

---

---

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ  
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

---

---

УДК 621.372

РАЗРАБОТКА И СИНТЕЗ АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ  
НА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЗВЕНЬЯХ

© 2023 г. П. С. Мартьянов\*

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,  
ул. Бутлерова, 15, Москва, 117342 Российская Федерация

\*E-mail: La3232@mail.ru

Поступила в редакцию 30.11.2022 г.

После доработки 17.12.2022 г.

Принята к публикации 27.01.2023 г.

Описана методика синтеза аналоговых устройств с использованием элементарных звеньев электроники, таких как интегрирующее, дифференцирующее, сложения (вычитания), умножения (деления), мультиплексирования (демультиплексирования). Предложенная методика синтеза обоснована теоретически, а используемые элементарные звенья называются предлагаемой элементной базой аналоговой электроники. Приводится описание теории, а также пример разработки модели аналогового фильтра низких частот с использованием предлагаемой методики.

DOI: 10.31857/S003384942305011X, EDN: UHVVOF

## ВВЕДЕНИЕ

Развиваемая в настоящее время идея замены стандартной элементной базы радиоэлектроники (резисторы, конденсаторы, индуктивности, диоды, транзисторы и т.д. до бесконечности) на элементную базу, состоящую всего из пяти элементов, оригинальна тем, что создает реальные предпосылки для появления перепрограммируемых аналоговых интегральных схем и матричных аналоговых больших интегральных схем. Данная работа является логическим продолжением и развитием основных идей, предложенных в работах [1, 2]. В соответствии с [1, 2] под синтезом аналоговой системы понимают методы, позволяющие при некоторых первоначально заданных параметрах системы, характеристиках воздействий, ограничениях и взаимосвязях определить структурную схему и математическую модель в виде передаточной характеристики, по которым в дальнейшем определить функционально-структурную (принципиальную) схему и основные параметры разрабатываемого устройства. Таким образом, задача синтеза устройства разделена на две задачи: получение передаточной функции по заданным параметрам и синтез функционально-структурной схемы по передаточной функции.

Несмотря на широкое применение цифровой техники, аналоговая электроника сохраняет свои позиции, к примеру, в области низкочастотного диапазона для воспроизведения музыкальных звуков. В этом случае обеспечивается лучшее качество звучания, чем на цифровых элементах. А

также в области высокочастотного диапазона, что позволяет проектировать аналоговые приборы на частотах, недоступных для цифровой техники.

Впервые задачу синтеза линейных динамических систем предложил советский ученый А.А. Ланнэ в работе [4], и там же указал на непреодолимые трудности на пути ее решения. А первые научные работы и теоретическое обоснование новой методики появились в начале 2000 годов [1, 2].

Для линейной динамической системы процедура анализ–синтез может быть определена только в том случае, если определена элементная база [3, 4]. Так, если известно множество элементарных звеньев, из которых будет строиться система в процессе синтеза и на которые будет распадаться система в процессе анализа, то процедура анализ–синтез может быть строго определена. Поскольку для классической электроники элементная база до сих пор не определена несколькими радиоэлементами [1], следовательно, ожидать обоснования процедур анализ–синтез не имеет смысла.

Цель данной работы состоит в обосновании возможности синтеза аналоговых устройств на основе использования предлагаемой элементной базы.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКИ СИНТЕЗА

Как уже было сказано, основная идея перехода на нестандартную элементную базу предполагает использование пяти элементарных звеньев, которые являются элементами теории автоматическо-

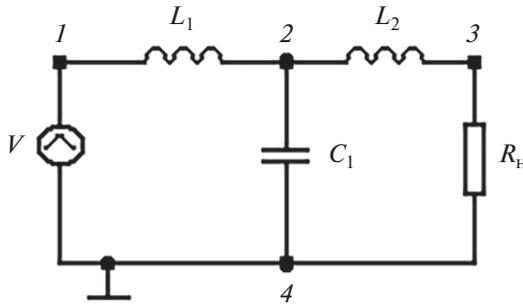


Рис. 1. Т-образный фильтр нижних частот.

