

УДК 621.317.35

**Д.Н. Кузнецов, О.И. Ровняков**

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк,  
кафедра электронной техники  
E-mail: [kuzen2000@rambler.ru](mailto:kuzen2000@rambler.ru)

## **АНАЛИЗАТОР ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ НА ОСНОВЕ СИНТЕЗАТОРА С ПРЯМЫМ ЦИФРОВЫМ СИНТЕЗОМ ЧАСТОТЫ**

### **Abstract**

**Kuznetsov D., Rovnyakov O. Linear quadrupoles frequency response analyzer based on direct digital synthesizer.** In this article the function chart, algorithm of work of the frequency response analyzer and results of the researches made with its usage are considered.

**Keywords:** frequency the analysis, synthesize of frequency, designing, modeling, experiment.

### **Анотація**

**Кузнецов Д.М., Ровняков О.І. Аналізатор частотних характеристик лінійних чотириполіусників на основі синтезатора з прямим цифровим синтезом частоти.** У статті розглянуті функціональна схема, алгоритм роботи і результати досліджень частотного аналізатора на базі синтезатора з прямим цифровим синтезом частоти.

**Ключові слова:** частотний аналіз, синтезатор частоти, проектування, моделювання, експеримент.

### **Аннотация**

**Кузнецов Д.Н., Ровняков О.И. Анализатор частотных характеристик линейных четырехполюсников на основе синтезатора с прямым цифровым синтезом частоты.** В статье рассмотрены функциональная схема, алгоритм работы и результаты исследований частотного анализатора на базе синтезатора с прямым цифровым синтезом частоты.

**Ключевые слова:** частотный анализ, синтезатор частоты, проектирование, моделирование, эксперимент.

**Актуальность.** Задача нахождения амплитудно-частотных характеристик линейных четырёхполюсников в малосигнальном режиме является одной из наиболее часто решаемых в ходе анализа и разработки электронных схем. При этом она же обычно является одной из наиболее трудоёмких. Достаточно часто практикуется метод снятия амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) по нескольким точкам путём определения коэффициента передачи схемы на интересующих частотах «вручную». Однако этот метод крайне трудоёмок, «растянут» во времени, и зачастую не даёт полной картины частотной характеристики.

Другой подход состоит в использовании специализированных устройств — осциллографических измерителей АЧХ или установок на базе генератора качающейся частоты (ГКЧ) и осциллографа. Такой метод позволяет быстро получить качественные результаты, однако требует применения дорогостоящего специализированного оборудования. Авторами статьи была предпринята попытка создания недорогого устройства для работы совместно с аналоговым или цифровыми осциллографом, которое решало бы проблему быстрого снятия АЧХ в требуемом диапазоне частот.

При работе с цифровыми осциллографами при этом появляется также возможность использования полученных данных в электронном виде и их дальнейшей программной обработки в пакетах прикладных программ.

Разработанное устройство позволяет оперативно изменять программное обеспечение под конкретные требования к частотам выходного сигнала.

**Постановка задачи.** На этапе разработки к проектируемому устройству были сформулированы следующие требования:

- генерация синусоидального сигнала в звуковом диапазоне частот;
- возможность девиации частоты в произвольном интервале;
- малый шаг и высокая точность установки частоты;
- вывод АЧХ на цифровой осциллограф или аналоговый осциллограф с ЭЛТ;
- синхронизация работы генератора и приёмного устройства — осциллографа;
- вывод меток частоты на экран приёмного устройства;
- связь с персональным компьютером и возможность программирования устройства через последовательный интерфейс RS-232;

**Решение поставленной задачи.** Основным блоком устройства, предназначенного для съёма частотных характеристик, безусловно, является синтезатор или генератор сигнала изменяемой частоты. Поскольку одним из требований к устройству является возможность получения малого шага частот сигнала и высокая точность их установки, было предложено построить устройство на базе синтезатора. В широком смысле синтезатор частоты — устройство, позволяющее получать частоту или набор частот выходного сигнала на основе частоты сигнала опорного. К числу наиболее распространённых методов синтеза частоты относятся:

- прямой аналоговый синтез;
- косвенный синтез, использующий фазовую автоподстройку частоты ФАПЧ;
- прямой цифровой синтез частоты (Direct Digital Synthesizers или DDS).

