

СТРУКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Светлов А.В.¹, Паршуков М.Ю.¹, Сапунов Е.В.¹, Комаров В.В.¹

¹ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», Пенза, Россия (440026, г. Пенза, ул. Красная, 40), e-mail: rtech@pnzgu.ru

Представлены структурные схемы измерителей динамических параметров операционных усилителей: частоты единичного усиления, запаса устойчивости по фазе, максимальной скорости нарастания выходного напряжения. Приведено описание работы измерителей, указаны их особенности, даны расчетные соотношения для вычисления искомых динамических параметров операционных усилителей по результатам измерений. Представленные измерители отличаются простотой реализации и программным управлением процессом измерения, что позволяет их использовать при построении многофункциональных аппаратно-программных комплексов для автоматизированного измерения параметров операционных усилителей. Разработаны методика и алгоритм автоматизированного измерения частоты единичного усиления операционных усилителей. Экспериментальные исследования подтвердили возможность автоматизированного измерения частоты единичного усиления до 40 МГц и скорости нарастания выходного напряжения операционных усилителей до 50 В/мкс с погрешностью, не превышающей 5%.

Ключевые слова: операционный усилитель, частота единичного усиления, запас устойчивости по фазе, максимальная скорость нарастания выходного напряжения, измерение.

STRUCTURE AUTOMATED METERS DYNAMIC PARAMETERS OF THE OPERATIONAL AMPLIFIERS

Svetlov A.V.¹, Parshukov M.U.¹, Sapunov E.V.¹, Komarov V.V.¹

¹Penza state university, Penza, Russia (440026, Penza, street Krasnaya, 40), e-mail: rtech@pnzgu.ru

The block diagram for measuring the dynamic parameters of operational amplifiers: the unity gain frequency, phase margin on the unity gain frequency, the maximum slew rate output voltage operational amplifier. Illustrated the block diagram of hardware and software complex for measuring the dynamic parameters of the operational amplifiers. The features of the practical implementation of the nodes of hardware and software: software-controlled test signals generator based on generator direct digital synthesis (DDS), differential amplitude detector, meter of time intervals based on analog converter time interval length in voltage. Developed a measurement procedure and algorithm of the automated measurement of the frequency of unity gain operational amplifiers. Experimental studies have confirmed the possibility of automated measurement of the unity gain frequency to 40 MHz and slew rate output voltage operational amplifiers up to 50 V/us with an error not exceeding 5%.

Keywords: operation amplifier, the unity gain frequency, phase margin, the maximum slew rate output voltage, measurement.

Введение

Одной из наиболее сложных задач входного контроля электрорадиоэлементов при производстве радиоэлектронной аппаратуры является контроль параметров интегральных операционных усилителей (ОУ). На предприятиях, производящих бытовую электронику, обычно ограничиваются проверкой условной работоспособности ОУ. При производстве изделий ответственного назначения требуется контроль электрических параметров комплектующих в объеме, установленном техническими условиями (ТУ). Проблема заключается в том, что на предприятиях имеются средства контроля только статических параметров аналоговых интегральных схем.

Цель исследования

Целью исследования является разработка отвечающих современным требованиям средств измерений динамических параметров ОУ. В первую очередь необходимо разработать средства измерений частоты единичного усиления ОУ и максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ, поскольку эти два параметра в обязательном порядке указываются среди паспортных данных ОУ во всех справочниках и ТУ. Кроме того, при создании макромоделей ОУ для Spice-совместимых программ схемотехнического моделирования (PSpice, OrCAD, Multisim и др.) требуется учитывать такой динамический параметр ОУ, как запас устойчивости по фазе на частоте единичного усиления. Задачу разработки средств измерений трех названных параметров следует считать приоритетной, но желательно, чтобы эти средства могли быть программным путем перенастроены на измерение остальных динамических параметров ОУ: частоты среза, частоты полной мощности, времени установления выходного напряжения.

