

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова»
(КБГУ)

Институт электроники, робототехники и искусственного интеллекта

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ОПОП

 Р.Ш. Тешев

« 12 » февраля 2026 г.

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Б1.В.ДВ.06.02 «ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА АУДИО- И ВИДЕОСИГНАЛОВ»

Специальность

11.05.01 Радиоэлектронные системы и комплексы

Специализация

Радиоэлектронные системы передачи информации

Квалификация (степень) выпускника

Инженер

Форма обучения

Очная

Нальчик 2025

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Таблица 1

Код и формулировка компетенции	Индикаторы достижения	Планируемые результаты обучения по дисциплине (ЗУН)
<p>ОПК-3 Способен к логическому мышлению, обобщению, прогнозированию, постановке исследовательских задач и выбору путей их достижения, освоению работы на современном измерительном, диагностическом и технологическом оборудовании, используемом для решения различных научно-технических задач в области радиоэлектронной техники и информационно-коммуникационных технологий.</p>	<p>ОПК-3.1 Способен понимать методы решения задач анализа и расчета характеристик радиоэлектронных систем и устройств с применением современных средств измерения и проектирования</p>	<p>Знать методы решения задач анализа и расчета характеристик радиоэлектронных систем и устройств с применением современных средств измерения и проектирования.</p>
	<p>ОПК-3.2 Способен анализировать, моделировать и прогнозировать поведение радиоэлектронных систем и комплексов;</p>	<p>Уметь подготавливать научные публикации на основе результатов исследований.</p>
	<p>ОПК-3.2 Способен работать на современном измерительном и диагностическом оборудовании.</p>	<p>Владеть навыками использования методов решения задач анализа и расчета характеристик радиоэлектронных систем и устройств.</p>
<p>ОПК-7 Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности.</p>	<p>ОПК-7.1. Способен понимать приемы, способы и методы применения вычислительной техники при выполнении функции сбора, хранения, обработки, передачи и использования данных.</p>	<p>Знать современные принципы поиска, хранения, обработки, анализа и представления в требуемом формате информации.</p>
	<p>ОПК-7.2. Способен применять принципы работы современных информационных технологий.</p>	<p>Уметь: решать задачи обработки данных с помощью современных средств автоматизации.</p>
	<p>ОПК-7.3. Способен использовать современные информационные технологии</p>	<p>Владеть: навыками обеспечения информационной безопасности.</p>

	для решения задач профессиональной деятельности.	
--	--	--

2 Шкала оценивания планируемых результатов обучения

2.1 Текущий контроль

Оценка результатов текущей успеваемости в рамках контрольных точек осуществляется посредством 70-балльной системы, при этом за добросовестное посещение занятий обучающийся может набрать до 10 баллов, за качественное прохождение оценочных мероприятий - до 60 баллов.

Таблица 2

Карта распределения рейтинговых баллов в рамках текущего контроля

№	Оценочное средство	Форма проведения	Порядок проведения	Максимальное количество баллов	Критерии оценивания
1	Лабораторная работа №1 «Проектирование БИХ-фильтра и исследование его АЧХ.».	письменная	Работа включает в себя два задания, выполняется студентами попарно.	6	6- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 4 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 2 – задания выполнены частично или одно из заданий выполнено не верно, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно
2	Лабораторная работа №2 «Исследование процесса фильтрации сигнала БИХ-фильтра».	письменная	Работа включает в себя два задания, выполняется студентами попарно.	6	6- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 4 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 2 – задания выполнены частично или одно из заданий выполнено не верно, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или все

					задания выполнены неверно
3	Лабораторная работа №3 «Проектирование КИХ-фильтра».	письменная	Работа включает в себя два задания, выполняется студентами попарно.	6	6- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 4 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 2 – задания выполнены частично или одно из заданий выполнено неверно, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно
4	Лабораторная работа №4 «Проектирование цифровых фильтров».	письменная	Работа включает в себя два задания, выполняется студентами попарно.	6	6- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 4 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 2 – задания выполнены частично или одно из заданий выполнено неверно, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно
5	Лабораторная работа №4 «Определение характеристик цифрового фильтра».	письменная	Работа включает в себя два задания, выполняется студентами попарно.	6	6- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 4 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 2 – задания выполнены частично или одно из заданий выполнено неверно, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно
6	Тесты по 1 контрольной точке	с применением ДТ	Студент проходит компьютерное тестирование в ЭИОС.	7	Количество баллов пропорционально количеству правильных ответов

7	Тесты по 2 контрольной точке	с применением ДТ	Студент проходит компьютерное тестирование в ЭИОС.	7	Количество баллов пропорционально количеству правильных ответов
8	Коллоквиум по 1 контрольной точке	письменная	Студенты отвечают письменно на вопросы коллоквиума	8	8 – ответы полные, точные, демонстрируют глубокое понимание темы, аргументация логична; 6 – ответы в основном правильные, но содержат незначительные ошибки; 4- ответы недостаточно полные; 3– ответы частичные, содержат ошибки или требуют наводящих вопросов; 2-ответы не на все вопросы, частичные. 0 – ответы отсутствуют или полностью неверные.
9	Коллоквиум по 2 контрольной точке	письменная	Студенты отвечают письменно на вопросы коллоквиума	8	8 – ответы полные, точные, демонстрируют глубокое понимание темы, аргументация логична; 6 – ответы в основном правильные, но содержат незначительные ошибки; 4- ответы недостаточно полные; 3– ответы частичные, содержат ошибки или требуют наводящих вопросов; 2-ответы не на все вопросы, частичные. 0 – ответы отсутствуют или полностью неверные.
	Итого:			60	

Карта распределения баллов в рамках промежуточной аттестации

№	Оценочное средство	Форма проведения	Порядок проведения	Максимальное количество баллов	Критерии оценивания
1	Экзаменационный билет	Устный опрос	Билет содержит 2 теоретических вопроса. На теоретические вопросы студент должен ответить устно.	Теоретические вопросы – 30 баллов.	<p>Критерии оценивания теоретических вопросов:</p> <p>25 до 30 баллов: Глубокий уровень владения материалом, точное знание ключевых концепций, способность анализировать и интерпретировать факты, грамотно строить высказывания, привести примеры, свободно оперировать терминологией.</p> <p>От 19 до 24 баллов: Базовое владение предметом, умение последовательно раскрыть основную мысль вопроса, грамотное применение терминов, наличие существенных элементов анализа и обобщений, но недостаточное развертывание или отдельные неточности.</p> <p>От 13 до 18 баллов: Частичное освоение материала, попытка объяснить основной смысл вопроса, использование</p>

					<p>некоторых базовых терминов, но отсутствие глубокого понимания сложных моментов, логические недостатки изложения, отсутствие выводов. От 7 до 12 баллов: Ошибочные представления, слабо выраженное владение основными понятиями, значительные затруднения в интерпретации вопросов, существенные фактологические ошибки, отсутствие обоснованных выводов и примеров. От 0 до 6 баллов: Полное непонимание темы, неспособность сформулировать адекватный ответ, грубые ошибки, несоответствие требованиям задания.</p>
--	--	--	--	--	---

3. Оценочные материалы для текущего и промежуточного контроля успеваемости

3.1. Оценочные материалы для текущего контроля

Лабораторная работа №1

Проектирование БИХ-фильтра и исследование его АЧХ.

Задание:

- создать новый проект шаблона **Схема модели общего вида**

- показать процесс установки блоков на схему и их соединения между собой
- разработать модель цифрового фильтра при помощи блоков общетехнической группы библиотек **Автоматика** и блоков библиотеки **Цифровая обработка сигналов**
- рассмотреть процесс задания свойств блоков
- построить график АЧХ фильтра

Создание нового проекта

Для создания нового проекта общетехнического шаблона необходимо выполнить следующие действия:

1. В главном окне SimInTech нажать кнопку **Файл** и выбрать пункт **Новый проект**
2. В выпадающем меню выбрать пункт **Схема модели общего вида** (Рис. 1).

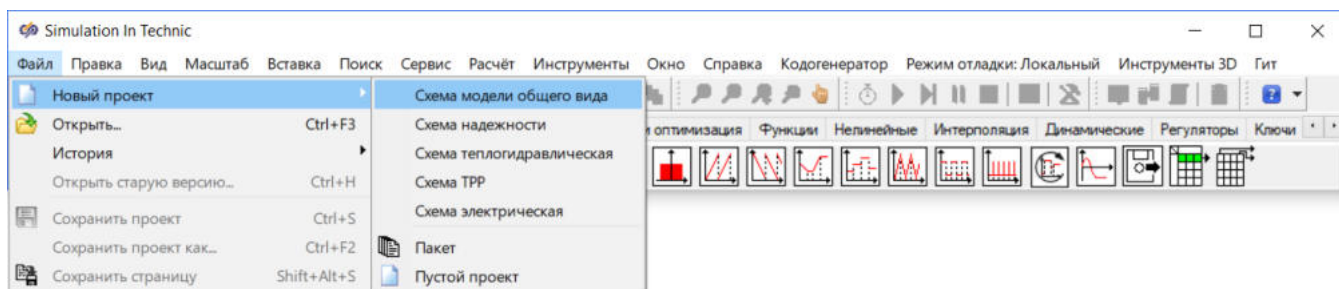


Рис. 1. Главное окно SimInTech с выделенным меню создания нового проекта.

Откроется новое окно проекта **Схема модели общего вида**, в котором будет проходить разработка модели фильтра (Рис. 2).

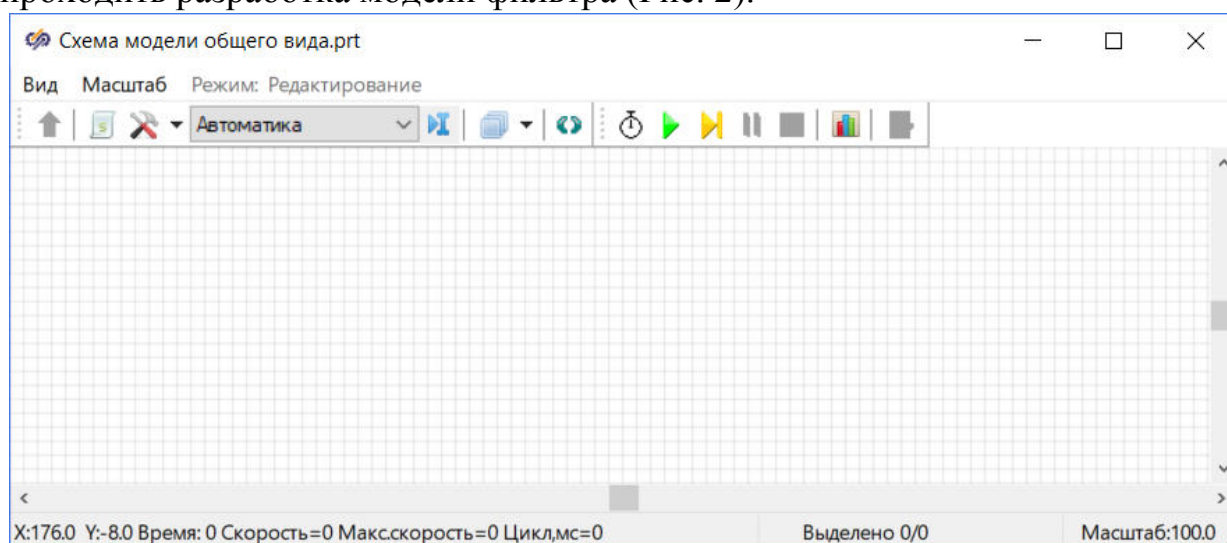


Рис. 2. Окно проекта "Схема модели общего вида".

Требуется сохранить созданный проект. Для этого:

1. В главном окне SimInTech нажать кнопку **Файл** и выбрать пункт **Сохранить проект как**
2. В появившемся окне выбрать или при необходимости создать папку, в которую будет сохранен данный проект
3. В появившемся окне в поле **Имя файла** указать желаемое имя проекта либо оставить имя проекта по умолчанию и нажать на кнопку **Сохранить**

Добавление блоков на схему

Требуется поместить на схему блок **БИХ-фильтр**. Для этого выполнить следующие действия:

1. В главном окне SimInTech в палитре блоков выбрать вкладку **ЦОС** (Рис. 3).

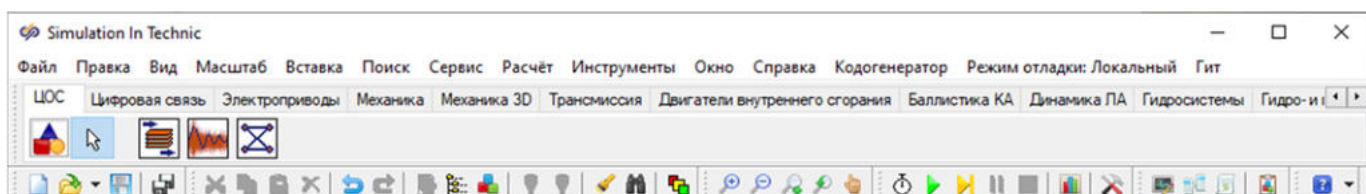


Рис. 3. Главное окно SimInTech с выбранной вкладкой "ЦОС" в палитре блоков.

2. Одинарным нажатием левой кнопкой мыши выбрать блок **БИХ-фильтр**
3. Перевести курсор мыши на рабочую область окна проекта. В рабочей области окна проекта появится графическое изображение блока **БИХ-фильтр**, которое будет следовать за курсором мыши
4. Выбрать место в рабочей области окна проекта для установки блока и установить блок одинарным нажатием левой кнопкой мыши (Рис. 4).

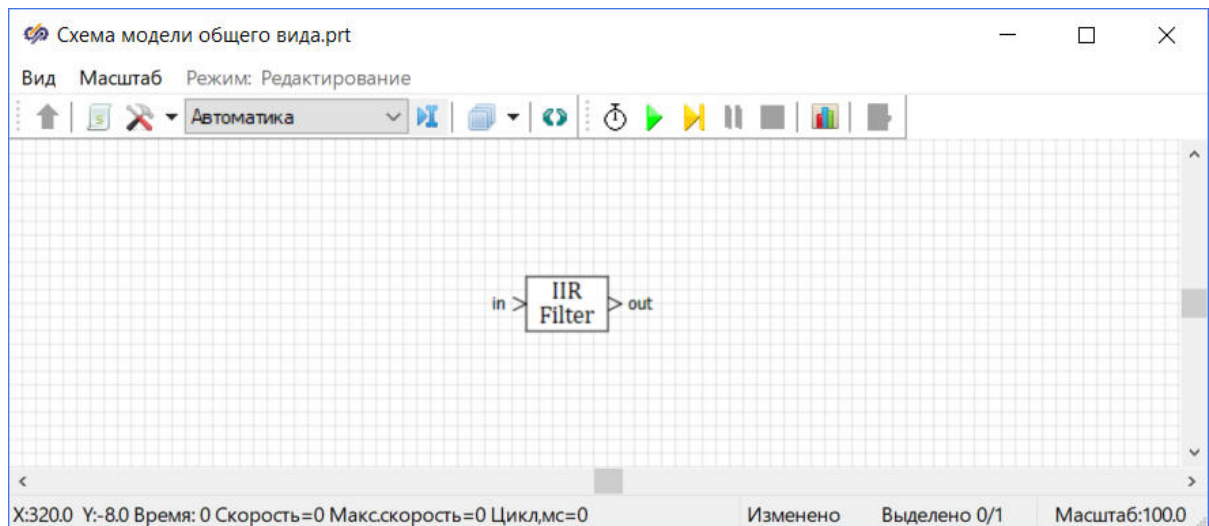


Рис. 4. Окно проекта с установленным блоком "БИХ-фильтр".

После установки блока его можно переместить. Для перемещения блока внутри рабочей области окна проекта необходимо нажать на блок левой кнопкой мыши и, удерживая, переместить.

Аналогичными действиями необходимо добавить на схему и разместить согласно рисунку (Рис. 5) следующие блоки:

- 1 блок **Ступенька** из вкладки **Источники**. С помощью данного блока будет формироваться входной сигнал фильтра
- 1 блок **Временной график** из вкладки **Вывод данных**. С помощью данного блока будет производиться графическое отображение результатов моделирования.

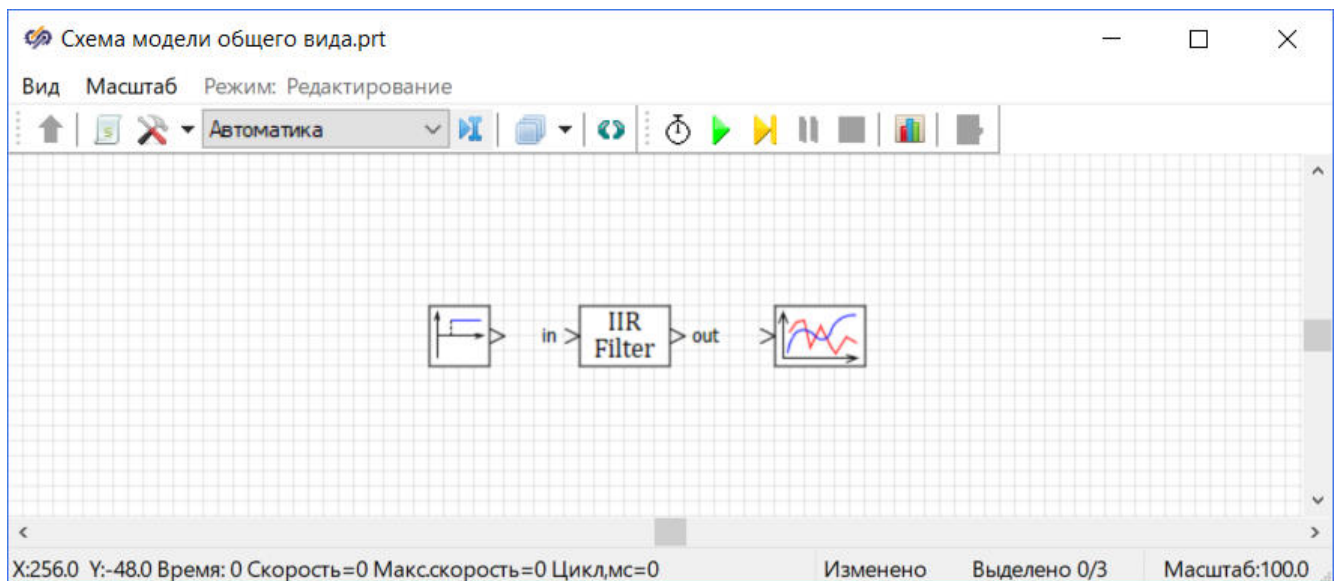


Рис. 5. Окно проекта с добавленными блоками.

Соединение блоков на схеме

Необходимо соединить блоки между собой, для этого:

1. Навести курсор мыши на порт "out" блока БИХ-фильтр (курсор мыши изменится на вертикальную стрелку) и нажать левую кнопку мыши
2. Появившуюся линию соединить с входным портом блока Временной график и нажать левую кнопку мыши

После выполнения этих действий появится линия связи (Рис. 6).

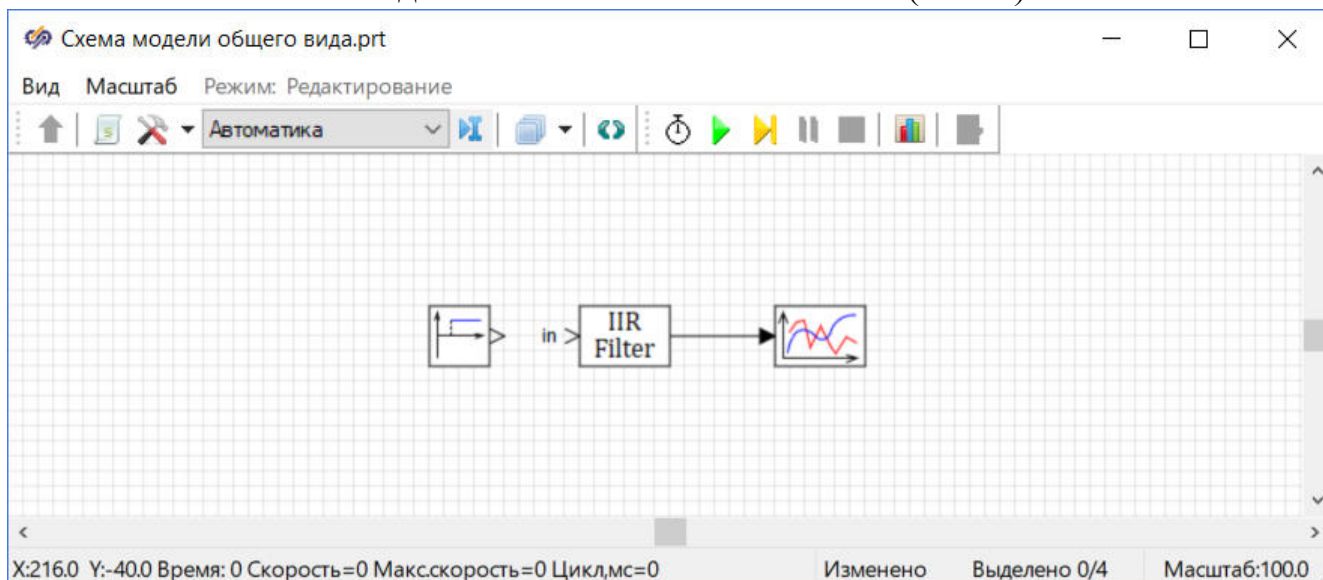


Рис. 6. Окно проекта с созданной линией связи.

Аналогичными действиями необходимо соединить блок Ступенька с блоком БИХ-фильтр (Рис. 17).

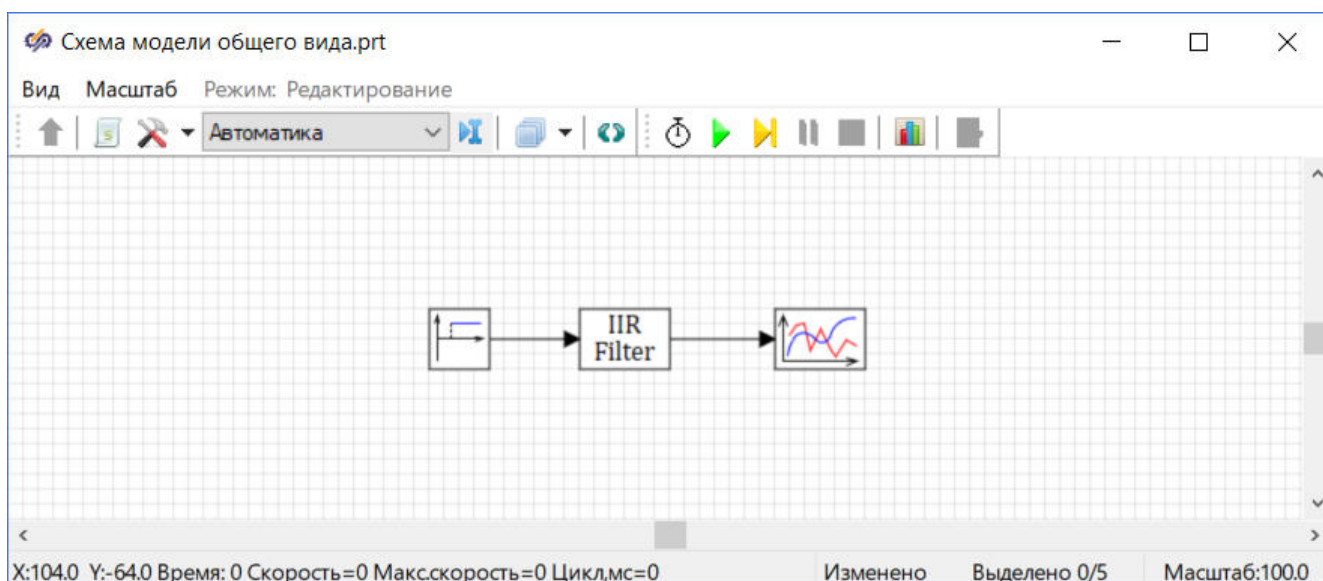


Рис. 7. Окно проекта с соединенными блоками.

Перед тем, как приступить к выполнению следующего пункта данного задания, необходимо сохранить проект.

Задание свойств блоков

Перед началом расчета требуется задать свойства блокам на схеме. Необходимо одинарным нажатием левой кнопкой мыши выделить блок **БИХ-фильтр**, затем одинарным нажатием правой кнопкой мыши по выделенному блоку вызвать контекстное меню блока и в нем выбрать пункт **Свойства объекта** (Рис. 8).

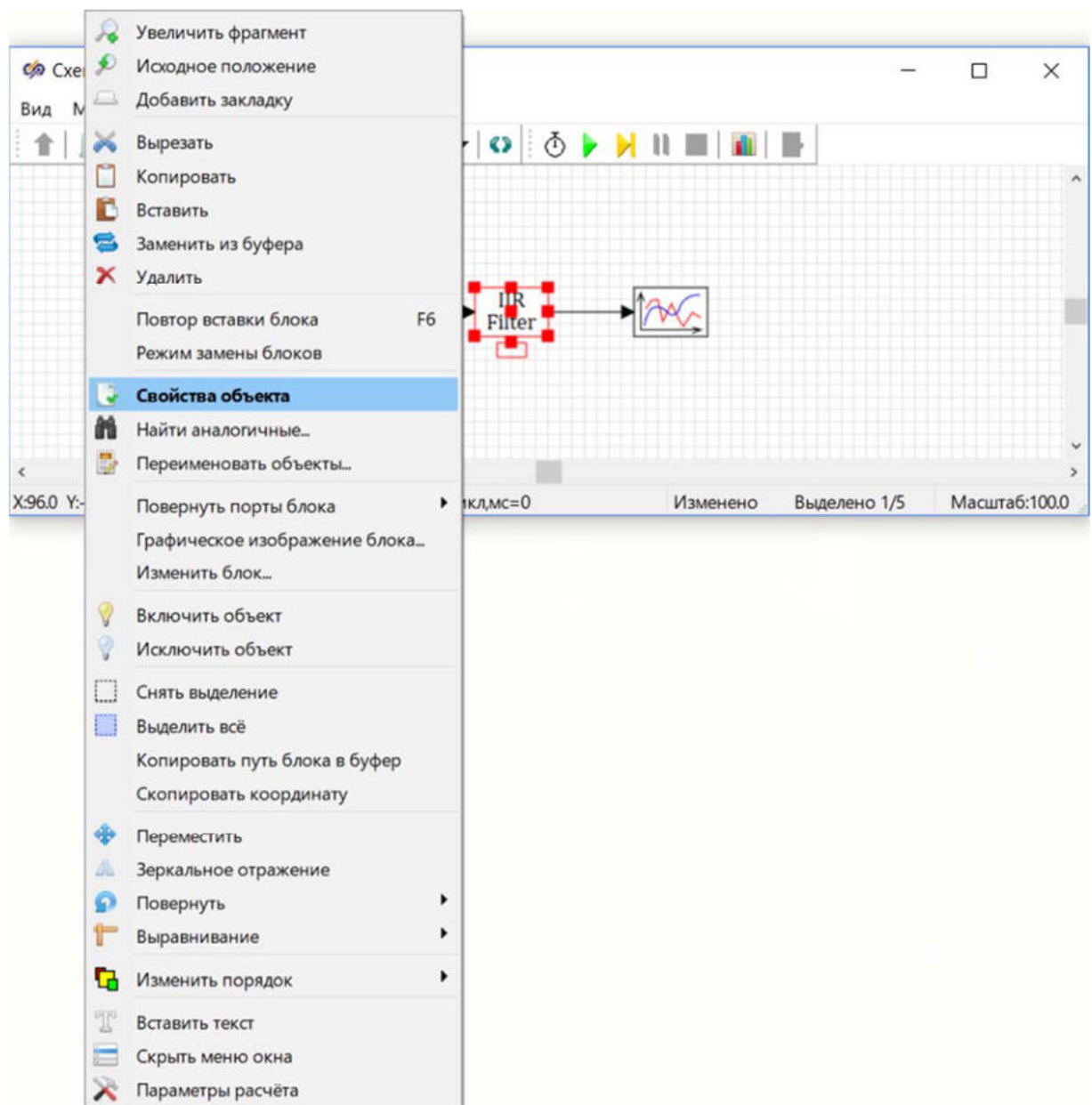


Рис. 8. Окно проекта с контекстным меню блока.

Откроется окно **Свойства**, в котором необходимо задавать новые значения свойств блока (Рис. 9).

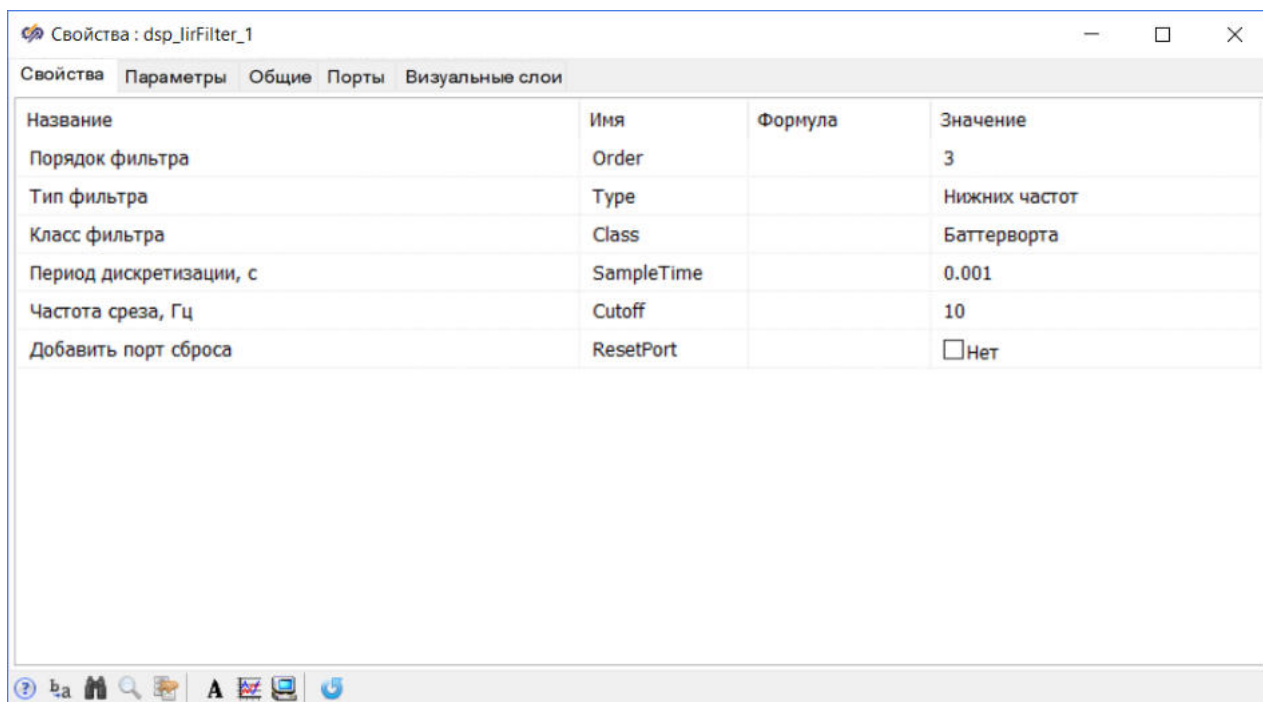


Рис. 9. Окно "Свойства" блока "БИХ-фильтр" со свойствами по умолчанию.

В данной работе будет рассматриваться модель НЧ-фильтра Чебышёва 1-го рода 8-го порядка. Для изменения класса фильтра следует раскрыть список доступных классов в поле "**Значение**" свойства "**Класс фильтра**" и выбрать "**Чебышёва 1-го рода**". После этого изменится список доступных для изменения свойств. Для изменения свойств блока в поле "**Формула**" необходимо задать новые значения свойств согласно рисунку (Рис. 20).

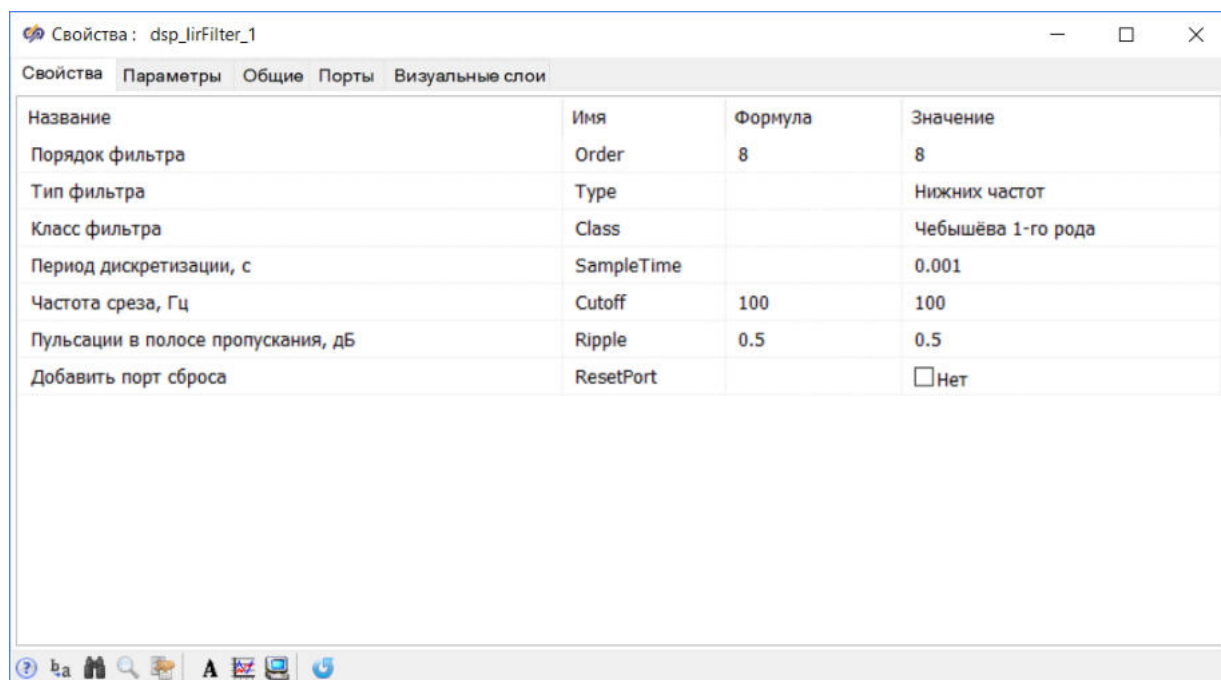


Рис. 20. Окно "Свойства" блока "БИХ-фильтр" с новыми значениями свойств.

Период дискретизации 0.001 секунды соответствует частоте дискретизации 1000 Гц.

Аналогичными действиями требуется изменить свойства других блоков на схеме. Для блока **Ступенька** задать значения свойств согласно рисунку (Рис. 21).

Название	Имя	Формула	Значение
Время срабатывания	t	0.001	[0.001]
Начальное состояние	y0	1	[1]
Конечное состояние	yk	0	[0]

Рис. 21. Окно "Свойства" верхнего блока "Ступенька".

Блок **Ступенька** будет формировать импульс с амплитудой 1 и длительностью 0.001 секунды. Длительность импульса равна периоду дискретизации фильтра. Такой сигнал необходим для снятия импульсной характеристики фильтра, после проведения ее спектрального анализа будет построен график АЧХ фильтра.

Перед тем, как приступить к выполнению следующего пункта данного задания, необходимо сохранить проект.

Настройка параметров расчета

Перед запуском проекта на расчет необходимо настроить Параметры расчёта. Для этого в окне проекта на панели кнопок нажать на кнопку **Параметры расчёта** (Рис. 22).

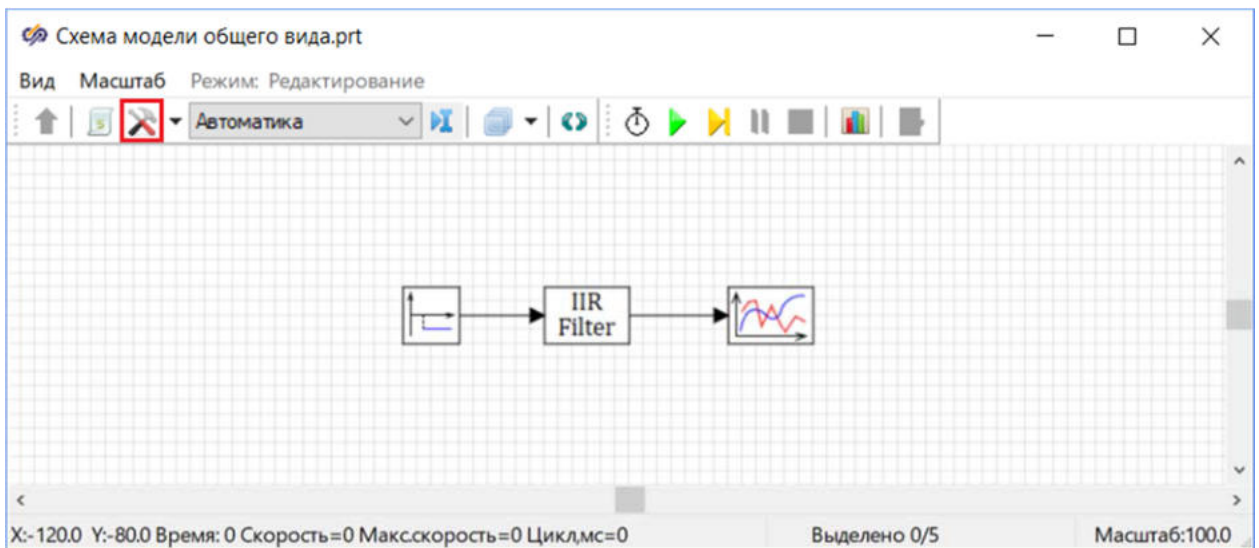


Рис. 22. Окно проекта с выделенной кнопкой "Параметры расчёта".

В появившемся окне параметров проекта установить новое значение свойства (Рис. 23) "Конечное время расчёта" равным "1":

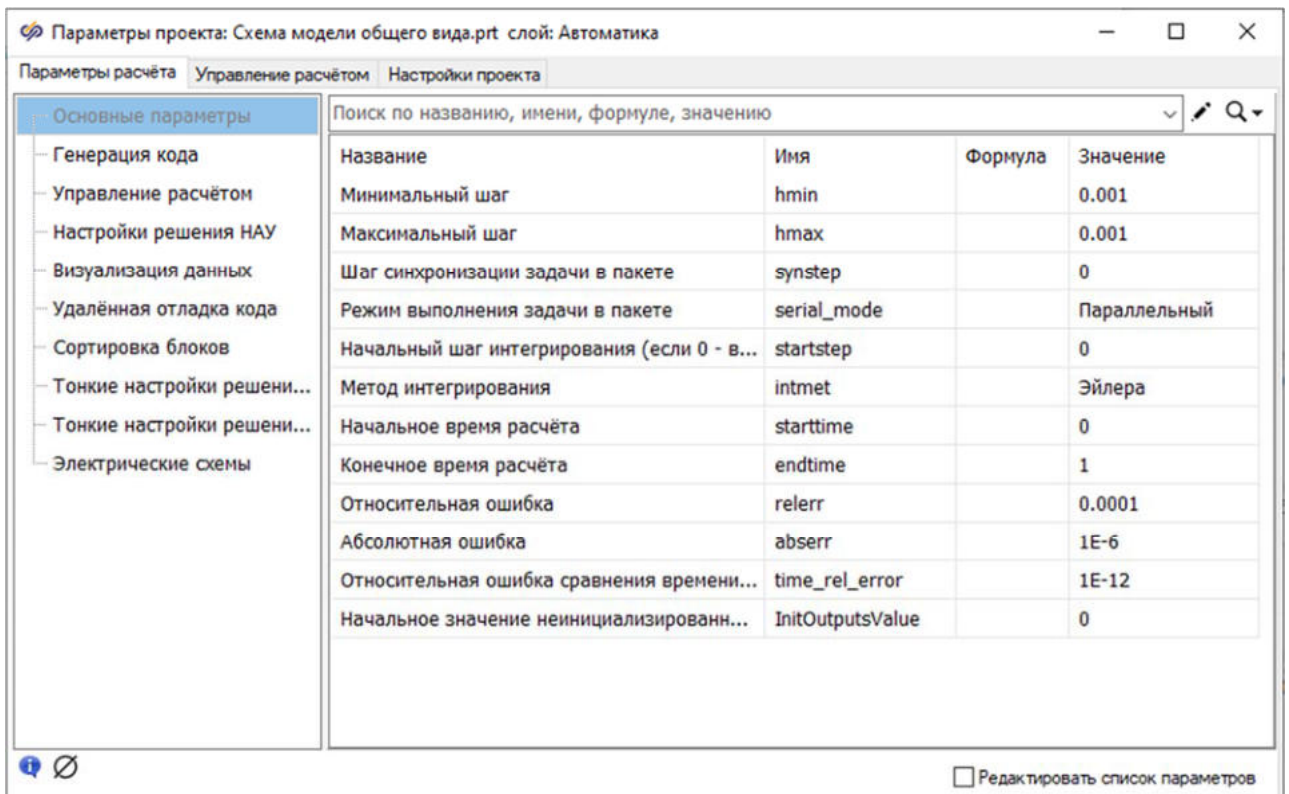


Рис. 23. Окно "Параметры проекта" вкладка "Параметры расчёта".

Перед тем, как приступить к выполнению следующего пункта данного задания, необходимо сохранить проект.

Запуск моделирования и построение графика

Необходимо запустить модель на расчет нажатием на кнопку **Пуск** (Рис. 24) и дождаться окончания расчета.

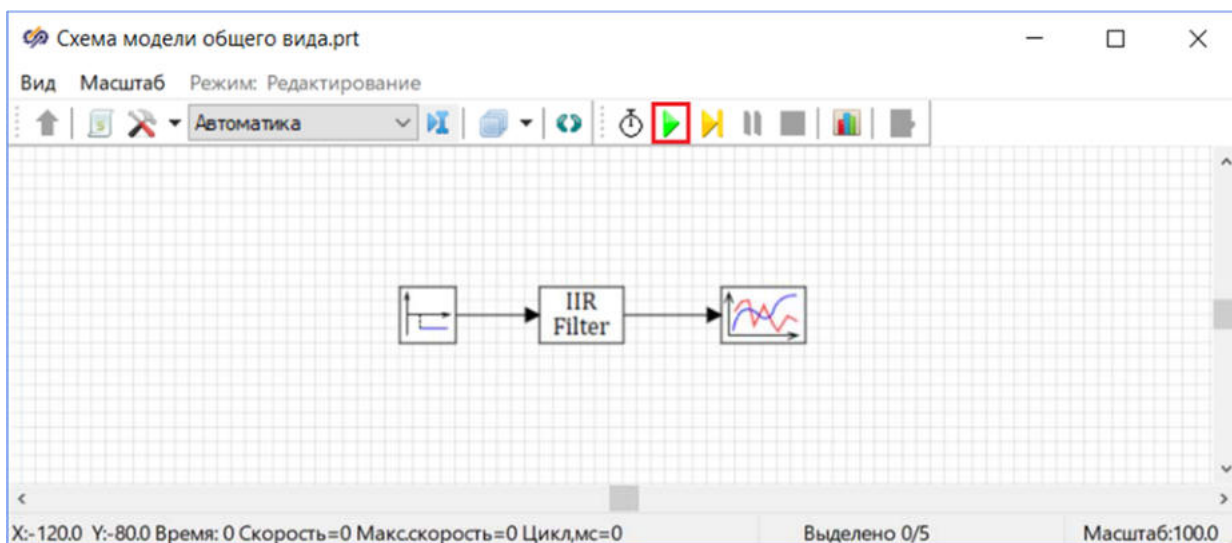


Рис. 24. Окно проекта с выделенной кнопкой "Пуск".

После окончания расчета двойным нажатием левой кнопкой мыши по блоку **Временной график** открыть график импульсной характеристики фильтра. График должен выглядеть аналогично рисунку (Рис. 25).

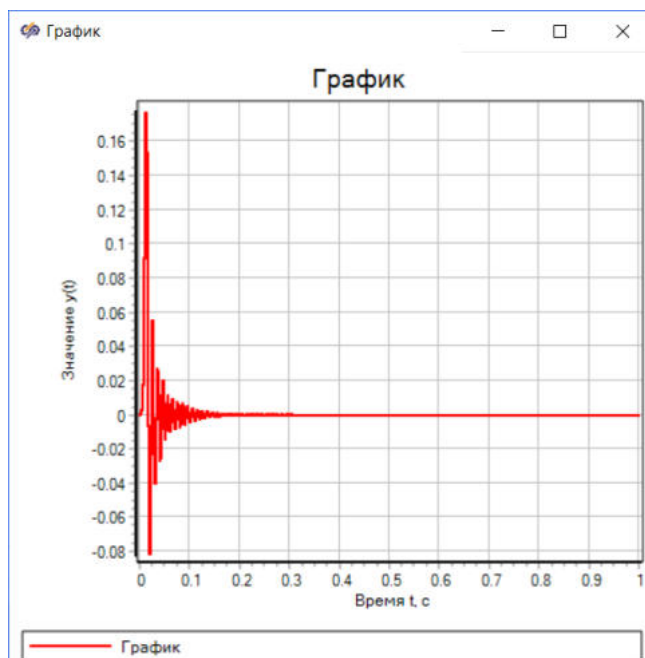


Рис. 25. График импульсной характеристики спроектированного фильтра.

Для построения графика АЧХ фильтра необходимо провести спектральный анализ импульсной характеристики. Для этого нажатием правой кнопкой

мышью по окну **График** вызвать контекстное меню и в нем нажать кнопку **Анализ данных** и выбрать пункт **Спектральный анализ** (Рис. 26).

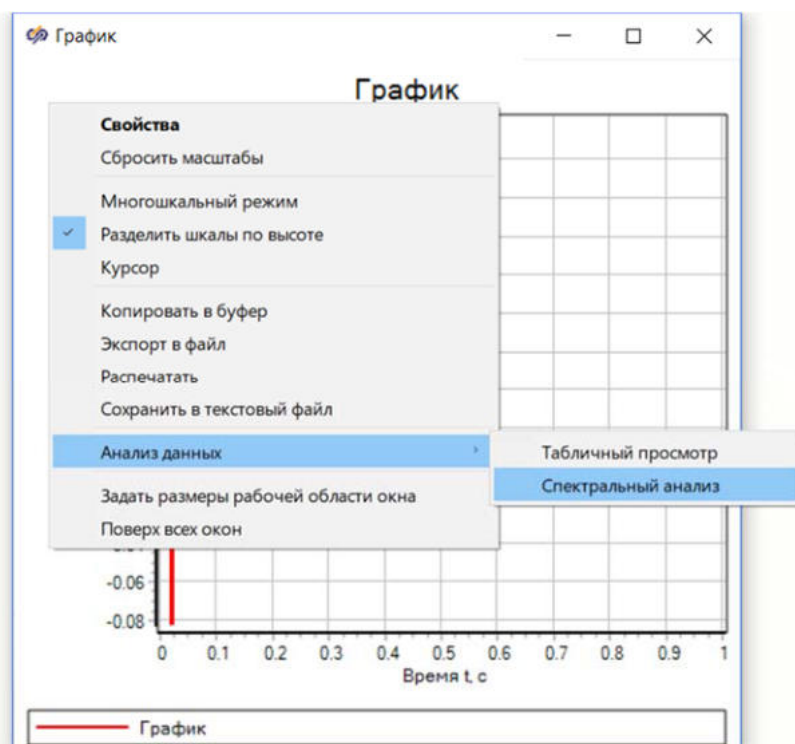


Рис. 26. Контекстное меню окна "График".

Откроется окно **Спектральный анализ сигнала** (Рис. 27).

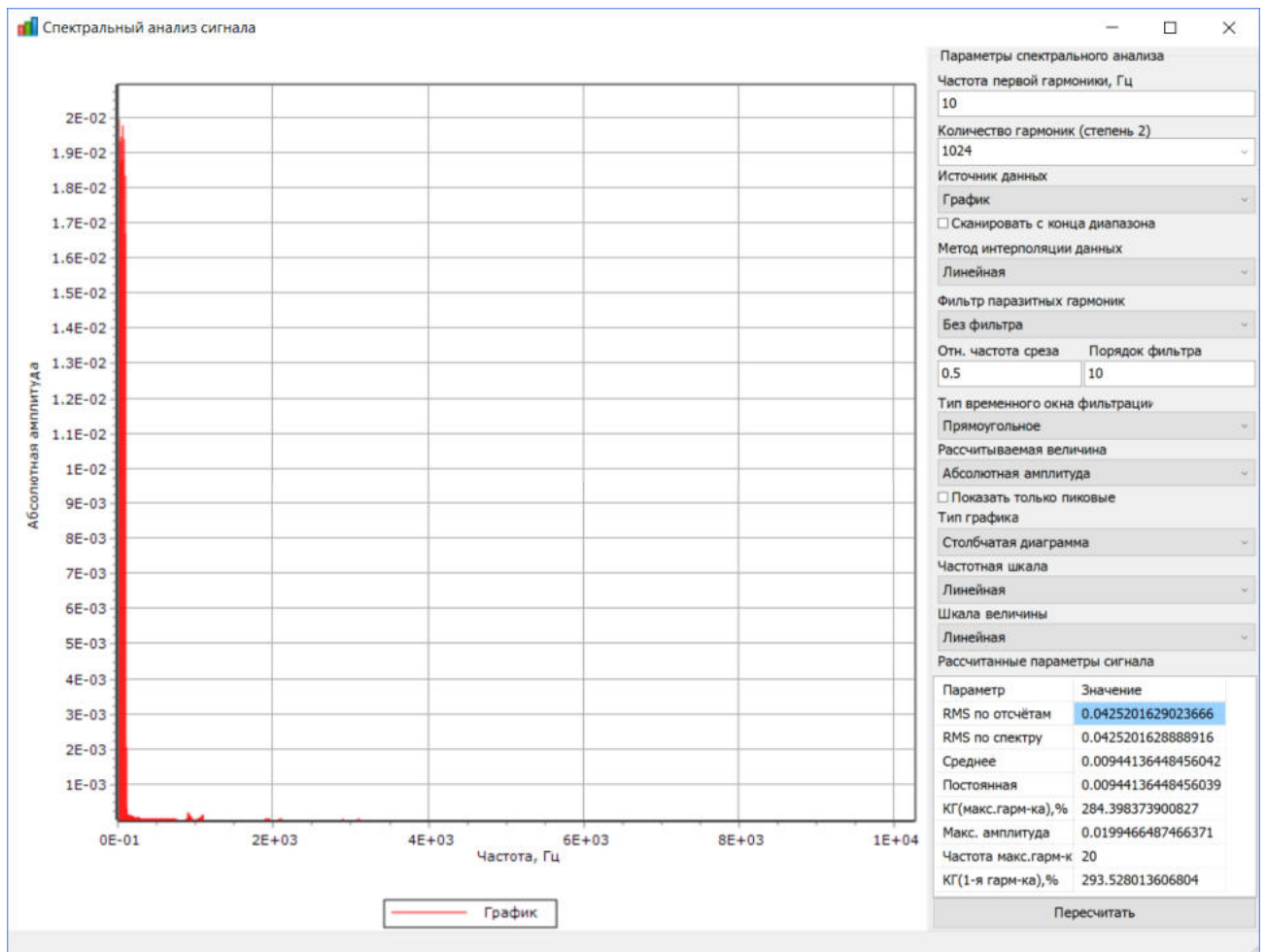


Рис. 27. Окно "Спектральный анализ сигнала".

Для корректного отображения графика АЧХ указать следующие параметры спектрального анализа:

- "Частота первой гармоники, Гц" – "1"
- "Количество гармоник" – "500". Количество гармоник должно быть равно половине частоты дискретизации
- "Рассчитываемая величина" – "Относительная (A/Amax)"
- "Тип графика" – "Линейный график"

Вид графика изменится согласно рисунку (Рис. 28).

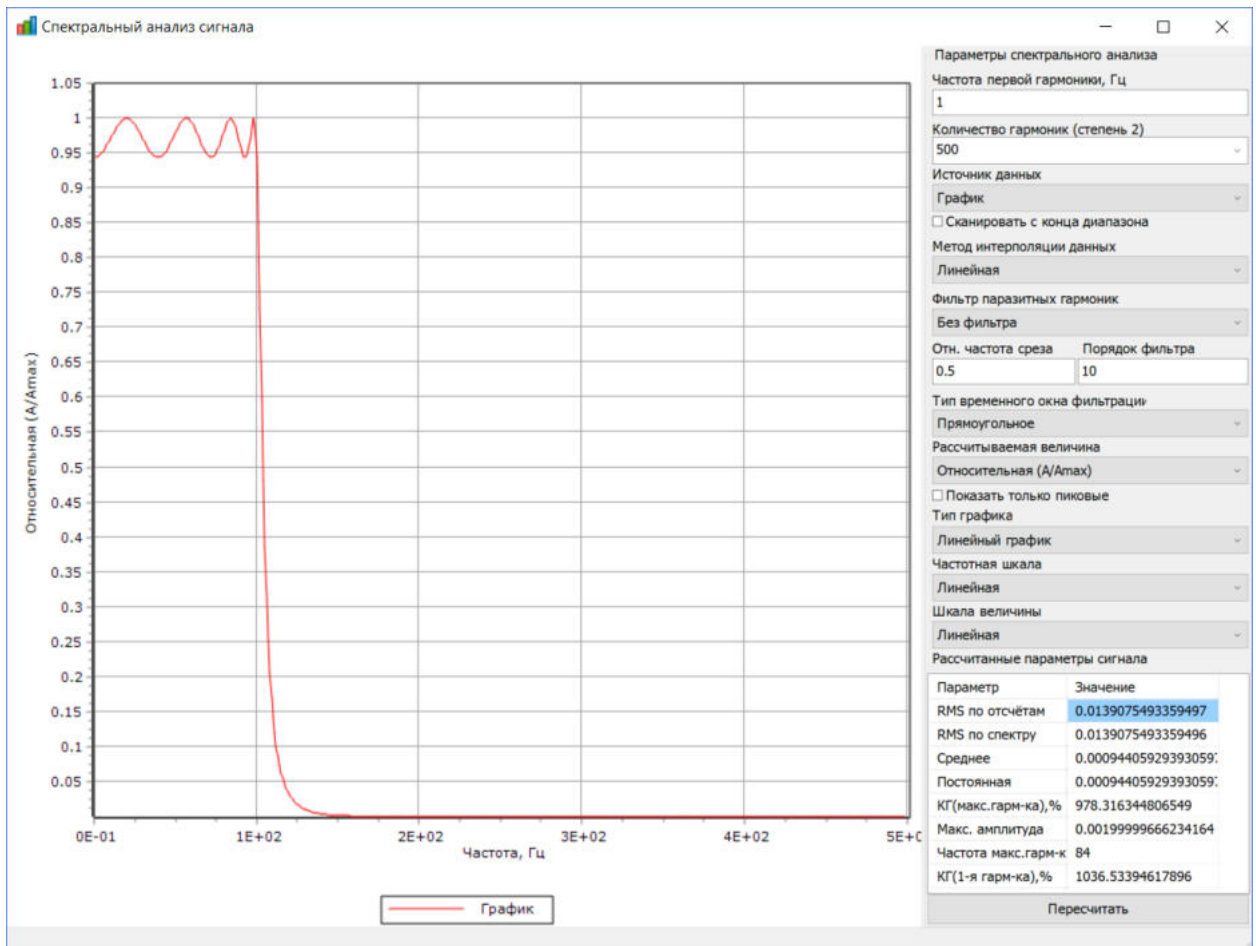


Рис. 28. Окно "Спектральный анализ сигнала" с измененными параметрами.

Полученный график (Рис. 29) является графиком АЧХ фильтра.

При задании свойств блока БИХ-фильтр значение допустимого уровня неравномерности АЧХ в полосе пропускания было задано равным 0.5 дБ. Допустимое значение коэффициента усиления в зоне пропускания: $10^{-0.5/20} = 0.944$.

Полученное значение соответствует графику АЧХ.

Перед тем, как приступить к выполнению следующего задания, необходимо сохранить проект.

Лабораторная работа №2 Исследование процесса фильтрации сигнала БИХ-фильтра

Задание:

- внести изменения в расчетную схему

- исследовать графики и спектры входного и выходного сигналов фильтра.

Изменение расчетной схемы

Необходимо изменить расчетную схему. Для этого следует удалить со схемы блок **Ступенька**, добавить на схему, расположить и соединить, согласно рисунку (Рис. 27), следующие блоки:

- 2 блока **Синусоида** из вкладки **Источники**. С помощью данных блоков будет формироваться входной сигнал фильтра
- 3 блока **Временной график** из вкладки **Вывод данных**. С помощью данных блоков будет производиться графическое отображение результатов моделирования

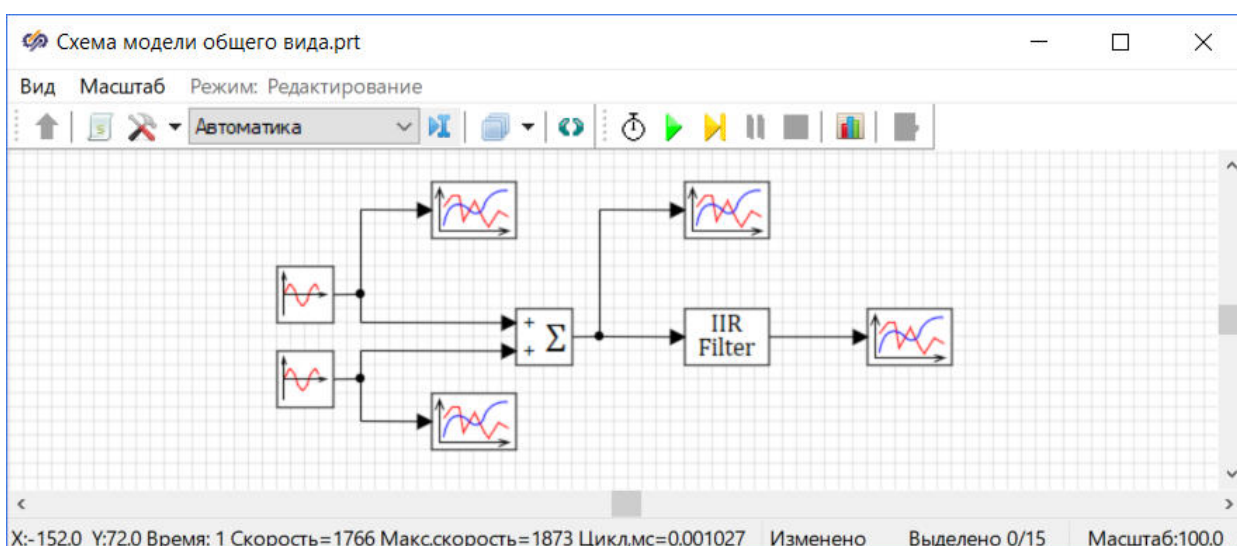


Рис. 27. Рабочая область окна проекта с добавленными блоками.

Задать блокам подписи, для этого:

1. Выбрать блок **Временной график** одинарным нажатием левой кнопкой мыши по нему (Рис. 28).

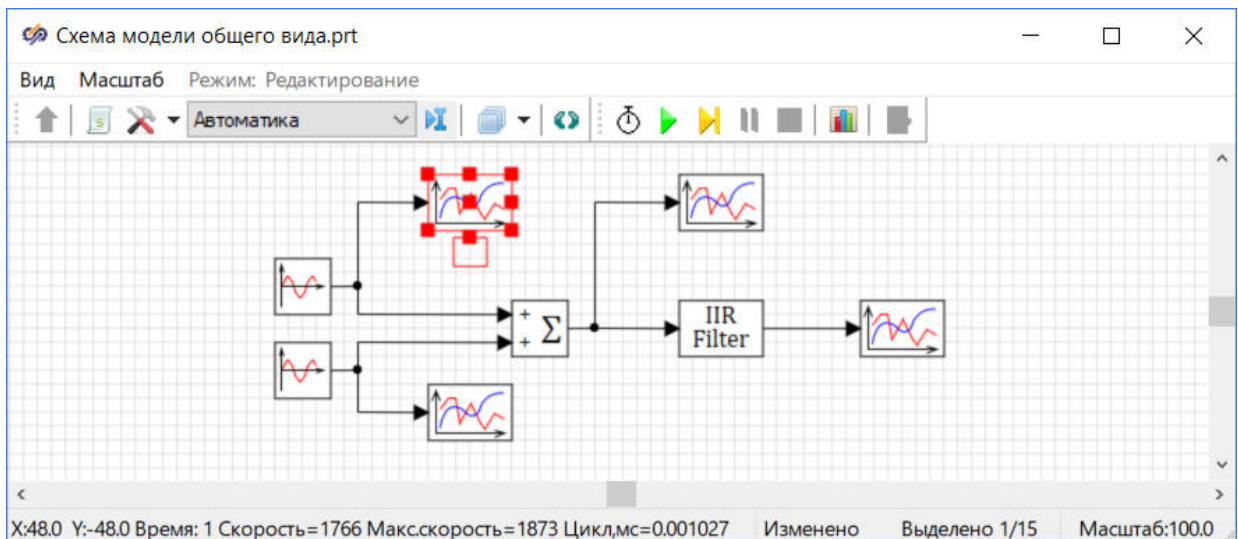


Рис. 28. Окно проекта с выделенным блоком "Временной график".

2. Двойным нажатием левой кнопкой мыши на прямоугольную область подписи блока, расположенную рядом с выделенным блоком, и ввести желаемую подпись блока. Выделенному блоку требуется задать подпись "**Первый сигнал**"
3. Для того, чтобы переместить поле подписи блока, необходимо нажать левой кнопкой мыши на красный прямоугольник в верхней части этого поля и переместить его, не отпуская левую кнопку мыши

Для блоков **Временной график** и блоков **Синусоида** требуется задать подписи и расположить их на схеме согласно рисунку (Рис. 29).

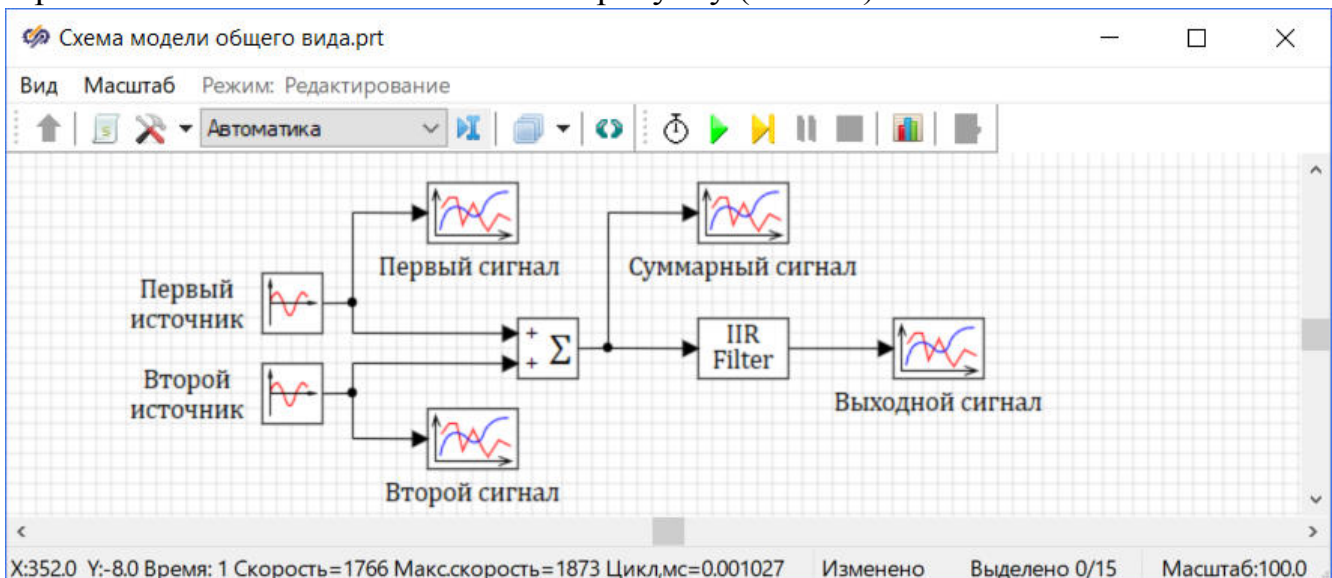


Рис. 29. Окно проекта с заданными именами блоков.

Перед тем, как приступить к выполнению следующего пункта данного задания, необходимо сохранить проект.

Задание свойств блоков

Для блока **Синусоида** с подписью **"Первый источник"** задать новые значения свойств согласно рисунку (Рис. 30).

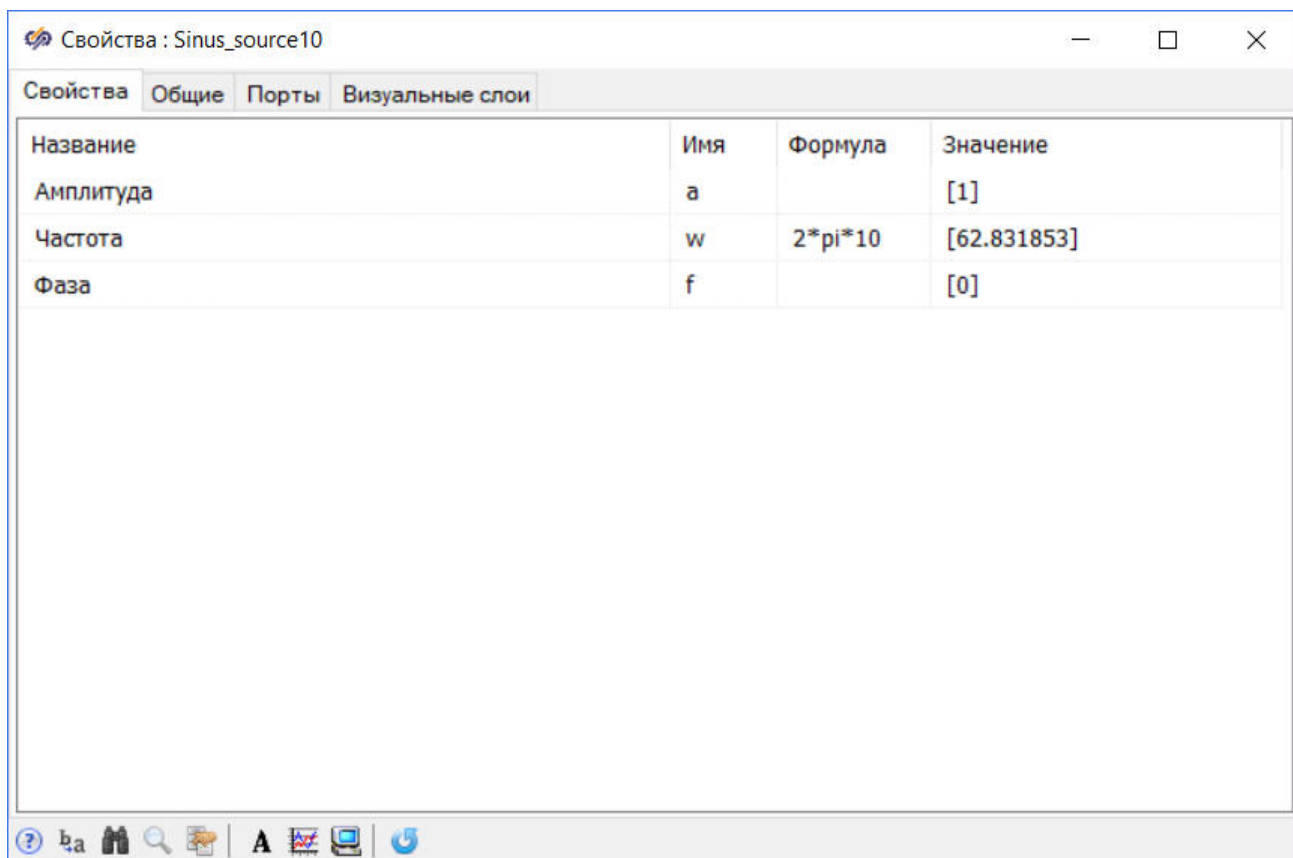


Рис. 30. Окно "Свойства" для блока "Синусоида" с подписью "Первый источник".

Для блока **Синусоида** с подписью **"Второй источник"** задать новые значения свойств согласно рисунку (Рис. 31).

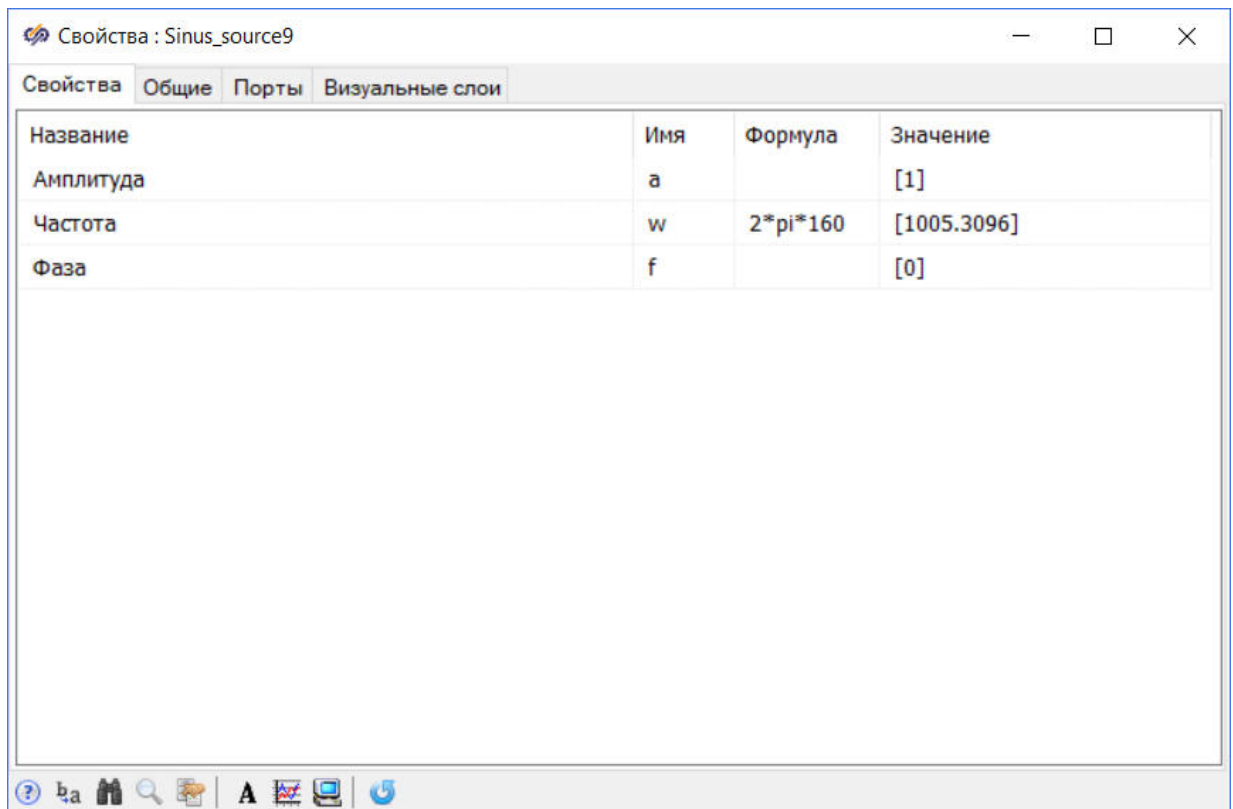


Рис. 31. Окно "Свойства" для блока "Синусоида" с подписью "Второй источник".

Результатом суммирования сигналов двух блоков **Синусоида** является периодический сигнал с двумя гармониками частотой 10 и 160 Гц. Первая гармоника попадает в полосу пропускания фильтра, вторая – в его зону непрозрачности.

