

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВСТРОЕННОЙ СХЕМЫ ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

С. Г. Семенцов¹, А. А. Адамова²

^{1,2} Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия
¹ siemens_off@mail.ru, ² aadamova@bmstu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются интегральные пьезорезистивные преобразователи на базе монокристаллического кремния. Анализируется работа встроенной схемы термокомпенсации с дополнительными терморезисторами и особенности ее работы. *Материалы и методы.* Рассматривается применимость терморезисторов с положительным и отрицательным температурным коэффициентом сопротивления для улучшения параметров схемы термокомпенсации. *Результаты и выводы.* Проведено схемотехническое моделирование усовершенствованной схемы термокомпенсации в широком температурном диапазоне. Показаны преимущества усовершенствованной схемы термокомпенсации.

Ключевые слова: температурная погрешность, измерительный мост, пьезорезистивный преобразователь, монокристаллический кремний, ИПД-интегральный преобразователь давления

Для цитирования: Семенцов С. Г., Адамова А. А. Усовершенствование встроенной схемы термокомпенсации пьезорезистивных датчиков давления // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 52–58. doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-5

IMPROVEMENT OF THERMAL COMPENSATION CIRCUIT FOR PIEZORESISTIVE PRESSURE SENSORS

S.G. Sementsov¹, A.A. Adamova²

^{1,2} Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
¹ siemens_off@mail.ru, ² aadamova@bmstu.ru

Abstract. *Background.* The article discusses integrated piezoresistive converters based on monocrystalline silicon. The operation of the built-in thermal compensation circuit with additional thermistors and the features of its operation are analyzed. *Materials and methods.* The applicability of thermistors with positive and negative temperature coefficients of resistance to improve the parameters of the thermal compensation circuit is considered. *Results and conclusions.* Circuit modeling of an improved thermal compensation circuit was carried out over a wide temperature range. The advantages of an improved thermal compensation circuit are shown.

Keywords: temperature error, measuring bridge, piezoresistive converter, monocrystalline silicon, ICP-integrated pressure converter

For citation: Sementsov S.G., Adamova A.A. Improvement of thermal compensation circuit for piezoresistive pressure sensors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(2):52–58. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-5

Введение

Рассмотренный в предыдущей статье метод термокомпенсации, основанный на пропорциональности амплитуды выходного сигнала тензометрического моста току, протекающему через мост, позволяет частично компенсировать увеличение выходного сигнала при повышении температуры за счет пропорционального уменьшения тока в цепи измерительного моста.

Однако уменьшение тока измерительного моста недостаточно точно компенсирует рост выходного напряжения [1]. Этот результат был получен в процессе моделирования измерительного моста

интегрального преобразователя давления (ИПД) со встроенной схемой термокомпенсации, включающего в себя как реальные значения сопротивлений резисторов моста, так и значения их температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) в температурном диапазоне $-50 +150$ °С (рис. 1).

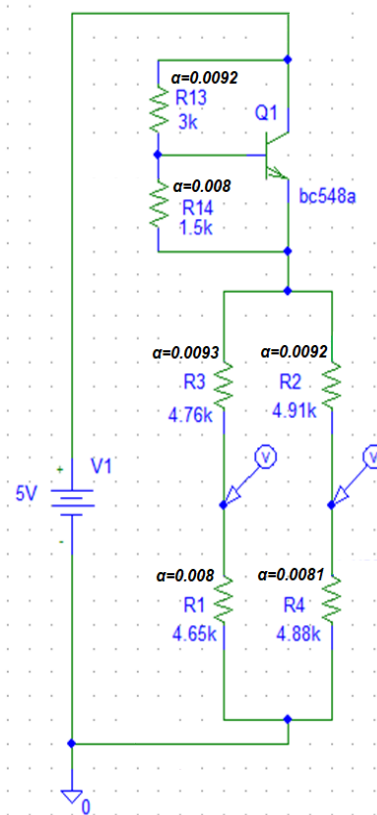


Рис. 1. Модель измерительного моста со встроенной схемой термокомпенсации

Разбаланс измерительного моста со встроенной схемой термокомпенсации составляет ± 25 мВ в исследуемом температурном диапазоне.

Использование резистора с отрицательным ТКС в схеме термокомпенсации

По результатам проведенного в предыдущей статье анализа встроенной схемы термокомпенсации было показано, что ток измерительного моста формируется из двух составляющих: тока делителя $R13$, $R14$ и тока транзистора $Q1$ [1]. Вклад этих токов в общий ток измерительного моста существенно зависит от температуры, причем при низких температурах основной вклад в суммарный ток дает ток делителя, а при высоких – ток транзистора.

Этот фактор теоретически позволяет улучшить работу схемы термокомпенсации за счет применения в цепи делителя вместо $R13$ терморезистора с отрицательным ТКС $\alpha = -0,01$. Результаты моделирования измерительного моста для этого случая показывают, что разбаланс моста во всем температурном диапазоне укладывается в допуск ± 20 мВ [1].

Однако на практике резисторы с отрицательным ТКС из-за особенностей технологии изготовления имеют нелинейную зависимость ТКС от температуры. Рассмотрим в качестве примера семейство терморезисторов с отрицательным ТКС (*NTC*-терморезисторы) B57045K фирмы Epcos. Это семейство предназначено для измерения температуры и включает в себя терморезисторы с номинальным сопротивлением от 1 до 150 кОм (см. электронный каталог терморезисторов Epcos) [2].

Для моделирования в составе измерительного моста вместо резистора $R13$ можно использовать терморезистор с номиналом 2,2 кОм (Epcos B57045K0222K). На рис. 2 представлена зависимость ТКС от температуры для данного терморезистора.

В данном случае очевидно, что зависимость ТКС от температуры носит нелинейный характер, причем соответствующее расчетному значению ТКС $\alpha = -0,01$ наблюдается только при температурах выше 85 °С.

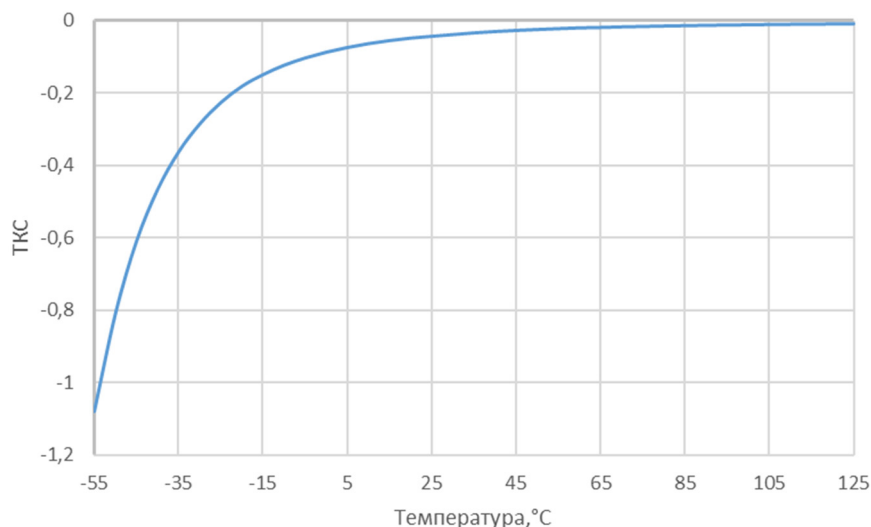


Рис. 2. Зависимость ТКС от температуры для терморезистора Epcos B57045K0222K

При непосредственной замене резистора R_{13} на терморезистор B57045K0222K из-за резкого увеличения сопротивления терморезистора при низких температурах ток делителя падает практически до нуля, ток транзистора также отсутствует (рис. 3).

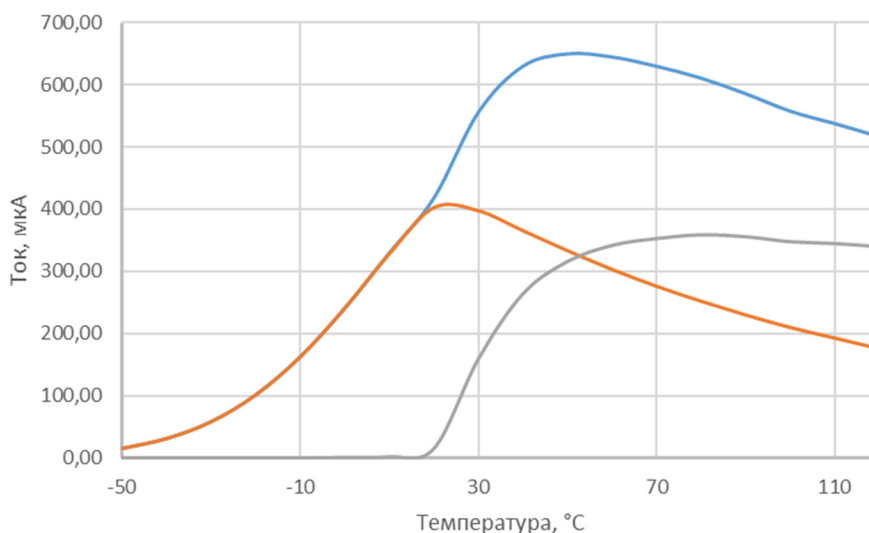


Рис. 3. Распределение токов делителя (оранжевая кривая), транзистора (серая) и общего тока измерительного моста (синяя) в зависимости от температуры

В результате суммарный ток через измерительный мост падает ниже 20 мкА, что приводит к неработоспособности измерительного моста при низких температурах.

Использование резистора с положительным ТКС в схеме термокомпенсации

Альтернативным подходом является применение резисторов с положительным ТКС (РТС-терморезисторов) в схеме термокомпенсации. Как можно заметить из рис. 3, в области низких температур основной вклад в ток измерительного моста дает ток делителя и только при температурах выше 50 °C начинает доминировать ток транзистора. При этом ток транзистора остается практически неизменным при температурах выше 70 °C. В сочетании с уменьшающимся током делителя этот ток формирует ниспадающую кривую суммарного тока, но скорость уменьшения тока недостаточна, чтобы скомпенсировать рост разбаланса измерительного моста с ростом температуры.

Для решения этой задачи можно использовать терморезистор с положительным ТКС в цепи коллектора транзистора, обеспечивающий снижение тока через транзистор при температурах выше 70 °C. Модель схемы термокомпенсации с РТС-терморезистором в цепи коллектора представлена на рис. 4.

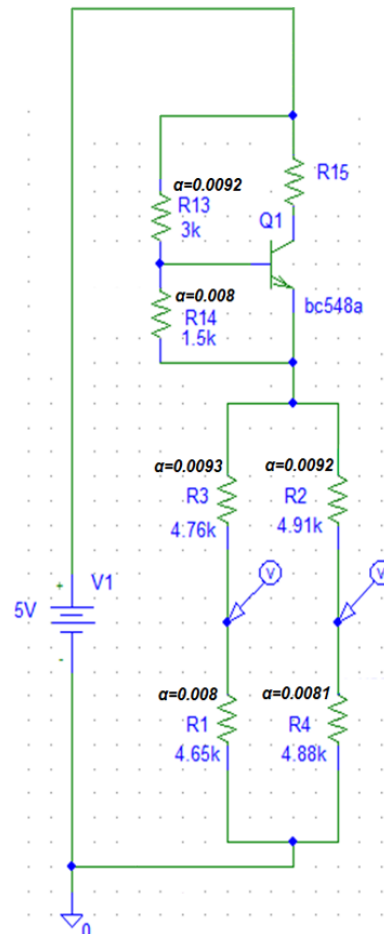


Рис. 4. Модель схемы термокомпенсации с РТС-терморезистором в цепи коллектора

В качестве терморезистора с положительным ТКС может быть использовано семейство РТС-термисторов D901 фирмы Ersos. Это семейство предназначено для использования в качестве датчиков температуры и включает в себя терморезисторы с пороговой температурой в диапазоне от 60 °С до 120 °С [2]. Рассмотрим в качестве примера терморезистор B59052D1060A040 с пороговой температурой 60 °С и сопротивлением 70 Ом при температуре 10 °С.

На рис. 5 представлена зависимость сопротивления от температуры терморезистора B59052D1060A040.