Методы исследования

Измерение динамических параметров должно производиться в соответствии с методами, установленными в ГОСТ [2–4]. При этом измерение частоты единичного усиления ОУ возможно двумя методами в зависимости от характера спада его частотной характеристики [3]. Если ОУ имеет спад АЧХ в области высоких частот 20 дБ на декаду, то, в соответствии с первым методом, измерение может быть выполнено на фиксированной частоте в пределах декады более низкой, чем искомая частота единичного усиления, с последующим определением искомой частоты путем экстраполяции. Однако если спад амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ОУ на высоких частотах не равномерный и его крутизна отличается от 20 дБ на декаду, то применение расчетного метода даст неверный результат. В качестве примеров ОУ, имеющих такие АЧХ, можно назвать широко распространенные микросхемы: OP27 и AD797 фирмы Analog Devices, OP37 фирмы Maxim, LM318 производства фирм Texas Instruments и National Semiconductor, LT1028 и LT1128 фирмы Linear Technology. В частности, при измерении частоты единичного усиления ОУ LT1128 вместо фактического значения 5,2 МГц применение расчетного метода с линейной экстраполяцией дает значение 23 МГц. Получается недопустимо большая (более 300%) методическая погрешность! Поэтому представляется целесообразным применение второго рекомендованного ГОСТ метода с плавным изменением частоты тестового сигнала и определением частоты, на которой коэффициент усиления ОУ по напряжению будет равен единице, т.е. соблюдается равенство входного и выходного напряжений. Такой метод является универсальным и может применяться для ОУ с любой формой АЧХ в области высоких частот, однако ручная реализация этого метода весьма трудоемка, что обуславливает необходимость автоматизации измерений.

При реализации метода измерения максимальной скорости нарастания выходного

напряжения ОУ [1; 2] должна быть предусмотрена возможность измерения также и скорости спада выходного напряжения ОУ с учетом асимметрии реальных значений максимальных скоростей нарастания и спада выходного напряжения ОУ [7; 8].

Результаты исследования и их обсуждение

Практическая реализация методов измерения всех динамических параметров ОУ должна позволять интегрировать все измерительные схемы в автоматизированный многофункциональный измерительный комплекс, поскольку использование комплекта отдельных измерительных приборов требует больших затрат времени на коммутацию, настройку приборов и считывание их показаний. Такая «ручная» технология применима только для выборочного исследования отдельных экземпляров микросхем и не может быть использована для массового входного контроля и отбора микросхем с заданными значениями параметров для наиболее критичных применений. Для автоматизации измерения параметров ОУ авторами разработан аппаратно-программный комплекс [5], многофункциональность которого обеспечивается путем программно управляемого изменения конфигурации измерительных цепей и режимов работы оборудования при измерении разных параметров ОУ.

Программно управляемое формирование тестовых сигналов осуществляется с помощью генератора прямого цифрового синтеза DDS (Direct Drive Synthesizer), обладающего высокой точностью установки значения частоты, высоким разрешением и быстрой перестройкой частоты, что позволяет с приемлемыми для практики затратами времени реализовать метод измерения частоты единичного усиления с плавным изменением частоты входного сигнала [5]. Программное обеспечение комплекса, кроме автоматизации процессов подготовки и проведения измерительного эксперимента, предназначено также для математической обработки и представления его результатов [7].

В качестве основы построения аппаратно-программного комплекса выступают три разработанные авторами базовые структуры измерителей динамических параметров ОУ.

Структура измерителя максимальных скоростей нарастания и спада выходного напряжения ОУ (рис. 1) отличается тем, что длительности импульсов, сформированных с помощью двух компараторов, пропорциональные времени нарастания и спада между уровнями 0,1 и 0,9 выходного напряжения ОУ, преобразуются в постоянные напряжения.

