

УДК 539.1.075, 621.317.745

## ПРОСТОЙ УСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

*Евдокимов С.В., Яценко А.А., Яценко А.В.*

*Таврический Национальный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Украина  
E-mail: [lab2@crimea.edu](mailto:lab2@crimea.edu)*

Описан прецизионный дифференциальный электрометрический усилитель, имеющий существенные преимущества по сравнению со специализированными устройствами промышленного изготовления в случае использования измерительных резисторов с сопротивлением менее 2 ГОм. Чувствительность определяется в основном шумом измерительных резисторов, а само устройство может быть использовано для измерения медленно меняющихся токов с точностью до 1 фА.

**Ключевые слова:** сегнетоэлектрик, электрометрия, термоэлектрический модуль.

Исследование пирозлектрических и фотогальванических свойств сегнетоэлектрических материалов связано с измерением слабых ( $10^{-15} \div 10^{-9}$ )А медленно (и, обычно, непериодически) меняющихся токов, возникающих при изменении температуры или освещении образца. Для проведения таких измерений обычно используются промышленные электрометрические вольтметры, например, типа Keithley 6517 [1], электрометрические усилители У5-11 и т.п. Однако при проведении длительных измерений в широком температурном диапазоне применение подобной аппаратуры сопряжено с определенными экспериментальными трудностями и далеко не всегда оправданно.

Одним из условий корректного выполнения прямых пирозлектрических измерений является необходимость проведения эксперимента при малых скоростях изменения температуры образца (до 0.05 К/мин) в течение длительного времени [2]. Это условие предполагает не только высокую чувствительность измерительного устройства, но и хорошую долговременную стабильность. Более того, наличие собственной электрической проводимости исследуемого объекта в большинстве случаев приводит к необходимости уменьшения входного (измерительного) сопротивления электрометрического усилителя [3] и невозможности реализации предельных параметров промышленных приборов.

Рассматривается дифференциальный электрометрический усилитель, который при использовании измерительных резисторов суммарным сопротивлением менее 2 ГОм имеет ряд преимуществ по сравнению с устройствами, использующими специализированные операционные усилители (ОУ) с фемтоамперными токами смещения  $I_{см}$  (INA116, LMC6001, AD515, OPA129 и др.).

Принципиальная схема измерительной части устройства приведена на рис.1. Основой схемы является классический инструментальный усилитель с применением двоянного ОУ  $M_1$  с малым входным током и прецизионного ОУ  $M_2$ . Такая схема обеспечивает эффективное подавление синфазной помехи [4], поэтому при выполнении

условия  $R_1 \cdot I_{см1} \cong R_2 \cdot I_{см2}$  влияние токов смещения и их температурный дрейф также частично компенсируются. Понижение напряжения питания ОУ существенно уменьшает  $I_{см}$  большинства типов ОУ с полевыми транзисторами (ПТ) на входе [5], поэтому для  $M_1$  было выбрано  $U_{пит} \pm 5.0$  В.

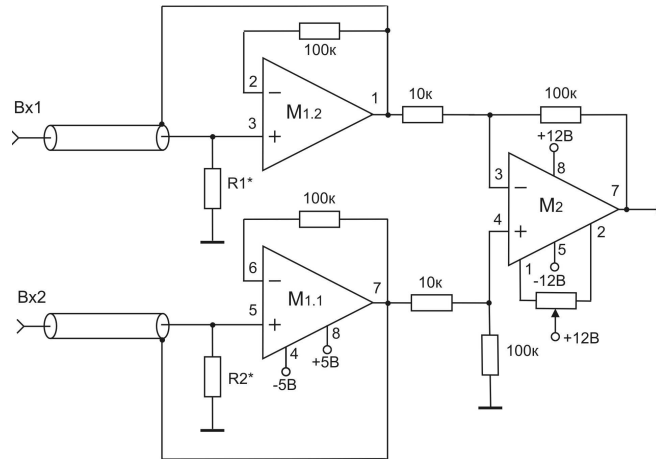


Рис. 1. Принципиальная схема электрометрического усилителя.  $M_1$  - AD648;  $M_2$  - 140УД17А. Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  - типа С3-10А, остальные - типа С2-31.

Нами была проведена экспериментальная проверка параметров двояных ОУ с ПТ на входе типов 574УД2, LF412, TL062 и AD648 (партии от 10 до 20 экземпляров), на основании которой предпочтение было отдано AD648. Оказалось, что у трети микросхем этого типа при температуре окружающей среды  $+22^\circ\text{C}$  и  $U_{пит} = \pm 5.0$  В разность токов смещения  $\Delta I_{см}$  неинверсных входов двух ОУ, входящих в микросхему, не превышает 50 фА. Измерения проводились методом интегрирования входного тока ОУ [4]. Температурный дрейф напряжения смещения  $U_{см}$  ОУ микросхем, попадающих в эту группу, при  $U_{пит} = \pm 5.0$  В отличался не более чем на 1 мкВ/ $^\circ\text{C}$ , а температурные зависимости  $\Delta I_{см}$  трех типичных экземпляров микросхем из выделенной группы приводятся на рис.2.

На рис.3 представлены зависимости приведенного ко входу температурного дрейфа устройства (с учетом температурного дрейфа  $I_{см}$ ), выполненного с использованием этих же экземпляров микросхем AD648 от общего входного сопротивления  $R_{вх} = R_1 + R_2$  при  $T = 23^\circ\text{C}$ . Видно, что при  $R_{вх} \leq 2$  ГОм и  $T = 23^\circ\text{C}$  предложенное устройство имеет существенные преимущества перед специализированным электрометрическим ОУ типа INA116 и электрометрическим вольтметром Keithley 6517A с гарантированным производителем температурным дрейфом напряжения смещения 10 мкВ/ $^\circ\text{C}$ .

Дополнительное улучшение долговременной стабильности данного устройства может быть достигнуто активным термостатированием. Применение простых схем компенсационного типа [5] эффективно только при малых ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) изменениях температуры окружающей среды, т.к. входные токи ОУ с ПТ на входе имеют нелинейную зависимость от температуры (рис.2). В качестве активного

термостатирующего элемента нами был применен термоэлектрический модуль (ТЭМО) типа CP1.0-71-05L фирмы Rubezh Engineering Co. LTD (Россия, С.-Петербург). Плата инструментального усилителя и измерительные резисторы расположены внутри пенопластового термостата с внутренним объемом 15 см<sup>3</sup> и не имеют непосредственного термического контакта с размещенным там же медным радиатором активной поверхности ТЭМО. Для исключения появления на радиаторе активной поверхности ТЭМО водяного конденсата её температура была выбрана равной 16°C.

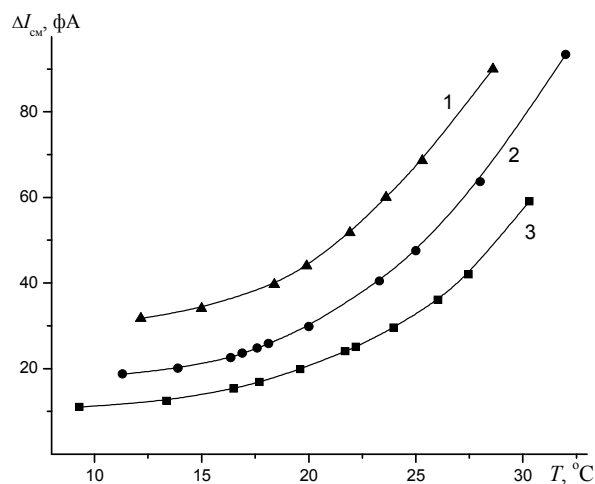


Рис. 2. Зависимость разности токов смещения  $\Delta I_{см}$  неинвертирующих входов ОУ, входящих в состав ИМС AD648 (три экземпляра из отобранной группы) от температуры окружающей среды.