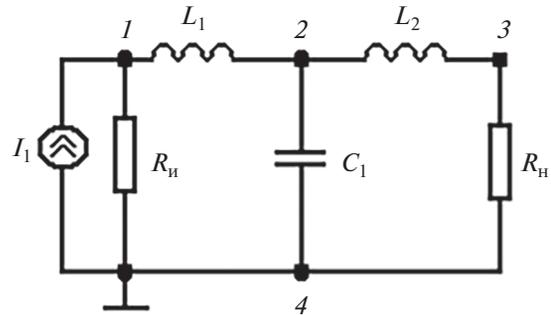


Рис. 2. Модель Т-образного фильтра нижних частот.

го управления, включающими в себя интегрирующие звено, дифференцирующее звено, звено сложения, или вычитания, звено умножения, или деления и звено мультиплексирования (соединения или разъединения). Основная задача предлагаемой методики синтеза аналогового устройства состоит в получении функционально-структурной модели (принципиальной схемы) по известной передаточной функции. Для этого необходимо рассмотреть случай, когда передаточная функция задается электрической принципиальной схемой, состоящей из стандартной элементной базы [2, 5].

Поскольку данная методика синтеза не так проста для восприятия, то целесообразно для лучшего понимания процесса рассмотреть пример реализации какого-либо устройства из элементарных звеньев электроники. В качестве примера, используем аналоговый Т-образный фильтр нижних частот (ФНЧ), электрическая принципиальная схема (модель), которого представлена на рис. 1. На заключительном этапе была получена модель фильтра из элементарных звеньев, принцип работы которой такой же, как у Т-образного ФНЧ. Далее, для практического обоснования методики с полученной моделью был проведен эксперимент.

Для обеспечения возможности получения системы уравнений в узловых потенциалах, преобразуем схему, представленную на рис. 1, заменив источник напряжения  $V$  на источник тока  $I$  в соответствии с преобразованиями Тевенина–Нортон [5]. Результат преобразования показан на рис. 2.

Для получения модели Т-образного ФНЧ в виде системы уравнений с узловыми потенциалами составим матрицу проводимости (1) схемы фильтра, изображенной на рис. 2:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_n} + \frac{1}{sL_1} & -\frac{1}{sL_1} & 0 & -\frac{1}{R_n} \\ -\frac{1}{sL_1} & \frac{1}{sL_1} + sC_1 + \frac{1}{sL_2} & -\frac{1}{sL_2} & -sC_1 \\ 0 & -\frac{1}{sL_2} & \frac{1}{R_n} + \frac{1}{sL_2} & -\frac{1}{R_n} \\ -\frac{1}{R_n} & -sC_1 & -\frac{1}{R_n} & \frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_n} + sC_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \\ -I \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $R_n, R_{in}$  – сопротивление нагрузки и источника тока соответственно.

В левой части системы расположена матрица проводимостей, умноженная на столбец узловых потенциалов, что в результате дает столбец токов, расположенных в правой части системы ( $G_i U_i = I_i$ ). Каждая строка матрицы относится к одному из узлов (см. рис. 2): первому (1), второму (2), третьему (3) и нулевому (4) соответственно [1, 2].

Поскольку узел 4 на схеме рис. 2 заземлен, то напряжение на нем будет равняться 0. Используя правила умножений матриц, вычеркиваем последний столбец и последнюю строку системы,

поскольку значение  $U_4 = 0$ . Выражение (1) упрощается и приобретает следующий вид:

$$\begin{bmatrix} G_n + \frac{1}{sL_1} & -\frac{1}{sL_1} & 0 \\ -\frac{1}{sL_1} & \frac{1}{sL_1} + sC_1 + \frac{1}{sL_2} & -\frac{1}{sL_2} \\ 0 & -\frac{1}{sL_2} & G_n + \frac{1}{sL_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $G_n, G_n$  – проводимость источника тока и нагрузки соответственно.

