

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.317.3

М. Ю. Паршуков, Н. В. Родионова, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СРЕДСТВАМ ИЗМЕРЕНИЙ ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ¹

M. Yu. Parshukov, N. V. Rodionova, E. V. Sapunov, A. V. Svetlov

REQUIREMENTS FOR MEASUREMENT INSTRUMENTS OF OPERATIONAL AMPLIFIER FREQUENCY PARAMETERS

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* В работе определены требования к разрабатываемым средствам измерений динамических параметров операционных усилителей, которые могут использоваться как самостоятельные измерительные приборы или как блоки многофункционального автоматизированного аппаратно-программного комплекса. *Материалы и методы.* Показано, что для измерения частоты единичного усиления и запаса устойчивости по фазе операционных усилителей общего применения необходимы программно управляемые устройства для определения отношения амплитуд и разности фаз синусоидальных напряжений на выходе и входе операционных усилителей. *Результаты.* Определен диапазон рабочих частот: от 0,1 до 10 МГц. Рабочий диапазон измерения отношения амплитуд сигналов: от минус 6 до + 6 дБ. Рабочий диапазон измерения разности фаз: от 30 до 150°. Относительная погрешность измерений отношения амплитуд и разности фаз сигналов не более 2 % в пределах рабочих диапазонов. *Выводы.* Сформулированы требования, предъявляемые к средствам измерений частотных параметров операционных усилителей. Определены требования к разрешению аналого-цифрового преобразователя на выходе измерителя отношения амплитуд сигналов исходя из требуемого разрешения при измерении частоты единичного усиления операционных усилителей.

A b s t r a c t. *Background.* It is determination of requirements for developed means of measuring the dynamic parameters of operational amplifiers which can be used as independent measuring devices or multipurpose units of automated hardware and software complex. *Materials and methods.* It is shown that program-controlled devices for determining the ratio of amplitudes and phase difference of sinusoidal voltages on output and input of the operational amplifiers needed for the measurement of unity gain frequency and phase margin of general purpose operational amplifiers. *Results.* The operating frequencies range was defined from 0,1 to 10 MHz. The operating range of amplitude ratio measurement is from -6 to + 6 dB. The operating range of phase difference measurement is from 30 degrees to 150 degrees. The relative measurement error of amplitude ratio and phase difference of signals is no more than 2 % within the operating range. *Conclusions.* Requirements for measurement instruments of operational amplifier frequency parameters was formulated. Requirements for the resolution of ADC on output of signals amplitude ratio meter are defined, on the basis of the required resolution in measurement of operational amplifiers unity gain frequency.

¹ Работа поддержана Грантом Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 16-38-00233).

К л ю ч е в ы е с л о в а: операционный усилитель, измерение, частота единичного усиления, запас устойчивости по фазе, отношение амплитуд, разность фаз, рабочие диапазоны измерений, погрешность.

К e y w o r d s: operational amplifier, measurement, unity gain frequency, phase margin, amplitude ratio, phase difference, operating range of measurements, error.

Введение

Работа операционных усилителей (ОУ) в динамическом режиме характеризуется временными параметрами, имеющими размерность времени или скорости изменения напряжения во времени, а также частотными параметрами, имеющими размерность частоты или разности фаз.

В данной работе рассмотрены требования, предъявляемые к измерителям важнейших частотных параметров ОУ: частоты единичного усиления и запаса устойчивости по фазе. Частоту единичного усиления ОУ необходимо измерять, поскольку этот параметр в обязательном порядке указывается среди паспортных данных ОУ во всех справочниках и технических условиях. Запас устойчивости по фазе желательно учитывать при отборе ОУ для электронных схем, склонных к самовозбуждению. Кроме того, значение этого параметра используется при создании макромоделей ОУ для Spice-совместимых программ схемотехнического моделирования (PSpice, OrCAD, Multisim и др.).

Частота единичного усиления определяется как частота, на которой коэффициент усиления ОУ, т.е. отношение выходного и входного напряжений ОУ, равняется единице (ГОСТ 23089.13–86). Запас устойчивости по фазе ОУ определяется по разности фаз между входным и выходным напряжениями ОУ на частоте единичного усиления (ГОСТ 23089.16–90). Таким образом, для измерения частотных параметров ОУ необходимы устройства для определения отношения амплитуд и разности фаз синусоидальных напряжений на выходе и входе ОУ.

При разработке средств измерений частотных параметров ОУ целесообразно предусмотреть их универсальность, возможность использования как самостоятельных измерительных приборов или интегрирования в состав многофункционального аппаратно-программного комплекса [1] для автоматизированного измерения динамических параметров ОУ. Поэтому аппаратная часть измерителя частотных параметров ОУ должна быть программно управляемой.

1. Определение границ рабочих диапазонов измерений

Первоочередной задачей является разработка средств измерений частотных параметров наиболее широко распространенных ОУ общего применения. Для измерения параметров таких ОУ предназначен аппаратно-программный комплекс [1]. Частота единичного усиления большинства ОУ общего применения находится в диапазоне от 0,1 до 10 МГц [2], что определяет требуемый диапазон рабочих частот разрабатываемых измерителей частотных параметров ОУ и входящих в их состав измерителей отношения амплитуд и разности фаз синусоидальных напряжений на выходе и входе ОУ.

Согласно ГОСТ 23089.0–78 погрешность измерений параметров ОУ в динамическом режиме должна находиться в пределах $\pm 10\%$. Задавая для вновь разрабатываемых средств измерений частотных параметров ОУ предел результирующей допускаемой погрешности $\pm 5\%$, можно установить предел допускаемых погрешностей $\pm 2\%$ для составляющих результирующей погрешности, вносимых измерителями отношения амплитуд и разности фаз напряжений.

Границы рабочего диапазона измерения отношения амплитуд выходного и входного напряжений ОУ определяются с учетом специфики используемой при построении аппаратно-программного комплекса [1] методики автоматизированного измерения частоты единичного усиления ОУ [3]. Данная методика основана на оценке коэффициента усиления ОУ при итерационном сужении диапазона поиска частоты, при которой коэффициент усиления ОУ становится меньше единицы при заданном разрешении по частоте. Высокая точность измерения отношения выходного и входного напряжений ОУ должна быть обеспечена вблизи частоты единичного усиления при отношении амплитуд, приближающемся к единице. Поэтому может быть задана ширина рабочего диапазона измерения отношения амплитуд: $U_{\text{вых ОУ}}/U_{\text{вх ОУ}} = 0,5...2$ или от минус 6 до +6 дБ.

Границы рабочего диапазона измерения разности фаз выходного и входного напряжений ОУ на частоте единичного усиления устанавливаются, исходя из того, что при значении

запаса устойчивости по фазе на частоте единичного усиления менее 45° ОУ становится потенциально неустойчивым, а уменьшение запаса устойчивости до 30 и менее градусов приводит к выходу ОУ из линейного режима. Поэтому можно установить рабочий диапазон измерения разности фаз от 30 до 150° (в неинвертирующем и инвертирующем включении ОУ).

В установленных рабочих диапазонах отношения амплитуд и разности фаз сигналов разрабатываемый измеритель должен обеспечивать требуемую точность измерений, а за пределами границ диапазонов – сохранять работоспособность без нормирования погрешностей измерений.

2. Создание макромоделей ОУ по измеренным значениям частотных параметров

С целью сокращения затрат времени на макетирование и экспериментальные исследования электронных схем и, в то же время, расширения программы исследований все более широко применяются Spice-совместимые программы схемотехнического моделирования, обеспечивающие хорошую сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных при условии адекватности используемых моделей элементов схемы. Особенно остро проблема сходимости результатов моделирования и экспериментальных данных встает при реализации методик совокупных измерений параметров датчиков и многоэлементных электрических цепей, особенно резонансных [4]. В таких методиках значения отсчетов выходного напряжения измерительной схемы используются для составления и решения системы уравнений, связывающих исходные данные и искомые параметры. Примером может служить методика совокупных измерений параметров пьезокерамических элементов с несколькими тестовыми синусоидальными сигналами, частоты которых соответствуют характерным точкам амплитудно-частотной характеристики измерительной схемы [5].

Для обеспечения хорошей сходимости результатов моделирования измерительной схемы с применением Spice-совместимых программ схемотехнического моделирования и результатов экспериментальных исследований требуется точное задание значения частоты единичного усиления ОУ, следовательно, необходимо использовать макромоделю, составленную для конкретного экземпляра ОУ – того же самого, с которым проводятся экспериментальные исследования. С этой целью перед установкой микросхемы ОУ в плату измерительной схемы необходимо измерить параметры этой микросхемы и составить с их учетом макромоделю ОУ.

Рассмотрим задачу моделирования измерительной схемы (рис. 1) стенда для совокупных измерений параметров пьезокерамических элементов (ПКЭ) с использованием тестовых синусоидальных сигналов.

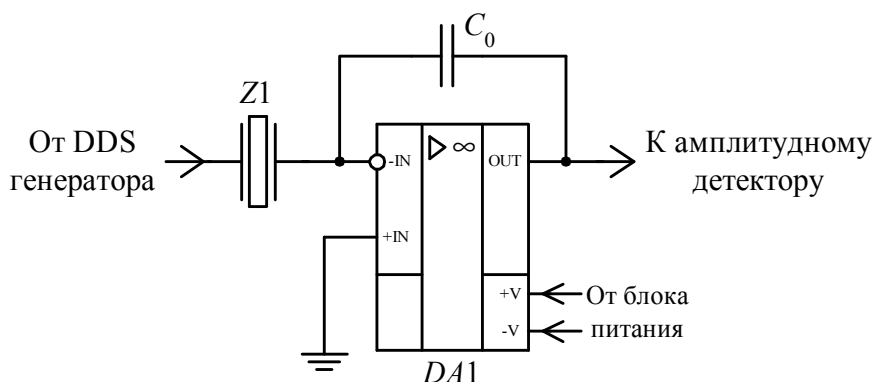


Рис. 1. Измерительная схема стенда для совокупных измерений параметров пьезокерамических элементов

Исследуемый ПКЭ включается во входной цепи измерительной схемы на основе ОУ К544УД2 [6] с опорным конденсатором C_0 в цепи отрицательной обратной связи.

На предварительном этапе для экземпляра ОУ К544УД2, используемого в дальнейшем при проведении экспериментальных исследований, в соответствии с требованиями ГОСТ измерены динамические параметры:

- частота единичного усиления – 8,1 МГц;
 - запас устойчивости по фазе на частоте единичного усиления – 49°;
 - максимальная скорость нарастания выходного напряжения – 27,7 В/мкс.
- Статические параметры ОУ взяты из справочной литературы [6].

С учетом указанных динамических и статических параметров создана макромодель ОУ K544УД2 с помощью программы Model Editor системы проектирования OrCAD [7]. С помощью программы PSpice A/D OrCAD выполнено моделирование измерительной схемы, представленной на рис. 1. Установлено, что результаты моделирования имеют хорошую сходимость с результатами экспериментов. С целью исследования влияния на результаты моделирования отклонения значения частоты единичного усиления, задаваемого при создании макромодели ОУ, от фактического значения этого параметра дополнительно созданы еще две макромодели ОУ со значениями частоты единичного усиления на 5 % больше и на 5 % меньше, чем фактическое значение $f_1 = 8,1$ МГц. Соответственно $f_1' = 8,51$ МГц и $f_1'' = 7,69$ МГц.

На рис. 2 приведены полученные в результате моделирования измерительной схемы с использованием трех названных макромоделей графики амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) – зависимостей амплитуды выходного напряжения ОУ от частоты вблизи области последовательного резонанса пьезокерамического элемента, представляемого четырехэлементной эквивалентной электрической схемой с параметрами, указанными в [5]. Максимальные значения амплитуды выходного напряжения на частоте последовательного резонанса соответственно равны: $U_{\text{макс}} = 2,032$ В; $U'_{\text{макс}} = 2,067$ В; $U''_{\text{макс}} = 1,994$ В. Относительные погрешности оценки по результатам моделирования максимальных значений амплитуды выходного напряжения соответственно равны:

$$\delta U'_{\text{макс}} = \frac{U'_{\text{макс}} - U_{\text{макс}}}{U_{\text{макс}}} \cdot 100 \% = 1,72 \% ; \quad \delta U''_{\text{макс}} = \frac{U''_{\text{макс}} - U_{\text{макс}}}{U_{\text{макс}}} \cdot 100 \% = - 1,87 \% .$$

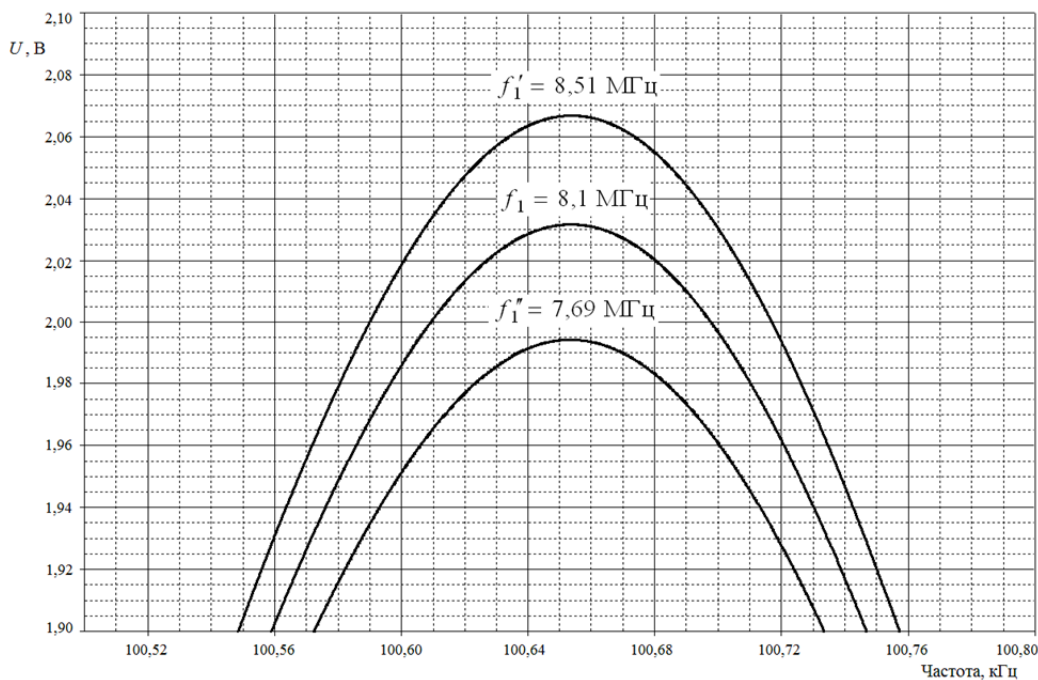


Рис. 2. Графики АЧХ измерительной схемы, представленной на рис. 1

Такие значения погрешности можно считать приемлемыми только при моделировании средств контроля работоспособности схем, но не при моделировании средств измерений.

Полученные результаты показывают, что для создания макромоделей ОУ, обеспечивающих адекватное представление их частотных свойств, необходимо измерять частоту единичного усиления ОУ с достаточно высоким разрешением, по крайней мере менее 1 % от измеряемой частоты.

3. Обеспечение требуемого разрешения по частоте средств измерений частотных параметров ОУ

При поиске частоты единичного усиления ОУ, задавая требуемое разрешение по частоте δf (в процентах) и предполагая, что вблизи частоты единичного усиления спад амплитудно-частотной характеристики ОУ общего применения составляет 20 дБ на декаду частоты, можно определить соответствующее такому разрешению по частоте δf изменение амплитуды выходного напряжения ОУ δU_m (в децибелах):

$$\delta U_m = 20 \lg \left(1 + \frac{\delta f}{100} \right). \quad (1)$$

Для измерения отношения амплитуд выходного и входного напряжений ОУ в [8] предложено использовать логарифмический усилитель-детектор AD8302 [9], характеристики которого на предварительном этапе исследуются с целью определения «усредненного» для рабочего диапазона частот наклона передаточной характеристики $a_{\text{уср}}$, мВ/дБ.

Тогда изменению амплитуды δU_m выходного напряжения ОУ соответствует изменение постоянного выходного напряжения ΔU_a измерителя отношения амплитуд сигналов – детектора AD8302:

$$\Delta U_a = a_{\text{уср}} \delta U_m = a_{\text{уср}} 20 \lg \left(1 + \frac{\delta f}{100} \right). \quad (2)$$

На рис. 3 и 4 приведены графики рассчитанных в соответствии с (2) зависимостей разрешения по напряжению ΔU_a (в милливольтгах) измерителя отношения амплитуд сигналов с $a_{\text{уср}} = 31,405$ мВ/дБ от разрешения по частоте δf в диапазонах 0,1–1 и 0,01–0,1 %.

Соотношение (2) и графики, приведенные на рис. 3 и 4, позволяют сформулировать требования к разрешению аналого-цифрового преобразователя, осуществляющего оцифровку постоянного выходного напряжения измерителя отношения амплитуд сигналов. Например, при требуемом разрешении 0,5 % по частоте разрешение по напряжению АЦП должно быть около 1,5 мВ. Если, наоборот, задано разрешение по напряжению используемого АЦП, то можно определить обеспечиваемое при этом разрешение по частоте. Например, разрешению по напряжению АЦП 0,1 мВ соответствует разрешение по частоте около 0,04 %.

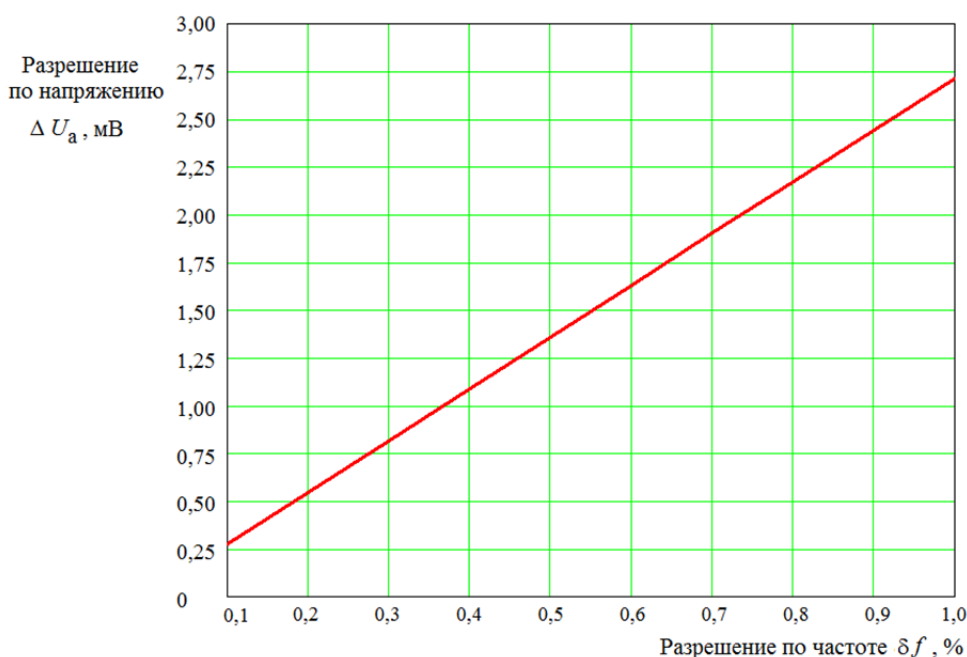


Рис. 3. График зависимости разрешения по напряжению от разрешения по частоте в диапазоне 0,1–1 %

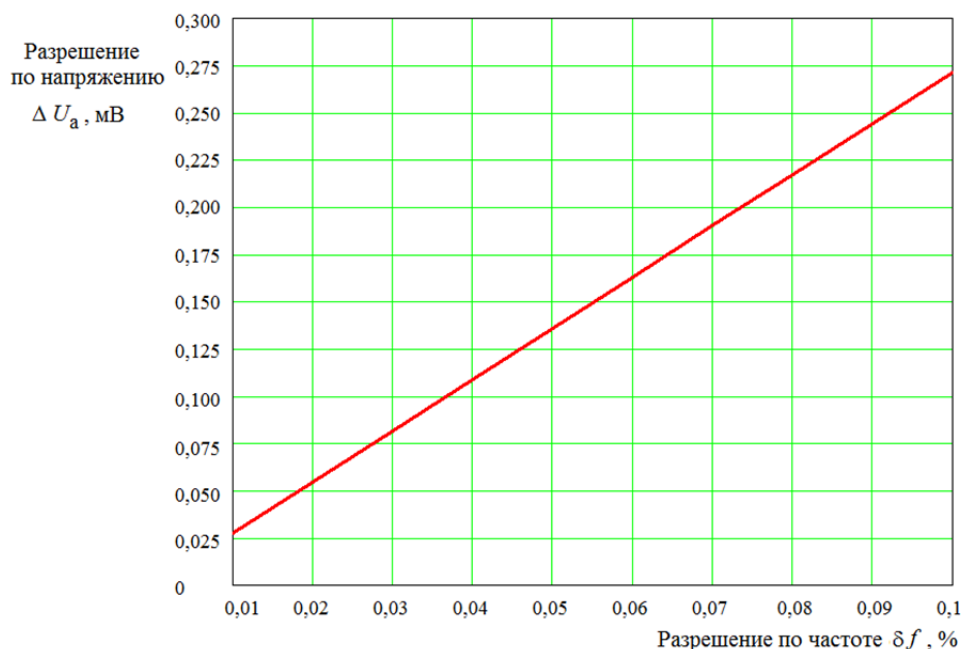


Рис. 4. График зависимости разрешения по напряжению от разрешения по частоте в диапазоне 0,01–0,1 %

Для оперативного задания требуемого разрешения по частоте целесообразно использовать АЦП с программным управлением разрешением, например МСР3422 [10].

Заключение

Сформулированы требования, предъявляемые к средствам измерений частотных параметров ОУ:

- программное управление работой аппаратной части;
- рабочий диапазон частот: от 0,1 до 10 МГц;
- рабочий диапазон измерения отношения амплитуд сигналов: $U_{\text{вых ОУ}}/U_{\text{вх ОУ}} = 0,5...2$ или от минус 6 до + 6 дБ;
- рабочий диапазон измерения разности фаз: от 30 до 150°;
- относительная погрешность измерений отношения амплитуд и разности фаз сигналов не более 2 % в пределах рабочих диапазонов.

Получено соотношение, позволяющее сформулировать требования к разрешению АЦП, осуществляющего оцифровку выходного напряжения измерителя отношения амплитуд сигналов, исходя из требуемого разрешения по частоте при измерении частоты единичного усиления ОУ.

Средства измерений динамических параметров ОУ, построенные с учетом описанных требований, могут применяться для отбора ОУ, предназначенных для построения высокоточных измерительных приборов, например фазометров, фазовращателей и калибраторов фазы [11].

Список литературы

1. Измерители динамических параметров операционных усилителей / А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, В. В. Комаров // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 100–102.
2. Операционные усилители общего применения: Справочная информация // Промэлектроника. – URL: http://www.promelec.ru/catalog_info/48/73/251/92/
3. Светлов, А. В. Методика измерения частоты единичного усиления операционных усилителей / А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, В. В. Комаров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 2 (30). – С. 41–51.
4. Совокупные измерения электрических параметров пьезокерамических элементов / А. В. Светлов, А. С. Колдов, Н. В. Родионова, Е. А. Ломтев, Б. В. Цыпин // Известия

- высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 2 (34). – С. 123–135.
5. Колдов, А. С. Методика совокупных измерений параметров пьезокерамических элементов с использованием синусоидальных сигналов / А. С. Колдов, Н. В. Родионова, А. В. Светлов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 44–46.
 6. URL: <http://lib.chipdip.ru/030/DOC001030712.pdf>.
 7. Разевиг, В. Д. Система проектирования OrCAD 9.2 / В. Д. Разевиг. – М. : СОЛОН-Р, 2001. – 520 с.
 8. Сапунов, Е. В. Исследование характеристик детекторов измерительных сигналов / Е. В. Сапунов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 327–329.
 9. AD8302. LF–2.7 GHz RF/IF Gain and Phase Detector. – Analog Devices, Inc., 2002. – URL: <http://www.analog.com/media/cn/technical-documentation/data-sheets/AD8302.pdf>.
 10. MCP3422/3/4. 18-Bit, Multi-Channel $\Delta\Sigma$ Analog-to-Digital Converter with I²C™ Interface and On-Board Reference. – Microchip Technology Inc., 2009. – URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22088c.pdf>.
 11. Сапельников, В. М. Фазовращатели, калибраторы фазы, эталоны фазового сдвига, фазовые измерения в радионавигации / В. М. Сапельников, С. А. Кравченко, М. К. Чмых. – 2-е изд., доп. – Уфа : РИЦ УГНТУ, 2014. – 276 с.

Паршуков Максим Юрьевич

инженер,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu

Parshukov Maksim Jur'evich

engineer,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Родионова Нина Владимировна

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu

Rodionova Nina Vladimirovna

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сапунов Евгений Владимирович

инженер,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu

Sapunov Evgenij Vladimirovich

engineer,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Светлов Анатолий Вильевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu

Svetlov Anatolij Vil'evich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of radio engineering
and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Нефедьев Дмитрий Иванович

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Nefed'ev Dmitriy Ivanovich

doctor of technical sciences, associate professor,
head of sub-department
of information and measuring equipment
and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317.3

Требования, предъявляемые к средствам измерений частотных параметров операционных усилителей / М. Ю. Паршуков, Н. В. Родионова, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов, Д. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 5–12.