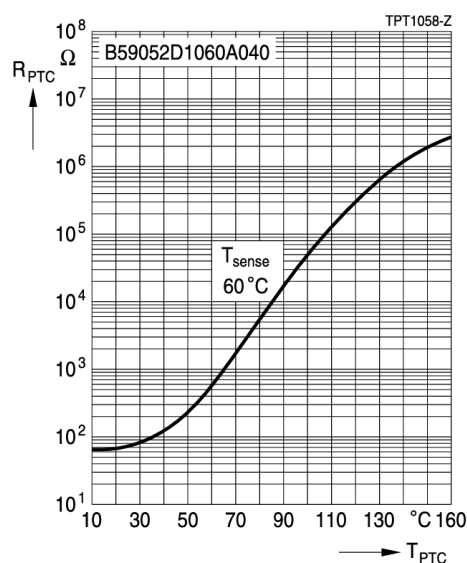


Рис. 5. Зависимость сопротивления от температуры терморезистора B59052D1060A040 [2]

В данном случае сопротивление терморезистора увеличивается от 70 Ом до 3 МОм в температурном диапазоне 10–160 °С. При введении терморезистора R_{15} в схему термокомпенсации в температурном диапазоне –50–70 °С влияние R_{15} не велико, ток моста в основном определяется током делителя. Однако при температуре выше 70 °С за счет резкого увеличения сопротивления R_{15} снижается ток через транзистор, что приводит к дополнительному уменьшению суммарного тока через измерительный мост. В результате формируется следующая зависимость тока измерительного моста (синяя кривая), делителя (оранжевая) и транзистора (серая) от температуры (рис. 6).

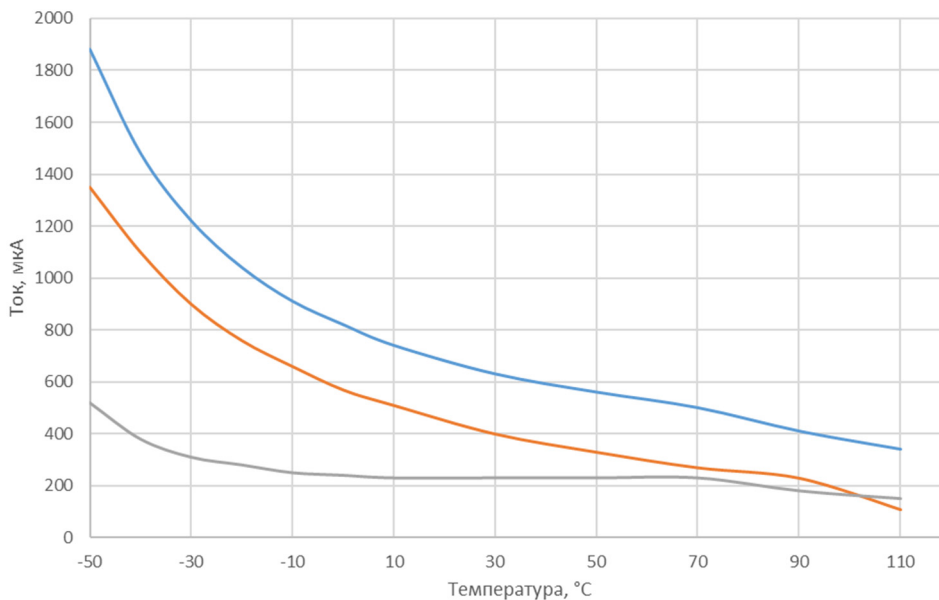


Рис. 6. Зависимость тока через измерительный мост от температуры при введении дополнительного терморезистора R_{15}

В данном случае дополнительное уменьшение тока при высоких температурах позволяет линеаризировать зависимость разбаланса измерительного моста от температуры. Полученная зависимость показана на рис. 7.

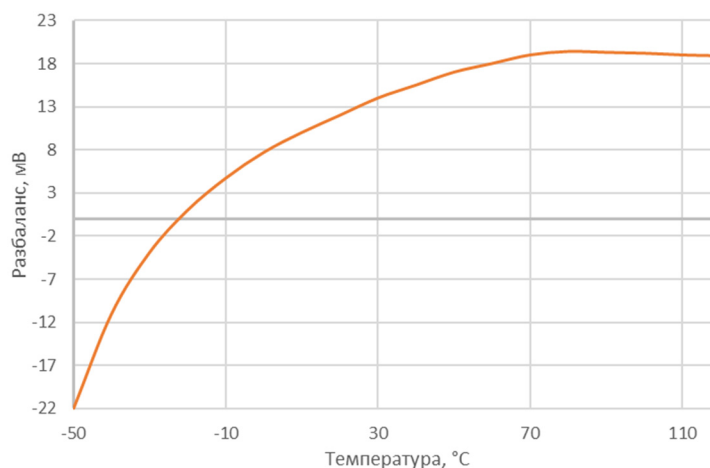


Рис. 7. Зависимость разбаланса измерительного моста от температуры при введении резистора R_{15}

Если в области низких температур работа схемы термокомпенсации практически не изменилась по сравнению с исходным вариантом, то в области температур выше 70 °С разбаланс моста уменьшился с 28 до 20 мВ.

