatorname{int}\left\{\frac{\lg(100^2 - 1)}{2 \lg(3)}\right\} = \operatorname{int}(4,19) = 5.$$

4. Определяются полюса передаточной функции:

$$p_{p1} = \exp\left(j \frac{\pi}{2} \left[1 + \frac{2-1}{5}\right]\right) = \exp\{j0,6\pi\} = -0,309077 + j0,951057;$$

$$p_{p2} = \exp\left(j \frac{\pi}{2} \left[1 + \frac{4-1}{5}\right]\right) = \exp\{j0,8\pi\} = -0,809017 + j0,587785;$$

$$p_{p3} = \exp\{j\pi\} = -1;$$

$$p_{p4} = \exp\left(j \frac{\pi}{2} \left[1 + \frac{3-1}{5}\right]\right) = \exp\{j1,2\pi\} = -0,809017 + j0,587785;$$

$$p_{p5} = \exp\left(j \frac{\pi}{2} \left[1 + \frac{5-1}{5}\right]\right) = \exp\{j1,4\pi\} = -0,309077 - j0,951057;$$

Данные расчеты можно, например, произвести с помощью программы, записанной в Mathcad:

$$\varepsilon \equiv 0$$

$$a \equiv 40$$

$$\Omega \equiv 3$$

$$j \equiv \sqrt{-1}$$

$$a_1 \equiv 10^{\frac{40}{20}}$$

$$n \equiv \operatorname{round}\left[\left(\frac{\log(a_1^2 - 1)}{2 \log(\Omega)}\right), 0\right] + 1$$

$$k \equiv 1..n$$

$$n \equiv 5$$

$$H(p) \equiv \frac{1}{\prod_{k=1}^n (p - p_k)}$$

$$p_k \equiv \exp \left[ \frac{j \times \pi}{2} \times \left( 1 + \frac{2k-1}{n} \right) \right]$$

$$p_1 = -0,309 + 0,951i$$

5. Записывается передаточная функция ФНЧ:

$$H(p) = \frac{k_0}{(p + p_{p0})(p + p_{p2})(p + p_{p3})(p + p_{p4})(p + p_{p5})};$$

при  $p = 0$   $H(p) = H(0) = k_0 = 1$ , так как  $H(p)|_{p=0} = 1$ ;

$$H(p) =$$

$$= \frac{k_0}{(p+1)(p^2 + 0,618034p + 1)(p^2 + 1,618034p + 1)};$$

$$H(p) = \frac{1}{(p^5 + 3,23p^4 + 5,23p^3 + 5,23p^2 + 3,23p + 1)}.$$

6. Проводится функциональное моделирование фильтра. Структурная схема программы моделирования на языке MatLab представлена на рис. 3.

Структурная схема блока Subsystem1 представлена на рис. 4. Аналогичные структуры имеют блоки Subsystem2 и Subsystem3. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