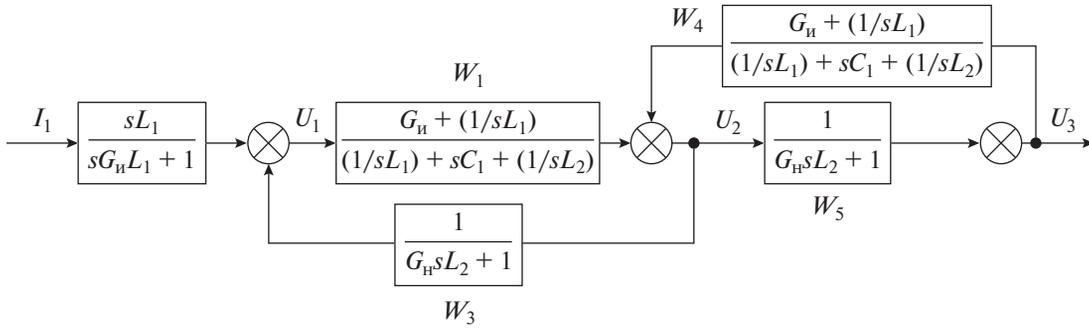


Рис. 3. Структурная схема Т-образного фильтра нижних частот.

После стандартного преобразования матрицы (2), переходим к системе уравнений

$$\begin{aligned}
 U_1 &= \frac{I_1 s L_1}{s G_n L_1 + 1} + \frac{U_2}{s G_n L_1 + 1} = \frac{I_1 s L_1 + U_2}{G_n s L_1 + 1}, \\
 U_2 &= \frac{U_1 \{G_n + (1/s L_1)\} + U_3 \{G_n + (1/s L_2)\}}{\frac{1}{s L_1} + s C_1 + \frac{1}{s L_2}}, \\
 U_3 &= \frac{s^2 C_1 L_1 U_2}{s G_n L_1 + 1} = \frac{U_2}{G_n s L_2 + 1},
 \end{aligned} \tag{3}$$

которая определяет значения узловых потенциалов.

Исходя из методики, изложенной в [1, 2], системе уравнений (3) возможно представить как блок-схему (рис. 3), которая будет являться структурной схемой фильтра.

Представленная на рис. 3 структурная схема, позволяет утверждать, что рассматриваемый фильтр имеет третий порядок и представляет линейную систему с двумя перекрестными обратными отрицательными связями. Математические выражения в прямоугольниках являются передаточными функциями обособленных звеньев. Они определяют передаточную функцию Т-образного ФНЧ, которая может быть вычислена по правилам, сформулированным в теории автоматического управления [5, 6].

Передаточные функции элементов структурной схемы фильтра, размещенных в прямоугольниках рис. 3, должны быть преобразованы и составлены из элементарных звеньев. Для этого преобразуем каждую передаточную функцию  $W_1, \dots, W_5$ . Рассмотрим передаточную функцию  $W_1$ :

$$W_1 = \frac{s L_1}{s G_n L_1 + 1}. \tag{4}$$

Представленное выше звено с передаточной функцией  $W_1$  не является элементарным звеном, но может быть получено соединением дифференцирующего звена с дополнительно введенной передаточной функцией  $W_{1Б} = s L_1$  и дополнитель-

ного пропорционального звена  $W_{1А} = G_n$  по схеме отрицательной обратной связи

$$W_1 = \frac{W_{1Б}}{1 + W_{1Б} W_{1А}} = \frac{s L_1}{s L_1 G_n + 1}.$$

Таким образом, звено с передаточной функцией  $W_1$  может быть получено соединением двух элементарных звеньев с передаточными функциями  $W_{1Б}$  и  $W_{1А}$ .

Далее преобразуем след передаточную функцию  $W_2$ :

$$W_2 = \frac{G_n + (1/s L_1)}{\frac{1}{s L_1} + s C_1 + \frac{1}{s L_2}}. \tag{5}$$