Запуск моделирования и построение графиков

Запустить проект на расчет и дождаться окончания расчета.

Открыть окно **График** для блока **Временной график** с подписью "**Первый сигнал**". Временной график первого сигнала должен выглядеть аналогично рисунку (Рис. 32).

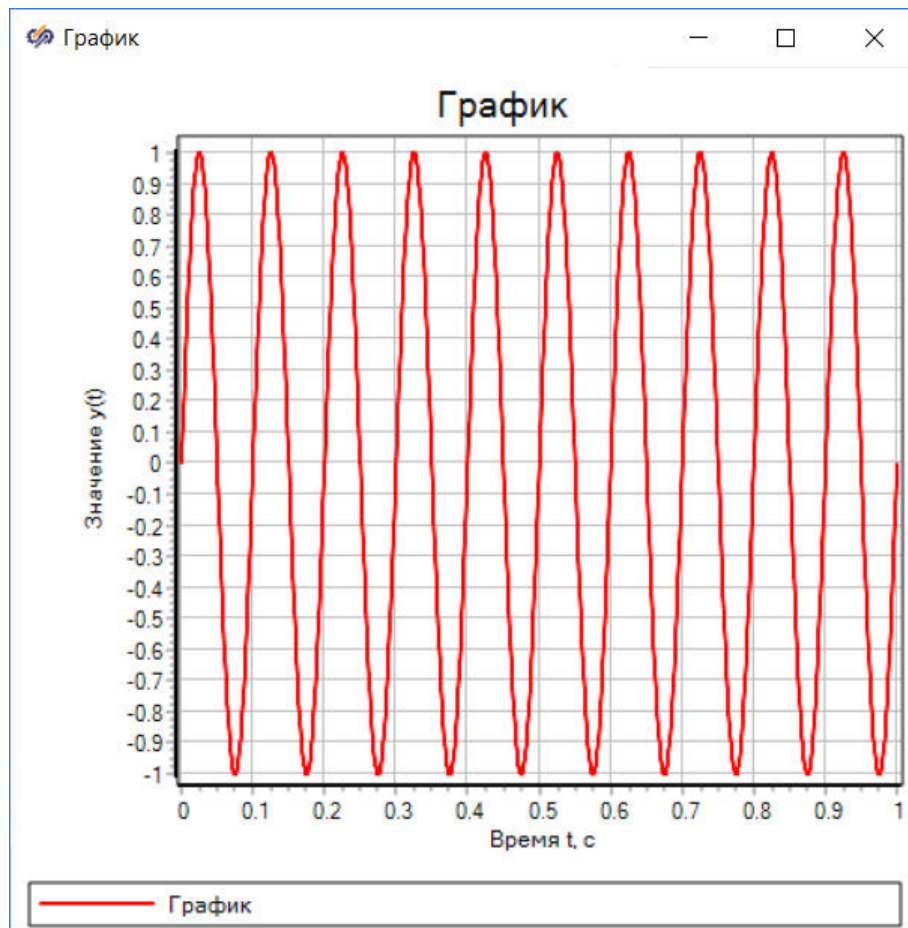


Рис. 32. Окно "График" с подписью "Первый сигнал".

Открыть окно **Спектральный анализ сигнала** и в нем задать параметры спектрального анализа аналогично тому, как это было сделано в предыдущем задании. Спектр сигнала должен выглядеть аналогично рисунку (Рис. 33).

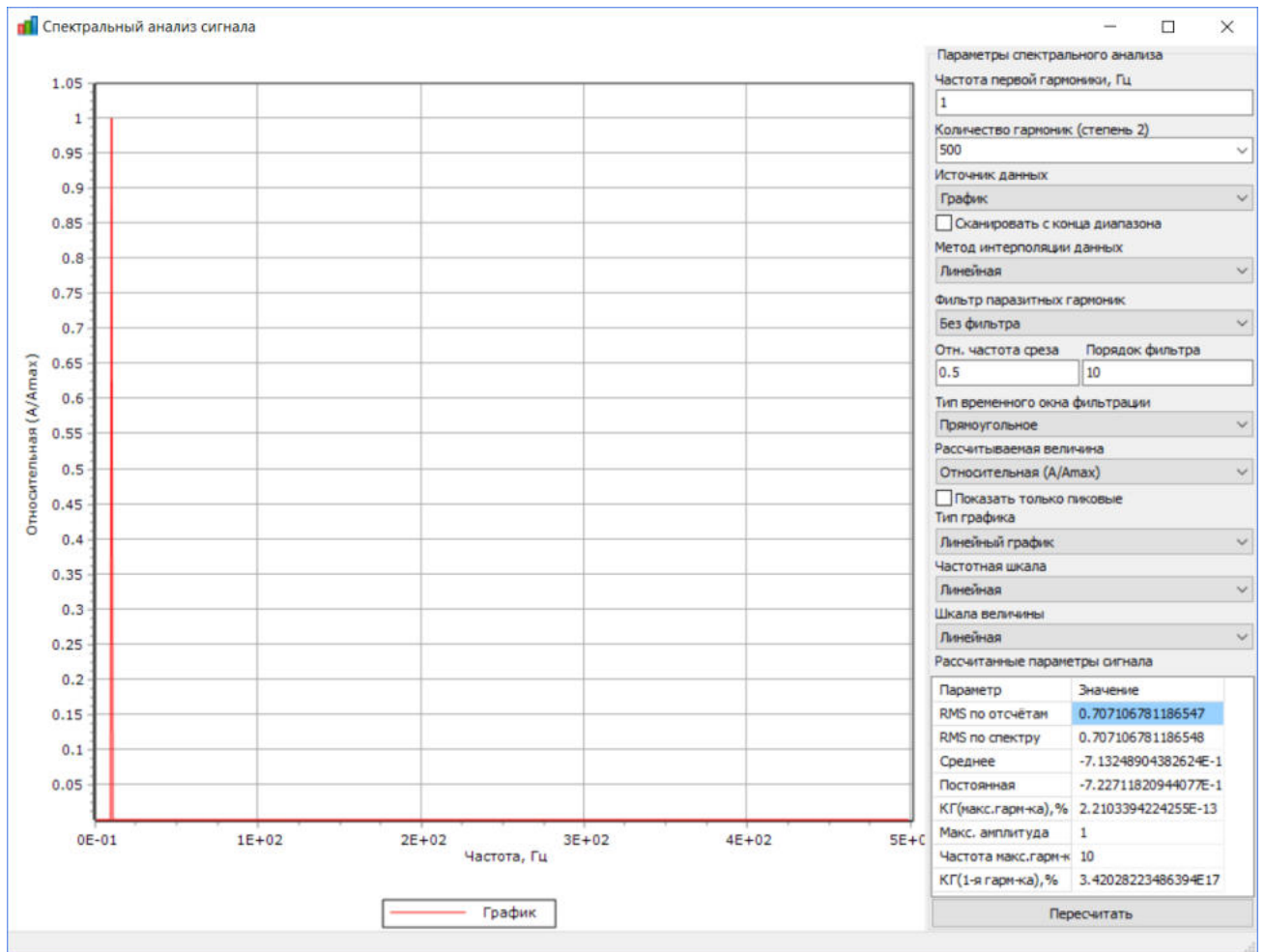


Рис. 33. Окно "Спектральный анализ" графика с подписью "Первый сигнал".

Открыть окно График для блока Временной график с подписью "Второй сигнал". Временной график второго сигнала должен выглядеть аналогично рисунку (Рис. 34).

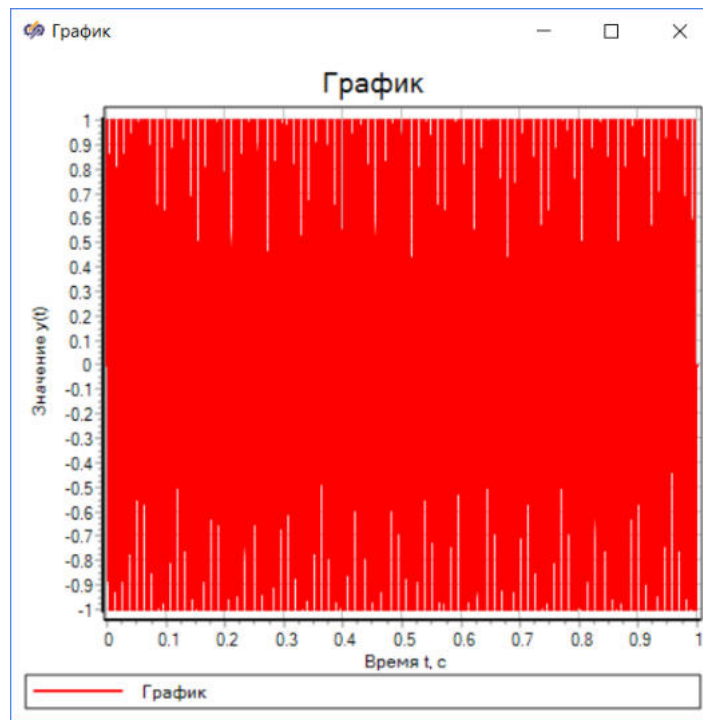


Рис. 34. Окно "График" с подписью "Второй сигнал".

Для изменения масштаба отображения необходимо нажатием правой кнопкой мыши по окну графика вызвать контекстной меню и в нем выбрать пункт **Свойства** (Рис. 35).

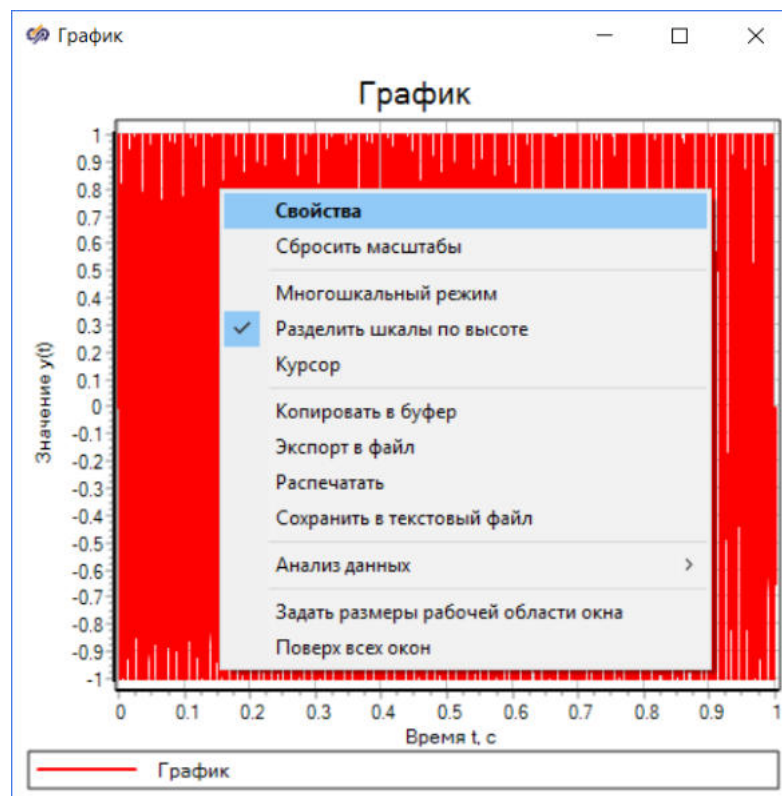


Рис. 35. Контекстное меню окна "График".

В появившемся окне в столбце "Ось X" указать значение свойства "Максимум" согласно рисунку (Рис. 36) и закрыть окно нажатием кнопки **Ок**.

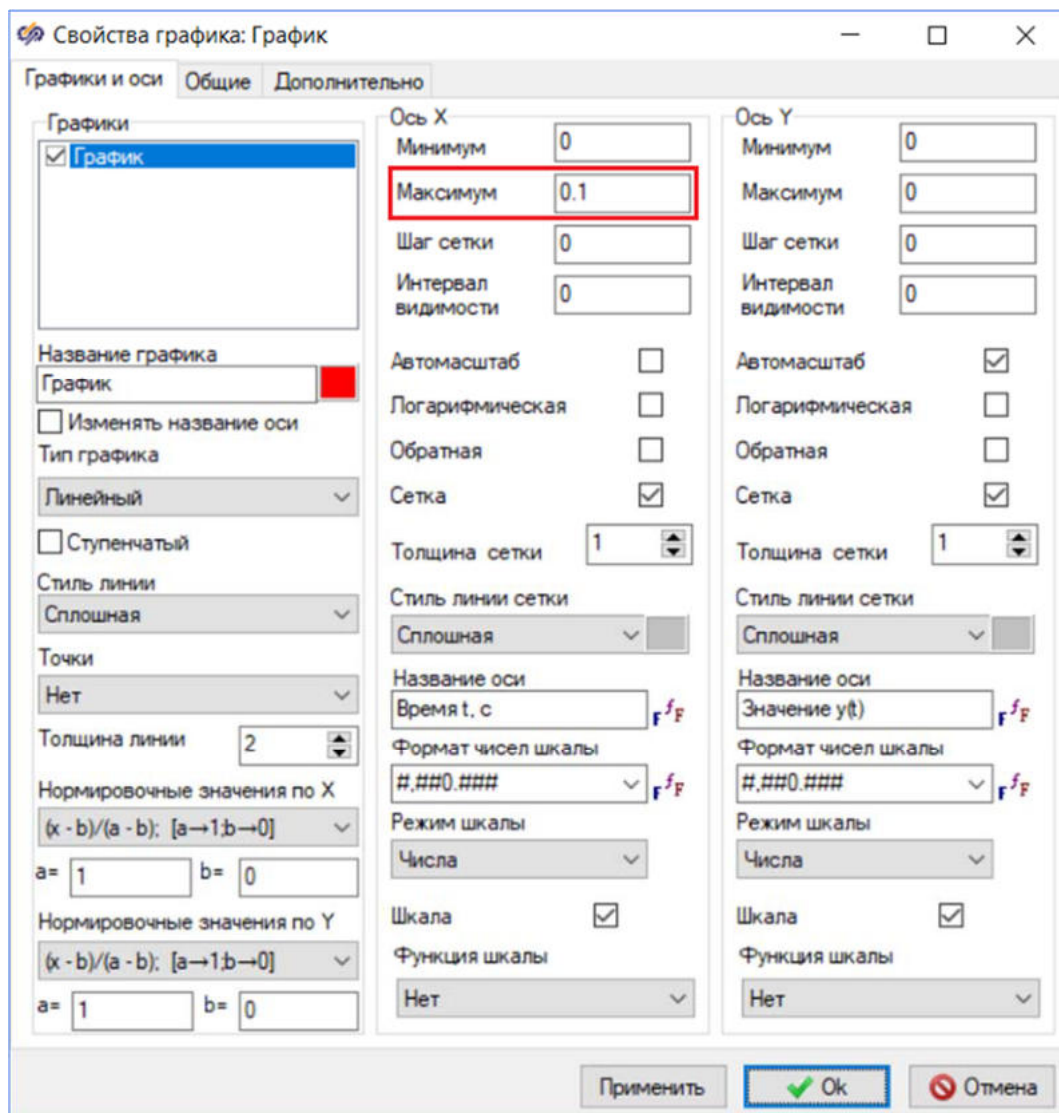


Рис. 36. Окно "Свойства графика".

Окно **График** изменит свой вид (Рис. 37).

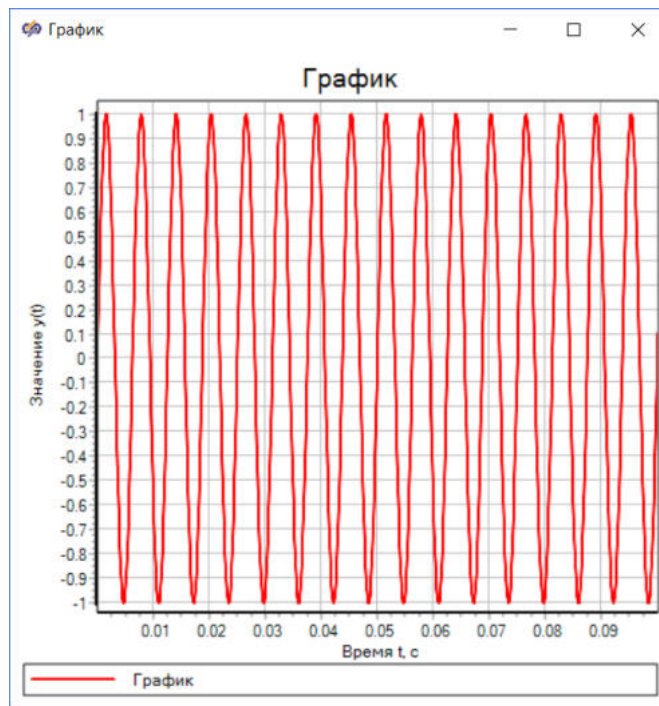


Рис. 37. Окно "График" с подписью "Второй сигнал" с измененным масштабом.

Открыть окно **Спектральный анализ сигнала** и изменить параметры спектрального анализа аналогично тому, как это было сделано в предыдущем задании. Спектр сигнала должен выглядеть аналогично рисунку (Рис. 38).

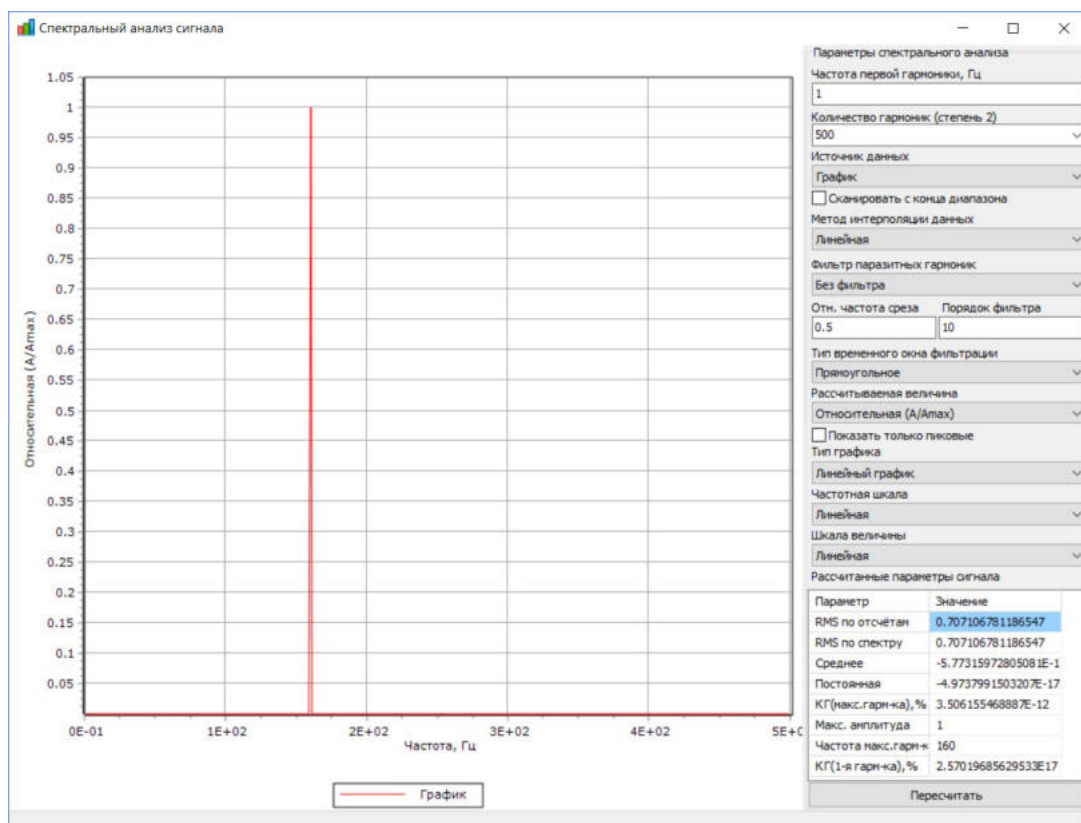


Рис. 38. Окно "Спектральный анализ" графика с подписью "Второй сигнал".

Открыть окно **График** для блока **Временной график** с подписью **"Суммарный сигнал"**. Временной график суммарного сигнала должен выглядеть аналогично рисунку (Рис. 39).

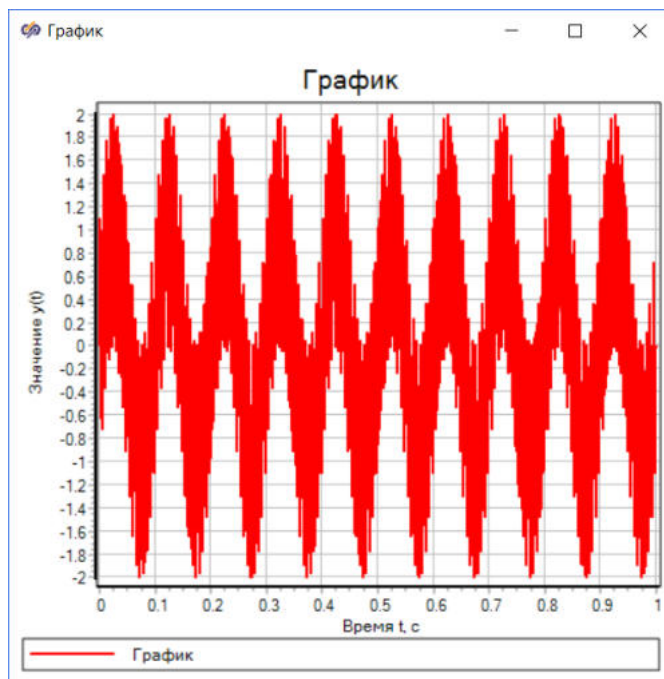


Рис. 39. Окно "График" с подписью "Суммарный сигнал".

Открыть окно **Спектральный анализ сигнала** и изменить параметры спектрального анализа аналогично тому, как это было сделано в предыдущем задании. Спектр сигнала должен выглядеть аналогично рисунку (Рис. 40).

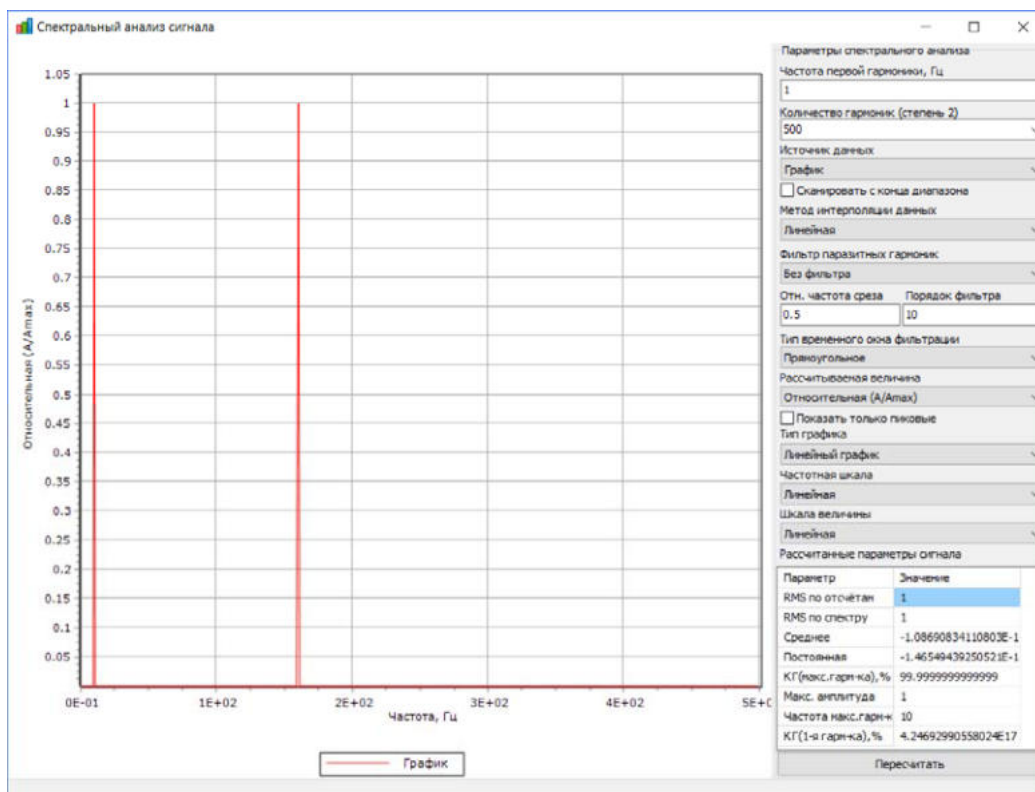


Рис. 40. Окно "Спектральный анализ" графика с подписью "Суммарный сигнал".

Спектр суммарного сигнала демонстрирует то, что сигнал на входе фильтра имеет две гармоники с частотами 10 и 160 Гц, поскольку он является суммой двух синусоид с соответствующими частотами.

Открыть окно График для блока Временной график с подписью "Выходной сигнал". Временной график сигнала на выходе фильтра должен выглядеть аналогично рисунку (Рис. 41).

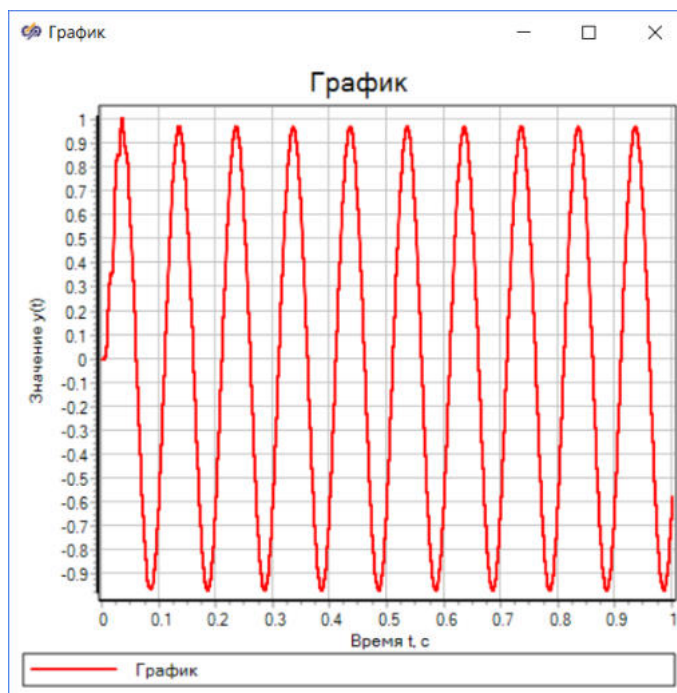


Рис. 41. Окно "График" с подписью "Выходной сигнал".

Открыть окно Спектральный анализ сигнала и изменить параметры спектрального анализа аналогично тому, как это было сделано в предыдущем задании. Спектр сигнала должен выглядеть аналогично рисунку (Рис. 42).

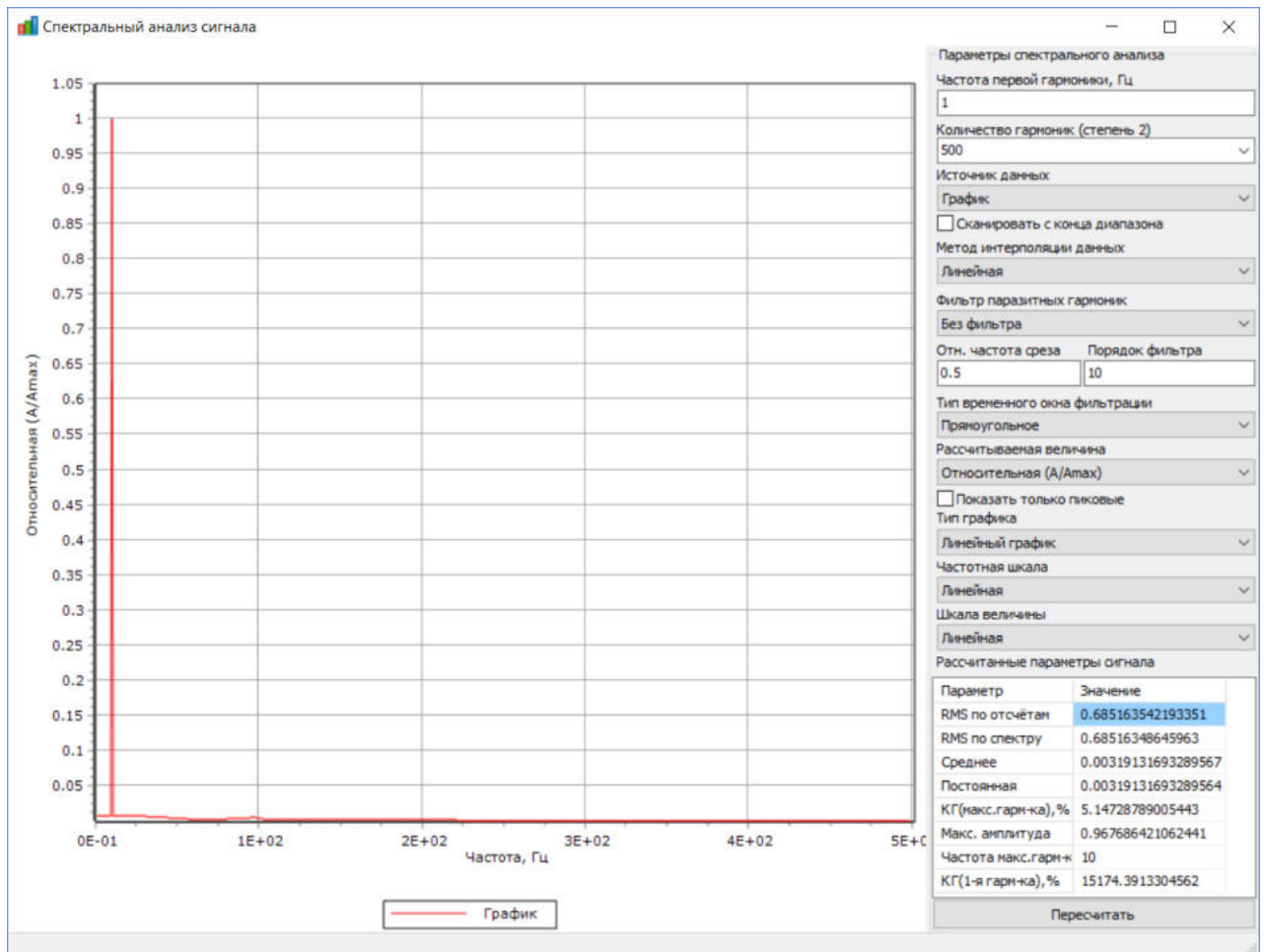


Рис. 42. Окно "Спектральный анализ" графика с подписью "Выходной сигнал".

График и спектр сигнала демонстрируют то, что сигнал на выходе фильтра имеет только одну ярко выраженную гармонику с частотой 10 Гц, поскольку фильтр подавил составляющую сигнала с частотой 160 Гц.

Перед тем, как приступить к выполнению следующего задания, необходимо сохранить проект.

Самостоятельная работа

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Необходимо повторить проектирование фильтра Чебышева 1-го рода 8-го порядка (для НЧ и ВЧ) и 12-го порядка (для полосового и режекторного фильтров) с частотой дискретизации, частотой среза полосы пропускания и пульсациями в полосе пропускания согласно значениям исходных данных варианта, представленных в таблице (Табл. 1)

2. Для каждого фильтра провести исследование процесса прохождения через фильтр сигнала, представляющего собой сумму двух гармоник, для двух случаев:

- 1-я и 2-я гармоники одновременно попадают в полосу пропускания фильтра
- 1-я гармоника попадает в полосу пропускания, а 2-я гармоника лежит в зоне непрозрачности фильтра

3. Занести в отчет графики результатов фильтрации сигнала (во временной и частотной областях)

Табл. 1. Исходные данные.					
№ варианта	Тип ЦФ	f_d , Гц	f_{zn} , Гц	f_{np} , Гц	Уровень пропускания, дБ
1	НЧ	1000	150	100	0,5
	П	2000	150±100	150±50	0,5
2	ВЧ	1000	100	150	0,5
	Р	2000	150±50	150±100	0,5
3	НЧ	1000	100	50	0,5
	П	2000	250±50	250±150	0,5
4	ВЧ	1000	50	100	0,5
	Р	2000	250±150	250±50	0,5
5	НЧ	1000	150	50	0,5
	П	2000	175±125	175±25	0,5
6	ВЧ	1000	50	150	0,5

	Р	2000	175±25	175±125	0,5
7	НЧ	1000	75	25	0,5
	П	2000	200±125	200±50	0,5
8	ВЧ	1000	25	75	0,5
	Р	2000	200±50	200±125	0,5
9	НЧ	1000	50	25	0,5
	П	2000	250±225	250±150	0,5
10	ВЧ	1000	25	50	0,5
	Р	2000	250±150	250±225	0,5
11	НЧ	1000	250	200	0,5
	П	2000	300±100	300±200	0,5
12	ВЧ	1000	200	250	0,5
	Р	2000	300±200	300±100	0,5

Контрольные вопросы

1. Дать определение следующих терминов: полоса пропускания, зона подавления, частота дискретизации, показатель частотной избирательности
2. Перечислить типы фильтров частотной избирательности и назвать их различия
3. Что значит синтезировать цифровой фильтр?

4. С помощью какого блока в SimInTech можно спроектировать НЧ-фильтр Чебышёва 1-го рода 8-го порядка?

Лабораторная работа №3

Проектирование КИХ-фильтра

Задание:

- разработать модель цифрового КИХ-фильтра при помощи блоков общетехнической группы библиотек Автоматика и блоков библиотеки Цифровая обработка сигналов
- исследовать процесс фильтрации сигнала с помощью КИХ-фильтра
- сделать выводы на основе построения графика АЧХ для КИХ-фильтра

Создание нового проекта

Для создания нового проекта необходимо:

1. В главном окне SimInTech нажать кнопку **Файл** и выбрать пункт **Новый проект**
2. В выпадающем меню выбрать пункт **Схема модели общего вида**
3. Сохранить проект с названием по умолчанию или указать желаемое имя проекта

Добавление блоков на схему

Требуется поместить на схему блок **КИХ-фильтр**. Для этого выполнить следующие действия:

1. В главном окне SimInTech в палитре блоков выбрать вкладку **ЦОС** подменю **Фильтрация** (Рисунок 1).

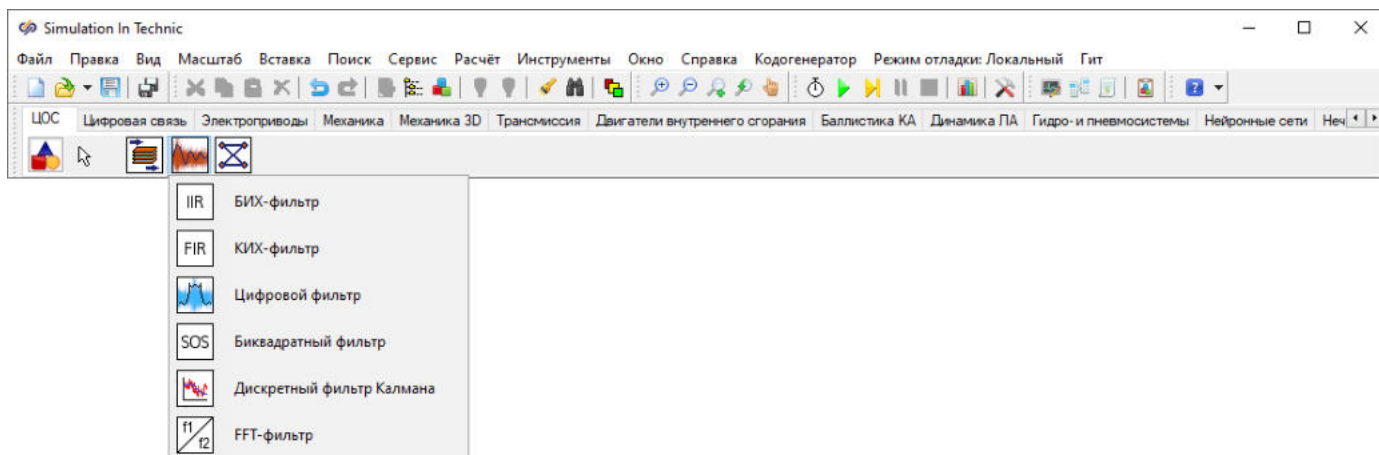


Рис. 1. Главное окно SimInTech с выделенной вкладкой "ЦОС" в палитре блоков и открытым подменю "Фильтрация"

2. Одинарным нажатием левой кнопкой мыши выбрать блок **КИХ-фильтр**
3. Установить блок **КИХ-фильтр** в рабочую область окна проекта одинарным нажатием левой кнопкой мыши. (Рисунок 2).

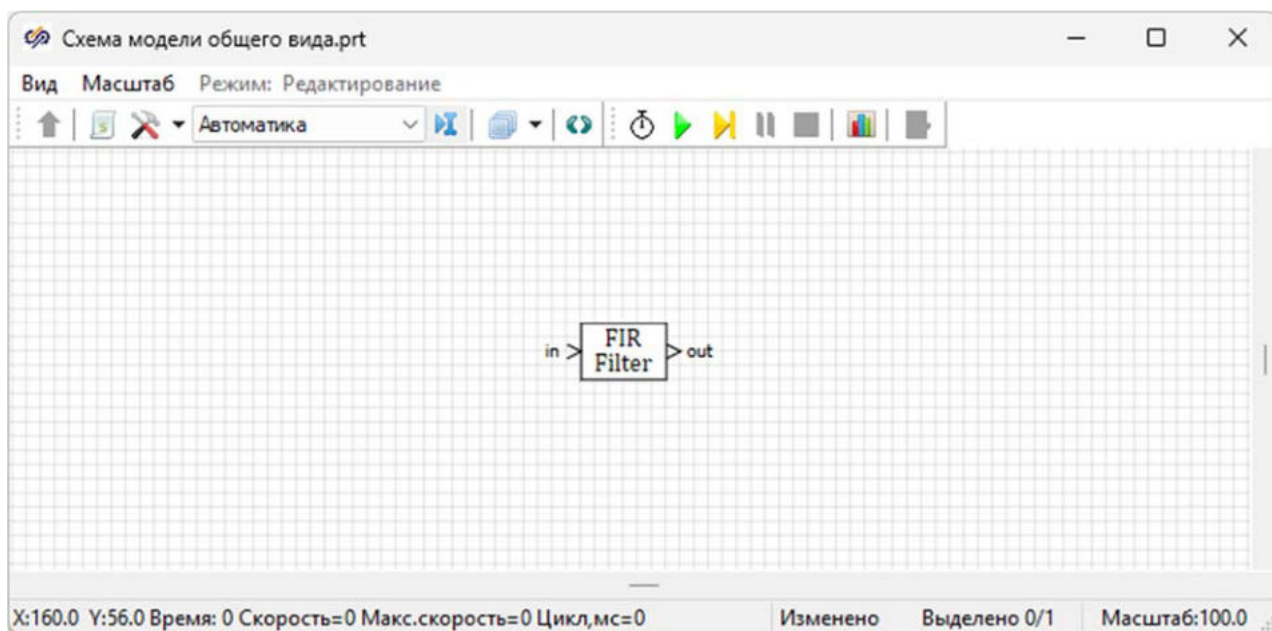


Рис. 2. Окно проекта с установленным блоком "КИХ-фильтр".

Аналогичными действиями необходимо добавить на схему и разместить согласно рисунку (Рисунок 3) следующие блоки:

- 1 блок **Ступенька** из вкладки **Источники**. С помощью данного блока будет формироваться входной сигнал фильтра
- 1 блок **Временной график** из вкладки **Вывод данных**. С помощью данного блока будет осуществляться графическое отображение результатов моделирования
- 1 блок **График Y от X** из вкладки **Вывод данных**. С помощью данного блока будет производиться графическое отображение АЧХ фильтра
- 1 блок **Спектральная плотность** из вкладки **Статистика**. С помощью данного блока будет производиться спектральный анализ импульсного сигнала

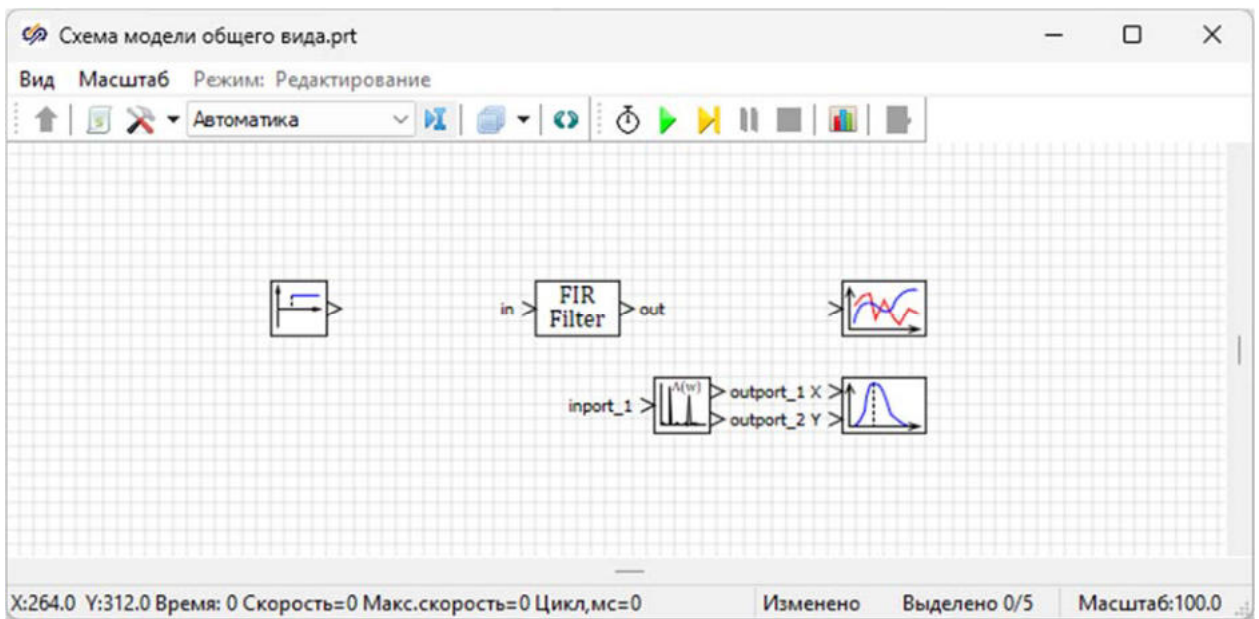


Рис. 3. Окно проекта с добавленными блоками.

Необходимо соединить блоки линиями связи согласно рисунку (Рисунок 4).

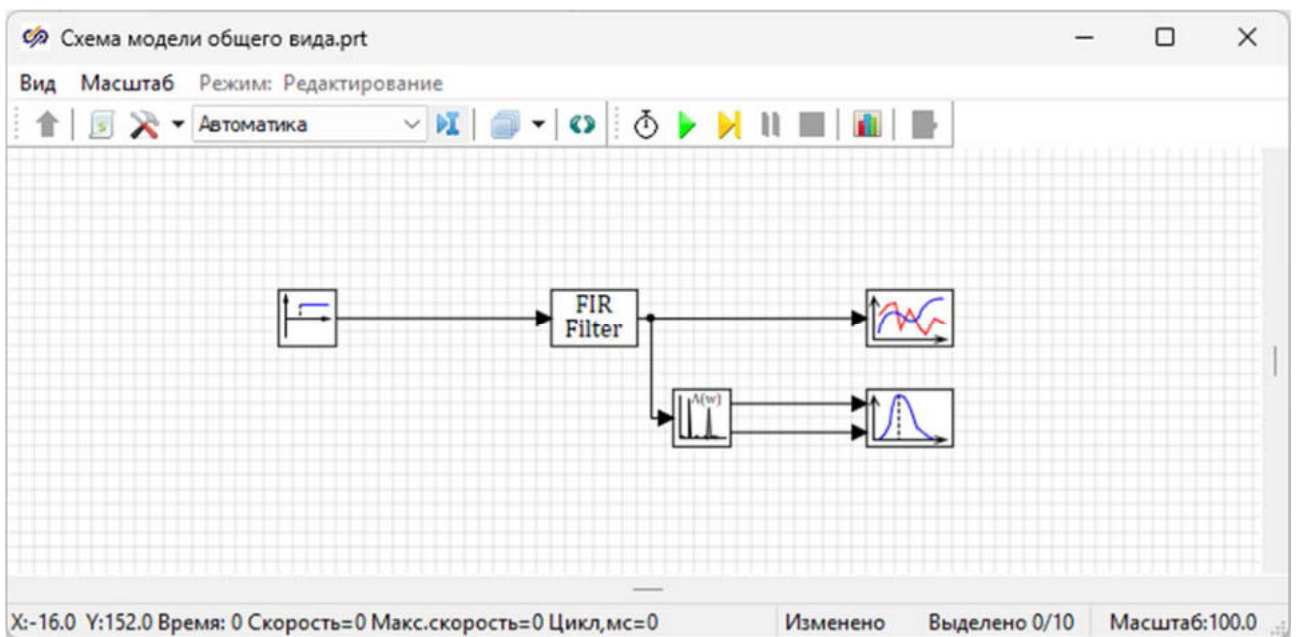


Рис. 4. Окно проекта с соединенными блоками.

Перед тем, как приступить к выполнению следующего пункта данного задания, необходимо сохранить проект.

Задание свойств блоков

В данной работе будет рассматриваться модель равноволнового НЧ-фильтра 53-го порядка. Для задания передаточной функции КИХ-фильтра необходимо использовать его импульсную характеристику. Данная

характеристика рассчитывается с помощью инструмента Проектирование и анализ фильтров. Для этого необходимо:

1. В главном окне SimInTech нажать кнопку Инструменты и выбрать пункт Проектирование и анализ фильтров (Рисунок 5).

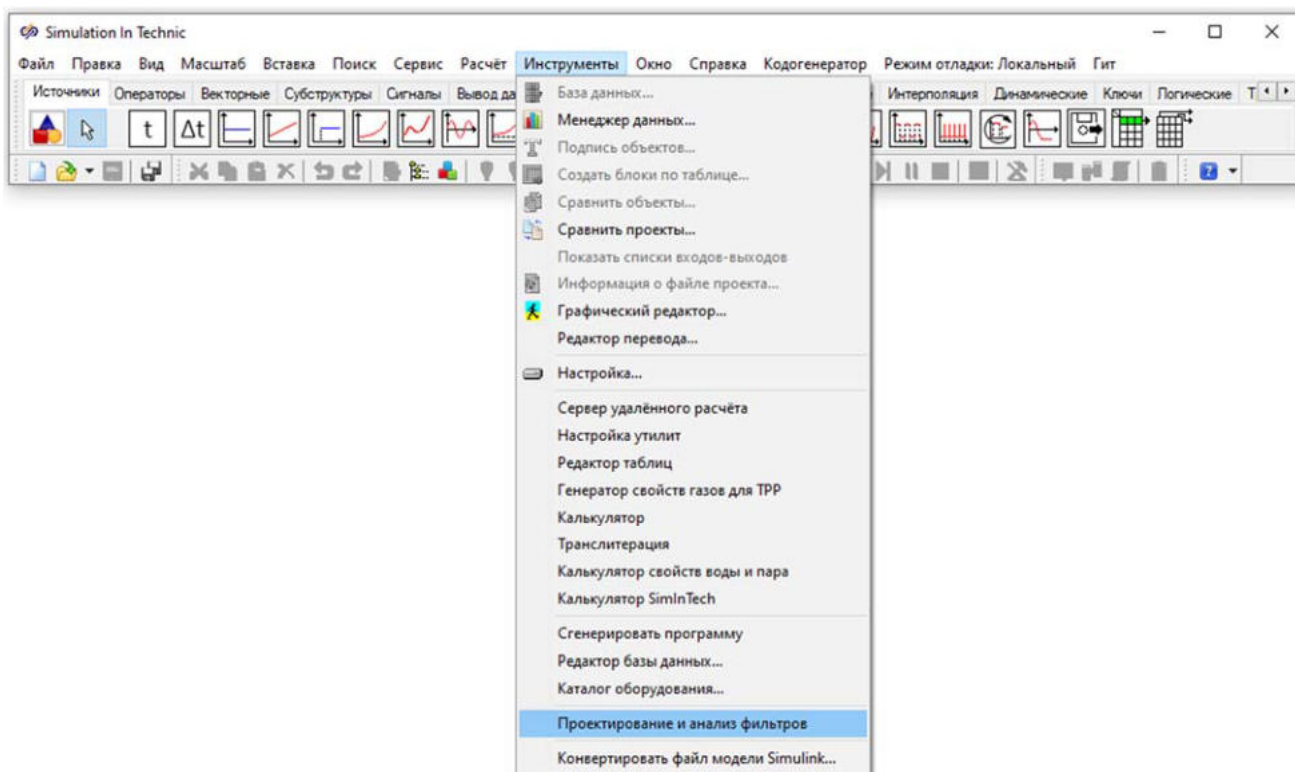


Рис. 5. Главное окно SimInTech с открытой вкладкой "Инструменты" и выделенным пунктом "Проектирование и анализ фильтров".

2. Необходимо рассчитать равноволновый КИХ-фильтр низких частот 53-го порядка с частотой дискретизации $F_d = 1000$ Гц, частотой среза $F_{проп} = 100$ Гц и частотой подавления $F_{подавл} = 150$ Гц. Для этого задать данные параметры согласно рисунку (Рисунок 6).

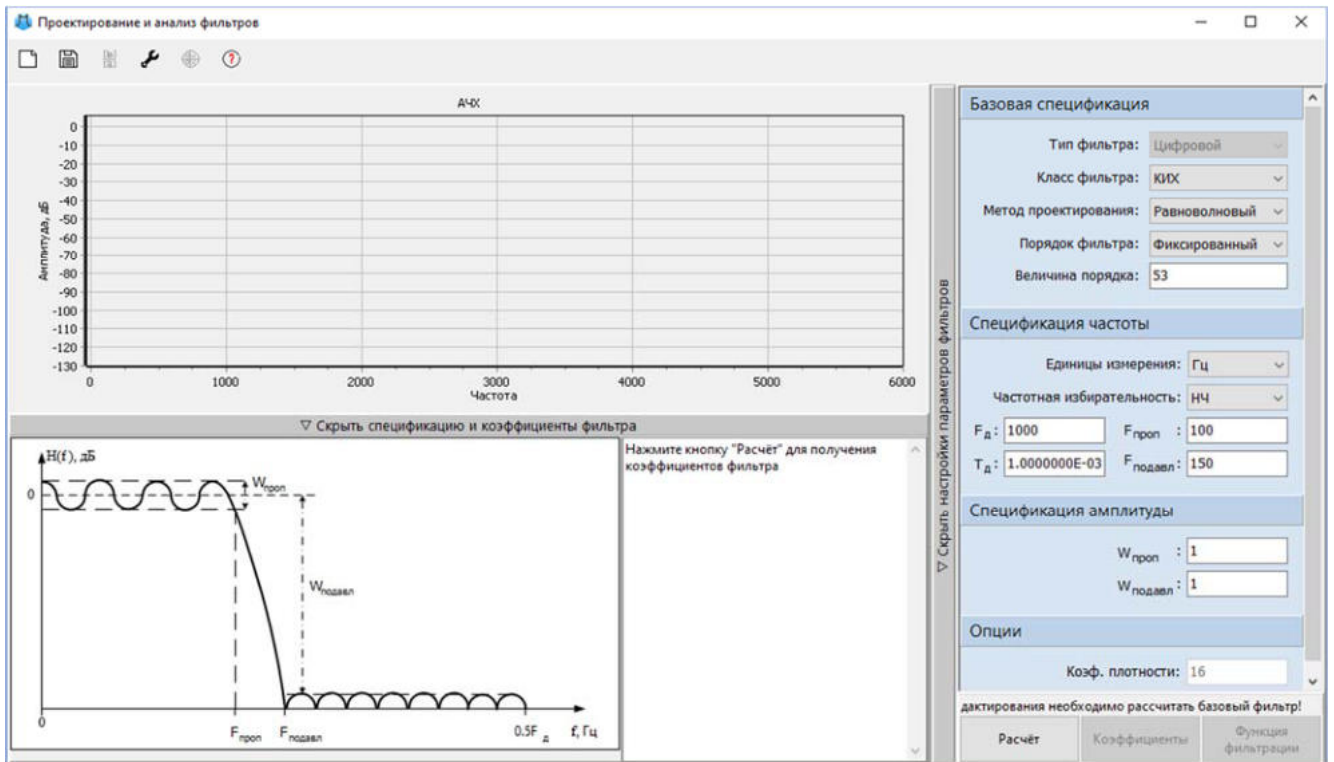


Рис. 6. Окно "Проектирование и анализ цифровых фильтров" с заданными характеристиками.

3. Требуется рассчитать фильтр одинарным нажатием на кнопку **Расчёт**, выделенную на рисунке (Рисунок 7). После расчета характеристики фильтра должны выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 7).

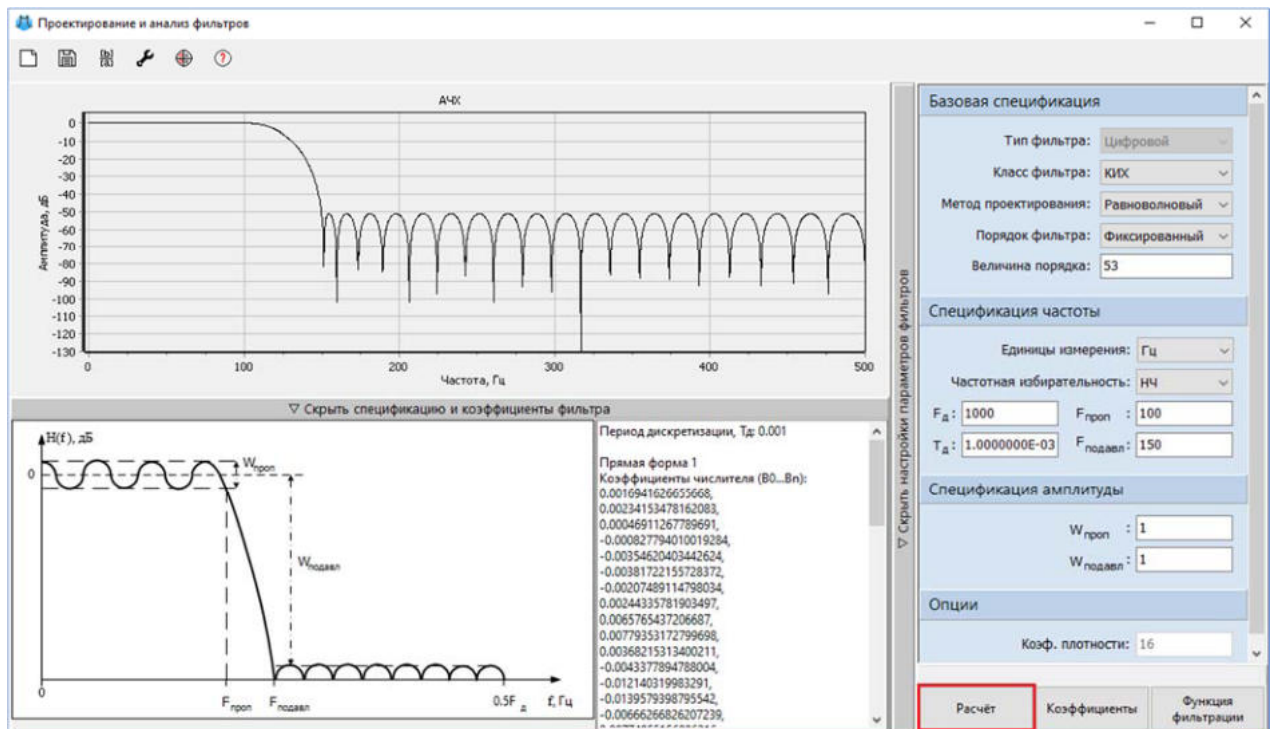


Рис. 7. Окно "Проектирование и анализ цифровых фильтров" с рассчитанными характеристиками и выделенной кнопкой "Расчет".

4. После окончания расчета необходимо скопировать полученные коэффициенты импульсной характеристики, которые используются для задания передаточной функции КИХ-фильтра. Для этого следует выделить коэффициенты в нижней части окна Проектирование и анализ фильтров, обозначенной на рисунке (Рисунок 8), нажатием правой кнопки мыши вызвать контекстное меню, после чего выбрать Копировать или скопировать с использованием сочетания клавиш "Ctrl + C".

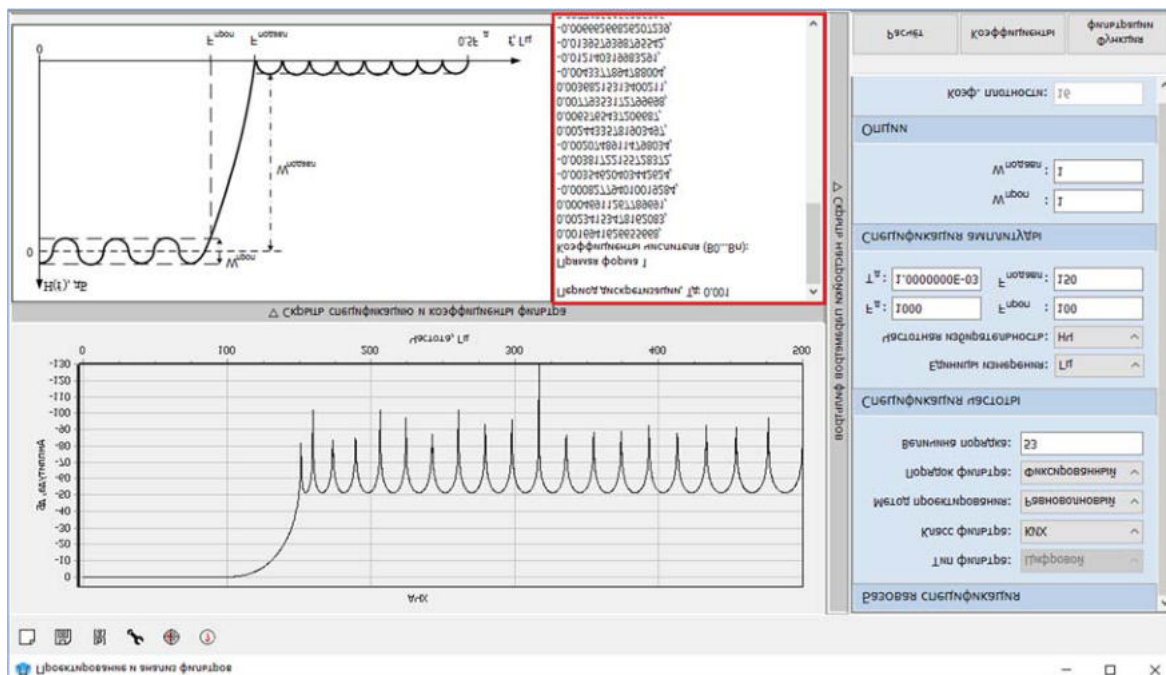


Рис. 8. Окно "Проектирование и анализ цифровых фильтров" с выделенной областью, содержащей коэффициенты фильтра.

Перед началом расчета требуется задать свойства блокам на схеме.

Необходимо задать импульсную характеристику КИХ-фильтра. Для этого следует открыть окно Свойства блока КИХ-фильтр (Рисунок 9).

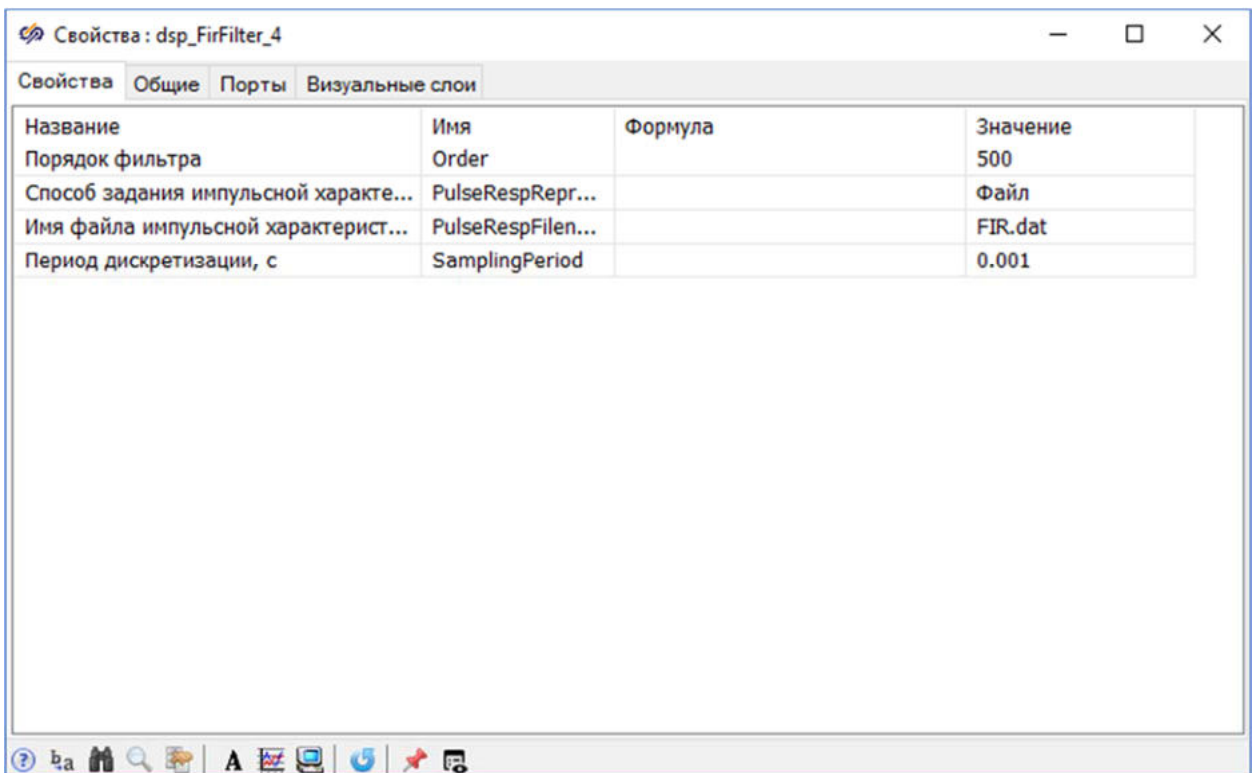


Рис. 9. Окно "Свойства" блока "КИХ-фильтр" со свойствами по умолчанию.

Изменить способ задания импульсной характеристики. Для этого необходимо в свойстве "**Способ задания импульсной характеристики**" выбрать значение "**Вектор**". После этого изменится список доступных свойств (Рисунок 10). Установить свойство "**Порядок фильтра**" равным "**53**".

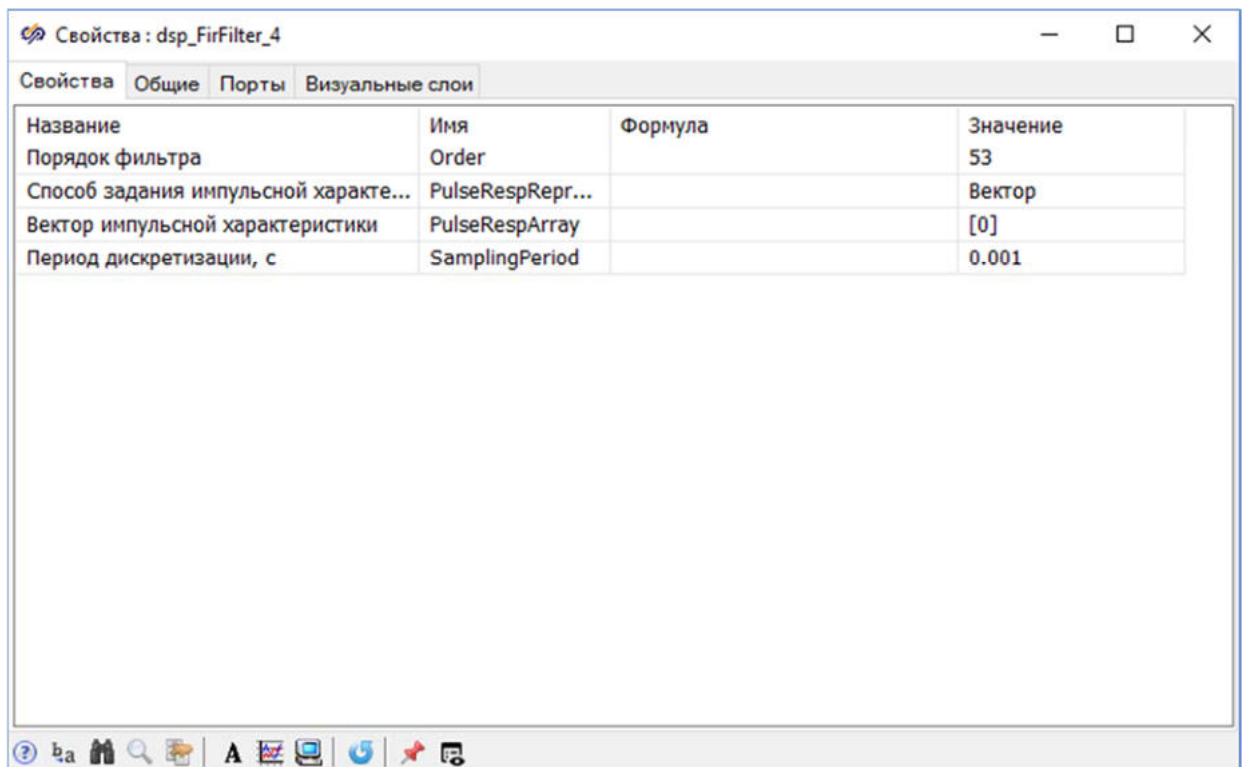


Рис. 10. Окно "Свойства" блока "КИХ-фильтр" со измененными свойствами.

Вычисленные ранее коэффициенты необходимо задать в свойстве "**Вектор импульсной характеристики**". Для этого нажать на кнопку текстового редактора в поле "**Значение**", которая обозначена на рисунке (Рисунок 11).

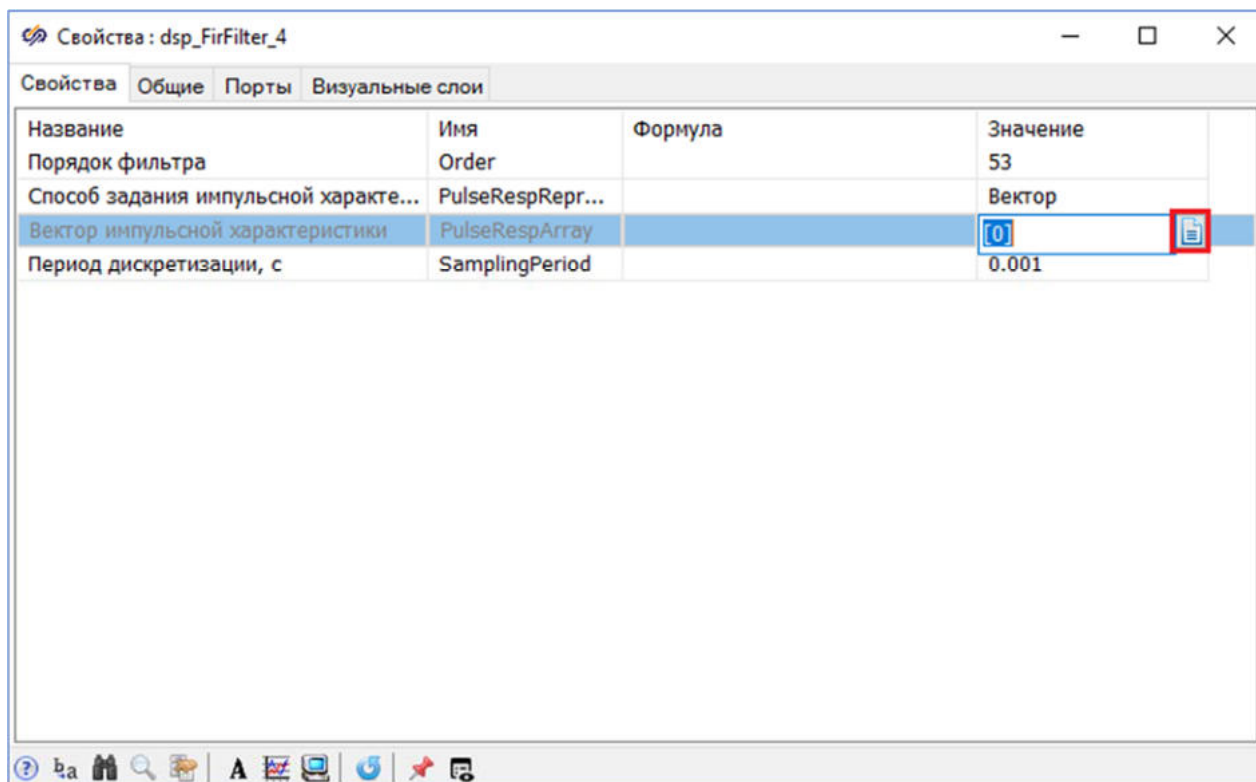


Рис. 11. Окно "Свойства" блока "КИХ-фильтр" с выделенной строкой свойства "Вектор импульсной характеристики".

В открывшемся окне текстового редактора внутри квадратных скобок, позволяющих задать вектор значений в SimInTech, следует вставить ранее скопированные коэффициенты импульсной характеристики ([Рисунок 12](#)).

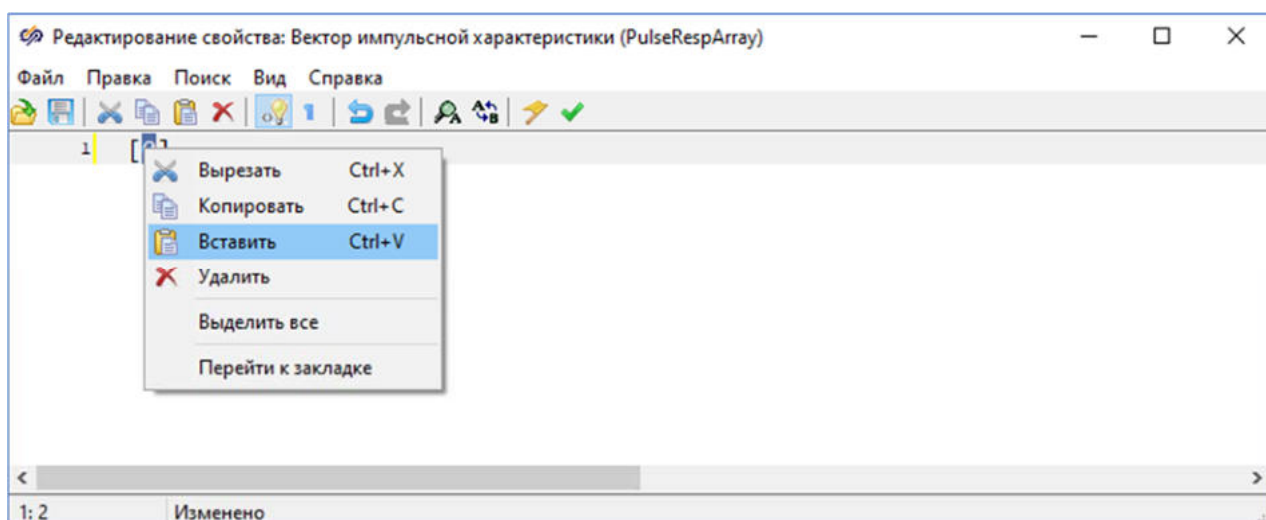


Рис. 12. Окно текстового редактора блока "КИХ-фильтр".

После добавления коэффициентов импульсной характеристики необходимо сохранить изменения нажатием на кнопку **Применить и закрыть** (Рисунок 13).

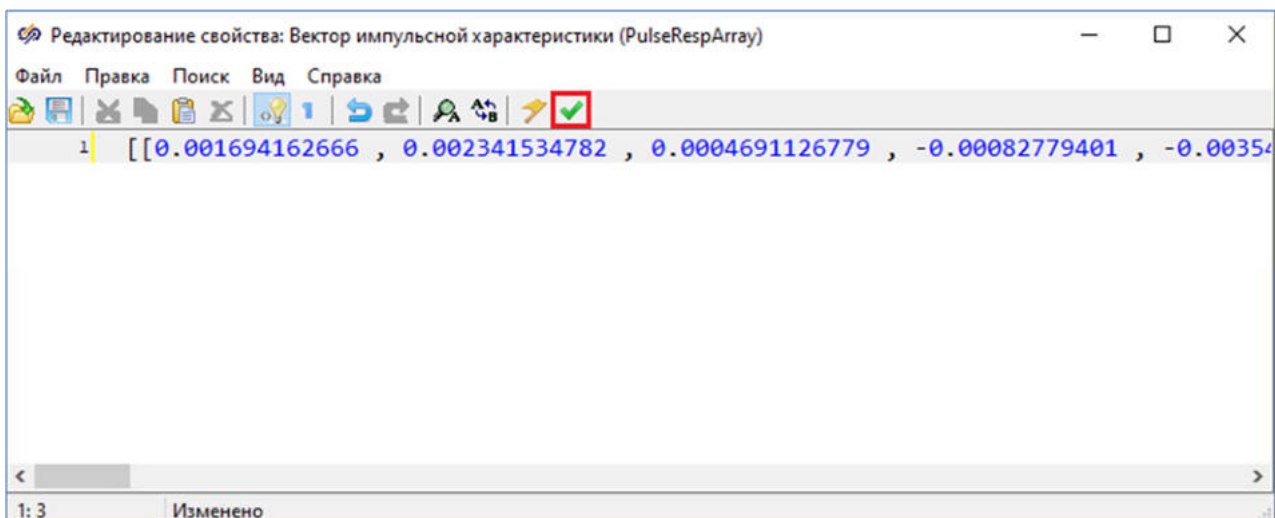


Рис. 13. Окно текстового редактора блока "КИХ-фильтр" с вставленными коэффициентами и выделенной кнопкой "Применить и закрыть".

Блок **Ступенька** будет формировать импульс с амплитудой 1 и длительностью 0.001 секунды, равной периоду дискретизации фильтра. Такой сигнал необходим для снятия импульсной характеристики фильтра.

Для блока **Ступенька** задать значения свойств согласно рисунку (Рисунок 14).

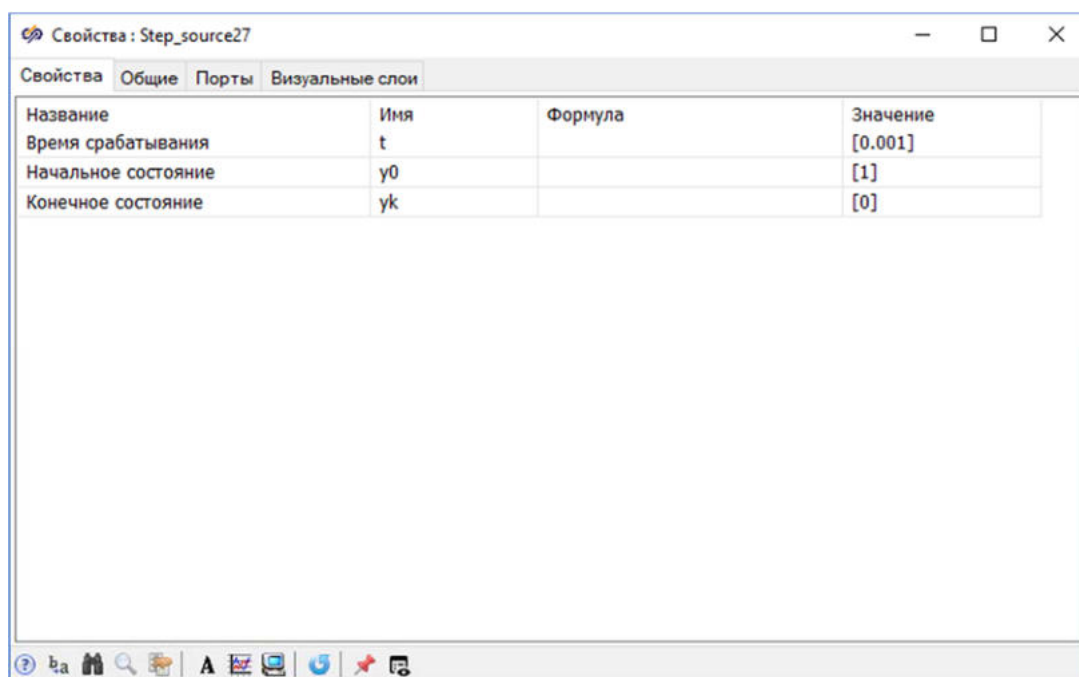


Рис. 14. Окно "Свойства" блока "Ступенька".

Блоки **Спектральная плотность** будут осуществлять спектральный анализ импульсной характеристики. Для них следует задать значения свойств согласно рисунку (Рисунок 15).

Название	Имя	Формула	Значение
Размер серии	size		1000
Способ расчёта	calcmode		По каждой серии
Период квантования	tau		0.001
Удалять линейный тренд	deltrend		<input type="checkbox"/> Нет
Выводимая величина	outmode		Амплитуда норми...
Окно фильтрации	win		Прямоугольное
Тип фильтра	filtertype		Без фильтра
Порядок фильтра	filterorder		53
Относительная частота среза филь...	filterwc		0.5

Рис. 15. Окно "Свойства" блока "Спектральная плотность".

Перед тем, как приступить к выполнению следующего пункта данного задания, необходимо сохранить проект.

Настройка параметров расчёта

Перед запуском проекта на моделирование требуется задать Параметры расчёта проекта. Для этого в окне проекта на панели кнопок нажать на кнопку **Параметры расчёта** (Рисунок 16).

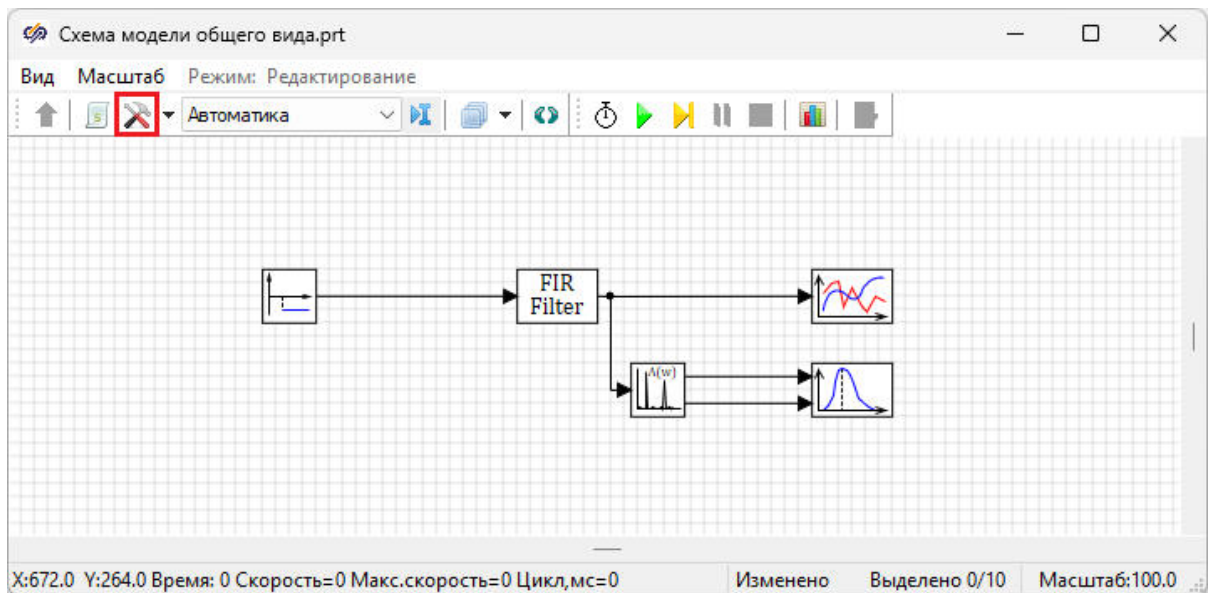


Рис. 16. Окно проекта с выделенной кнопкой "Параметры расчёта".

В появившемся окне параметров проекта установить новые значения свойства (Рисунок 17) "**Конечное время расчёта**" равным "1":

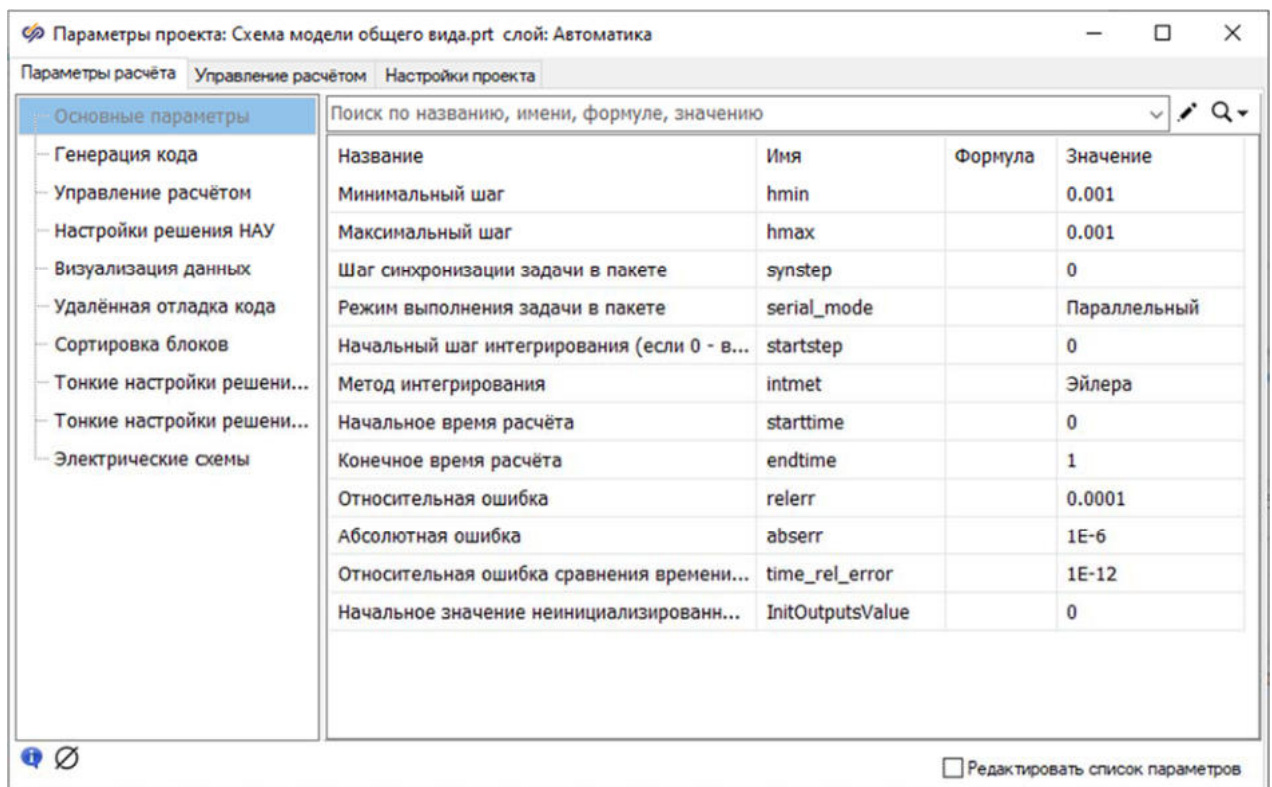


Рис. 17. Окно "Параметры проекта" вкладка "Параметры расчёта".

Перед тем, как приступить к выполнению следующего пункта данного задания, необходимо сохранить проект.

Запуск моделирования и построение графиков

Следует запустить проект на моделирование нажатием на кнопку **Пуск** (Рисунок 18) и дождаться окончания расчета.

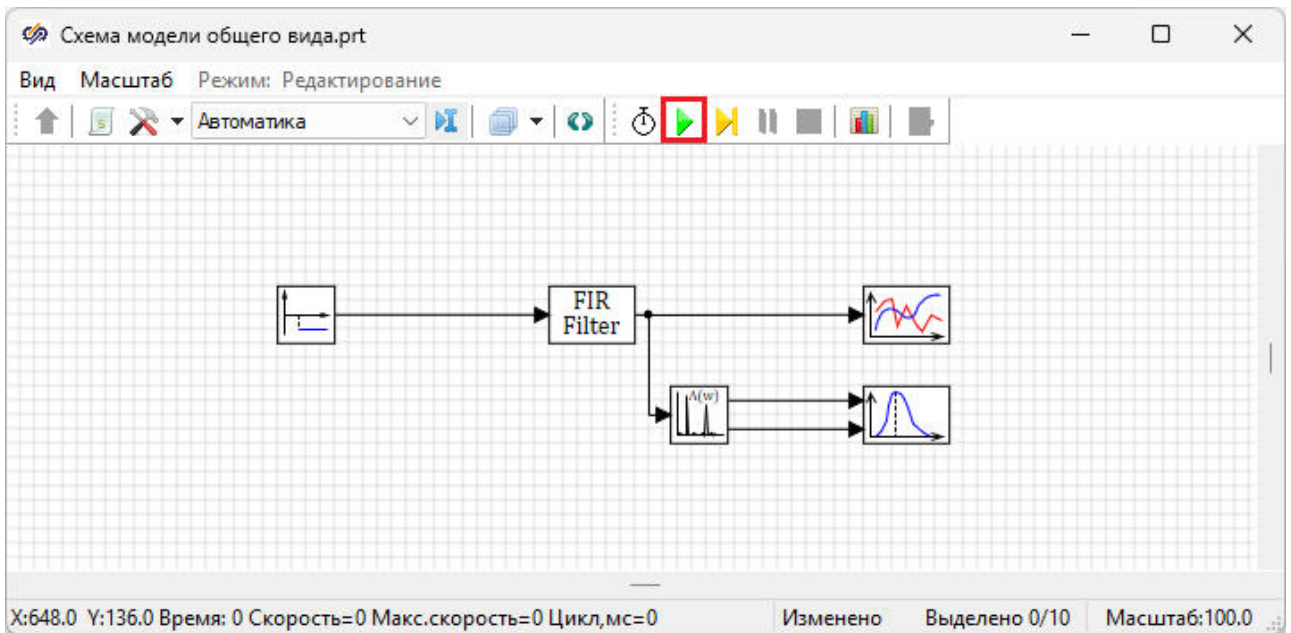


Рис. 18. Окно проекта с выделенной кнопкой "Пуск".

После окончания расчета двойным нажатием левой кнопкой мыши по блоку **Временной график**, открыть график импульсной характеристики фильтра. График должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 19).

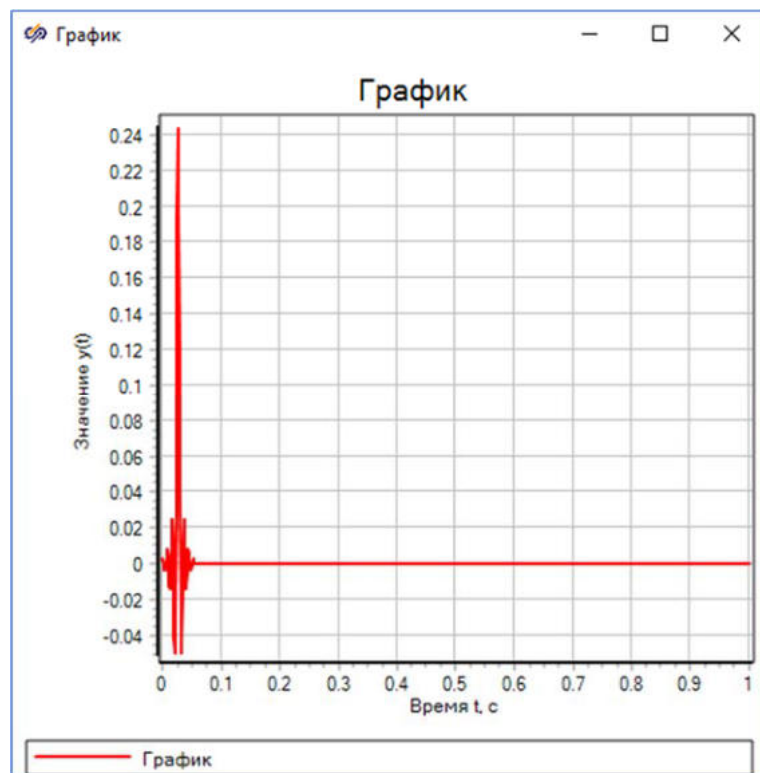


Рис. 19. График импульсной характеристики спроектированного фильтра.

Необходимо настроить параметры отображения результатов моделирования в блоке **Временной график**. Для этого необходимо нажать правой кнопкой мыши на окно **График** и выбрать пункт **Свойства** (Рисунок 20).

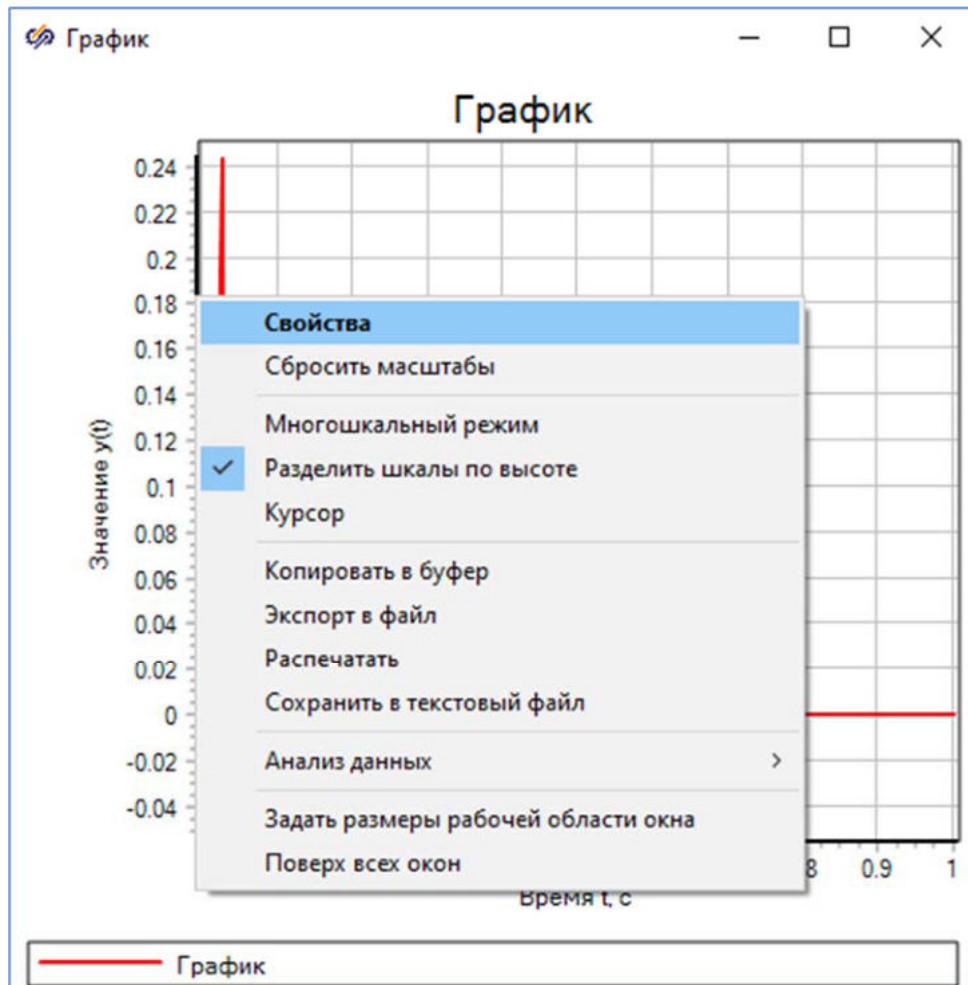


Рис. 20. График импульсной характеристики сигнала с контекстным меню.

В открывшемся окне **Свойства графика** на вкладке **Графики и оси** изменить **"Тип графика"** на **"Столбчатый"** и уменьшить диапазон отображения с помощью значения **"Максимум"** в колонке **"Ось X"** (Рисунок 21).

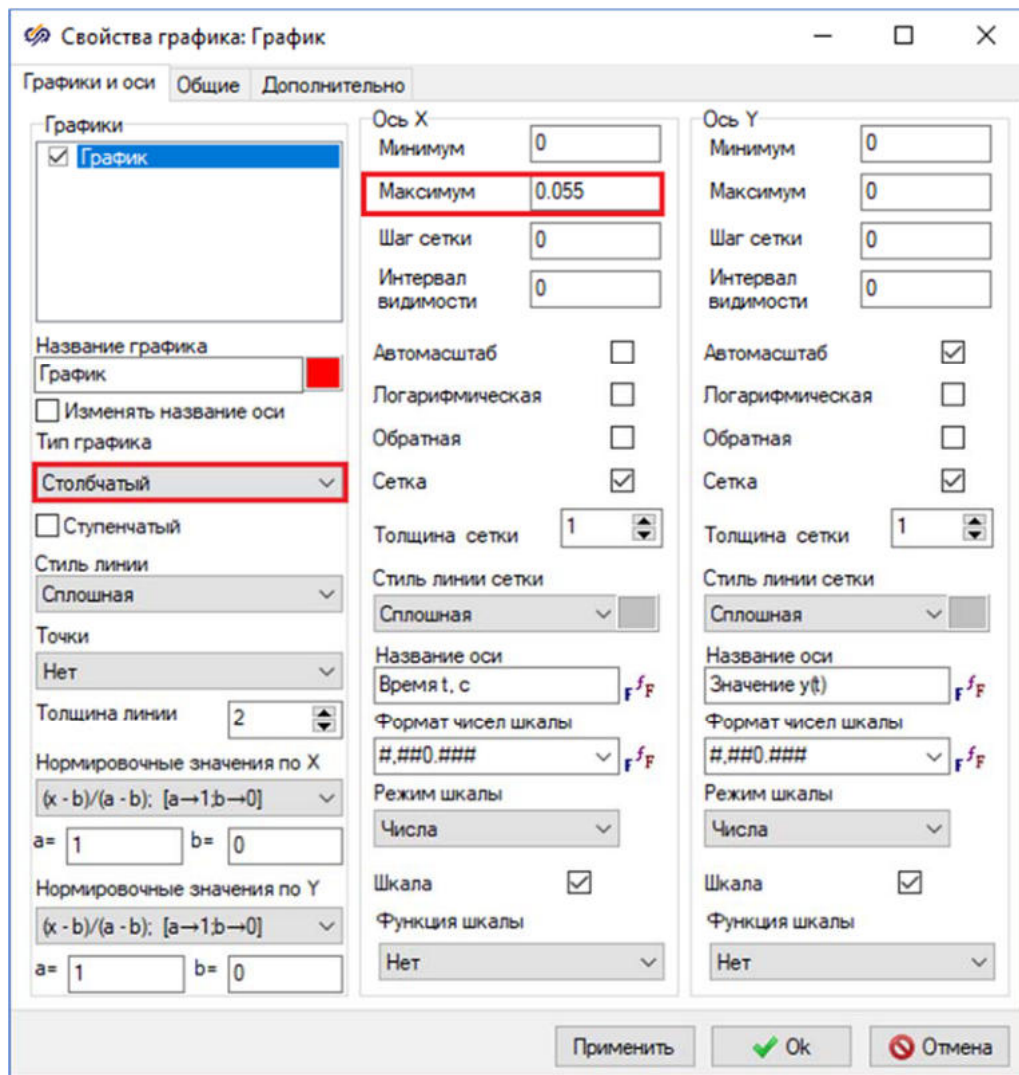


Рис. 21. Окно "Свойства графика" с выделенными свойствами, которые необходимо изменить.

На вкладке **Общие** отключить свойство **"Показывать легенду"** (Рисунок 22).

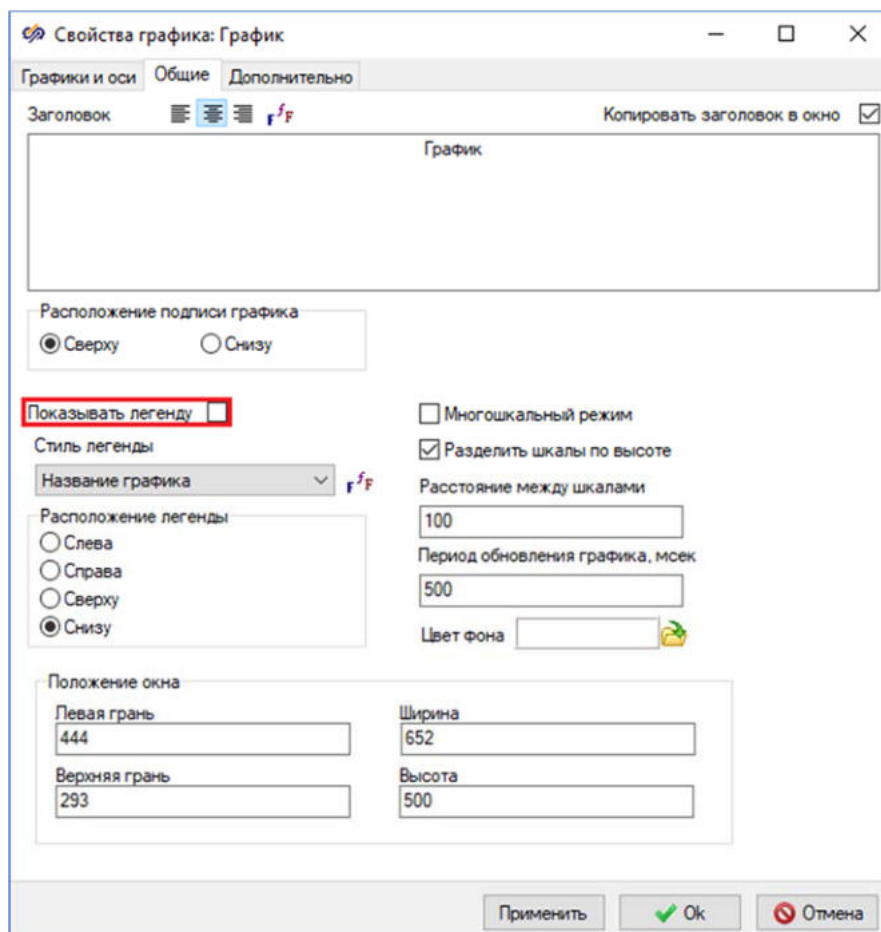


Рис. 22. Окно "Свойства графика" с выделенным свойством "Показывать легенду".

После изменения свойств графика необходимо закрыть окно нажатием на кнопку **Ok**, полученный график импульсной характеристики должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 23).

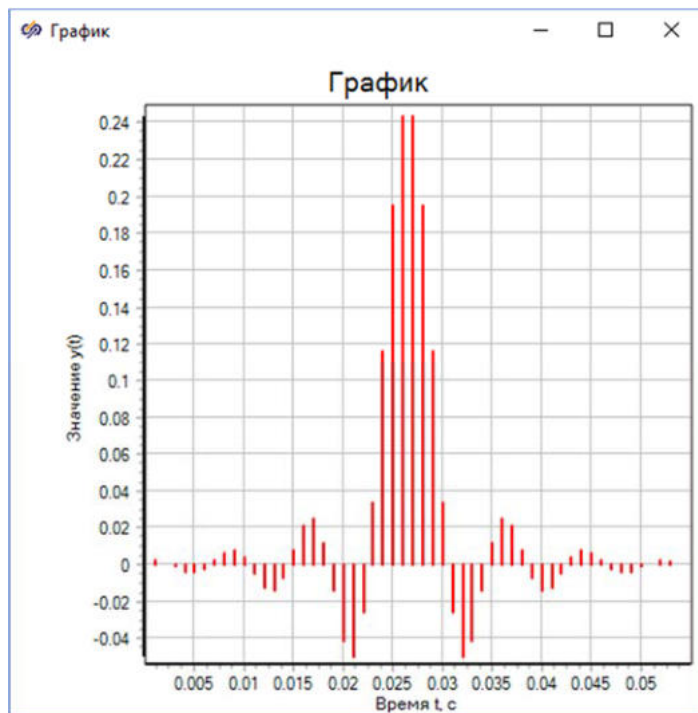


Рис. 23. Импульсная характеристика сигнала с измененными свойствами отображения графика.

Построенный график импульсной характеристики полностью совпадает с графиком, построенным инструментом Проектирование и анализ фильтров (Рисунок 24).

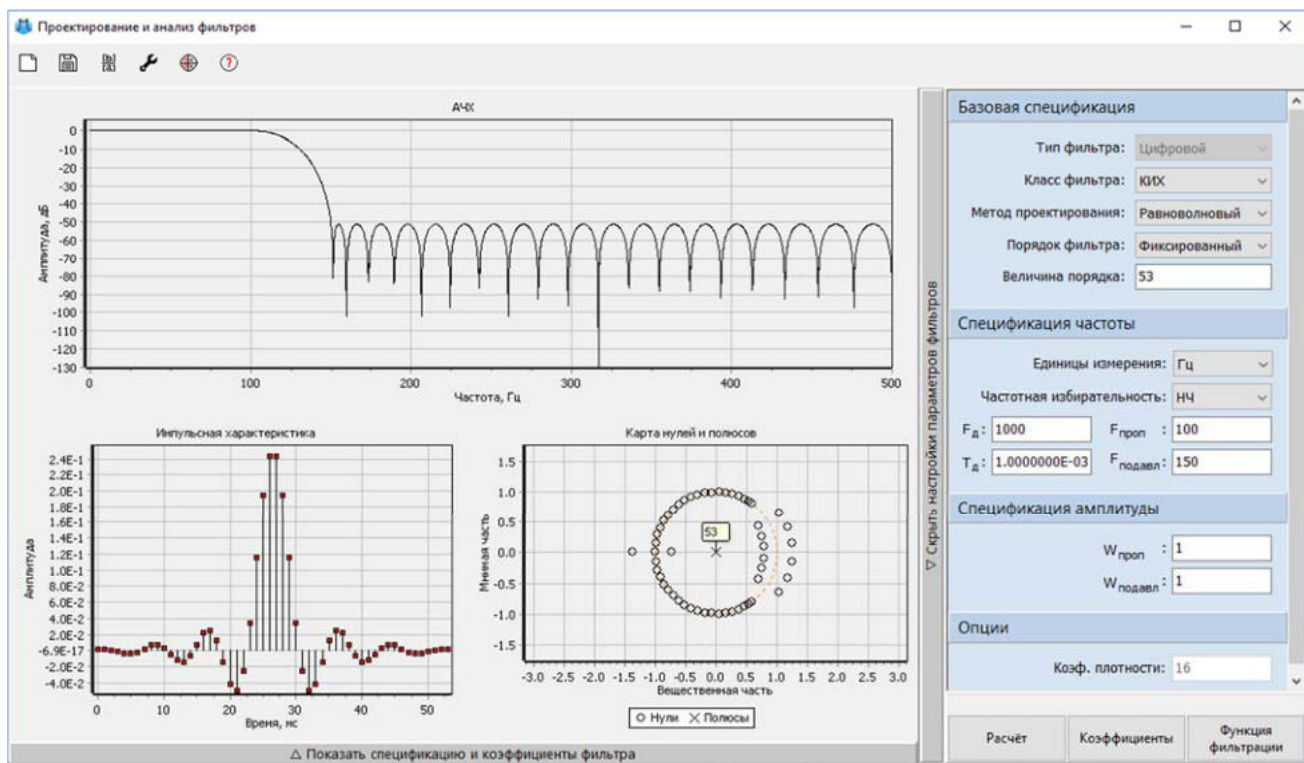


Рис. 24. График импульсной характеристики в окне инструмента "Проектирование и анализ фильтров".

Для построения графика АЧХ фильтра используется блок **График Y от X**. Двойным нажатием левой кнопкой мыши по блоку **График Y от X** открыть график АЧХ фильтра. График должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 25).

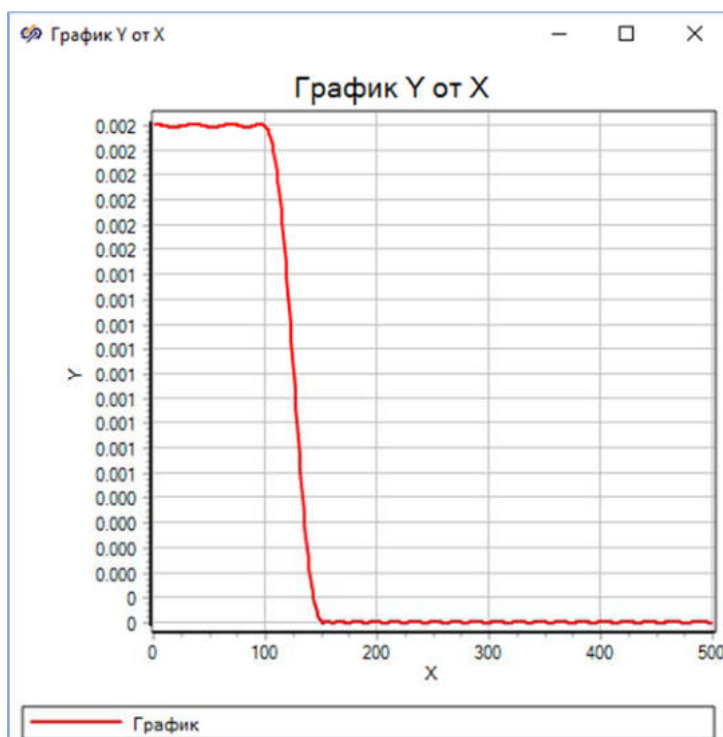


Рис. 25. График АЧХ сигнала.

Необходимо настроить отображение результатов моделирования в блоке **График Y от X**. Для этого необходимо нажать правой кнопкой мыши на окно **График** и выбрать пункт **Свойства**.

В открывшемся окне **Свойства графика** на вкладке **Графики и оси** установить новые значения свойств **"Функция шкалы"** и **"Название оси"** согласно рисунку (Рисунок 26) и на вкладке **Общие** отключить свойство **"Показывать легенду"**.

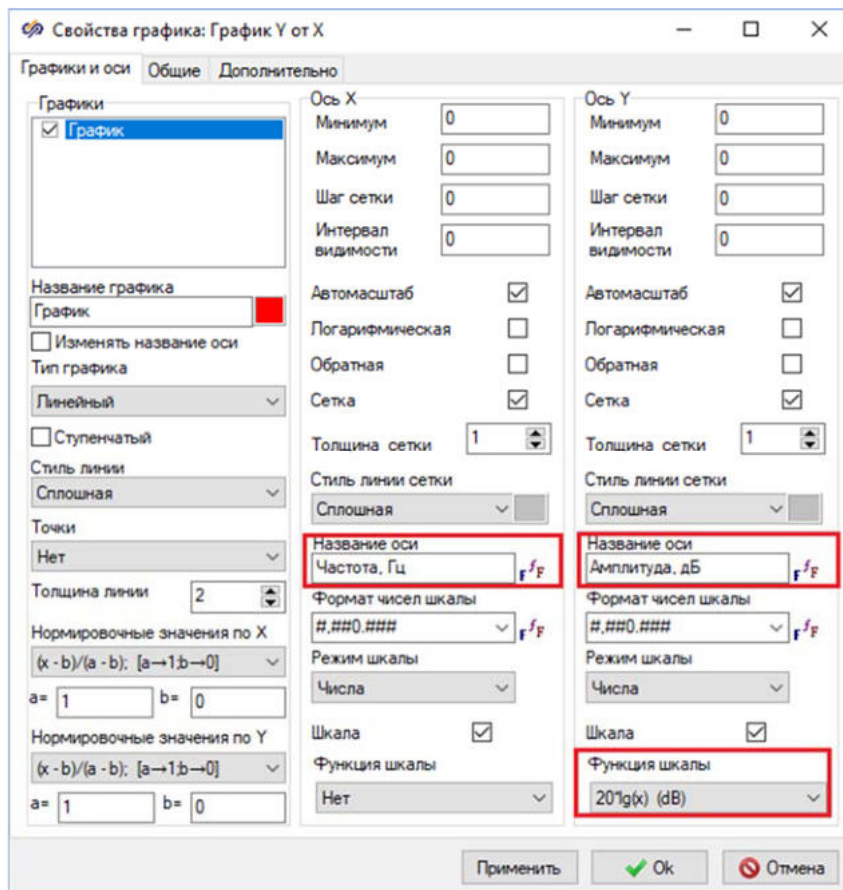


Рис. 26. Окно "Свойства графика" с выделенными свойствами, которые необходимо изменить.

После изменения свойств графика необходимо закрыть окно нажатием на кнопку **Ok**, полученный график АЧХ должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 27).

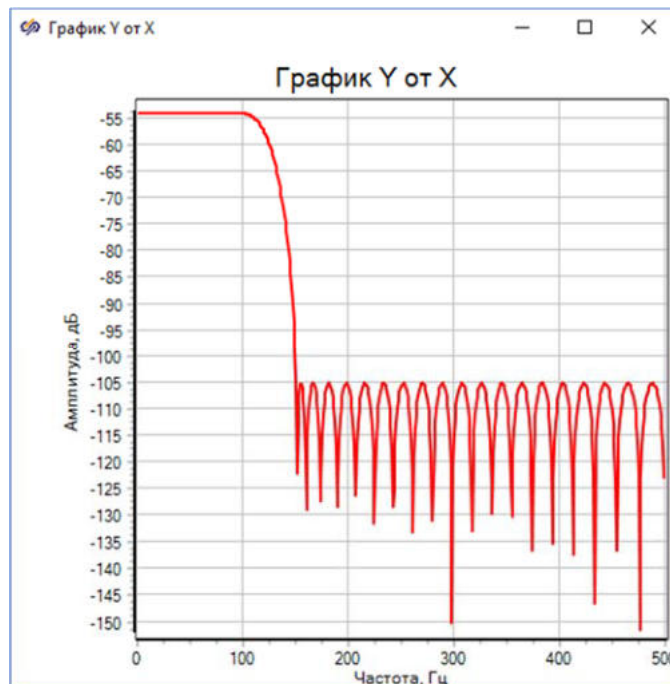


Рис. 27. График АЧХ сигнала.

Построенный график АЧХ полностью совпадает с графиком, построенным инструментом Проектирование и анализ фильтров (Рисунок 28).

Перед тем, как приступить к выполнению следующего задания, необходимо сохранить проект.

Лабораторная работа №4 **Исследование процесса фильтрации сигнала**

Задание:

- создать расчетная схема для анализа работы КИХ-фильтра при фильтрации сигнала, являющегося суммой двух синусоид
- произвести анализ графиков и спектров входного и выходного сигналов фильтра

Создание нового проекта

Необходимо создать новый проект Схема модели общего вида и сохранить проект, указав желаемое имя проекта, либо оставив имя проекта по умолчанию.

Для исследования фильтрации сигнала необходимо поместить в рабочую область окна проекта следующие блоки (Рисунок 28):

- 1 блок КИХ-фильтр из подменю Фильтрация вкладки ЦОС
- 2 блока Синусоида из вкладки Источники. С помощью данных блоков будет формироваться входной сигнал фильтра
- 1 блок Сумматор из вкладки Операторы. С помощью данного блока будет осуществляться суммирование двух синусоид и формироваться входной сигнал фильтра
- 3 блока Временной график из вкладки Вывод данных. С помощью данных блоков будет осуществляться графическое отображение результатов моделирования
- 4 блока График Y от X из вкладки Вывод данных. С помощью данных блоков будет производиться графическое отображение АЧХ фильтра
- 4 блока Спектральная плотность из вкладки Статистика. С помощью данных блоков будет производиться спектральный анализ импульсного сигнала
- 1 блок FIFO/LIFO буфер из вкладки ЦОС. С помощью данного блока будет осуществляться задержка сигнала

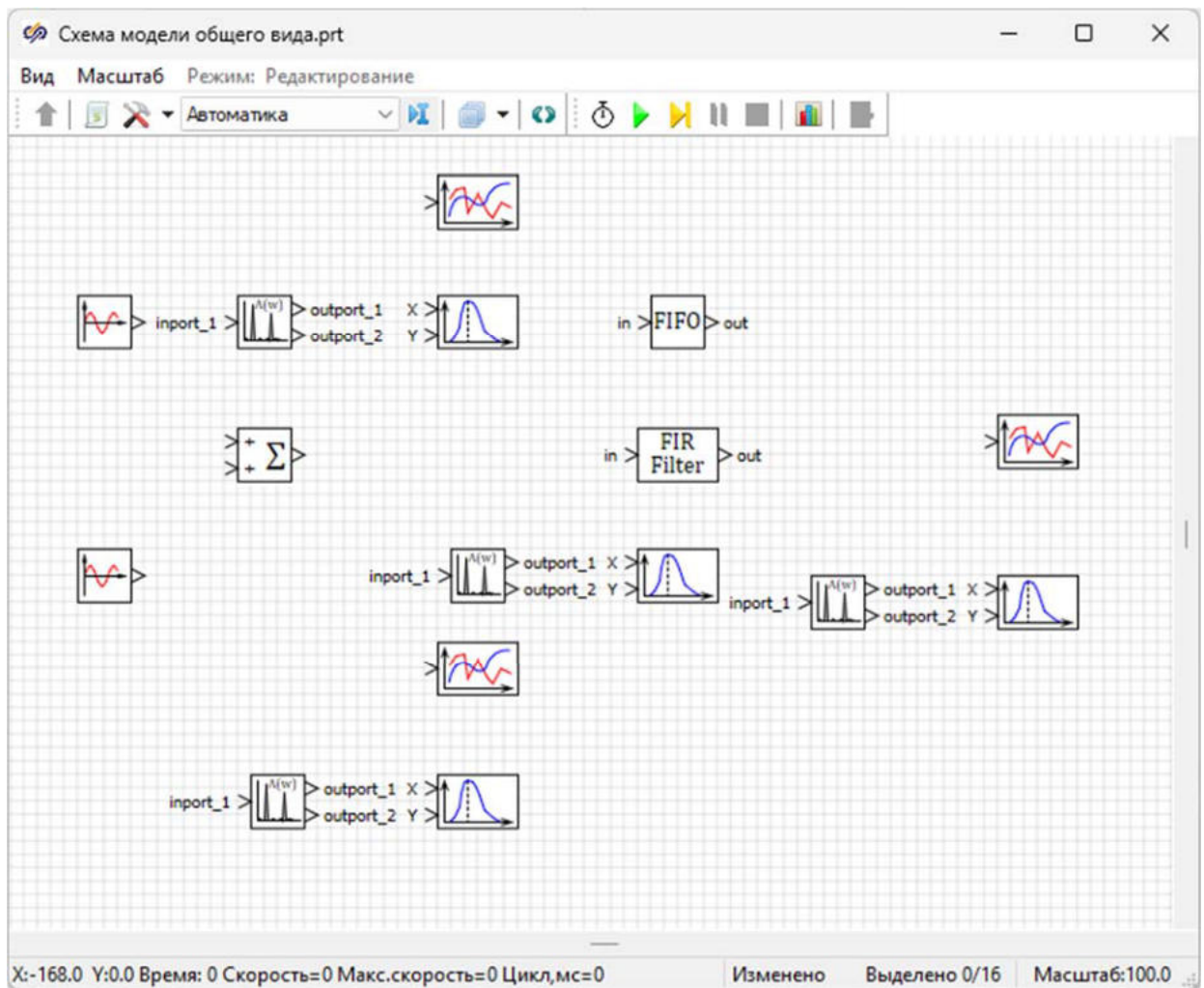


Рис. 28. Рабочая область окна проекта с добавленными блоками.

Задание подписей блоков

Необходимо задать подписи блокам на схеме, для этого:

1. Выделить на схеме верхний блок **Синусоида** одинарным нажатием левой кнопкой мыши по нему (Рисунок 29).

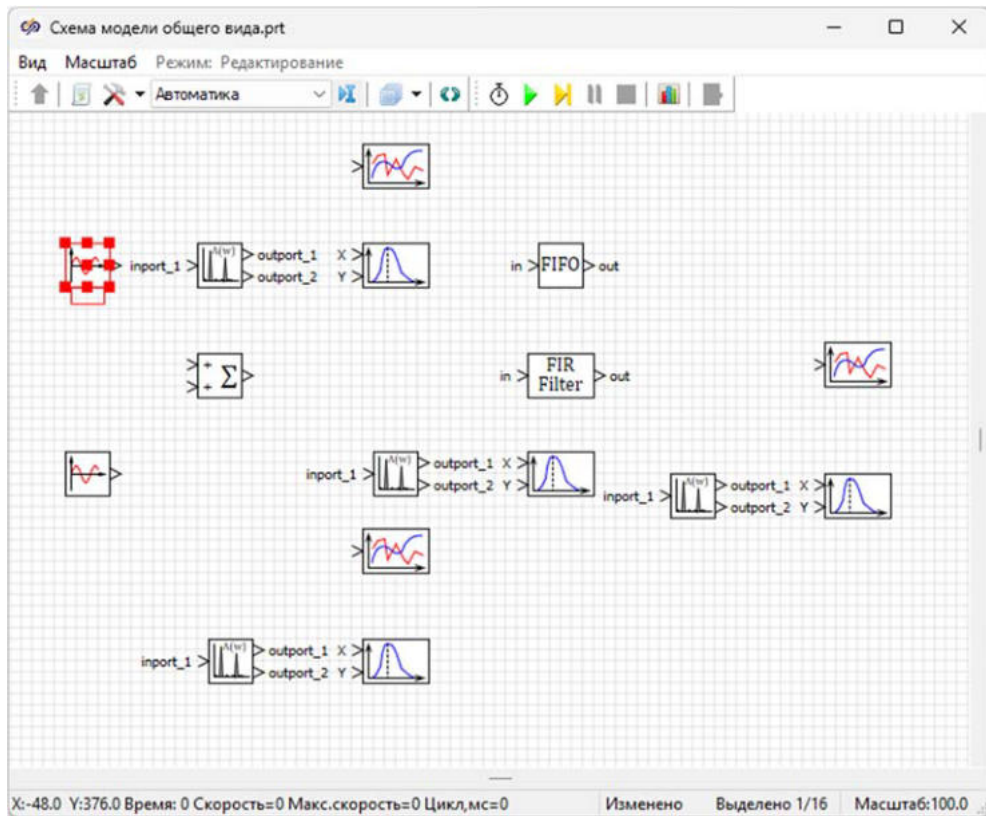


Рис. 29. Окно проекта с выделенным блоком "Синусоида".

2. Открыть область подписи блока двойным нажатием левой кнопкой мыши на прямоугольную область, расположенную под выделенным блоком, и задать подпись "Первый источник" (Рисунок 30).

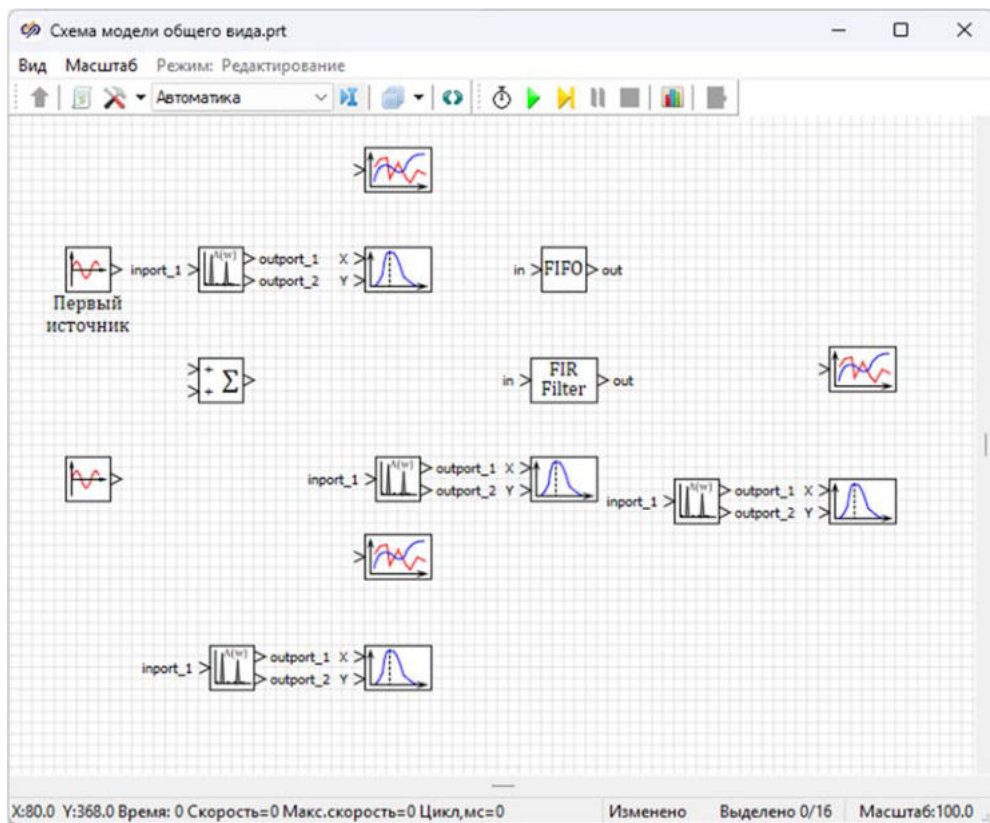


Рис. 30. Окно проекта с заданной подписью блока "Первый источник".

3. Аналогичными действиями необходимо задать подписи остальным блокам согласно рисунку (Рисунок 31).

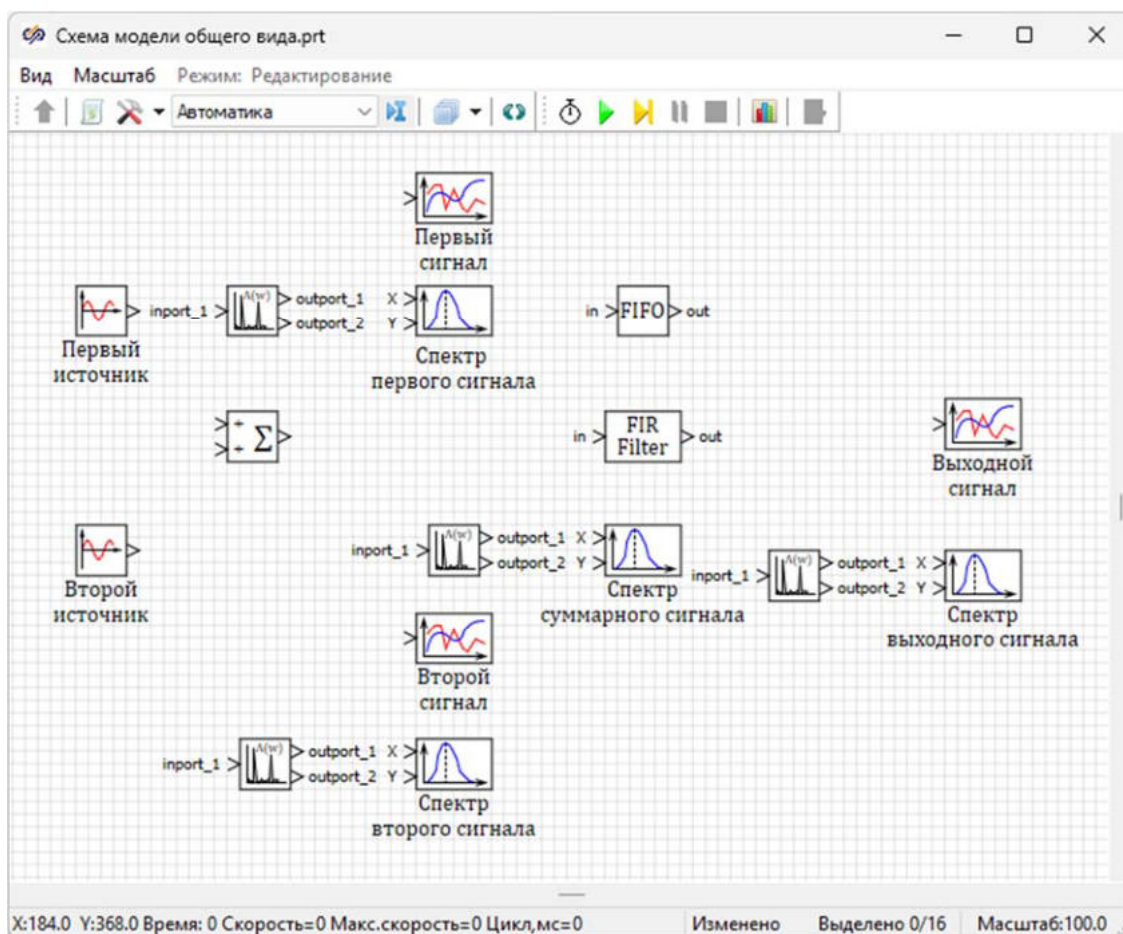


Рис. 31. Окно проекта с заданными подписями блоков.

Перед тем как приступить к выполнению следующего пункта данного задания, необходимо сохранить проект.

Задание свойств блоков

Для блока Синусоида с подписью "Первый источник" требуется задать новые значения свойств согласно рисунку (Рисунок 32).

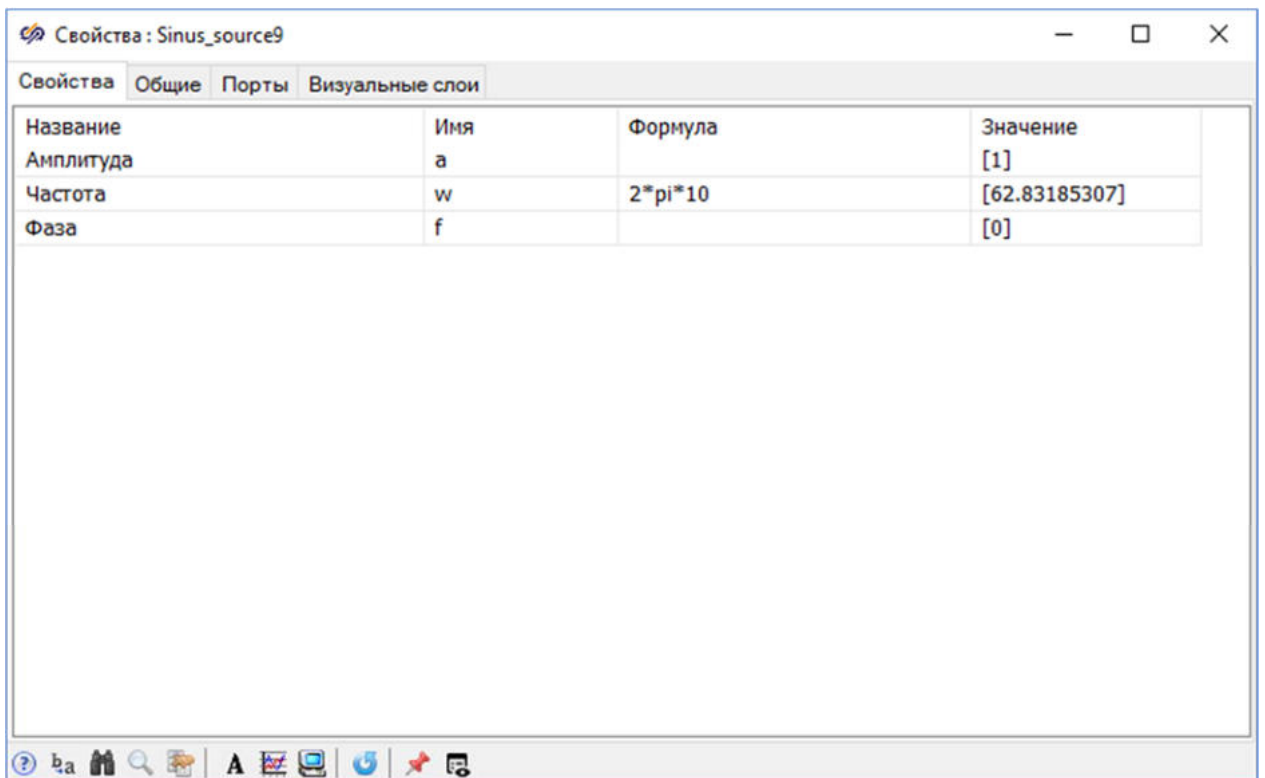


Рис. 32. Окно "Свойства" для блока "Синусоида" с подписью "Первый источник".

Для блока Синусоида с подписью "Второй источник" требуется задать новые значения свойств согласно рисунку (Рисунок 33).

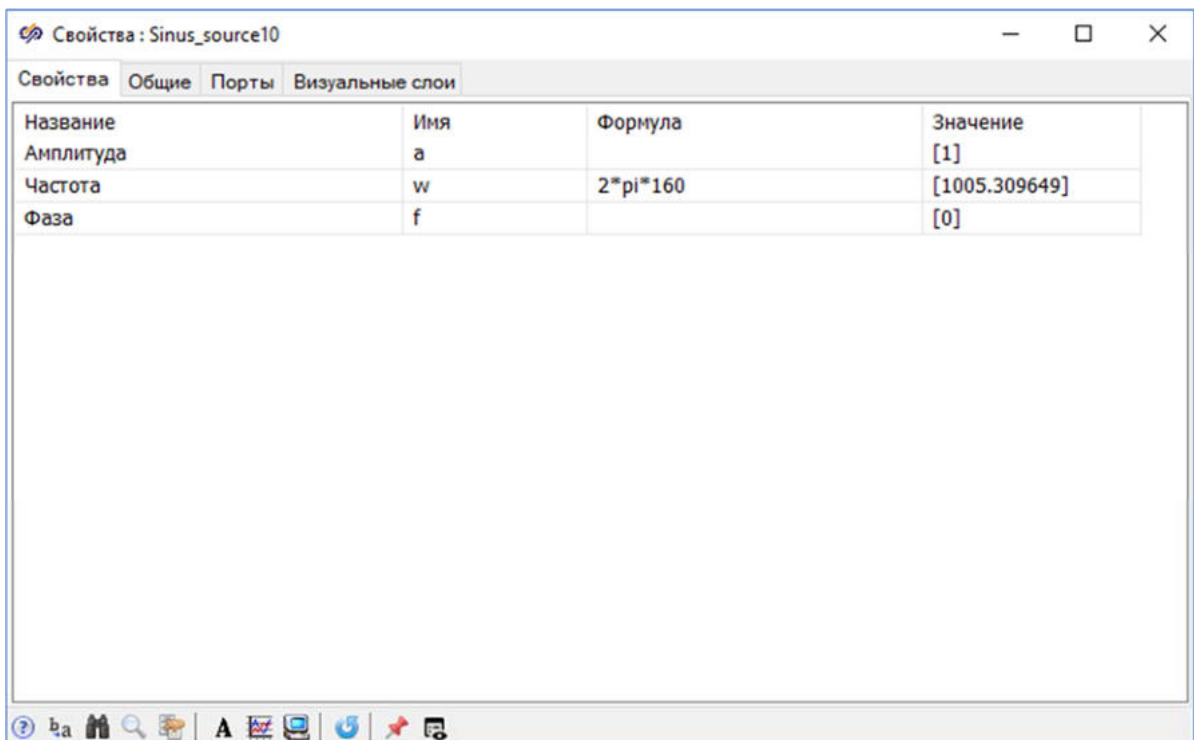


Рис. 33. Окно "Свойства" для блока "Синусоида" с подписью "Второй источник".

Результатом суммирования сигналов двух блоков **Синусоида** является периодический сигнал с двумя гармониками частотой 10 и 160 Гц. Первая гармоника попадает в полосу пропускания фильтра, вторая – в его полосу подавления.

Блоки **Спектральная плотность** будут осуществлять спектральный анализ импульсной характеристики.

Для блоков **Спектральная плотность** следует задать значения свойств согласно рисунку (Рисунок 34):

- **"Период квантования" - "0.001"**
- **"Размер серии" - "1000"**

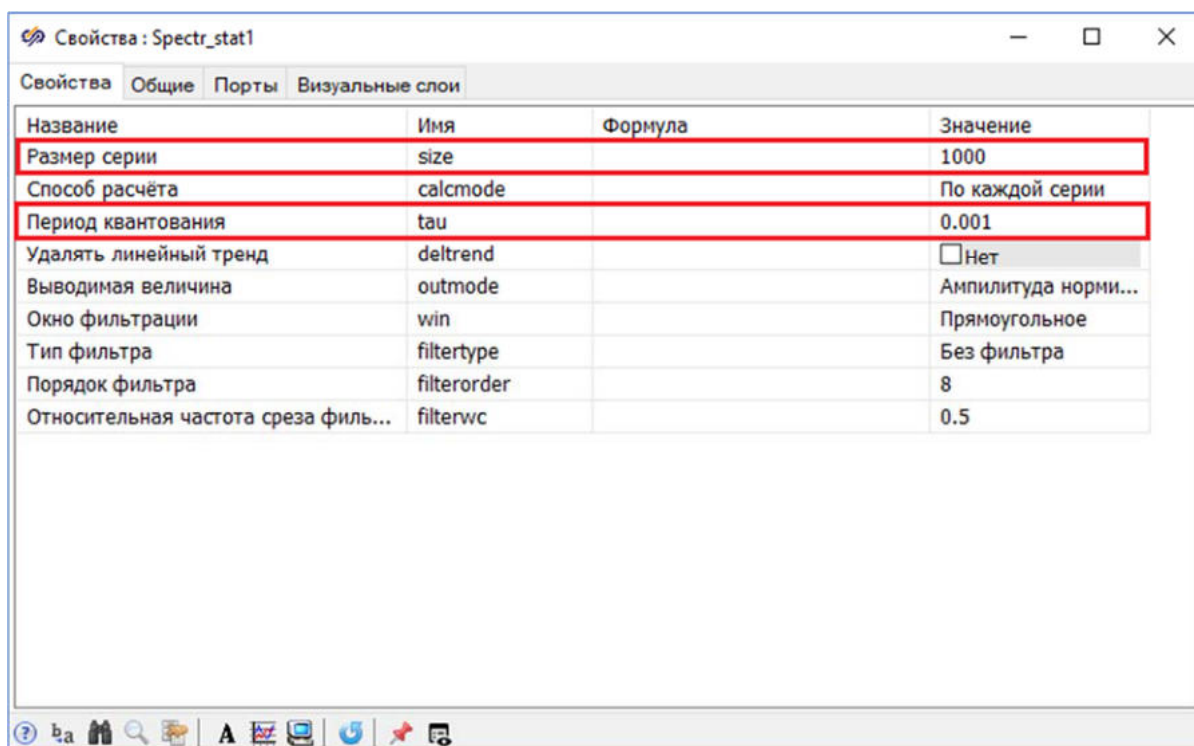


Рис. 34. Окно "Свойства" блока "Спектральная плотность".

Для блока **FIFO/LIFO буфер**, который будет осуществлять запаздывание сигнала, следует задать значения свойств согласно рисунку (Рисунок 34).

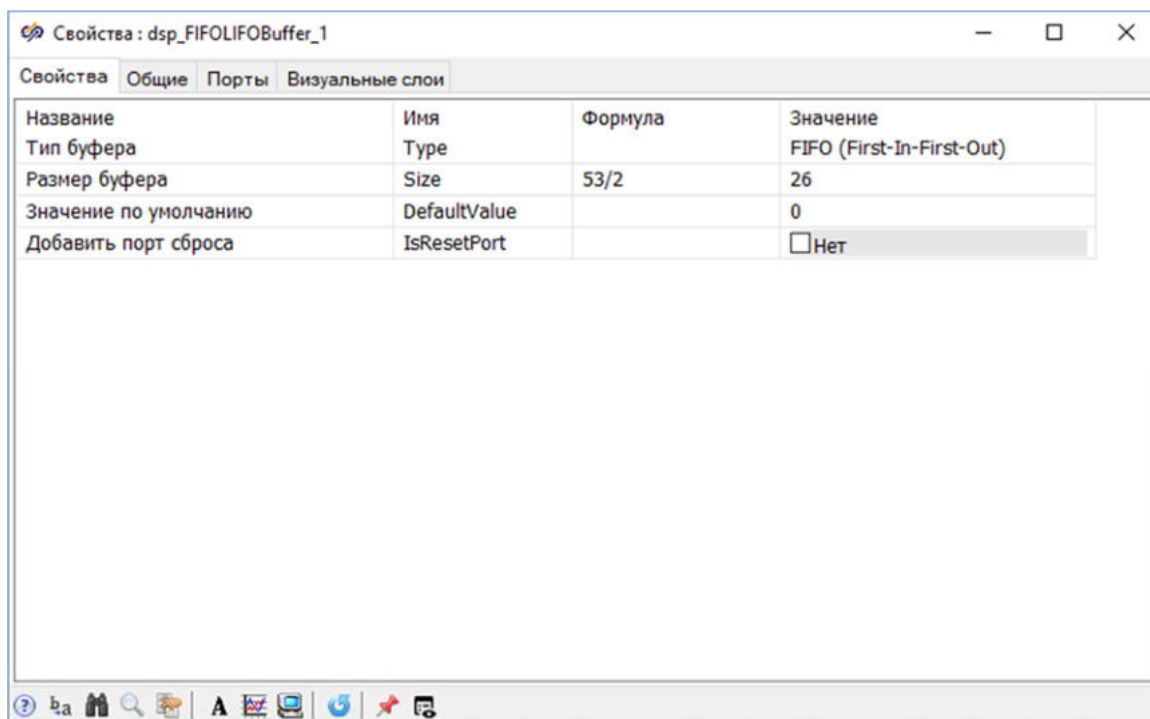


Рис. 35. Окно "Свойства" блока "FIFO/LIFO буфер".

Для отображения нескольких сигналов на одном графике необходимо увеличить количество входных портов блока **Временной график**. Для этого следует открыть окно **Свойства** блока **Временной график** и в поле **"Значение"** задать значение свойства **"Количество входных портов"** равным **"2"**.

Необходимо соединить блоки линиями связи между собой согласно рисунку (Рисунок 36).

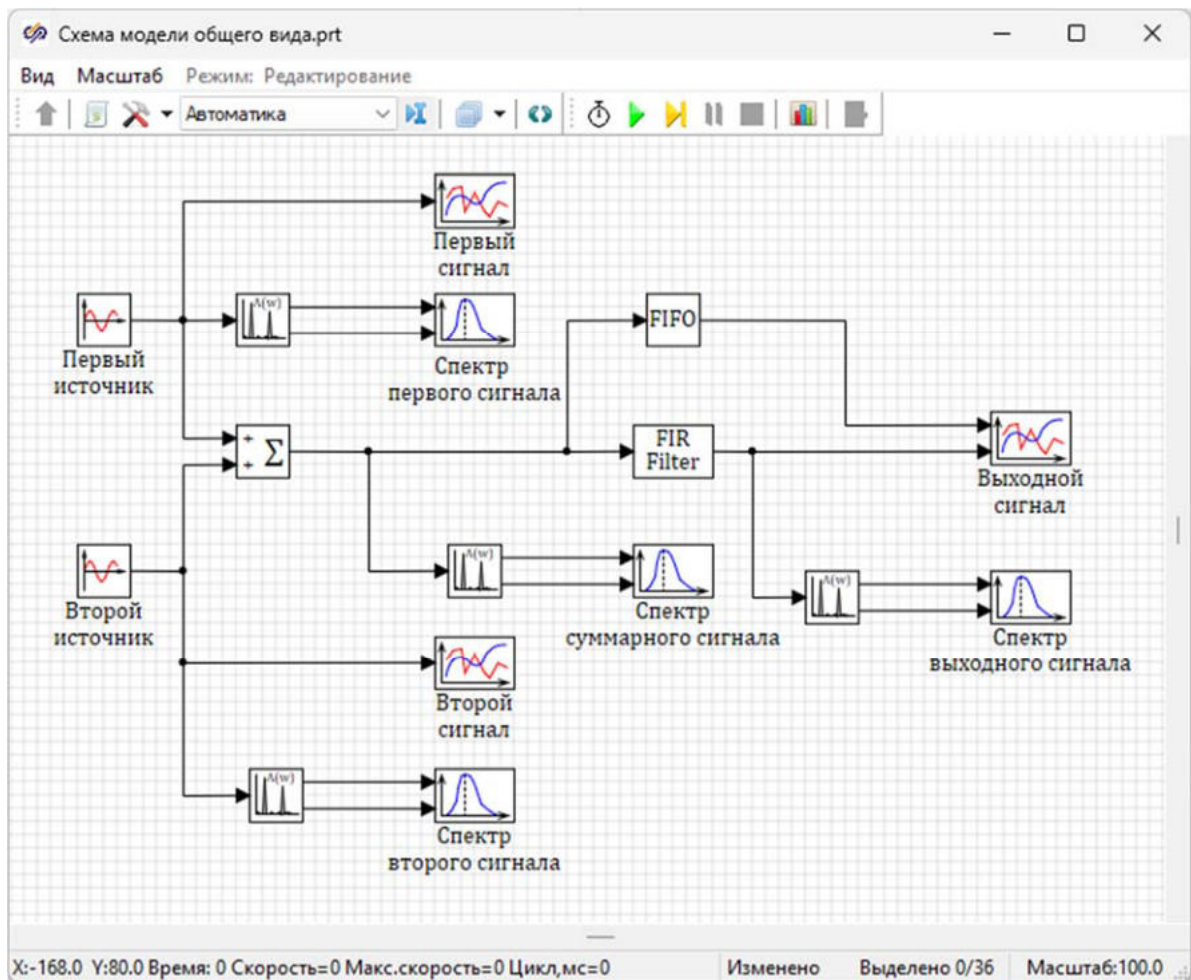


Рис. 36. Окно проекта с соединенными блоками.

Перед тем, как приступить к выполнению следующего пункта данного задания, необходимо сохранить проект.

Запуск моделирования и построение графиков

Перед запуском проекта на моделирование необходимо изменить Параметры расчёта для корректного отображения графиков сигнала. Для этого в окне **Параметры расчёта** установить значение свойства **"Конечное время расчёта"** равным **"2"** (Рисунок 37).

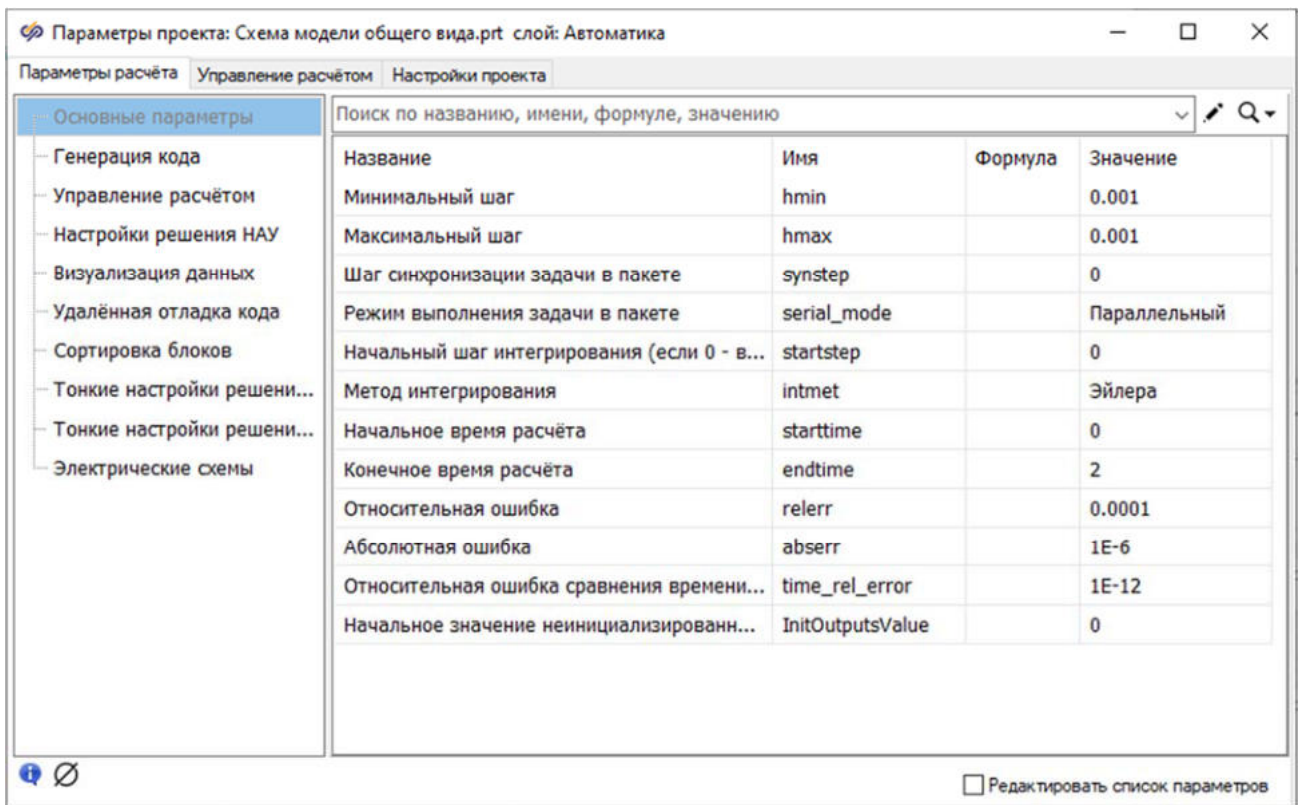


Рис. 37. Окно "Параметры проекта" вкладка "Параметры расчёта".

Запустить проект на моделирование и дождаться окончания расчета.

Открыть окно **График** для блока **График Y от X** с подписью **"Спектр первого сигнала"**. График должен выглядеть согласно рисунку ([Рисунок 38](#)).

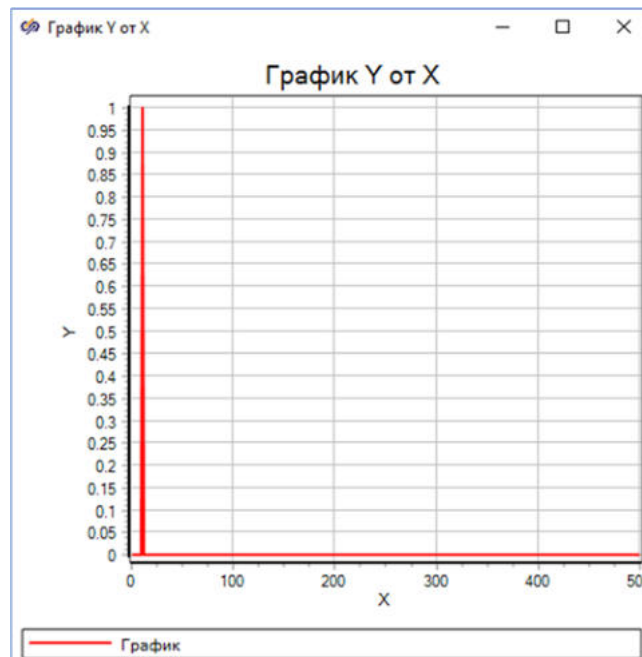


Рис. 38. Окно "График" с подписью "Спектр первого сигнала".

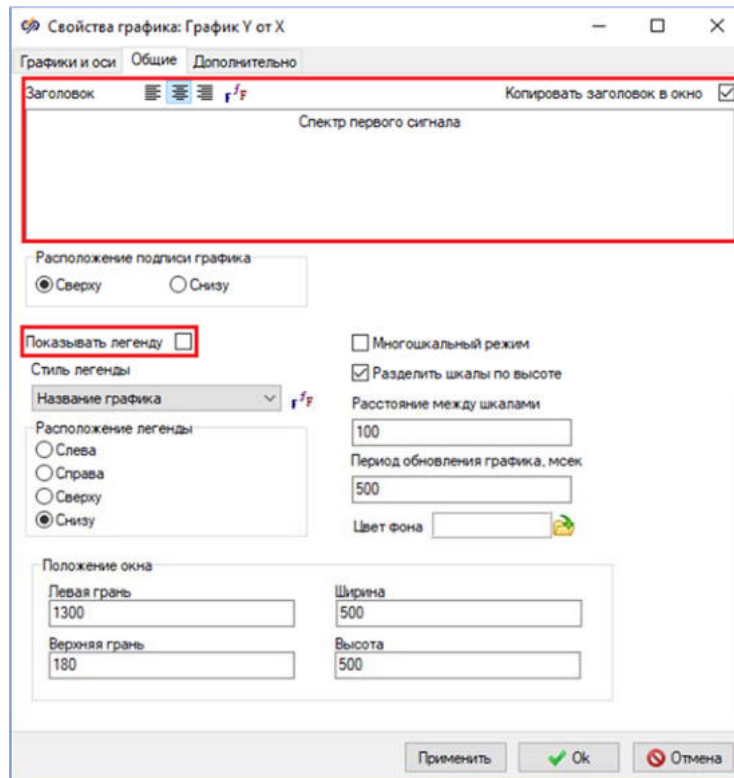


Рис. 40. Окно "Свойства графика" на вкладке "Общие" с выделенными свойствами, которые необходимо изменить.

После изменения свойств графика необходимо закрыть окно нажатием на кнопку **Ok**, полученный график "Спектр первого сигнала" должен соответствовать рисунку (Рисунок 41).



Рис. 41. Окно "График" с подписью "Спектр первого сигнала".

Открыть окно **График** для блока **График Y от X** с подписью **"Спектр второго сигнала"**. Изменить параметры отображения аналогично графику из окна **График** блока **График Y от X** с подписью **"Спектр первого сигнала"** (Рисунок 41). После изменения свойств **"Функция шкалы"**, **"Название оси"**, **"Показывать легенду"** и названия графика в поле **"Заголовок"** спектр второго сигнала должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 42).



Рис. 42. Окно "График" с подписью "Спектр второго сигнала".

Открыть окно **График** для блока **График Y от X** с подписью **"Спектр суммарного сигнала"**. Изменить параметры отображения аналогично графику из окна **График** блока **График Y от X** с подписью **"Спектр первого сигнала"** (Рисунок 451). После изменения свойств **"Функция шкалы"**, **"Название оси"**, **"Показывать легенду"** и названия графика в поле **"Заголовок"** спектр суммарного сигнала должен выглядеть согласно рисунку (Рисунок 43).

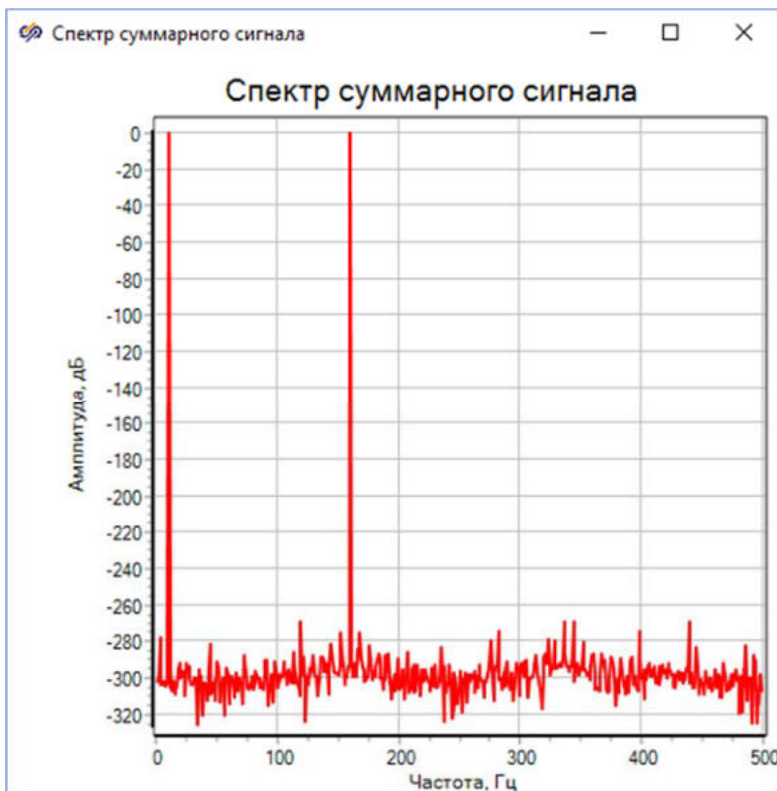


Рис. 43. Окно "График" с подписью "Спектр суммарного сигнала".

На графике спектра суммарного сигнала видно, что сигнал на входе фильтра имеет две гармоники с частотами 10 и 160 Гц, поскольку он является суммой двух синусоид с соответствующими частотами.

Открыть окно **График** для блока **График Y от X** с подписью **"Спектр выходного сигнала"**. Изменить параметры отображения аналогично графику из окна **График** блока **График Y от X** с подписью **"Спектр первого сигнала"** ([Рисунок 45](#)). После изменения свойств **"Функция шкалы"**, **"Название оси"**, **"Показывать легенду"** и названия графика в поле **"Заголовок"** спектр выходного сигнала должен выглядеть согласно рисунку ([Рисунок 44](#)).



Рис. 44. Окно "График" с подписью "Спектр выходного сигнала".

Открыть окно График для блока Временной график с подписью "Выходной сигнал". Временной график второго сигнала должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 495).

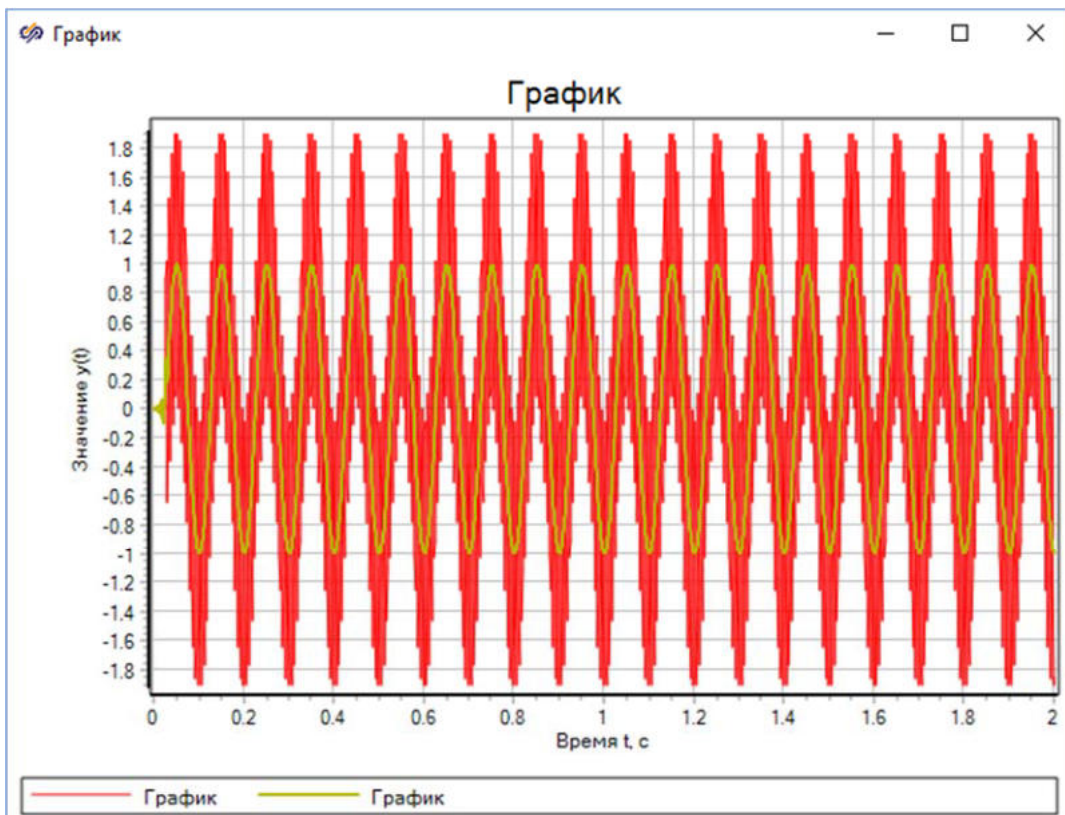


Рис. 45. Окно блока "Временной график" с подписью "Выходной сигнал".

Для отображения нескольких сигналов на разных шкалах одного окна необходимо открыть контекстное меню окна **График** и активировать **Многошкальный режим** (Рисунок 46).

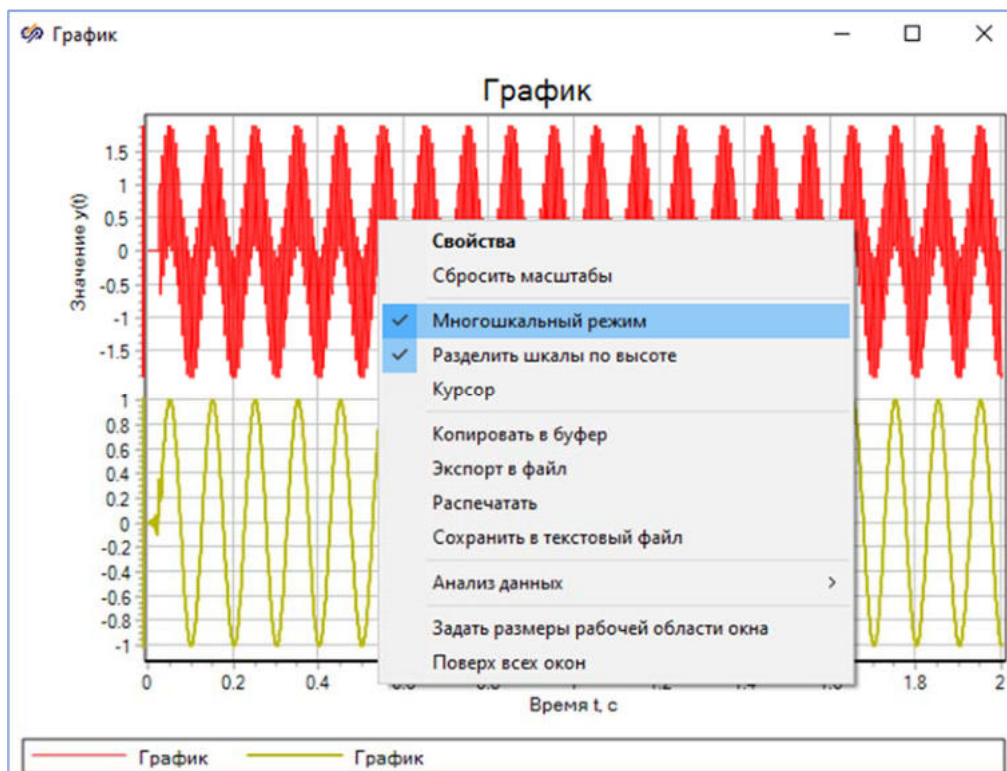


Рис. 46. Окно блока "Временной график" с контекстным меню и активированным многошкальным режимом.

Далее следует настроить отображение результатов моделирования в блоке **Временной график** с подписью "**Выходной сигнал**". Для этого открыть окно **Свойства графика** и задать свойства согласно рисункам (Рисунок 47, Рисунок 48).

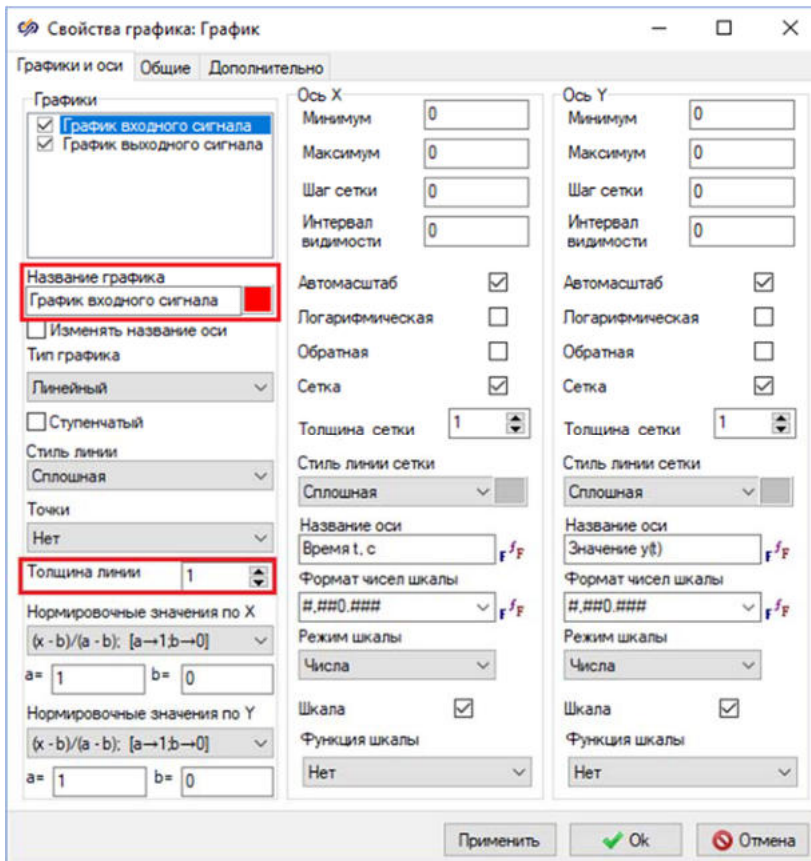


Рис. 47. Окно "Свойства графика" с выделенными свойствами, которые необходимо изменить.

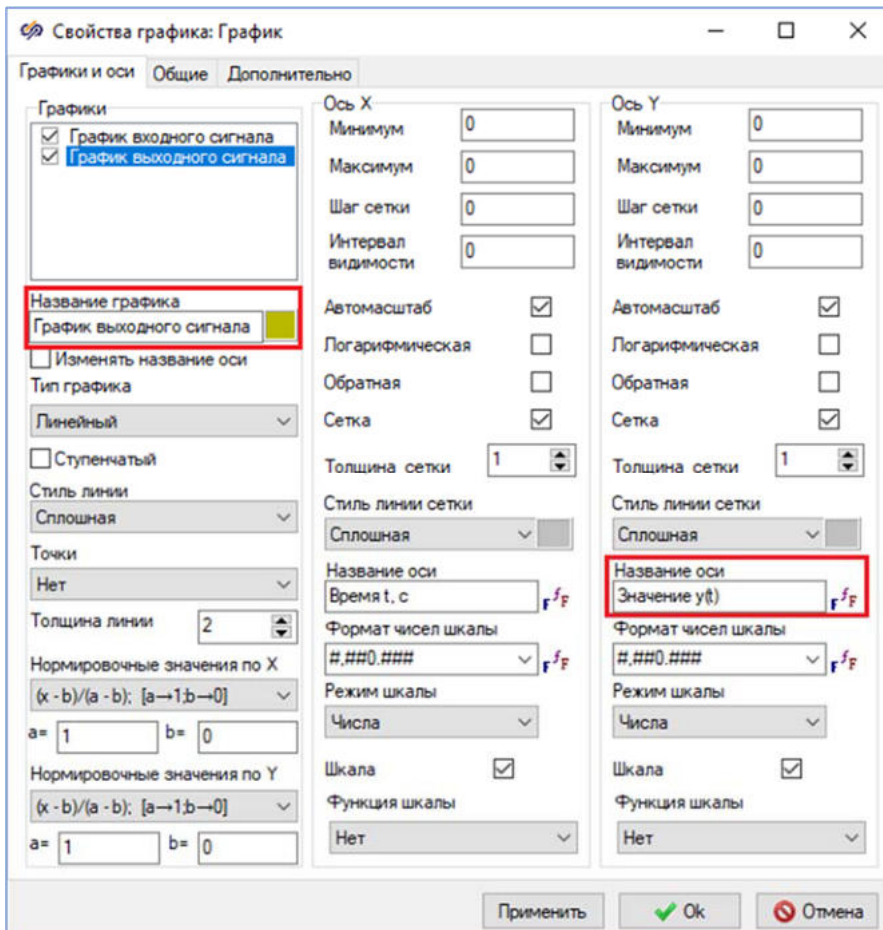


Рис. 48 . Окно "Свойства графика" с выделенными свойствами для второго графика, которые необходимо изменить.

После изменения свойств графика необходимо закрыть окно нажатием на кнопку **Ок**, полученный график должен выглядеть согласно рисунку (Рисунок 49).

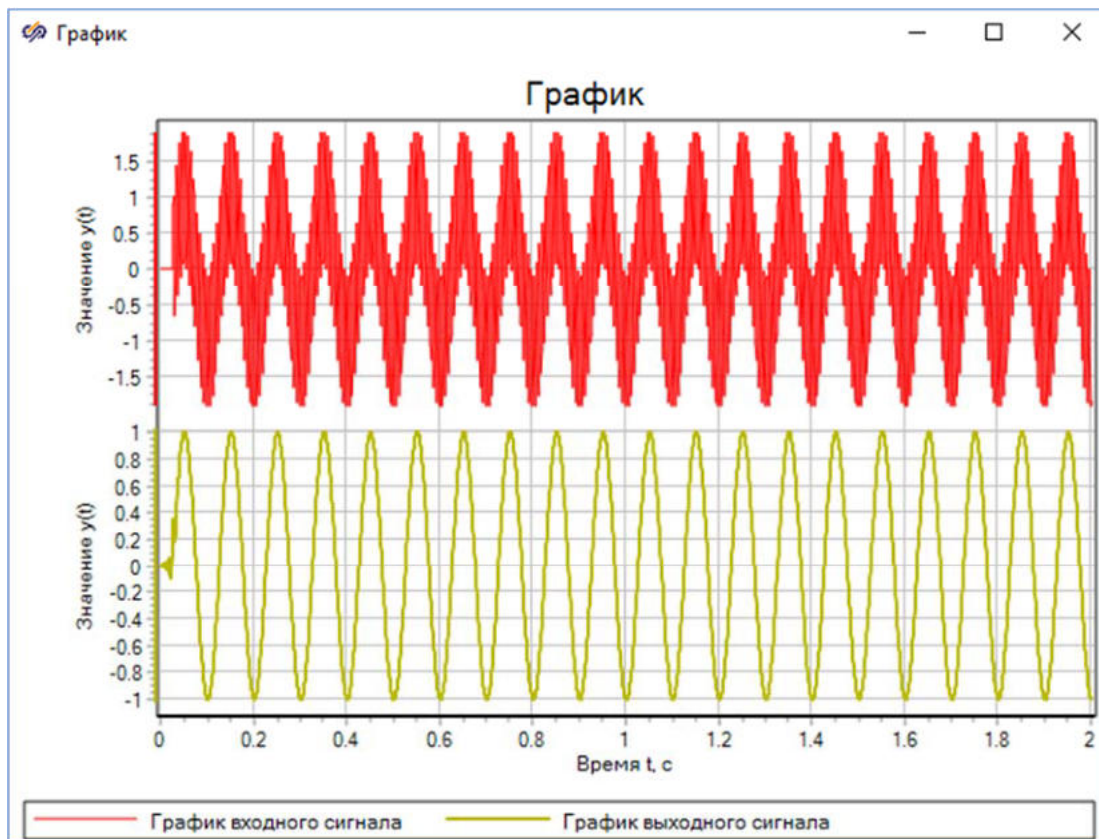


Рис. 49. Окно блока "Временной график" в многошкальном режиме.

График и спектр сигнала показывают, что сигнал на выходе фильтра имеет только одну ярко выраженную гармонику с частотой 10 Гц, поскольку фильтр подавил составляющую сигнала с частотой 160 Гц.

Самостоятельная работа

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Согласно номеру варианта необходимо повторить проектирование равноволнового фильтра и полосового или режекторного фильтров с частотой дискретизации, частотой среза полосы пропускания и пульсациями в полосе пропускания, заданными в таблице (Таблица 1)
2. Для каждого фильтра провести исследование процесса фильтрации сигнала, представляющего собой сумму двух гармоник. Рассмотреть два случая:

- 1-я и 2-я гармоники одновременно попадают в полосу пропускания фильтра
- 1-я гармоника попадает в полосу пропускания, а 2-я гармоника лежит в зоне непрозрачности фильтра

Табл. 1. Исходные данные						
№ варианта	Тип ЦФ	f_д, Гц	f_{зн}, Гц	f_{пн}, Гц	Уровень подавления, дБ	Уровень пропускания, дБ
1	НЧ	1000	150	100	70	0,5
	П	2000	150±100	150±50	40	0,5
2	ВЧ	1000	100	150	70	0,5
	Р	2000	150±100	150±100	40	0,5
3	НЧ	1000	100	50	60	0,5
	П	2000	250±150	250±50	80	0,5
4	ВЧ	1000	50	100	60	0,5
	Р	2000	250±50	250±150	80	0,5
5	НЧ	1000	150	50	90	0,5
	П	2000	175±125	175±25	70	0,5
6	ВЧ	1000	50	150	90	0,5
	Р	2000	175±25	175±125	70	0,5
7	НЧ	1000	75	25	80	0,5
	П	2000	200±125	200±50	60	0,5
8	ВЧ	1000	25	75	80	0,5
	Р	2000	200±50	200±125	60	0,5
9	НЧ	1000	50	25	40	0,5
	П	2000	250±225	250±150	60	0,5
10	ВЧ	1000	25	50	40	0,5

Табл. 1. Исходные данные						
№ варианта	Тип ЦФ	f_d , Гц	f_{zn} , Гц	$f_{пп}$, Гц	Уровень подавления, дБ	Уровень пропускания, дБ
	Р	2000	250±150	250±225	60	0,5
11	НЧ	1000	250	200	60	0,5
	П	2000	300±200	300±100	80	0,5
12	ВЧ	1000	200	250	60	0,5
	Р	2000	300±100	300±200	80	0,5

Контрольные вопросы

1. Как рассчитать импульсную характеристику фильтра в SimInTech?
2. Как рассчитать АЧХ фильтра в SimInTech?
3. Каким образом возможно построить временной график сигнала в SimInTech?
4. Каким образом возможно построить график спектра сигнала в SimInTech?

Лабораторная работа №4 Проектирование цифровых фильтров

Цель работы

- **Приобрести** первичные навыки работы по проектированию цифровых фильтров в SimInTech

Задачи работы

- **Ознакомиться** с основными типами и характеристиками цифровых фильтров
- **Освоить** основные приемы работы для проектирования цифровых фильтров частотной селекции
- **Освоить** основные приемы работы для построения частотных характеристик цифровых фильтров
- **Исследовать** процесс обработки сигналов цифровым фильтром

Задание 1. Построение АЧХ фильтров

- разработать модель цифрового фильтра при помощи блоков общетехнической группы библиотек Автоматика и блоков библиотеки Цифровая обработка сигналов
- показать расчет фильтров с помощью инструмента Проектирование и анализ фильтров
- построить графики АЧХ фильтров

Создание нового проекта

Для создания нового проекта необходимо:

1. В главном окне SimInTech нажать кнопку Файл и выбрать пункт Новый проект
2. В выпадающем меню выбрать пункт Схема модели общего вида
3. Сохранить проект с названием по умолчанию или указать желаемое имя проекта

Разработка модели для проектирования БИХ- и КИХ-фильтров

Необходимо добавить на схему и разместить, согласно рисунку (Рисунок 1), следующие блоки:

- 2 блока Цифровой фильтр из подменю Фильтрация вкладки ЦОС
- 1 блок Ступенька из вкладки Источники. С помощью данного блока будет формироваться входной сигнал фильтра
- 2 блока Временной график из вкладки Вывод данных. С помощью данных блоков будет осуществляться графическое отображение результатов моделирования
- 2 блока График Y от X из вкладки Вывод данных. С помощью данных блоков будет производиться графическое отображение АЧХ фильтра
- 2 блока Спектральная плотность из вкладки Статистика. С помощью данных блоков будет производиться спектральный анализ импульсного сигнала.

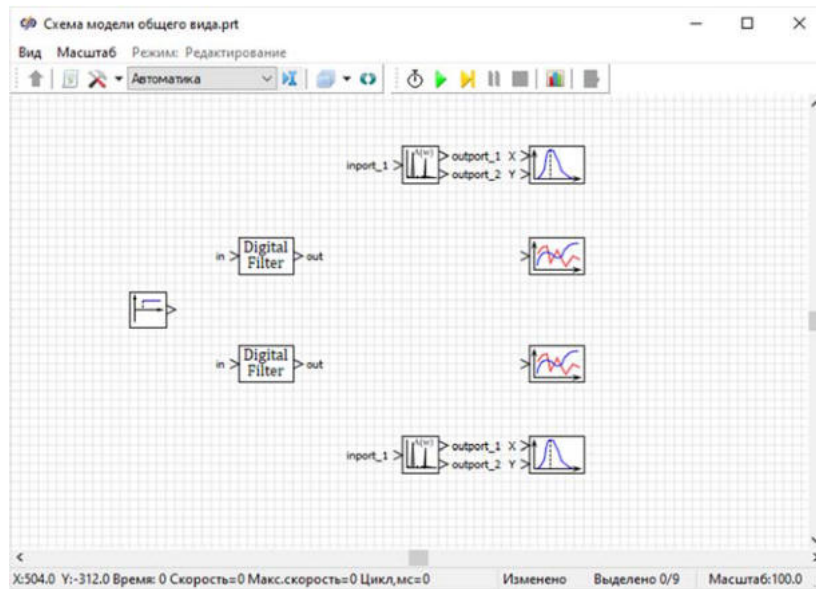


Рис. 1. Окно проекта с добавленными блоками.

Необходимо соединить блоки линиями связи между собой согласно рисунку (Рисунок 2).

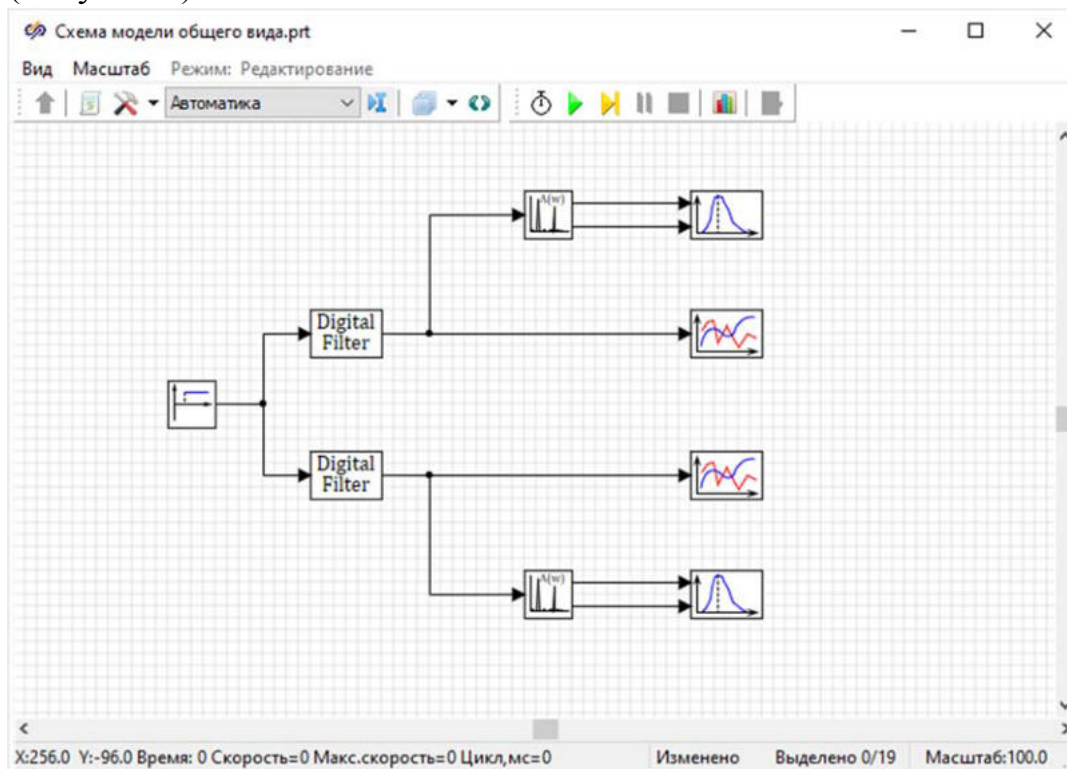


Рис. 2. Окно проекта с соединенными блоками.

Необходимо задать подписи блокам на схеме согласно рисунку (Рисунок 3).

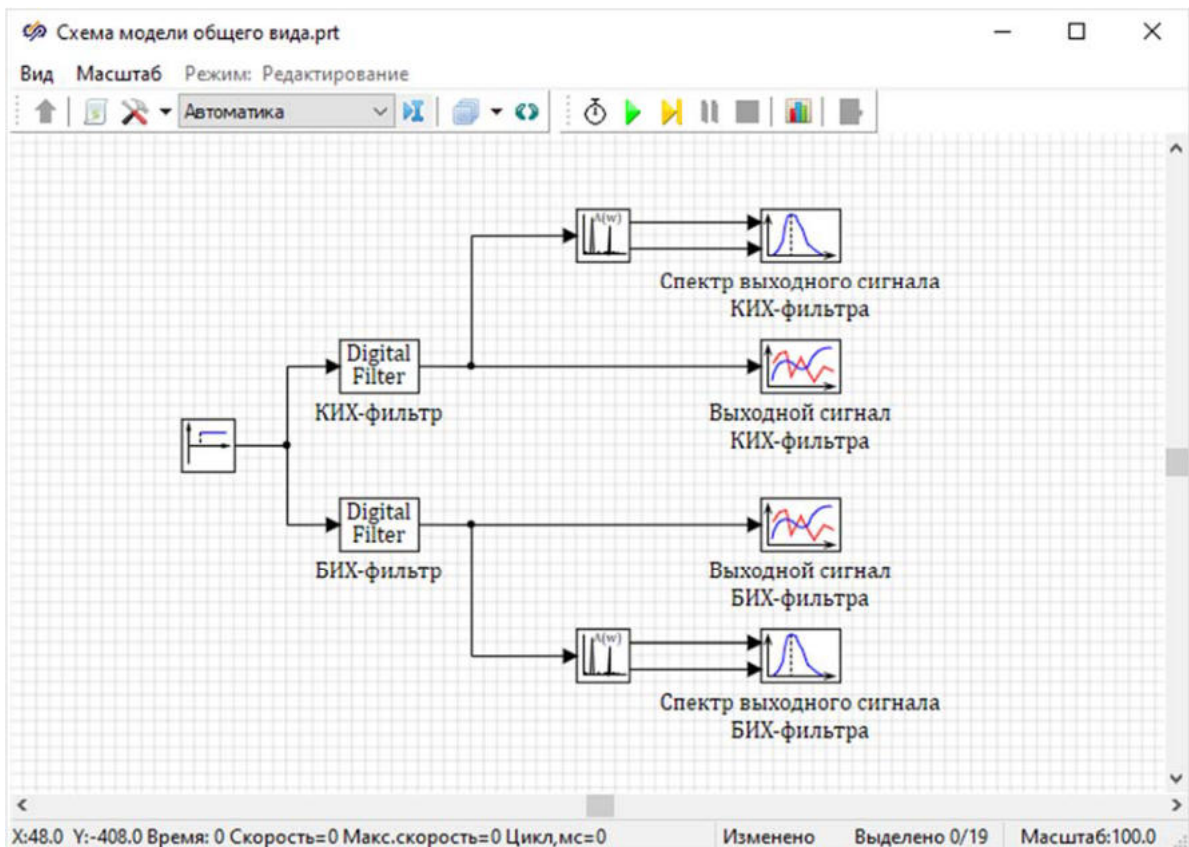


Рис. 3. Окно проекта с заданными подписями блоков.

В данной работе будут рассматриваться модели низкочастотного (НЧ) фильтра Чебышёва 1-го рода 8-го порядка и равноволнового НЧ-фильтра 53-го порядка. Необходимо задать свойства каждому из блоков, для этого:

1. Двойным нажатием левой кнопкой мыши по блоку Цифровой фильтр с подписью КИХ-фильтр открыть окно Проектирование и анализ фильтров, которое служит для расчетов фильтров и задания их параметров (Рисунок 4).

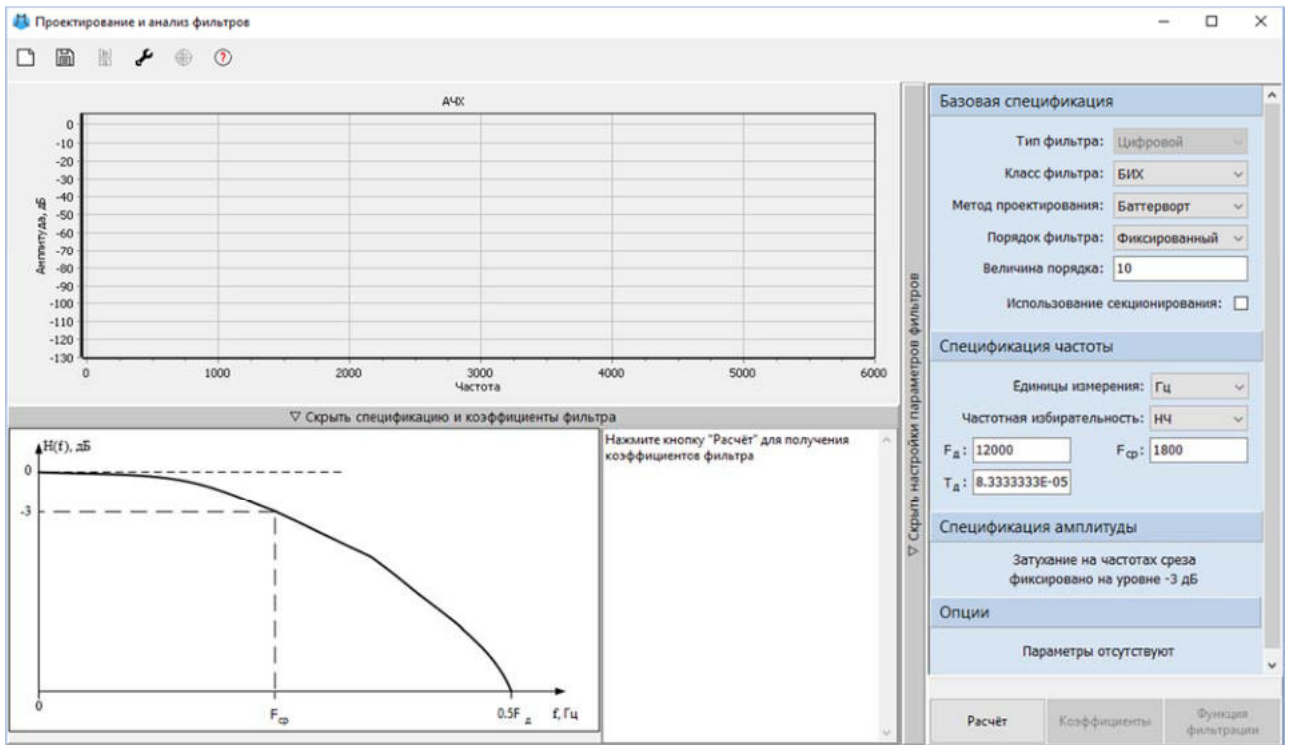


Рис. 4. Окно "Проектирование и анализ фильтров" блока "Цифровой фильтр" с подписью "КИХ-фильтр" с значениями по умолчанию.

2. Необходимо рассчитать равноволновый НЧ-фильтр 53-го порядка с частотой дискретизации $F_d = 1000$ Гц, частотой среза $F_{\text{проп}} = 100$ Гц и частотой подавления $F_{\text{подавл}} = 150$ Гц. Для этого требуется задать параметры фильтра согласно рисунку и нажать на кнопку **Расчёт** (Рисунок 5).

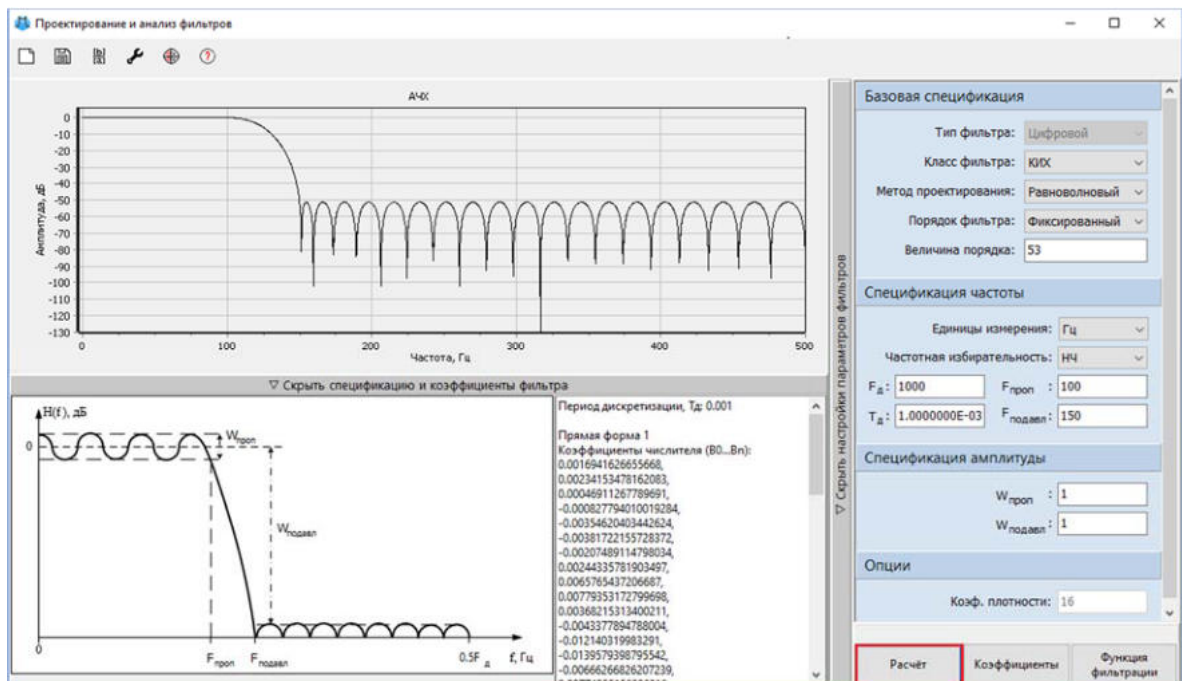


Рис. 5. Окно "Проектирование и анализ фильтров" блока "Цифровой фильтр" с подписью "КИХ-фильтр" с заданными значениями свойств для равноволнового КИХ-фильтра.

3. После окончания расчета блока Цифровой фильтр с подписью КИХ-фильтр необходимо закрыть окно Проектирование и анализ фильтров

Аналогичными действиями требуется задать значения блоку Цифровой фильтр с подписью БИХ-фильтр и рассчитать НЧ-фильтр Чебышёва 1-го рода 8-го порядка с частотой дискретизации $F_d = 1000$ Гц и частотой среза $F_{\text{среза}} = 100$ Гц. Для этого необходимо задать параметры фильтра согласно рисунку и нажать на кнопку Расчёт (Рисунок 6).

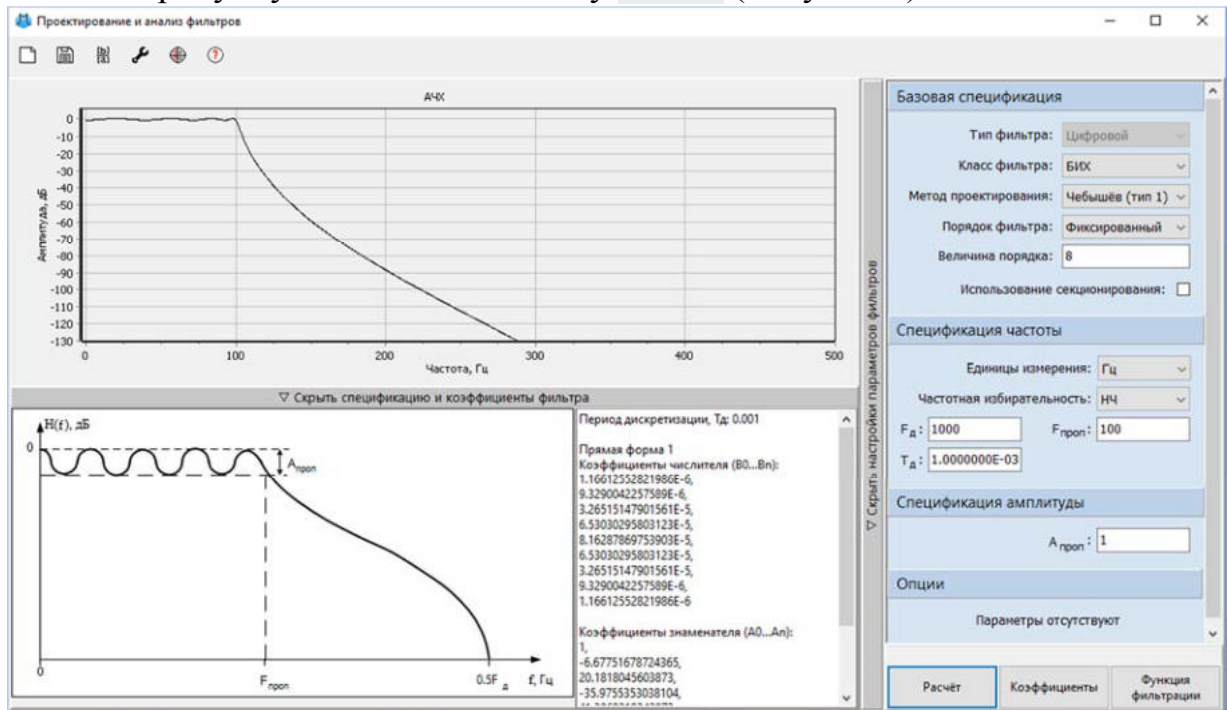


Рис. 6. Окно "Проектирование и анализ фильтров" блока "Цифровой фильтр" с подписью "БИХ-фильтр" с заданными значениями свойств для БИХ-фильтра Чебышева 1-го рода.

Блок Ступенька будет формировать импульс с амплитудой "1" и длительностью "0.001" секунды. Длительность импульса равна периоду дискретизации фильтра. Такой сигнал необходим для снятия импульсной характеристики фильтра. После проведения ее спектрального анализа будет построен график АЧХ фильтра.

Для блока Ступенька задать значения свойств согласно рисунку (Рисунок 7).

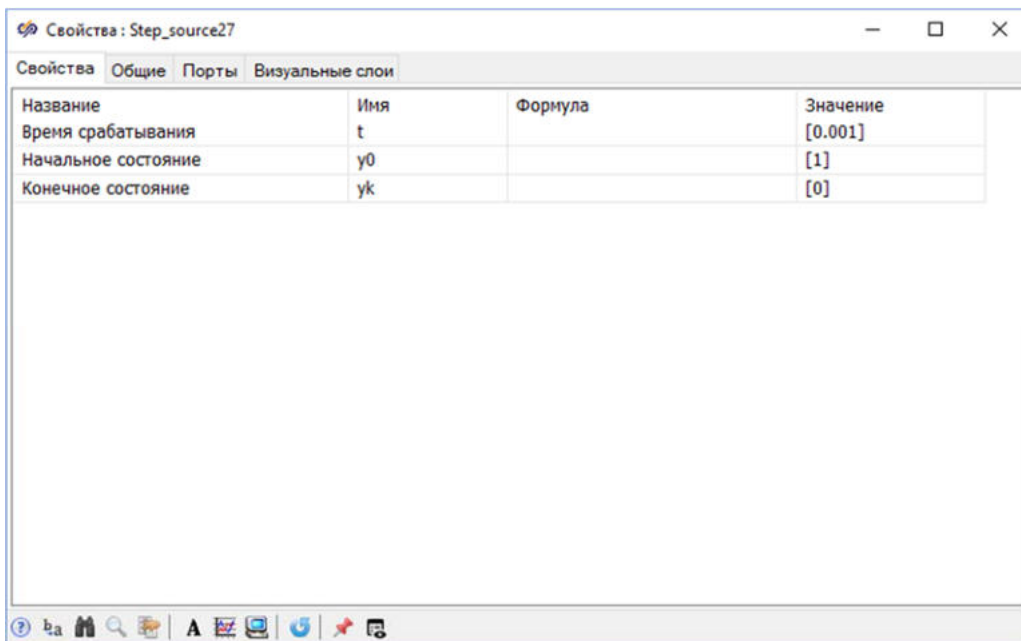


Рис. 7. Окно "Свойства" блока "Ступенька".

Блоки **Спектральная плотность** будут осуществлять спектральный анализ импульсной характеристики. Необходимо задать значения свойств блокам **Спектральная плотность** согласно рисунку (Рисунок 8).

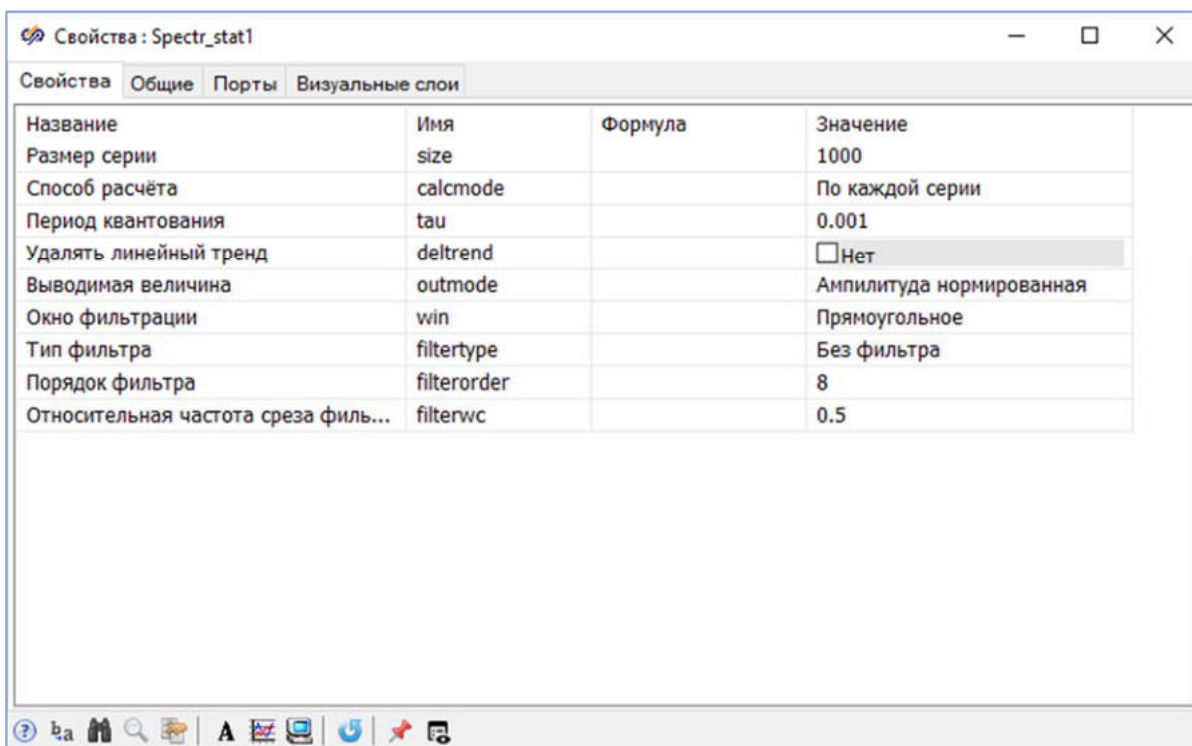


Рис. 8. Окно "Свойства" блока "Спектральная плотность".

Перед запуском проекта на моделирование необходимо настроить Параметры расчёта проекта. Для этого в окне проекта на панели кнопок нажать на кнопку **Параметры расчёта** (Рисунок 9).

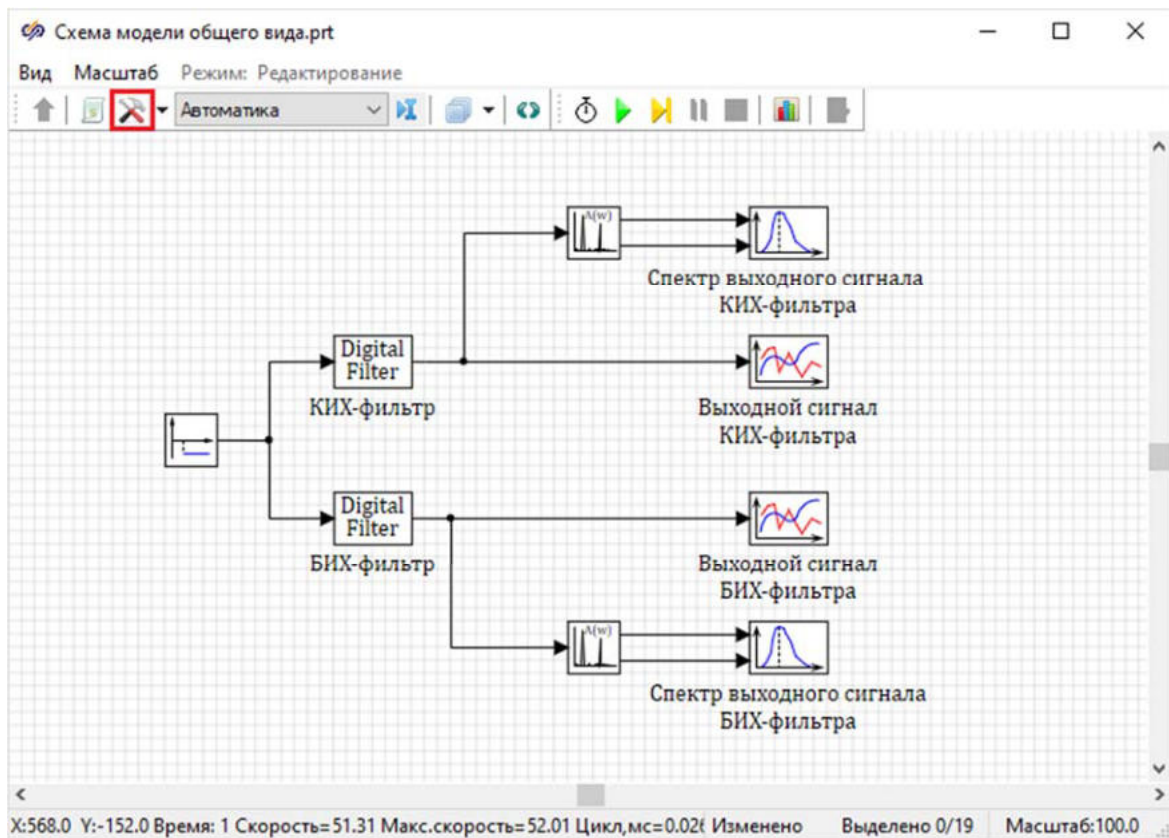


Рис. 9. Окно проекта с выделенной кнопкой "Параметры расчёта".

В появившемся окне параметров проекта установить значения свойства (Рисунок 10) "**Конечное время расчета**" равным "1":

Параметры проекта: Схема модели общего вида.prt слой: Автоматика

Параметры расчёта Управление расчётом Настройки проекта

Основные параметры

Поиск по названию, имени, формуле, значению

Название	Имя	Формула	Значение
Минимальный шаг	hmin		0.001
Максимальный шаг	hmax		0.001
Шаг синхронизации задачи в пакете	synstep		0
Режим выполнения задачи в пакете	serial_mode		Параллельный
Начальный шаг интегрирования (если 0 - в...)	startstep		0
Метод интегрирования	intmet		Эйлера
Начальное время расчёта	starttime		0
Конечное время расчёта	endtime		1
Относительная ошибка	relerr		0.0001
Абсолютная ошибка	abserr		1E-6
Относительная ошибка сравнения времени...	time_rel_error		1E-12
Начальное значение неинициализированн...	InitOutputsValue		0

Редактировать список параметров

Рис. 10. Окно "Параметры проекта" вкладка "Параметры расчёта".

Перед тем, как приступить к выполнению следующего пункта данного задания, необходимо сохранить проект.

Запуск моделирования и построение графиков

Необходимо запустить проект на моделирование нажатием на кнопку **Пуск** (Рисунок 11) и дождаться окончания расчета.

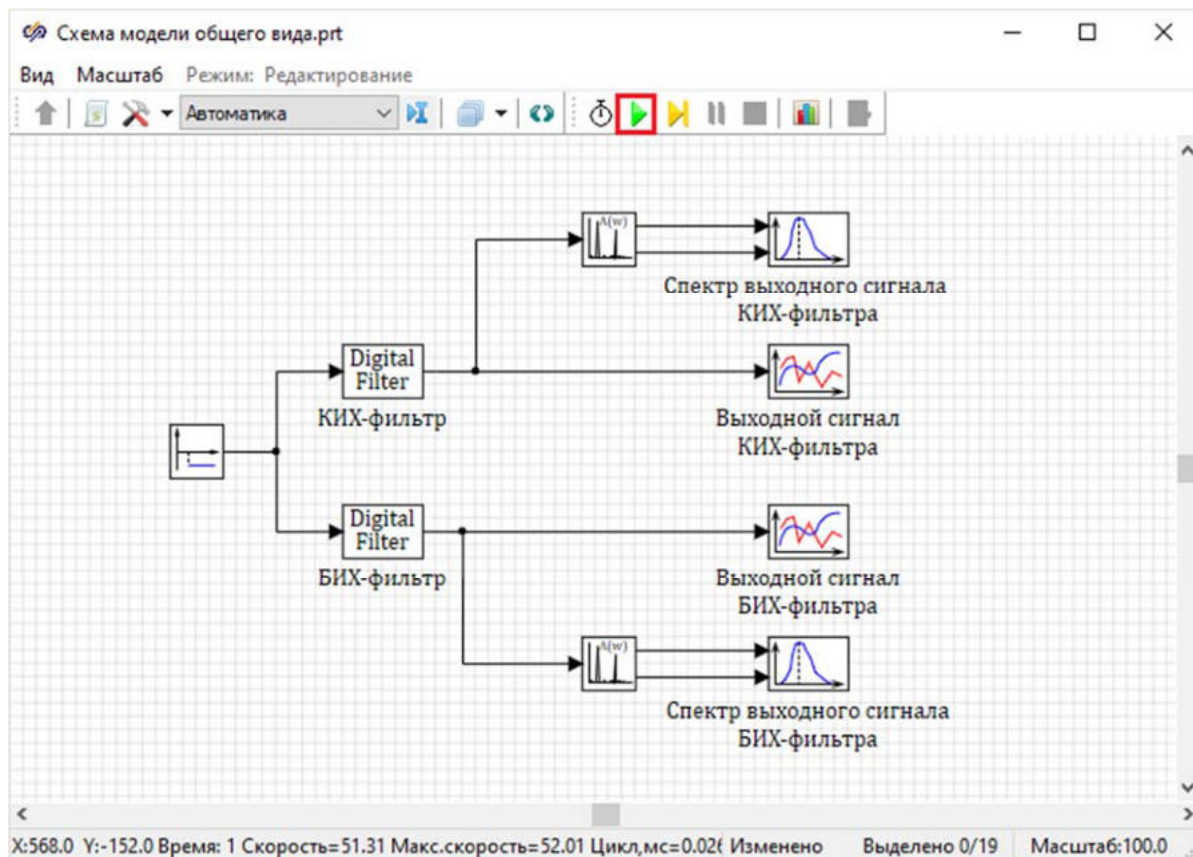


Рис. 11. Окно проекта с выделенной кнопкой "Пуск".

После окончания расчета двойным нажатием левой кнопкой мыши по блоку **Временной график** с подписью "**Выходной сигнал КИХ-фильтра**" открыть график импульсной характеристики КИХ-фильтра. График должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 12).

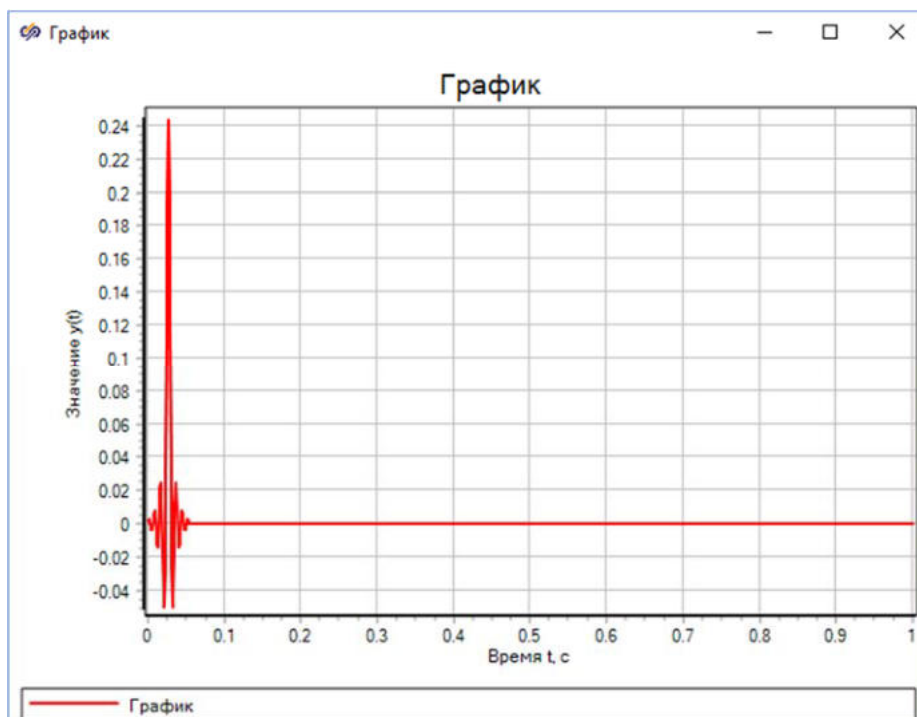


Рис. 12. График импульсной характеристики спроектированного КИХ-фильтра.

Необходимо настроить отображение результатов моделирования в блоке **Временной график** с подписью **"Выходной сигнал КИХ-фильтра"**. Для этого необходимо открыть окно **Свойства графика** и на вкладке **Графики** и оси изменить **"Тип графика"** на **"Столбчатый"** и уменьшить диапазон отображения с помощью изменения значения **"Максимум"** на **"0.055"** в колонке **"Ось X"** (Рисунок 13).

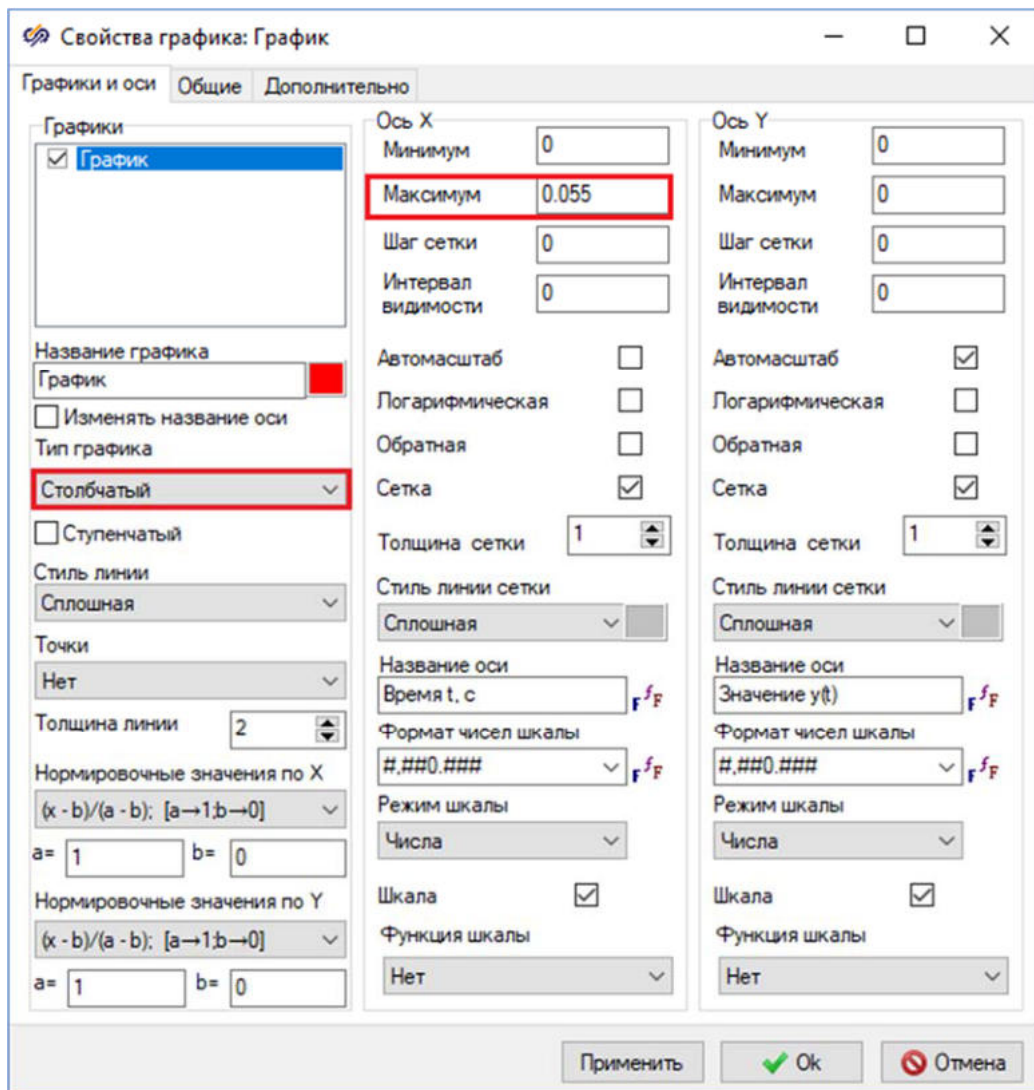


Рис. 13. Окно "Свойства графика" с выделенными свойствами, которые необходимо изменить.

На вкладке **Общие** отключить свойство **"Показывать легенду"** (Рисунок 14).

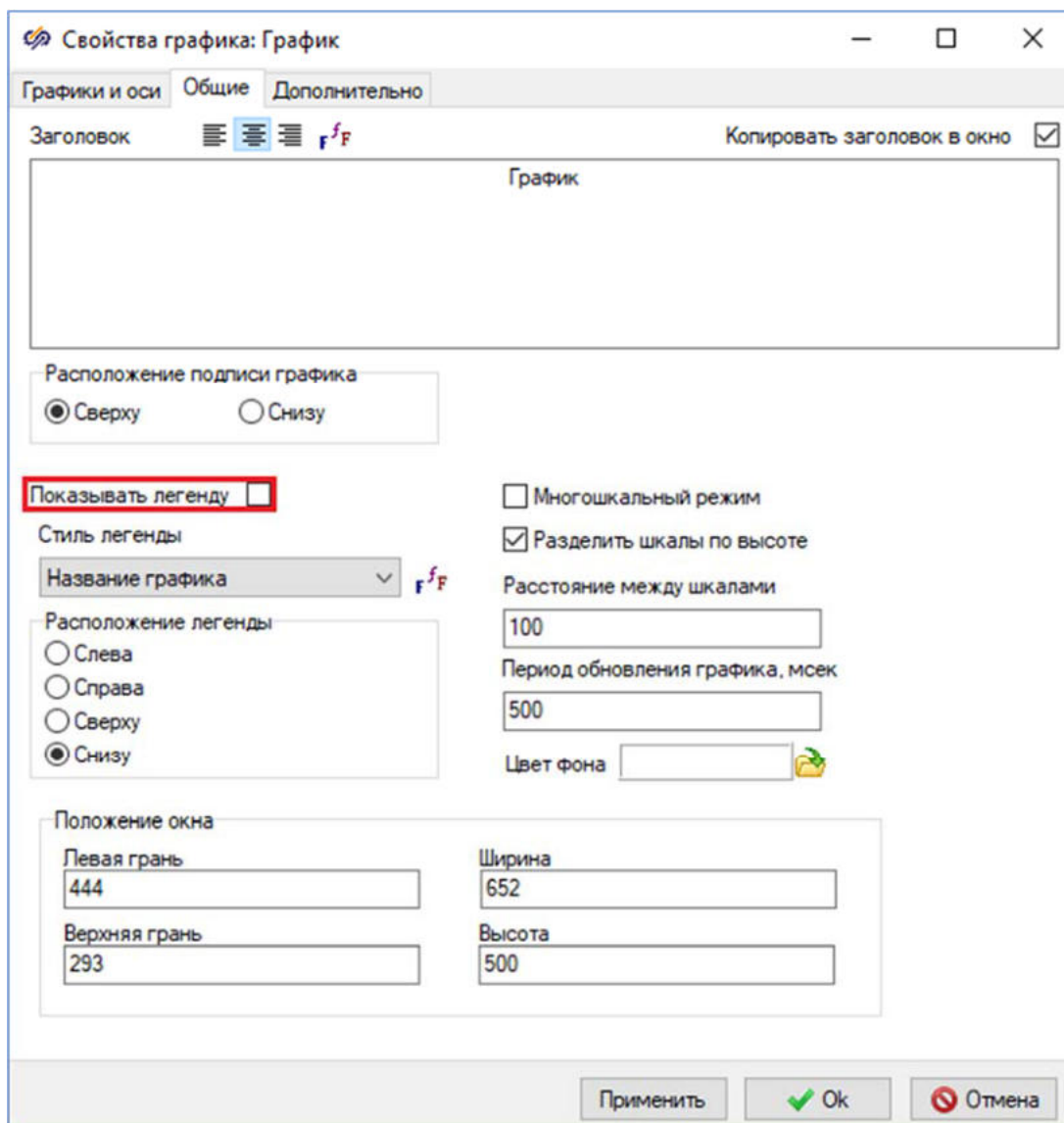


Рис. 14. Окно "Свойства графика" с выделенным свойством "Показывать легенду".

После изменения свойств графика необходимо закрыть окно нажатием на кнопку **Ok**. Полученный график должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 15).

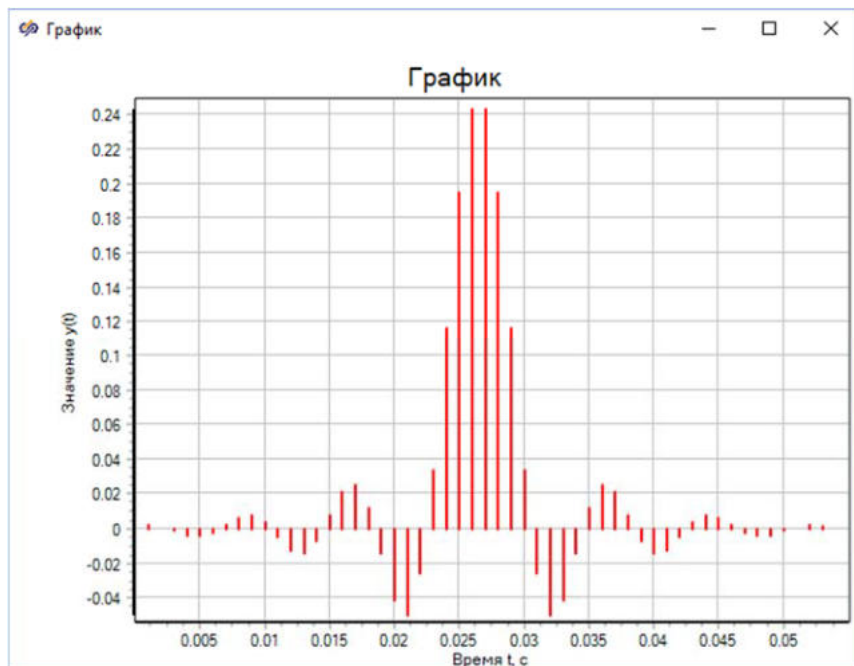


Рис. 15. Импульсная характеристика КИХ-фильтра.

Построенный график импульсной характеристики полностью совпадает с графиком, построенным с помощью инструмента Проектирование и анализ фильтров (Рисунок 16).