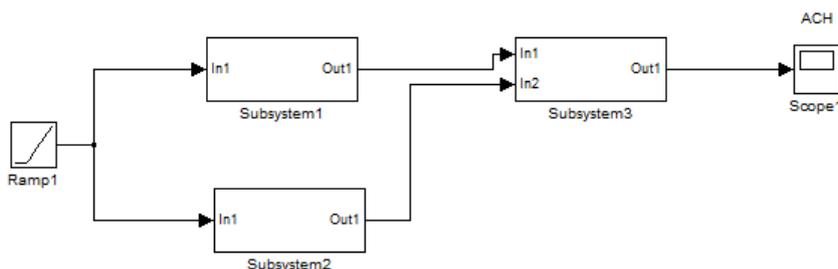


Рис. 3. Графическая схема программы для нахождения АЧХ фильтра Баттерворта

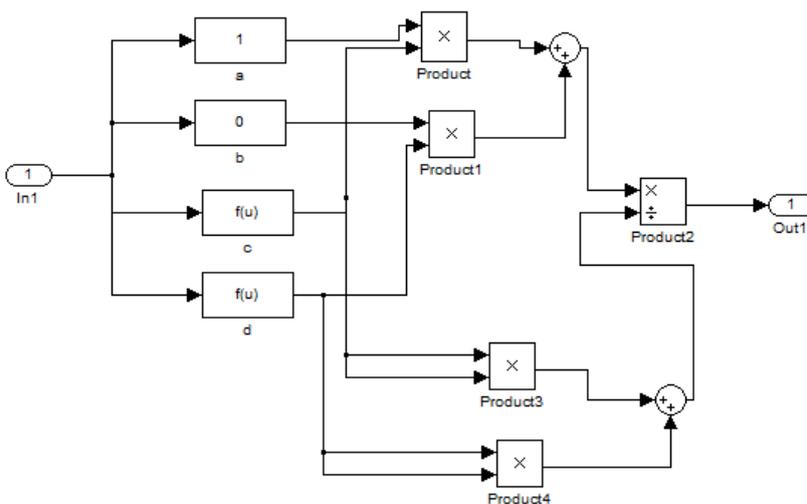


Рис. 4. Структурная схема блока Subsystem1

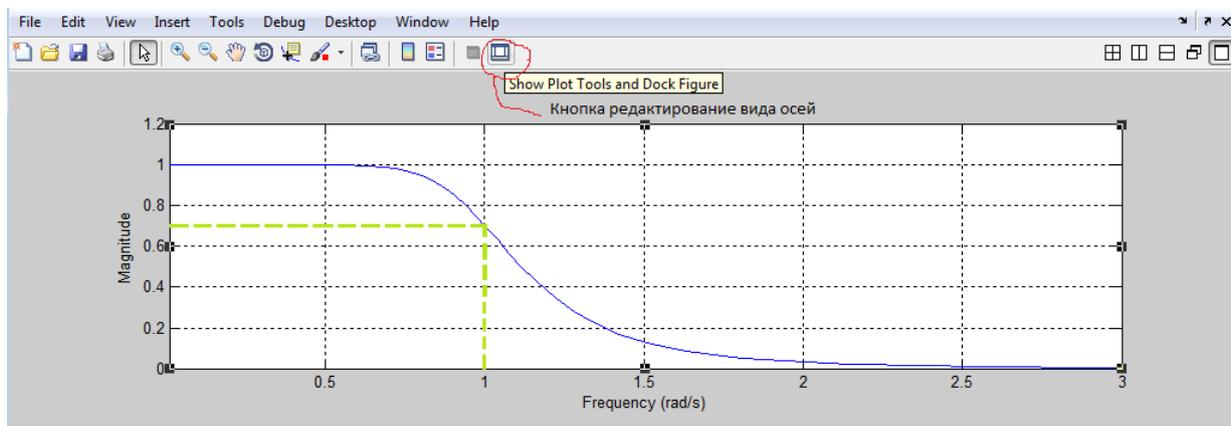


Рис. 5. Вид АЧХ

7. Верификация проекта.

- Форма АЧХ получилась идеальной.
- Значение АЧХ на частоте среза, равной 1, соответ-

ствует значению коэффициента усиления  $\frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,707$ .

- Значение частоты  $\Omega_3 = 3$  соответствует значению  $1/a_3^2 = 0,000625$ .

8. Вывод по результату проектирования: полученные характеристики фильтра удовлетворяют требованиям технического задания, следовательно, коррекция результатов проектирования не требуется.

Таким образом, в работе предложена методика автоматизированного проектирования фильтров низкой частоты (ФНЧ) на примере фильтра Баттерворта. В методике объединены процедуры структурного

и параметрического синтеза ФНЧ на функциональном уровне, а также осуществлена верификация результатов проектирования. Данная методика может быть использована специалистами, занимающимися проектированием информационно-измерительных систем.

#### Библиографические ссылки

1. Джонсон Д., Джонсон Дж., Мур Г. Справочник по активным фильтрам : пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.
2. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб. : Питер, 2002. – 320 с.
3. Хьюлсман Л. П., Аллен Ф. Е. Введение в теорию и расчет активных фильтров : пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1984. – 384 с.

V. A. Panov, PhD, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University

#### Method of Automated Design of Analog Filters at Functional Level

*The paper proposes the technique of computer-aided design of low frequency filters(LFF) by the example of Butterworth filter. To verify design results the software MatLab was applied. This technique united procedures of LFF structural and parametric synthesis at the functional level.*

**Key words:** filter, design, functional level, MatLab.

УДК 623.593

**В. В. Коробейников**, кандидат технических наук, Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск

**В. С. Казаков**, кандидат технических наук, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## ДОЗВУКОВАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ МИШЕНЬ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ТОЧКИ ПОПАДАНИЯ И СКОРОСТИ ПУЛИ

*Рассматривается конструкция и математическая модель мишени, позволяющей определять для каждого выстрела координаты точки попадания и скорость пули.*

**Ключевые слова:** акустика, мишень, координата, скорость, датчик.

Дозвуковая акустическая мишень предназначена для определения внешнебаллистических параметров пуль, скорость движения которых меньше 500 м/сек. Для пуль со скоростью движения по траектории больше этого значения применяются сверхзвуковые акустические мишени [1]. Дозвуковая мишень отличается от сверхзвуковой наличием формирователя возмущения [2], при пробивании которого пулей образуется звуковая волна, распространяющаяся от точки попадания (ТП) до акустических датчиков (далее датчиков) расположенных на несущем каркасе мишени. Для определения координат точек попадания используется время прохождения этой волны от ТП до датчиков, которое определяется с помощью цифрового виртуального запоминающего осциллографа (ВЗО) [3]. Датчики расположены на каркасе таким образом, что при любой ТП после

пролета пуль формирователя от воздействия волны сначала срабатывает стартовый датчик (рис. 1). Сигнал от стартового датчика запускает ВЗО на прием, оцифровывание и запись информации от других датчиков в память прибора, затем с помощью программы ПЭВМ информация из памяти прибора считывается и обрабатывается. В результате обработки этой информации определяется время от момента появления сигнала на выходе стартового датчика до момента появления сигнала на выходе каждого координатного датчика. Далее эти времена используются в системе уравнений, в результате решения которой определяются координаты ТП.

Математическая модель дозвуковой мишени для определения координат ТП получается из рассмотрения рис. 1 и представляет собой следующую систему уравнений: