

УДК 621.316.72

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ СРАВНЕНИЯ СИНФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

П.Ф. Баранов, В.Н. Бориков, Э.И. Цимбалист
Томский политехнический университет
E-mail: bpf@tpu.ru

Баранов Павел Федорович, аспирант кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля, заведующий лабораторией технологий, систем и инструментов для автоматизированных сетевых лабораторных практикумов удаленного доступа ТПУ.

E-mail: bpf@tpu.ru

Область научных интересов: методы и средства измерений электрических величин, графические программные технологии, аналитическое приборостроение, интеллектуальные системы.

Бориков Валерий Николаевич, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: borikov@tpu.ru

Область научных интересов: методы и средства измерений электрических величин, компьютеризация научных исследований.

Цимбалист Эдвард Ильич, канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Института кибернетики ТПУ.

E-mail: tsimbalist@tpu.ru

Область научных интересов: средства измерений, установки и системы, предназначенные для испытаний и поверки метрологических характеристик электронных вольтметров, многозначных мер и масштабных преобразователей напряжения переменного тока.

Статья представляет результаты разработки высокочувствительного прибора для сравнения синфазных напряжений переменного тока. Приводятся решение задачи расширения динамического диапазона сравниваемых сигналов и результаты экспериментального определения метрологических характеристик разработанного прибора.

Ключевые слова:

Синхронный усилитель, синфазные напряжения, дифференциальный метод, сравнение переменных напряжений, калибровка.

Введение

При подтверждении метрологических характеристик измерительных преобразователей (ИП) максимальную точность обеспечивает метод сравнения с мерой. Практическое применение метода невозможно без наличия высокочувствительных приборов сравнения, разрешающая способность которых определяет минимальную погрешность измерений.

В качестве приборов, обеспечивающих разрешающую способность порядка единиц нановольт при сравнении двух переменных сигналов в широком динамическом диапазоне частот и напряжений, распространение получили синхронные усилители с дифференциальным входом (СУДВ) [1–2].

Современные СУДВ реализуют метод одновременного сличения сравниваемых напряжений по амплитудам синфазных составляющих, с усилением разностного сигнала, его синхронным детектированием, фильтрацией и представлением в цифровом и аналоговом видах [3–5].

Структурная схема простейшего СУДВ такого типа представлена на рис. 1.

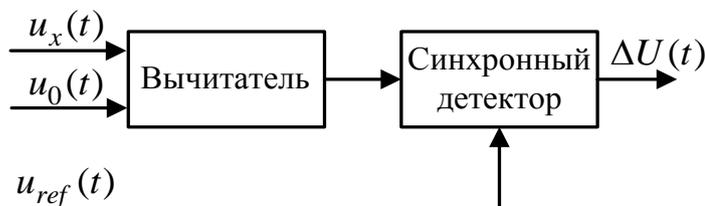


Рис. 1. Структурная схема СУДВ

Выходная величина такого СУДВ определяется выражением

$$\Delta U \approx \frac{1}{E} \left(\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \left[u_x(t) - u_0(t) + \frac{u_x(t) + u_0(t)}{2K_{\text{ОСС}}} \right] u_{\text{ref}}(t) dt \right), \quad (1)$$

где E – значение деноминатора синхронного детектора, В; $u_0(t)$, $u_x(t)$ – значения сравниваемых входных сигналов, В; $u_{\text{ref}}(t)$ – значение опорного сигнала, В; $K_{\text{ОСС}}$ – коэффициент ослабления синфазного сигнала.

Из (1) следует, что измерение разности ΔU сигналов $u_0(t)$ и $u_x(t)$ сопровождается погрешностью, которая зависит от фазового сдвига φ между входными сигналами, конечного подавления синфазного сигнала $K_{\text{ОСС}}$ схемы сравнения (вычитателя) и некогерентности опорного $u_{\text{ref}}(t)$ и детектируемого сигналов на входах синхронного детектора, характеризуемой фазовым сдвигом φ_{ref} .