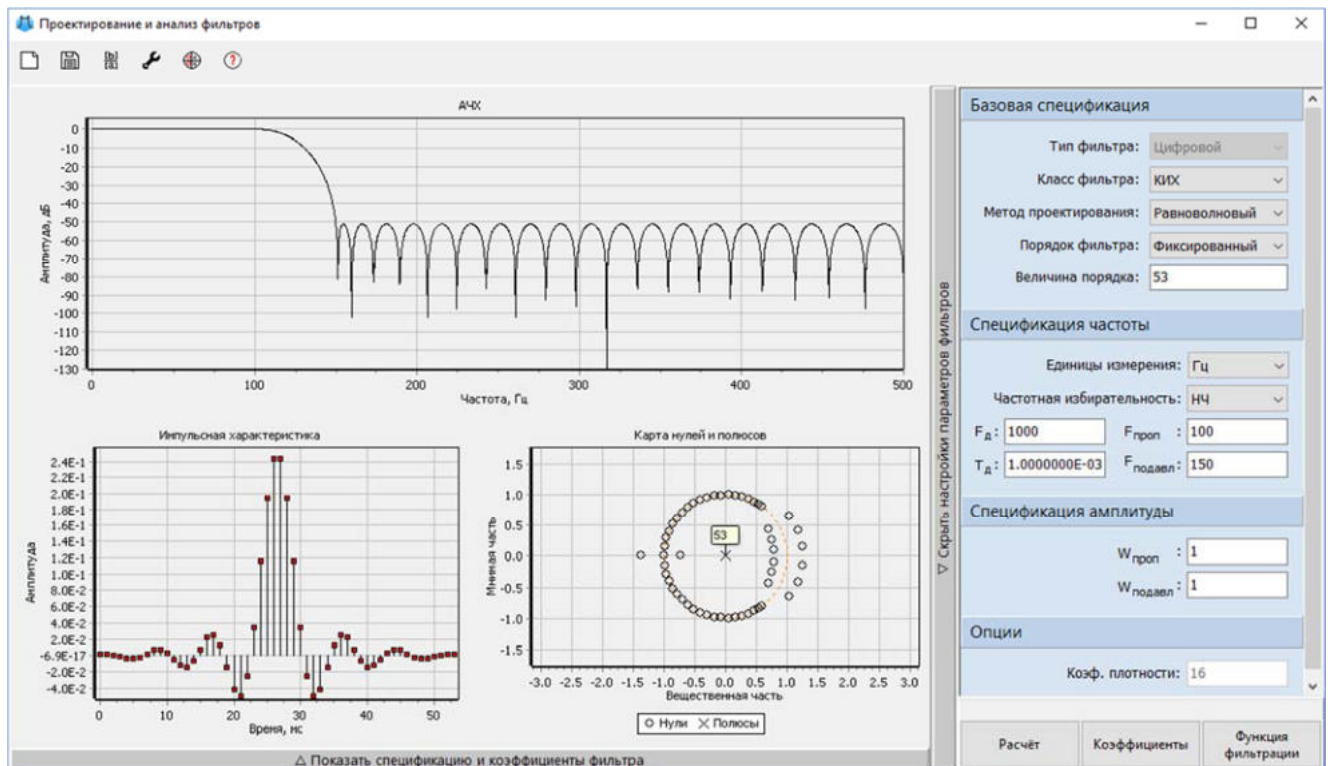


Рис. 16. Импульсная характеристика КИХ-фильтра в окне инструмента "Проектирование и анализ фильтров".

Для построения графика АЧХ КИХ-фильтра используется блок График Y от X. Двойным нажатием левой кнопкой мыши по блоку График Y от X с

подписью "Спектр выходного сигнала КИХ-фильтра" открыть полученный график. График должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 17).

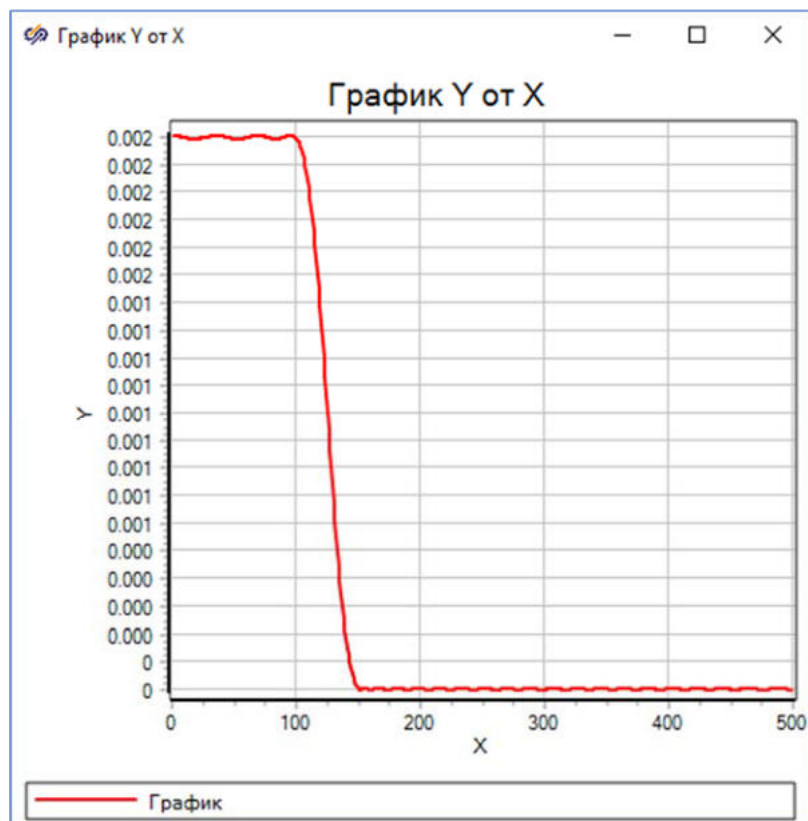


Рис. 17. График АЧХ КИХ-фильтра.

Необходимо настроить отображение результатов моделирования в блоке **График Y от X** с подписью "Спектр выходного сигнала КИХ-фильтра". Для этого необходимо в окне **Свойства графика** на вкладке **Графики и оси** установить новые значения следующих свойств (Рисунок 18):

- "Функция шкалы" – " $20\lg(x)$ (dB)"
- "Название оси" в колонке "Ось X" – "Частота, Гц"
- "Название оси" в колонке "Ось Y" – "Амплитуда, дБ"

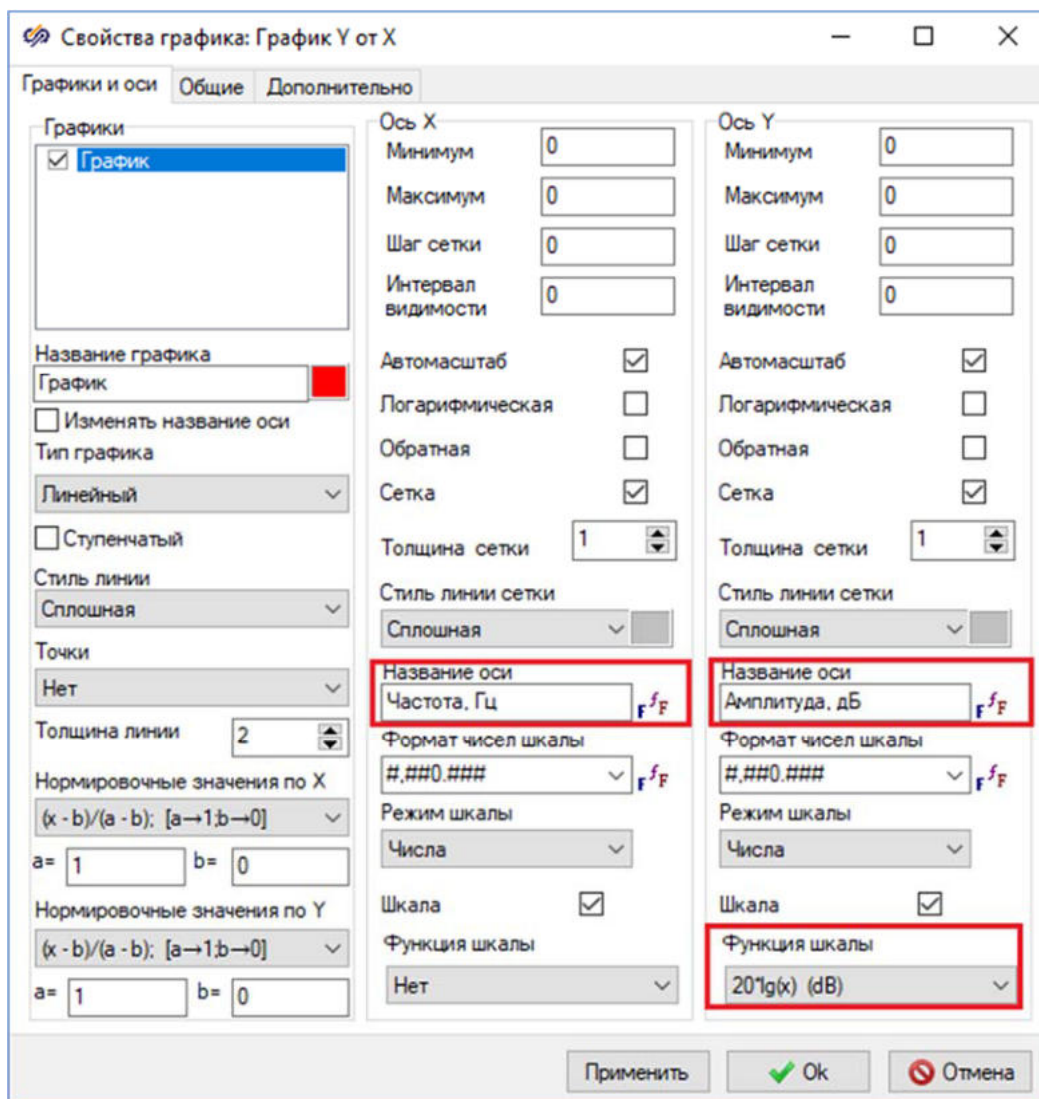


Рис. 18. Окно "Свойства графика" с выделенными свойствами, которые необходимо изменить.

На вкладке **Общие** отключить свойство "**Показывать легенду**".

После изменения свойств графика необходимо закрыть окно нажатием на кнопку **Ok**. Полученный график должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 19).

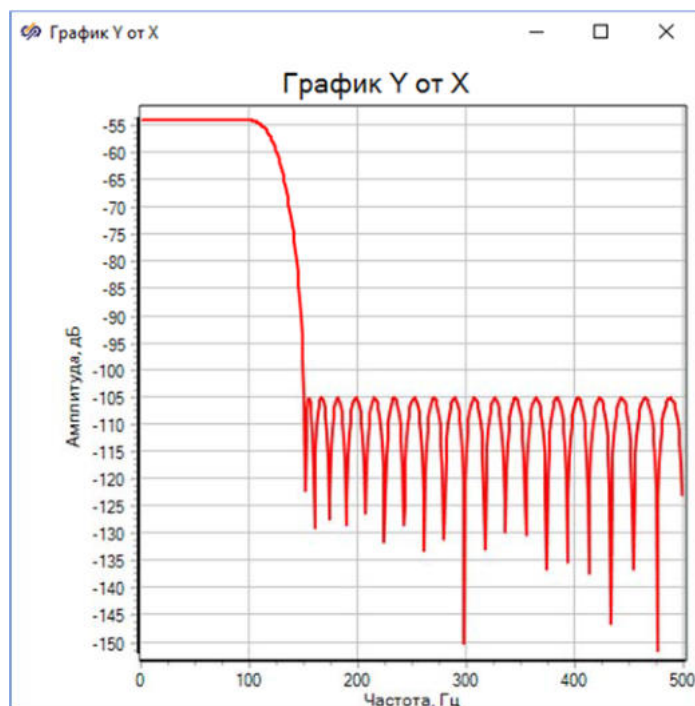


Рис. 19. График АЧХ КИХ-фильтра.

Построенный график АЧХ КИХ-фильтра полностью совпадает с графиком, построенным инструментом Проектирование и анализ фильтров (Рисунок 16).

Для построения импульсной характеристики БИХ-фильтра используется блок **Временной график** с подписью **"Выходной сигнал БИХ-фильтра"**. Следует открыть график импульсной характеристики двойным нажатием правой кнопкой мыши. График должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 19).

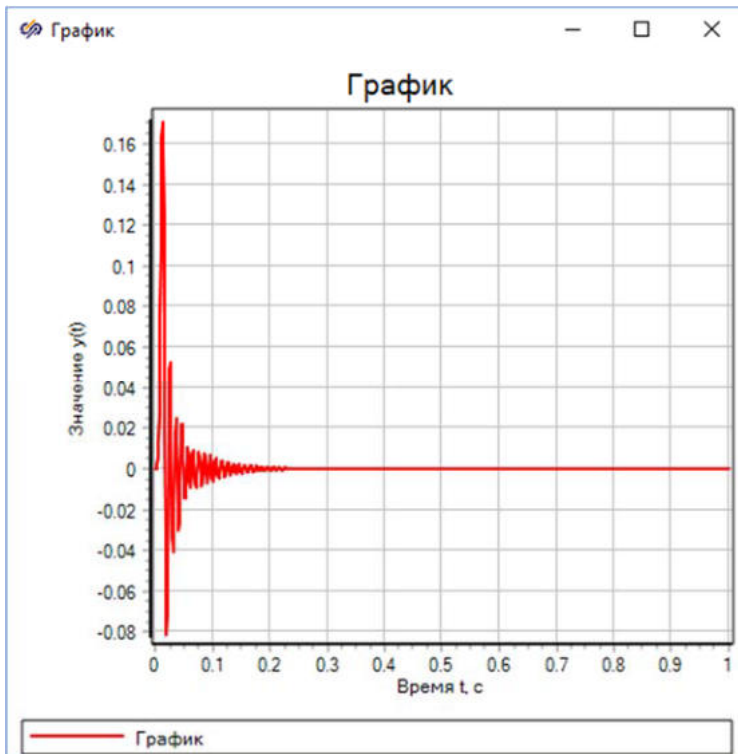


Рис. 20. График импульсной характеристики спроектированного БИХ-фильтра.

Построенный график импульсной характеристики БИХ-фильтра полностью совпадает с графиком, построенным с помощью инструмента Проектирование и анализ фильтров (Рисунок 21).

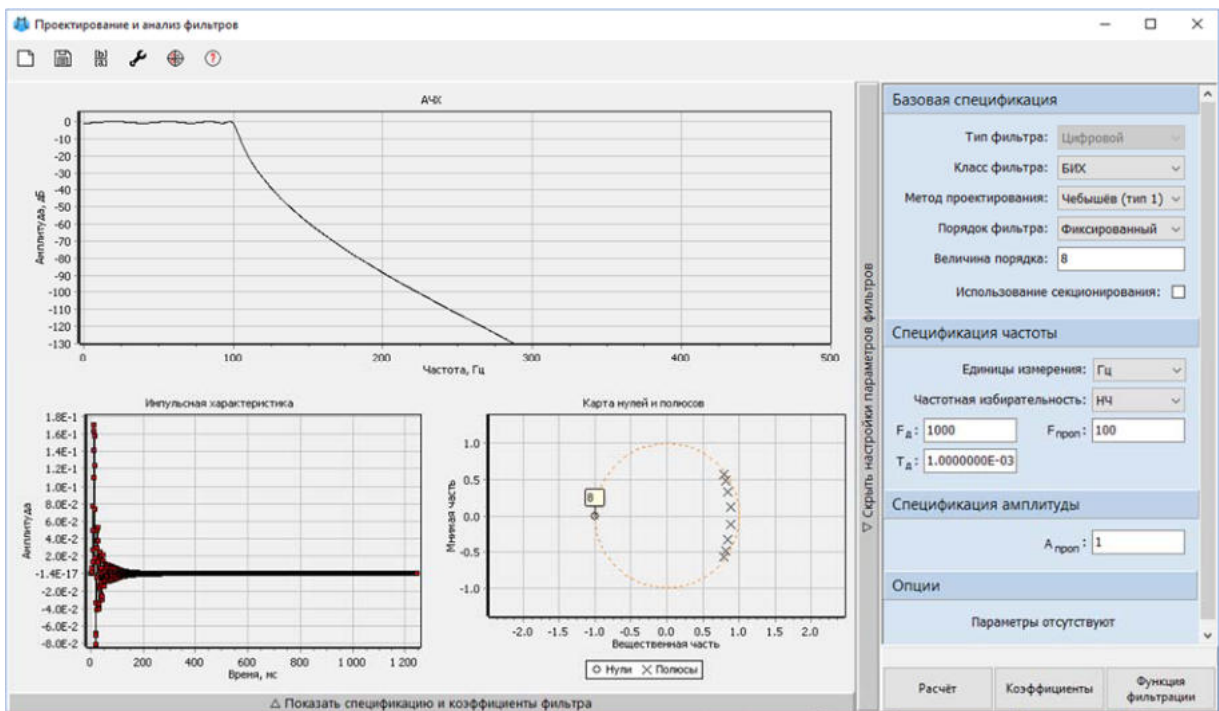


Рис. 21. График импульсной характеристики спроектированного БИХ-фильтра в окне инструмента "Проектирование и анализ фильтров".

Для построения графика АЧХ БИХ-фильтра используется блок **График Y от X**. Двойным нажатием левой кнопкой мыши по блоку **График Y от X** с подписью **"Спектр выходного сигнала БИХ-фильтра"** открыть построенный график. График должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 22).

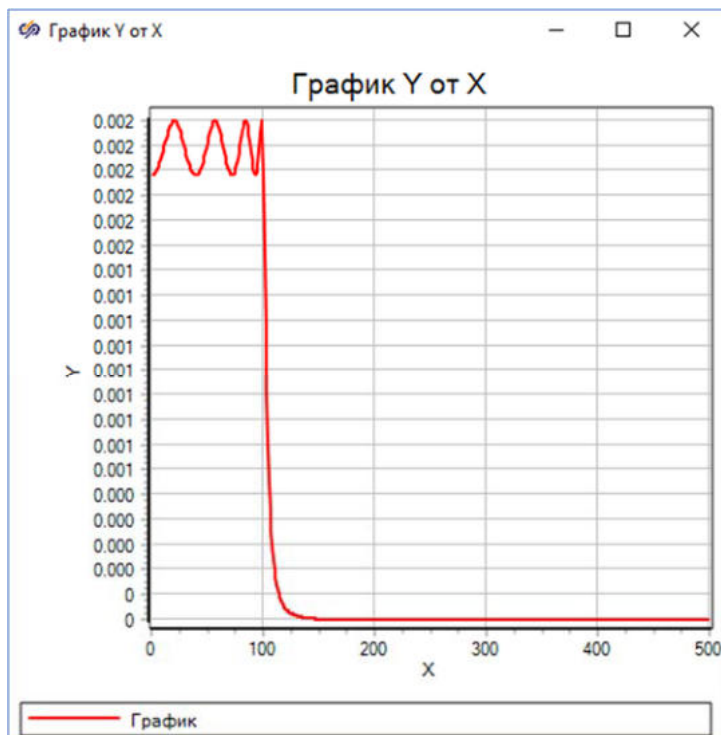


Рис. 22. График АЧХ БИХ-фильтра.

Необходимо настроить отображение результатов моделирования в блоке **График Y от X** с подписью **"Спектр выходного сигнала БИХ-фильтра"**. Для этого следует нажать правой кнопкой мыши на окно **График** и выбрать пункт **Свойства**.

В открывшемся окне **Свойства графика** на вкладке **Графики и оси** установить новые значения свойств (Рисунок 23):

- **"Функция шкалы"** – **" $20\lg(x)$ (dB)"**
- **"Название оси"** в колонке **"Ось X"** – **"Частота, Гц"**
- **"Название оси"** в колонке **"Ось Y"** – **"Амплитуда, дБ"**

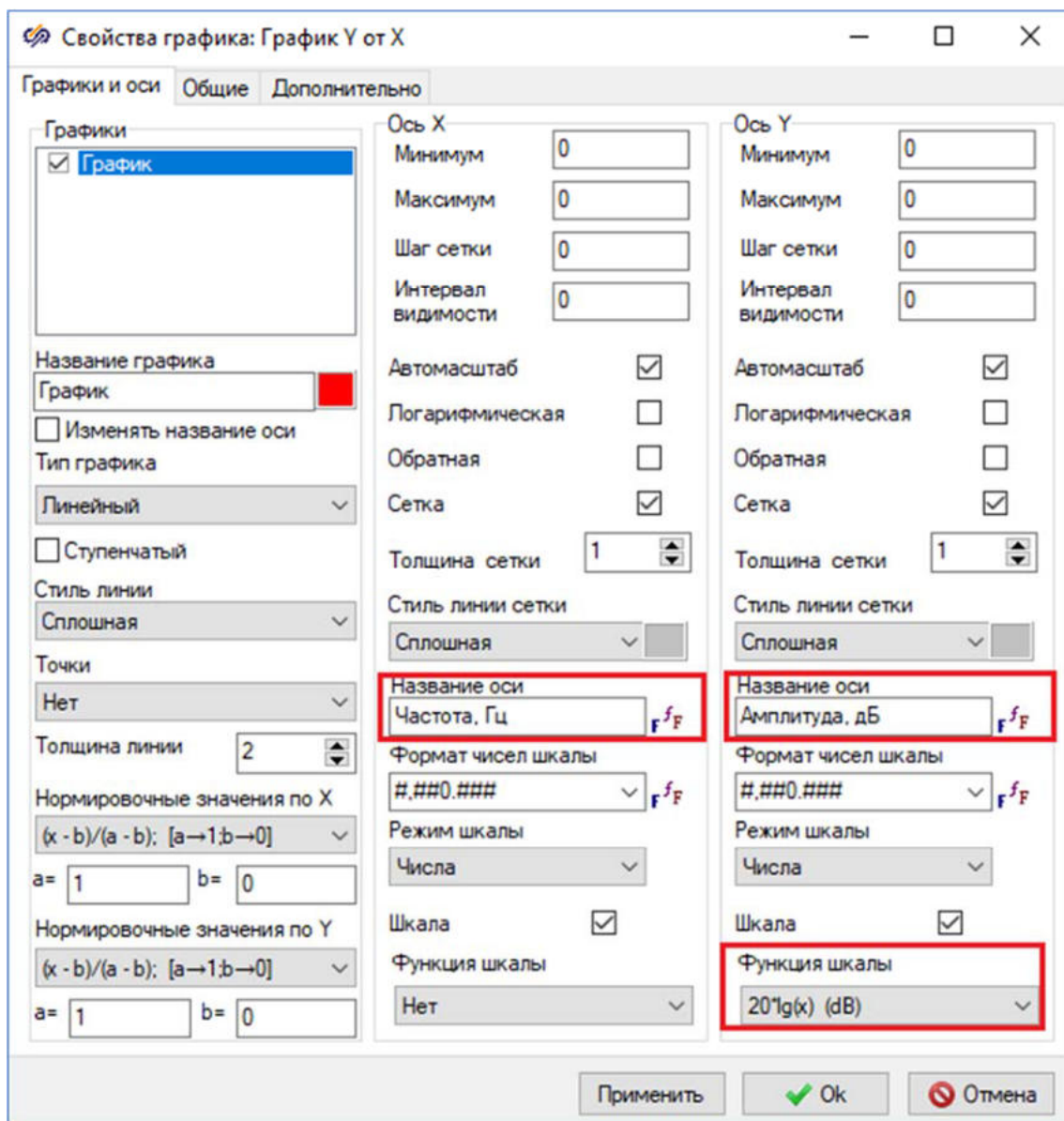


Рис. 23. Окно "Свойства графика" с выделенными свойствами, которые необходимо изменить.

На вкладке **Общие** следует отключить свойство "**Показывать легенду**".

После изменения свойств графика необходимо закрыть окно нажатием на кнопку **Ok**. Полученный график должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 24).

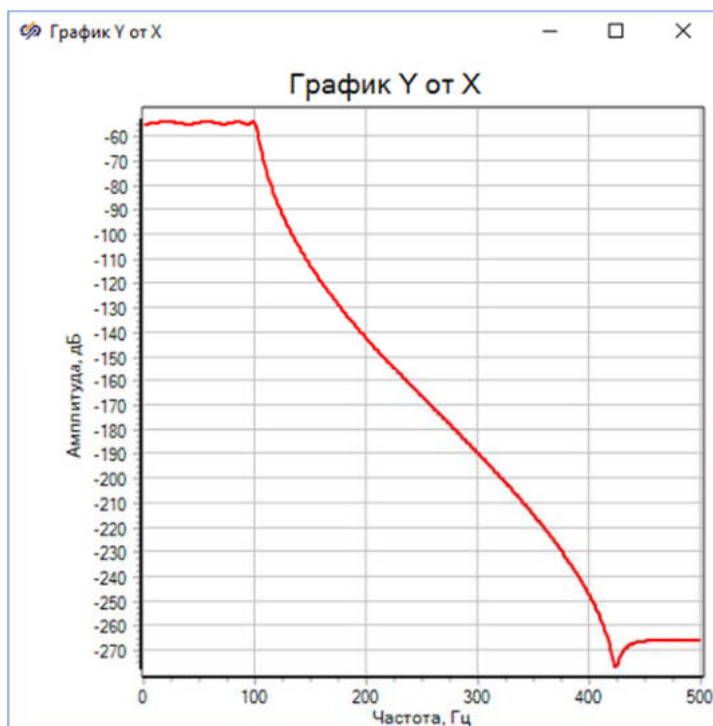


Рис. 24. График АЧХ БИХ-фильтра.

Построенный график АЧХ БИХ-фильтра полностью совпадает с графиком, построенным инструментом Проектирование и анализ фильтров (Рисунок 21).

Перед тем, как приступить к выполнению следующего пункта данного задания, необходимо сохранить проект.

2. Исследование процесса фильтрации сигнала

Задание:

- создана расчетная схема для анализа работы фильтров при фильтрации сигнала, являющегося суммой двух синусоид
- произведен анализ графиков и спектров входного и выходного сигналов фильтров
- произведено сравнение КИХ- и БИХ- фильтров на основе построенных в процессе работы графиков

Разработка модели

Необходимо создать новый проект Схема модели общего вида и сохранить его, указав желаемое имя проекта либо оставив имя проекта по умолчанию.

Для исследования фильтрации сигнала необходимо поместить в рабочую область окна проекта следующие блоки:

- 2 блока Цифровой фильтр из подменю Фильтрация вкладки ЦОС
- 2 блока Синусоида из вкладки Источники. С помощью данных блоков будет формироваться входной сигнал фильтра
- 1 блок Сумматор из вкладки Операторы. С помощью данного блока будет осуществляться суммирование двух синусоид и формироваться входной сигнал фильтра
- 3 блока Временной график из вкладки Вывод данных. С помощью данных блоков будет осуществляться графическое отображение результатов моделирования
- 3 блок График Y от X из вкладки Вывод данных. С помощью данных блоков будет производиться графическое отображение АЧХ фильтра
- 3 блок Спектральная плотность из вкладки Статистика. С помощью данных блоков будет производиться спектральный анализ импульсного сигнала
- 2 блока FIFO/LIFO буфер из подменю Буферизация вкладки ЦОС. С помощью данных блоков будет осуществляться задержка сигнала

Расположить блоки в окне проекта согласно рисунку (Рисунок 25).

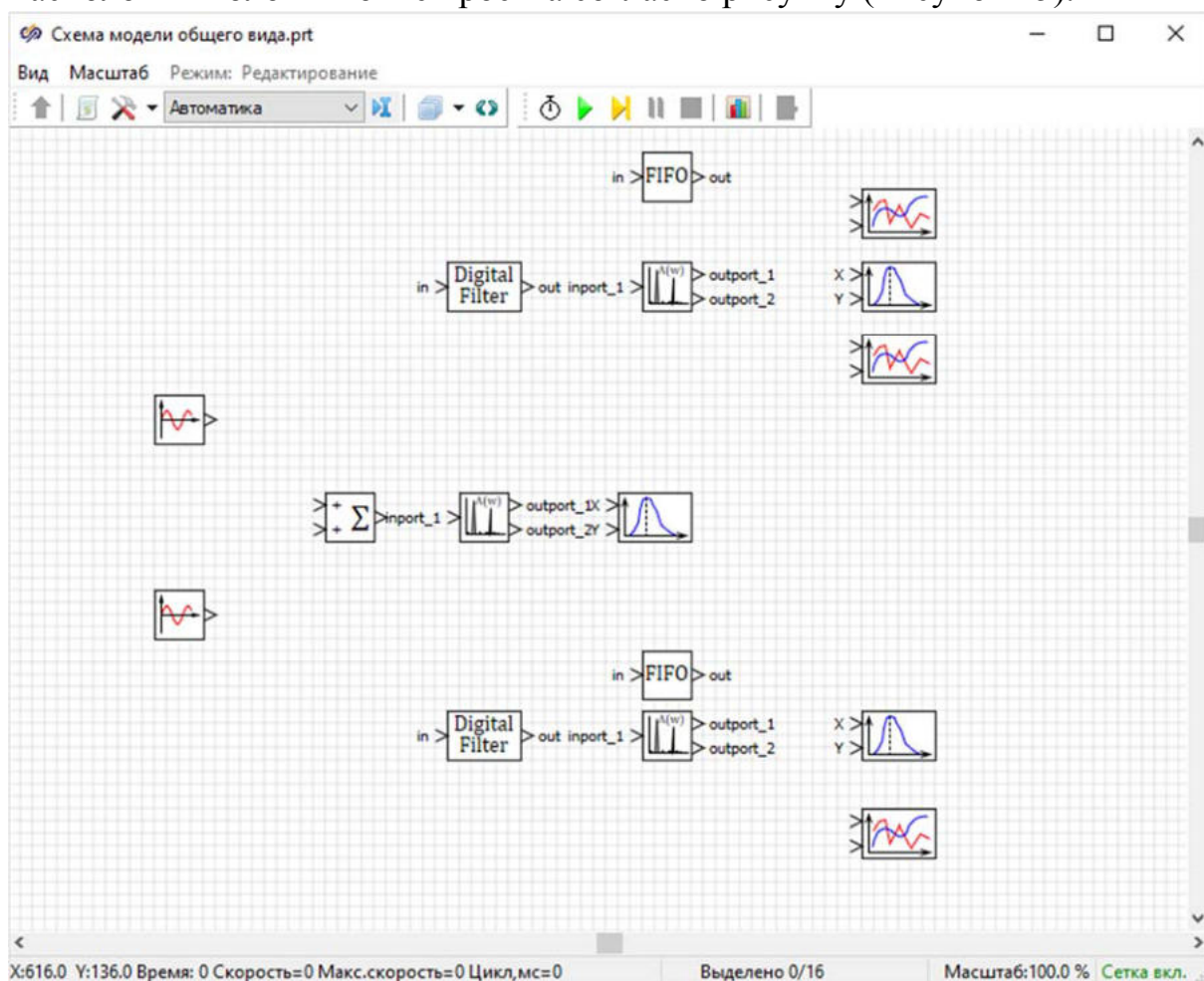


Рис. 25. Рабочая область окна проекта с добавленными блоками.

Задание подписей блоков

Для блоков **Временной график** и **График Y от X** необходимо изменить отображение текста подписи блока. Для этого следует выделить нужный блок, нажать по нему правой кнопкой мыши и выбрать пункт **Свойства объекта**. В открывшемся окне свойств перейти во вкладку **Общие** и установить новые значения свойству **"Выравнивание подписи"** - **"По левому краю"** (Рисунок 26).

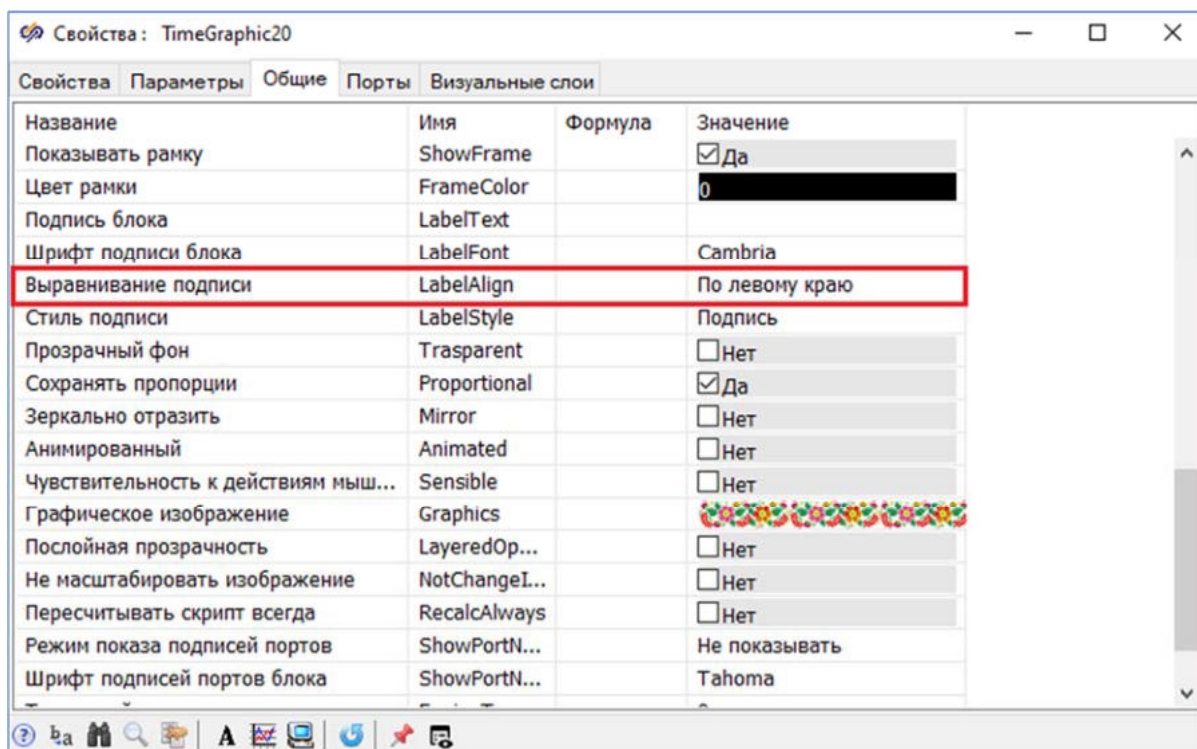


Рис. 26. Окно "Свойства" блока с выделенным свойством "Выравнивание подписи".

Необходимо задать подписи блокам на схеме. Для блоков **Временной график** и **График Y от X** разместить подпись справа от соответствующего блока согласно рисунку (Рисунок 27).

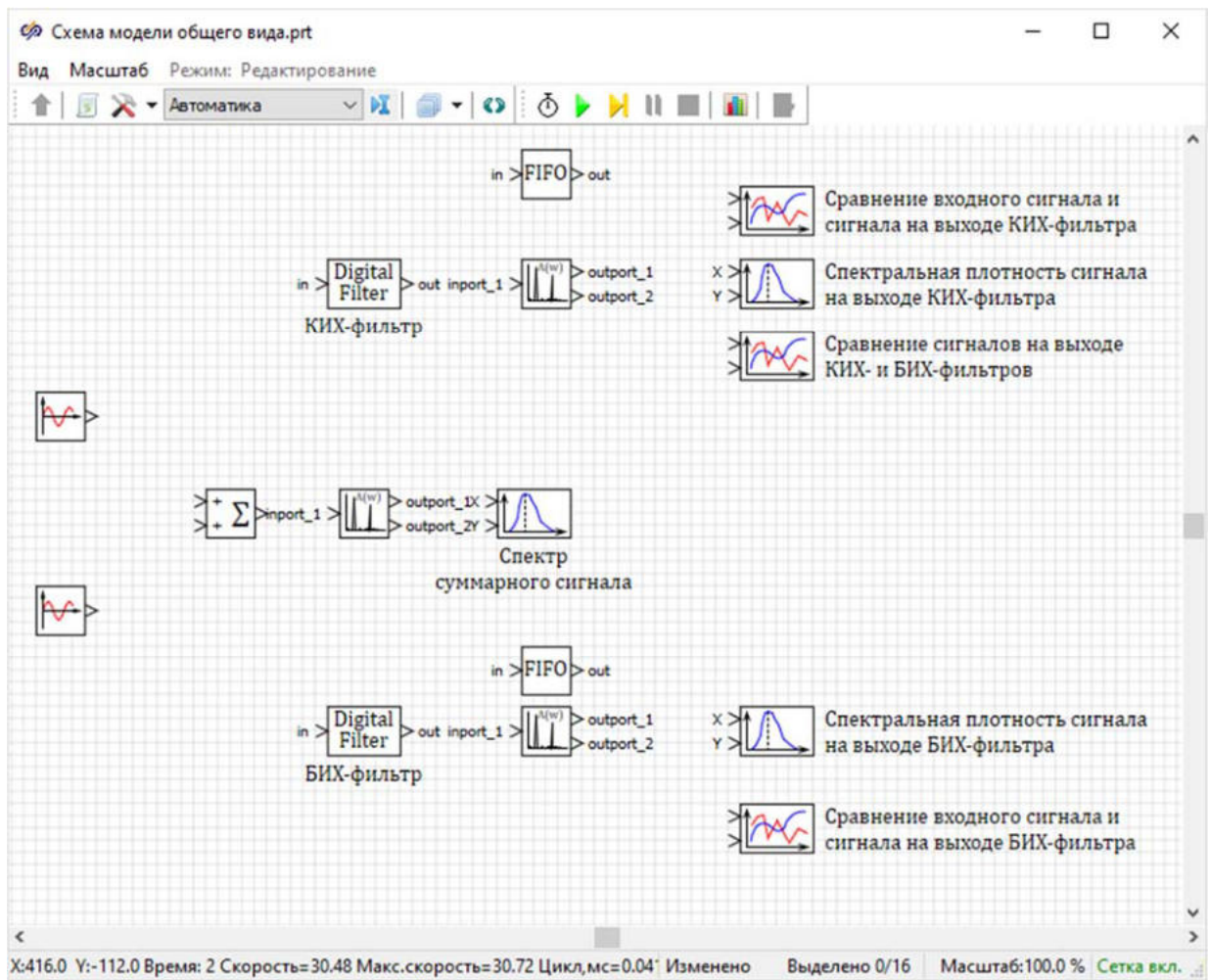


Рис. 27. Окно проекта с заданными подписями блоков.

Перед тем, как приступить к выполнению следующего пункта данного задания, необходимо сохранить проект.

Задание свойств блоков

Для блока **Синусоида** с подписью **"Первый источник"** задать новые значения свойств согласно рисунку (Рисунок 28).

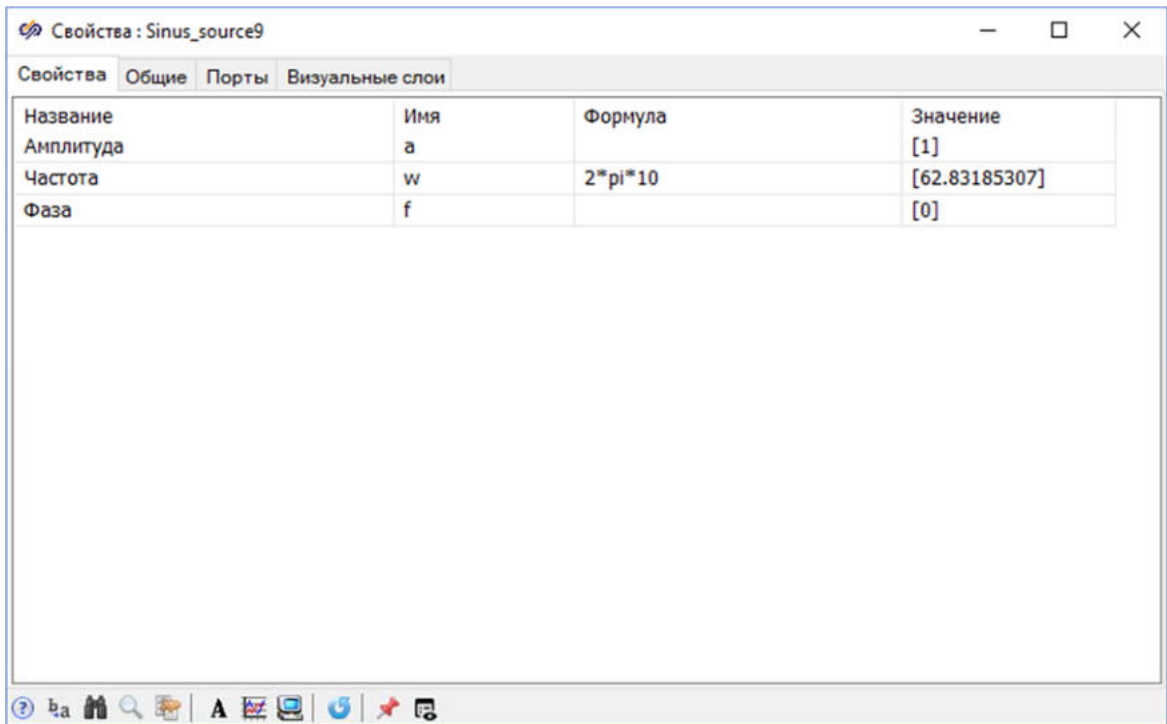


Рис. 28. Окно "Свойства" для блока "Синусоида" с подписью "Первый источник".

Для блока Синусоида с подписью "Второй источник" задать новые значения свойств согласно рисунку (Рисунок 29).

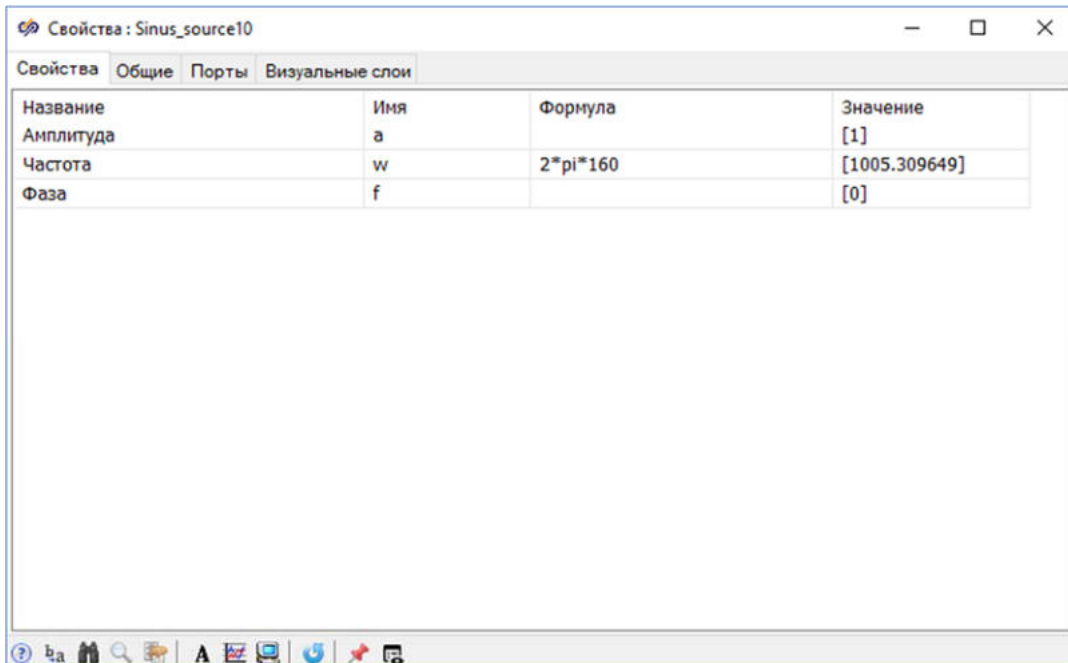


Рис. 29. Окно "Свойства" для блока "Синусоида" с подписью "Второй источник".

Результатом суммирования сигналов двух блоков Синусоида является периодический сигнал с двумя гармониками частотой 10 и 160 Гц.

Блоки **Спектральная плотность** будут осуществлять спектральный анализ импульсной характеристики. Следует задать значения свойств согласно рисунку (Рисунок 30).

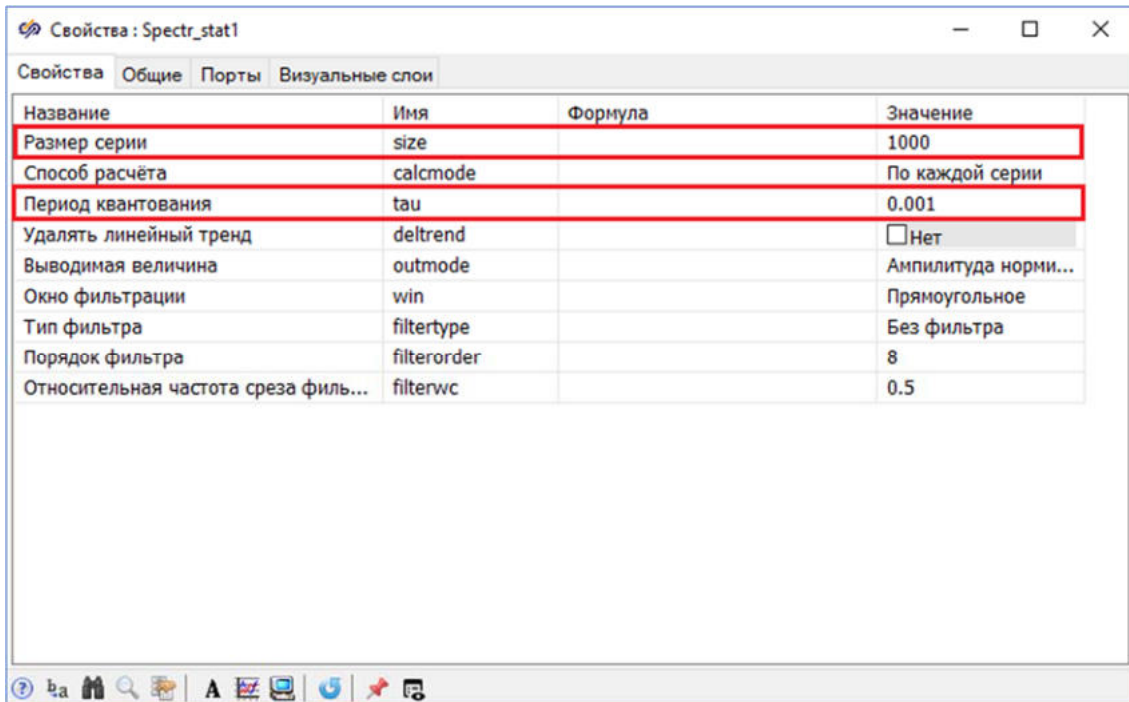


Рис. 30. Окно "Свойства" блока "Спектральная плотность".

Блоки **FIFO/LIFO буфер** будут осуществлять запаздывание сигнала. Следует задать значения свойств согласно рисунку (Рисунок 31).

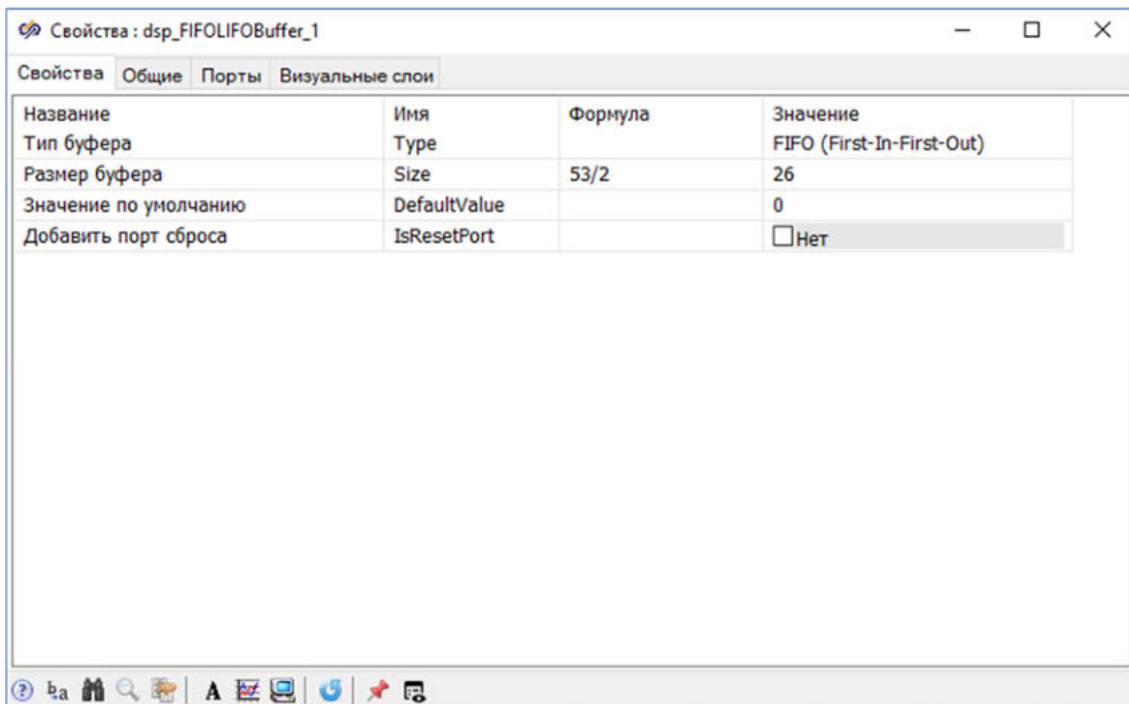


Рис. 31. Окно "Свойства" блока "FIFO/LIFO буфер".

Для отображения дополнительного сигнала на одном графике необходимо увеличить количество входных портов блока **Временной график**. Для этого открыть окно **Свойства блока Временной график** и в поле **"Значение"** задать значение свойства **"Количество входных портов"** равным **"2"**.

Необходимо соединить блоки линиями связи между собой согласно рисунку (Рисунок 32).

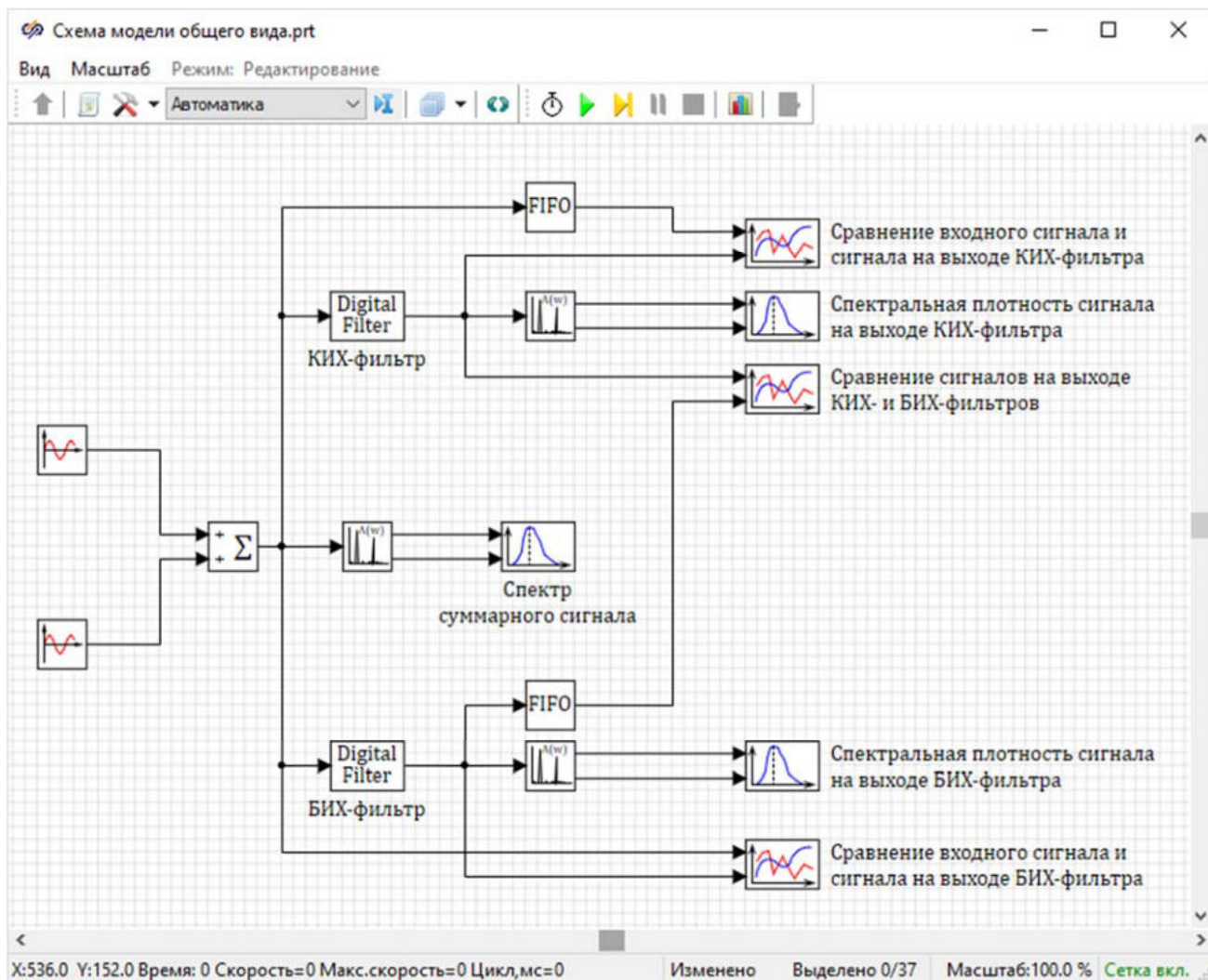


Рис. 32. Окно проекта с соединенными блоками.

Перед тем, как приступить к выполнению следующего пункта данного задания, необходимо сохранить проект.

Запуск моделирования и построение графиков

Запустить проект на моделирование и дождаться окончания расчета.

Открыть окно **График** для блока **График Y от X** с подписью **"Спектр суммарного сигнала"**. График должен выглядеть согласно рисунку (Рисунок 33).

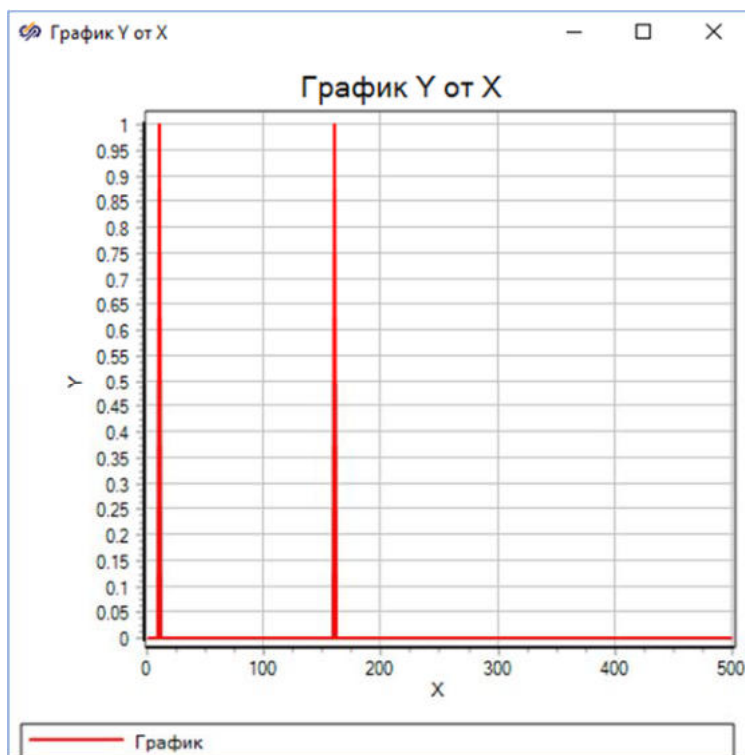


Рис. 33. Окно "График" блока "График Y от X" с подписью "Спектр суммарного сигнала".

Необходимо настроить отображение результатов моделирования в блоках **График Y от X**. Для этого следует открыть окно **График** блока **График Y от X** с подписью **"Спектр суммарного сигнала"** и выбрать пункт **Свойства**.

В открывшемся окне **Свойства графика** на вкладке **Графики и оси** установить новые значения свойств **"Функция шкалы"** и **"Название оси"** (Рисунок 34):

- **"Функция шкалы"** – **" $20\lg(x)$ (dB)"**
- **"Название оси"** в колонке **"Ось X"** – **"Частота, Гц"**
- **"Название оси"** в колонке **"Ось Y"** – **"Амплитуда, дБ"**

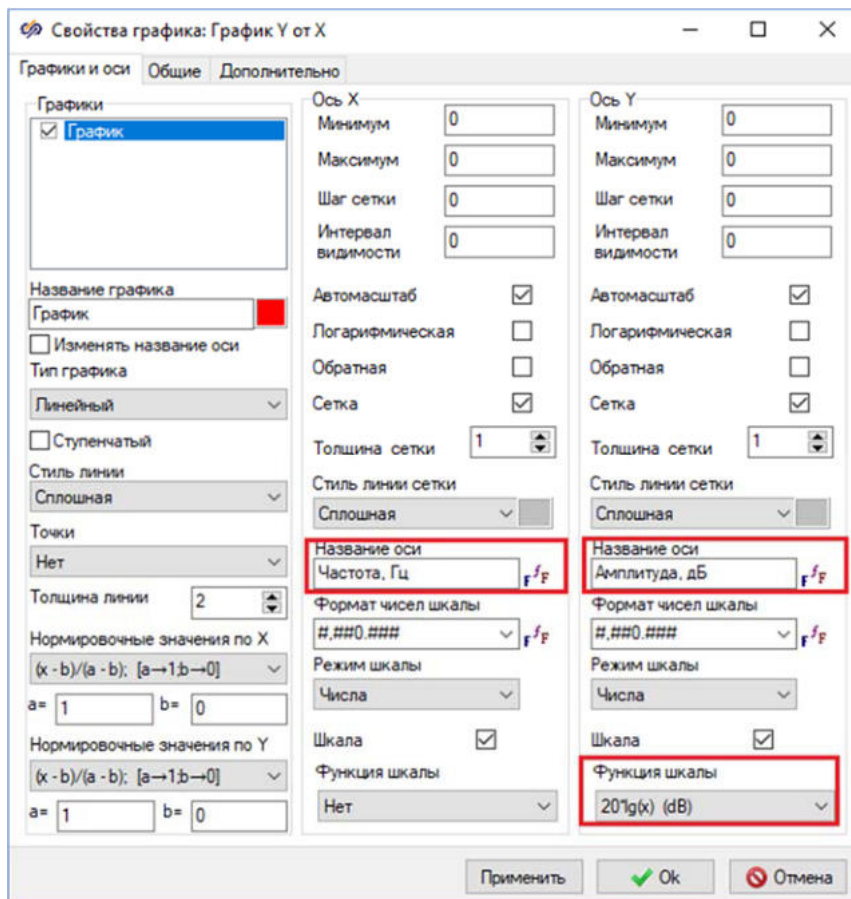


Рис. 34. Окно "Свойства графика" с выделенными свойствами, которые необходимо изменить.

На вкладке **Общие** отключить свойство "**Показывать легенду**".

После изменения свойств графика необходимо закрыть окно нажатием на кнопку **Ok**. Полученный график должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 35).

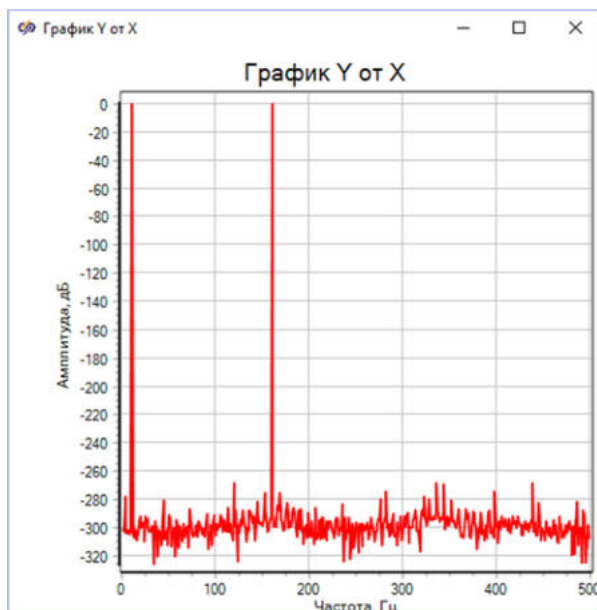


Рис. 35. Окно "График" блока "График Y от X" с подписью "Спектр суммарного сигнала".

Открыть окно **График** для блока **График Y от X** с подписью "Спектральная плотность сигнала на выходе КИХ-фильтра". Установить новые значения свойств "Функция шкалы" и "Название оси":

- "Функция шкалы" – " $20\lg(x)$ (dB)"
- "Название оси" в колонке "Ось X" – "Частота, Гц"
- "Название оси" в колонке "Ось Y" – "Амплитуда, дБ"

На вкладке **Общие** отключить свойство "Показывать легенду".

После изменения свойств графика спектр выходного сигнала должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 36).

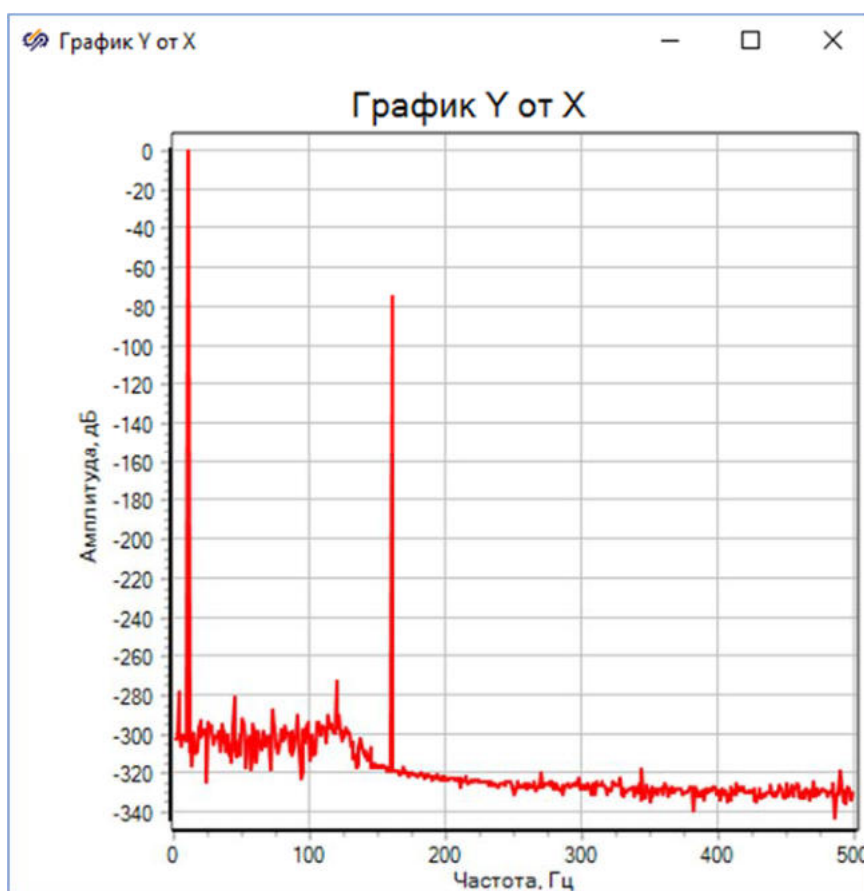


Рис. 36. Окно "График" с подписью "Спектральная плотность сигнала на выходе КИХ-фильтра".

Открыть окно **График** для блока **График Y от X** с подписью "Спектральная плотность сигнала на выходе БИХ-фильтра". В свойствах графика на вкладке **Графики и оси** установить новые значения свойств "Функция шкалы" и "Название оси":

- **"Функция шкалы" – "20lg(x) (dB)"**
- **"Название оси" в колонке "Ось X" – "Частота, Гц"**
- **"Название оси" в колонке "Ось Y" – "Амплитуда, дБ"**

На вкладке **Общие** отключить свойство **"Показывать легенду"**.

После изменения свойств графика спектр выходного сигнала должен выглядеть согласно рисунку (Рисунок 37).

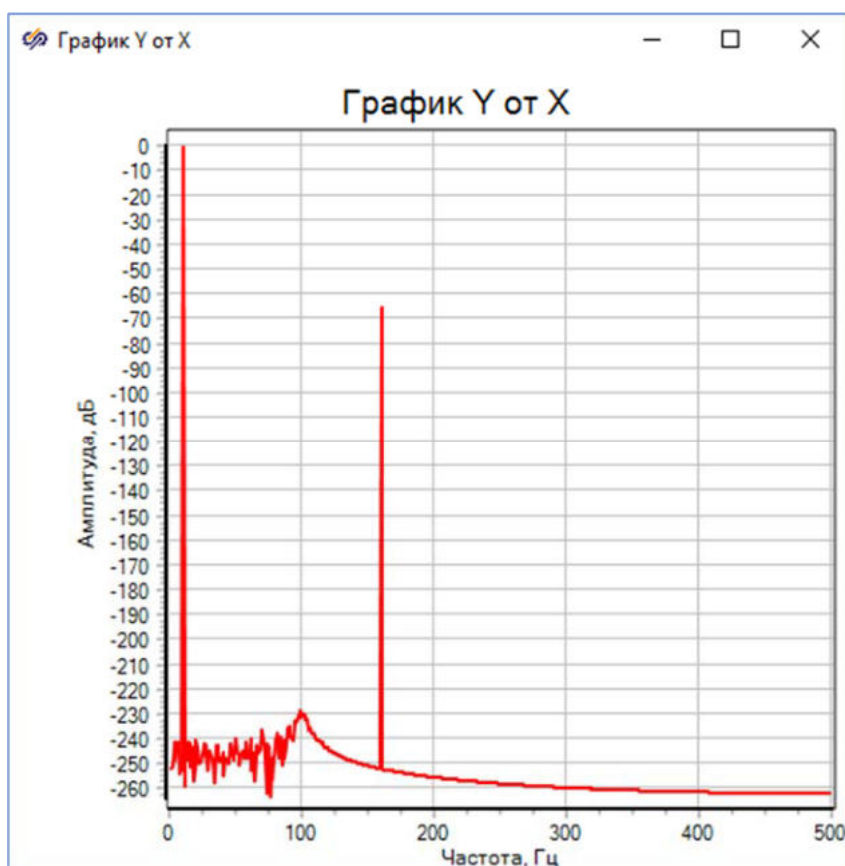


Рис. 37. Окно "График" с подписью "Спектральная плотность сигнала на выходе БИХ-фильтра".

Спектр суммарного сигнала демонстрирует то, что сигнал на входе фильтра имеет две гармоники с частотами 10 и 160 Гц, поскольку он является суммой двух синусоид с соответствующими частотами.

Открыть окно **График** для блока **Временной график** с подписью **"Сравнение входного сигнала и сигнала на выходе КИХ-фильтра"**. В окне **Свойства графика** на вкладке **Графики и оси** установить новые значения следующих свойств (Рисунок 38):

- **"Название графика" – "Входной сигнал"**
- **"Название графика" на второй вкладке – "Сигнал после фильтрации"**

- "Максимум" в колонке "Ось X" – "2"

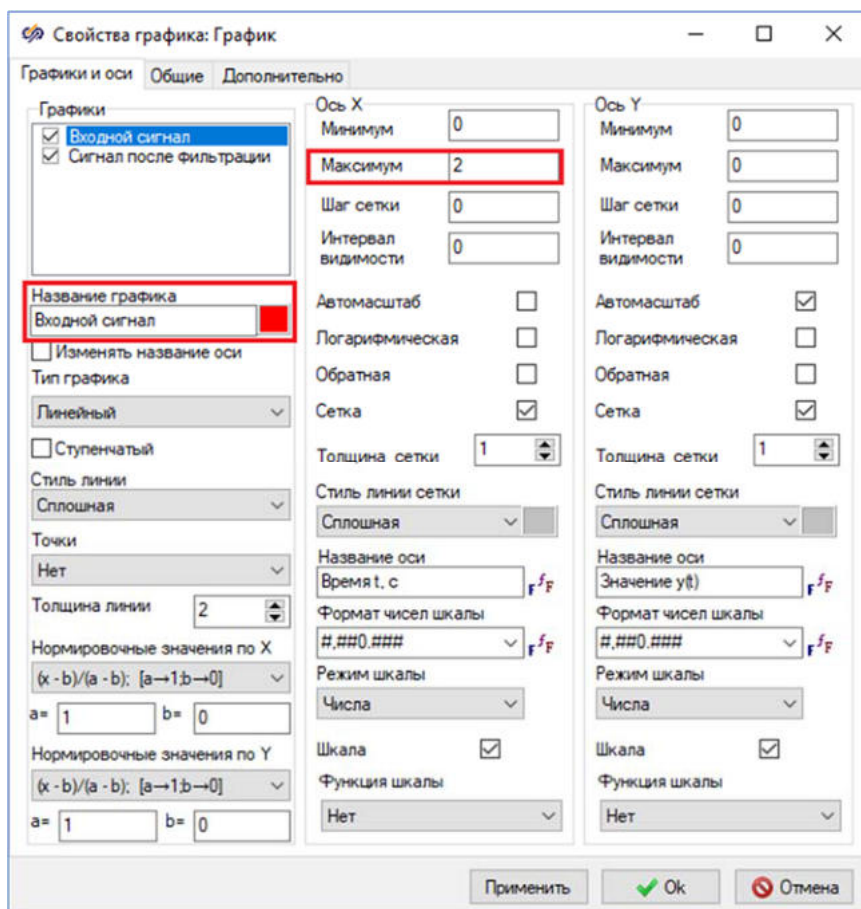


Рис. 38. Окно "Свойства графика" с выделенными свойствами, которые необходимо изменить.

После изменения свойств графика необходимо закрыть окно нажатием на кнопку **Ok**. Полученный график должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 39).

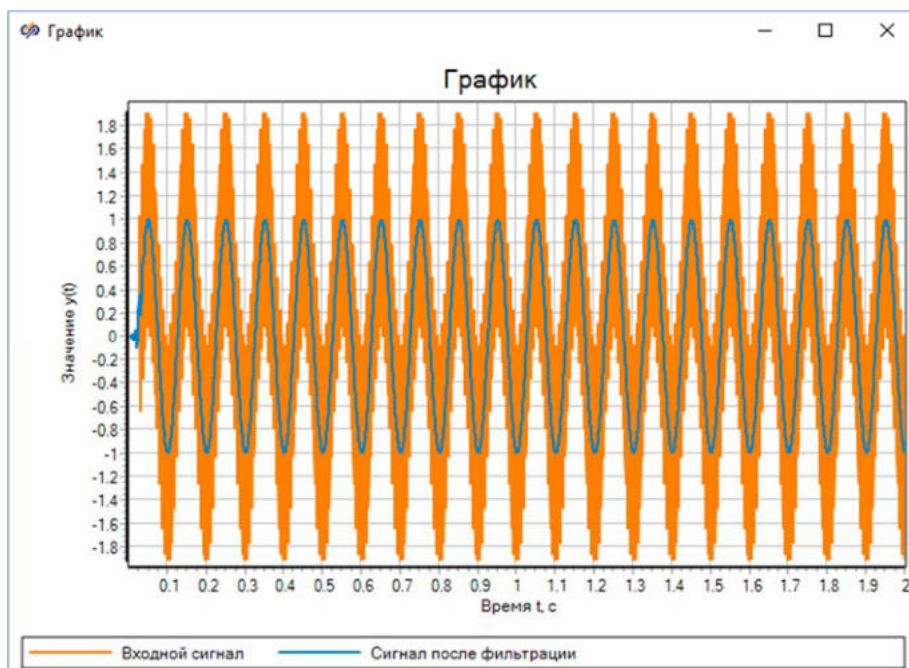


Рис. 39. Окно "График" с подписью "Сравнение входного сигнала и сигнала на выходе КИХ-фильтра".

Открыть окно **График** для блока **Временной график** с подписью **"Сравнение входного сигнала и сигнала на выходе БИХ-фильтра"**. В окне **Свойства графика** на вкладке **Графики** и **оси** установить новые значения свойств (Рисунок 40):

- **"Название графика" – "Входной сигнал"**
- **"Название графика" на второй вкладке – "Сигнал после фильтрации"**
- **"Максимум" в колонке "Ось X" – "2"**

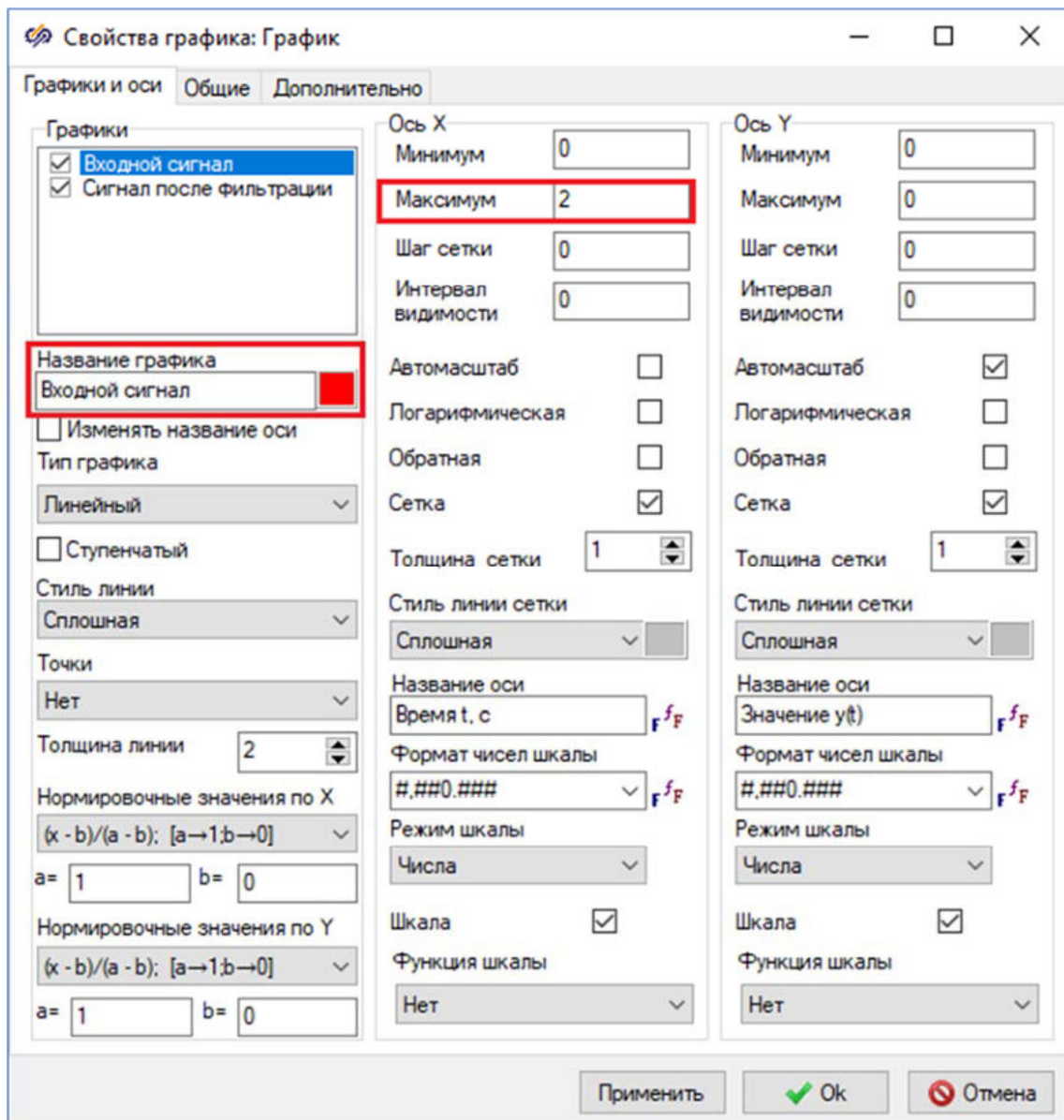


Рис. 40. Окно "Свойства графика" с выделенными свойствами, которые необходимо изменить.

После изменения свойств графика необходимо закрыть окно нажатием на кнопку **Ok**. Полученный график должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 41).

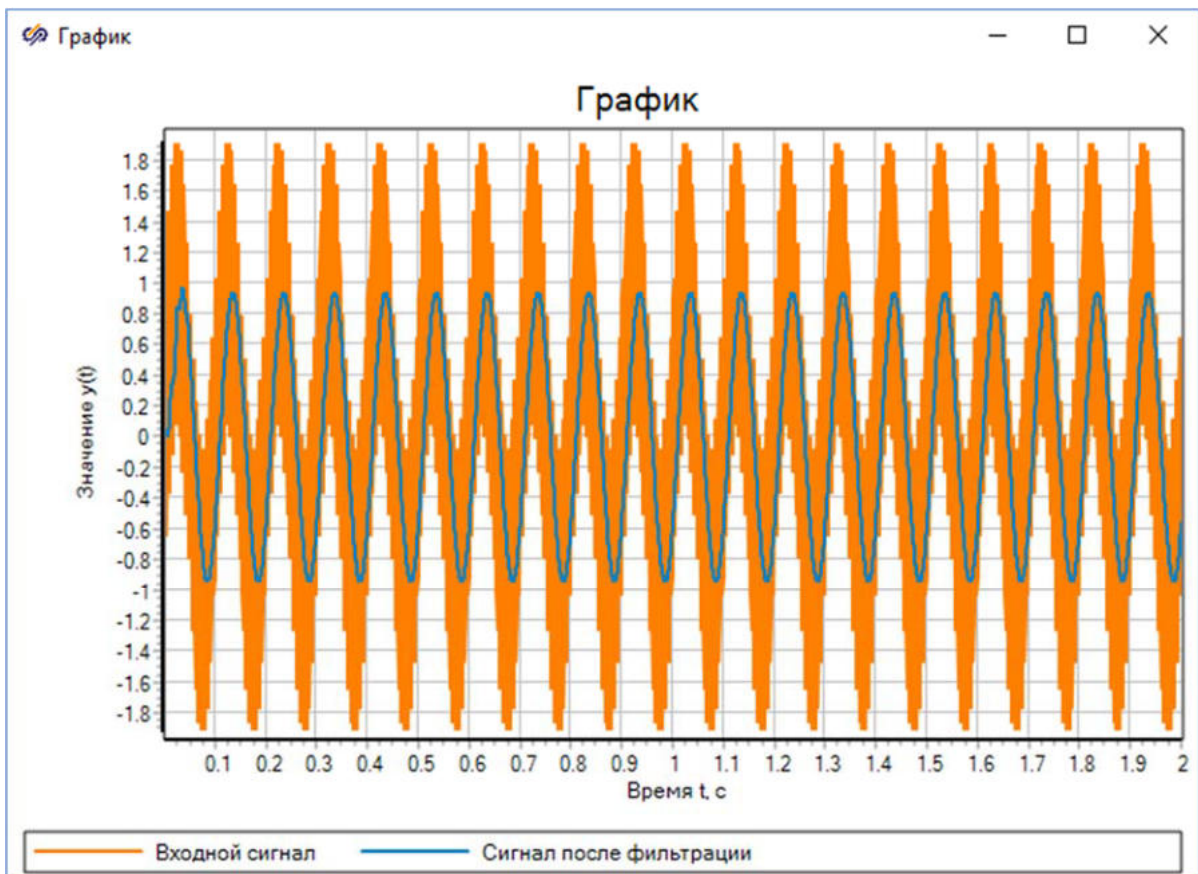


Рис. 41. Окно блока "Временной график" с подписью "Сравнение входного сигнала и сигнала на выходе БИХ-фильтра".

Открыть окно **График** для блока **Временной график** с подписью **"Сравнение сигналов на выходе КИХ- и БИХ-фильтров"**. В окне **Свойства графика** на вкладке **Графики и оси** установить новые значения свойств (Рисунок 42):

- **"Название графика"** – **"Сигнал на выходе КИХ-фильтра"**
- **"Название графика"** на второй вкладке – **"Сигнал на выходе БИХ-фильтра"**
- **"Максимум"** в колонке **"Ось X"** – **"2"**

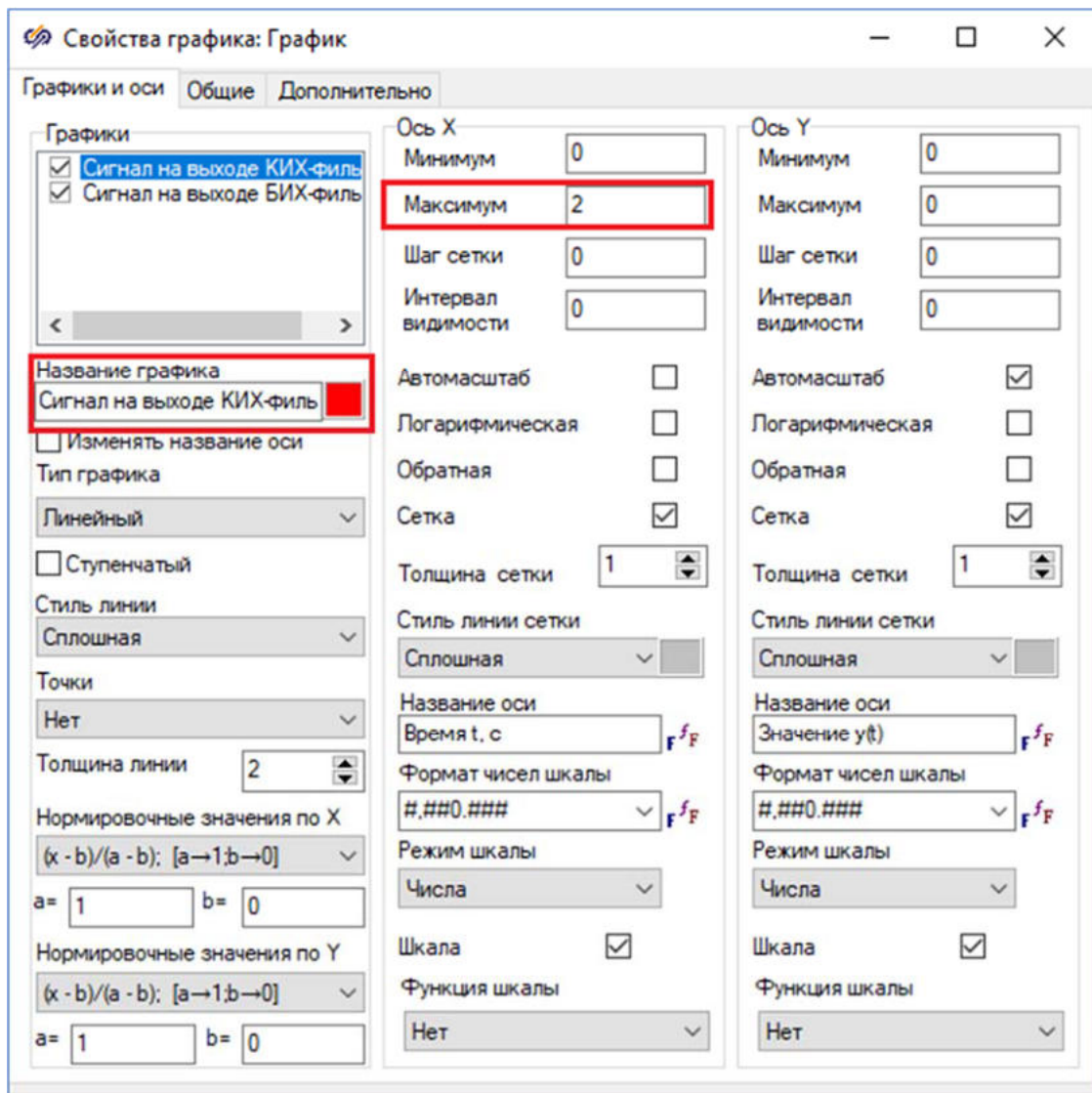


Рис. 42. Окно "Свойства графика" с выделенными свойствами, которые необходимо изменить.

После изменения свойств графика необходимо закрыть окно нажатием на кнопку **Ok**. Полученный график должен соответствовать рисунку (Рисунок 43).

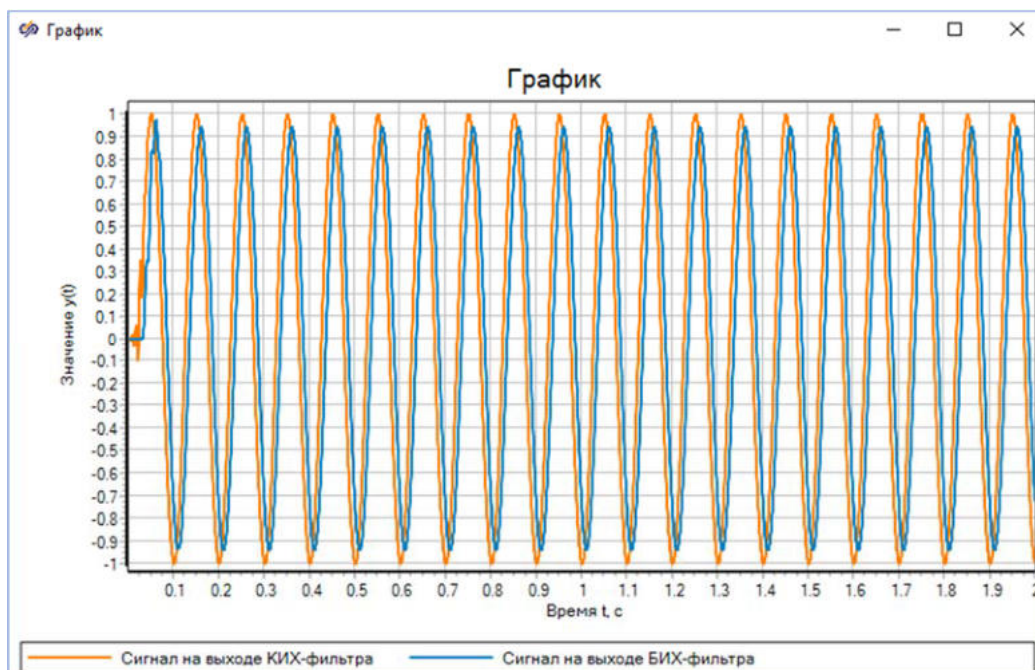


Рис. 43. Окно блока "Временной график" с подписью "Сравнение сигналов на выходе КИХ- и БИХ-фильтров".

Из полученного графика видно, что КИХ-фильтр вносит задержку в сигнал, получаемый на выходе из фильтра. В первые секунды обработки сигнала БИХ-фильтр вызывает искажения. Различие амплитуд двух сигналов связано с неравномерностью в полосе пропускания БИХ-фильтра. Допустимое значение амплитуды в зоне пропускания рассчитывается по формуле $10^{0.5/20} = 0.944$, где 0.5 дБ - значение допустимого уровня неравномерности АЧХ в полосе пропускания. Для проверки соответствия этому графика необходимо использовать инструмент **Курсор**. Для этого следует нажать правой кнопкой мыши на **График** и выбрать **Курсор** (Рисунок 44).

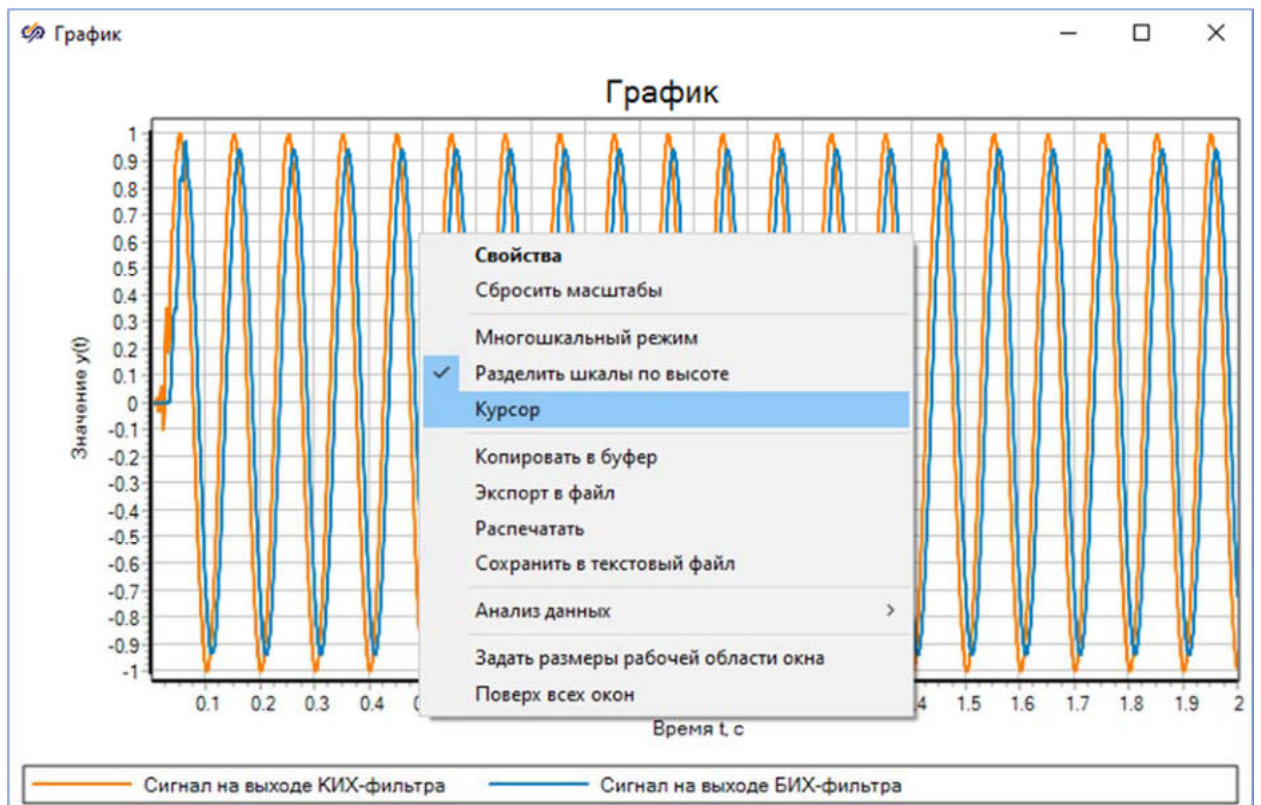


Рис. 44. Окно блока "Временной график" с подписью "Сравнение сигналов на выходе КИХ и БИХ-фильтров" с выделенной кнопкой "Курсор".

После установки курсора мыши в верхней точки графика "Сигнал на выходе БИХ-фильтра", становится очевидно, что значения амплитуды графика после установления сигнала не превышают значения "0.94" (Рисунок 45).

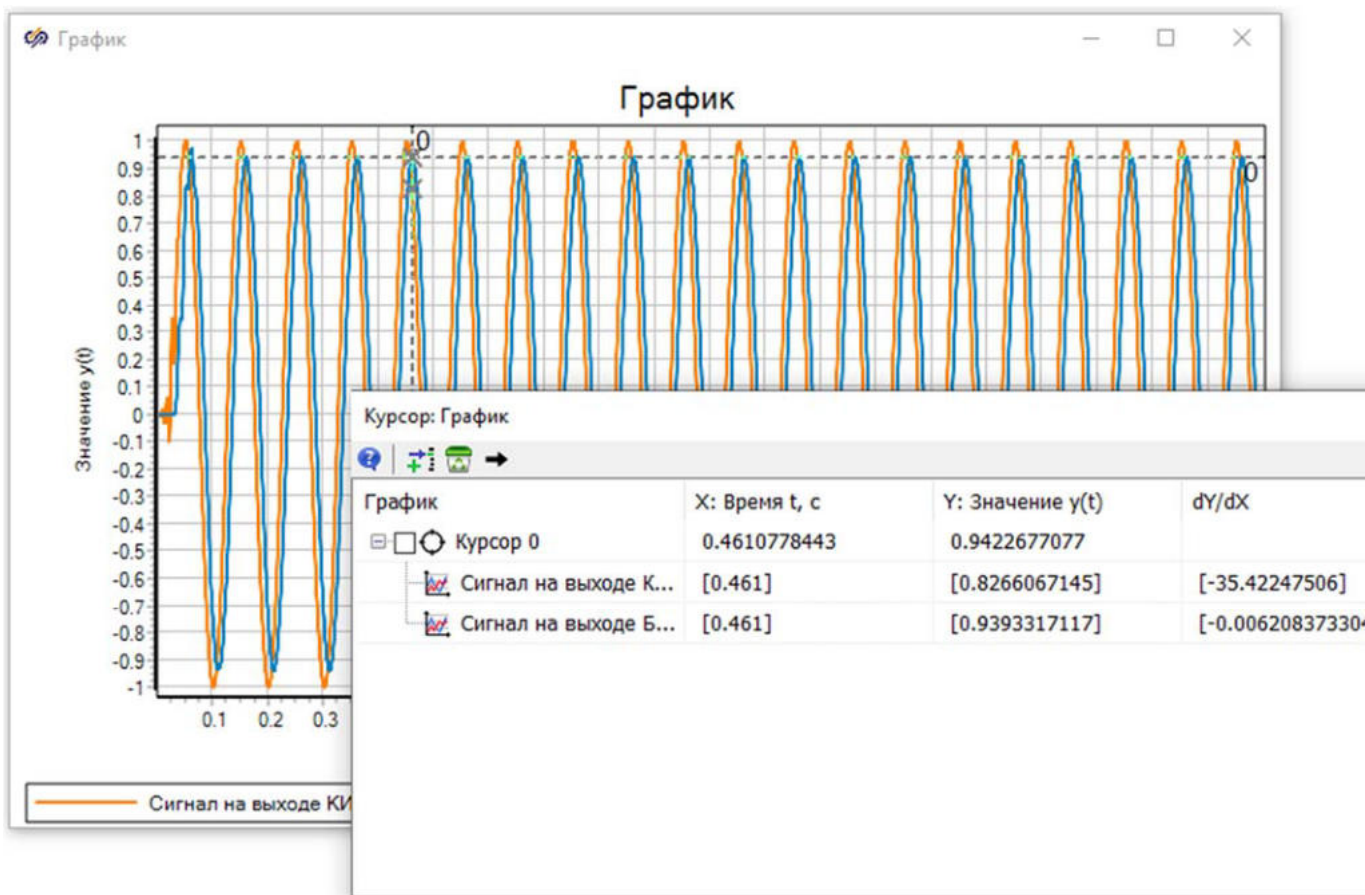


Рис. 45. Окно блока "Временной график" с подписью "Сравнение сигналов на выходе КИХ- и БИХ-фильтров" при использовании инструмента "Курсор".

Контрольные вопросы

1. Как рассчитать импульсную характеристику фильтра в SimInTech?
2. Как рассчитать АЧХ фильтра в SimInTech?
3. Каким образом возможно построить временной график сигнала в SimInTech?
4. Каким образом возможно построить график спектра сигнала в SimInTech?

Лабораторная работа № 5

Определение характеристик цифрового фильтра

Цель работы

- Приобрести навыки работы для проектирования цифровых БИХ-фильтров в SimInTech

Задачи работы

- **Ознакомиться** с основными типами и характеристиками цифровых БИХ-фильтров
- **Освоить** методы проектирования БИХ-фильтров частотной селекции
- **Освоить** основные способы построения частотных характеристик для цифровых фильтров
- **Исследовать** эффективность обработки сигнала БИХ-фильтром

Объект исследования

Фильтр частотной селекции – это устройство, пропускающее или подавляющее частоты определенного диапазона в составе спектра входного сигнала. Это необходимо для выделения полезного сигнала и подавления его нежелательных составляющих, например, шума и помех.

Существуют четыре основных типа фильтров частотной селекции: низкочастотный (НЧ), высокочастотный (ВЧ), полосовой (П) и режекторный (Р).

При разработке цифрового фильтра частотной селекции исходными данными являются:

- частота дискретизации (sampling frequency) – f_d (или F_d)
- частоты среза полосы пропускания (Bandpass frequency) – f_{c1}, f_{c1}' (или $F_{nпрон}$) и частоты среза зоны непрозрачности – f_{c2}, f_{c2}' (это справедливо для НЧ и режекторного фильтра; для ВЧ и полосового фильтра частоты среза меняются местами) (или $F_{подавл}$)
- допустимый уровень неравномерности АЧХ в полосе пропускания (Bandpass ripple) – $\varepsilon_{1доп}$ (или $A_{nпрон}$)
- допустимый уровень боковых лепестков АЧХ в зоне непрозрачности (Bandstop ripple) – $\varepsilon_{2доп}$ (или $A_{подавл}$)

Фильтры с бесконечной импульсной характеристикой или, БИХ-фильтры, (IIR – "Infinite impulse response") – это наиболее общий класс цифровых цепей (моделей, состоящих из совокупности цифровых устройств), для которых вход $x[n]$ и выход $y(n)$ связаны следующим линейным разностным уравнением M -го порядка:

После определения текущего значения выхода (при $a_0 = 1$) формула приобретает следующий вид:

Последнее равенство показывает следующее:

- текущее выходное значение БИХ-фильтра зависит как от L последних входных отсчетов, так и от предыстории выхода фильтра – M последних выходных отсчетов (что нехарактерно для КИХ-фильтров)
- класс КИХ-цепей (класс моделей с конечной импульсной характеристикой) является подмножеством класса БИХ-цепей (это частный случай при $M = 0$)
- для проектирования БИХ-фильтра необходимо рассчитать его коэффициенты a_k и b_r , $k = [1, M]$, $r = [1, L]$

Цель оптимального синтеза БИХ-цепей сводится к нахождению структуры, обладающей минимальными порядками L и M векторов коэффициентов a_k и b_r , при которых характеристики цепи будут отклоняться от идеальных (требуемых) в пределах заданной погрешности. При проектировании необходимо задать частоту дискретизации, полосы пропускания, зоны подавления, уровни пропускания и подавления. Очевидно, что чем больше L и M , тем точнее воспроизводятся частотные характеристики цепи. Тем не менее возможное увеличение L и M ограничено техническими ресурсами той вычислительной среды, в которой будет происходить обработка сигнала.

Для описания свойств БИХ-фильтра (помимо линейного разностного уравнения), отражающих, в конечном счете, характеристики его частотной избирательности обе части разностного уравнения БИХ-фильтра подвергаются Z -преобразованию по теореме о смещенной последовательности и находится отношение изображения выхода к изображению входа, в результате получается передаточная функция в виде отношения полиномов от z^{-1} :

Корни уравнения $K_L(z) = 0$ являются нулями передаточной функции, корни $D_M(z) = 0$ – ее полюсами. Для устойчивости цифровой цепи необходимо и достаточно, чтобы ее полюсы находились внутри круга единичного радиуса на комплексной Z -плоскости. Круг единичного радиуса с центром в начале координат является областью устойчивости фильтра на карте нулей и полюсов, а окружность – колебательной границей устойчивости. Если хотя бы один из корней расположен рядом с границей (то есть значение его модуля близко к единице), то неточное представление коэффициентов или их небольшие отклонения могут привести к неустойчивости. Поэтому, чем ближе полюсы к началу координат и, соответственно, дальше от окружности, тем меньшее влияние может оказать "нестабильность" коэффициентов на устойчивость (свойство робастности цепи). Значит, при выборе того или иного метода проектирования одним из критериев является вид **карты нулей и полюсов**. Более предпочтительны те методы, при которых получены корни характеристического уравнения, расположенные ближе к началу координат.

Описание частотных характеристик фильтра получается из передаточной функции при замене: $z = e^{j\omega T}$. Причем модуль комплексной функции $H(e^{j\omega T})$ – АЧХ, а аргумент – ФЧХ. Изменение фазовой характеристики следует рассматривать как вносимую фильтром групповую задержку по времени (ГВЗ). Смысл групповой задержки заключается в следующем: реакция физически реализуемого фильтра не может возникнуть раньше воздействия на его входе. Также любой фильтр имеет задержку на выходе на некоторую величину. Таким образом, сигналы разной частоты на выходе одного и того же БИХ-фильтра задерживаются на разное время. При этом происходит сдвиг фазы сигнала на выходе относительно сигнала на входе. Изменение временного сдвига сигнала, образующегося в результате фазового сдвига, характеризуется групповой задержкой.

Другими способами получения АЧХ и ФЧХ фильтра являются спектральный и гармонический анализ.

Построение частотных характеристик с помощью спектрального анализа было рассмотрено в 1-3 лабораторных работах РГТУ по цифровой обработке сигналов.

Основой **гармонического анализа** служит разложение сигнала на его составляющие гармонические компоненты. Для построения частотных характеристик системы с применением гармонического анализа необходимо разложить сигнал в ряд Фурье.

Временные характеристики: импульсная (ИХ) и переходная характеристики отражают реакцию фильтра на соответствующие входные сигналы во временной области. Импульсная характеристика (реакция на единичный импульс) БИХ-фильтра не ограничена во времени, в отличие от КИХ-фильтров, рассмотренных в лабораторной работе № 2 РГТУ "**Проектирование КИХ-фильтров. Исследование прохождения сигнала через КИХ-фильтр**".

В практике синтеза цифровых БИХ-фильтров частотной селекции наибольшее применение нашли так называемые косвенные методы расчета, использующие хорошо разработанный аппарат синтеза аналоговых фильтров с последующим переходом к эквивалентным, при определенных условиях, цифровым звеньям: фильтры Чебышёва, Золотарева, Баттерворта и другие. В данной лабораторной работе будут исследованы некоторые из них (фильтр Чебышёва, Беттерворта и фильтр эллиптического типа).

Выполнение лабораторной работы

Задание:

- разработана модель цифрового фильтра при помощи групп библиотек Автоматика и блоков библиотеки Анализ и оптимизация
- показан расчет фильтров с помощью инструмента Проектирование и анализ фильтров
- построены графики АЧХ и ФЧХ фильтров

- произведен анализ спроектированных БИХ-фильтров на основе их характеристик и свойств

Создание нового проекта

Для создания нового проекта необходимо выполнить следующие действия:

1. В главном окне SimInTech нажать кнопку **Файл** и выбрать пункт **Новый проект**
2. В выпадающем меню выбрать пункт **Схема модели общего вида** (Рисунок 1).

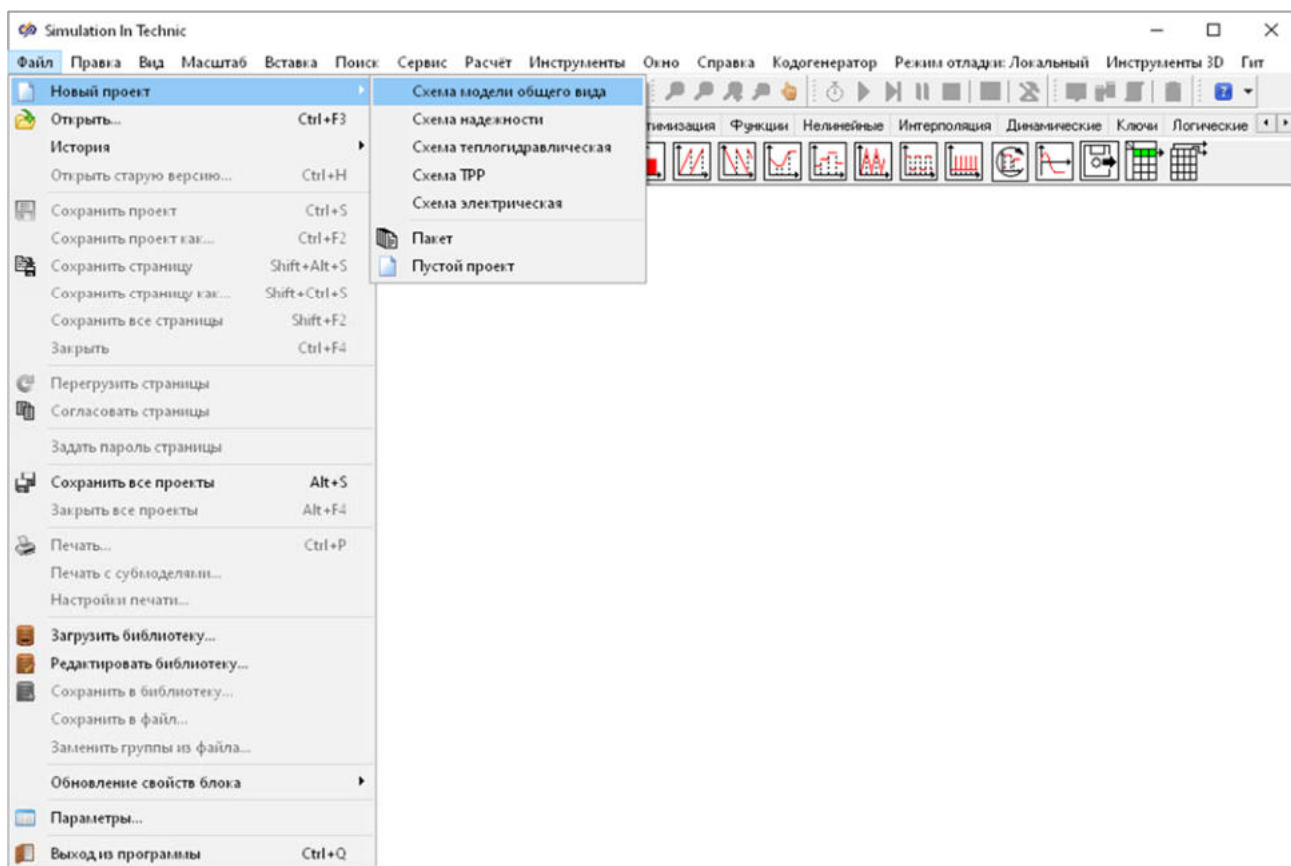


Рис. 1. Главное окно SimInTech с выделенным меню создания нового проекта.

3. Сохранить проект с названием по умолчанию или указать желаемое имя проекта

Разработка модели

Для анализа работы фильтра требуется разместить в рабочей области окна проекта следующие блоки:

- 1 блок **Цифровой фильтр** из подменю **Фильтрация** библиотеки **Цифровая обработка сигналов**

- 1 блок Гармонический анализатор из вкладки Анализ и оптимизация. С помощью данного блока будут строиться частотные характеристики и производиться оценка АЧХ и ФЧХ системы
- 2 блока Фазовый портрет из вкладки Вывод данных. Данные блоки реализуют отображение текущих результатов моделирования на фазовой плоскости для одной пары или нескольких пар фазовых переменных

Перечисленные блоки необходимо соединить между собой с помощью линий связи и задать подписи к блокам согласно рисунку (Рисунок 2).

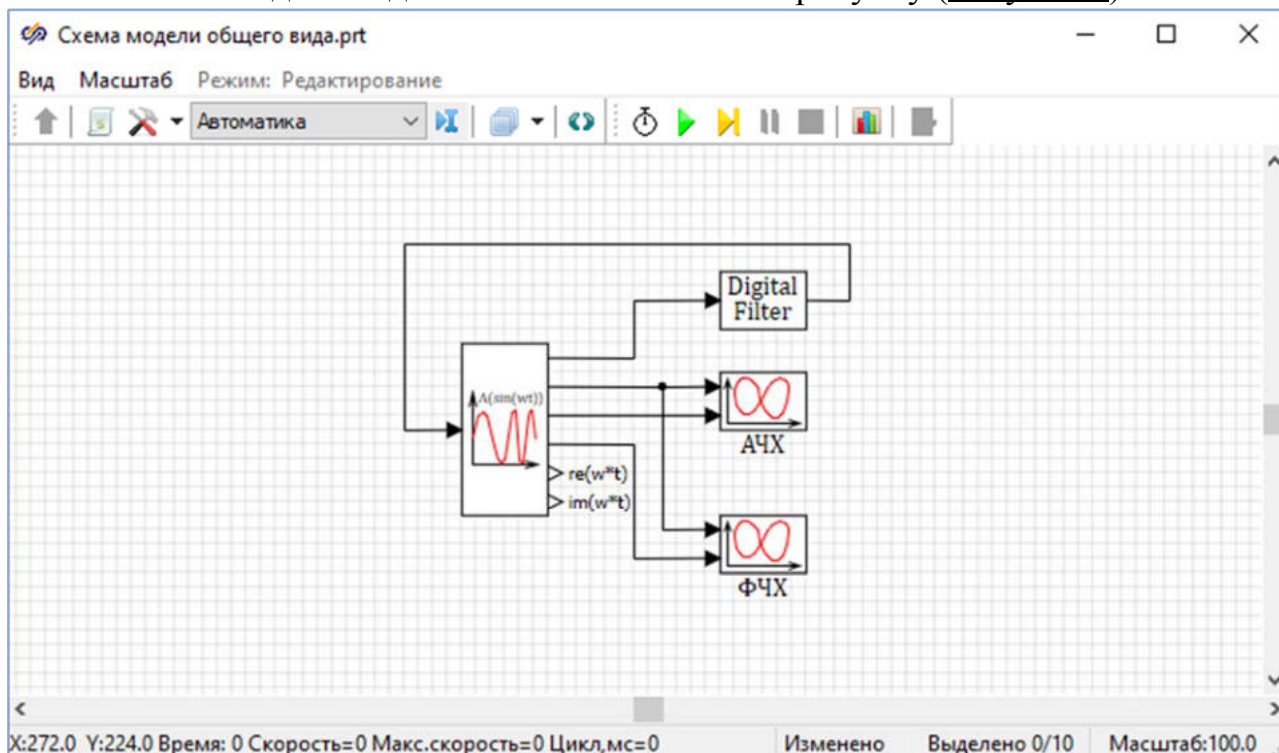


Рис. 2. Схема, содержащая блоки, необходимые для анализа цифрового фильтра.

Задание свойств блоков

В данной работе будут рассматриваться модели ВЧ-фильтра Чебышёва 1-го рода, Баттерворта и эллиптического типа.

Требуется задать свойства блоку Цифровой фильтр, для этого:

1. Двойным нажатием левой кнопкой мыши по блоку Цифровой фильтр открыть окно Проектирование и анализ фильтров, в котором будут задаваться параметры фильтра (Рисунок 3).

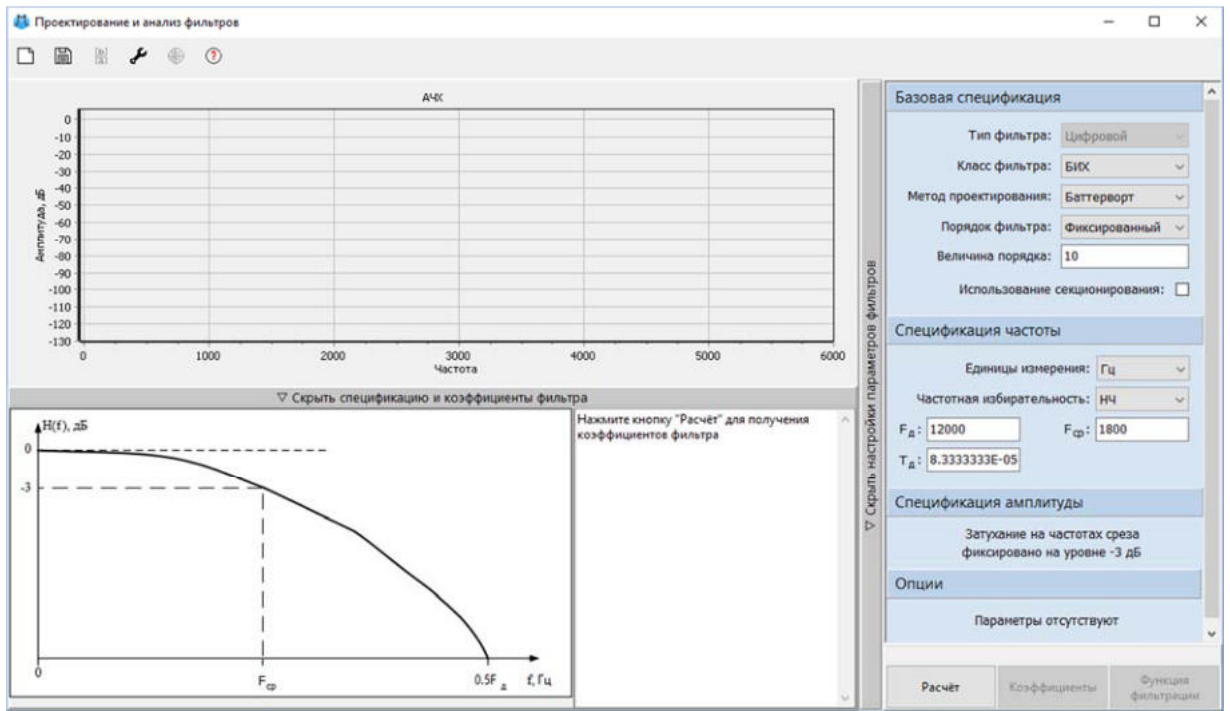


Рис. 3. Окно "Проектирование и анализ фильтров" блока "Цифровой фильтр" со значениями по умолчанию.

2. Необходимо рассчитать ВЧ-фильтр Чебышёва 1-го рода с частотой дискретизации $F_d = 1000$ Гц, частотой среза $F_{\text{прон}} = 150$ Гц, частотой подавления $F_{\text{подавл}} = 50$ Гц, амплитудой пропускания $A_{\text{прон}} = 0.5$ Дб и амплитудой подавления $A_{\text{подавл}} = 50$ Дб для минимального порядка фильтра. Для этого требуется задать данные параметры фильтра согласно рисунку (Рисунок 4) и нажать на кнопку Расчёт.

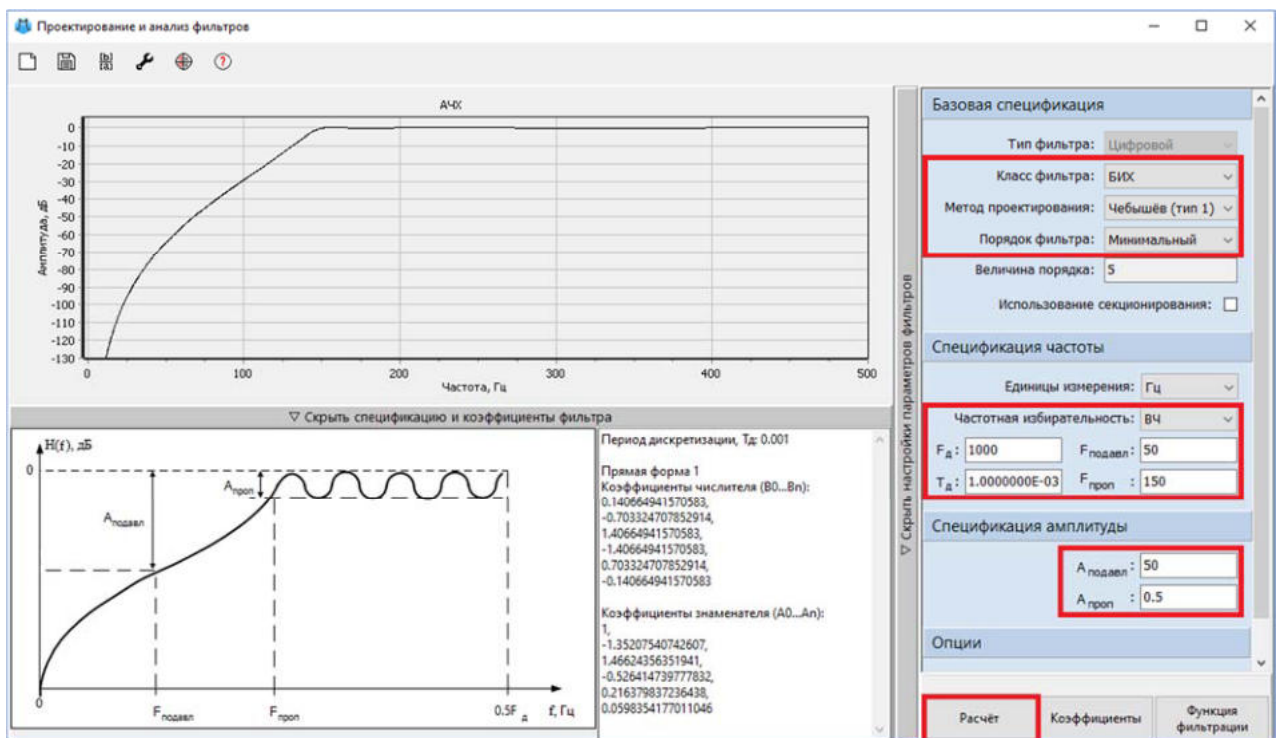


Рис. 4. Окно "Проектирование и анализ фильтров" блока "Цифровой фильтр" с установленными значениями параметров после нажатия на кнопку "Расчет". Расчетный минимальный порядок для фильтра Чебышёва в данном случае равен 5

3. Аналогично необходимо рассчитать высокочастотный фильтр Баттерворта с минимальным порядком. В окне Проектирование и анализ фильтров задать параметры и нажать на кнопку Расчет (Рисунок 5):

- "Fd" – "1000"
- "Fпроп" – "150"
- "Fподавл" – "50"
- "Апроп" – "0.5"
- "Аподавл" – "50"

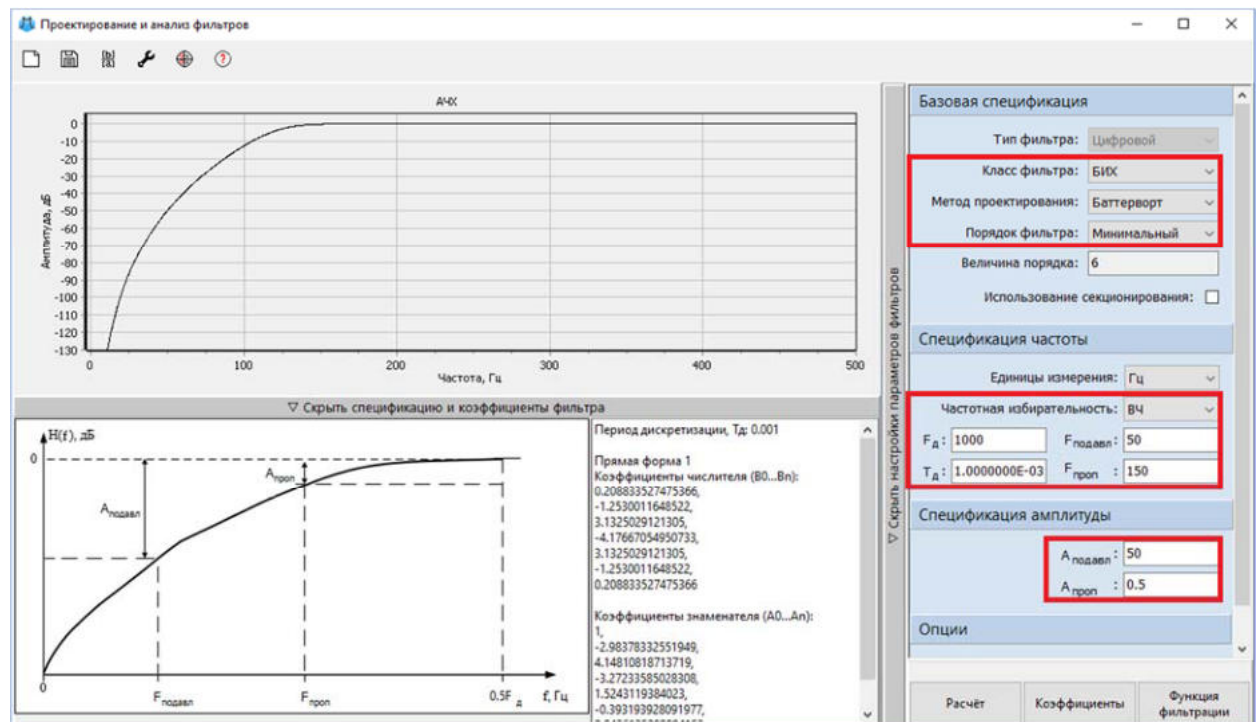


Рис. 5. Окно "Проектирование и анализ фильтров" блока "Цифровой фильтр" для фильтра Баттерворта. Расчетный минимальный порядок для фильтра Баттерворта равен 6

4. Для эллиптического типа фильтра минимальный порядок требуется рассчитать аналогичным образом. В окне Проектирование и анализ фильтров необходимо задать параметры фильтра и нажать на кнопку Расчет (Рисунок 6):

- "Fd" – "1000"

- "Fпроп" – "150"
- "Fподавл" – "50"
- "Aпроп" – "0.5"
- "Aподавл" – "50"

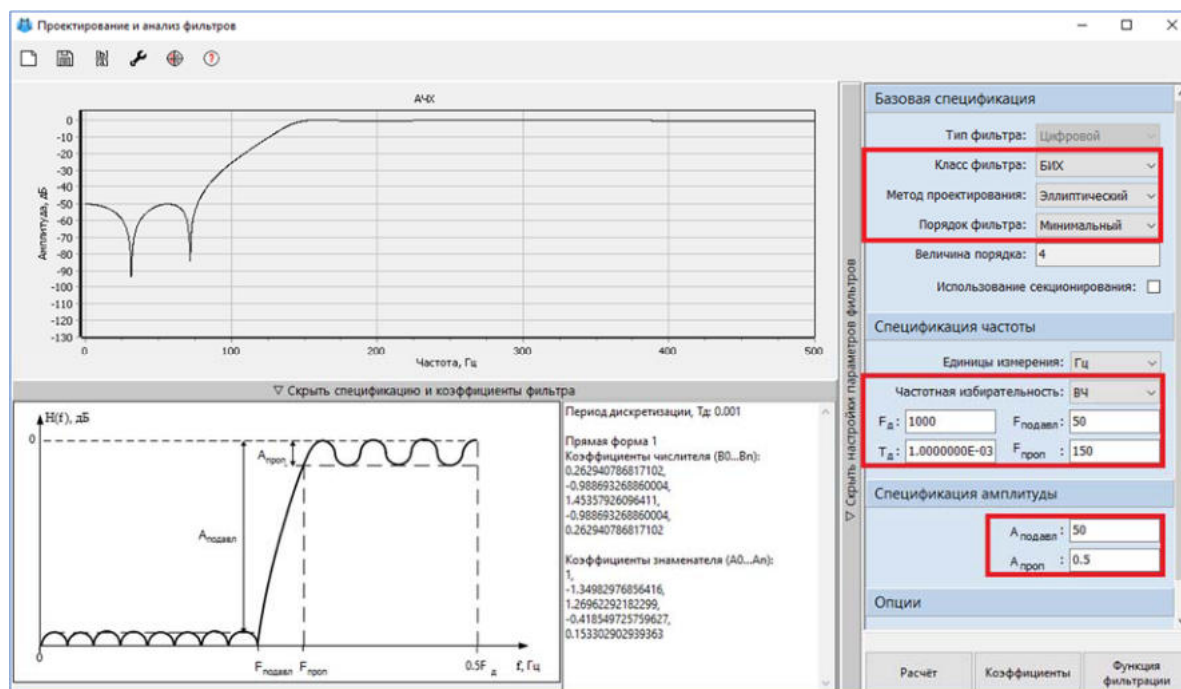


Рис. 6. Окно "Проектирование и анализ фильтров" блока "Цифровой фильтр" для фильтра эллиптического типа. По полученному расчету минимальный порядок фильтра равен 4

Таким образом, в работе будут исследоваться цифровые фильтры, порядок которых соответствует 4.

Для дальнейшего исследования требуется изменить свойства других блоков на схеме. Для блока Гармонический анализатор задать значения свойств согласно рисунку (Рисунок 7).

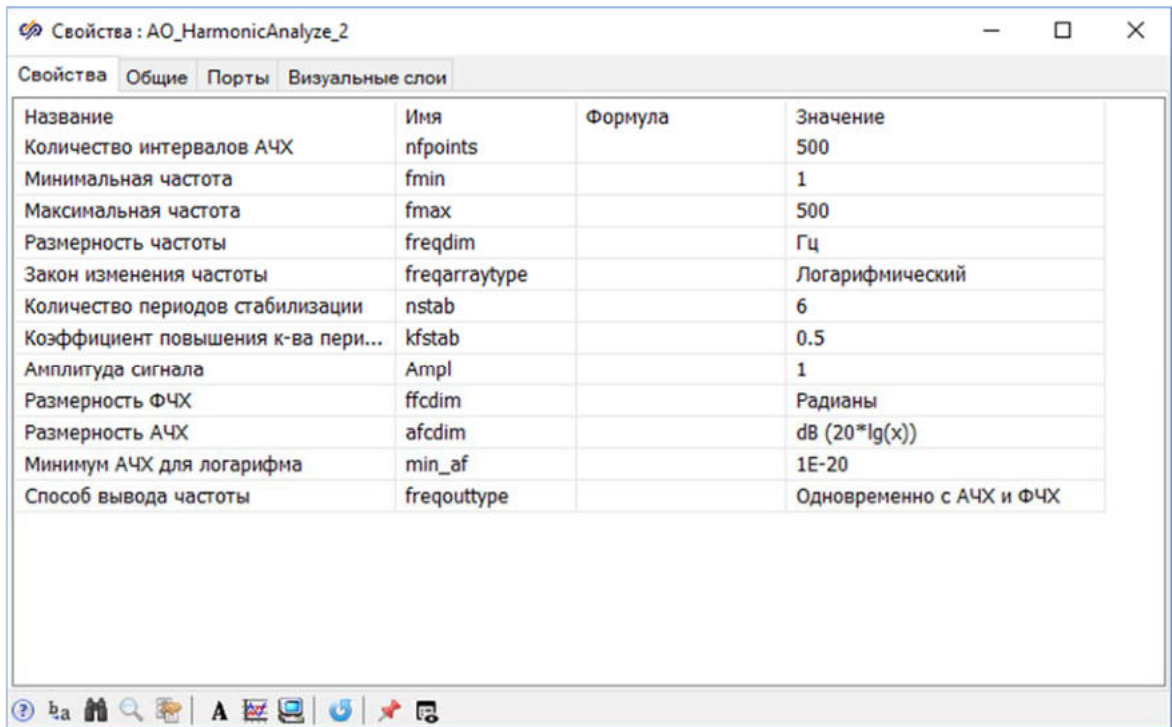


Рис. 7. Окно "Свойства" блока "Гармонический анализатор".

Настройка параметров расчёта

Перед запуском проекта необходимо увеличить время расчёта, так как блок **Гармонический анализатор** требует большее значение конечного времени для произведения расчётов, чем установленное по умолчанию. Требуется открыть окно **Параметры проекта** и в пункте **"Конечное время расчёта"** установить значение равным **"1e+6"** (Рисунок 8).

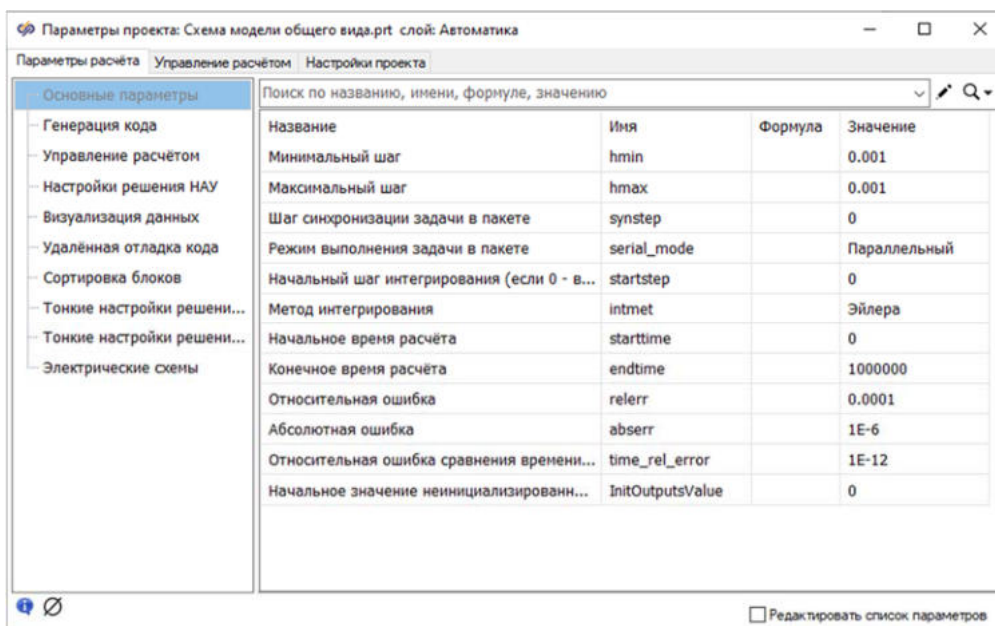


Рис. 8. Окно "Параметры проекта".

Перед тем, как приступить к выполнению следующего пункта данного задания, необходимо сохранить проект.

Исследование фильтра Чебышёва 1 рода

Далее необходимо исследовать фильтр Чебышёва 1 рода с 4 порядком. Для этого в разделе "Параметры фильтра" окна Проектирование и анализ фильтров порядок фильтра требуется изменить на "Фиксированный", равный "4", а метод проектирования фильтра – "Чебышёва (тип 1)". После этого необходимо произвести расчет фильтра нажатием кнопки Расчет.

Необходимо запустить модель на расчет нажатием на кнопку Пуск и дождаться окончания расчета.

После окончания расчета двойным нажатием левой кнопкой мыши по блоку Фазовый портрет с подписью "АЧХ" открыть график АЧХ БИХ-фильтра. График должен выглядеть аналогично рисунку (Рисунок 9).

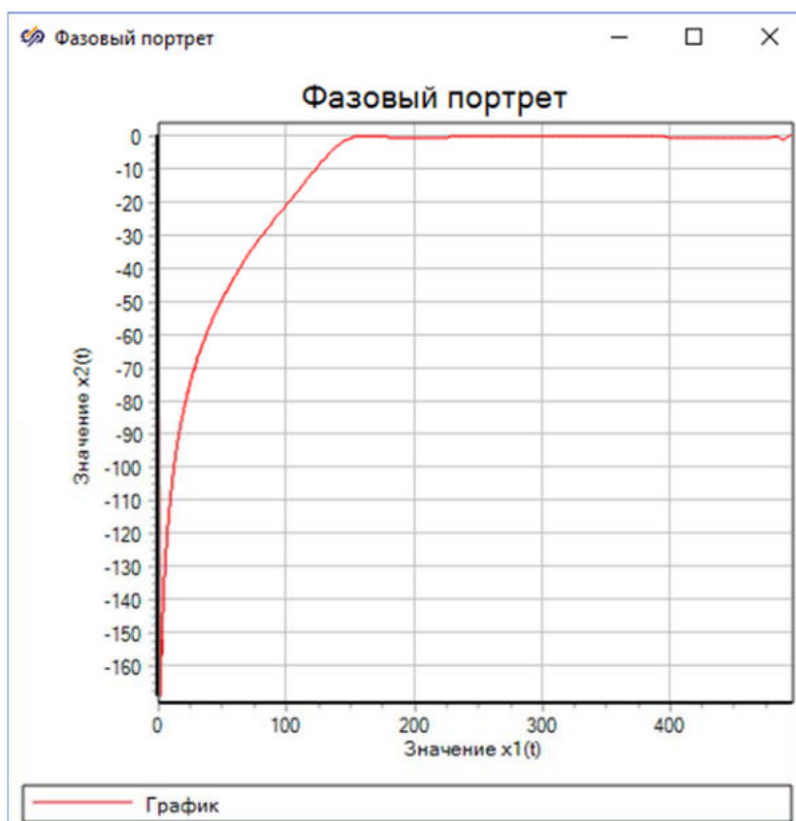


Рис. 9. График АЧХ цифрового БИХ-фильтра.

Необходимо настроить отображение результатов моделирования в блоке Фазовый портрет с подписью "АЧХ". Для этого требуется открыть Свойства графика и на вкладке Графики и оси в столбце "Ось X" задать название оси "Частота, Гц", в столбце "Ось Y" название оси "Амплитуда, дБ" (Рисунок 10).

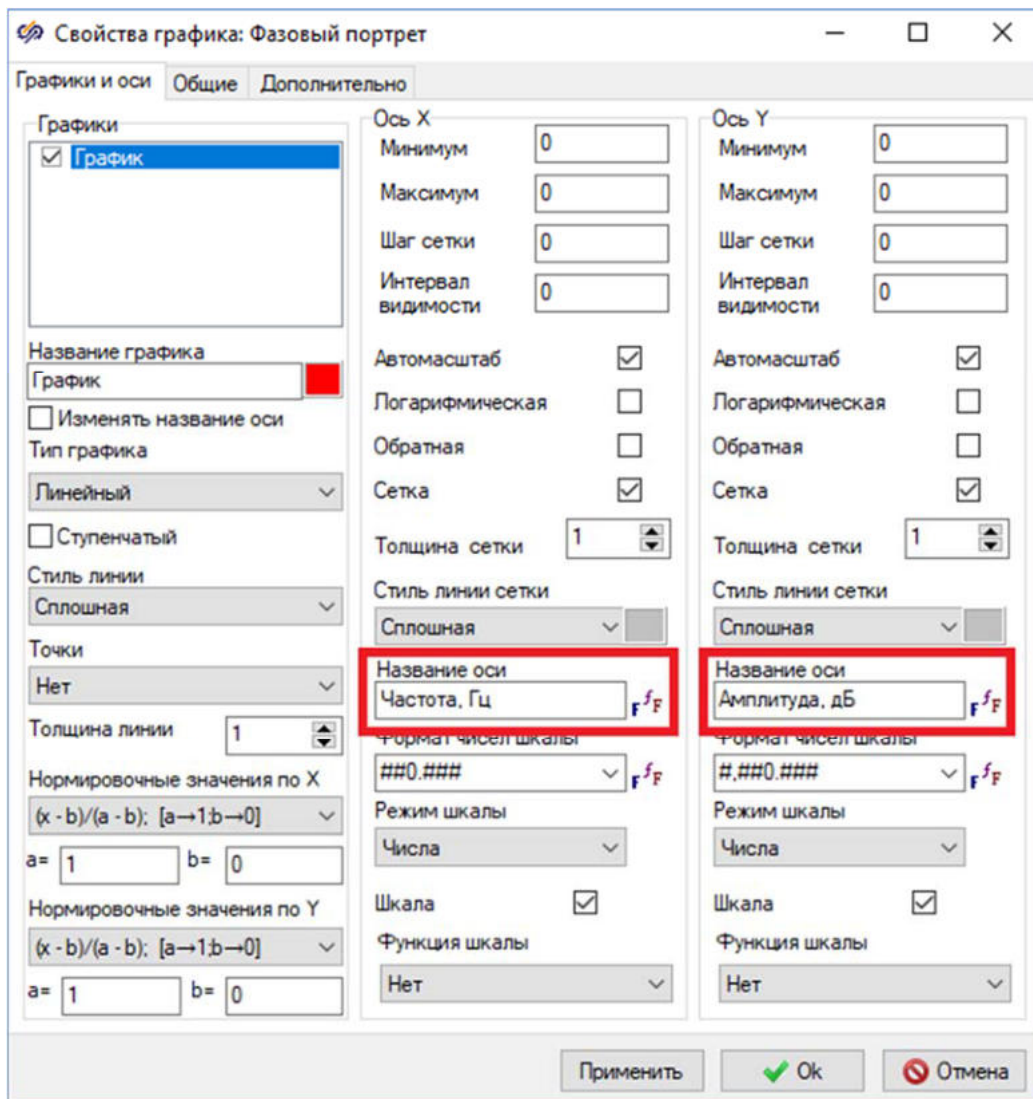


Рис. 10. Окно "Свойства графика" с измененными свойствами.

На вкладке **Общие** необходимо задать название графика **"АЧХ"** и отключить свойство **"Показывать легенду"** (Рисунок 11).

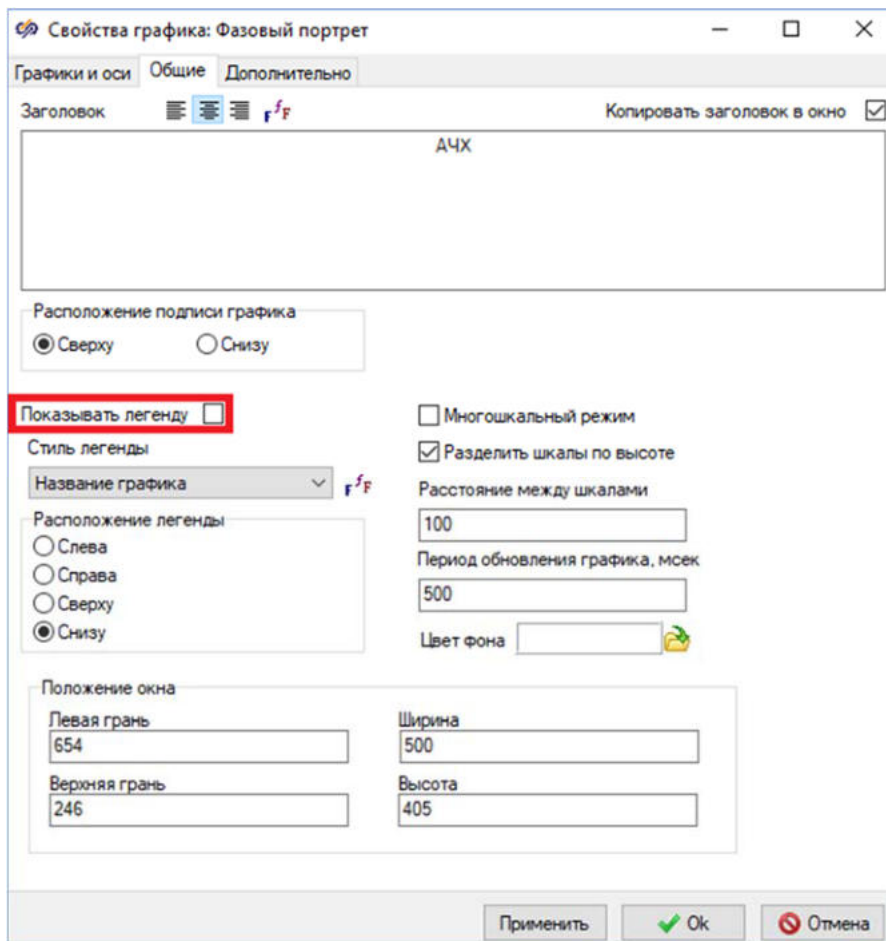


Рис. 11. Окно "Свойства графика" на вкладке "Общие".

После изменения свойств графика следует сохранить изменения и закрыть окно нажатием на кнопку **Ok**. В результате изменения свойств, график должен соответствовать рисунку (Рисунок 12).

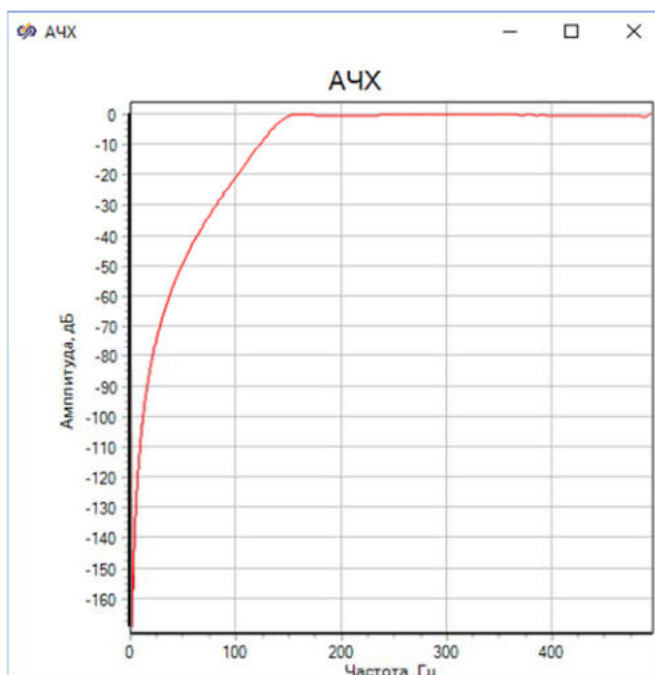


Рис. 12. График АЧХ цифрового БИХ-фильтра с измененными свойствами.

Построенный график АЧХ БИХ-фильтра Чебышёва 1 рода совпадает с построенным в окне Проектирование и анализ фильтров графиком "АЧХ" (Рисунок 13).

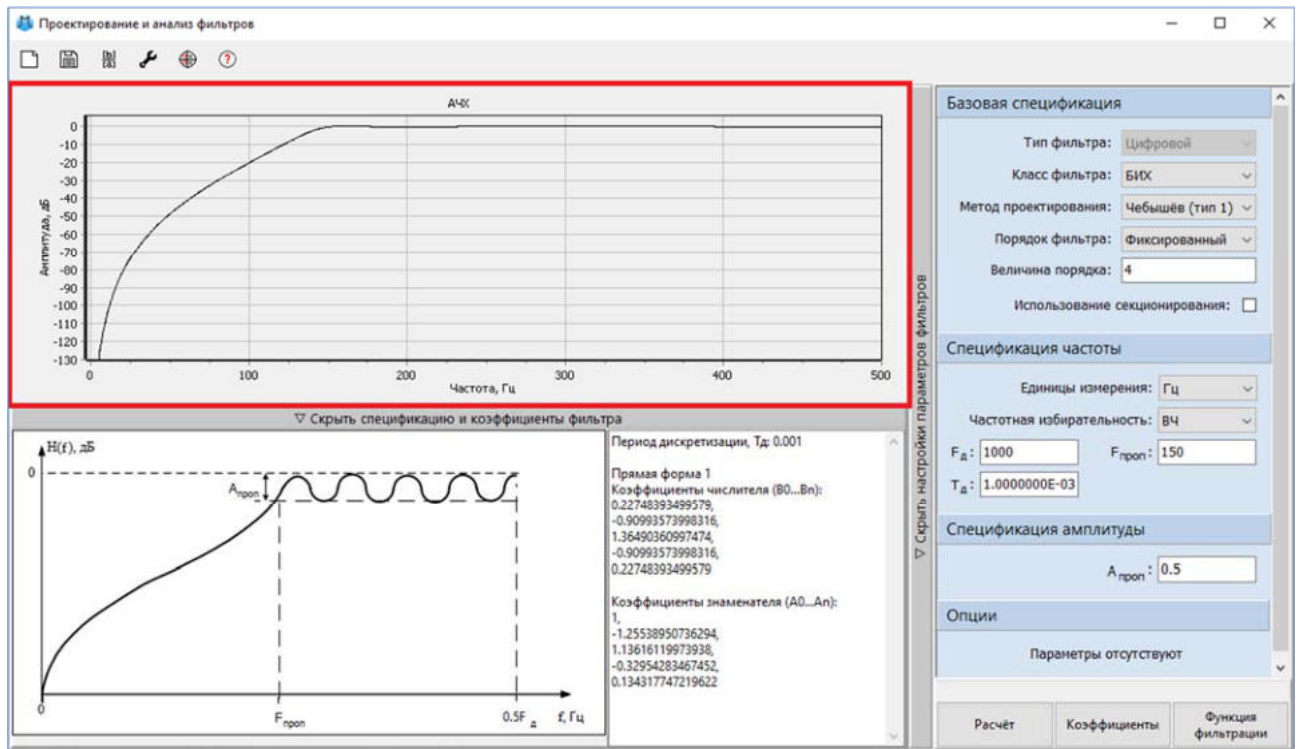


Рис. 13. Окно "Проектирование и анализ фильтров" блока "Цифровой фильтр" с выделенным графиком "АЧХ".

Аналогичным способом необходимо изменить параметры отображения блока Фазовый портрет с названием "ФЧХ": в окне Свойства графика на вкладке Графики и оси в столбце "Ось X" задать название оси "Частота, Гц", в столбце "Ось Y" название оси "Сдвиг фазы, рад." (Рисунок 14).