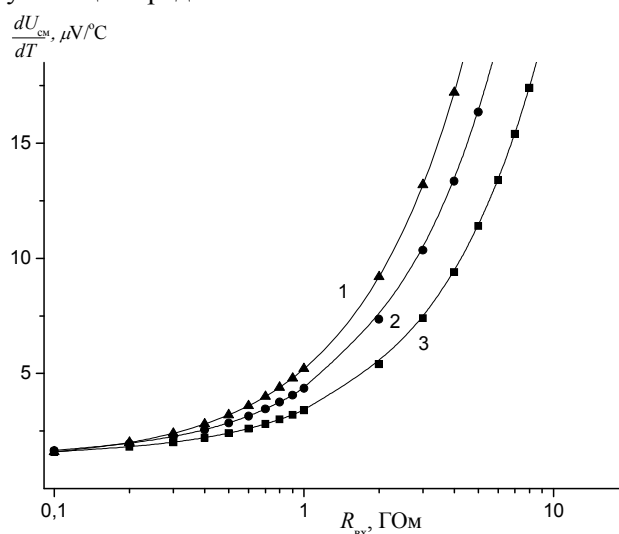


Рис. 3. Зависимости приведенного ко входу температурного дрейфа напряжения смещения от входного сопротивления устройства, выполненного на тех же экземплярах ОУ при  $T=22^{\circ}C$ .

Схема управления ТЭМО (рис.4) включает в себя датчик температуры (последовательно включенные переходы эмиттер-база транзисторов  $T_1 \div T_4$ , закрепленных на радиаторе активной поверхности ТЭМО), регулируемый источник опорного напряжения на ЦАП  $M_1$ , дифференциальный усилитель  $M_2$ , пропорционально-интегральный регулятор на ОУ  $M_3$  и усилитель мощности на ОУ  $M_4$  и транзисторах  $T_7, T_8$ . Температура внутри термостата дискретно задается установкой цифрового кода на входах  $M_1$ , а точная подстройка температуры осуществляется резистором  $R_1$ .

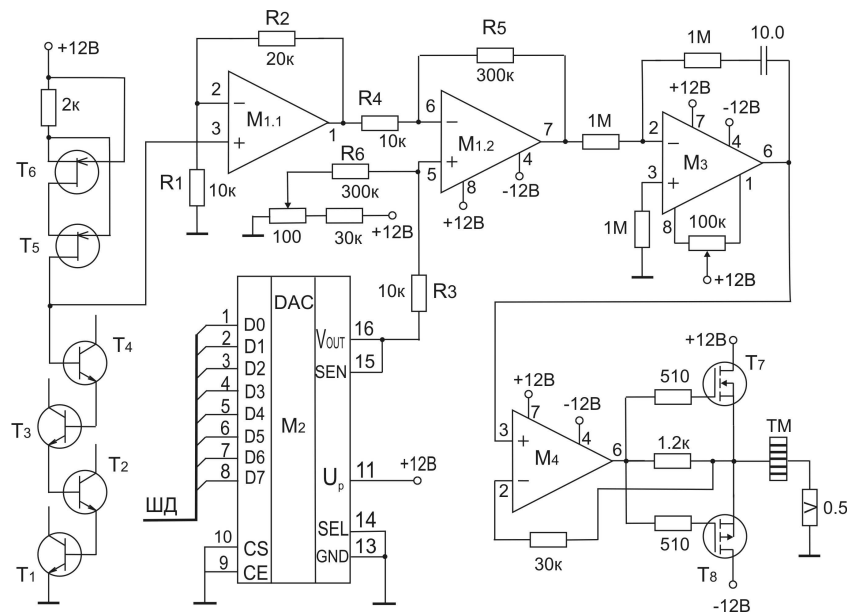


Рис. 4. Схема управления ТЭМО.  $T_1 \div T_4$  – КТ315Б;  $T_5, T_6$  – 504НТ2;  $T_7$  – IRF530;  $T_8$  – IRF9530;  $M_1$  – LM358;  $M_2$  – AD558J;  $M_3$  – 544УД1;  $M_4$  – 140УД6; резисторы  $R_1 \div R_6$  – типа С2-31; ТМ - СР1.0-71-05L.

Время установки температуры внутри термостата с точностью  $0.2^\circ\text{C}$  при температуре окружающей среды  $25^\circ\text{C}$  составляет 11 мин., а долговременная нестабильность при отсутствии резких колебаний температуры помещения не превышает  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . Как видно из рис.2, такая нестабильность соответствует изменению  $\Delta I_{\text{см}}$  менее, чем на  $\pm 0.2$  фА для всех экземпляров ОУ из отобранной группы.