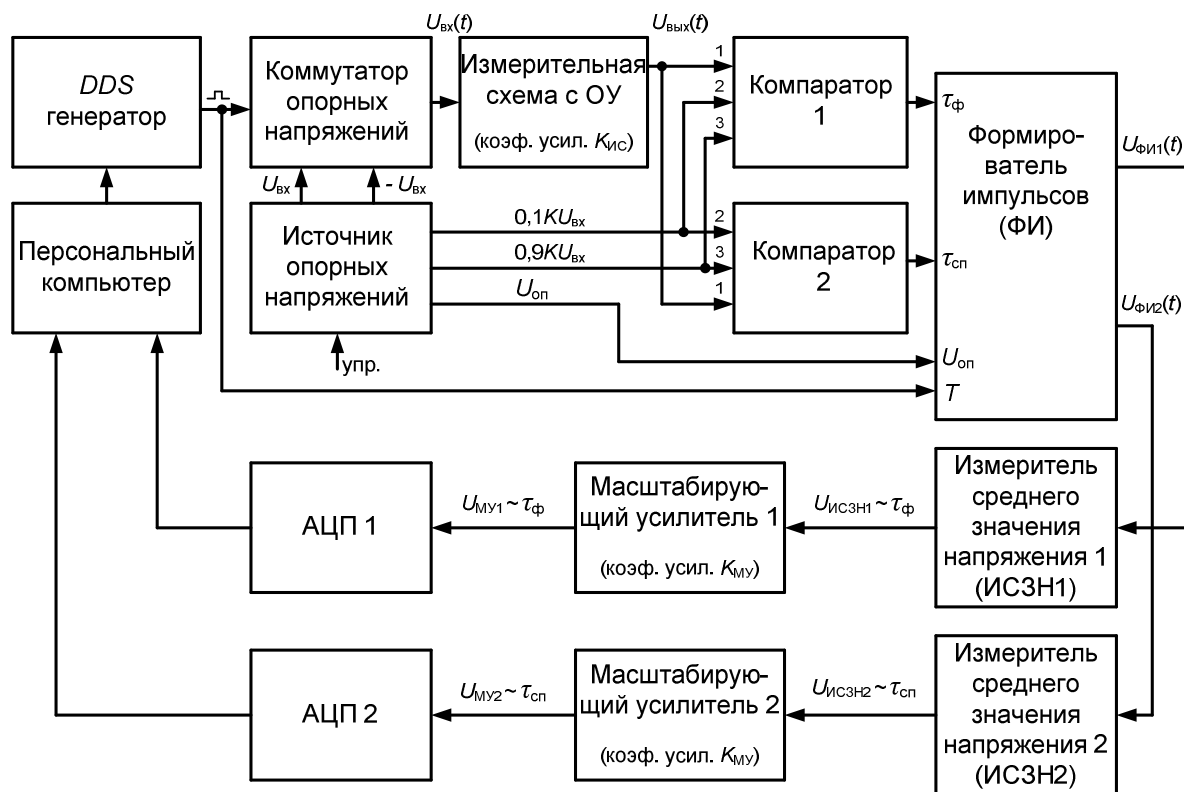


Рис. 1. Структурная схема измерителя скорости нарастания и спада выходного напряжения ОУ

Исследуемый ОУ включается в состав измерительной схемы в виде неинвертирующего усилителя с коэффициентом усиления $K_{ИС}$. На вход измерительной схемы поступает напряжение $U_{вх}(t)$ в виде последовательности однополярных или двухполярных прямоугольных импульсов с амплитудой $U_{вх}$ и периодом следования T . Стабильность амплитуды импульсов входного напряжения обеспечивается за счет коммутации стабилизированных постоянных опорных напряжений $U_{вх}$ и $-U_{вх}$ с помощью коммутатора, управляемого выходным импульсным сигналом *DDS*-генератора.

Выходное напряжение измерительной схемы $U_{вых}(t)$ поступает на первые входы компараторов 1 и 2, на вторые и третьи входы которых подаются постоянные пороговые напряжения $U_{пор1} = 0,1KU_{вх}$ и $U_{пор2} = 0,9KU_{вх}$ с выхода источника опорных напряжений. Компараторы 1 и 2 осуществляют сравнение напряжения $U_{вых}(t)$ с установленными пороговыми уровнями, в результате чего на выходах компараторов формируются импульсы с длительностями, равными соответственно времени нарастания $\tau_{ф}$ и спада $\tau_{сп}$ между уровнями 0,1 и 0,9 выходного напряжения ОУ. Выходные напряжения компараторов 1 и 2 поступают на входы формирователя импульсов, на другие входы которого подаются стабилизированное постоянное опорное напряжение $U_{оп}$ с выхода источника опорного напряжения и исходный импульсный сигнал с выхода *DDS*-генератора, задающий период T следования импульсов.

Формирователь импульсов осуществляет необходимую временную селекцию сигналов, в результате чего на его выходах формируются периодические последовательности прямоугольных импульсов $U_{\text{ФИ1}}(t)$ и $U_{\text{ФИ2}}(t)$ с амплитудой $U_{\text{оп}}$, периодом следования T и длительностями, соответственно равными времени нарастания $\tau_{\text{ф}}$ и времени спада $\tau_{\text{сп}}$ выходного напряжения ОУ. Напряжения $U_{\text{ФИ1}}(t)$ и $U_{\text{ФИ2}}(t)$ с выходов формирователя импульсов поступают на входы измерителей среднего значения напряжения ИСЗН1 и ИСЗН2, выходные постоянные напряжения которых пропорциональны соответственно времени нарастания $\tau_{\text{ф}}$ и времени спада $\tau_{\text{сп}}$ выходного напряжения ОУ. Эти напряжения усиливаются масштабирующими усилителями 1 и 2 с одинаковыми коэффициентами усиления $K_{\text{МУ}}$. Значение $K_{\text{МУ}}$ выбирается, исходя из условия согласования уровня выходного напряжения ИСЗН1, ИСЗН2 с диапазоном входных напряжений АЦП.

Выходные напряжения масштабирующих усилителей 1 и 2 оцифровываются с помощью АЦП 1 и 2 и в виде цифрового кода заносятся в персональный компьютер, где программой обработки результатов измерений вычисляются искомые значения максимальных скоростей нарастания и спада выходного напряжения ОУ по формулам:

$$V_{U_{\text{ВЫХ}} \text{ max ф}} = \frac{0,8 \cdot K_{\text{ИС}} \cdot K_{\text{МУ}} \cdot U_{\text{ВХ}} \cdot U_{\text{оп}}}{U_{\text{МУ1}} \cdot T}; \quad (1)$$

$$V_{U_{\text{ВЫХ}} \text{ max сп}} = \frac{0,8 \cdot K_{\text{ИС}} \cdot K_{\text{МУ}} \cdot U_{\text{ВХ}} \cdot U_{\text{оп}}}{U_{\text{МУ2}} \cdot T}. \quad (2)$$

Таким образом, разработанная структура (рис. 1) измерителя максимальных скоростей нарастания и спада выходного напряжения ОУ позволяет решить поставленную задачу при простой реализации и программном управлении процессом измерения.

Структура измерителя частоты единичного усиления ОУ (рис. 2) отличается от известных структур тем, что сравнение входного и выходного напряжений ОУ осуществляется с помощью дифференциального амплитудного детектора и компаратора напряжений, состояние которого учитывается при задании частоты генератора тестовых сигналов.