Полученное выше звено с передаточной функцией  $W_2$  может быть декомпозировано до элементарных звеньев следующим образом:

$$\begin{aligned}
 W_2 &= \frac{G_n + (1/s L_1)}{\frac{1}{s L_1} + s C_1 + \frac{1}{s L_2}} = \frac{G_n s L_1 + 1}{s L_1 \left( \frac{1}{s L_1} + s C_1 + \frac{1}{s L_2} \right)} = \\
 &= \frac{G_n s L_1 + 1}{\left\{ (1 + L_1/L_2) + s^2 C_1 L_1 \right\}} = \frac{G_n s \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} + \frac{L_2}{L_1 + L_2}}{\left( 1 + s^2 C_1 \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \right)}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Передаточная функция (6) может быть получена параллельным соединением звеньев с дополнительно введенными передаточными функциями  $W_{2.1}$  и  $W_{2.2}$ , где

$$W_{2.1} = \frac{G_n s \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}}{\left( 1 + s^2 C_1 \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \right)}.$$

Для дальнейшего преобразования введем обозначения

$$k_{GL} = G_n \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}, \quad k_{CL} = C_1 \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$$

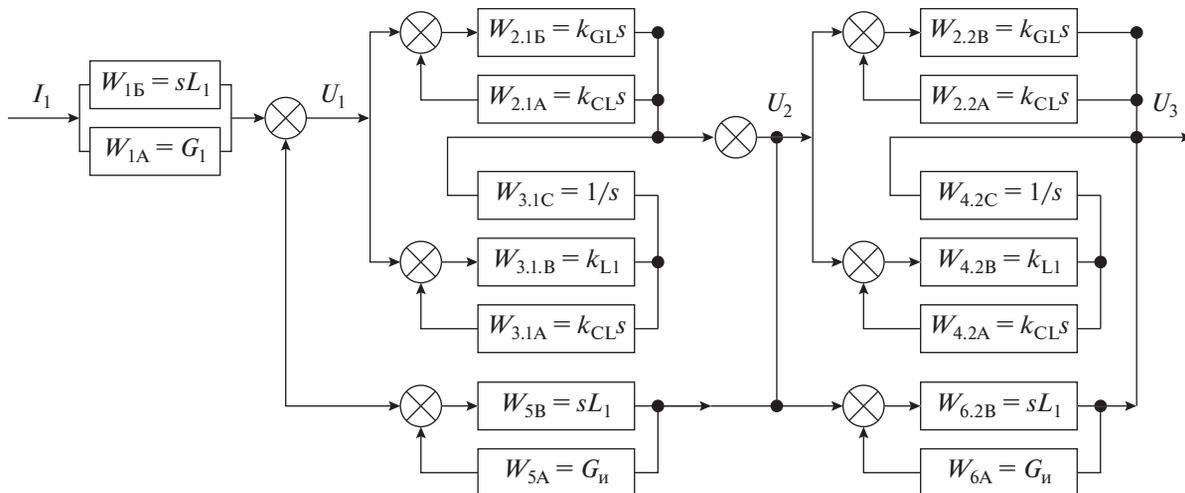


Рис. 4. Структурно-функциональная схема Т-образного фильтра нижних частот из элементарных звеньев.

и получим выражение для первой передаточной функции

$$W_{2.1} = \frac{k_{GL}s}{1 + k_{CL}s^2}. \tag{7}$$

Выражение (7) является передаточной функцией дифференцирующего инерционного звена, которая может быть получена соединением двух дифференцирующих звеньев по схеме с обратной отрицательной связью  $W_{2.1B} = \left( G_n \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \right) s$ ,  $W_{2.1A} = C_1 s$  (подробнее см. [1]).

Далее преобразуем вторую часть выражения (6)  $W_{2.2}$ , которое представлено ниже

$$W_{2.2} = \frac{\frac{L_2}{L_1 + L_2}}{\left( 1 + s^2 C_1 \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \right)}.$$

Для дальнейшего преобразования введем обозначения

$$k_{L1} = \frac{L_1}{L_1 + L_2}, \quad k_{L2} = \frac{L_2}{L_1 + L_2}.$$

Также получим выражение для второй части:

$$W_{2.2} = \frac{k_{L2}}{1 + k_{CL}s^2}. \tag{8}$$

Передаточная функция (8) может быть получена соединением трех элементарных звеньев: двух дифференцирующих звеньев по схеме с отрицательной обратной связью, а затем присоединением последовательного интегрирующего звена  $W_{2.2} = 1/s$ . Таким образом, передаточная функция  $W_2$  может быть получена соответствующим соединением пяти элементарных звеньев.