Приведенная ко входу среднеквадратичная спектральная плотность тока шумов в основном определяется шумом измерительных резисторов и её измеренное значение при  $R_{\text{вх}} = 2.0$  ГОм составляет  $3.9$  фА/ $\sqrt{\text{Гц}}$ . Для последующей обработки полезного сигнала используется дополнительный прецизионный усилитель с дискретно регулируемым коэффициентом усиления и напряжением смещения и активный фильтр Баттерворта 3-го порядка (на схеме не показаны) с дискретно

регулируемой в пределах (0.1 ÷ 10) Гц частотой среза.

Все преимущества данного устройства в полной мере реализуются при исследовании пьезоэлектрических или фотогальванических свойств, а также эффекта Холла в диэлектрических материалах, так как электроды, нанесенные на исследуемый кристалл, подключаются к обоим входам электрометрического усилителя. При исследовании вольтамперных характеристик диэлектрических материалов у данного усилителя используется только один из входов, а второй выполняет роль источника компенсирующего сигнала, поэтому при сохранении величины собственного температурного дрейфа для той же ширины полосы пропускания будет наблюдаться некоторое ухудшение ОСШ. Электрометрические усилители, выполненные по данной схеме, успешно эксплуатируются в составе автоматизированной установки для исследования электрических свойств сегнетоэлектрических материалов.

Примененный комплекс схемотехнических решений позволяет при использовании во входном каскаде электрометрического усилителя сдвоенного ОУ типа LMC6042 и увеличении сопротивления измерительных резисторов резко повысить чувствительность устройства (вплоть до  $10^{-16}$  А) при сохранении долговременной стабильности, отвечающей такой точности.

#### Список литературы

1. Costache M. Investigations of pyroelectric properties of pure and alanine doped TGS crystals / M. Costache, I. Matei, L. Pintilie, H.V. Alexandru, C. Berbecaru // J. Optoelectronics and adv. Materials. – 2001. – V. 1. – с. 75-81.
2. Евдокимов С.В. Аномалии пьезоэлектрических свойств кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  конгруэнтного состава / С.В. Евдокимов, Р.И. Шостак, А.В. Яценко // ФТТ. – 2007. – Т. 49, № 10. – с. 1866.
3. Милов Е.В. Пьезоэлектрический эффект и спонтанная поляризация в высокотемпературном сегнетоэлектрике  $\text{LaVGeO}_5$  / Е.В. Милов, Б.А. Струков // ФТТ. – 2001. – Т. 43, № 3. – с. 495-498.
4. Титце У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
5. Курчанинов Л.Л. Электрометрический усилитель / Л.Л. Курчанинов, В.В. Сушков, Р.С. Шувалов // ПТЭ. – 1990. - № 1. – с. 138-139.
6. Антоненко В.И. Термостабильный электрометрический измеритель постоянного тока на операционном усилителе К544УД1А / В.И. Антоненко // ПТЭ. – 1990. - № 6. – с. 115-117.

**Яценко А.В. Простой усилитель для пьезоэлектрических измерений / С.В. Евдокимов, А.А. Яценко, А.В. Яценко // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Фізико-математичні науки. – 2010. – Т. 23(62), № 1. Ч. 1. – С. 125-130.**

Описано прецизійний диференціальний електрометричний підсилювач, який має суттєві переваги у порівнянні з спеціалізованими пристроями промислового вироблення у разі використання вимірювальних резисторів з опором менш ніж 2 ГОм. Чутливість визначається переважно шумом вимірювальних резисторів, а сам пристрій може бути використаний для вимірювань повільно змінюючихся струмів з точністю до 1 фА.

**Ключові слова:** сегнетоелектрик, електрометр, термоелектричний модуль

**Yatsenko A.V. Simple amplifier for pyroelectric measurements / S.V. Yevdokimov, A.A. Yatsenko, A.V. Yatsenko** // Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. – Series: Physics and Mathematics Sciences. – 2010. – Vol. 23(62), No. 1. P. 1. – P. 125-130.

Precision differential electrometric amplifier is described, which have sufficient preferences in comparing to specialized manufactured devices in the case of exploiting of reference resistors with resistance less than 2 GOhm. Sensitivity of this device is limited by the noise of the reference resistors, and the device can be used for the measurements of the slowly changed currents with accuracy up to 1 fA.

**Key words:** ferroelectric, electrometry, thermoelectric module

*Поступила в редакцию 11.12.2009 г.*