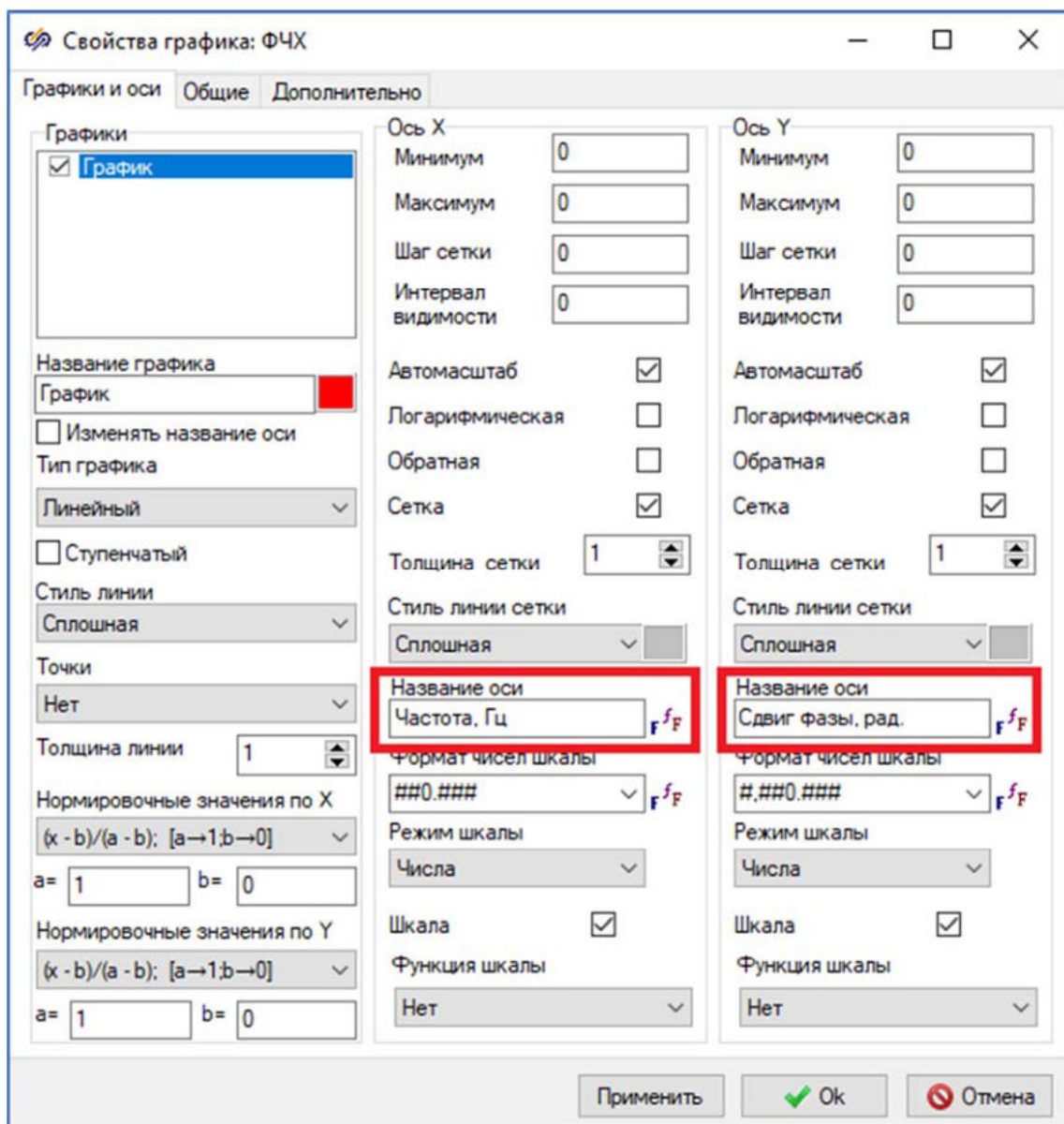


Рис. 14. Окно "Свойства графика".

На вкладке **Общие** задать название графика "**ФЧХ**" и отключить свойство "**Показывать легенду**", после чего сохранить изменения, нажав кнопку **Ок**. График должен соответствовать рисунку (Рисунок 15).

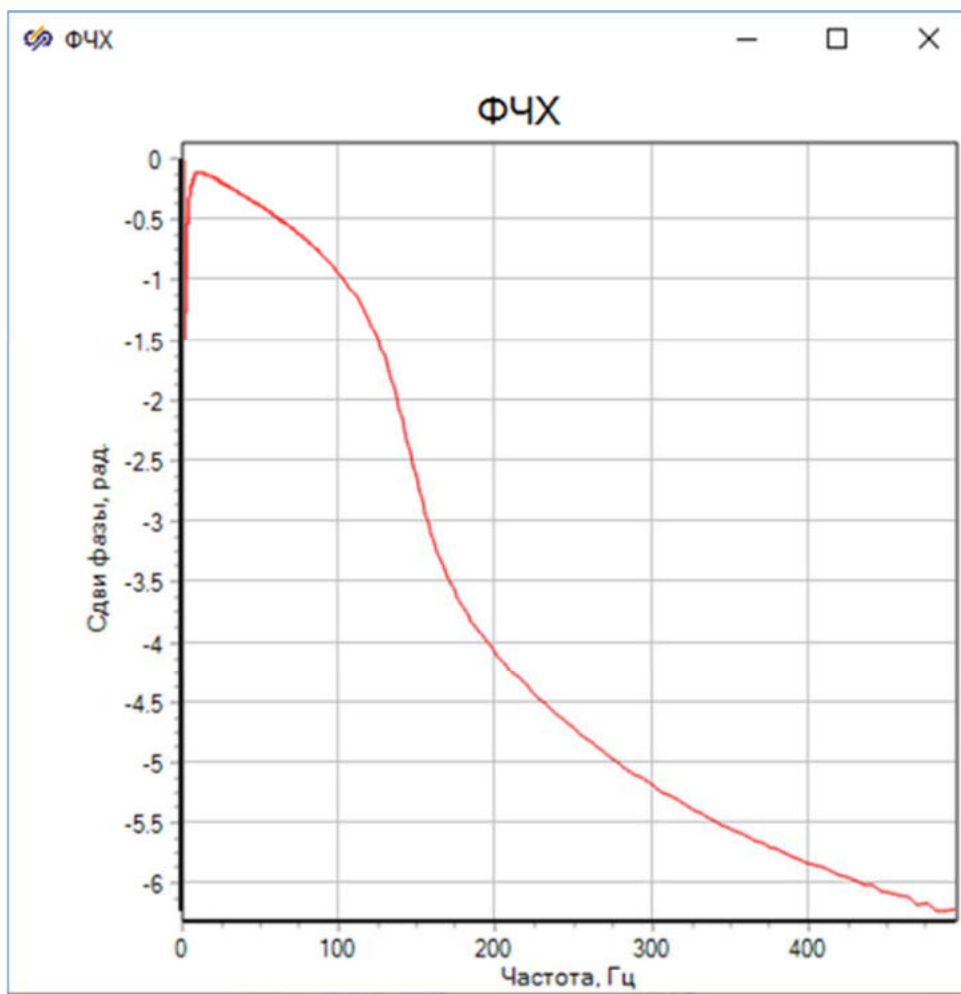


Рис. 15. График ФЧХ цифрового БИХ-фильтра с измененными свойствами.

Построенный график ФЧХ БИХ-фильтра Чебышёва 1 рода должен совпадать с построенным в окне Проектирование и анализ фильтров графиком "ФЧХ". Для того чтобы открыть этот график, необходимо в окне Проектирование и анализ фильтров, нажав правой кнопкой мыши, вызвать контекстное меню, в котором выбрать пункт "Тип характеристик", в выпадающем списке навести курсор на "Частотные характеристики" и выбрать пункт "ФЧХ" (Рисунок 16).

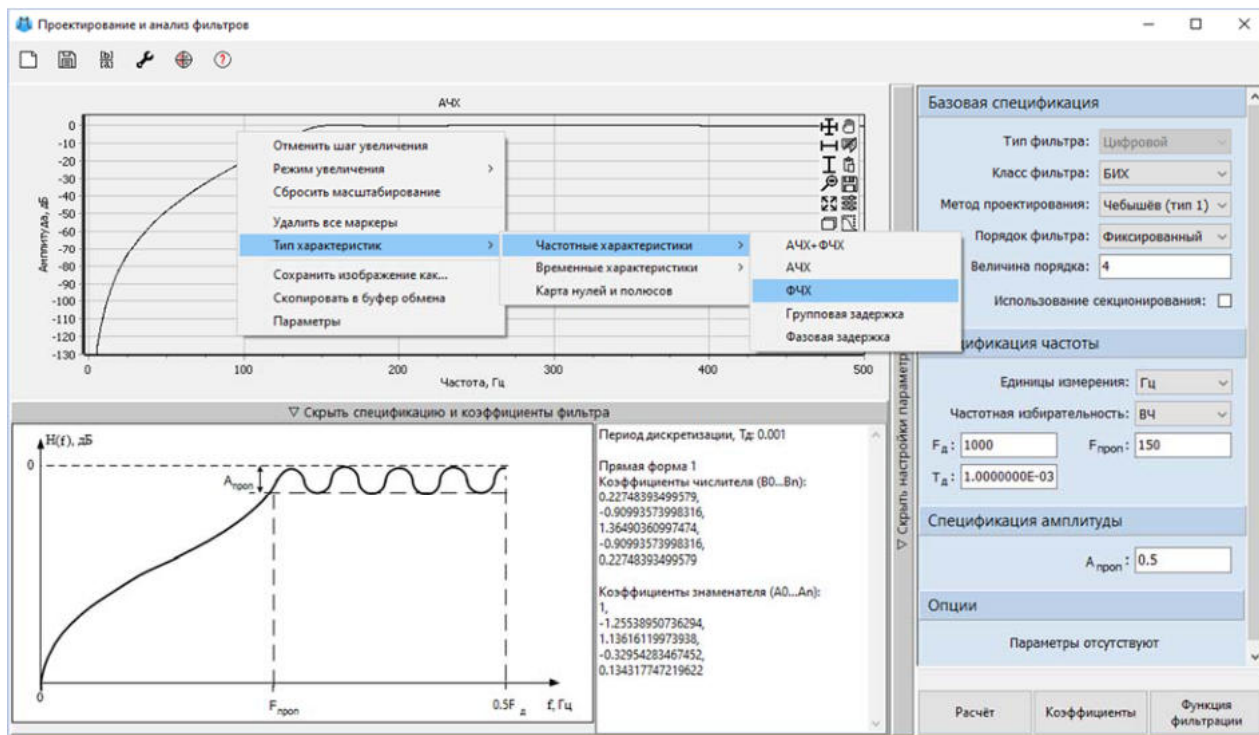


Рис. 16. Окно "Проектирование и анализ фильтров" блока "Цифровой фильтр" с выделенной кнопкой "ФЧХ".

График ФЧХ, построенный в окне Проектирование и анализ фильтров (Рисунок 17), совпадает с графиком в блоке Фазовый портрет с подписью "ФЧХ" (Рисунок 15).

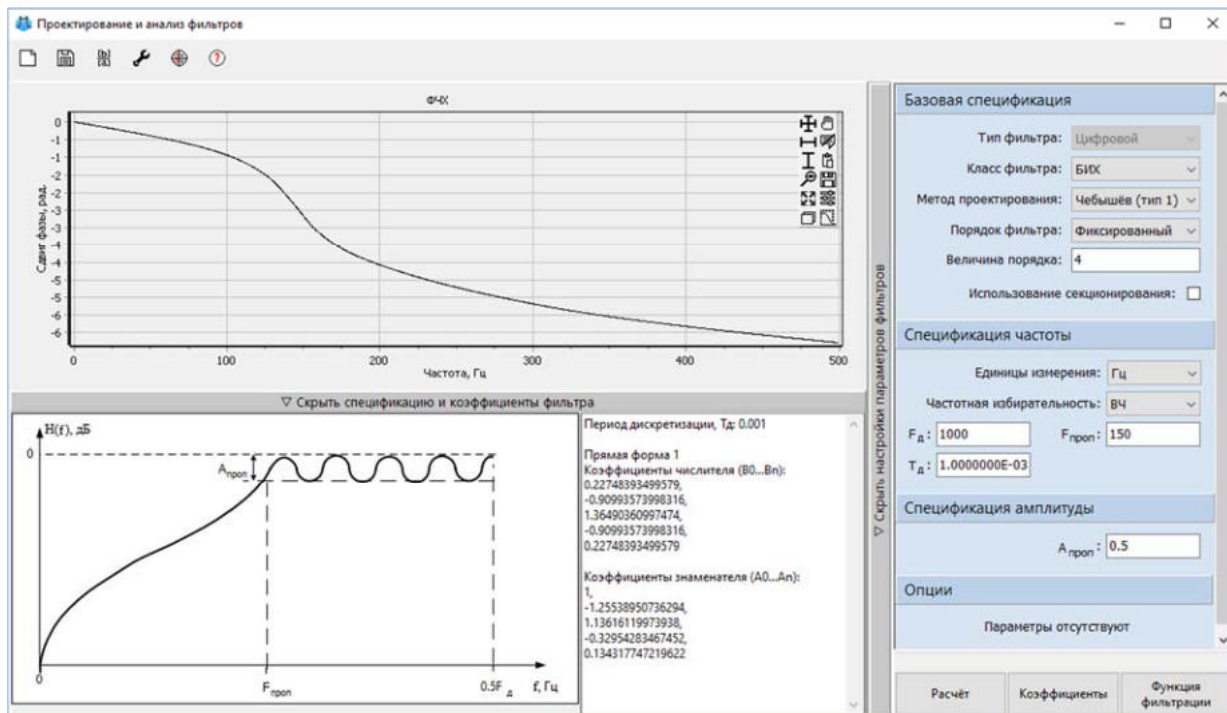


Рис. 17. График ФЧХ цифрового БИХ-фильтра.

По полученным с помощью проектирования фильтра графическим данным необходимо определить следующие параметры: неравномерность АЧХ в полосе пропускания, уровень затухания в зоне непрозрачности, отклонение ФЧХ от линейной в полосе пропускания и максимальное по модулю значение полюса.

Неравномерность АЧХ характеризует степень ее отклонения от прямой, параллельной оси частот, на уровне 0 дБ. Для поиска неравномерности АЧХ необходимо открыть окно Проектирование и анализ фильтров, рассмотреть график "АЧХ" и выбрать зону от 150 до 500 Гц с использованием кнопки Масштабирование области (Рисунок 18).

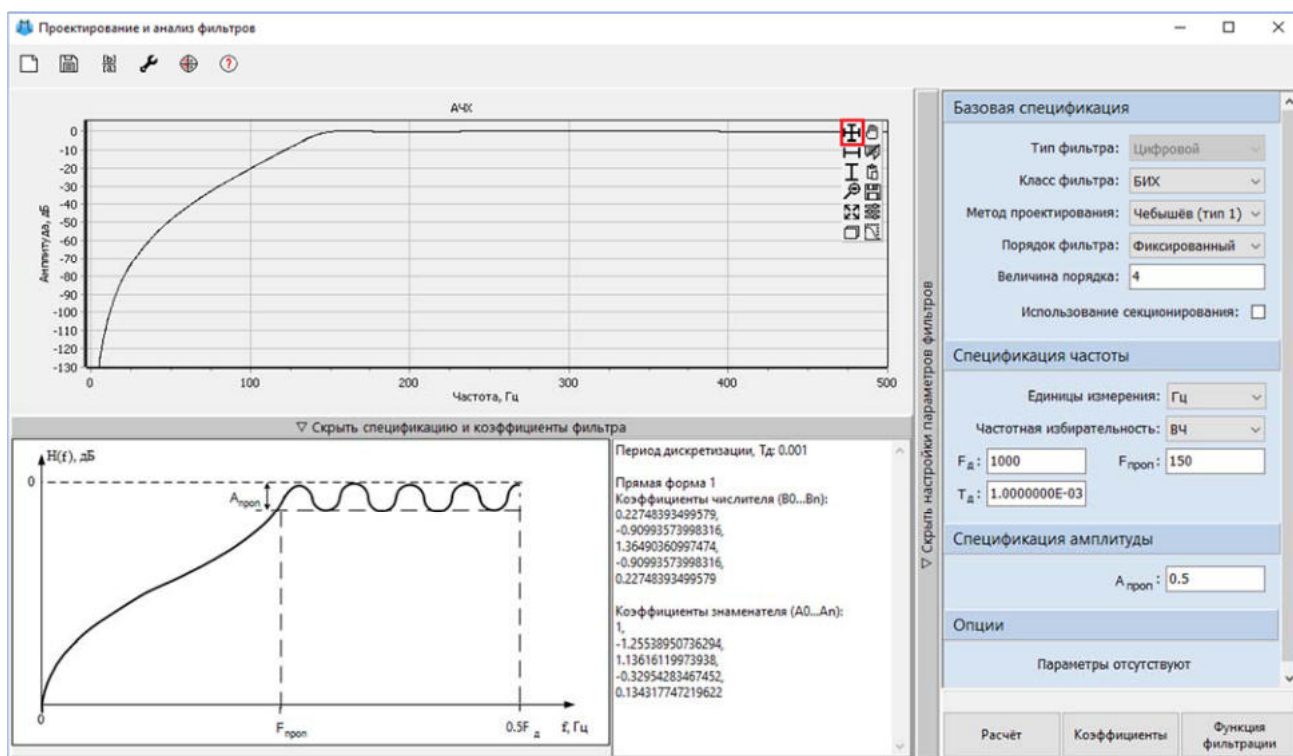


Рис. 18. График АЧХ в окне "Проектирование и анализ фильтров" с выделенной кнопкой "Масштабирование области".

После использования инструмента масштабирования отображаемая на графике область изменится согласно рисунку (Рисунок 19). На графике требуется найти точку (Рисунок 19) с минимальной амплитудой и частотой выше 150 Гц и отметить величину отклонения ее амплитуды от 0 дБ.

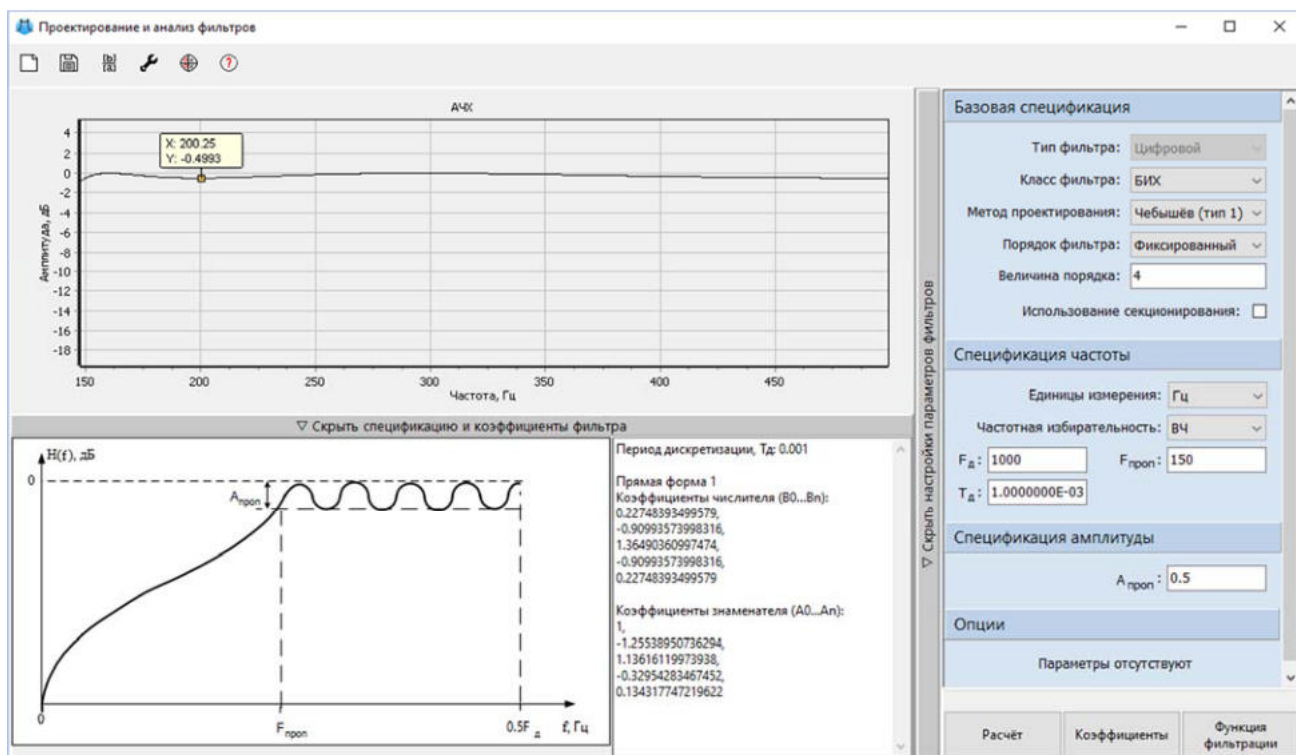


Рис. 19. График АЧХ в диапазоне от 150 до 500 Гц.

По графику (Рисунок 19) установлено, что неравномерность АЧХ в полосе пропускания соответствует примерно 0.5 дБ.

Далее необходимо определить уровень затухания в зоне непрозрачности АЧХ, то есть изменение амплитуды сигнала в области частот, где сигнал подавляется или отсутствует. Уровень затухания рассчитывается из разницы амплитуд сигнала, входящего в зону непрозрачности, и сигнала, выходящего из нее.

Для нахождения уровня затухания необходимо выделить, удерживая правую кнопку мыши, полосу от 50 до 150 Гц в окне графика АЧХ (Рисунок 20).

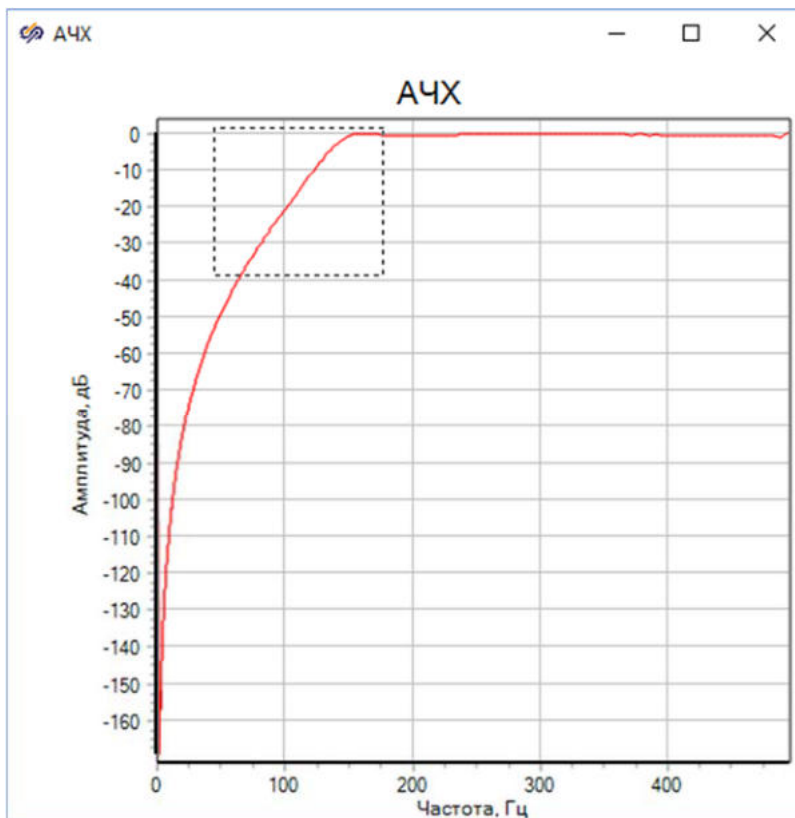


Рис. 20. Выделение области от 50 до 150 Гц на графике АЧХ.

После требуется зафиксировать значения амплитуды на выбранных частотах с помощью инструмента Курсор (Рисунок 21). Для этого необходимо вызвать контекстное меню графика и выбрать пункт Курсор.

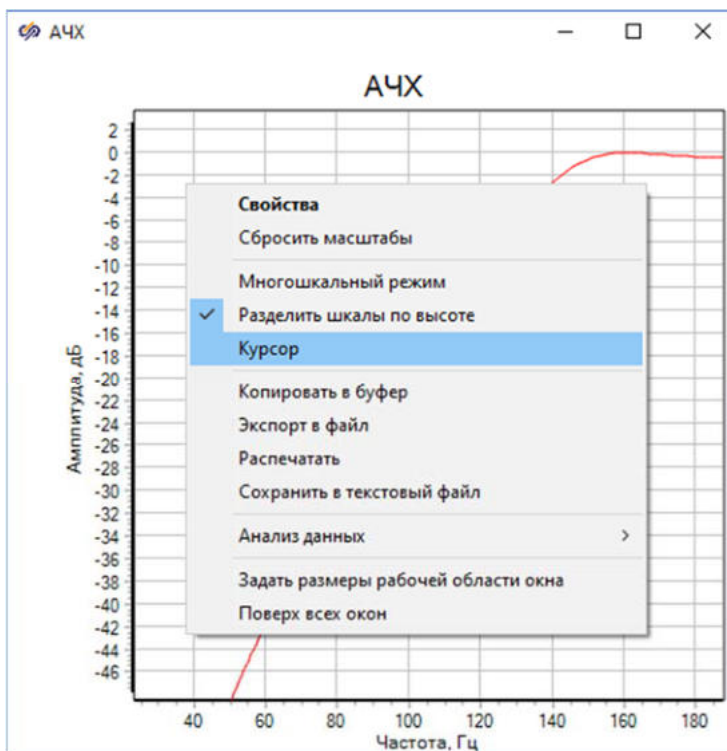


Рис. 21. Свойство "Курсор" графика АЧХ.

При нажатии на кнопку **Курсор** появляется окно **Курсор: АЧХ** ([Рисунок 22](#)) с таблицей, содержащей информацию о точке, на которую наведен курсор (крестик на графике). В колонке "**Х: Частота, Гц**" содержится значение функции по оси X, в колонке "**Y**" значение по оси Y, показывающее величину амплитуды в дБ.

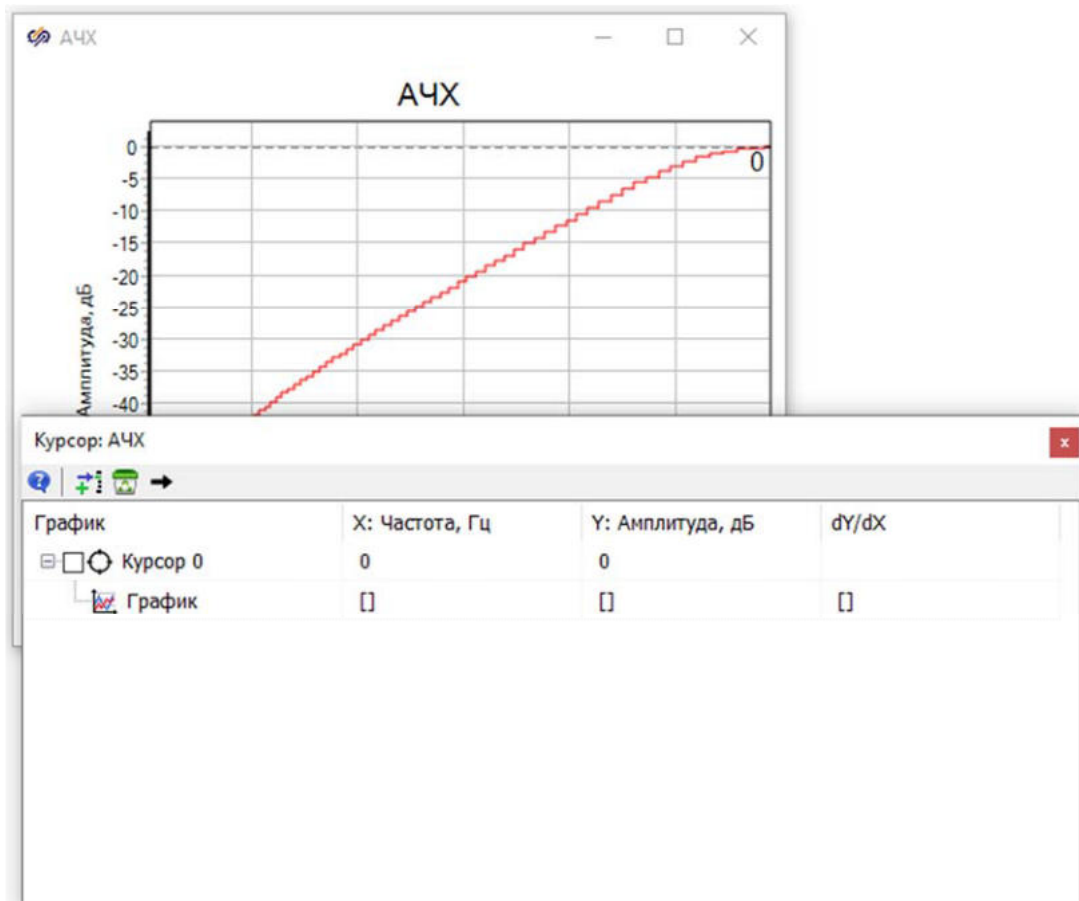


Рис. 22. Окно "Курсор: АЧХ" графика АЧХ.

Чтобы вычислить уровень затухания, необходимо найти разность амплитуд в крайних точках графика. Для этого в поле "**Х: Частота, Гц**" строки, начинающейся с "**Курсор 0**", требуется задать значение, равное 50 Гц, или с помощью мыши установить курсор на графике "**АЧХ**" на данное значение. Затем нажать на кнопку **Добавить новый курсор** ([Рисунок 23](#)) и в поле "**Х: Частота, Гц**" строки, начинающейся с "**Курсор 1**", задать значение, равное 150 Гц, или сделать это с помощью установки курсора на графике "**АЧХ**" с использованием мыши ([Рисунок 24](#)).

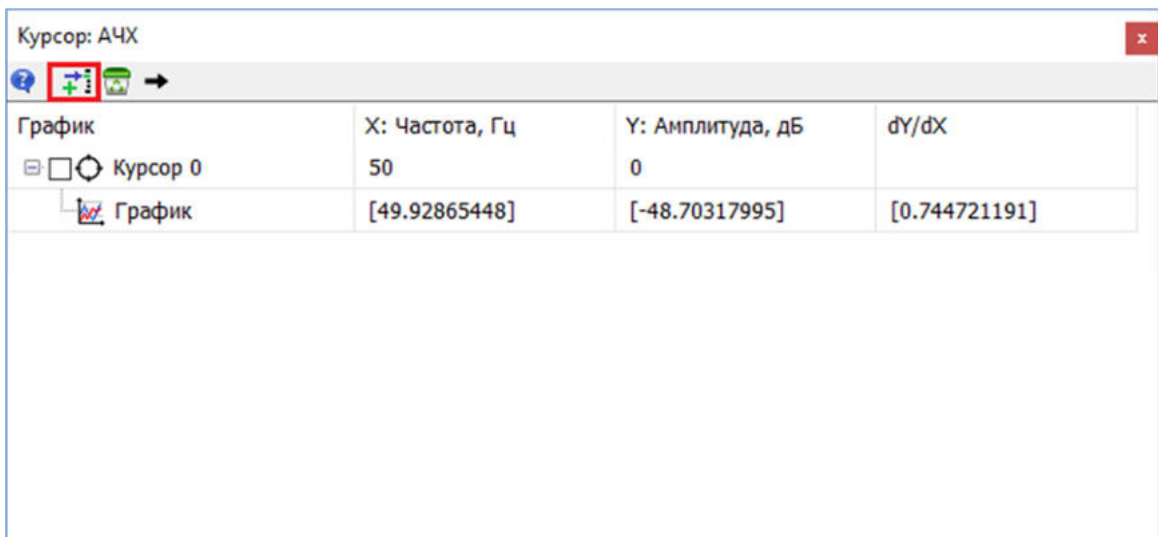


Рис. 23. Окно "Курсор: АЧХ" графика АЧХ с выделенной кнопкой "Добавить новый курсор".

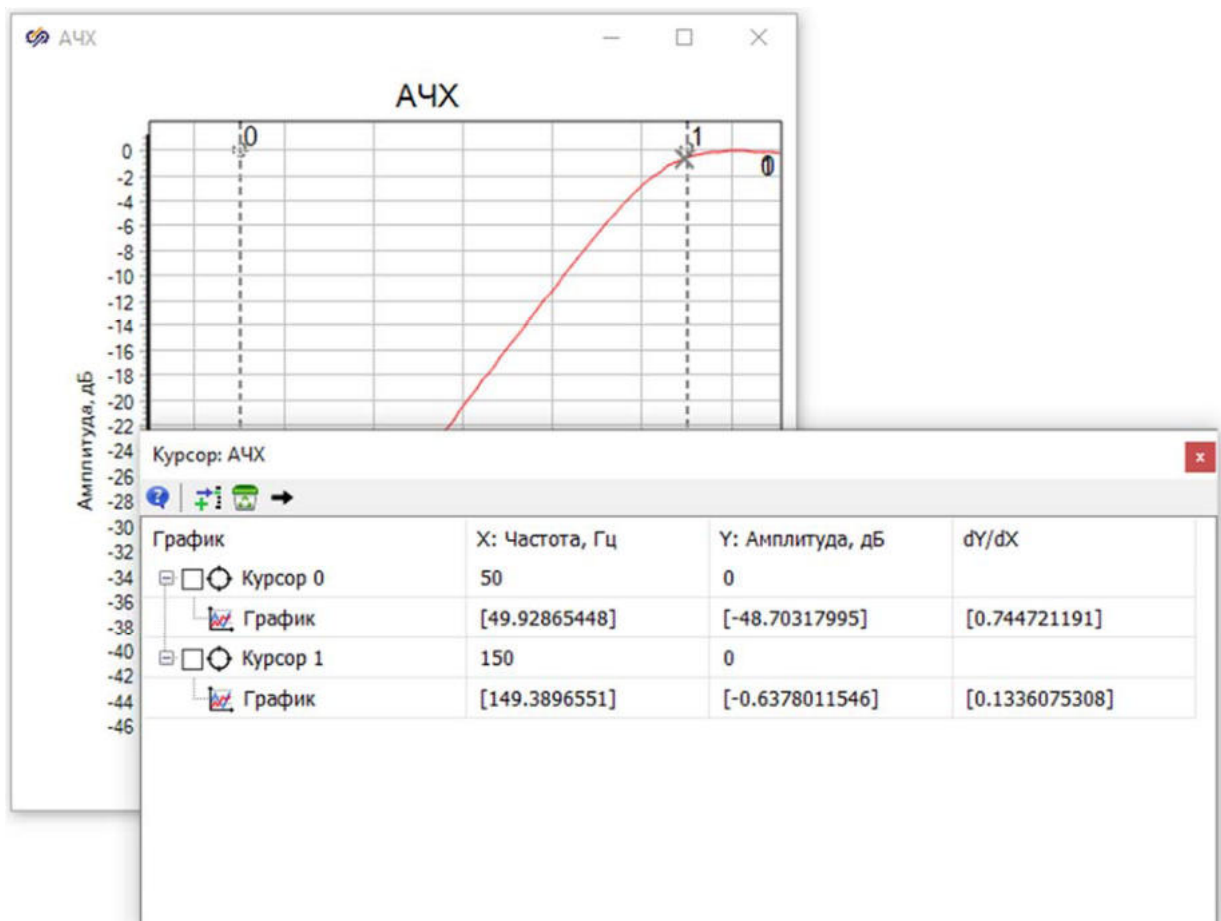


Рис. 24. Окно "Курсор: АЧХ" графика АЧХ с установленными курсорами на 50 и 150 Гц.

Необходимо выбрать строки "Курсор 0" и "Курсор 1", после этого появится дополнительное окно со сравнением установленных курсоров и соответствующих точек на графике (Рисунок 25).

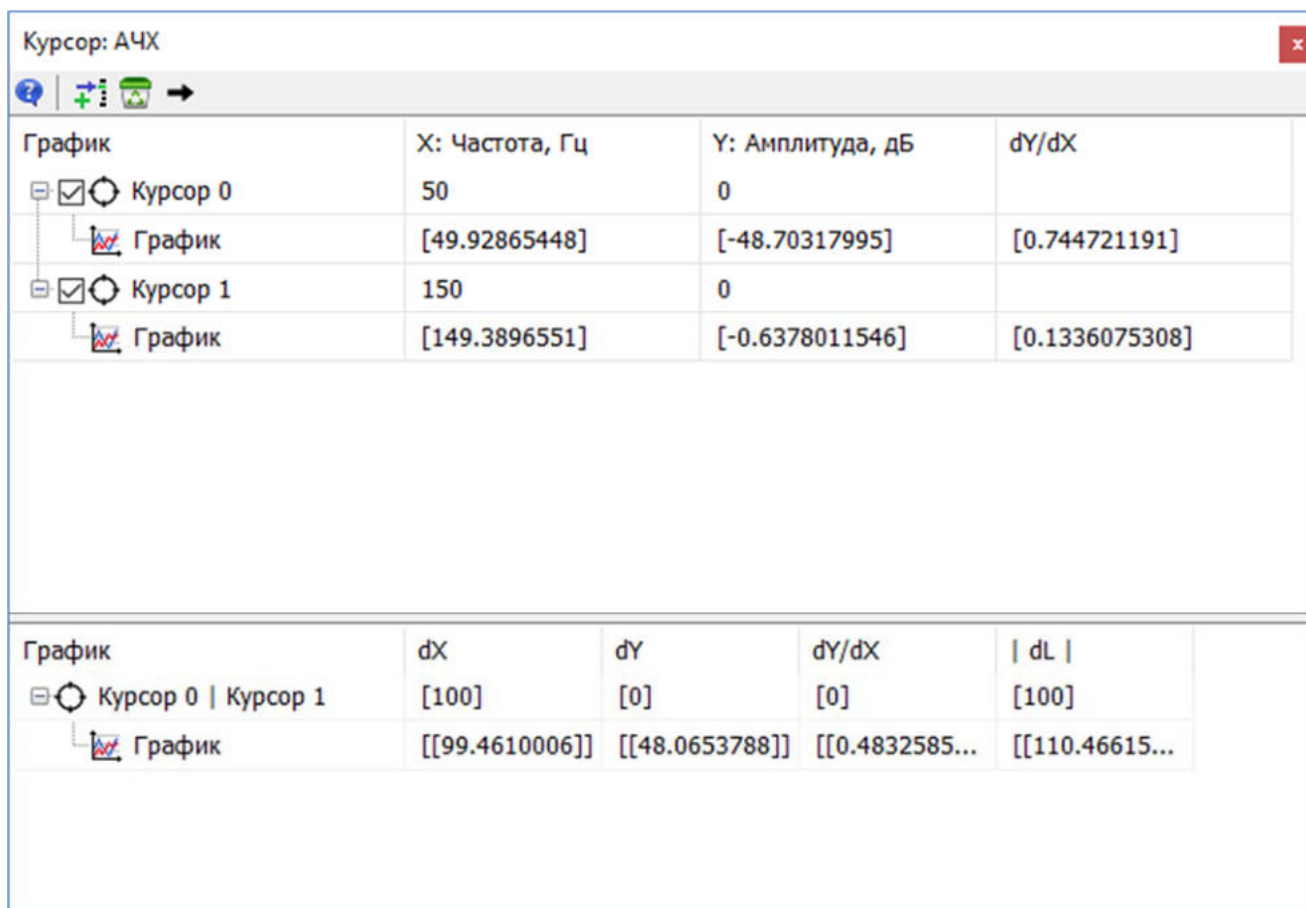


Рис. 25. Окно "Курсор: АЧХ" графика АЧХ с окном, сравнивающим две точки на графике.

Таким образом, искомое значение должно быть приблизительно равно 48.06 дБ.

Далее требуется найти отклонение ФЧХ от линейной в полосе пропускания, которое определяется по групповой задержке. Групповая задержка рассчитывается по графику "**Групповая задержка**" как разница между максимальным и минимальным значением во всей полосе пропускания. Для того чтобы открыть этот график, необходимо в окне Проектирование и анализ фильтров, нажав правой кнопкой мыши, вызвать контекстное меню, в котором выбрать пункт "**Тип характеристик**", в выпадающем списке навести курсор на "**Частотные характеристики**" и выбрать пункт "**Групповая задержка**" (Рисунок 26).

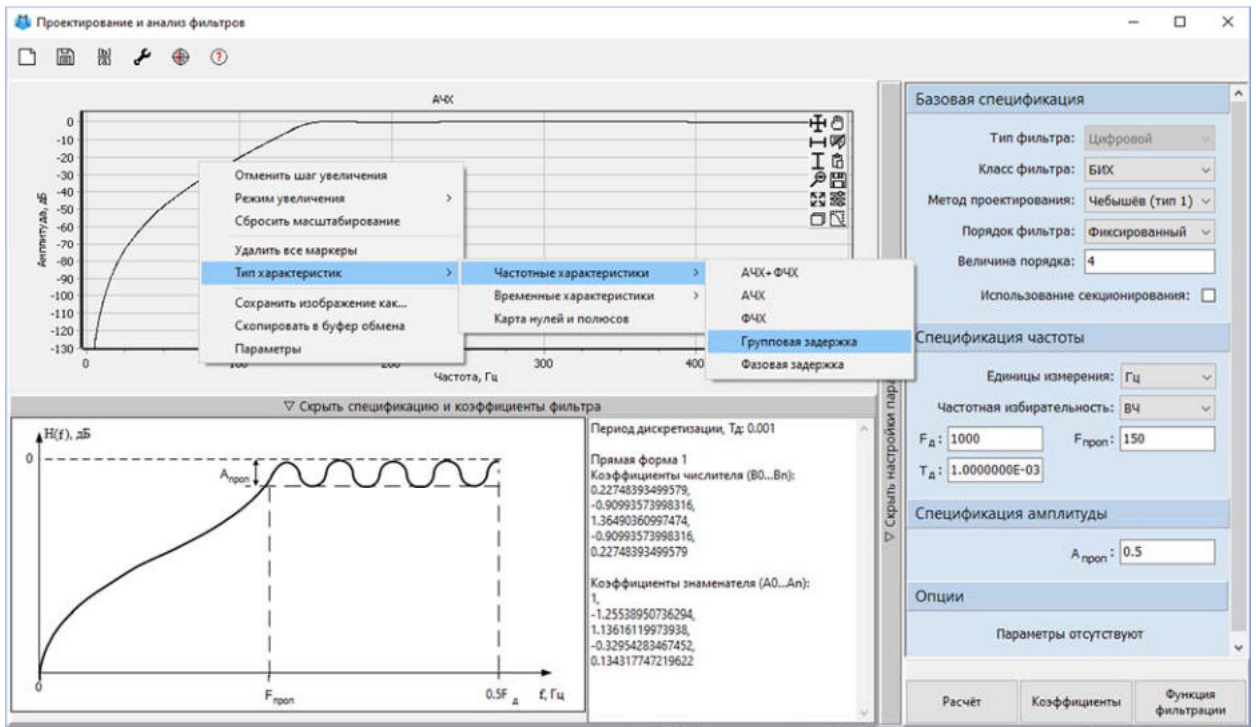


Рис. 26. Окно "Проектирование и анализ фильтров" блока "Цифровой фильтр" с выделенной кнопкой "Групповая задержка".

Необходимо открыть график "Групповая задержка", для этого следует нажать на кнопку Развернуть график на всю рабочую область (Рисунок 27).

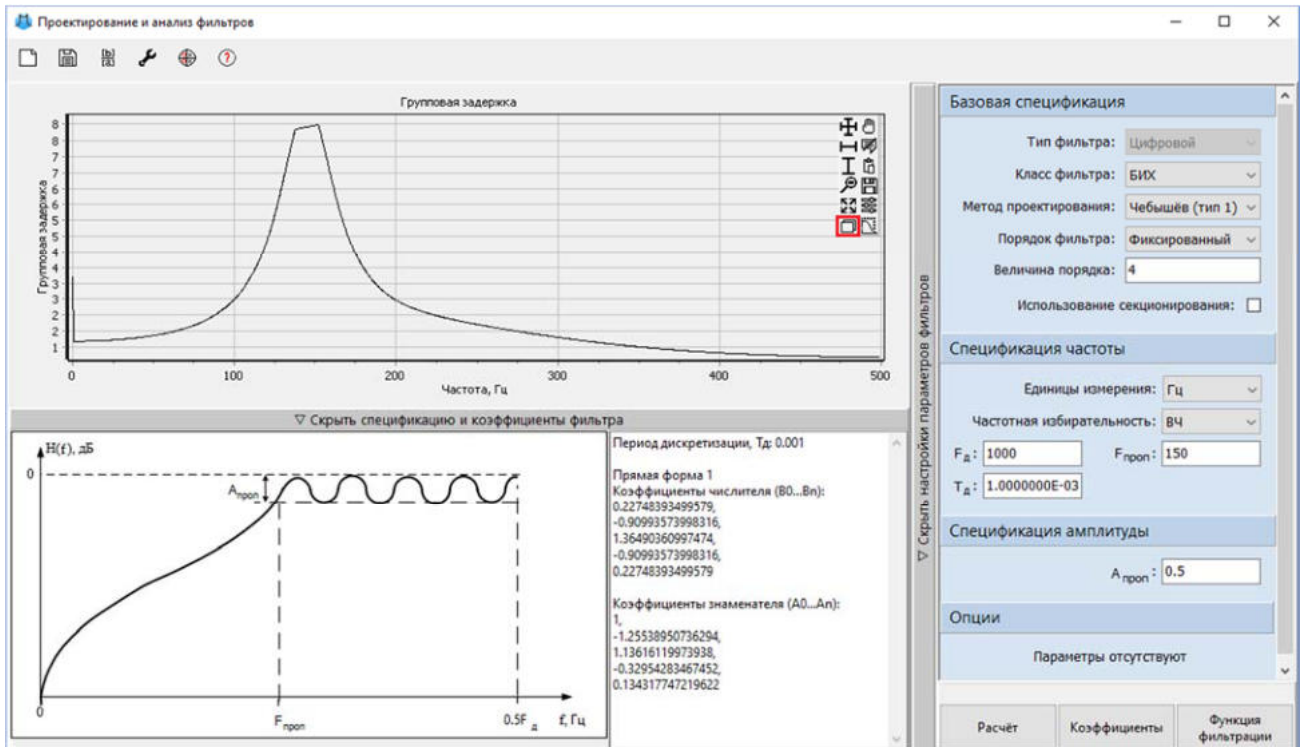


Рис. 27. Окно "Проектирование и анализ фильтров" блока "Цифровой фильтр" с выделенной кнопкой "Развернуть график на всю рабочую область".

График групповой задержки должен соответствовать рисунку (Рисунок 28).

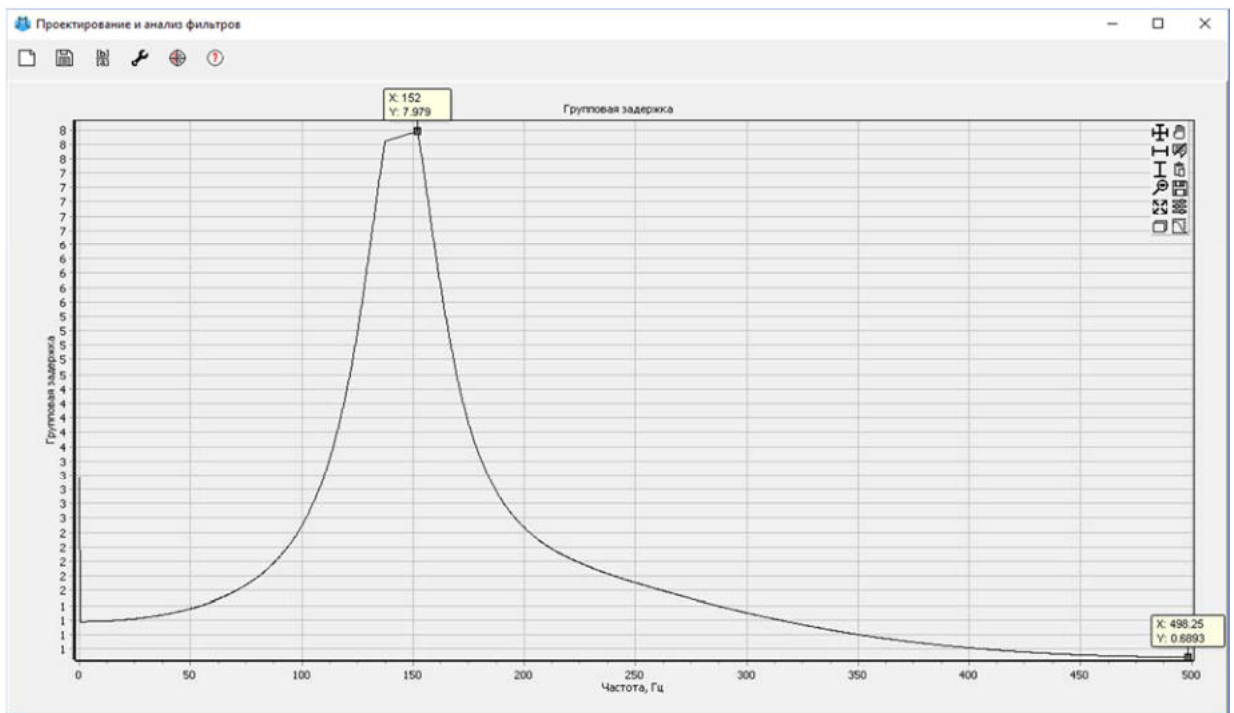


Рис. 28. График групповой задержки.

По графику (Рисунок 28) отклонение ФЧХ от линейной в полосе пропускания требуется рассчитать через количество отсчетов на отрезке от 150 Гц. Таким образом, отклонение равно 7.3 отсчетов.

Далее необходимо найти максимальное по модулю значение полюса, которое определяется по графику "Карта нулей и полюсов" в окне Проектирование и анализ фильтров (Рисунок 29).

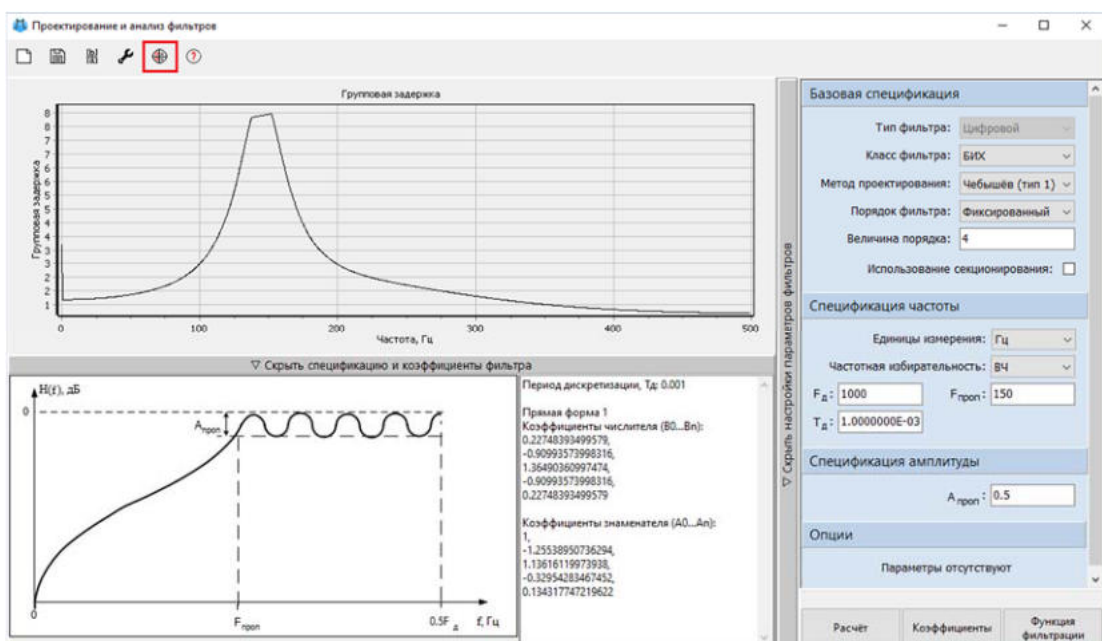


Рис. 29. Окно "Проектирование и анализ фильтров" блока "Цифровой фильтр" с выделенной кнопкой "Редактирование карты нулей и полюсов" ..

Необходимо выбрать полюс (отображающийся на карте крестиком), расположенный наиболее близко к окружности единичного радиуса (Рисунок 30), и определить расстояние между центром координат и выбранным полюсом по координатам, отображаемым в правом окне Карта нулей и полюсов. Если на графике отображены только 2 координаты полюса, то расстояние до центра координат находится по теореме Пифагора.

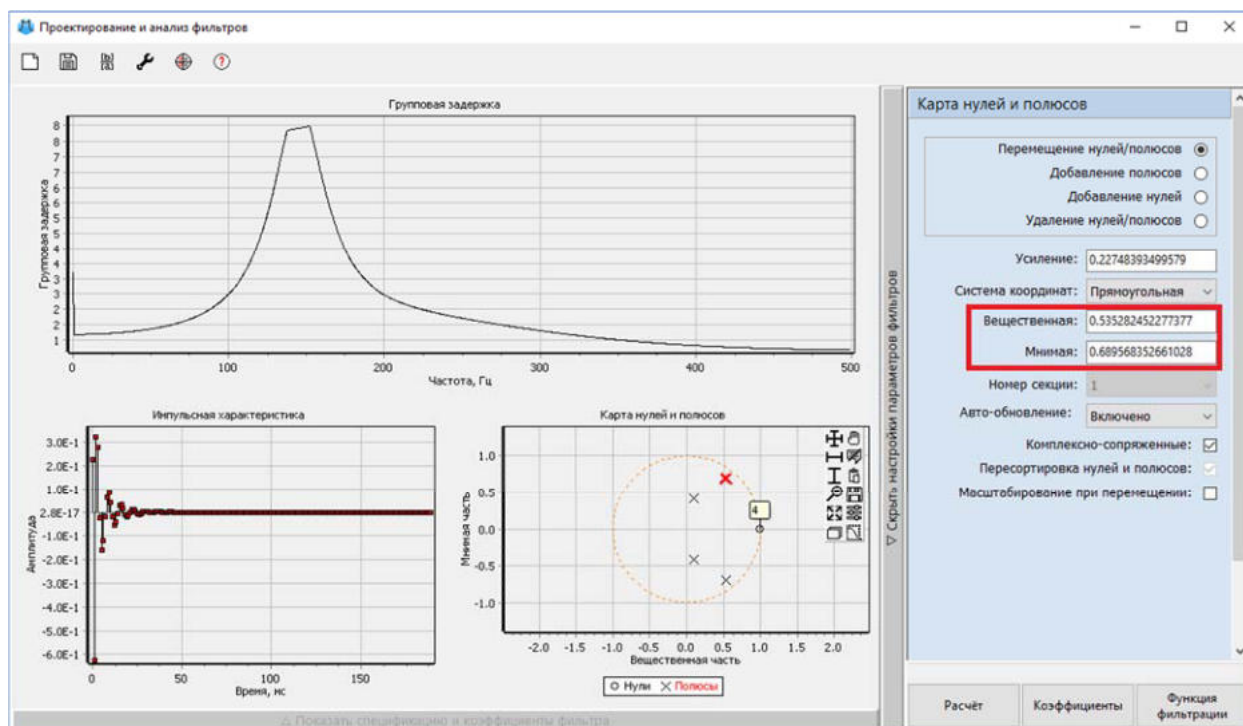


Рис. 30. Карта нулей и полюсов с выделенными координатами наиболее близкого к границе окружности полюса.

Максимальное расстояние по теореме Пифагора между полюсом и центром единичной окружности равно 0.87.

Таким образом, на основе полученных графиков определены следующие параметры:

- неравномерность АЧХ в полосе пропускания равна 0.5 дБ
- уровень затухания в зоне непрозрачности равен 48.06 дБ
- отклонение ФЧХ от линейной в полосе пропускания равно 7.3 отсчетов
- максимальное по модулю значение полюса 0.87

Проектирование фильтра Чебышёва 1 рода высокого порядка

Далее необходимо выполнить проектирование фильтра с более высоким порядком. Для этого в окне Проектирование и анализ фильтров в поле

"**Параметры фильтра**" требуется установить фиксированный порядок фильтра, равный 10 (Рисунок 31).

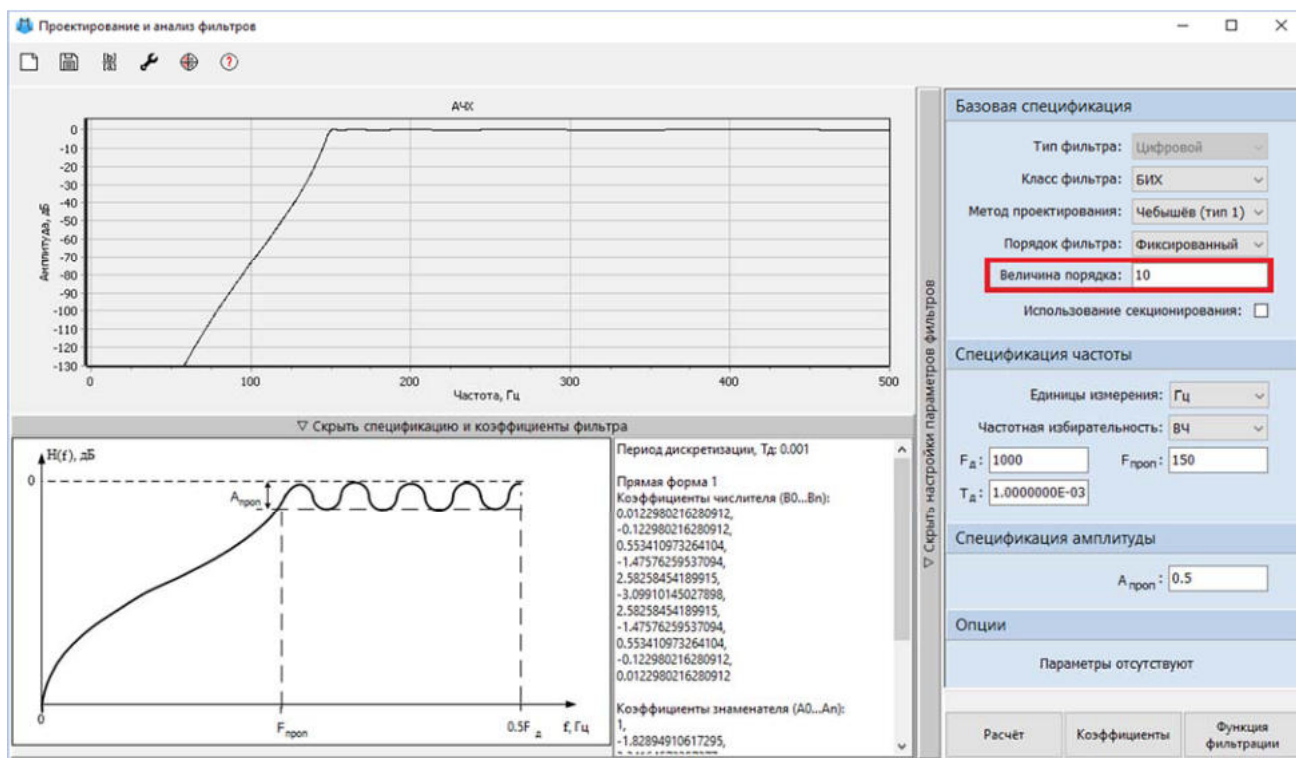


Рис. 31. Окно "Проектирование и анализ фильтров" блока "Цифровой фильтр" с установленным фиксированным порядком 10.

После нажатия на кнопку **Расчёт** по графику "АЧХ" заметно, что фильтр с более высоким порядком быстрее приходит в устойчивое положение, что приближает ее к идеальной.

Проектирование фильтра Баттерворта

Аналогично фильтру Чебышёва 1 рода необходимо исследовать фильтр Баттерворта 4 порядка и определить его параметры.

Для анализа фильтра Баттерворта параметры в окне **Проектирование и анализ фильтров** требуется изменить согласно рисунку (Рисунок 32).

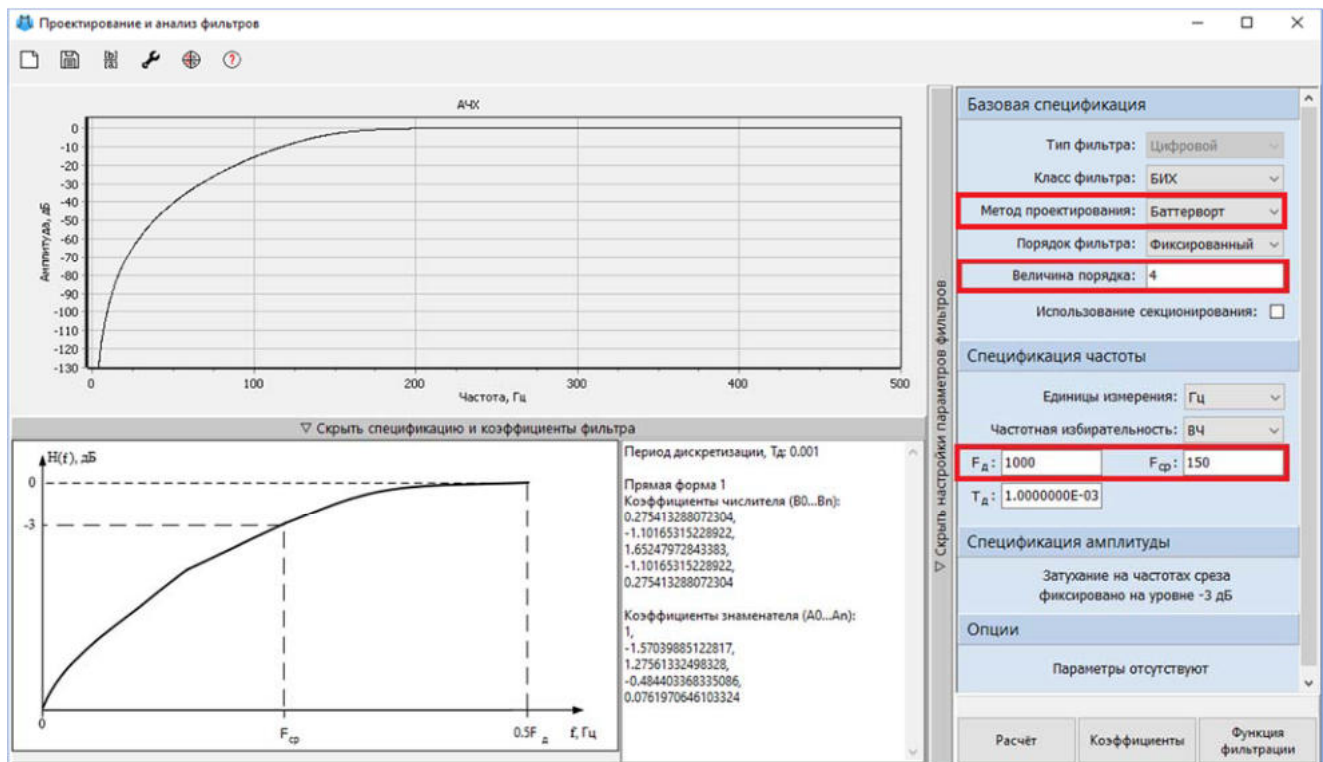


Рис. 32. Окно "Проектирование и анализ фильтров" блока "Цифровой фильтр" для фильтра Баттерворта.

После расчета фильтра Баттерворта и нажатия кнопки **Расчёт** в окне проекта, графики АЧХ и ФЧХ должны соответствовать рисункам (Рисунок 33 и Рисунок 34).

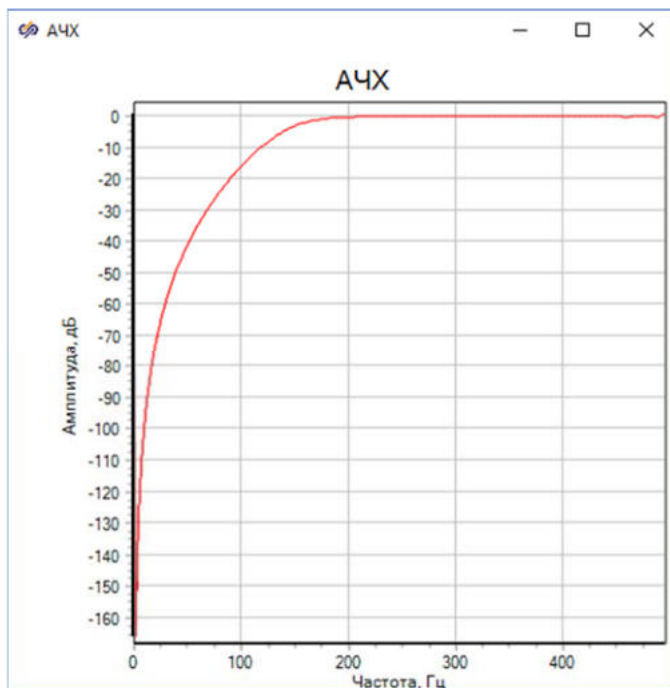


Рис. 33. График АЧХ для фильтра Баттерворта.

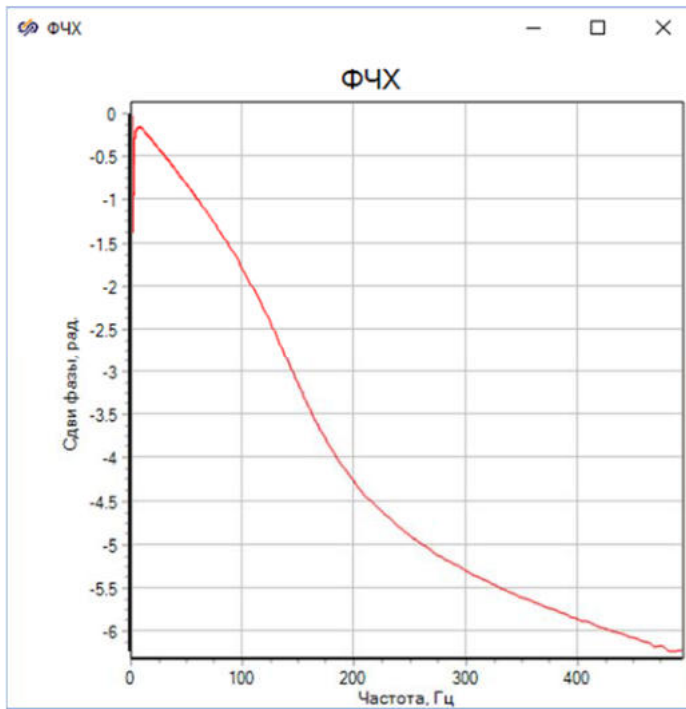


Рис. 34. График ФЧХ для фильтра Баттерворта.

Полученный график АЧХ фильтра Баттерворта соответствует теории: в полосе пропускания отсутствуют минимумы и максимумы, спад на границе равен 3 дБ.

Все расчеты параметров для фильтра Баттерворта проводятся аналогично расчетам для фильтра Чебышёва 1 рода.

Для того чтобы определить неравномерность АЧХ в полосе пропускания, необходимо открыть график "АЧХ" в окне Проектирование и анализ фильтров (Рисунок 35) и найти максимальное отклонение функции от нуля в области от 150 Гц.

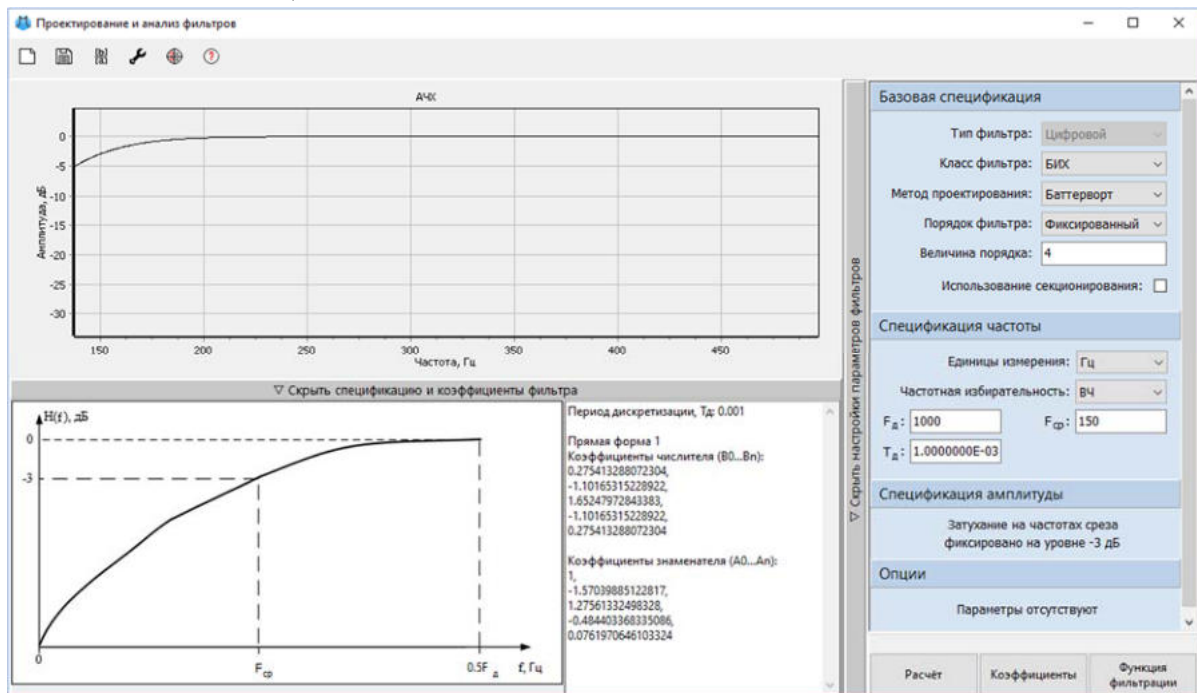


Рис. 35. Приближенный график АЧХ для фильтра Баттерворта в полосе от 150 Гц.

Из графика "АЧХ" видно, что функция не имеет явных перепадов в зоне пропускания, что делает неравномерность АЧХ нулевой.

Для расчета уровня затухания необходимо по графику "АЧХ" соответствующего блока **Фазовый портрет** вычислить разницу между амплитудами на 50 и 150 Гц с использованием инструмента Курсор (Рисунок 36) аналогично способу, описанному для фильтра Чебышёва 1 рода.

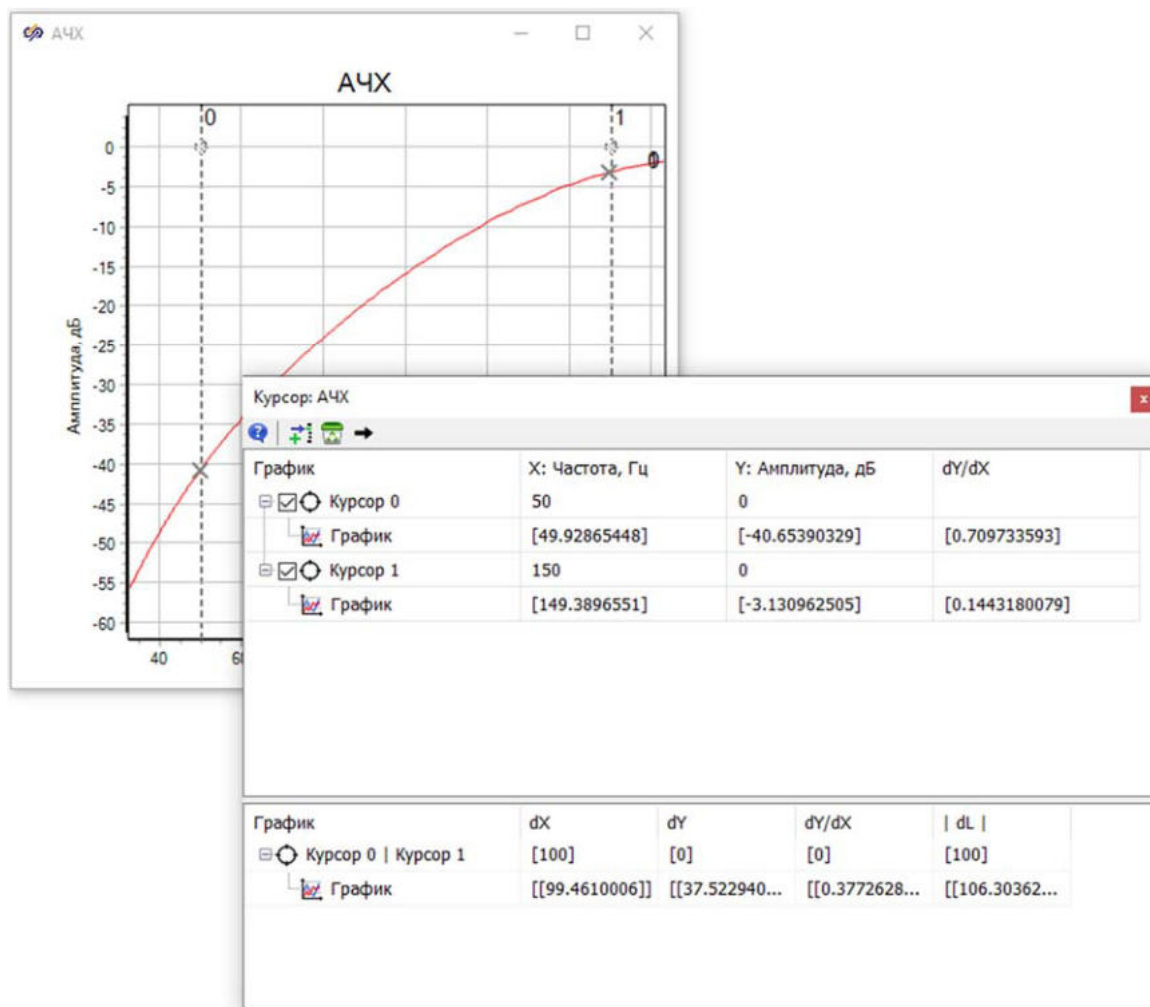


Рис. 36. Окно "Курсор: АЧХ" графика АЧХ с окном, сравнивающим две точки на графике для фильтра Баттерворта.