Из перечисленных методов в последнее время получает широкое распространение метод прямого цифрового синтеза частоты, что обусловлено появлением недорогих и простых в использовании интегральных DDS-синтезаторов, построенных по принципу «всё в одном».

Основные преимущества данного метода [1,2]:

- очень малый реально достижимый шаг перестройки по частоте и фазе;
- предельно точная установка частоты выходного сигнала;
- чрезвычайно быстрая перестройка частоты и фазы;
- отсутствие переходных процессов при перестройке, характерных для ФАПЧ;
- высокая температурная стабильность;
- стандартные цифровые интерфейсы управления микросхемами DDS-синтезаторов.

DDS уникальны своей цифровой определенностью: генерируемый ими сигнал синтезируется со свойственной цифровым системам точностью. Частота, амплитуда и фаза сигнала в любой момент времени точно известны и подконтрольны. DDS практически не подвержены температурному дрейфу и старению. Единственным элементом, который обладает свойственными аналоговым схемам нестабильностями, является ЦАП. Все это является причиной того, что в последнее время DDS вытесняют обычные аналоговые синтезаторы частот.

Вышеперечисленные достоинства метода делают его идеальным вариантом для использования в поставленной работе.

В настоящее время признанным лидером по производству интегральным микросхем (ИМС) DDS-синтезаторов является фирма Analog Devise. Она выпускает целый ряд DDS-синтезаторов для решения широкого круга инженерных задач. Для достижения поставленной цели была выбрана ИМС AD9835. На рисунке 1 изображена структура этой микросхемы, взятая из документации производителя [3].

Данная ИМС выполнена по традиционной для синтезаторов данного типа структуре. Программирование ИМС на желаемый режим работы осуществляется посредством стандартного цифрового последовательного интерфейса I<sup>2</sup>C. Тактирование работы синтезатора осуществляется посредством сигнала опорной частоты MCLK. Основным элементом DDS-синтезатора является 32-разрядный регистр, называемый аккумулятором фазы. Содержимое частотных регистров FREQ0 и

FREQ1 служит делителем частоты опорного сигнала. Число в аккумуляторе фазы инкрементируется с частотой, равной отношению частоты опорного сигнала  $f_{\text{ТАКТ}}$  и числа в частотном регистре. Аккумулятор фазы работает с периодическими переполнениями, обеспечивая арифметику по модулю  $2N$ . Такое периодическое переполнение соответствует периодическому поведению функции  $\sin$  с периодом  $2\pi$ . Другими словами, частота переполнений аккумулятора фазы равна частоте выходного сигнала. Это частота определяется формулой:  $F_{\text{ВЫХ}} = M \cdot f_{\text{ТАКТ}} / 2N$  где  $F_{\text{ВЫХ}}$  — выходная частота,  $f_{\text{ТАКТ}}$  — тактовая частота,  $M$  — код частоты,  $N$  — разрядность аккумулятора фазы.