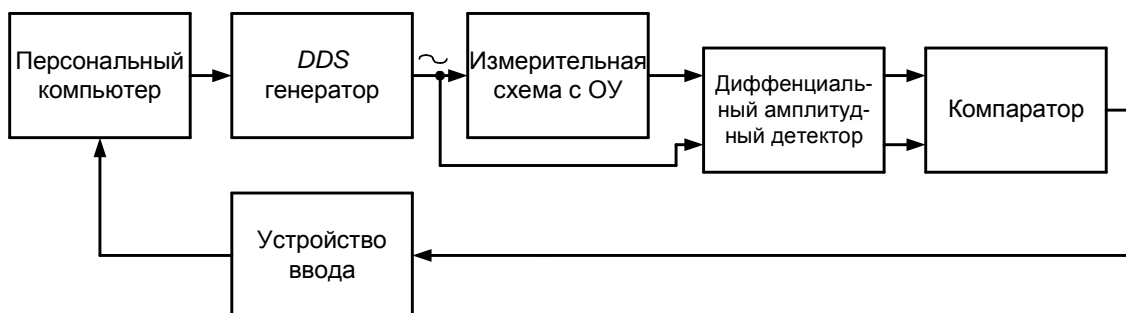


Рис. 2. Структурная схема измерителя частоты единичного усиления ОУ

Исследуемый ОУ включается в состав измерительной схемы в виде инвертирующего или неинвертирующего усилителя с коэффициентом усиления, равным 10. На вход измерительной схемы поступает тестовый синусоидальный сигнал с выхода программно управляемого *DDS*-генератора сигналов. Входное и выходное напряжения измерительной схемы подаются на входы дифференциального амплитудного детектора, в котором для обеспечения идентичности каналов использована сборка диодов Шоттки на одной подложке. Выходные напряжения двух каналов дифференциального амплитудного детектора, пропорциональные амплитудам входного и выходного напряжений измерительной схемы, поступают на входы компаратора напряжений. Информация о состоянии компаратора через устройство ввода поступает на персональный компьютер и учитывается программой, управляющей заданием частоты тестового сигнала *DDS*-генератора.

Разработаны методика и алгоритм автоматизированного измерения частоты единичного усиления ОУ, отличающиеся тем, что частота тестового сигнала, подаваемого на исследуемый ОУ для оценки его коэффициента усиления, изменяется не плавно, а дискретно, начиная с минимально допустимого значения частоты единичного усиления, с последующим удвоением частоты, а затем итерационным сужением диапазона поиска частоты f_1 , при которой коэффициент усиления ОУ становится меньше единицы при заданном разрешении по частоте.

Структура измерителя запаса устойчивости ОУ по фазе (рис. 3) отличается тем, что разность фаз между входным и выходным напряжениями ОУ на частоте единичного усиления преобразуется с помощью двух компараторов в длительность интервала времени, а затем в постоянное напряжение.

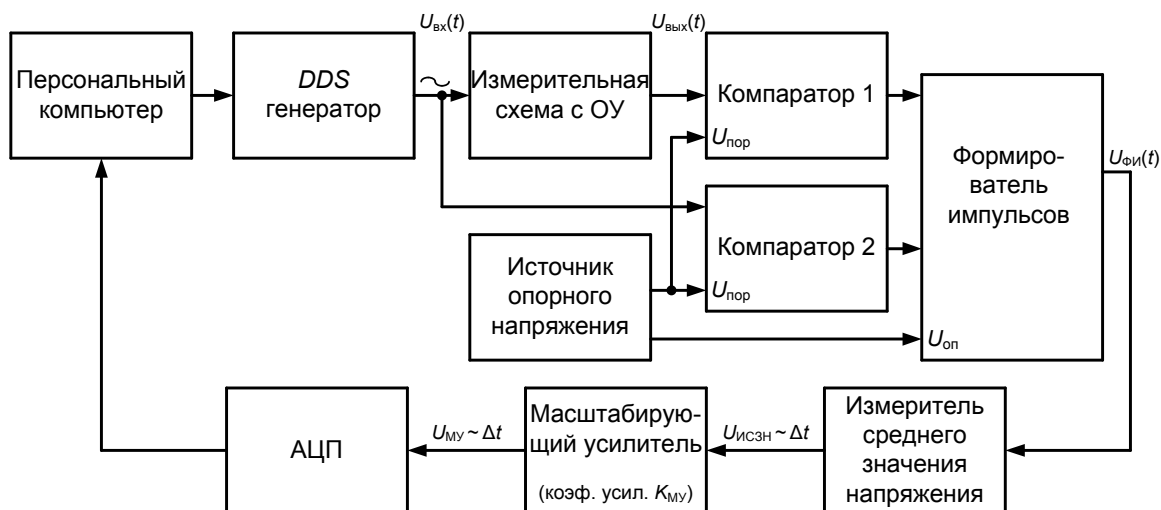


Рис. 3. Структурная схема измерителя запаса устойчивости ОУ по фазе

Программно управляемый *DDS*-генератор тестовых сигналов подает синусоидальный сигнал с частотой, равной ранее измеренной частоте f_1 единичного усиления ОУ, на вход измерительной схемы в виде неинвертирующего усилителя с исследуемым ОУ. Входное и

выходное напряжения измерительной схемы $U_{\text{вх}}(t)$ и $U_{\text{вых}}(t)$ поступают соответственно на первые входы компараторов 1 и 2, на вторые входы которых подается заранее выбранное постоянное пороговое напряжение $U_{\text{пор}}$ с выхода источника опорного напряжения.