Преобразуем передаточную функцию  $W_3$

$$W_3 = \frac{1}{sG_n L_2 + 1}.$$

Это выражение можно представить в виде двух элементарных звеньев: пропорционального с передаточной функцией  $W(s) = k_B = 1$  и дифференцирующего  $W_{GL} = k_{GL}s$ , соединенным по схеме с отрицательной обратной связью.

Передаточная функция  $W_4$ , представленная ниже

$$W_4 = \frac{G_n + 1/sL_2}{1/sL_1 + sC_1 + 1/sL_2},$$

отличается от передаточной функции  $W_2$  только значениями коэффициентов  $G_n$  и  $L_2$  в числителе, это не изменяет хода вычислений и позволяет пользоваться результатами выводов для передаточной функции  $W_2$ .

Передаточная функция

$$W_5 = \frac{1}{sG_n L_2 + 1}$$

не отличается от передаточной функции  $W_3$ .

Преобразование передаточных функций структурной схемы фильтра, изображенного на рис. 3, до элементарных звеньев позволяет синтезировать из них структурно-функциональную схему, которая дополнена на рис. 4. На данной схеме показаны дополнительно введенные передаточные функции с индексами А, Б, В, С. Принцип работы данной схемы аналогичен электрической схеме, основанной на элементах классической элементной базы.

Было проведено моделирование электрической принципиальной схемы фильтра, представленного на рис. 1 в программе схемотехнических

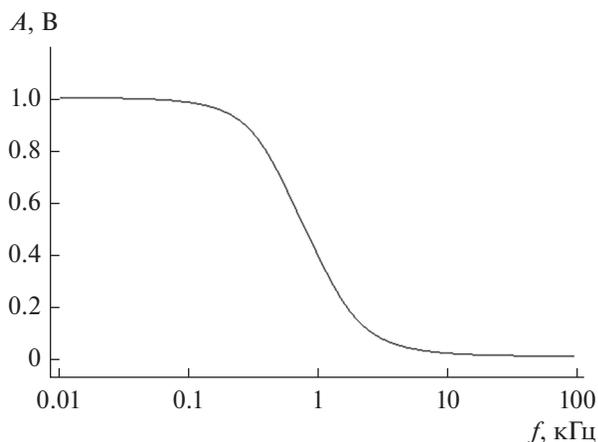


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика Т-образного фильтра нижних частот.

расчетов PSpice. Результаты моделирования получены при следующих исходных данных:  $I_1 = 1$  мА,  $R_{и} = 100$  Ом,  $L_1 = 40$  мГн,  $L_2 = 5$  мГн,  $R_{н} = 100$  кОм,

$C_1 = 2.5$  мкФ, и представлены на рис. 5 в виде амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

## 2. ВОЗМОЖНОСТЬ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ И ВЫВОДЫ

Структурно-функциональная схема, полученная в результате синтеза, требует экспериментального подтверждения работоспособности и сравнения ее функционирования с принципиальной электрической схемой фильтра, спроектированного на традиционной элементной базе.

В связи с отсутствием соответствующей элементной базы для практической реализации элементарных звеньев аналоговой электроники была выбрана программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) модели Altera. На этой микросхеме были программно реализованы элементарные звенья, из которых синтезировалась структурно-функциональная схема фильтра. Для этого был создан экспериментальный макет (рис. 6).