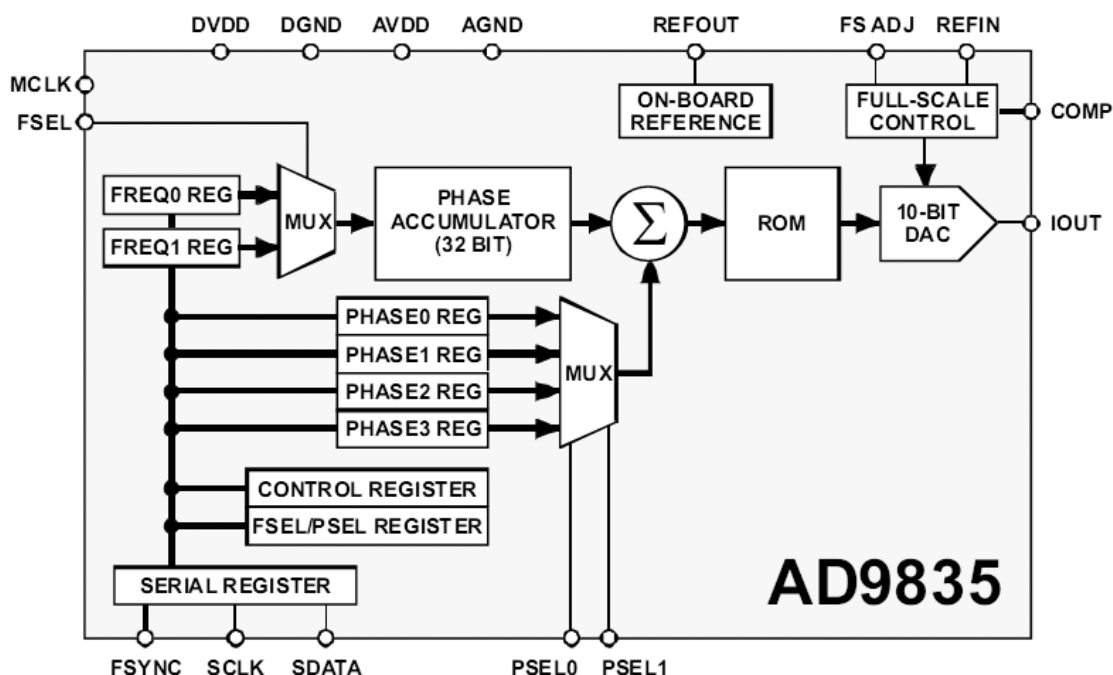


Рисунок 1 — Структура интегрального DDS-синтезатора AD9835

Во внутреннем постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) ИМС синтезатора хранится таблица значений функции синуса от дискретных значений аргумента. Содержимое аккумулятора служит аргументом-указателем на адрес конкретной ячейки ПЗУ. Таким образом, в каждом цикле работы синтезатора происходит выборка текущих значений синуса из ПЗУ. Численные значения из ПЗУ служат входной величиной цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), преобразующего периодический массив двоичных чисел в непрерывный аналоговый сигнал.

Функциональная схема разработанного измерителя АЧХ приведена на рисунке 2.

Устройство работает следующим образом. Компьютер передает в микроконтроллер МК ряд частот, воспроизводимых синтезатором при снятии АЧХ исследуемой схемы. МК рассчитывает для каждой частоты соответствующее значение для частотного регистра DDS-синтезатора и сохраняет их в массив. Далее начинается цикл измерений, в котором DDS-синтезатор под управлением МК последовательно воспроизводит сигналы заданного ряда частот, которые подаются на вход исследуемой схемы. Выходной сигнал исследуемой схемы поступает на вход «Y1» электронного осциллографа для визуализации АЧХ. Второй канал осциллографа «Y2» используется для нанесения частотных меток. Для синхронизации работы осциллографа и синтезатора МК в каждом цикле измерений формирует соответствующие синхроимпульсы запуска хода электронного луча.

В качестве микроконтроллера в устройстве применен 8-разрядный МК AT89C51ED2 с возможностью внутрисхемного перепрограммирования по интерфейсу RS232 [5].

**Результаты исследований.** Для проверки работоспособности разработанного устройства и оценки адекватности получаемых с его помощью результатов было проведено экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик простейших RC-цепей.

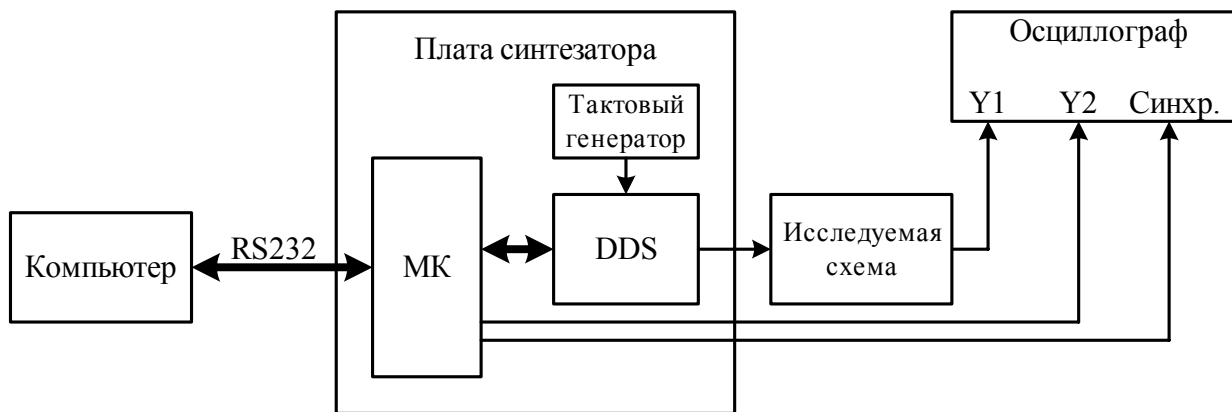


Рисунок 2 — Функциональная схема измерителя АЧХ

На рисунках 3–5 приведены схемы фильтров нижних частот (ФНЧ), верхних частот (ФВЧ) и также полосового фильтра соответственно. Перед экспериментальными исследованиями было проведено моделирование выбранных схем в режиме малого сигнала в пакете Multisim 10. Полученные при моделировании амплитудно-частотные характеристики ФНЧ, ФВЧ и полосового фильтра приведены на рисунках 6–8 соответственно.

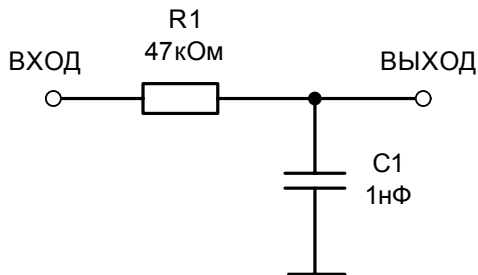


Рисунок 3 — ФНЧ первого порядка

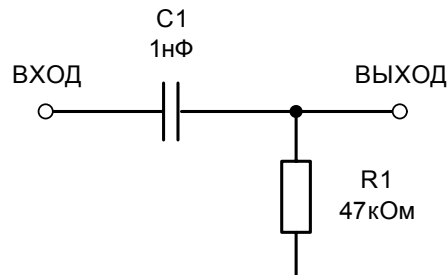


Рисунок 4 — ФВЧ первого порядка

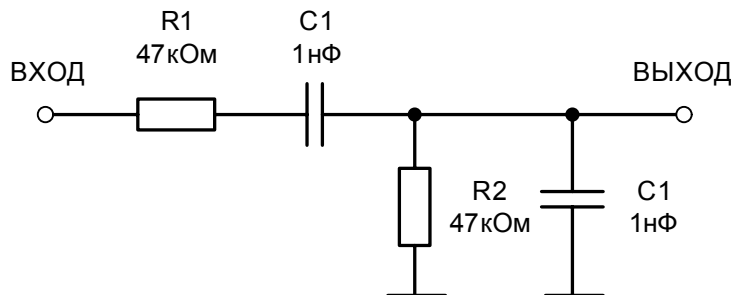


Рисунок 5 — Схема полосового фильтра

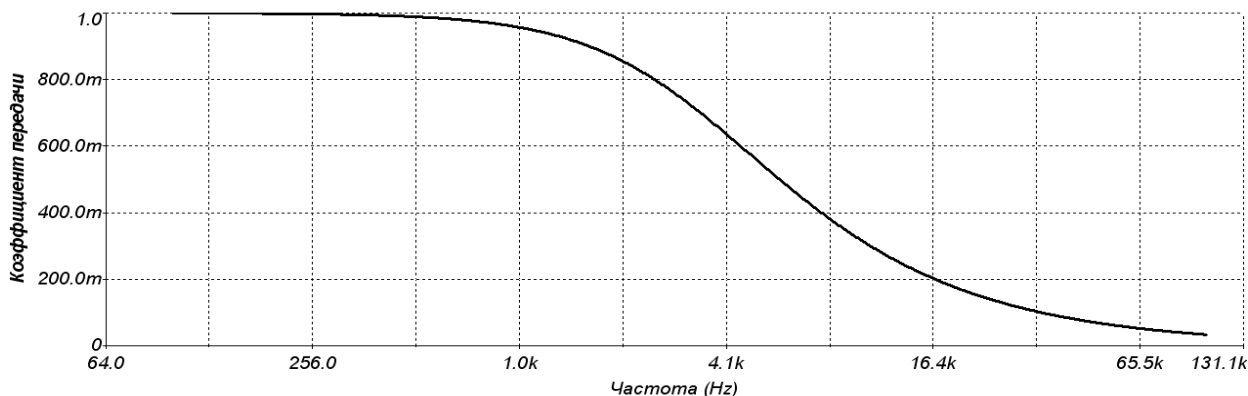


Рисунок 6 — АЧХ фильтра нижних частот

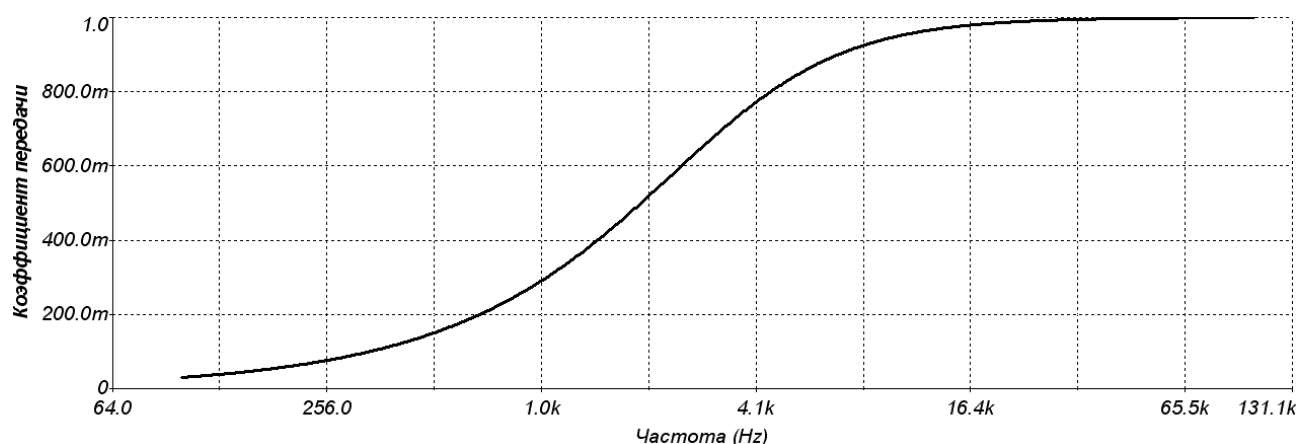


Рисунок 7 — АЧХ фільтра верхніх частот

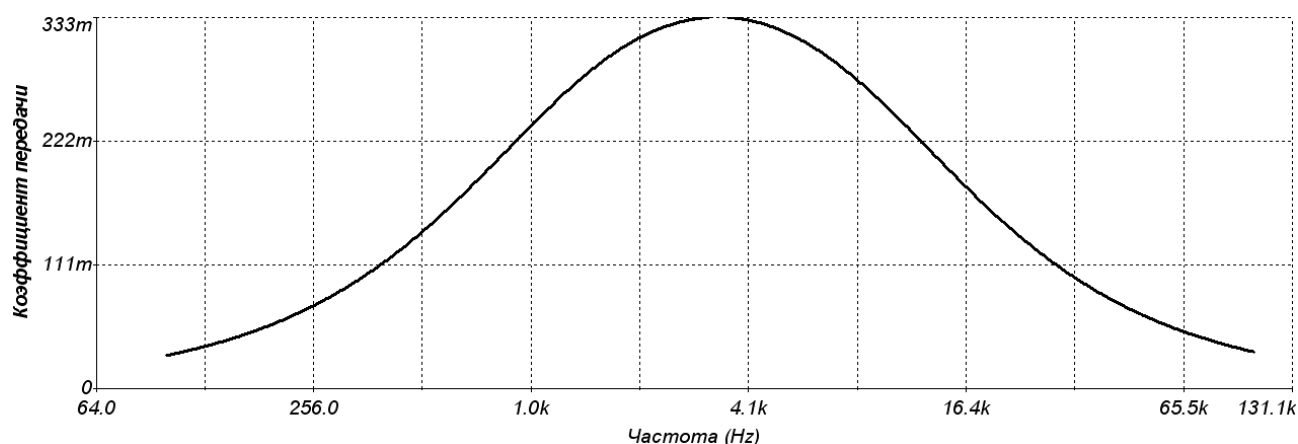


Рисунок 8 — АЧХ полосового фільтра

Для експериментальних досліджень измеритель АЧХ был запрограммирован на последовательную выдачу синусоидальных тестовых сигналов с октавной характеристикой возрастания частоты в диапазоне 100Гц..102,4кГц (ряд из 71 частоты). Устройством регистрации выходного сигнала исследуемых звеньев служил аналоговый осциллограф С1-117/1. Поскольку ЭЛТ осциллографа С1-117/1 имеет небольшое послесвечение, в то время как для отображения всего диапазона частот на экране ЭЛТ требовалось время развёртки, примерно равное 3с, фиксация результатов производилась фотографически в темноте, с выдержкой 4 секунды. Результаты исследований для схем ФНЧ, ФВЧ и полосового фильтра приведены на рисунках 9 и 10 соответственно. Как показал эксперимент, результаты, полученные при помощи измерителя АЧХ, идентичны результатам моделирования.

**Выводы.** Разработанный измеритель АЧХ на базе ИМС прямого цифрового синтеза частоты обеспечивает высокое качество выходного синусоидального сигнала в широком диапазоне частот с малым шагом перестройки. Устройство позволяет производить быструю смену программного обеспечения в зависимости от конкретных требований к частотам выходного сигнала. Устройство позволяет оперативно получать амплитудно-частотные характеристики анализируемых четырёхполосников в интересующем диапазоне частот. Схема прибора не содержит дорогостоящих компонентов и при использовании с аналоговыми или цифровыми осциллографами может рассматриваться в качестве недорогой альтернативы специализированным измерителям АЧХ.

### Литература

1. Ридико Л. DDS: прямой цифровой синтез частоты — Компоненты и технологии. 2001. — № 7. — С. 50–54. [http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/01\\_07/stat\\_50.htm](http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/01_07/stat_50.htm).