Заключение

Усовершенствованная за счет введения в нее дополнительных элементов, формирующих ток цепи делителя и ток транзистора, схема термокомпенсации на базе биполярного транзистора

позволяет значительно улучшить температурную стабильность ИПД. Формирование этих двух составляющих тока измерительного моста с использованием дополнительных терморезисторов с положительным и отрицательным ТКС дает дополнительные возможности по дальнейшему улучшению температурных параметров ИПД [3–6].

1. Проведенное моделирование показало, что введение дополнительного терморезистора с отрицательным ТКС в цепь делителя из-за нелинейной зависимости ТКС от температуры нарушает работу моста в области низких температур.

2. В то же время введение терморезистора с положительным ТКС в цепь транзистора обеспечивает дополнительное уменьшение тока измерительного моста, что позволяет линеаризовать работу ИПД в области высоких температур.

3. Введение дополнительных элементов в схему термокомпенсации позволяет сформировать необходимую зависимость тока измерительного моста от температуры, что открывает дополнительные возможности по более эффективной компенсации температурной погрешности ИПД.

Список литературы

1. Адамова А. А., Семенцов С. Г., Багдасаров Д. А. Моделирование температурной погрешности пьезорезистивных датчиков давления // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2023. Т. 2. С. 20–24.
2. Электронный каталог терморезисторов Epcos URL: <https://static.chipdip.ru/lib/056/DOC000056454.pdf>
3. Андреев К. А., Тиняков Ю. Н., Шахнов В. А. Математические модели гибридных чувствительных элементов датчиков давления // Датчики и системы. 2013. № 9. С. 2–10.
4. Аваева Л. Г., Сергеева Н. А., Милешин С. А., Цивинская Т.А. Анализ проблем производства кристаллов чувствительных элементов из монокристаллического кремния для сенсорных систем // Датчики и системы. 2017. № 5. С. 25.
5. Адамов А. П., Адамова А. А., Семенцов С. Г. Современные материалы в конструкции датчиков для аэрокосмических аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 1. С. 84–90.
6. Адамов А. П., Адамова А. А., Семенцов С. Г., Темиров А. Т. Замеры давления в условиях агрессивных сред // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 1. С. 67–75.

References

1. Adamova A.A., Sementsov S.G., Bagdasarov D.A. Modeling of the temperature error of piezoresistive pressure sensors. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2023;2:20–24. (In Russ.)
2. *Elektronnyy katalog termorezistorov Epcos = Electronic catalog of thermistors Epcos*. (In Russ.). Available at: <https://static.chipdip.ru/lib/056/DOC000056454.pdf>
3. Andreev K.A., Tinyakov Yu.N., Shakhnov V.A. Mathematical models of hybrid sensing elements of pressure sensors. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2013;(9):2–10. (In Russ.)
4. Avaeva L.G., Sergeeva N.A., Mileshin S.A., Tsivinskaya T.A. Analysis of problems of production of crystals of sensitive elements from monocrystalline silicon for sensor systems. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2017;(5):25. (In Russ.)
5. Adamov A.P., Adamova A.A., Sementsov S.G. Modern materials in the design of sensors for aerospace vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(1):84–90. (In Russ.)
6. Adamov A.P., Adamova A.A., Sementsov S.G., Temirov A.T. Pressure measurements in aggressive media. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(1):67–75. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Станислав Григорьевич Семенцов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5)
E-mail: siemens_off@mail.ru

Stanislav G. Sementsov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of design
and production technology of the electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Арина Александровна Адамова

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5)
E-mail: aadamova@bmstu.ru

Arina A. Adamova

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department of design
and production technology of the electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 05.02.2024

Поступила после рецензирования/Revised 15.02.2024

Принята к публикации/Accepted 20.03.2024