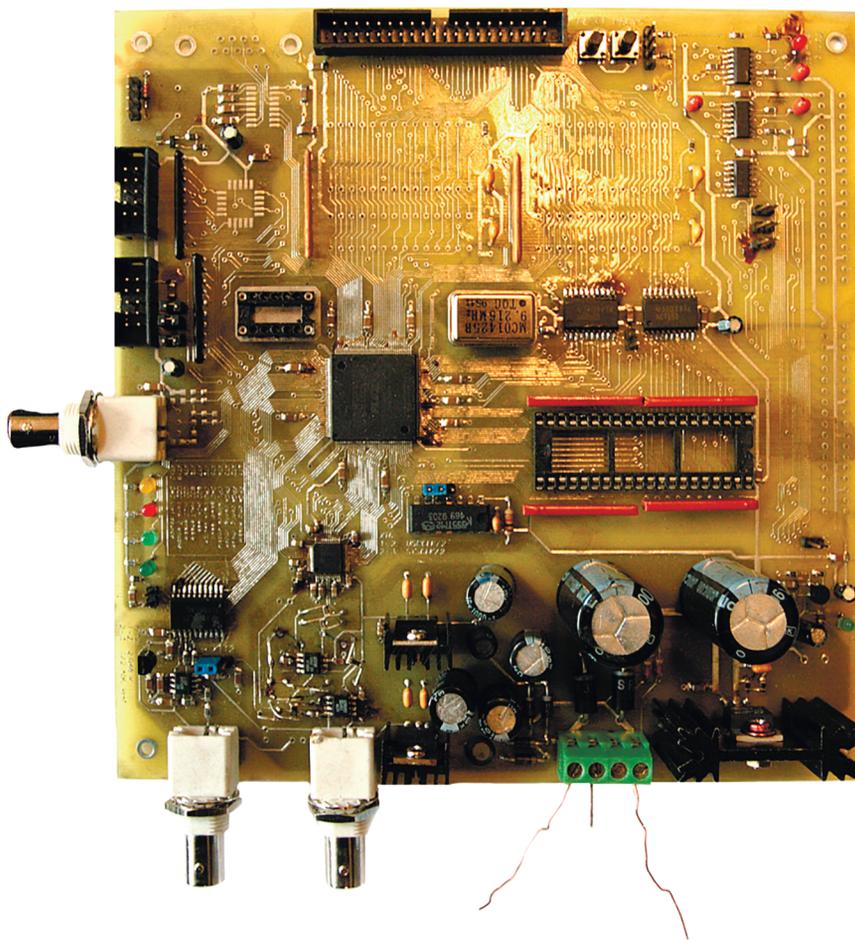


Рис. 6. Фотография экспериментального макета.

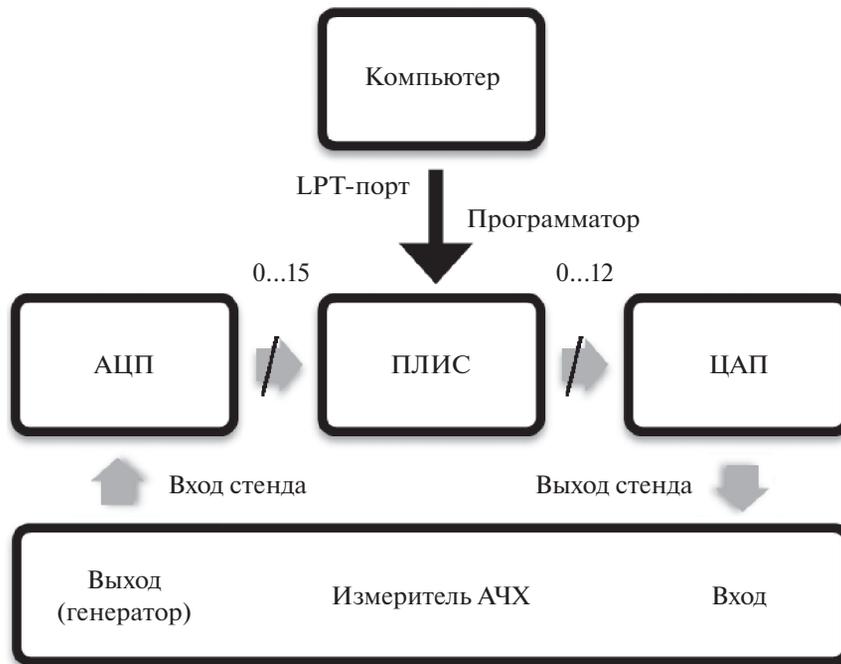


Рис. 7. Схема эксперимента.

Основой макета является ПЛИС, на которой перепрограммировали написанный на языке программирования Verilog код. В результате получалось устройство, которое способно работать по прототипу Т-образного аналогового ФНЧ, а это определяло готовность экспериментального стенда к другим исследованиям с элементарными звеньями [2, 7].