Компараторы 1 и 2 изменяют свои состояния при превышении напряжениями $U_{\text{вх}}(t)$ и $U_{\text{вых}}(t)$ установленного порогового уровня. Выходные напряжения компараторов 1 и 2, а также стабилизированное постоянное опорное напряжение $U_{\text{оп}}$ с выхода источника опорного напряжения поступают на входы формирователя импульсов (ФИ), на выходе которого формируется периодическая последовательность прямоугольных импульсов $U_{\text{ФИ}}(t)$ с амплитудой $U_{\text{оп}}$, периодом следования $T = 1/f_1$ и длительностью Δt , равной времени задержки выходного напряжения измерительной схемы относительно входного напряжения. Выходное напряжение формирователя импульсов $U_{\text{ФИ}}(t)$ поступает на вход измерителя среднего значения напряжения (ИСЗН). Выходное напряжение ИСЗН усиливается масштабирующим усилителем с коэффициентом усиления $K_{\text{МУ}}$, а затем оцифровывается с помощью АЦП и в виде цифрового кода заносится в персональный компьютер, где программой обработки результатов измерений вычисляется искомое значение запаса устойчивости по фазе φ_0 :

$$\varphi_0 = 180^\circ - \varphi = 180^\circ \cdot \left(1 - \frac{2U_{\text{МУ}}}{K_{\text{МУ}} \cdot U_{\text{оп}}} \right). \quad (3)$$

Разработанные структуры реализованы с использованием технологии виртуальных приборов [6] и могут быть программным путем перенастроены на измерение других динамических параметров ОУ. Программное обеспечение создано в среде графического программирования LabVIEW.

Заключение

Экспериментальные исследования разработанных структур 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 (спада) выходного напряжения ОУ составило 50 В/мкс.

Список литературы

1. Автоматизированное измерение максимальной скорости нарастания выходного

напряжения операционного усилителя / А.В. Светлов, М.Ю. Паршуков, С.Ю. Байдаров, И.В. Ханин // Надежность и качество – 2010 : труды Международного симпозиума (Пенза, 24 – 31 мая 2010 г.) : в 2-х т. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. – Т. 2. – С. 185–187.

2. ГОСТ 23089.10-83. Микросхемы интегральные. Метод измерения максимальной скорости и времени нарастания выходного напряжения операционных усилителей.

3. ГОСТ 23089.13-86. Микросхемы интегральные. Методы измерения частоты среза и частоты единичного усиления операционных усилителей.

4. ГОСТ 23089.16-90. Микросхемы интегральные. Метод измерения запаса устойчивости по фазе операционных усилителей.

5. Измерение динамических параметров операционных усилителей с применением цифровых формирователей сигналов / А.В. Светлов, М.Ю. Паршуков, В.В. Комаров, Е.В. Сапунов // Надежность и качество – 2013 : труды Международного симпозиума (Пенза, 27 мая – 3 июня 2013 г.) : в 2-х т. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – Т. 2. – С. 62–65.

6. Использование технологии виртуальных приборов при разработке аппаратно-программного комплекса для измерения параметров операционных усилителей / А.В. Светлов, М.Ю. Паршуков, С.Ю. Байдаров, В.В. Комаров // Надежность и качество – 2012 : труды Международного симпозиума (Пенза, 21–31 мая 2012 г.) : в 2-х т. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 2. – С. 7–10.

7. Методика обработки результатов измерений параметров операционного усилителя / А.В. Светлов, С.Ю. Байдаров, В.В. Комаров, М.Ю. Паршуков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 128–140.

8. Светлов А.В., Андреев А.Н., Казаков В.А. Макромодель операционного усилителя для моделирования измерительных цепей с импульсными сигналами // Измерительная техника. – 1999. – № 9. – С. 26–29.

Рецензенты:

Чураков П.П., д.т.н., профессор, декан факультета приборостроения, информационных технологий и систем ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», г. Пенза.

Юрков Н.К., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», г. Пенза.