Uzbek Journal of Physics
DOI: https//doi.org/10.52304/.v25i4.473

Экспериментальные исследования усиления сигнала в электрической цепи электронного термометра

А.А. Хакимов[*,1], А.З. Рахматов[2], С.Ю. Герасименко[1], Р.Г. Закиров[3], О.А. Абдулхаев[1], Ш.М. Кулиев[1], Д.Б. Истамов[1], А.Р. Абдулхаева[1], Д.М. Ёдгорова[1]

[1]Физико-технический институт АН РУз, ул. Чингиза Айтматова 2Б, 100084, Ташкент, Узбекистан
[2]АО «FOTON», ул. Амира Тимура 13, 100047 Ташкент, Узбекистан
[3]НИИ Физика полупроводников и микроэлектроники при НУУз, ул. Янги Алмазар 20, 100057, Ташкент, Узбекистан

Получена 25.08.2023, revised 29.11.2023

* Corresponding author: e-mail : alimad54@gmail.com, Phone: +998 90 977 90 45

Предложен и экспериментально реализован макет усилителя малых электрических сигналов с возможностью получения устойчивого усиления сигнала для использования его в схеме электронных термометров, который объединяет возможность функционирования в одно- и двухполярном режиме, что обеспечивает удобство и простоту в работе, поскольку удается обойтись без полноценного двухполярного питания. Чувствительность усилителя в пределах величин от 150 до 310 мВ на 1°С, что показывает перспективность использования его в схемах электронных термометров.

Ключевые слова: усилитель, схема, датчик, температура, термостат, двухполярное питание, масштабный усилитель.

A prototype of a low-level signal amplifier with the ability to provide stable signal amplification for use in electronic thermometer circuits has been proposed and experimentally implemented. The amplifier can operate in both unipolar and bipolar modes, which ensures convenience and simplicity in operation, as it eliminates the need for full bipolar power supply. The sensitivity of the amplifier ranges from 150 to 310 mV per 1°C, indicating its potential for use in electronic thermometer circuits.

Keywords: amplifier, circuit, sensor, temperature, thermostat, bipolar power supply, scale amplifier

I. Введение

В настоящее время в системах измерения температуры и термометрах в качестве сенсорных элементов используются термодиоды, термотранзисторы, резисторные и интегральные термодатчики [1, 2]. Общим недостатком большинства термодатчиков и сенсорных элементов является их невысокая точность [3], которая определяется совокупностью факторов, зависящих от технологических и материальных параметров. В работе [4] была предложена в качестве температурного сенсора кремниевая трехэлектродная структура с обедненной базовой областью, чья термочувствительность в широком температурном диапазоне от −180°С до +180°С обладает высокой линейностью и составляет величину 2.1 мВ/°С. В настоящей работе мы в качестве сенсорного температурного элемента использовали указанную 3-электродную структуру, сигнал с которой оказывался мал в силу его малых линейных размеров, чем осложнялось получение сенсорного сигнала достаточной мощности, из-за чего встал вопрос его усиления. При проектировании схемы усилителя сигнала от такого 3-хэлектродного сенсорного элемента необходимо было предусмотреть требования к контурам схемы и к ее элементам с целью устранения возможных помех и искажений сигнала, в том числе путем фильтраций шумов переменного и постоянного токов, сглаживания импульсных помех, влияния разброса номиналов, используемых в схеме элементов, схемотехниче-

ских решений для создания возможности использовать наиболее оптимального решения в части использования одно- и двухполярного питания. при этом учитывалось гашение паразитных эффектов и обеспечение сбалансированности сигнала в общей работе контуров схемы.

II. Схема предлагаемого усилителя для работы электронного термометра

На рис. 1 приведена симуляционная схема усилителя, рассмотренного нами и предназначенного для усиления сигнала от термодатчика. Схема экспериментальной установки представляет собой комплексное устройство с различными компонентами, которые работают совместно. Источник питания V2 (литиевая батарея +5 В) обеспечивает +5 В напряжение для всей схемы. Стабилизатор питания датчика температуры +3 В реализован на базе *n-p-n* транзистора BD135Q1, стабилитрона (диода) D1ABZB784-C3V3, резистора R12 и емкости C4. Стабилизатор преобразует +5 В напряжение от источника питания в стабильное +3 В напряжение, которое требуется для питания датчика температуры (сенсора), который измеряет текущую температуру и передает сигнал дальше по схеме для обработки. Входной пассивный согласованный фильтр служит для подавления электромагнитных помех входного сигнала и защиты от шумов. Его роль выполняет емкость C1. В схеме также указаны некоторые компоненты с определенными значениями, такие как резисторы (R1-R12) и конденсаторы (C2-C4), которые определяют значения сопротивления и емкости в схеме. Емкости C5, C6 являются внешними емкостями, чья энергия на последующих этапах позволяет осуществить преобразование напряжения, которое требуется для питания датчика, резистор R13 корректирует ток на этом участке цепи. Эти значения определены для конкретных требований и могут варьироваться в зависимости от дизайна и конфигурации схемы.

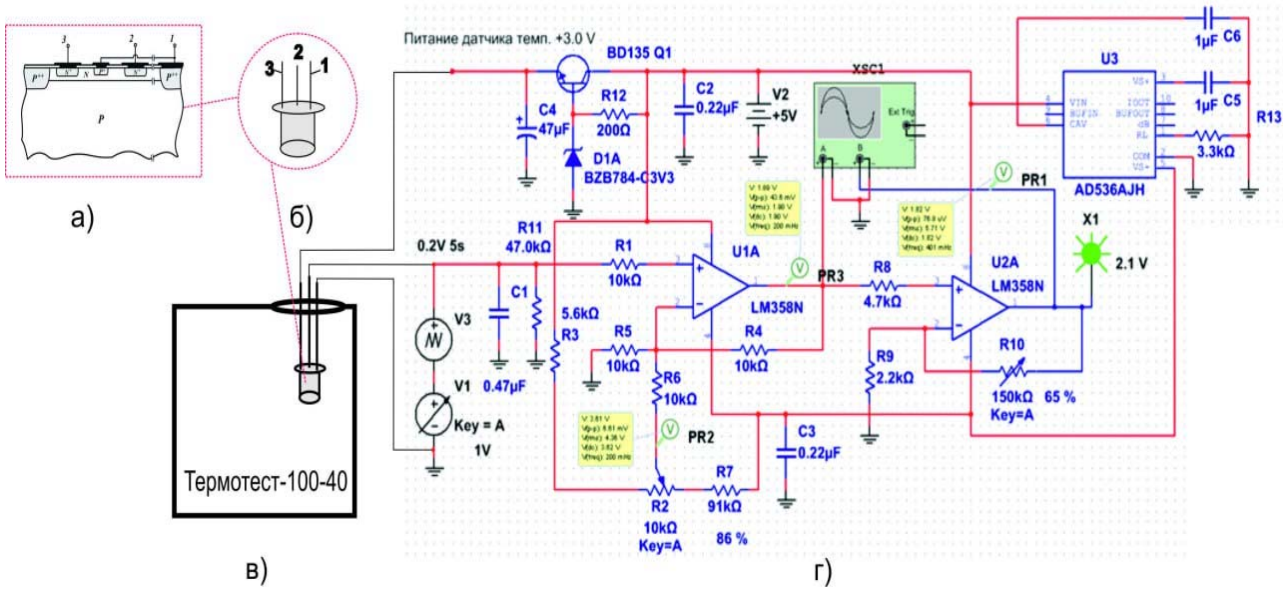


Рисунок 1. Экспериментальная схема измерения параметров усилителя, реализуемая путем размещения измерительного датчика в термостат: а) структура сенсорной (бескорпусной) части полупроводникового 3-х электродного датчика температуры [4], б) 3-х электродный датчик в корпусе, в) переливной жидкостный термостат «ТЕРМОТЕСТ-100-40», г) симуляционная схема предлагаемого усилителя.

Конвертер отрицательного напряжения для питания операционных усилителей DC-DC "-5 В" преобразует +5 В напряжение от источника питания в отрицательное напряжение –5 В, чтобы питать операционные усилители с функцией компенсации входного постоянного напряжения. На симуляционной схеме базовый компонент конвертора представлен как AD536AJH, явля-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

ющийся многофункциональным устройством, практически аналогом микросхемы ICL7660, которая была выбрана для работы экспериментального макета, где микросхема ICL7660 выполняет функцию конвертера напряжения, осуществляя инвертирование напряжения и преобразование постоянного напряжения с одного уровня на другой. Микросхема ICL7660 содержит в себе два коммутационных ключа и дополнительные элементы, такие как конденсаторы и резисторы. При переключении коммутационных ключей напряжение заряжает внешние конденсаторы. Затем используя энергию этих конденсаторов, микросхема производит преобразование напряжения.

Также составными частями инвертирующего преобразователя являются элемент, обеспечивающий односторонний поток тока и защиту от обратной полярности (в нашем случае это диод), и элементы для обеспечения рабочего режима и ограничения тока (в нашем случае это резисторы) [5].

Добавление DC-DC-конвертора отрицательного напряжения позволило нам использовать двухполярное питание в устройстве, при этом сохраняя общее питание устройства однополярным. Нам важно было обеспечить (и не ухудшить) совместимость с другими компонентами, поскольку, как выше отмечалось, в нашем усилителе удобнее и выгоднее было для некоторых компонентов иметь режим двухполярного питания для своей работы. Добавление конвертора отрицательного напряжения позволило использовать такие компоненты без необходимости изменять или адаптировать их питание. Это особенно полезно, если уже имеется и используется однополярное питание в системе, что и было в нашем случае:

Во-первых, привязка к сигналу датчика при производимых расчетах и использование прецизионных значений элементов помогли избежать несколько проблем, в первую очередь, неточности измерений и передачи сигнала по цепи, поскольку, если значения элементов не соответствуют нужным требованиям, то могут возникнуть ошибки и неточности в измерениях. Изменение сопротивления, емкости или других характеристик элементов может привести к искажению сигнала и неправильным результатам измерений.

Во-вторых, улучшилась проблема нестабильности, так как неправильные (с большим разбросом) значения элементов могут вызвать нестабильность в работе схемы. Нестабильность может проявляться в виде осцилляций, нежелательных помех или непредсказуемых изменений в сигнале.

В-третьих, удалось избежать потерь чувствительности, поскольку при не настроенных соответствующим образом элементах схемы система может потерять чувствительность к изменениям сигнала датчика. Это может привести к потере информации о состоянии или параметрах, которые необходимы для работы системы.

Поэтому, в целом, привязка элементов схемы к сигналу датчика позволила обеспечить стабильную и надежную работу системы с точностью и соответствующей чувствительностью к измеряемым параметрам.

Кроме того, как показали расчеты и моделирование [6], некоторые компоненты схемы могли иметь искажения и нежелательные эффекты при использовании двухполярного питания. Путем использования конвертера отрицательного напряжения мы постарались предотвратить такие эффекты и сохранить преимущества или хорошую работу с общим однополярным питанием. Положительными были удобство и простота, поскольку удавалось обойтись без полноценного двухполярного питания путем добавления конвертора отрицательного напряжения, что и явилось эффективным способом достижения нужного функционала.

Входной (первый) операционный усилитель LM358N с функцией компенсации входного постоянного напряжения обрабатывает входной сигнал, поступающий на него с резистора R1 таким образом, чтобы компенсировать его постоянную составляющую, которая вносит смещение в уровень отсчета нуля, то есть, сигнал смещается относительно исходной нулевой точки (нулевого напряжения). Это может быть вызвано различными факторами, такими как несбалансированность или паразитные эффекты в схеме, температурные изменения, возмущения или несовершенства компонентов [7]. Целью такой обработки входного сигнала является сохранение только переменной части сигнала, которая содержит информацию от датчика. Компенсация (или корректировка) постоянного напряжения позволила отцентрировать сигнал относительно нуля и сохранить точную величину переменной составляющей сигнала, сфокусировавшись на ней, поскольку она отражает изменения, данные или

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

информацию, передаваемые посредством входного сигнала.

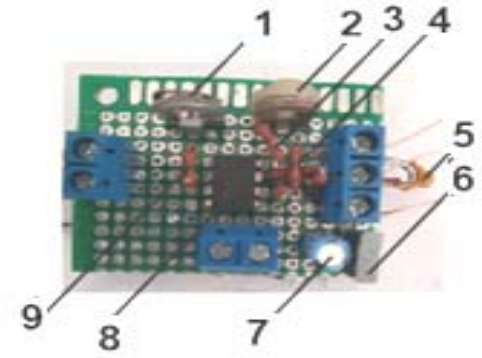
Второй операционный усилитель LM358N с функцией масштабирования коэффициента усиления настраивает и масштабирует коэффициент усиления сигнала, поступающего в него с резистора R8, перед его дальнейшей обработкой, где такое масштабирование означает изменение или настройку уровня усиления сигнала в части увеличения амплитуды сигнала по заданному коэффициенту усиления, в конечном счете, решающее задачу настройки и контроля усиления сигнала перед его дальнейшей обработкой или передачей на другую часть схемы. Для достижения масштабирования коэффициента усиления в часть схемы с операционным усилителем LM358N была добавлена составляющая с резисторной сетью R9, R10, образующая делитель напряжения, который определяет уровень усиления [8]. Здесь использован операционный усилитель в неинвертирующей конфигурации, причем входной сигнал подается на инвертирующий вход усилителя через резистор R9, а некоторая часть выходного сигнала обратно подается на этот же вход через резистор R10. Соотношение этого резистора и входного резистора определяют коэффициент усиления схемы.

Нами в схеме использованы сдвоенные операционные усилители, позволяющие иметь два операционных усилителя в одном корпусе. Это обеспечило удобство монтажа и экономию пространства на электронной печатной плате. Кроме того, оба усилителя однотипны и подобны в своих характеристиках, что облегчило их параллельное использование в различных функциональных блоках схемы [9].

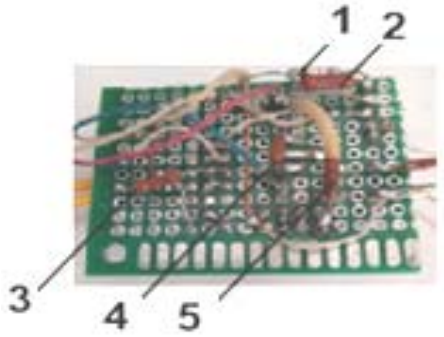
III. Экспериментальные измерения параметров предлагаемого усилителя

Для исследования параметров рассматриваемого усилителя был изготовлен макет симуляционной схемы (рис. 2), на котором проведены экспериментальные измерения по схеме рис. 1 с использованием установки термотест-100-40 с диапазоном регулирования температуры от –40 до +105°C с нестабильностью поддержания установленной температуры ±0.01°C и неоднородностью температурного поля в рабочей зоне ±0.01°C.

На рис. 2 представлено изображение экспериментально изготовленного макета симуляционной схемы.



а) передняя сторона макета



б) обратная сторона макета

Рисунок 2. Экспериментальный макет симуляционной схемы

На рис. 2 показаны передняя и задняя стороны макета симуляционной схемы. Передняя сторона макета состоит из следующих элементов: 1 – подстроечный резистор для регулировки коэффициента усиления 2-го каскада; 2 – подстроечный резистор балансировки «установка выхода 0»; 3 – резистор компенсации сдвига «+»; 4 – выходное сопротивление для регулировки работы 1-го каскада; 5 – входная емкость входного фильтра; 6 – транзистор стабилизатора «+3.0 В»; 7 – конденсатор выходного фильтра «+3.0 В»; 8 – сдвоенный операционный усилитель; 9 – сопротивление узла усиления 2-го каскада для управления коэффициентом усиления каскада. На задней стороны макета: 1 – стабилитрон КС133 для стабилизатора «+3.0 В»; 2 – резистор, задающий режим работы стабилитрона; 3 – резистор, задающий режим работы 2-го каскада; 4 – резистор, задающий режим смещения по знаку «–»; 5 – сопротивление для управления коэффициентом усиления 2-го каскада.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

При исследовании характеристик рабочего макета усилителя измеряли зависимость сигнала датчика температуры от величины температуры, причем измеряемая температура задавалась от термостата. Выставляли температуру на термостате с помощью подстроечного резистора R2, а также балансировку нуля, и проводили измерение. Затем меняли температуру (задается новая температурная точка) и снова снимали значение напряжения сигнала с измерительного вольтметра. Таким способом перекрывалось измерение всего нужного температурного диапазона. С помощью другого подстроечного резистора R10 выставляли новое значение усиления схемы, и весь цикл измерения начинали заново (у нас с температуры 32°C) вплоть до требуемого конца измеряемого диапазона (около 43°C). Во всем цикле измерения контролировали правильный режим работы термостата с контролем исходной (начальной) точки измерения. На графиках, показанных ниже, представлена измеряемая зависимость сигнала от температуры с температурными шагами 1°C (рис. 3) и 5°C (рис. 4а).

Из рис. 3 видно, что предложенный вариант усилителя работает достаточно эффективно и является перспективным для дальнейшего использования. Графические данные такого усилителя показывают получение изменения сигнала на 15 мВ при температурном шаге в 0.1°C. Для подтверждения однотипности работы усилителя в выбранном диапазоне усиления были измерены величины сигнала при разных, но близких значениях коэффициента усиления, что

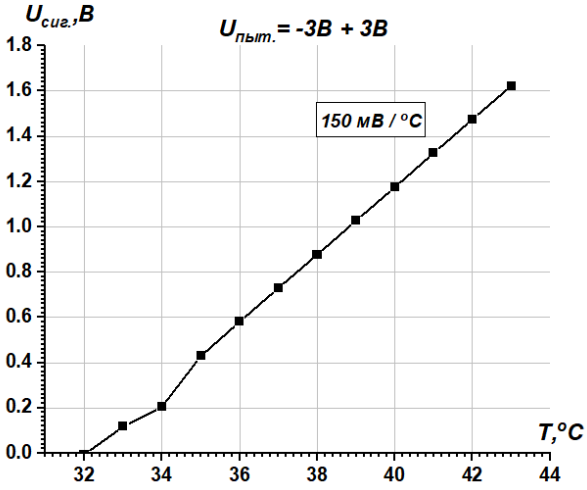
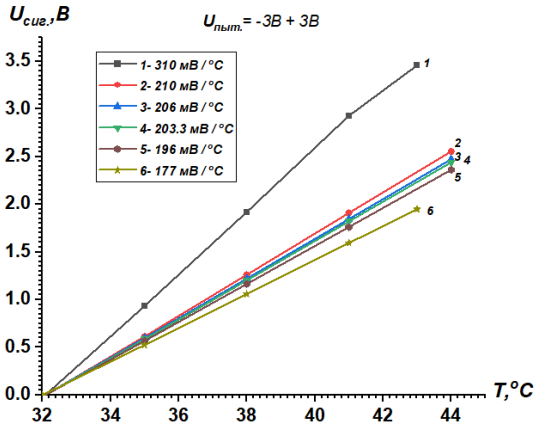
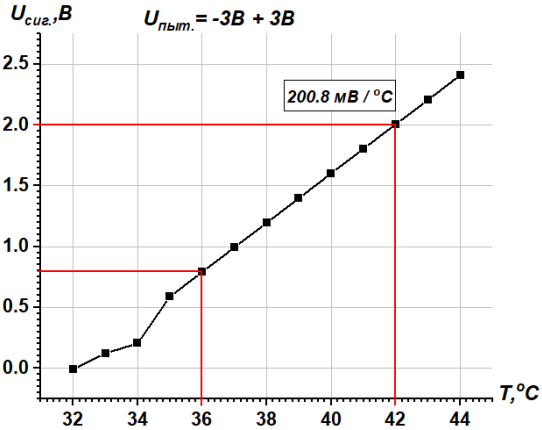


Рисунок 3. График изменения сигнала от температуры при наличии усиления сигнала (K_y=70).



а) изменение сигнала от температуры в динамическом диапазоне



б) усредненные изменения сигнала от температуры

Рисунок 4. Изменения сигнала от температуры в определенно выбранных диапазонах.

показало устойчивую работу усилителя в выбранном динамическом диапазоне (рис. 4а). Величины чувствительности, как показано на графике, имеют разные значения, например, от 196 мВ до 310 мВ в расчете на 1°C. Также на кривой 1 видно, что диапазон достаточно широк, однако, прослеживается тенденция к насыщению сигнала в верхней части графика. Поведение усредненной виртуальной части разных графиков отражается графиком на рис. 4б. Показано, что рост напряжения в расчете на 1°C составляет около 200.8 мВ, что эквивалентно чувствительности 20.08 мВ при шаге 0.1°C.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

IV. Заключение

Таким образом, экспериментальные исследования параметров разработанного и экспериментально изготовленного макета усилителя показали возможность получения устойчивого усиления сигнала в выбранном диапазоне температур и его хорошую линейность. Такой тип усилителя успешно может быть применен для усиления малых сигналов, в частности, для использования в электрической схеме электронного термометра.

Благодарности. Статья подготовлена в рамках выполнения проекта Ф3-201907183 «Разработка технологий изготовления термодатчиков и электронных термометров, совместимых с имеющейся технологической линией в АО «FOTON».

Метаданные

Experimental study of signal amplification in the electrical circuit of an electronic thermometer

A.A. Khakimov[1], A.Z. Rakhmatov[2], S.Yu. Gerasimenko[1], R.G. Zakirov[3], O.A. Abdulkhaev[1], Sh.M. Kuliev[1], D.B. Istamov[1], A.R. Abdulkhaeva[1], D.M. Yodgorova[1].