Входной каскад СУДВ

Для метрологического обеспечения ИП, таких как индуктивные делители напряжения (ИДН), токовые шунты и т. д., при определении амплитудно-частотных характеристик цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователей с учетом достигнутых разрядностей последних необходимо обеспечить сравнение синфазных напряжений до $10\sqrt{2}$ В с разрешающей способностью до 10 нВ.

Входной каскад СУДВ, обеспечивающий одновременное сравнение двух напряжений и выделение дифференциального сигнала, является ключевым с точки зрения обеспечения требуемых динамического диапазона сравниваемых напряжений и максимальной разрешающей способности.

В качестве вычитателя предложено использовать инструментальный усилитель (ИУ) в интегральном исполнении с программируемым коэффициентом усиления. Выбор таких ИУ обусловлен тем, что КОСС не зависит от выходных сопротивлений источников сравниваемых сигналов и зависимость КОСС от внутренних сопротивлений каскадов ИУ минимизирована технологически. На основе анализа параметров различных ИУ предложено использовать микросхему PGA207 фирмы Texas Instruments [6].

Проблема расширения динамического диапазона сравниваемых сигналов до $10\sqrt{2}$ В с разрешающей способностью до 10 нВ связана с малым напряжением питания ИУ и недостаточным подавлением синфазного сигнала. При сравнении двух одинаковых по амплитуде синфазных напряжений, равных 10 В, с помощью микросхемы PGA207 выходной сигнал составит около 100 мкВ на частоте 1 кГц и будет возрастать с увеличением частоты сравниваемых сигналов.

Для комплексного решения данных проблем предложена схема организации слеящего питания и выделения дифференциального сигнала на основе двух инструментальных усилителей и повторителя напряжения (рис. 2).

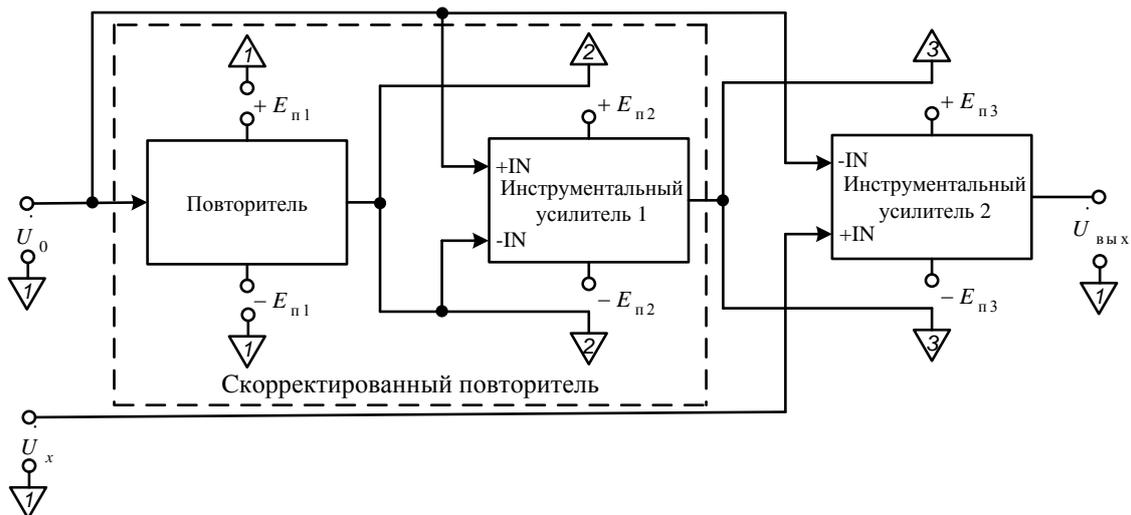


Рис. 2. Схема выделения дифференциального сигнала

В схеме на рис. 2 напряжение на выходе первого ИУ:

$$\dot{U}_{\text{вых(ИУ1)}} = \dot{U}_0 \dot{K}_{\text{п(к)}}$$

где $\dot{K}_{\text{п(к)}}$ – скорректированный коэффициент передачи повторителя.

Тогда на инверсном входе второго ИУ (относительно потенциала земли $\nabla 3$) действует напряжение

$$\dot{U}_{-IN} = \dot{U}_0 (1 - \dot{K}_{\text{п(к)}}),$$

а на неинверсном относительно потенциала земли $\nabla 3$ действует

$$\dot{U}_{+IN} = \dot{U}_x - \dot{U}_0 \dot{K}_{\text{п(к)}}.$$

Таким образом, напряжение на выходе второго ИУ относительно потенциала земли $\nabla 3$

:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{вых}} &= \dot{U}_x - \dot{U}_0 \dot{K}_{\text{п(к)}} - \dot{U}_0 (1 - \dot{K}_{\text{п(к)}}) + \frac{\dot{U}_x - \dot{U}_0 \dot{K}_{\text{п(к)}} + \dot{U}_0 (1 - \dot{K}_{\text{п(к)}})}{2\dot{K}_{\text{ОСС}}} = \\ &= (\dot{U}_x - \dot{U}_0) + \left[\frac{\dot{U}_x + \dot{U}_0}{2\dot{K}_{\text{ОСС}}} - \frac{\dot{U}_0 \dot{K}_{\text{п(к)}}}{\dot{K}_{\text{ОСС}}} \right]. \end{aligned}$$

Следовательно, дифференциальное напряжение инвариантно к коэффициенту передачи повторителя, а $K_{\text{ОСС}}$ увеличивается пропорционально точности передачи повторителя.

Структурная схема СУДВ

Структурная схема разработанного СУДВ приведена на рис. 3.

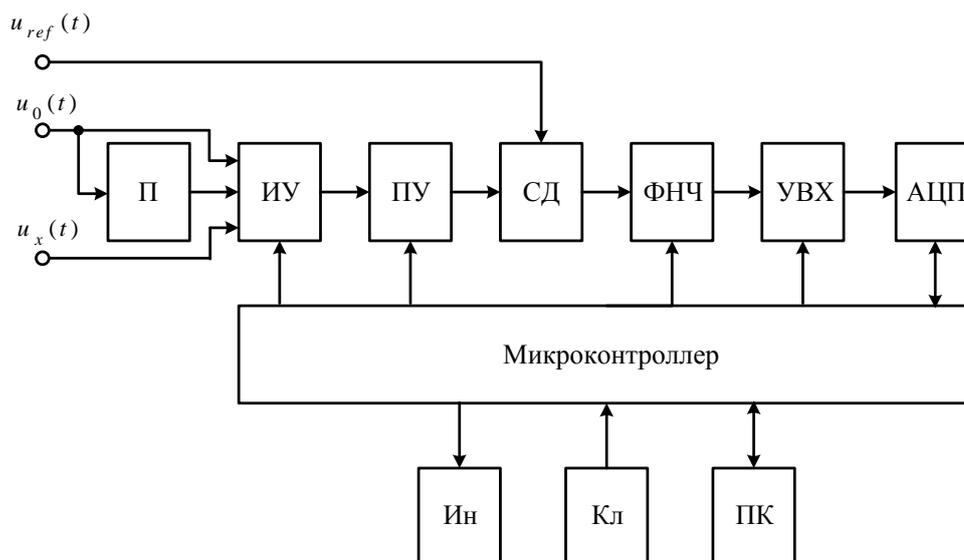


Рис. 3. Структурная схема СУДВ

В состав СУДВ входят: повторитель напряжения (П), инструментальный усилитель (ИУ), усилитель с программируемым коэффициентом усиления (ПУ), синхронный детектор (СД), фильтр нижних частот (ФНЧ), устройство выборки-хранения (УВХ), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), микроконтроллер, цифровой и стрелочный индикаторы (Ин), клавиатура (Кл) и персональный компьютер (ПК).

Повторитель собран на микросхемах ОР285 и PGA207, на PGA207 реализованы также ИУ, ПУ, УВХ. Схема синхронного детектора собрана на микросхеме AD734, в которой для повышения чувствительности установлено значение деноминатора, близкое к 1 В. Для получения монотонности переходной характеристики ФНЧ собран на микросхеме ОР270 и является фильтром Бесселя третьего порядка с частотой среза 0,2 Гц.

Микроконтроллер (АТmega128) реализует управление работой кодоуправляемых узлов СУДВ, дополнительную фильтрацию и индикацию результатов измерений. АЦП выполнено на микросхеме МАХ110.

Использование УВХ позволяет ослабить влияние остаточного напряжения синфазной составляющей разностного сигнала за счет введения операции калибровки измерительного тракта СУДВ, при которой на оба входа схемы выделения дифференциального сигнала подается один и тот же сигнал $u_0(t)$.

Метрологические характеристики СУДВ

Метрологические характеристики реализованного СУДВ были определены экспериментально, для этого был использован эталонный делитель ДИ-3м. ДИ-3м имеет два выхода: основной – выход с младшей декады («Вых. 2») – и дополнительный – выход с первой декады («Вых. 1»). Таким образом, были получены как синфазное, так и разностное напряжения, подаваемые на входы СУДВ.

Входное сопротивление СУДВ по каналу U_x определяли по схеме рис. 4. методом косвенных измерений в два этапа.

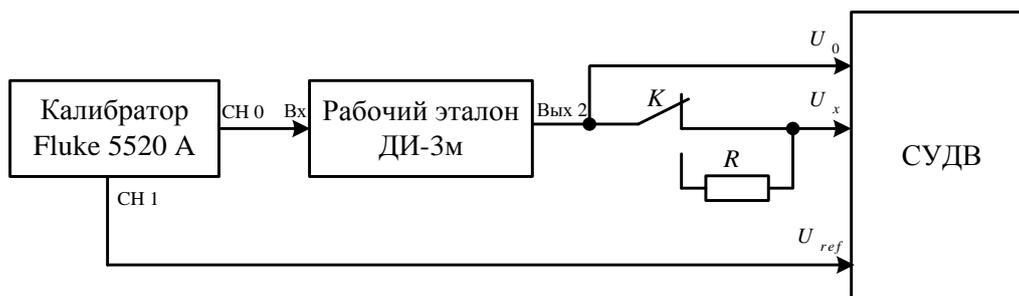


Рис. 4. Схема включения СУДВ для определения его входного сопротивления по каналу U_x

С основного выхода (СН0) калибратора Fluke 5520 А было подано напряжение $U_{вх}$, равное $10\sqrt{2}$ В, с частотой 1 кГц, со вспомогательного выхода (СН1) калибратора было подано напряжение $5\sqrt{2}$ В той же частоты, а коэффициент передачи рабочего эталона ИДН ДИ-3м ($K_{П(ИДН)}$) был установлен равным 0,100000.

На первом этапе на оба входа СУДВ было подано напряжение с выхода ИДН и проведена калибровка СУДВ. На втором этапе сигнал на вход U_x был подан через эталонное сопротивление R , равное 1 кОм, и по показаниям индикатора СУДВ зафиксирована разность напряжений ΔU между входами U_0 и U_x .

Расчет входного сопротивления СУДВ проводился по формуле

$$R_{вх} = \frac{U_{вх} K_{П(ИДН)}}{|\Delta U| / R}.$$

Входного сопротивления по каналу U_0 определялось по аналогичной схеме, на втором этапе сигнал на вход U_0 был подан через эталонное сопротивление R , а на вход U_x – непосредственно с выхода ИДН и была зафиксирована разность напряжений ΔU между входами U_0 и U_x .

Результаты расчетов входных сопротивлений по каналам U_0 и U_x приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчетов входных сопротивлений

Резистор R	Показания индикатора, мкВ	Входное сопротивление, МОм
Включен в цепь U_0	5,0	200
Включен в цепь U_x	-0,5	2000

Определение разрешающей способности СУДВ проводили по схеме, изображенной на рис. 5.

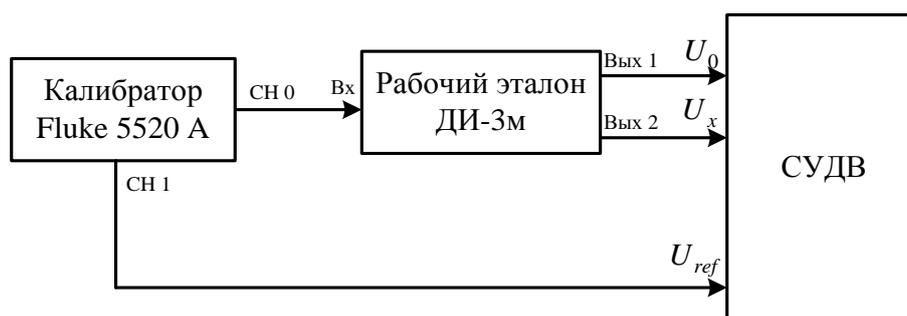


Рис. 5. Схема включения СУДВ для определения разрешающей способности

Определение разрешающей способности проведено методом косвенных измерений путем пересчета изменений коэффициента передачи рабочего эталона ИДН ДИ-3м в напряжение разбаланса $U_{диз}$ ИДН между каналами и напряжением, фиксированным СУДВ.

С основного выхода (СН0) калибратора Fluke 5520 А было подано напряжение $10\sqrt{2}$ В с частотой 1 кГц, со вспомогательного выхода (СН1) калибратора – $5\sqrt{2}$ В той же частоты, а коэффициент передачи рабочего эталона ИДН ДИ-3м был установлен равным 0,100000 по выходу

1. Изменяли коэффициент передачи ИДН ДИ-3м по выходу 2 в диапазоне от 0,100001 до 0,100005. Для определения при разрешающей способности СУДВ 10 мкВ коэффициент передачи ИДН ДИ-3м по выходу 2 изменяли в диапазоне от 0,100010 до 0,100050.

Результаты определения при разрешающей способности СУДВ 10, 1 мкВ, 100 и 10 нВ приведены в табл. 2–5 соответственно.

Относительное отклонение показаний СУДВ рассчитывалось по формуле

$$\gamma = \frac{|(U_{\text{диз}} - \Delta U)|}{U_{\text{диз}}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $U_{\text{диз}}$ – напряжение разбаланса ИДН, В.

Таблица 2. Результаты определения при разрешающей способности СУДВ 10 мкВ

Напряжение разбаланса $U_{\text{диз}}$, мкВ	Показания СУДВ, ΔU , мкВ	Относительное отклонение показаний γ , %
100	100	0
200	200	0
300	300	0
400	400	0
500	500	0

Таблица 3. Результаты определения при разрешающей способности СУДВ 1 мкВ

Напряжение разбаланса $U_{\text{диз}}$, мкВ	Показания СУДВ, ΔU , мкВ	Относительное отклонение показаний γ , %
10	10	0
20	20	0
30	30	0
40	40	0
50	50	0

Таблица 4. Результаты определения при разрешающей способности СУДВ 100 нВ

Напряжение разбаланса $U_{\text{диз}}$, мкВ	Показания СУДВ, ΔU , мкВ	Относительное отклонение показаний γ , %
10	10,1	1,0
20	20,4	2,0
30	30,7	2,3
40	41,0	2,5
50	51,2	2,4

Таблица 5. Результаты определения при разрешающей способности СУДВ 10 нВ

Напряжение разбаланса $U_{\text{диз}}$, мкВ	Показания СУДВ, ΔU , мкВ	Относительное отклонение показаний γ , %
10	10,21	2,1
20	20,34	1,7
30	перегрузка	–

Из данных, приведенных в табл. 2–5, видно, что при всех разрешающих способностях относительное отклонение показаний не превышает 2,5 %.

Определение динамического диапазона сравниваемых напряжений проводили по схеме, изображенной на рис. 5.

Для определения максимальной амплитуды сравниваемых напряжений с основного выхода (СН0) калибратора Fluke 5520 А было подано напряжение $10\sqrt{2}$ В с частотой 1 кГц, со вспомогательного выхода (СН1) калибратора – напряжение $5\sqrt{2}$ В той же частоты, а коэффициент передачи рабочего эталона ИДН ДИ-3м по выходу 1 был установлен равным 0,999999. Изменяли коэффициент передачи ИДН ДИ-3м по выходу 2 в диапазоне от 0,999998 до 0,999994 и

измеряли значения ΔU при разрешающей способности СУДВ 100 нВ. Относительное отклонение показаний СУДВ рассчитывалось по формуле (2).

Результаты определения максимальной амплитуды сравниваемых напряжений приведены в табл. 6.

Таблица 6. Результаты определения максимальной амплитуды

Напряжение разбаланса $U_{\text{диз}}$, мкВ	Показания СУДВ, ΔU , мкВ	Относительное отклонение показаний γ , %
10	10,2	2,0
20	20,3	1,5
30	30,6	2,0
40	40,7	1,8
50	51,1	2,2

Определение минимальной амплитуды сравниваемых напряжений осуществлялось при аналогичных установках калибратора, коэффициент передачи рабочего эталона ИДН ДИ-3м по выходу 1 был установлен равным 0,000000. Изменяли коэффициент передачи ИДН ДИ-3м по выходу 2 в диапазоне от 0,000001 до 0,000005 и измеряли значения ΔU при разрешающей способности СУДВ 100 нВ. Относительное отклонение показаний СУДВ рассчитывалось по формуле (2).

Результаты определения максимальной амплитуды сравниваемых напряжений приведены в табл. 7.

Таблица 7. Результаты определения минимальной амплитуды

Напряжение разбаланса $U_{\text{диз}}$, мкВ	Показания СУДВ, ΔU , мкВ	Относительное отклонение показаний γ , %
10	10,1	1,0
20	20,2	1,0
30	30,4	1,3
40	40,8	2,0
50	50,9	1,8

Определение диапазона частот сравниваемых напряжений проводили по схеме, изображенной на рис. 6.

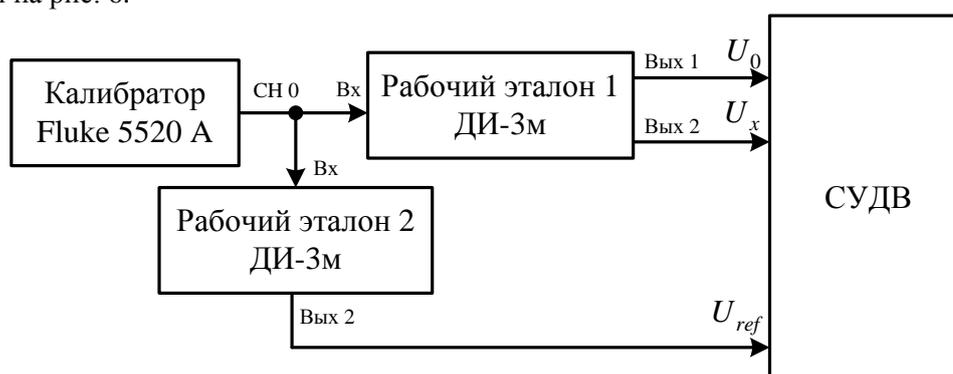


Рис. 6. Схема включения СУДВ для определения диапазона частот сравниваемых напряжений

С основного выхода (СН0) калибратора Fluke 5520 А было подано напряжение $10\sqrt{2}$ В с частотой 1 кГц, а коэффициент передачи первого рабочего эталона ИДН ДИ-3м по выходу 1 был установлен равным 0,100000, по выходу 2 – равным 0,100005. Для формирования опорного сигнала в полосе частот напряжения с основного выхода (СН0) калибратора подавалось через второй ИДН ДИ-3м с коэффициентом передачи по выходу 2, равным 0,500000. Измеряли зна-

чения ΔU при разрешающей способности СУДВ 100 нВ на частотах 20, 40, 80, 200 Гц и 1, 10, 20, 40, 80, 100 кГц.

Относительное отклонение показаний СУДВ от частоты рассчитывалось по формуле

$$\gamma_f = \frac{|\Delta U_{f(1)} - \Delta U_f|}{\Delta U_{f(1)}} \cdot 100\%,$$

где $\Delta U_{f(1)}$ – напряжение разбаланса ИДН на частоте 1 кГц, В; ΔU_f – напряжение разбаланса ИДН на частоте f , В.

Результаты определения диапазона частот сравниваемых напряжений приведены в табл. 8.

Таблица 8. Результаты определения диапазона частот при сравнении напряжений амплитудой $1\sqrt{2}$ В

Частота, кГц	1	0,2	0,08	0,04	0,02	10	20	40	80	100
Напряжение разбаланса ИДН на частоте, мкВ	51,3	50,3	49,9	48,7	48,9	53,0	50,3	50,0	48,9	48,8
Относительное отклонение показаний на частоте γ_f , %	–	1,9	2,7	5,0	4,7	3,3	1,9	2,5	4,7	4,9

В табл. 9 приведены результаты определения диапазона частот сравниваемых напряжений при коэффициенте передачи первого рабочего эталона ИДН ДИ-3м по выходу 1, равном 0,001000, а по выходу 2 – равном 0,001005.

Таблица 9. Результаты определения диапазона частот при сравнении напряжений амплитудой $0,01\sqrt{2}$ В

Частота, кГц	1	0,2	0,08	0,04	0,02	10	20	40	80	100
Напряжение разбаланса ИДН на частоте, мкВ	50,5	50,1	49,7	48,8	48,5	52,7	51,0	51,0	48,0	48,2
Относительное отклонение показаний на частоте γ_f , %	–	0,8	1,6	3,4	4,0	4,3	1,0	1,0	4,9	4,5

Из данных, приведенных в табл. 8 и 9, видно, что на всех частотах относительное отклонение показаний не превышает 5 %.

Таким образом, синхронный усилитель с дифференциальным входом, разработанный на основе предложенной структуры, позволяет обеспечить следующие характеристики:

- диапазон рабочих частот – 0,02... 100 кГц;
- динамический диапазон входных напряжений – $10\sqrt{2}$ мкВ... $10\sqrt{2}$ В;
- разрешающая способность – 10 нВ на частоте 1 кГц;
- разрешающая способность – 100 нВ, 1, 10 мкВ в диапазоне рабочих частот и напряжений.

Выводы

Предложена схема построения входного каскада синхронного усилителя с дифференциальным входом на основе двух инструментальных усилителей и повторителя напряжения, позволяющая увеличить коэффициент ослабления синфазного сигнала и расширить динамический диапазон сравниваемых напряжений.

Для определения погрешности коэффициента передачи измерительных преобразователей методом сравнения с мерой разработан синхронный усилитель с дифференциальным входом, экспериментально проведена процедура оценивания его метрологических характеристик.

Созданный синхронный усилитель с дифференциальным входом по своим метрологическим характеристикам превышает зарубежные аналоги и обеспечивает сравнение двух синусоидальных напряжений амплитудой от $10\sqrt{2}$ мкВ до $10\sqrt{2}$ В с разрешающей способностью до 10 нВ в диапазоне частот от 20 Гц до 100 кГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов П.Ф., Бориков В.Н. Синхронные усилители с дифференцированным входом (состояние и задачи) // Известия ТПУ. – 2013 – Т. 322. – № 4. – С. 155–159.
2. Бориков В.Н., Баранов П.Ф., Цимбалист Э.И., Ким В.Л. Устройство для испытаний и поверки индуктивных делителей напряжения // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 11. – С. 41–45.
3. Баранов П.Ф., Бориков В.Н. Уровень современного технического развития синхронных усилителей с дифференциальным входом // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 1(7). – С. 69–74. – URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/viewPDFInterstitial/608/460>.
4. Model SR830 DSP Lock-In Amplifier. User's Manual. – Stanford Research Systems, 2006. – 178 p.
5. Model 7270 DSP lock-in amplifier. Instruction Manual. – Ametek advanced measurement technology, 2010. – 217 p.
6. PGA207 High-Speed programmable gain instrumentation amplifier. Data Sheet. – Texas Instruments, Inc., 2013. – 15 p.

Поступила 25.06.2013 г.