Для программной реализации на ПЛИС была выбрана доступная система автоматизированного проектирования – Altera MAX+PLUS II.

Схема эксперимента с использованием разработанного макета изображена на рис. 7. На ней показаны только основные узлы: аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и ПЛИС. Основная часть эксперимента производилась для предварительной оценки результата. На вход АЦП с выхода генератора подавался нужный аналоговый сигнал. Уже оцифрованный сигнал в ПЛИС преобразовывался в зависимости от того, какой программно реализованный фильтр загружен в него. Далее на выходе из ПЛИС цифровой сигнал поступал на выходные усилительные каскады, затем на ЦАП, а далее уже на цифровой осциллограф, на котором наблюдалось изображение выходного сигнала. Также имелась возможность подключения измерителя АЧХ.

При проведении эксперимента на вход экспериментального стенда с выхода измерителя АЧХ подавался сигнал определенной амплитуды, синусоидальной формы на различных частотах, от 100 Гц до 250 кГц, с заданным шагом, а на выходе

регистрировали амплитуду полученного сигнала. На основании этих данных строилась АЧХ устройства. Диапазон рабочих частот устройства ограничен по верхней частоте до 250 кГц в связи с использованием АЦП, который обладает низкой максимальной скоростью быстрогодействия. Результат исследования прототипа аналогового фильтра нижних частот на элементарных звеньях представлен на рис. 8 в виде АЧХ.

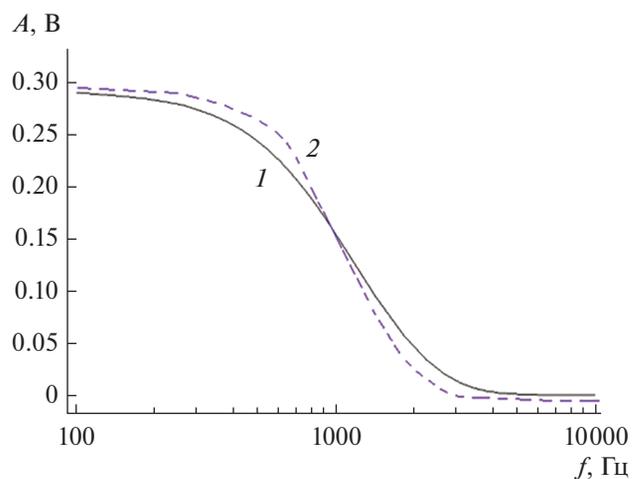


Рис. 8. Частотные характеристики Т-образного ФНЧ: 1 – эксперимент, 2 – расчет в программе PSpice.

В процессе анализа было установлено, что частотные характеристики, полученные в результате эксперимента и моделирования в программе PSpice, отличаются друг от друга в допустимых пределах. Это свидетельствует о возможности практической реализации Т-образного ФНЧ, выполненного на предлагаемой элементной базе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы.

Доказана возможность практической реализации фильтра нижних частот, спроектированного на предлагаемой элементной базе;

Представлен процесс макетирования элементарных звеньев аналоговой микроэлектроники в среде ПЛИС, получены АЧХ исследуемого фильтра, что подтверждает работоспособность методики;

Предложенная методика является одним из шагов на пути реализации матричных аналоговых

больших интегральных схем и перепрограммируемых интегральных схем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мишин Г.Т.* Современная аналоговая микроэлектроника. М.: Радиотехника, 2007.
2. *Мишин Г.Т.* Естественно-научные основания аналоговой электроники. М.: МИЭМ, 2003.
3. *Лэм Г.* Аналоговые и цифровые фильтры. М.: Мир, 1982.
4. *Ланнэ А.А.* Оптимальный синтез линейных электронных схем. М.: Связь, 1978.
5. *Сахарова Т.М.* Расчет частотных характеристик рабочего затухания электрических фильтров. М.: Связь, 1968.
6. *Влах И., Сингхал К.* Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. М.: Радио и связь, 1988.
7. *Мартьянов П.С.* // РЭ. 2018. Т. 63. № 11. С. 1197.