

Ким В.Л., Андреев С.А.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия (634050, Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: kimvall1@rambler.ru*

При калибровке и поверке приборов, работающих в нано- и микровольтовом диапазоне, необходимы автоматизированные системы измерений, контроля и испытаний. Для решения данной задачи в лаборатории дискретной и микропроцессорной техники Томского политехнического университета был разработан синхронный усилитель с встроенным генератором синусоидального напряжения. Работа усилителя основана на методе синхронного детектирования, что повышает точность измерений напряжений переменного тока. Разрешающая способность прибора равна 50 нВ в диапазоне частот 0,2...2 кГц. Синхронный усилитель состоит из основного измерительного канала и дополнительного генераторного канала. Управление каналами осуществляется цифровой подсистемой. На рынке существуют аналоги с высокими техническими характеристиками, но из-за их многофункциональности они отличаются высокой стоимостью, громоздкостью и низкой ремонтоспособностью. Данная разработка не имеет таких недостатков и может применяться при калибровке и поверке индуктивных делителей напряжения, определении погрешности преобразования ЦАП, АЦП, коэффициентов усиления операционных усилителей и ослабления аттенуаторов, проведении испытаний измерительных каналов аппаратно-программных комплексов. В статье приведены основные технические характеристики.

Ключевые слова: квадратурный генератор, синхронный усилитель, синхронное детектирование, индуктивный делитель напряжения.

## SYNCHRONOUS AMPLIFIER WITH A BUILT-IN QUADRATURE OSCILLATOR

Kim V.L., Andreev S.A.

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30), e-mail: kimvall1@rambler.ru*

Automated systems for measurement, control and testing are needed during calibration and verification of the devices operating in the nano- and microvolt range. To solve this problem a synchronous amplifier with a built-in sinusoidal oscillator was developed in the Tomsk Polytechnic University laboratory of discrete and microprocessor technology. Amplifier operation is based on the synchronous detection method that improves the AC voltage measurement accuracy. Device resolving power is 50 nV over the frequency range 0.2 ... 2 kHz. The synchronous amplifier consists of the main measurement channel and the additional generator channel. Channel management provided by the digital subsystem. There are analogues with high technical characteristics on the market, but they present expensive, cumbersome devices with low maintainability which is caused by their versatility. This product does not have these disadvantages and can be used for calibration and verification of inductive voltage dividers, determining DAC and ADC conversion error, an operational amplifier gain and an attenuation factor of attenuator, testing measuring channels of Hardware and software complex. The main technical characteristics are appended.

Keywords: quadrature oscillator, synchronous amplifier, synchronous detection, inductive voltage divider.

Повышение точности измерений напряжений переменного тока в нано- и микровольтовом диапазоне возможно методом синхронного детектирования [4–6].

На рынке существует ряд приборов – синхронные усилители, нановольтметры [10], отличающихся высокими техническими характеристиками. Однако они в силу своей многофункциональности отличаются высокой стоимостью, громоздкостью и низкой ремонтоспособностью (как правило, отсутствует техническая и программная документация).

В лаборатории дискретной и микропроцессорной техники Томского политехнического

университета был создан синхронный усилитель с встроенным генератором синусоидального напряжения (рис. 1).

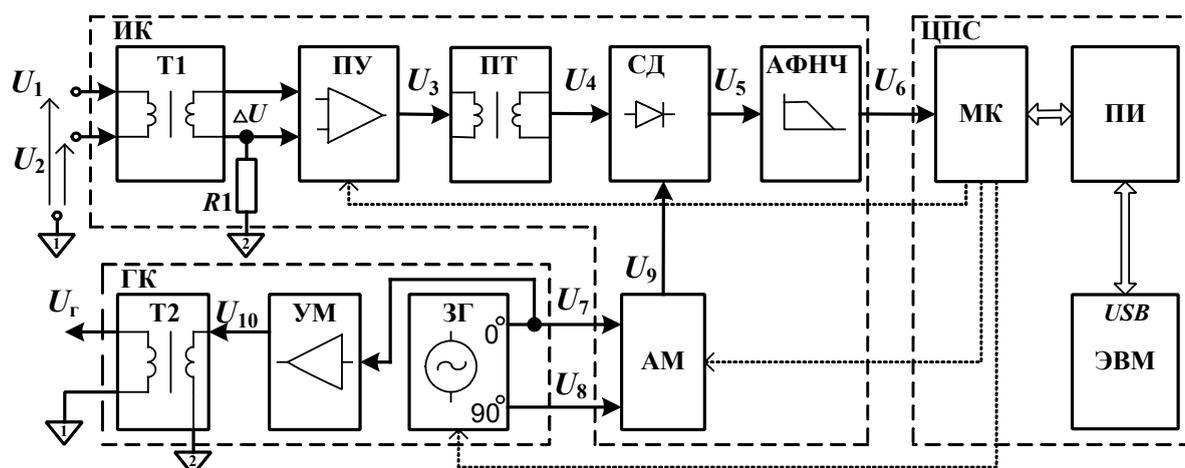


Рис. 1. Структурная схема синхронного усилителя

Одним из основных назначений устройства является использование его в качестве прибора сравнения при калибровке и поверке индуктивных делителей напряжения (ИДН) [2]. Например, усилитель позволяет измерять синфазную и квадратурную составляющие разности двух напряжений тестируемого и эталонного индуктивных делителей напряжения.

Синхронный усилитель состоит из основного измерительного канала (ИК) и дополнительного генераторного канала (ГК). Управление каналов осуществляется цифровой подсистемой (ЦПС), содержащей микроконтроллер (МК), преобразователь интерфейса RS232/USB (ПИ) и персональную ЭВМ верхнего уровня (ЭВМ).

В основном канале входной двухобмоточный трансформатор Т1 с коэффициентом трансформации 1:1 обеспечивает гальваническую развязку синхронного усилителя от источников напряжений  $U_1(t)$ ,  $U_2(t)$ , подключаемых к дифференциальному входу устройства. Разностное напряжение  $\Delta U(t)$  поступает на программируемый трехкаскадный усилитель ПУ с коэффициентом усиления 50,  $10^2$ ,  $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$ ,  $10^7$ . Такое многокаскадное построение усилительного тракта позволяет установить диапазон измерения синхронного детектора СД в пределах (0,5–5) В. Режим работы ПУ по постоянному току обеспечивается резистором R1. Передача переменной составляющей напряжения  $U_3(t)$  с выхода ПУ на СД осуществляется при помощи переходного трансформатора ПТ с коэффициентом трансформации 1:1. Заметим, что использование такого трансформатора вместо переходной C, R–цепи на входе СД позволяет практически полностью устранить влияние сравнительно большого входного тока и его дрейфа на стабильность работы СД. Так как ПТ не вносит

фазовых искажений, то напряжение на его выходе равно входному, т. е.  $U_4(t) = U_3(t)$ .

Далее выходное напряжение  $U_5(t)$  синхронного детектора фильтруется посредством активного фильтра низких частот АФНЧ второго порядка с частотой среза 5 Гц. Выходное напряжение  $U_6(t)$  фильтра поступает на вход АЦП микроконтроллера ЦПС.

Генераторная часть прибора формирует синусоидальное напряжение частотой 0,2...2 кГц и состоит из задающего генератора ЗГ, усилителя мощности УМ с выходным трансформатором Т2 с коэффициентом трансформации 1:1 и аналогового мультиплексора АМ. Выходное напряжение  $U_7(t)$  генератора, формируемое на вторичной обмотке Т2, поступает на объект исследования, например, сличаемые рабочий и эталонный ИДН.