[1]Physical-Technical Institute of the Academy of Sciences of RUz, Chingiz Aytmatov str., 2B,100084, Tashkent, Uzbekistan
[2]«FOTON» JSC, Amir Temur str., 13, 100047, Tashkent, Uzbekistan
[3]Semiconductor Physics and Microelectronics Scientific Research Institute at the National University of RUz, Yangi Almazar str., 20, 100057, Tashkent, Uzbekistan

A prototype of a low-level signal amplifier with the ability to provide stable signal amplification for use in electronic thermometer circuits has been proposed and experimentally implemented. The amplifier can operate in both unipolar and bipolar modes, which ensures convenience and simplicity in operation, as it eliminates the need for full bipolar power supply. The sensitivity of the amplifier ranges from 150 to 310 mV per 1°C, indicating its potential for use in electronic thermometer circuits.

Keywords: amplifier, circuit, sensor, temperature, thermostat, bipolar power supply, scale amplifier.

Литература (References)

[1] P.R.N. Childs, J.R.Greenwood. Review of Scientific Instruments **71**, 2959-2978 (2000). https://doi.org/10.1063/1.1305516
[2] M. Mansoor, I. Haneef, S. Akhtar, A. De Luca, F. Udrea. Sensors and Actuators A: Physical **232**, 63-74 (2015). https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.04.022.
[3] O.A. Abdulkhaev, R.R. Bebitov, A.R. Abdulkhaeva, D.M. Yodgorova. Uzbek Journal of Physics **20** (5) 300-304 (2018). https://doi.org/10.1063/10.0016843
[4] O.A. Abdulkhaev, R.R. Bebitov, A.Z. Rakhmatov, D.M, Yodgorova, Zh.Kh. Shertoev. Nauchnyy zhurnal Fizika poluprovodnikov i mikroelektronika, Izd. OOO "VNESHINVESNROM", .Tashkent **1**, No.3. S.43-49 (2019)
[5] G.S. Ostapenko. Analogovye poluprovodnikovye integral'nye mikroskhemy (Moscow, Radio I svyaz', 1981)
[6] A.A. Khakimov, A.Z. Rakhmatov, S.Yu. Gerasimenko, R.G. Zakirov, D.M. Yodgorova, D.B. Istamov, O.A. Abdulkhaev, Sh.M. Kuliev. Scientific-Technical Journal (STJ FerPI) **27**, №3, 152-158 (2023).
[7] A.A. Zhigal'skiy. Proektirovanie i konstruirovanie mikroskhem: ucheb. posobie [Design and construction of microcircuits: (Textbook, Tomsk, TUSUR, 2007).
[8] Proektirovanie usilitel'nykh ustroystv. Pod red. N.V. Terpugova (Moskva, Vysshaya shkola, 1999).
[9] V.G. Vajenin, Yu.V. Markov, L.L. Lesnaya. Analogoviye uctroystva na operatsionnikh usilitelyakh: uchebnoye posobiye (Ekaterinburg, Izdatelsnvo Ural universiteta, 32-80, 2014). https://elar.urfu.ru/handle/10995/28632

Электрон термометрнинг электр занжиридаги сигнал кучайтиришининг экспериментал тадқиқи

А.А. Ҳакимов[1], А.З. Рахматов[2], С.Ю. Герасименко[1], Р.Г. Закиров[3], О.А. Абдулхаев[1], Ш.М. Кулиев[1], Д.Б. Истамов[1], А.Р. Абдулхаева[1], Д.М. Ёдгорова[1].

[1]ЎзРФА Физика-техника институти, Чингиз Айтаматов 2Б, 100084, Тошкент, Ўзбекистон
[2]«FOTON» АЖ, Амир Темур кўч., 13, 100047, Тошкент, Ўзбекистон
[3]ЎзМУ қошидаги "Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника" институти, Янги Алмазор кўч., 20, 100057, Тошкент, УЎбекистон

Электрон термометрларнинг электр занжирида қўллаш учун сигнални муқобил кучайтирилишини таъминлаш имкониятига эга бўлган кичик электр сигналлар кучайтиргичи макети таклиф этилди ва тажрибада олинди, ҳамда ушбу кучайтиргич бир ва икки қутбли режимларда ишлаш олиш имкониятига эга бўлиб, бу иш жараёнида қулайлик ва соддаликни таъминлайди, чунки бунда хаққоний икки қутбли манбаларни қўллаш зарур эмас. Кучайтиргичнинг сезгирлиги 1°C га 150 дан 310 мВ гача бўлиб, ушбу кучайтиргичлар электрон термометрларда қўллаш учун катта истиқболга эгадир.

Калит сўзлар: кучайтиргич, схема, датчик, температура, термостат, икки қутбли манба шкалали кучайтиргич.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.