

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

М. Ю. Паршуков

1. Принципы построения аппаратно-программного комплекса для измерения динамических параметров операционных усилителей

Важнейшими динамическими параметрами операционных усилителей (ОУ) являются максимальная скорость нарастания выходного напряжения, частота единичного усиления и запас устойчивости по фазе. Анализ требований, предъявляемых к средствам измерений динамических параметров ОУ [1], показывает, что одновременное выполнение этих требований возможно путем создания аппаратно-программного комплекса (АПК), принципы построения которого можно сформулировать следующим образом:

1. АПК должен обладать многофункциональностью, заключающейся в выполнении комплексом нескольких различных функций, измерении нескольких параметров ОУ с помощью одних и тех же блоков аппаратной части, что позволяет избежать аппаратной избыточности, уменьшить число элементов и связей, уменьшить габариты и стоимость АПК.

2. АПК должен обладать гибкостью, заключающейся в автоматизированном изменении схемы включения ОУ и подключении различных источников сигналов к его входу и измерительных преобразователей к его выходу при измерении нескольких параметров ОУ.

3. Многофункциональность и гибкость АПК должны обеспечиваться за счет программного управления его аппаратной частью.

4. Программное обеспечение АПК должно обеспечивать управление автоматизированными процессами подготовки и проведения измерительного эксперимента, математической обработки и представления результатов измерений.

5. Программное обеспечение АПК должно обеспечивать пользователю возможность пополнения базы данных, изменения программы измерительного эксперимента и формата представления его результатов.

6. Программное обеспечение АПК должно быть совместимым с программными средствами современных автоматизированных информационно-измерительных и управляющих систем.

Для практической реализации сформулированных принципов измерения динамических параметров ОУ структура аппаратной части АПК должна содержать совокупность блоков формирования и преобразования сигналов с программным управлением, а также средства их электронной коммутации. В экспериментальных исследованиях, проведенных автором данной работы, лучшие результаты получены при использовании метода прямого цифрового синтеза ((Direct Digital Synthesis, или DDS) [2].

2. Преимущества формирования измерительных сигналов с помощью генераторов DDS по сравнению с аналоговыми синтезаторами частот

Генераторы DDS находят все более широкое применение, поскольку они обладают целым рядом преимуществ по сравнению с обычными аналоговыми синтезаторами частот [3]:

- высокая точность, свойственная цифровым системам;
- непосредственное управление частотой и фазой выходного сигнала кодом, формируемым программным обеспечением АПК;
- широкий диапазон частот – от долей герц до десятков мегагерц;
- высокое разрешение по частоте (до микрогерц) и фазе (до десятых долей градуса);
- высокая скорость перестройки частоты (или фазы), которая ограничивается лишь быстродействием его цифрового интерфейса;

- перестройка по частоте без разрыва фазы, без выбросов и переходных процессов установления выходного напряжения;
- отсутствие явлений старения, температурного и временного дрейфа.

К недостаткам DDS можно отнести большое количество побочных гармоник, возникающих в процессе формирования сигнала, дискретность установки частоты, а также неравномерность амплитудно-частотной характеристики на протяжении всего диапазона рабочих частот. Эти недостатки генератора DDS не являются критическими, их влияние может быть существенно снижено применением ряда технических решений.

3. АПК на основе генератора прямого цифрового синтеза (DDS)

На основе генератора DDS автором разработан АПК для измерения динамических параметров ОУ, структурная схема аппаратной части которого представлена на рис. 1. Аппаратная часть комплекса содержит устройства, выполняющие все необходимые операции при проверке работоспособности и измерении динамических параметров ОУ.