ЗГ построен по схеме инвертора и двух интеграторов [1, 7]. Такие генераторы обеспечивают малые нелинейные искажения (десятые доли процента) синусоидального напряжения, что является условием точной работы СД. Другая отличительная особенность ЗГ – генерирование двух квадратурных напряжений. Напряжение  $U_7(t)$  поступает на вход УМ и на один из входов АМ. Выходное напряжение  $U_{10}(t)$  усилителя мощности подается на первичную обмотку трансформатора Т2. Напряжение  $U_8(t)$ , сдвинутое на  $90^\circ$  относительно  $U_7(t)$ , подается на второй вход мультиплексора. Таким образом, при измерении синфазной или квадратурной составляющей разностного напряжения  $\Delta U(t)$  напряжение  $U_9(t)$  на опорном входе СД будет равно  $U_7(t)$  или  $U_8(t)$  соответственно.

Цифровой код управления работой программируемого усилителя, задающего генератора и аналогового мультиплексора поступает от микроконтроллера (Atmega 128). Связь последнего с ЭВМ верхнего уровня осуществляется посредством ПИ (FT232RL).

Важной особенностью рассматриваемого устройства является его гальваническая развязка от объекта исследования ввиду использования на входе и выходе трансформаторов Т1 и Т2. Это позволяет использовать синхронный усилитель при калибровке ИДН не только методом сравнения с мерой (эталоном), о чем упоминалось выше, но и методом опорного потенциала [9] и параллельно-последовательным ступенчатым способом [8].

Основными элементами устройства являются синхронный детектор, параметры и характеристики которого определяют потенциальную разрешающую способность сравнения двух синусоидальных напряжений  $U_1(t)$ ,  $U_2(t)$ , и задающий генератор, генерирующий напряжения  $U_7(t)$  и  $U_8(t)$ .

Целесообразно в качестве СД использовать микросхему AD630, представляющую собой прецизионный балансный модулятор-демодулятор с полосой частот до 350 кГц (рис. 2). Кроме

своего основного назначения микросхема применима при синхронном, фазовом, квадратурном детектировании, а также в синхронных усилителях. Одним из основных недостатков AD630 является сравнительно большие входные токи (до 300 нА) и напряжение смещения (до 500 мкВ), что приводит к снижению чувствительности СД при работе с высокоомными источниками сигнала. Поэтому, как упоминалось выше, на входе СД используется переходный трансформатор, обеспечивающий малое омическое сопротивление на входе СД.