В результате расчетов уровень затухания равен 37.5 дБ.

Для определения отклонения ФЧХ от линейной в полосе пропускания необходимо открыть график "**Групповая задержка**" (Рисунок 37) в окне Проектирование и анализ фильтров и вычислить количество отсчетов в полосе от 150 до 500 Гц.

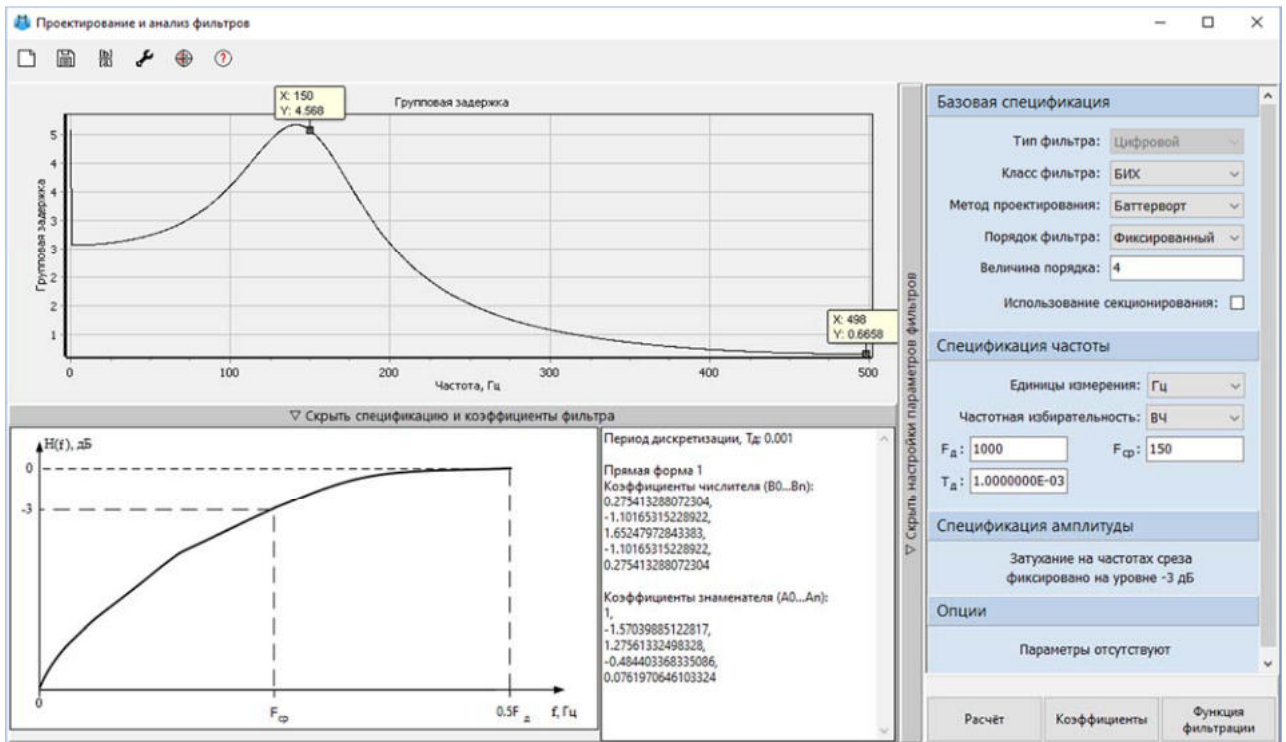


Рис. 37. График групповой задержки для фильтра Баттерворта.

Согласно рисунку (Рисунок 37), отклонение ФЧХ от линейной составляет 3.9 отсчетов.

Далее для определения максимального по модулю значения полюса необходимо открыть график "Карта нулей и полюсов" (Рисунок 38) в окне Проектирование и анализ фильтров и по теореме Пифагора рассчитать расстояние от начала координат до самого отдаленного от центра окружности полюса.

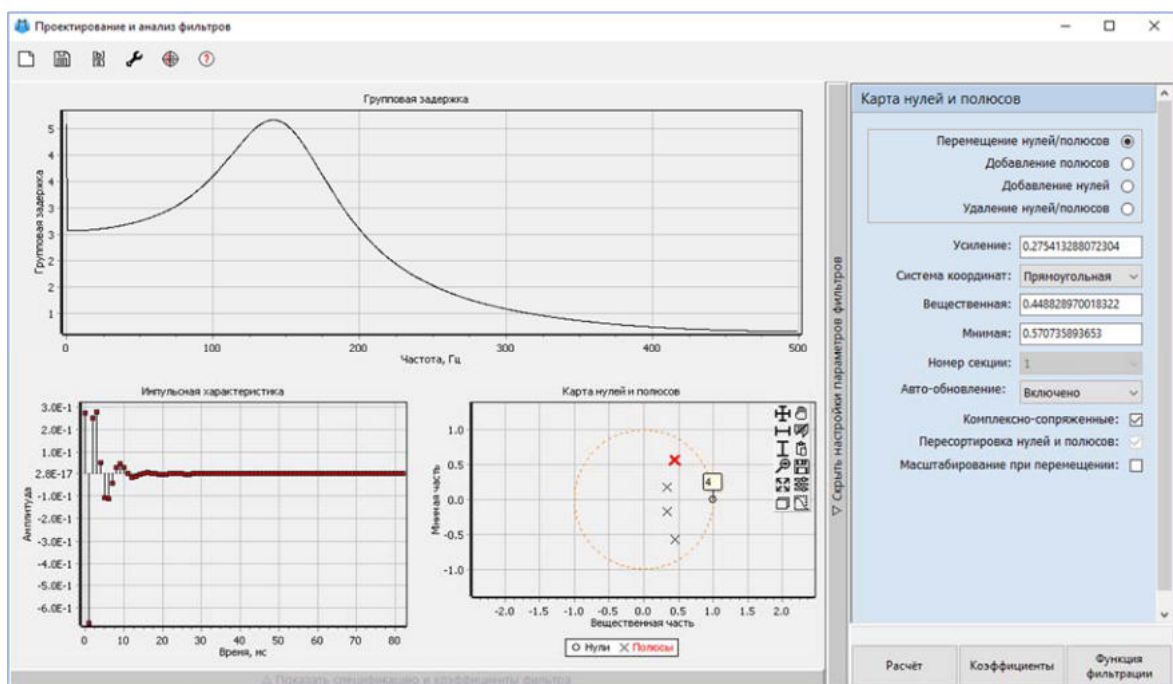


Рис. 38. Карта нулей и полюсов для фильтра Баттерворта с выделенным наиболее близким к границе окружности полюсом.

Максимальное по модулю расстояние согласно "Карте нулей и полюсов" (Рисунок 38) равно 0.73.

Таким образом, на основе полученных графиков определены следующие параметры:

- неравномерность АЧХ в полосе пропускания равна 0 дБ
- уровень затухания в зоне непрозрачности равен 37.5 дБ
- отклонение ФЧХ от линейной в полосе пропускания равно 3.9 отсчетов
- максимальное по модулю значение полюса 0.73

Проектирование фильтра эллиптического типа

Аналогично фильтрам Чебышёва 1 рода и Баттерворта необходимо исследовать фильтр эллиптического типа 4 порядка и найти его параметры. Для этого требуется изменить параметры в окне Проектирование и анализ фильтров согласно рисунку (Рисунок 39).

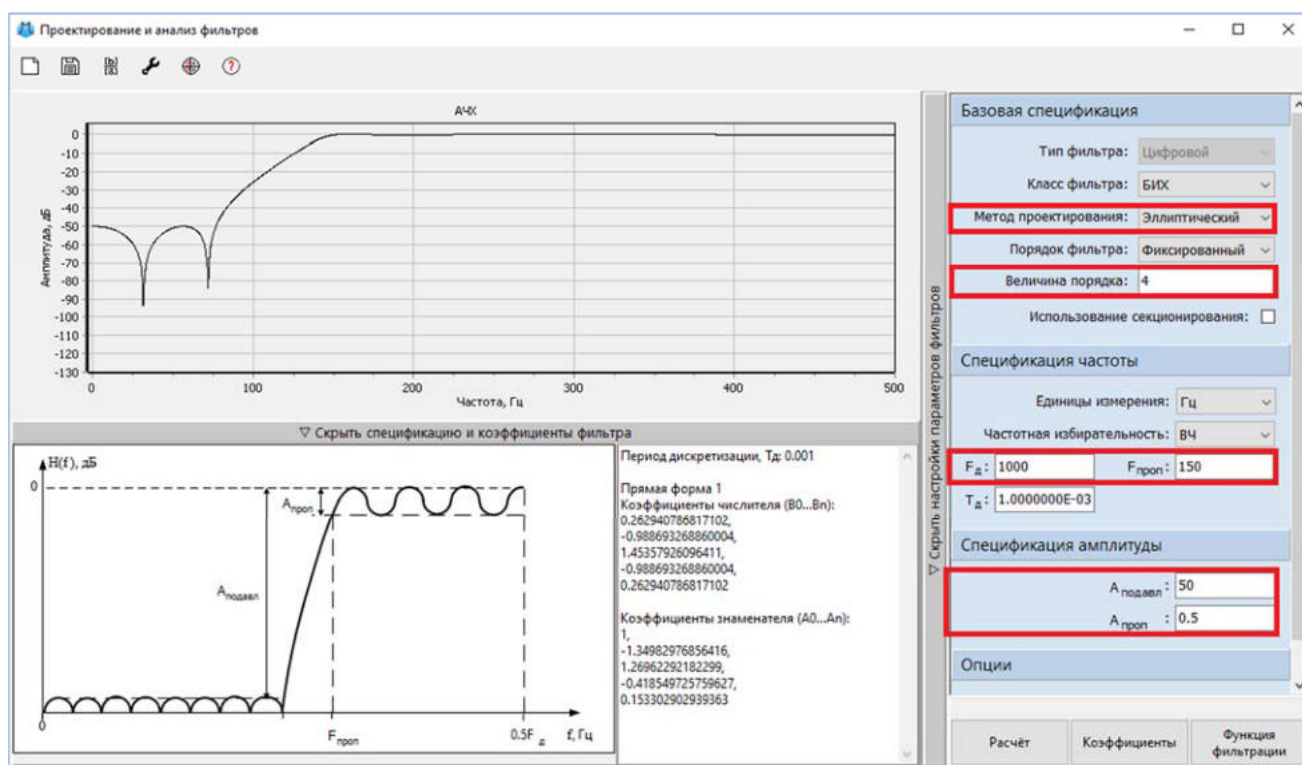


Рис. 39. Карта нулей и полюсов для фильтра Баттерворта с выделенным наиболее близким к границе окружности полюсом.

После запуска проекта на моделирование и окончания расчета, графики АЧХ и ФЧХ эллиптического фильтра в блоках Фазовый портрет соответствуют рисункам ниже (Рисунок 40 и Рисунок 41).

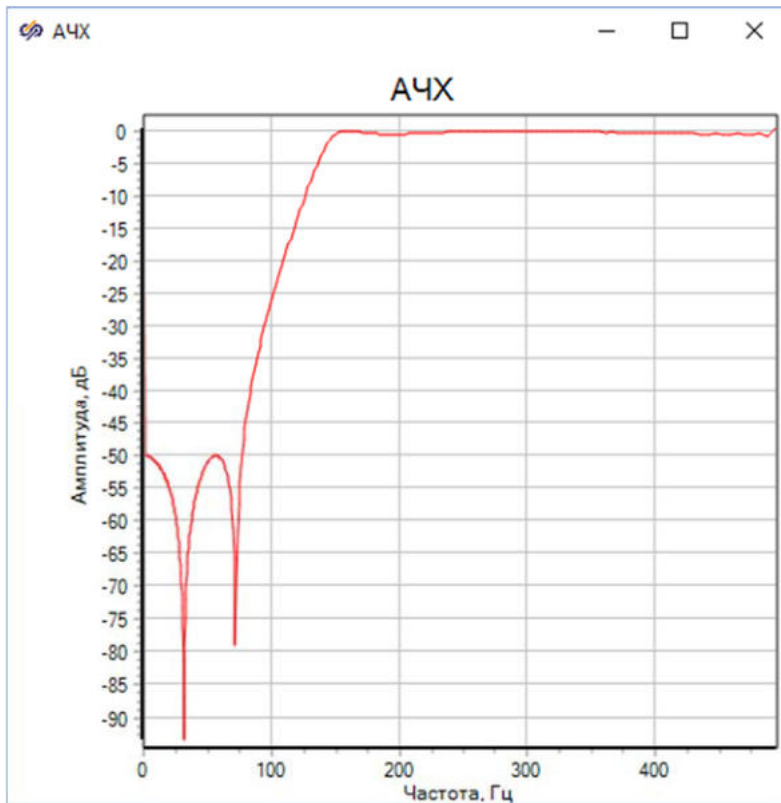


Рис. 40. График АЧХ для эллиптического фильтра.

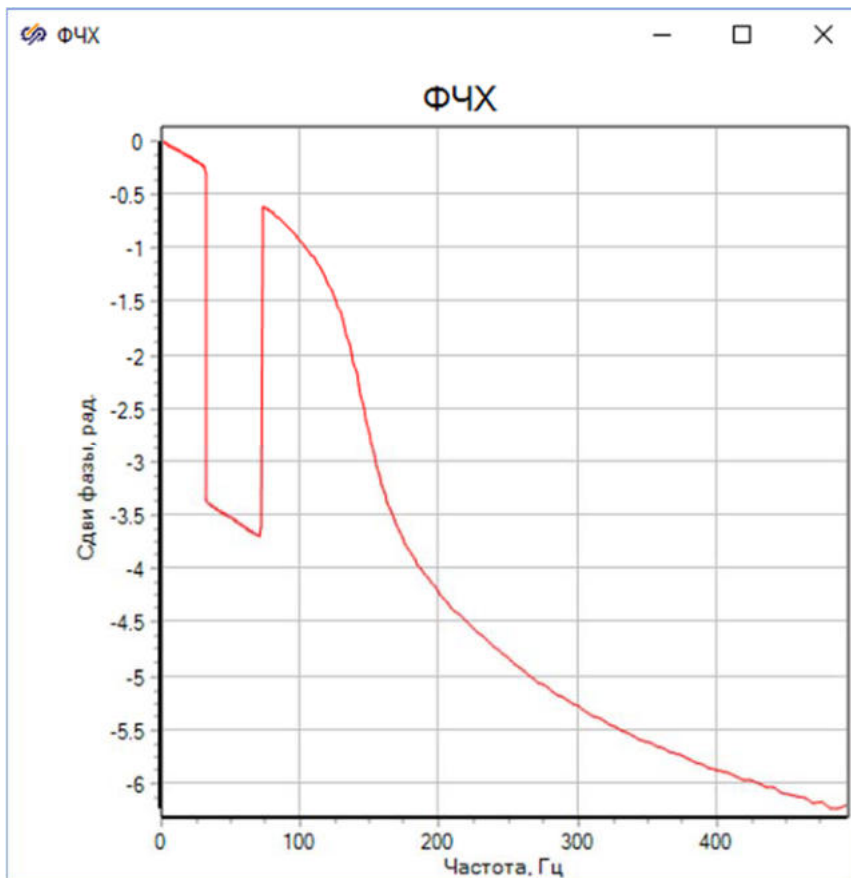


Рис. 41. График ФЧХ для эллиптического фильтра.

В полосе пропускания АЧХ эллиптического фильтра имеет резкие переходы между полосой пропускания и зоной непрозрачности, что позволяет достичь высокой степени подавления сигналов, находящихся в зоне непрозрачности. Также в ней АЧХ имеет резкие пики, обусловленные особенностями конструкции эллиптического фильтра.

Исследование фильтра эллиптического типа аналогично исследованию фильтра Чебышёва 1 рода и фильтра Баттерворта.

Для того чтобы определить неравномерность АЧХ в полосе пропускания, требуется открыть график "АЧХ" в окне Проектирование и анализ фильтров и найти максимальное отклонение функции от нуля в области от 150 Гц (Рисунок 42).

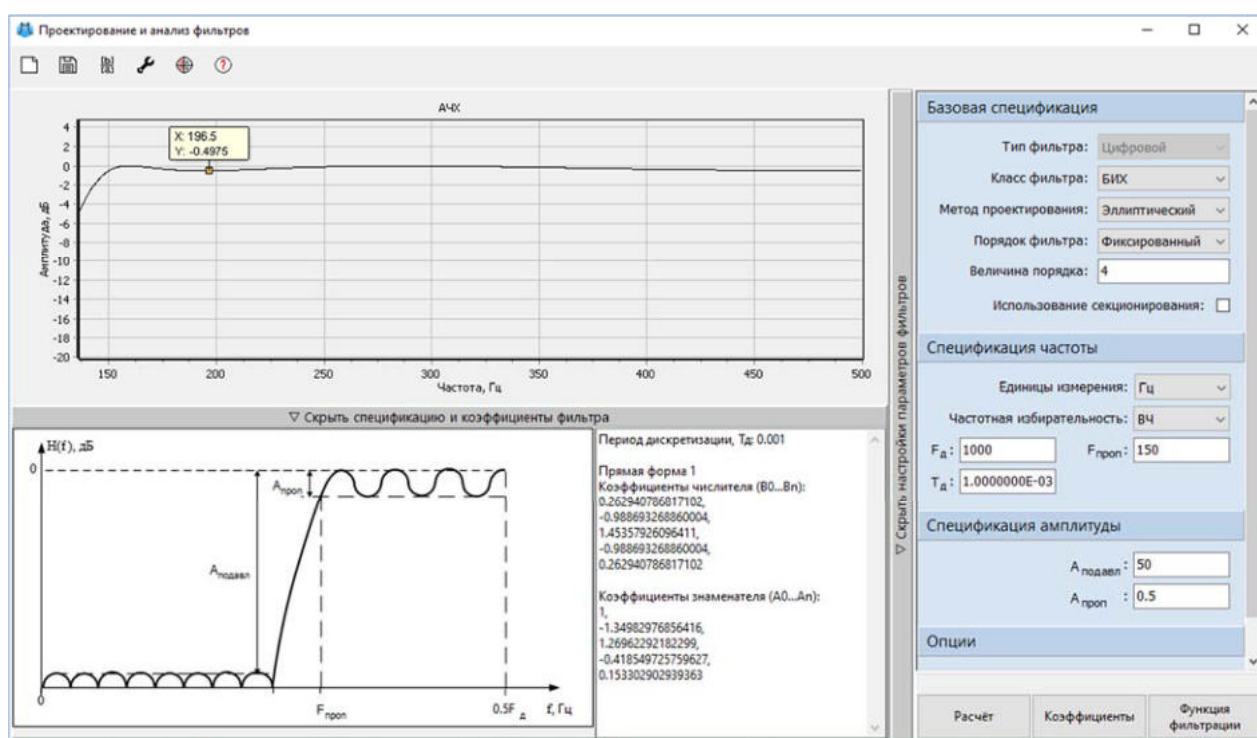


Рис. 42. Приближенный график АЧХ для фильтра эллиптического типа в полосе от 150 Гц.

Неравномерность АЧХ в полосе пропускания согласно графику равна 0.5 дБ.

Расчет уровня затухания требуется произвести по графику "АЧХ" соответствующего блока Фазовый портрет, для этого необходимо вычислить разницу между амплитудами на 50 и 150 Гц с использованием инструмента Курсор (Рисунок 43).

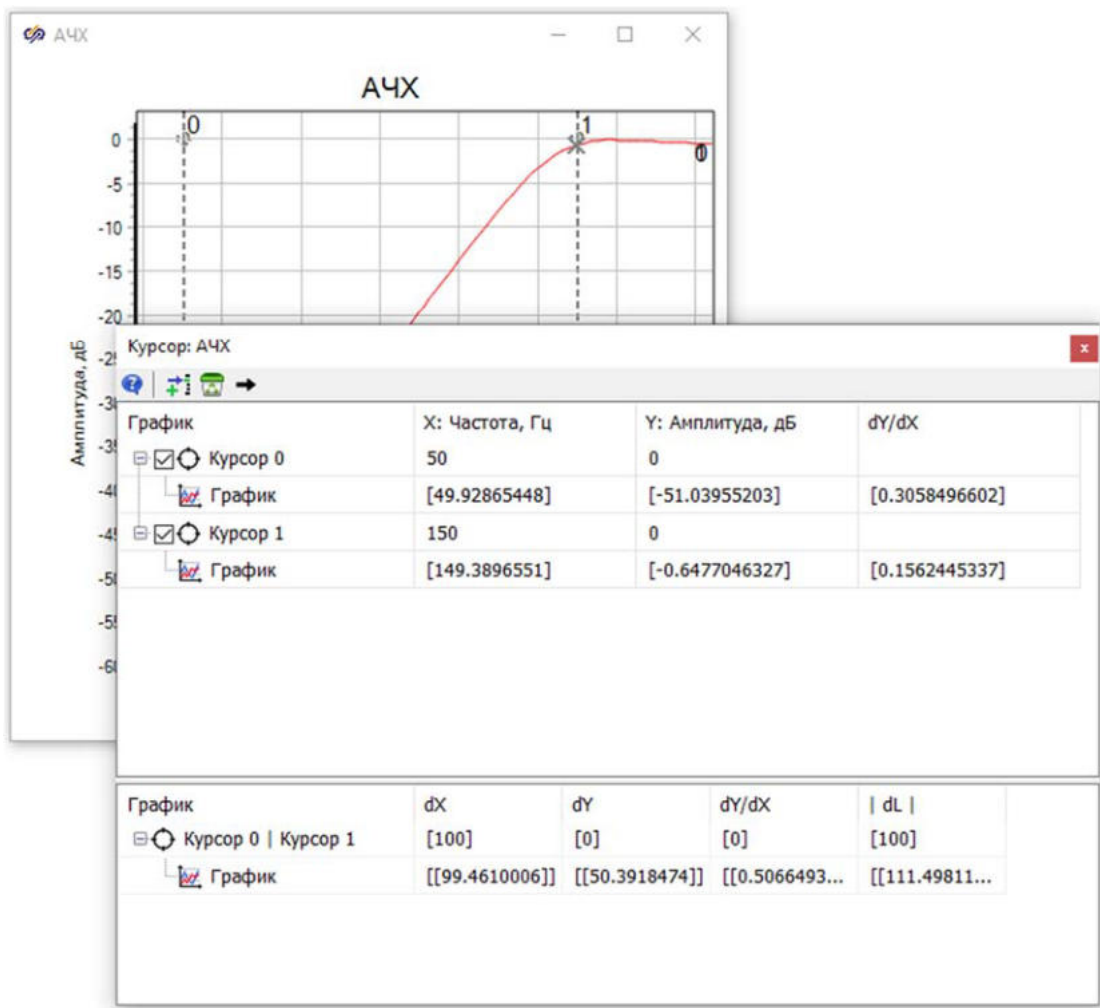


Рис. 43. Окно "Курсор: АЧХ" графика АЧХ с окном, сравнивающим две точки на графике для фильтра эллиптического фильтра.

Согласно расчетам, уровень затухания соответствует 50.4 дБ.

Для определения отклонения ФЧХ от линейной в полосе пропускания требуется открыть график "**Групповая задержка**" в окне Проектирование и анализ фильтров и вычислить количество отсчетов в полосе от 150 до 500 Гц (Рисунок 44).

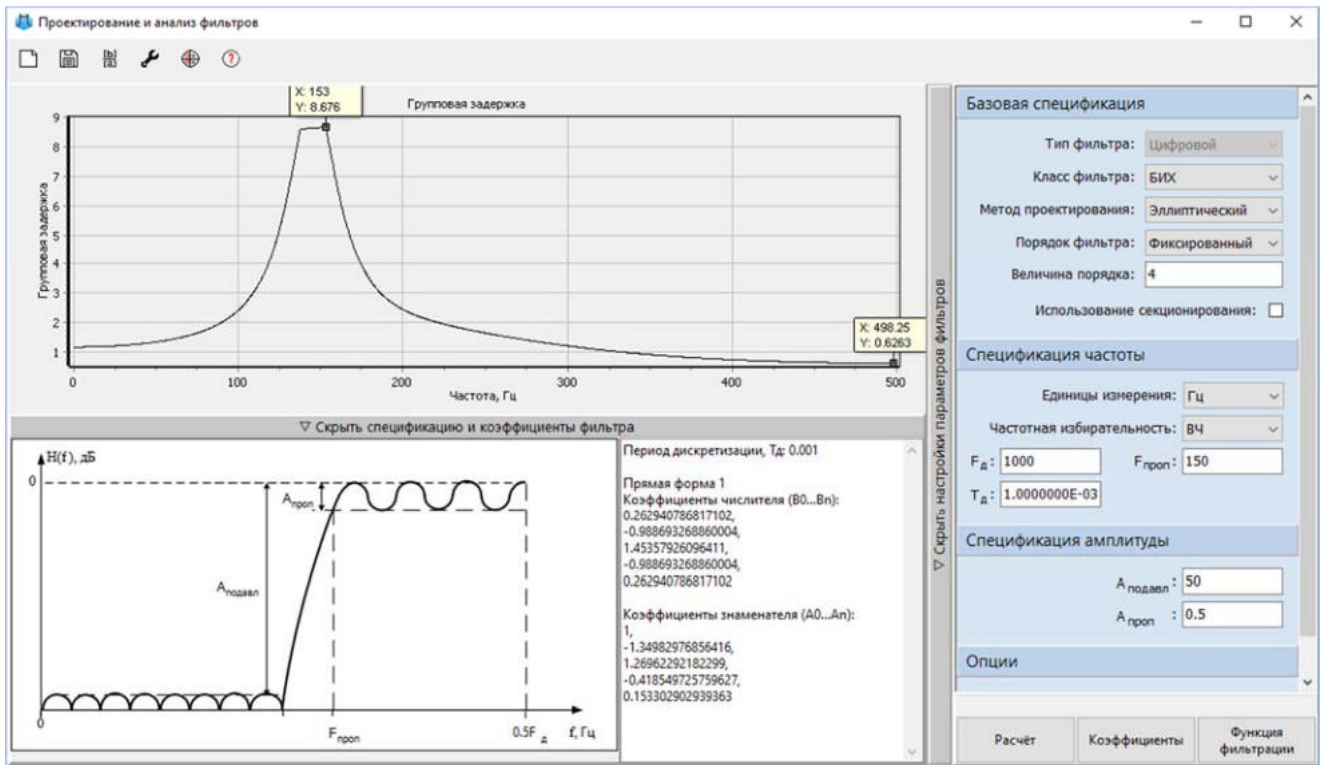


Рис. 44. График групповой задержки для фильтра эллиптического типа.

В результате построения отклонение ФЧХ от линейной равно 8 отсчетам.

Далее для подсчета максимального по модулю значения полюса необходимо открыть график "Карта нулей и полюсов" (Рисунок 45) в окне Проектирование и анализ фильтров и по теореме Пифагора рассчитать расстояние от начала координат до самого отдаленного от центра окружности полюса.

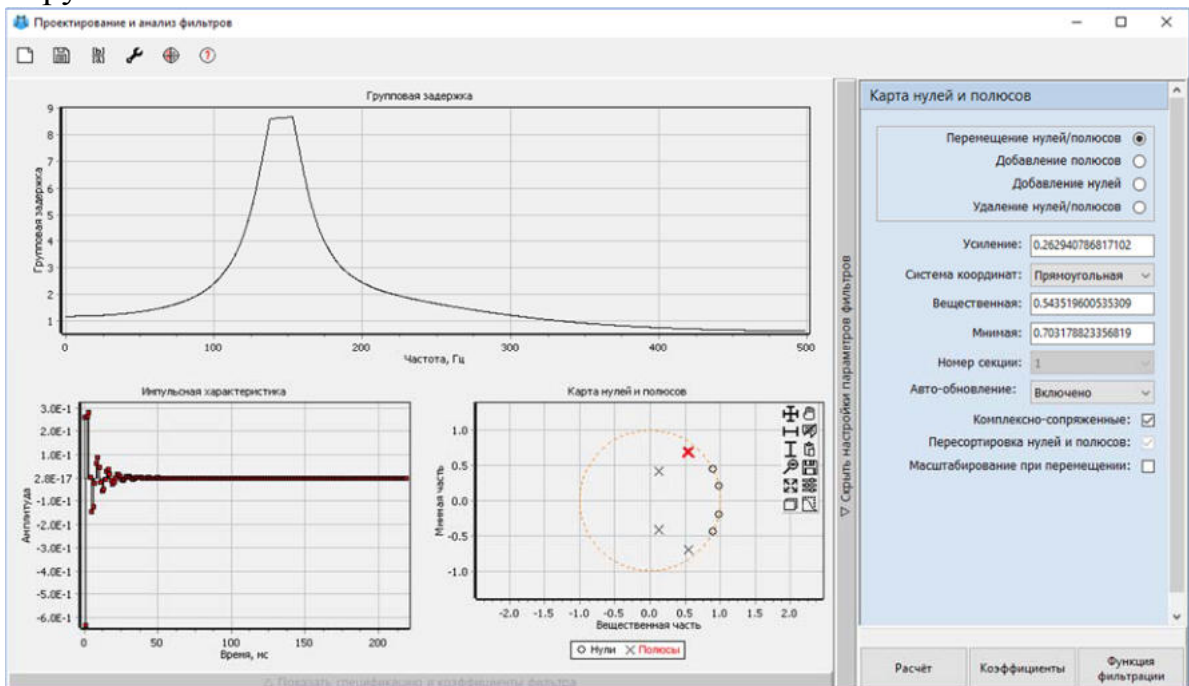


Рис. 45. Карта нулей и полюсов для фильтра эллиптического типа с выделенным наиболее близким к границе окружности полюсом.

Максимальное по модулю расстояние согласно карте нулей и полюсов равняется 0.88.

Таким образом, найденные параметры эллиптического фильтра должны соответствовать следующим значениям:

- неравномерность АЧХ в полосе пропускания равна 0.5 дБ
- уровень затухания в зоне непрозрачности равен 50.4 дБ
- отклонение ФЧХ от линейной в полосе пропускания равно 8 отсчетов
- максимальное по модулю значение полюса 0.88

В результате анализа полученных значений параметров трех фильтров установлено, что наибольшую идеальность АЧХ имеет фильтр Баттерворта, то есть он обеспечивает пропускание всех частот в полосе пропускания без какого-либо ослабления, и переход от зоны непрозрачности к полосе пропускания происходит мгновенно, без искажений и колебаний. Также фильтр Баттерворта лучше подавляет затухание сигнала в полосе пропускания.

Самостоятельная работа

В самостоятельной части лабораторной работы требуется выполнить следующие пункты:

1. Необходимо повторить исследование трех фильтров: фильтра Чебышёва 1 рода, фильтра Баттерворта и эллиптического фильтра. Для проектирования используются значения из таблицы вариантов (Таблица 1), где:

- Тип ЦФ - тип цифрового фильтра
- f_d – частота дискретизации цифрового фильтра
- $f_{зн}$ – частота среза зоны непрозрачности
- $f_{пп}$ – частота среза полосы пропускания
- $A_{подавл}$ – допустимый уровень боковых лепестков АЧХ в зоне непрозрачности
- $A_{проп}$ – допустимый уровень неравномерности АЧХ в полосе пропускания

Табл. 1. Исходные данные						
№ варианта	Тип ЦФ	f_d , Гц	$f_{зн}$, Гц	$f_{пп}$, Гц	$A_{подавл}$, дБ	$A_{проп}$, дБ
1	НЧ	1000	150	100	70	0,5

Табл. 1. Исходные данные						
№ варианта	Тип ЦФ	f_d , Гц	f_{zn} , Гц	f_{nn} , Гц	$A_{подавл}$, дБ	$A_{прон}$, дБ
	П	2 000	150 ± 100	150 ± 50	40	0,5
2	ВЧ	1 000	100	150	70	0,5
	Р	2 000	150 ± 100	150 ± 100	40	0,5
3	НЧ	1 000	100	50	60	0,5
	П	2 000	250 ± 150	250 ± 50	80	0,5
4	ВЧ	1 000	50	100	60	0,5
	Р	2 000	250 ± 50	250 ± 150	80	0,5
5	НЧ	1 000	150	50	90	0,5
	П	2 000	175 ± 125	175 ± 25	70	0,5
6	ВЧ	1 000	50	150	90	0,5
	Р	2 000	175 ± 25	175 ± 125	70	0,5
7	НЧ	1 000	75	25	80	0,5
	П	2 000	200 ± 125	200 ± 50	60	0,5
8	ВЧ	1	25	75	80	0,5

Табл. 1. Исходные данные						
№ варианта	Тип ЦФ	f_d , Гц	f_{zn} , Гц	f_{nn} , Гц	$A_{подавл}$, дБ	$A_{проп}$, дБ
		000				
	Р	2000	200 ±50	200 ±125	60	0,5
9	НЧ	1000	50	25	40	0,5
	П	2000	250 ±225	250 ±150	60	0,5
10	ВЧ	1000	25	50	40	0,5
	Р	2000	250 ±150	250 ±225	60	0,5
11	НЧ	1000	250	200	60	0,5
	П	2000	300 ±200	300 ±100	80	0,5
12	ВЧ	1000	200	250	60	0,5
	Р	2000	300 ±100	300 ±200	80	0,5

2. Проанализировать работу каждого фильтра по следующим параметрам: точность воспроизводимой АЧХ, линейность ФЧХ, вид временных (импульсной и переходной) характеристик, близость нулей и полюсов к границе устойчивости

3. По результатам исследования необходимо заполнить таблицу параметров (Таблица 2).

Табл. 2. Исследуемые параметры

Наименование метода	Рекомендуемый порядок фильтра	Неравномерность АЧХ в полосе пропускания, дБ	Уровень затухания в зоне непрозрачности, дБ	Отклонение ФЧХ от линейной в полосе пропускания	Максимальное по модулю значение полюса

4. Необходимо сделать выводы об особенностях каждого метода. Указать недостатки и возможные причины, почему следует отдать предпочтение тому или иному методу

5. Для одного из методов выполнить проектирование с разными порядками, чтобы удостовериться в том, что АЧХ фильтра с высоким порядком более точно приближается к идеальной

Контрольные вопросы

1. Что такое БИХ-фильтр?
2. Как рассчитать АЧХ фильтра в SimInTech?
3. О чем можно судить по карте нулей и полюсов БИХ-фильтра?
4. Почему предпочтительнее те фильтры, нули и полюсы которых близки к началу координат комплексной плоскости?
5. Как получить выражения для частотных характеристик БИХ-фильтра, если известна его передаточная функция?
6. В чем смысл групповой задержки по времени?
7. Как можно оценить устойчивость БИХ-цепи, не прибегая к нахождению нулей и полюсов, если известно ее уравнение?
8. С помощью каких блоков в SimInTech можно построить частотные характеристики цифрового фильтра?

Вопросы для тестирования

I:1

S: ### – это функция, показывающая зависимость одной величины от другой, причем эта зависимость должна быть нам чем-то интересна, она должна содержать информацию о каком-то процессе или явлении.

+: Сигнал

+: сигнал

I:2

S: ### – это зависимость давления воздуха от времени, а изображение – зависимость яркости и цвета от пространственных координат. И то, и другое мы можем рассматривать как некие сигналы.

+: Звук

+: звук

I:3

S: Звук – это зависимость давления воздуха от времени, а ### – зависимость яркости и цвета от пространственных координат. И то, и другое мы можем рассматривать как некие сигналы.

+: Изображение

+: изображение

I:4

S: ### – это их преобразование *в другие сигналы* или в числовые значения – как правило, для того, чтобы извлечь из них какую-то полезную информацию.

+: Обработка сигналов

+: обработка сигналов

I:5

S: ### сигналов – это их преобразование *в другие сигналы* или в числовые значения – как правило, для того, чтобы извлечь из них какую-то полезную информацию.

+: Обработка

+: обработка

I:6

S: ### дискретных сигналов – это преобразование одних последовательностей чисел в другие путем выполнения каких-то математических операций.

+: Обработка

+: обработка

I:7

S: Обработка ### сигналов – это преобразование одних последовательностей чисел в другие путем выполнения каких-то математических операций.

+: дискретных

+: Дискретных

I:8

S: Способом получения дискретных сигналов является ### аналоговых сигналов.

+: дискретизация

+: Дискретизация

I:9

S: Способом получения дискретных сигналов является дискретизация ### сигналов.

+: аналоговых

+: Аналоговых

I:10

S: Способом получения дискретных сигналов является дискретизация ... сигналов.

+: аналоговых

-: цифровых

-: смешанных

I:11

S: ### сигнал – это непрерывная функция времени, результат измерения значений какой-то физической величины, например, электрического напряжения.

+ : аналоговый

+ : Аналоговый

I:12

S: ... *сигнал* – это непрерывная функция времени, результат измерения значений какой-то физической величины.

- : Цифровой;

+ : Аналоговый;

- : Звуковой.

I:13

S: Устройство, осуществляемое измерение значений входного сигнала с некоторым шагом по времени, равным T , называется

- : аналоговым преобразователем (АЦ);

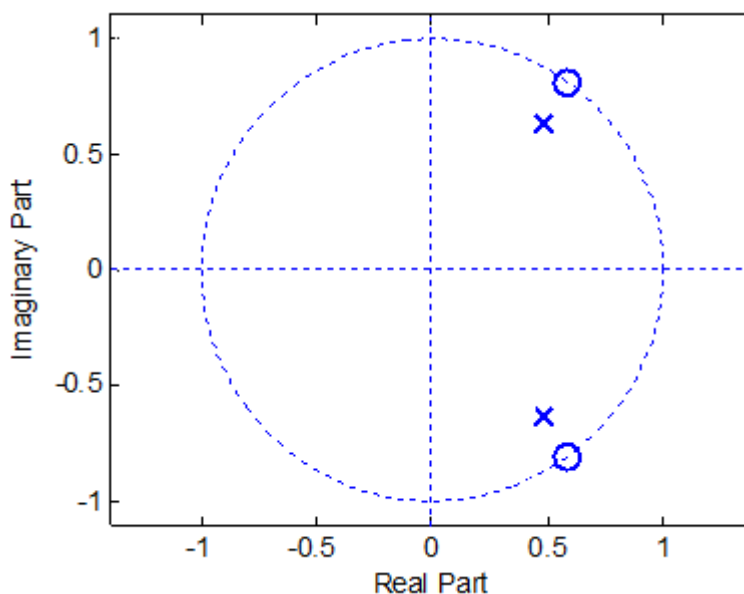
+ : аналого-цифровым преобразователем (АЦП);

- : цифрово-аналоговым преобразователем (ЦАП);

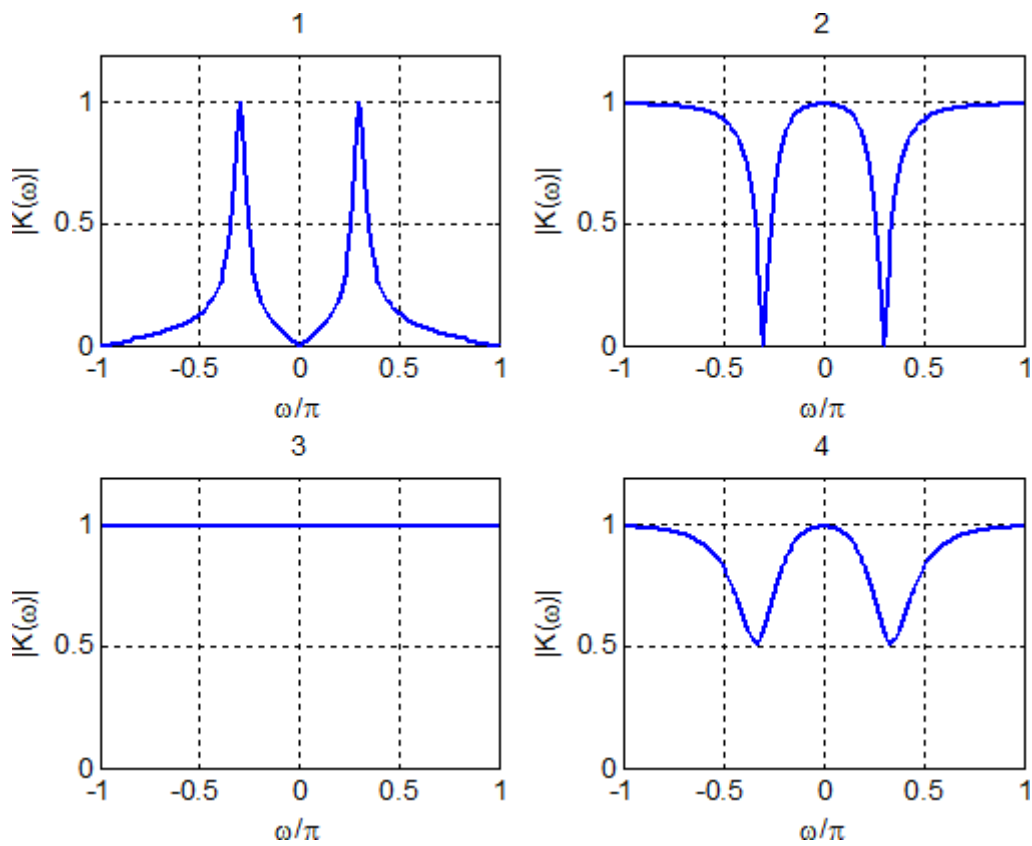
- : цифровым преобразователем (ЦП).

I:14

S: Расположение нулей и полюсов функции передачи дискретной системы на комплексной плоскости имеет следующий вид:



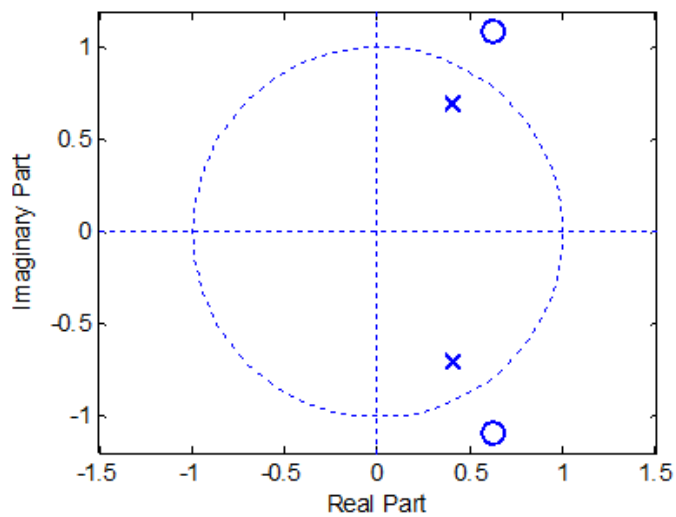
Какая из приведенных АЧХ 1–4 соответствует этому расположению нулей и полюсов?



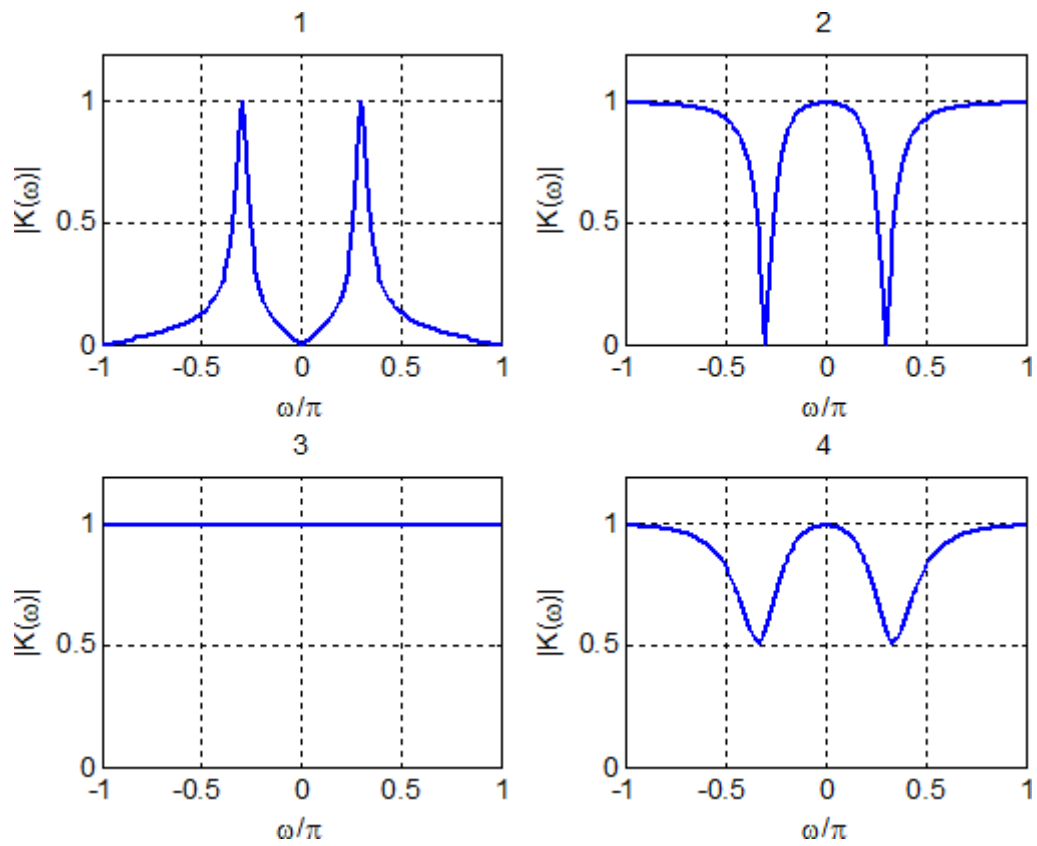
- 1
- + 2
- 3
- 4

I:15

S: Расположение нулей и полюсов функции передачи дискретной системы на комплексной плоскости имеет следующий вид:



Какая из приведенных АЧХ 1–4 соответствует этому расположению нулей и полюсов?



- 1

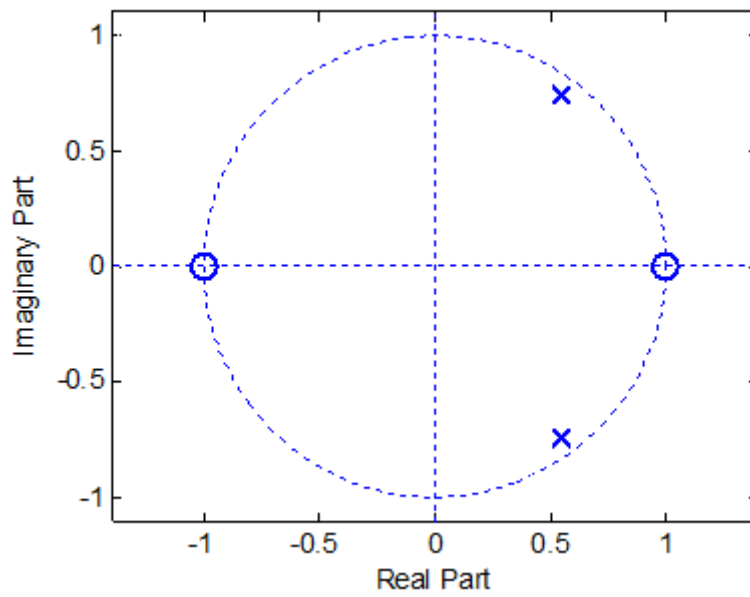
- 2

+ 3

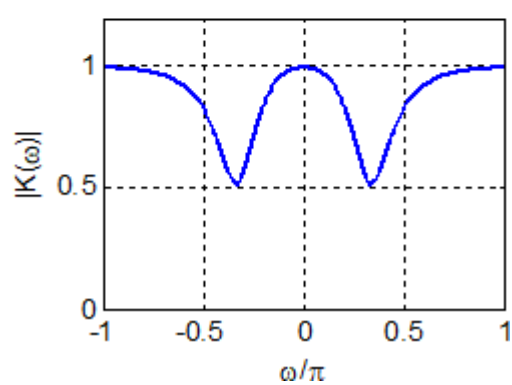
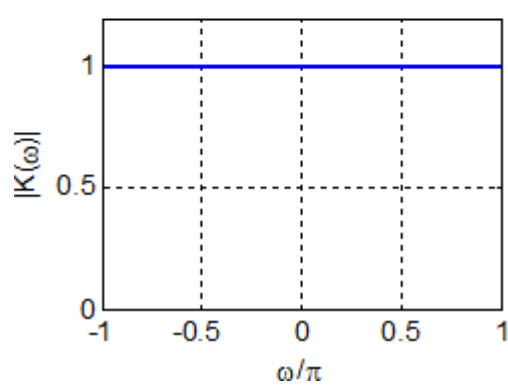
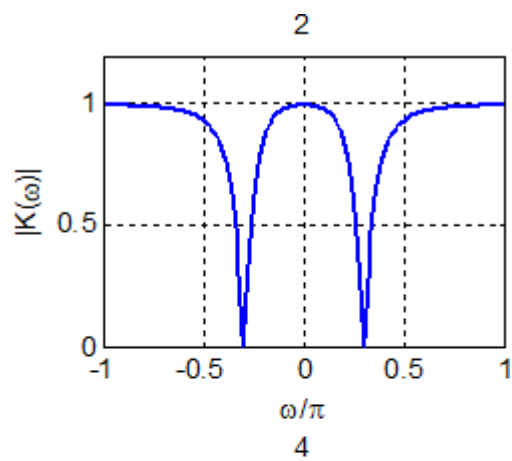
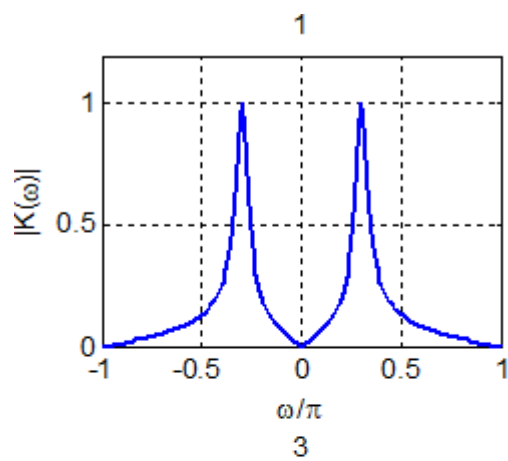
- 4

I:16

S: Расположение нулей и полюсов функции передачи дискретной системы на комплексной плоскости имеет следующий вид:



Какая из приведенных АЧХ 1–4 соответствует этому расположению нулей и полюсов?



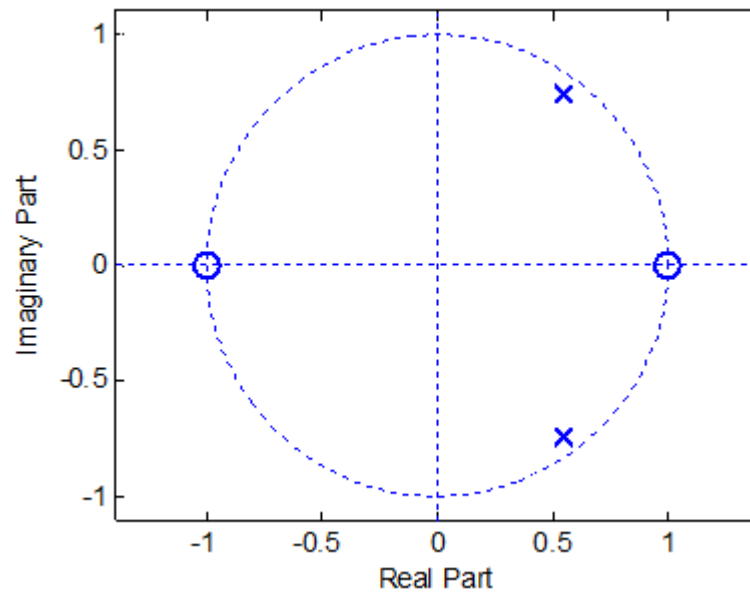
+1

-2

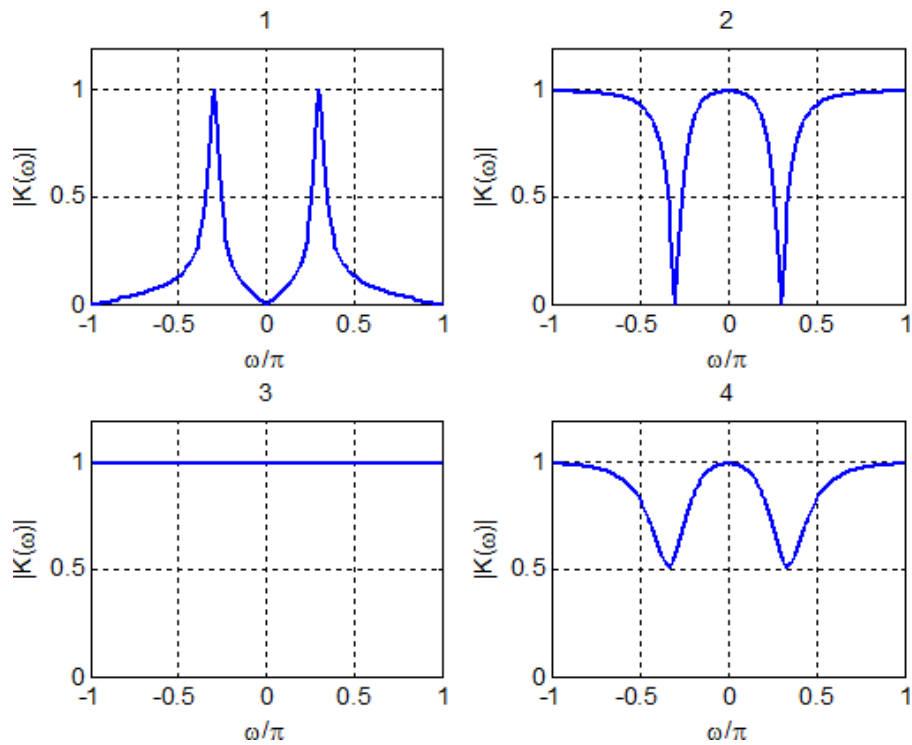
-3

I:17

S: Расположение нулей и полюсов функции передачи дискретной системы на комплексной плоскости имеет следующий вид:



Какая из приведенных АЧХ 1–4 соответствует этому расположению нулей и полюсов?



+1

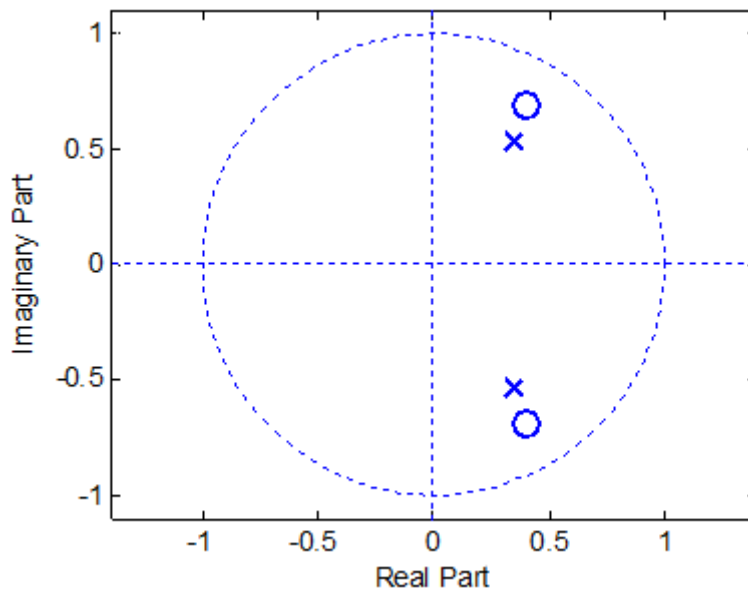
- 2

- 3

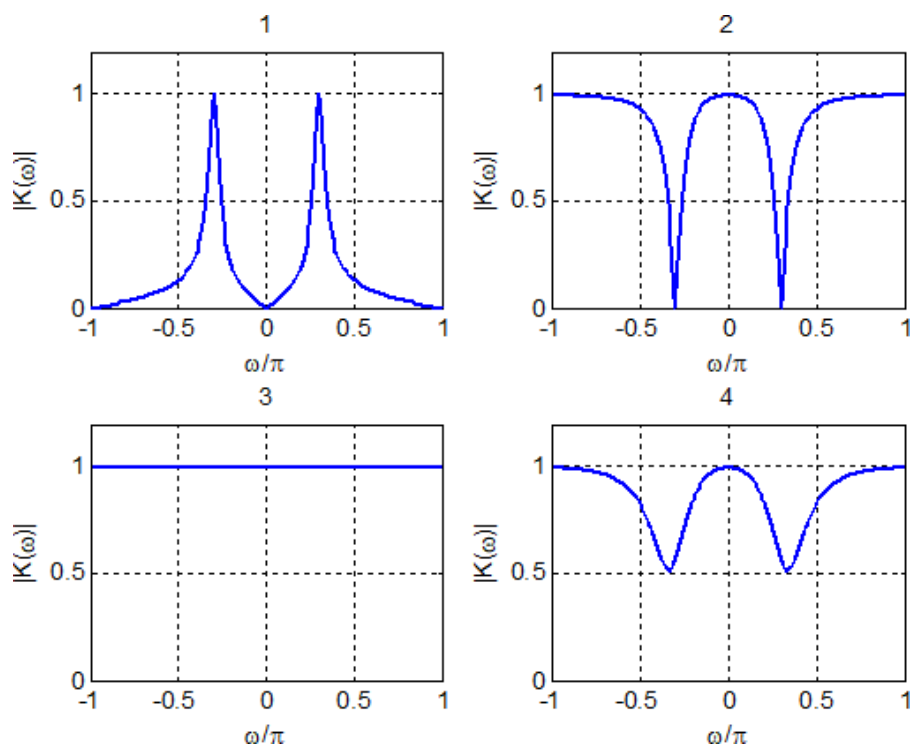
- 4

I:18

S: Расположение нулей и полюсов функции передачи дискретной системы на комплексной плоскости имеет следующий вид:



Какая из приведенных АЧХ 1–4 соответствует этому расположению нулей и полюсов?



- 1

- 2

- 3

+4

I:18

S: Какие из приведенных функций передачи соответствуют всепропускающим (фазовым) фильтрам?

$H(z) = \frac{1 - 0.4z^{-1} + 0.6z^{-2}}{1 + 0.4z^{-1} + 0.6z^{-2}}$

$H(z) = \frac{0.6 - 0.4z^{-1} + z^{-2}}{1 + 0.4z^{-1} + 0.6z^{-2}}$

$H(z) = \frac{0.6 + 0.4z^{-1} + z^{-2}}{1 + 0.4z^{-1} + 0.6z^{-2}}$ ✓

$H(z) = \frac{-0.6 - 0.4z^{-1} - z^{-2}}{1 + 0.4z^{-1} + 0.6z^{-2}}$ ✓

I:19

S: Функция передачи дискретной системы имеет вид

$$H(z) = \frac{1.7 - 1.48z^{-1} + 0.24z^{-2}}{1 - 1.3z^{-1} + 0.4z^{-2}}$$

Представьте её в виде суммы простых дробей:

$$H(z) = \frac{r_1}{1 - p_1 z^{-1}} + \frac{r_2}{1 - p_2 z^{-1}} + c$$

В качестве ответа введите *точные* значения параметров r_1, p_1, r_2, p_2 в указанном порядке, используя в качестве разделителя целой и дробной частей числа **точку**. Для однозначности порядка слагаемых выберите в качестве p_1 полюс с *меньшим* модулем.

Ответ:

$r_1 - 0.5$

$p_1 - 0.5$

$r_2 - 0.6$

$p_2 - 0.8$

$c - 0.6$

I:20

S: Функция передачи дискретной системы имеет вид:

$$H(z) = \frac{0.2 - 0.2z^{-2}}{1 + 0.8z^{-1} + 0.8z^{-2}}$$

Получите аналитическую формулу для импульсной характеристики этой системы в виде:

$$h(k) = c\delta(k) + Aa^k \cos(\tilde{\omega}k + \varphi), k \geq 0$$

В качестве ответа введите значения параметров c , A , a , w , q , округленные *ровно до двух знаков после запятой*, используя в качестве разделителя целой и дробной частей числа *точку*. Значение частоты w должно быть положительным и не превышать Π , значение фазы q должно лежать в диапазоне $-\Pi \dots +\Pi$.

Ответ:

$c - 0.25$

$A - 0.45$

$a - 0.89$

$w - 2.03$

$q - 0.06$

I:21

S: Функция передачи дискретной системы имеет вид

$$H(z) = \frac{1 + z^{-1} + z^{-2}}{1 + 0.6z^{-1} + a_2 z^{-2}}$$

В каком диапазоне должны лежать значения коэффициента a_2 , чтобы эта система была устойчивой?

$-0.4 < a_2 < 0.09$

$-0.4 < a_2 < 1$ ✓

$-1 < a_2 < -0.4$

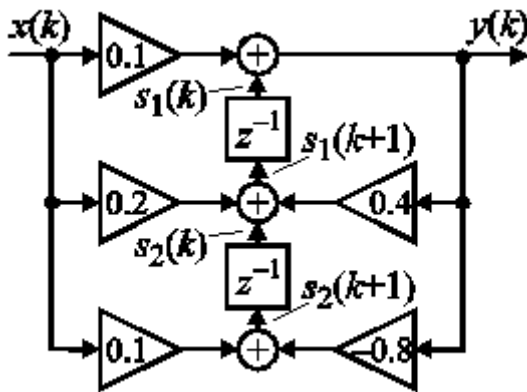
$-1 < a_2 < 1$

$-1 < a_2 < 0.09$

$0.09 < a_2 < 1$

I:22

S: Структурная схема дискретной системы показана на рисунке:



Порядок нумерации элементов вектора состояния

$$s(k) = \begin{bmatrix} s_1(k) \\ s_2(k) \end{bmatrix}$$

системы указан на рисунке.

Чему равны параметры пространства состояний для этой схемы?

$A = \begin{bmatrix} 0.4 & 0 \\ 1 & -0.8 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.7 \\ -0.6 \end{bmatrix}, C = [0 \ 1], D = 0.1$

$A = \begin{bmatrix} 0.4 & 1 \\ 0 & -0.8 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.1 \end{bmatrix}, C = [0.4 \ 0.8], D = 0.1$

$A = \begin{bmatrix} 0.4 & -0.8 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.6 \\ -0.7 \end{bmatrix}, C = [0.8 \ 0.4], D = 0.1$

$A = \begin{bmatrix} 0.4 & 1 \\ -0.8 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.24 \\ 0.02 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0], D = 0.1 \checkmark$

I:23

S: Параметры пространства состояний равны:

$$A = \begin{bmatrix} -0.8 & -1.5 \\ 0.96 & 0.8 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.625 \\ 0.5 \end{bmatrix}, C = [0.72 \quad -0.9], D = 1$$

Найдите функцию передачи данной системы и приведите ее к стандартной форме записи:

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}$$

В качестве ответа введите *точные* значения коэффициентов b_0, b_1, b_2, a_1, a_2 в указанном порядке.

Ответ:

b_0 - 1

b_1 - 0

b_2 - -1

a_1 - 0

a_2 - 0.8

I:24

S: Основными параметрами гармонического сигнала являются:

- а) амплитуда A и частота ω ;
- б) Амплитуда A и начальная фаза φ ;
- в) Амплитуда A , начальная фаза φ и частота ω ;
- г) Частота ω и начальная фаза φ .

I:25

S: Как определяется детерминированный сигнал?

- а) значение этого сигнала в любой момент времени определяется точно.

б) в любой момент времени этот сигнал представляет собой случайную величину, которая принимает конкретное значение с некоторой вероятностью.

в) в любой момент времени этот сигнал представляет собой не случайную величину, которая принимает конкретное значение с некоторой вероятностью.

г) Значение этого сигнала нельзя определить точно в любой момент времени.

I:26

S: Выберите формулу прямого преобразования Фурье?

а) $S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt$

б) $S(\omega) = \int_0^T s(t)s(t-\tau)dt$

в) $S(\omega) = \frac{1}{T} \int_{-T}^{T/2} s(t)e^{-j\omega t} dt$

г) $S(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(t)}{t-\tau} dt$

I:27

S: Дискретное преобразование Фурье используется для?

- а) корреляционного анализа;
- б) анализа предельных циклов;
- в) спектрального анализа;
- г) квантового анализа.

I:28

S: При обработке сигналов приходится увеличивать или уменьшать частоту дискретизации сигналов. Что производит функция перераспределения?

- а) повышает чистоту дискретизации в целое число раз.
- б) изменяет частоту дискретизации в произвольное число раз.
- в) понижает чистоту дискретизации в целое число раз.
- г) повышает чистоту дискретизации в произвольное число раз.

I:29

S: Какое свойство не относится к дискретному преобразованию Фурье?

- а) линейность;
- б) круговая свертка;
- в) задержка;
- г) симметрия.

I:30

S: Z – преобразование имеет свойства:

- а) нелинейность;
- б) цикличность;
- в) линейность, задержка, свертка
- г) сопряженность.

I:31

S: Преобразование Фурье (ПФ) используется для:

- а) преобразования только периодических сигналов из временной области в частотную область и обратно;
- б) фильтрации нежелательных частот сигналов;
- в) преобразования непериодических сигналов из временной области в частотную;
- г) сжатия дискретных сигналов.

I:32

S: Сигнал, непрерывно изменяющийся и по аргументу и по значению:

- а) аналоговый;
- б) дискретно-аналоговый;
- в) цифровой.

I:33

S: Периодические сигналы:

- а) $s(t) = s(t + T)$;
- б) $s(t) = U \sin(2\pi/T)$;
- в) $s(t) = at$.

Вопросы, выносимые на коллоквиум

Первый коллоквиум

1. Понятие измерения. Виды измерений.
2. Методы измерений.
3. Классификация средств измерений. Метрологические характеристики средств измерений.
4. Единство измерений. Единицы физических величин.
5. Система единиц физических величин. Международная система единиц SI.
6. Принципы и средства воспроизведения единиц физических величин.
7. Погрешность, классификация погрешностей.
8. Систематическая погрешность
9. Методы уменьшения систематической погрешности.
10. Случайная погрешность.
11. Законы распределения случайных погрешностей.
12. Математическое ожидание, дисперсия и среднеквадратическое отклонение результата измерения.
13. Однократное и многократное измерения, их погрешности, оформление результатов измерений.
14. Косвенное измерение и его погрешности.
15. Общие принципы измерения токов и напряжений электромеханическими измерительными приборами.
16. Приборы на основе магнитоэлектрических измерительных механизмов и особенности их использования при измерении в цепях переменного тока.
17. Приборы на основе электродинамических, электромагнитных и электростатических измерительных механизмов.
18. Измерение токов, напряжения, методы изменения пределов их измерения.
19. Параметры переменных напряжений и измерительные преобразователи электронных вольтметров.
20. Вольтметры постоянного и переменного напряжений. Измерение постоянного, среднеквадратического и средневыпрямленного напряжений.
21. Импульсные вольтметры.

Второй коллоквиум

1. Функциональные схемы вольтметров. Основные узлы цифровых вольтметров.
2. Принципы построения цифровых вольтметров. Цифровые вольтметры с двухтактным интегрированием.
3. Назначение и классификация осциллографов. Функциональная схема и принцип действия универсального осциллографа.
4. Измерение частоты, временных интервалов и фазового сдвига.
5. Параметры резисторов, катушек индуктивности и конденсаторов и методы их измерения.

6. Омметры. Мостовые методы измерения параметров цепей.
7. Резонансные методы измерения параметров цепей, измеритель добротности.
8. Измерение полных сопротивлений и полных проводимостей цифровыми измерителями.
9. Измерение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) электрических цепей.
10. Классификация и назначение измерительных генераторов.
11. Генераторы гармонических колебаний.
12. Принципы построения генераторов низкой и высокой частоты и их характеристики.
13. Основные тенденции развития радиоизмерительной техники. Автоматизация измерений.
14. Измерения разности фаз. Фазовые соотношения при преобразовании и умножении частоты.
15. Методы на основе мостов постоянного и переменного тока, принцип действия.
16. Трансформаторные мосты.
17. Резонансные методы измерения сопротивления, емкости, индуктивности и добротности.
18. Микропроцессорные измерители параметров элементов цепей.
19. Методы и средства измерений амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик радиотехнических цепей.

Вопросы на экзамен

1. Дискретизация и восстановление непрерывных сигналов.
2. Дискретизация узкополосных сигналов.
3. Спектр дискретного сигнала.
4. Нормировка времени и частоты.
5. Z-преобразование и его свойства.
6. Дискретные случайные сигналы.
7. Способы описания дискретных систем и взаимные преобразования между ними.
8. Все пропускающие (фазовые) фильтры.
9. Симметричные фильтры.
10. Системы первого порядка: простейшие фильтры нижних и верхних частот.
11. Системы второго порядка: условие устойчивости, резонатор и режектор второго порядка.
12. Преобразование случайного процесса в дискретной системе.
13. Структурные схемы (формы реализации) дискретных фильтров.
14. Импульсные характеристики некоторых идеализированных фильтров.
15. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ).
16. Формулы прямого и обратного ДПФ.

17. Соотношение между ДПФ и спектром дискретного сигнала.
18. Быстрые алгоритмы вычисления ДПФ.
19. Взаимосвязь ДПФ и дискретной фильтрации.
20. Алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) с прореживанием по времени..
21. Весовые функции (окна).
22. Классификация методов синтеза.
23. Синтез по аналоговому прототипу.
24. Прямые методы синтеза нерекурсивных фильтров.
25. Способы представления чисел в цифровых системах.
26. Форматы с фиксированной и плавающей запятой.
27. Преимущества и недостатки форматов представления чисел с фиксированной запятой.
28. Преимущества и недостатки форматов представления чисел с плавающей запятой.
29. Шум квантования.
30. Оптимальное неравномерное квантование.
31. Эффекты квантования в цифровых фильтрах.
32. Масштабирование коэффициентов цифровых фильтров.
33. Влияние формы реализации фильтра на проявление эффектов квантования.
34. Аналитическое описание собственных шумов цифровых фильтров.
35. Изменение частоты дискретизации.
36. Полифазные структуры.
37. Передискретизация сигнала, структурная схема процесса.
38. Полифазная реализация процессов интерполяции и прореживания.
39. Каскадные структуры «интегратор – гребенчатый фильтр».
40. Многокаскадные структуры при интерполяции и прореживании.