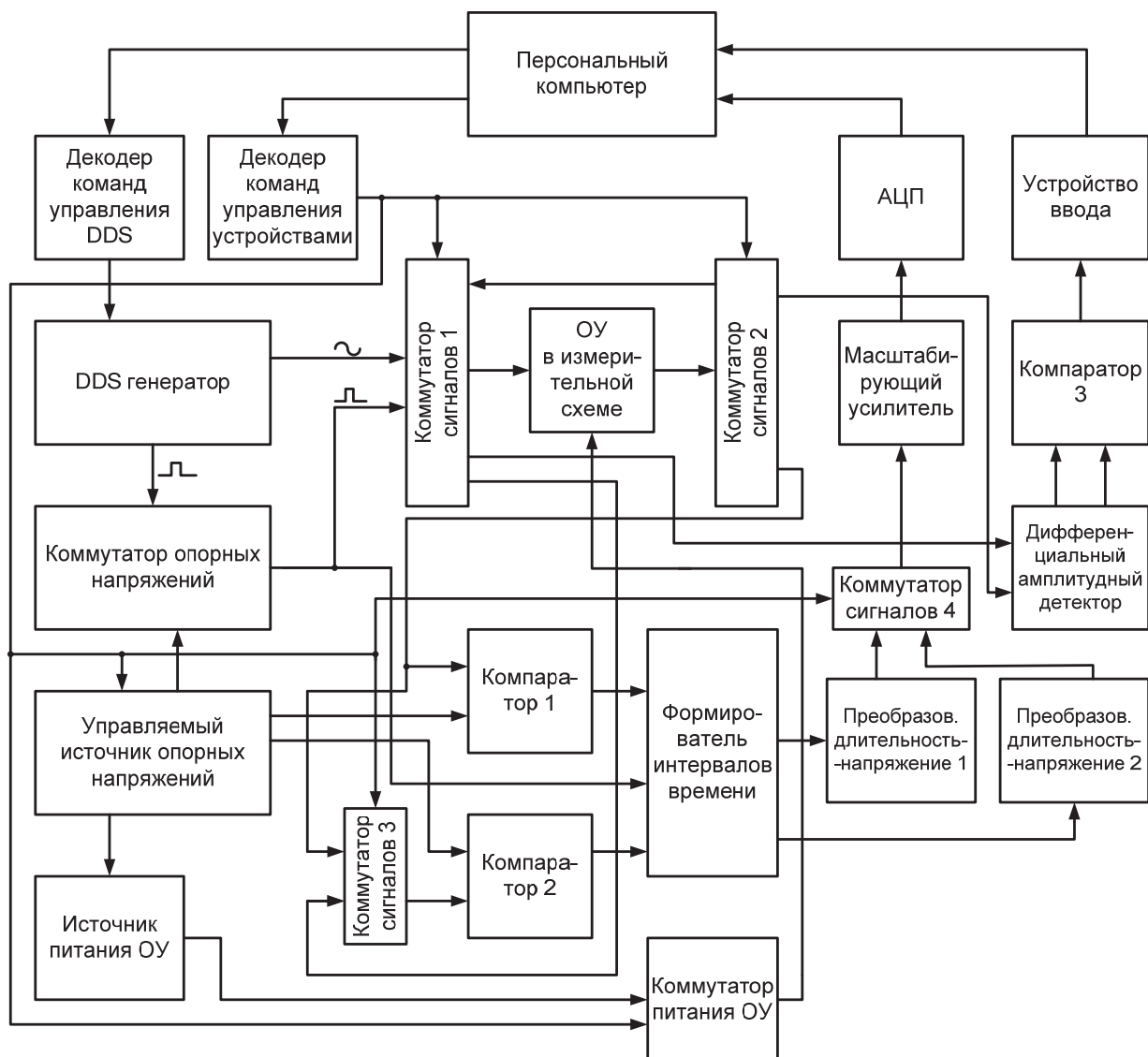


Рис. 1. Структурная схема АПК для измерения параметров ОУ на основе генератора прямого цифрового синтеза (DDS)

1. Для подключения ОУ с разным конструктивным исполнением корпусов микросхем и разным числом ОУ в корпусе предусмотрен набор соответствующих контактирующих устройств.

2. Для создания измерительных схем в виде инвертирующего или неинвертирующего усилителей с разными коэффициентами усиления с целью проверки работоспособности, а затем последовательного измерения динамических параметров ОУ используются коммутаторы сигналов 1 и 2, с помощью которых:

- видоизменяется измерительная схема;
- на вход измерительной схемы подается измерительный сигнал;
- выход измерительной схемы подключается к соответствующему измерительному преобразователю.

3. Коммутатор питания ОУ подает предусмотренные управляющей программой необходимые напряжения с выходов источника питания ОУ.

4. Для обеспечения программного управления коммутаторами сигналов и коммутатором питания ОУ используется декодер команд управления устройствами, построенный на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) Xilinx и моста USB-FiFO.

5. Декодер команд управления DDS осуществляет чтение из порта персонального компьютера данных, подготовленных управляющей программой, производящей в соответствии с программой эксперимента расчет и формирование кода управления, включая код запуска, код настройки параметров, код частоты и код начальной фазы. С выхода декодера код управления поступает на управляющие входы генератора DDS.

6. DDS-генератор гармонических и импульсных измерительных сигналов построен на основе интегральной микросхемы синтезатора AD9851 [4]. Диапазон частот – от 0,1 Гц до 45 МГц. При допустимом уровне искажений выходного сигнала данный генератор обеспечивает высокую точность установки и поддержания частоты выходного сигнала.

На рис. 2 приведена предложенная автором структурная схема DDS-генератора измерительных сигналов, используемого в АПК для измерения динамических параметров ОУ [5].

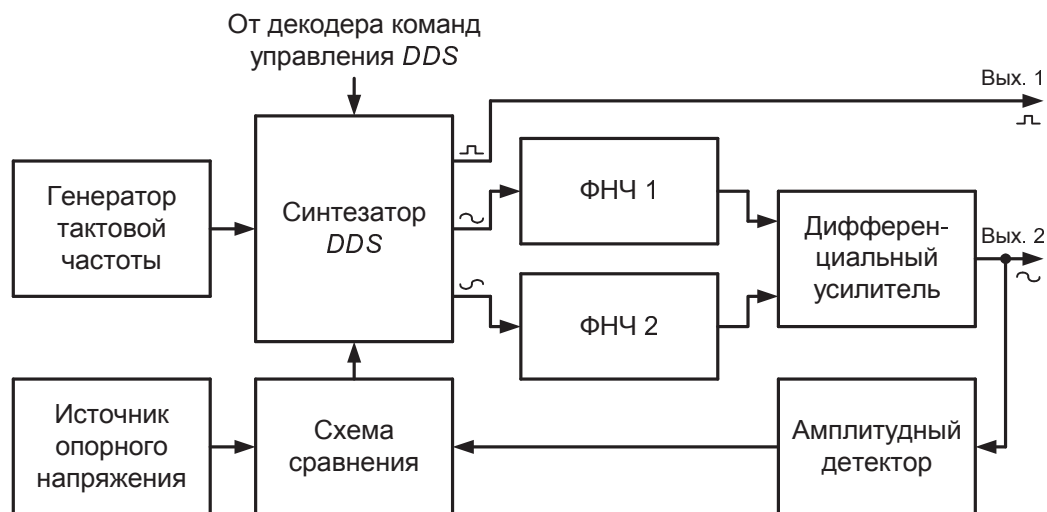


Рис. 2. Структурная схема DDS-генератора измерительных сигналов

Управление синтезатором DDS осуществляется кодом управления с выхода декодера команд. Генератор тактовой частоты, представляющий собой осциллятор с высокой стабильностью частоты, подключен к тактовому входу синтезатора. Частота тактового генератора 27 МГц умножается на шесть внутренней схемой DDS-синтезатора. В результате тактовая частота синтезатора составляет 162 МГц.

Выходной ЦАП DDS-синтезатора имеет два выхода, на которых формируются прямой и инверсный синусоидальные сигналы, не имеющие фазовых задержек, так как их формирование осуществляется параллельным управлением двумя матрицами ЦАП. Выходные сигналы DDS-синтезатора поступают на входы фильтров нижних частот ФНЧ1 и ФНЧ2, осуществляющих ограничение спектра выходных сигналов по частоте до 45 МГц. Дифференциальный усилитель осуществляет сложение в противофазе сигналов с выходов фильтров. Применение такой структуры включения ФНЧ и дифференциального усилителя позволило побороть первый недостаток

DDS-синтезатора, а именно: наличие внеполосных побочных гармоник в спектре выходного сигнала. Гармоники тактовой частоты, входящие в полосу рабочих частот, удалось подавить за счет того, что эти гармоники синфазно проникают на оба выхода DDS-синтезатора. Суммирование прямого и инверсного выходных синусоидальных сигналов DDS-синтезатора с помощью дифференциального усилителя позволило увеличить амплитуду гармоник полезного сигнала в два раза, а также подавить гармоники тактовой частоты и ослабить комбинационные гармоники.

В результате на выходе 2 схемы DDS-генератора измерительных сигналов получается гармонический сигнал синусоидальной формы. Для стабилизации амплитуды выходного сигнала на определенном уровне в схему введена цепь автоматической регулировки уровня, состоящая из амплитудного детектора, источника опорного напряжения, задающего стабилизированный уровень выходного сигнала, и схемы сравнения, сигнал с выхода которой поступает на вход установочного тока матрицы ЦАП DDS-синтезатора.

Импульсный сигнал прямоугольной формы на выходе 1 генератора получается в результате прохождения выходного сигнала синтезатора через встроенный быстродействующий компаратор. Данный сигнал будет использоваться для измерения скорости нарастания и спада выходного напряжения ОУ.

7. Программно управляемый источник опорных напряжений в соответствии с программой измерительного эксперимента вырабатывает все необходимые стабилизированные постоянные напряжения положительной и отрицательной полярности. Эти напряжения подаются на коммутатор опорных напряжений, который под управлением сигнала с выхода DDS генератора формирует последовательность однополярных или двухполярных прямоугольных импульсов со стабильной амплитудой, поступающих на инвертирующий или неинвертирующий вход исследуемого ОУ через коммутатор сигналов 1, а также на один из входов формирователя интервалов времени.

8. Выходное напряжение ОУ через коммутатор сигналов 2 поступает на вход дифференциального амплитудного детектора в режиме измерения частоты единичного усиления ОУ, а в режимах измерения максимальных скоростей нарастания и спада выходного напряжения ОУ и запаса устойчивости ОУ по фазе – на входы компаратора 1 и компаратора 2 (через коммутатор сигналов 3). Выходные напряжения компараторов 1 и 2 поступают на входы формирователя интервалов времени.

9. Формирователь интервалов времени вырабатывает прямоугольные импульсы, длительность которых при измерении разных параметров ОУ пропорциональна времени нарастания и спада выходного напряжения ОУ или временной задержке выходного синусоидального напряжения ОУ относительно входного напряжения на частоте единичного усиления ОУ.

10. Первый и второй преобразователи длительности интервалов времени в напряжение формируют постоянные напряжения, пропорциональные времени нарастания и спада выходного напряжения ОУ или временной задержке выходного напряжения ОУ. Эти напряжения через коммутатор сигналов 4 поступают на масштабирующий усилитель и далее на вход АЦП, с выхода которого цифровой код поступает на порт персонального компьютера для ввода в программу обработки результатов измерений информации, необходимой для вычисления значений скоростей нарастания и спада выходного напряжения ОУ. Предложен также и другой вариант построения схемы [6], содержащий два масштабирующих усилителя, подключенных непосредственно к выходам первого и второго преобразователей длительности интервалов времени в напряжение, а также два АЦП, выходы которых подключены к персональному компьютеру. Применение второго варианта построения схемы позволяет повысить ее быстродействие при измерении максимальных скоростей нарастания и спада выходного напряжения ОУ за счет устранения переходных процессов, возникающих при поочередном подключении с помощью коммутатора сигналов 4 выходов преобразователей длительности интервалов времени в напряжение к входу масштабирующего усилителя [7].

11. В режиме измерения частоты единичного усиления ОУ на входы дифференциального амплитудного детектора через коммутаторы сигналов 1 и 2 поступают синусоидальные сигналы со входа и выхода ОУ. Дифференциальный амплитудный детектор выделяет огибающие этих сигналов и подает их на входы компаратора 3 для сравнения их амплитуд. Для обеспечения идентичности каналов дифференциального амплитудного детектора использована сборка диодов Шоттки на одной подложке HSMS-286K-BLKG. Выход компаратора 3 через устройство ввода подключен к порту персонального компьютера для ввода информации о состоянии компаратора 3

в программу, управляющую измерительным экспериментом в соответствии с алгоритмом измерения частоты единичного усиления ОУ [8–9].

Таким образом, аппаратная часть АПК, построенного в соответствии со структурной схемой рис. 1, выполняет все операции, необходимые для измерения динамических параметров ОУ:

- декодирование и распределение команд управляющей программы по соответствующим устройствам;

- коммутацию измерительных цепей, коммутацию входных сигналов от формирователей к схеме измерения, коммутацию выходных сигналов из схемы измерения к соответствующему преобразователю;

- управление питанием исследуемого ОУ и блоков АПК;

- предварительную проверку работоспособности исследуемого ОУ и оценку возможности дальнейших измерений параметров ОУ;

- формирование измерительных синусоидальных и импульсных сигналов и опорных напряжений в соответствии с программой измерительного эксперимента;

- сравнение амплитуд синусоидальных напряжений на входе и выходе исследуемого ОУ;

- выделение временных интервалов, длительности которых пропорциональны времени нарастания и спада выходного напряжения ОУ и временной задержке выходного синусоидального напряжения ОУ относительно входного напряжения на частоте единичного усиления;

- преобразование длительности этих интервалов времени в пропорциональные напряжения, а затем в коды для последующей передачи в программную часть.

Программная часть АПК обеспечивает автоматизированное выполнение алгоритмов измерительных процессов, включая:

- тестирование работоспособности блоков аппаратной части;

- проведение измерительного эксперимента, предусматривающего проверку работоспособности ОУ и измерение параметров ОУ с формированием управляющих сигналов для элементов аппаратной части комплекса и регистрацией результатов измерений;

- выполнение необходимых вычислений при обработке результатов измерений;

- формирование отчета по результатам измерений;

- рассортировку ОУ на группы по измеренным значениям параметров и подбор ОУ с близкими значениями параметров;

- расчет параметров Spice-макромодели ОУ и составление ее текстового описания с учетом измеренных параметров.

Программная часть АПК разработана в среде графического программирования LabVIEW фирмы National Instruments, отличающейся простотой программирования, возможностью быстрой отладки приложений, а также оформления полученного программного продукта в установочный пакет для последующего использования вне среды разработки.

Заключение

Практическая реализация АПК и его экспериментальные исследования показали возможность автоматизированного измерения основных динамических параметров ОУ с относительной погрешностью, не превышающей 5 %. Такие показатели можно считать приемлемыми, поскольку по ГОСТ 23089.0–78 погрешность измерений параметров ОУ в динамическом режиме должна находиться в пределах $\pm 10\%$. Верхнее значение диапазона измерения частоты единичного усиления ОУ составило 40 МГц, а верхнее значение диапазона измерения максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ составило 50 В/мкс.

Список литературы

1. Методики входного контроля параметров операционных усилителей / М. Ю. Паршуков, А. В. Светлов, В. В. Комаров, Е. В. Сапунов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2. – С. 56–61.
2. Ридико, Л. И. DDS: прямой цифровой синтез частоты / Л. И. Ридико // Компоненты и технологии. – 2001. – № 7. – С. 50–54.
3. Murphy, E. Direct Digital Synthesis (DDS). Controls Waveforms in Test, Measurement, and Communications / Eva Murphy, Colm Slattery // Analog Dialogue 39-08. – 2005. – August. – URL: http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-08/dds_apps.pdf.

4. AD9851 CMOS 180 MHz DDS/DAC Synthesizer // Analog Devices, Inc. – 2004. – URL: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9851.pdf.
5. Пат. на полезную модель № 123966 Российская Федерация. МПК: G01R 17/00. Формирователь тестовых сигналов для исследования частотных характеристик операционных усилителей / В. В. Комаров, М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов. – Заявка 2012130800/28(048398), 18.07.2012. – Оpubл. 10.01.2013, Бюл. № 1.
6. Измерители динамических параметров операционных усилителей / М. Ю. Паршуков, А. В. Светлов, В. В. Комаров, Е. В. Сапунов // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 100–102.
7. Методика измерения частоты единичного усиления операционных усилителей / М. Ю. Паршуков, А. В. Светлов, В. В. Комаров, Е. В. Сапунов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 2. – С. 41–51.
8. Цыпин, Б. В. Диагностика интегральных операционных усилителей, установленных на платах / Б. В. Цыпин, Н. К. Юрков // Измерительная техника. – 2002. – № 2. – С. 64–66.
9. Tsylin, B. V. Diagnostics of Integrated Operational Amplifiers Mounted on Circuit Boards Measurement Techniques / B. V. Tsylin, N. K. Yurkov. – N. Y. : Springer, 2002. – February. – V. 45, № 2. – P. 210–213.

УДК 621.317.3

Паршуков, М. Ю.

Аппаратно-программный комплекс для измерения динамических параметров операционных усилителей / М. Ю. Паршуков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 3 (7). – С. 32–37.

Паршуков Максим Юрьевич

аспирант, инженер,
кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: parshucow@bk.ru

Аннотация. Рассмотрены принципы построения и структурная схема аппаратно-программного комплекса для измерения динамических параметров операционных усилителей. Показаны преимущества формирования измерительных сигналов с помощью генераторов прямого цифрового синтеза (DDS) по сравнению с аналоговыми синтезаторами частот.

Ключевые слова: операционный усилитель, динамические параметры, измерение, аппаратно-программный комплекс, генератор прямого цифрового синтеза (DDS).

Parshukov Maksim Yur'evich

postgraduate student, engineer,
sub-department of radio and radio-electronic systems,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Abstract. The article were considered the principles of construction and structural diagram hardware and software complex for measuring the dynamic parameters of the operational amplifiers. The advantages of forming the measuring signals using generators of direct digital synthesis (DDS) as compared with the analog frequency synthesizers.

Key words: operational amplifier, dynamic parameters, measurement, hardware and software complex, generators of direct digital synthesis (DDS).