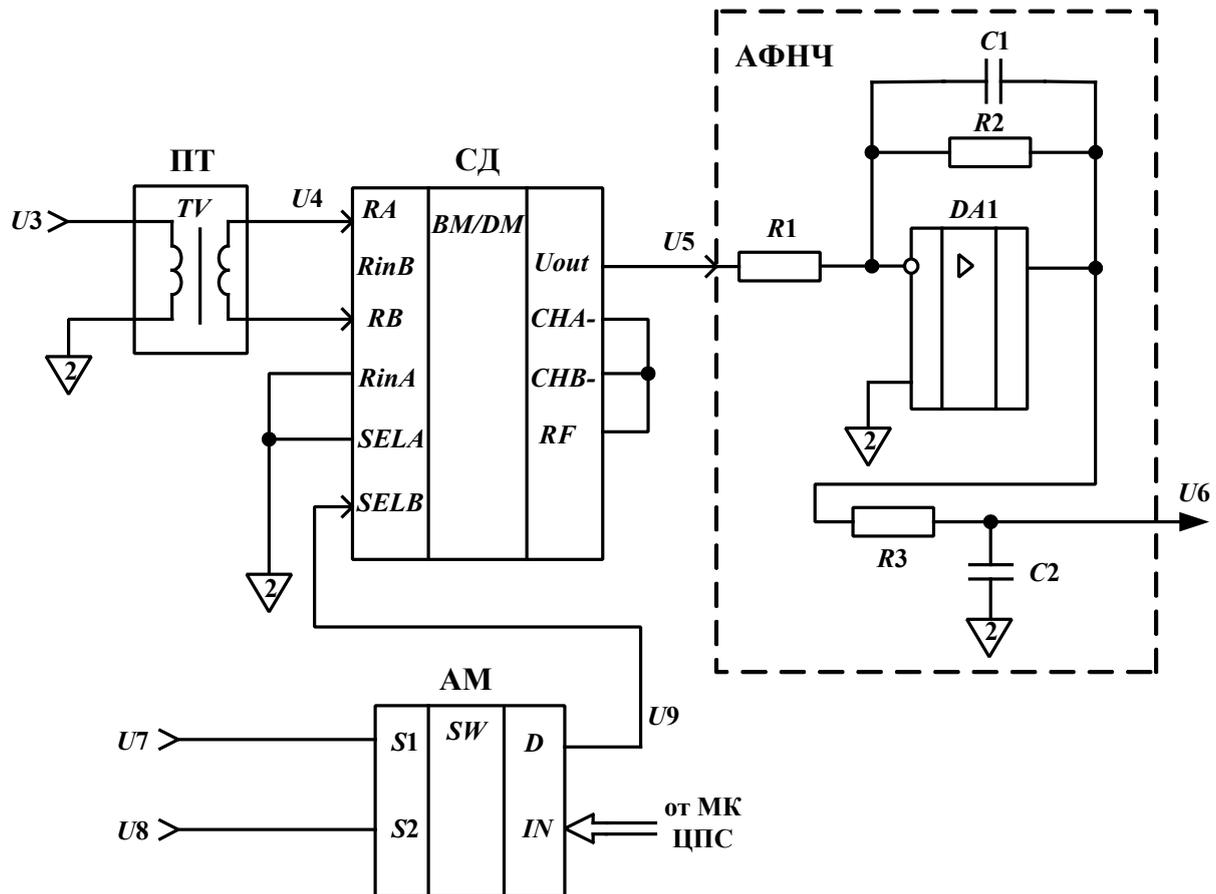


Рис. 2. Функциональная схема синхронного детектора и его обрамления

Полоса пропускания АФНЧ, подключенного к выходу СД, определяется элементами  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $C_1$  и  $C_2$ , т. е. частота среза равна

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} = \frac{1}{2\pi R_3 C_2}.$$

Коэффициент усиления на постоянном токе равен

$$|K_0| = \frac{R_2}{R_1}.$$

От частоты среза АФНЧ зависит выбор частоты дискретизации АЦП микроконтроллера.

Заметим, что стремление уменьшить полосу пропускания фильтра ведет к повышению его инерционности, а, следовательно, и увеличению времени реакции всего устройства. Как показали экспериментальные исследования, при частоте среза АФНЧ, равной 5 Гц, время установления переходного процесса устройства не превышает 3 сек.

При работе микросхемы СД в режиме синхронного детектирования на вход SELB второго демодулятора поступает сигнал опорной частоты  $U_9$ . Синфазную составляющую разности входных напряжений  $U_1(t)$ ,  $U_2(t)$  можно определить в случае, когда фаза этих сигналов практически равна фазе напряжения  $U_7$ , генерируемого задающим генератором ГК. Для этого необходимо, чтобы аналоговый мультиплексор АМ находился в положении  $S1$ . Если же сигналом управления, поступающим на вход  $IN$  мультиплексора от микроконтроллера цифровой подсистемы, АМ переводится в положение  $S2$ , то  $U_9 = U_8$ . Последнее напряжение сдвинуто на 90 градусов относительно  $U_7$ , поэтому СД измеряет квадратурную составляющую разности напряжений  $U_1(t)$ ,  $U_2(t)$ .

В задающем генераторе, представленном на рис. 3, инвертор выполнен на операционном усилителе  $DA2$  и резисторах  $R1$ ,  $R2$ , интеграторы – на операционных усилителях  $DA6$ ,  $DA8$  и конденсаторах  $C3$ ,  $C4$ . Пиковый детектор  $VD1$ ,  $C1$ ,  $R4$  и аналоговый умножитель  $DA3$  образуют первый контур стабилизации амплитуды ЗГ, а однополупериодный выпрямитель  $VD2$ ,  $R6$ , источник опорного напряжения  $U_{оп}$ , пассивный сумматор  $VD3$ ,  $R7$ ,  $R6$ , усилитель ошибки (интегратор)  $DA5$  с конденсатором  $C2$  – второй.