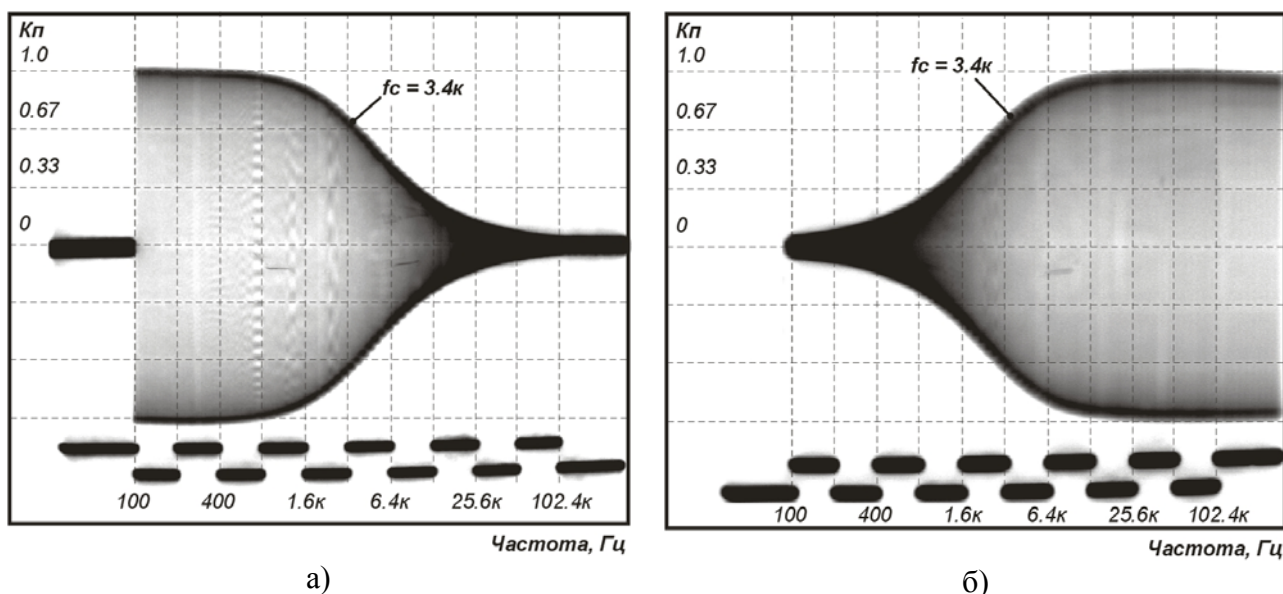


Рисунок 9 — Полученные экспериментально АЧХ ФНЧ (а) и ФВЧ (б)

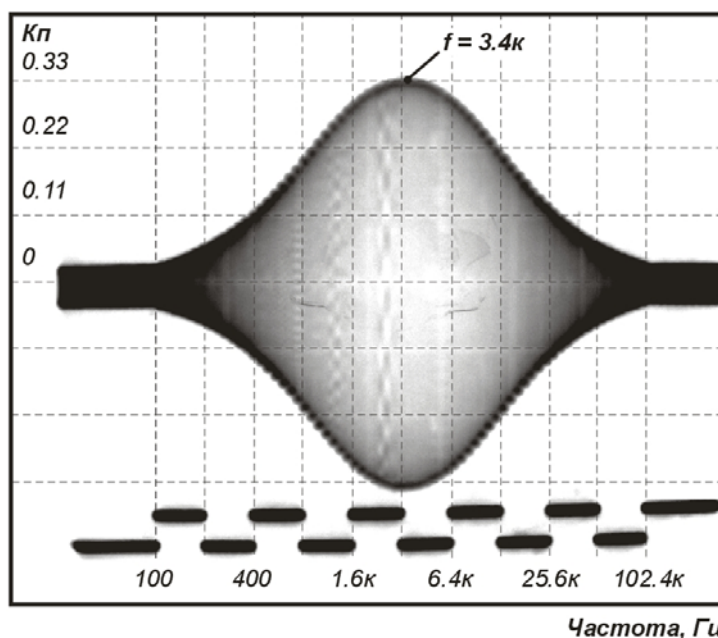


Рисунок 10 — Полученная экспериментально АЧХ полосового фильтра

2. Мёрфи Е., Слеттери К. Всё о синтезаторах DDS. Analog Dialogue 38-08 (Август 2004). <http://www.analog.com.ru/Public/DDSSYNTH.pdf>.
3. AD9835 50 MHz CMOS Complete DDS — техническое описание интегральных DDS-синтезаторов фирмы ANALOG DEVICES. [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD9835.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9835.pdf)
4. Slattery С. AN-621 APPLICATION NOTE: Programming the AD9832/AD9835 — Фирменное описание особенностей программирования DDS-синтезаторов ANALOG DEVICES. [http://www.analog.com/static/imported-files/application\\_notes/522433833AN621\\_0.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/522433833AN621_0.pdf).
5. AT89C51ED2 8-bit Flash Microcontroller. Техническое описание микроконтроллера ATMEL. <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/82697/ATMEL/AT89C51ED2.html>.

Здано в редакцію:  
11.03.2009р.

Рекомендовано до друку:  
д.т.н, проф. Зорі А.А.