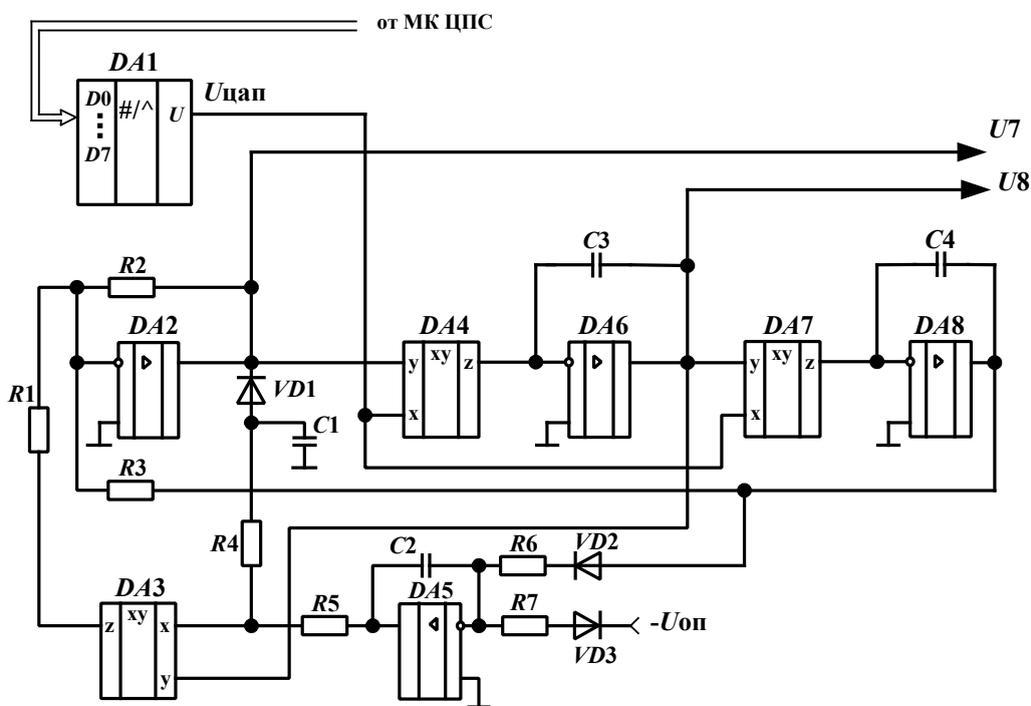


Рис. 3. Функциональная схема задающего генератора

Как видно из рис. 3, в цепях обратной связи первых двух интеграторов используются аналоговые перемножители  $DA4, DA7$ , играющие роль электрически управляемых резисторов  $R_{упр}$ . Частота колебаний ЗГ равна

$$f_{зг} = \frac{1}{2\pi R_{упр} C_3} = \frac{1}{2\pi R_{упр} C_4}.$$

Управление перемножителями  $DA4, DA7$  осуществляется восьмиразрядным цифроаналоговым преобразователем  $DA1$ , цифровые входы которого подключены к микроконтроллеру ЦПС. К последнему также подключены управляющие входы трехкаскадного усилителя ПУ (рис. 4).

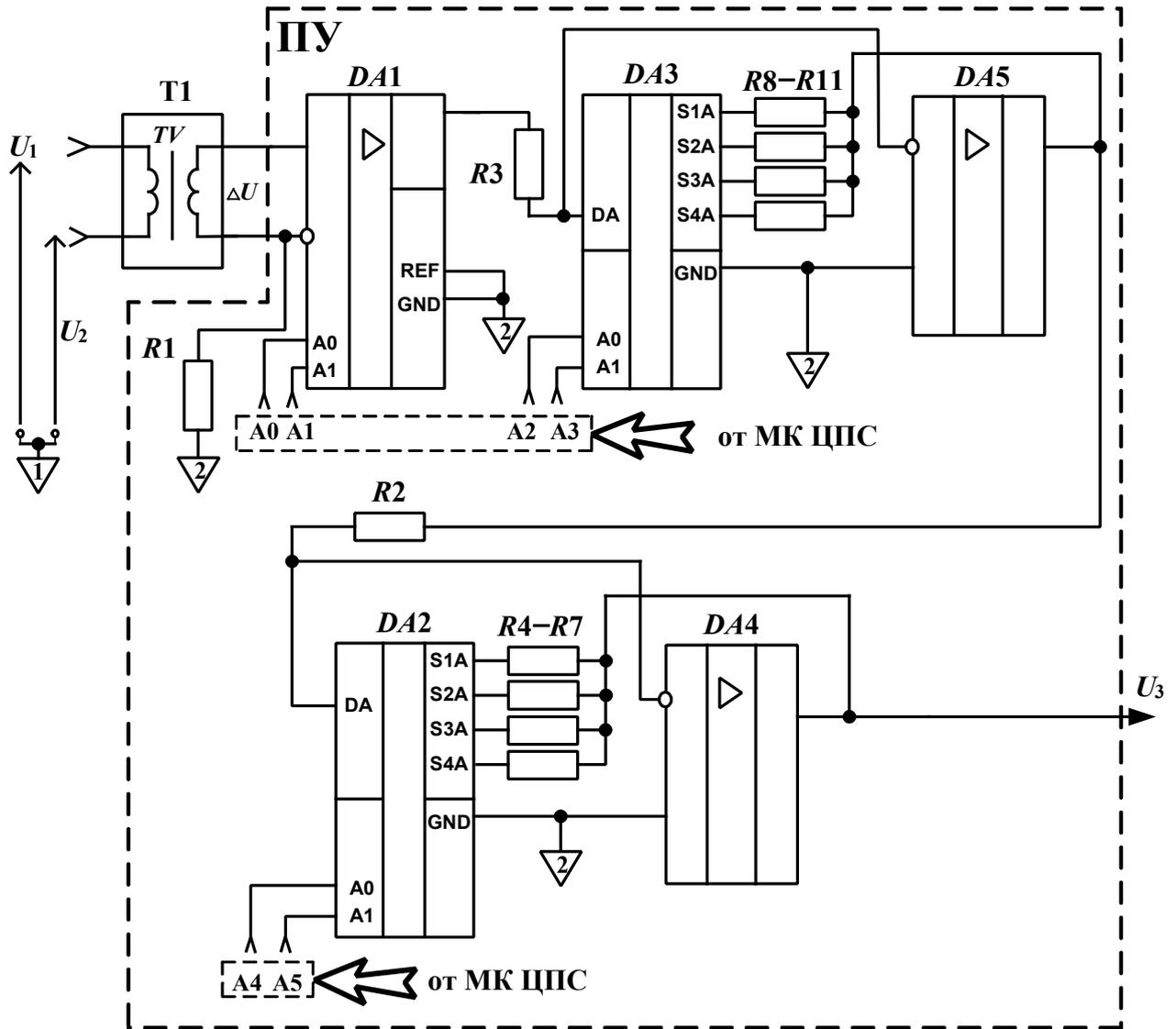


Рис. 4. Функциональная схема программируемого усилителя

Первый каскад ПУ выполнен на инструментальном усилителе  $DA1$  с дифференциальными

входами, подключенными к вторичной обмотке входного двухобмоточного трансформатора Т1. Активное сопротивление этой обмотки ввиду своей малости по сравнению с резистором смещения  $R1$  не оказывает существенного влияния на прохождение разностного сигнала  $\Delta U(t)$  на вход ПУ. Коэффициент усиления первого каскада ПУ может быть установлен равным 1, 2, 5 или 10 в зависимости от кода на адресных входах  $A0, A1$ .

Второй и третий каскады ПУ выполнены идентично в виде инвертирующих усилителей на ОУ  $DA4, DA5$  с коэффициентами усиления 1, 10, 100 и 1000. Установка конкретного коэффициента усиления производится аналоговыми мультиплексорами типа  $4 \times 1$  на микросхемах  $DA2, DA3$ . Эти мультиплексоры в зависимости от кода, поступающего от микроконтроллера ЦПС на адресные входы  $A0, A1$ , выбирают один из резисторов из набора резисторов обратных связей  $R8 - R11, R4 - R7$  первого и второго инвертирующих усилителей соответственно. Коэффициент усиления равен

$$K_{yc} = -\frac{R_m}{R_n},$$

где  $m = 8, 9, 10, 11$ ;  $n = 3$  – для первого усилителя и  $m = 4, 5, 6, 7$ ;  $n = 2$  – для второго усилителя.

В приборе использованы микросхемы AMP01EX, AD620BN, OP27G, OP37G, LM3886T, AD630ARZ, 525ПC2A, Atmega128, FT232RL.

Программное обеспечение разработано на языке C++.

Описанный синхронный усилитель был использован при поверке исходного ИДН, входящего в состав Государственного первичного эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 0 до 178 ГГц (ГЭТ93-2011) [3].

Другие области применения – определение погрешностей преобразования ЦАП, АЦП, коэффициентов усиления операционных усилителей и ослабления аттенюаторов, испытания измерительных каналов аппаратно-программных комплексов.

Основные технические характеристики:

Диапазон рабочих температур, °С .....	20±5
Диапазон рабочих частот, кГц .....	0,2...2
Диапазон входных напряжений (амплитудное значение), В .....	0,01...10
Максимальная разность входных напряжений, мВ .....	1
Разрешающая способность сравнения напряжения, нВ .....	50
Максимальная относительная погрешность измерения	

разности входных напряжений, % .....	5
Максимальное время измерения, с .....	3
Выходное напряжение встроенного генератора (амплитудное значение), В .....	10
Максимальный выходной ток генератора (амплитудное значение), А .....	1
Коэффициент гармоник напряжения генератора, не более % .....	0,2

*Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». Государственный контракт № 14.578.21.0032.*

### Список литературы

1. Борицов В.Н., Ким В.Л., Меркулов С.В. Генераторы тестовых напряжений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 1. – С. 23–26.
2. Ким В.Л. Методы и средства повышения точности индуктивных делителей напряжения: монография. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2009. – 214 с.
3. Ким В.Л., Пругло В.И., Меркулов С.В., Чебуренко Д.С., Иванов М.Л. Прецизионные низкочастотные средства измерений государственного первичного эталона ослабления электромагнитных колебаний // Известия Томского политехнического университета. – 2012, Т. 320. – № 4. – С. 84-88.
4. Ким В.Л., Цимбалист Э.И., Чебуренко Д.С. Дифференциальный нановольтметр Датчики и системы. – 2011. – № 9. – С. 49-51.
5. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2 т. Пер. с франц. – М.: Мир, 1983. – Т. 2. – 256 с.
6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – 3-е изд. – БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
7. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
8. Braun A., Richer H., Danneberg H. Determination of Voltage Transformer Error by Means of a Parallel-Series Step-Up Method // IEEE Trans. Instrum. and Meas. – 1980. – Vol. IM-29, № 4. – P. 492–495.
9. Nakase T. Isolated-Section Inductive Divider and Its Self-Calibration // IEEE Trans. Instrum. and Meas. – 1970. – Vol. IM-19, № 4. – P. 312–317.
10. Used-Line: сайт: URL: [http://www.used-line.com/used-lock-in-amplifiers/bb\\_74](http://www.used-line.com/used-lock-in-amplifiers/bb_74) (дата обращения 03.09.2014).

**Рецензенты:**

Авдеева Д.К., д.т.н., профессор, директор ООО «Медприбор», г. Томск;

Дмитриев В.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой моделирования и системного анализа  
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск.