

ИССЛЕДОВАНИЕ ВСТРОЕННОЙ СХЕМЫ ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

А. А. Адамова¹, С. Г. Семенцов², А. В. Бецков³

^{1,2} Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

³ Академия управления МВД России, Москва, Россия

¹ aadamova@bmsu.ru, ² siemens_off@mail.ru, ³ aumvd10@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются интегральные пьезорезистивные преобразователи на базе монокристаллического кремния. Одной из основных причин, приводящих к погрешностям пьезорезистивных преобразователей, является их чувствительность к изменению температуры. Поиск решений для снижения температурных погрешностей измерений является актуальной задачей. *Материалы и методы.* Рассмотрены преобразователи без встроенной в измерительный мост схемы термокомпенсации и с такой схемой. Проводится схмотехнический анализ работы схемы термокомпенсации и особенности ее поведения в широком диапазоне температур. Указаны причины возникновения температурных эффектов, определяющих точность преобразователей. *Результаты.* Показаны пути совершенствования встроенной схемы термокомпенсации за счет формирования необходимой температурной зависимости токов элементов измерительного моста. *Выводы.* Встроенная схема термокомпенсации обеспечивает значительное улучшение температурной стабильности во всем температурном диапазоне, причем введение в нее дополнительных элементов позволяет сформировать необходимую зависимость тока измерительного моста от температуры.

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

Для цитирования: Адамова А. А., Семенцов С. Г., Бецков А. В. Исследование встроенной схемы термокомпенсации пьезорезистивных датчиков давления // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 80–87. doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-9

INTERNAL TERMOCOMPENSATION SCHEME ANALYSIS FOR PIEZORESISTIVE PRESSURE SENSORS

A.A. Adamova¹, S.G. Sementsov², A.V. Betskov³

^{1,2} Bauman Moscow State Technical University, Moscow Russia

³ Management Academy of the Ministry of the Interior of the Russian Federation, Moscow Russia

¹ aadamova@bmsu.ru, ² siemens_off@mail.ru, ³ aumvd10@mail.ru

Abstract. *Background.* The article discusses integrated piezoresistive converters based on monocrystalline silicon. One of the main reasons leading to errors in piezoresistive transducers is their sensitivity to temperature changes. Finding solutions to reduce temperature measurement errors is an urgent task. *Materials and methods.* Converters without a thermal compensation circuit built into the measuring bridge and with such a circuit are considered. A circuit analysis of the operation of the thermal compensation circuit and the features of its behavior in a wide temperature range is carried out. The reasons for the occurrence of temperature effects that determine the accuracy of the converters are indicated. *Results.* Ways to improve the built-in thermal compensation circuit are shown by forming the necessary temperature dependence of the currents of the measuring bridge elements. *Conclusions.* The built-in thermal compensation circuit provides a significant improvement in temperature stability over the entire temperature range, and the introduction of additional elements into it makes it possible to form the necessary dependence of the measuring bridge current on temperature.

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

For citation: Adamova A.A., Sementsov S.G., Betskov A.V. Internal termocompensation scheme analysis for piezoresistive pressure sensors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(2):80–87. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-9

Введение

Помимо рассмотренных в предыдущей статье цикла преимуществ монокристаллический кремний имеет один существенный недостаток – повышенный температурный коэффициент сопротивления [1, 2]. Поскольку тензорезисторы измерительного моста структурно связаны с основным материалом подложки, то и они обладают высокой чувствительностью к изменению температуры, что способствует увеличению погрешности измерения датчика и выражается в температурном дрейфе нуля и температурном дрейфе чувствительности датчика.

Температурный дрейф нуля на выходе измерительного моста обусловлен разностью температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) резисторов, формирующих мост. В результате делители напряжения в составе моста имеют разные значения температурных коэффициентов отношения (ТКО).

Относительное изменение тензочувствительности при изменении температуры на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ определяется вторым важнейшим параметром интегрального преобразователя давления (ИПД) – температурным коэффициентом чувствительности (ТКЧ).

В отечественной литературе был предложен целый ряд методов термокомпенсации ИПД, основанных как на изменении параметров элементов измерительного моста (пассивные методы), так и на применении дополнительной внешней схемы термокомпенсации на активных элементах (активные методы) [2–4].

Один из методов основан на пропорциональности амплитуды выходного сигнала тензометрического моста току, протекающему через мост. Это позволяет частично компенсировать увеличение выходного сигнала при повышении температуры за счет пропорционального уменьшения тока в цепи измерительного моста.

Однако уменьшение тока недостаточно точно компенсирует рост выходного напряжения, что существенно снижает точность ИПД в широком температурном диапазоне [2–8]. Этот фактор заставляет искать пути совершенствования встроенной схемы термокомпенсации.

Моделирование встроенной схемы термокомпенсации

Для проведения моделирования в среде PSpice была создана модель измерительного моста ИПД, включающая в себя как реальные значения сопротивлений резисторов моста, так и значения их температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) в температурном диапазоне $-50\dots+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эти значения были получены путем усреднения по выборке из 10 ИПД разработки МИЭТ (г. Зеленоград) [2]. Полученная таким образом модель представлена на рис. 1.

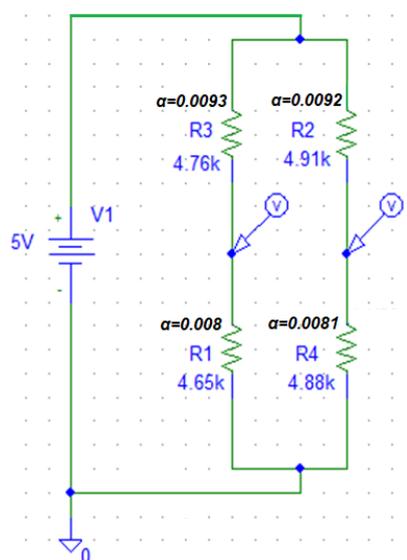


Рис. 1. Модель измерительного моста с реальными значениями сопротивления и ТКС

Было проведено моделирование измерительного моста без встроенной схемы термокомпенсации в температурном диапазоне $-50\dots+120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

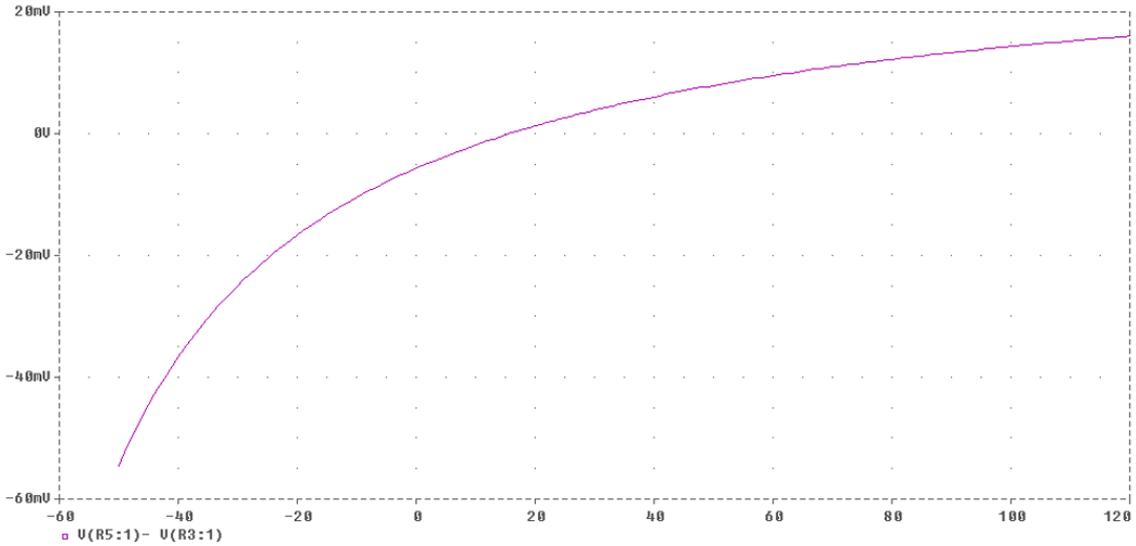


Рис. 2. Разбаланс моста в температурном диапазоне $-50\dots+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ без встроенной схемы термокомпенсации

В данном случае разбаланс моста во всем температурном диапазоне превышает 70 мВ ($-55\text{ мВ} - +15\text{ мВ}$).

Далее проводилось моделирование измерительного моста со встроенной схемой термокомпенсации (рис. 3). В модели также учитывались ТКС резисторов, формирующих цепь смещения биполярного транзистора.

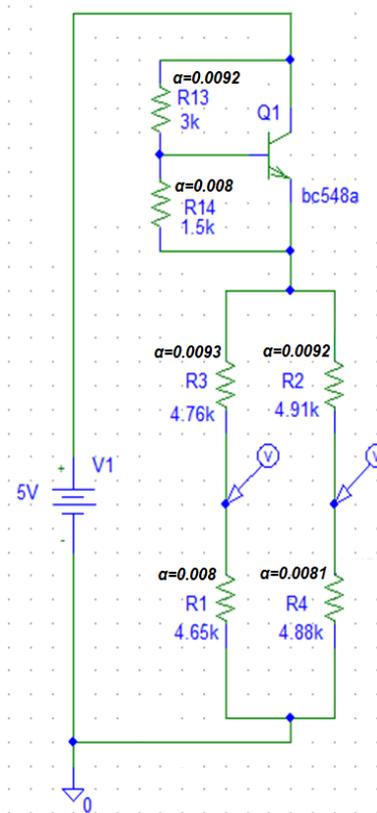


Рис. 3. Модель измерительного моста со встроенной схемой термокомпенсации

Результаты моделирования такого варианта в температурном диапазоне $-50\dots+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлены на рис. 4.

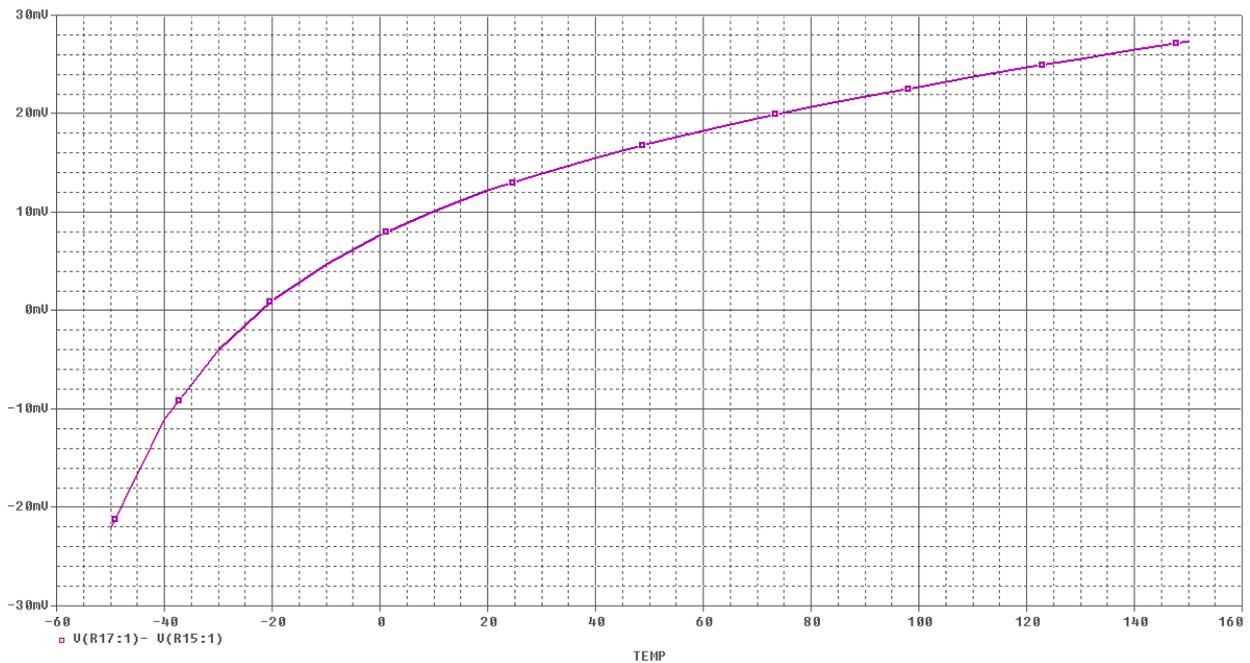


Рис. 4. Разбаланс моста в температурном диапазоне $-50\dots+150$ °C со встроенной схемой термокомпенсации

Со встроенной схемой термокомпенсации в полном температурном диапазоне разбаланс моста не превышает 40 мВ, уход нуля при температуре $+20$ °C не превышает 2 мВ. Улучшение температурной стабильности в данном случае достигается за счет нелинейного уменьшения тока через измерительный мост с ростом температуры (рис. 5).

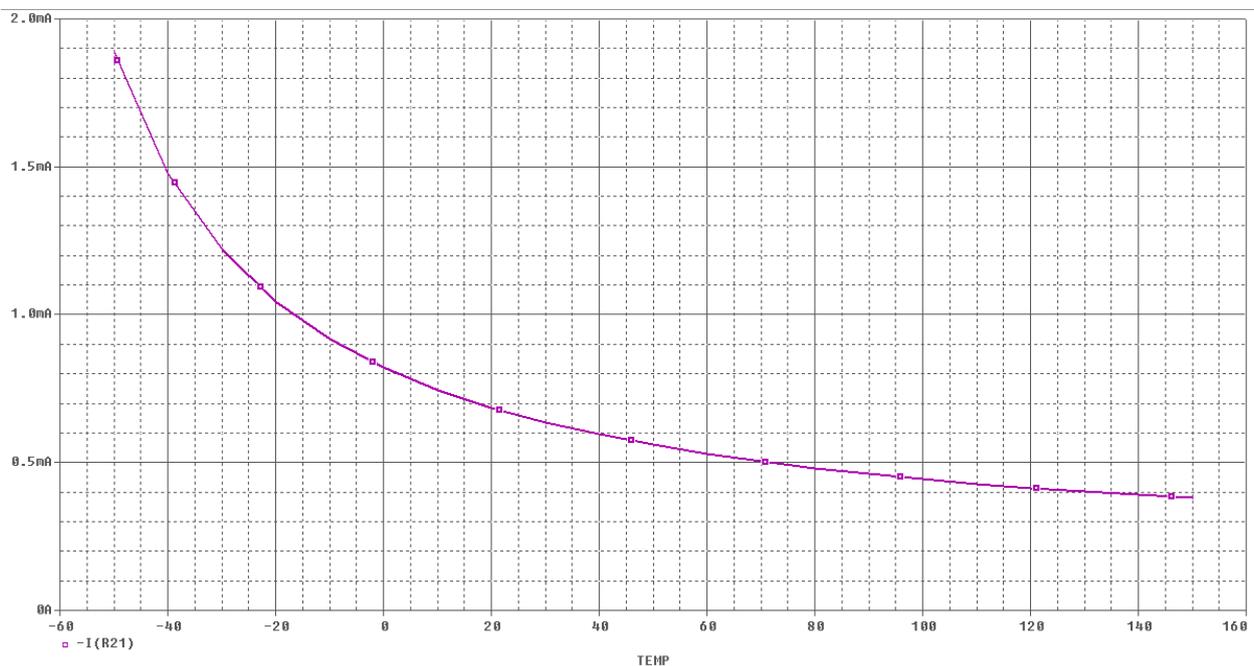


Рис. 5. Изменение тока через измерительный мост в температурном диапазоне $-50\dots+150$ °C

Изменение ТКС резисторов, формирующих цепь смещения транзистора (R13, R14 на рис. 3) не дают существенного изменения характера кривой и улучшения температурной стабильности.

Рассмотрим работу схемы термокомпенсации более подробно. Ток измерительного моста формируется из двух составляющих. Первая составляющая тока протекает через делитель R13, R14 с ТКС $\alpha = 0,008$ и $\alpha = 0,0092$ соответственно, а вторая – через эмиттер транзистора. На рис. 6 приведен график зависимости тока через делитель (зеленая кривая), через эмиттер транзистора (синяя кривая) и их суммы (через измерительный мост) (фиолетовая кривая) от температуры в диапазоне $-50\dots+150$ °C.

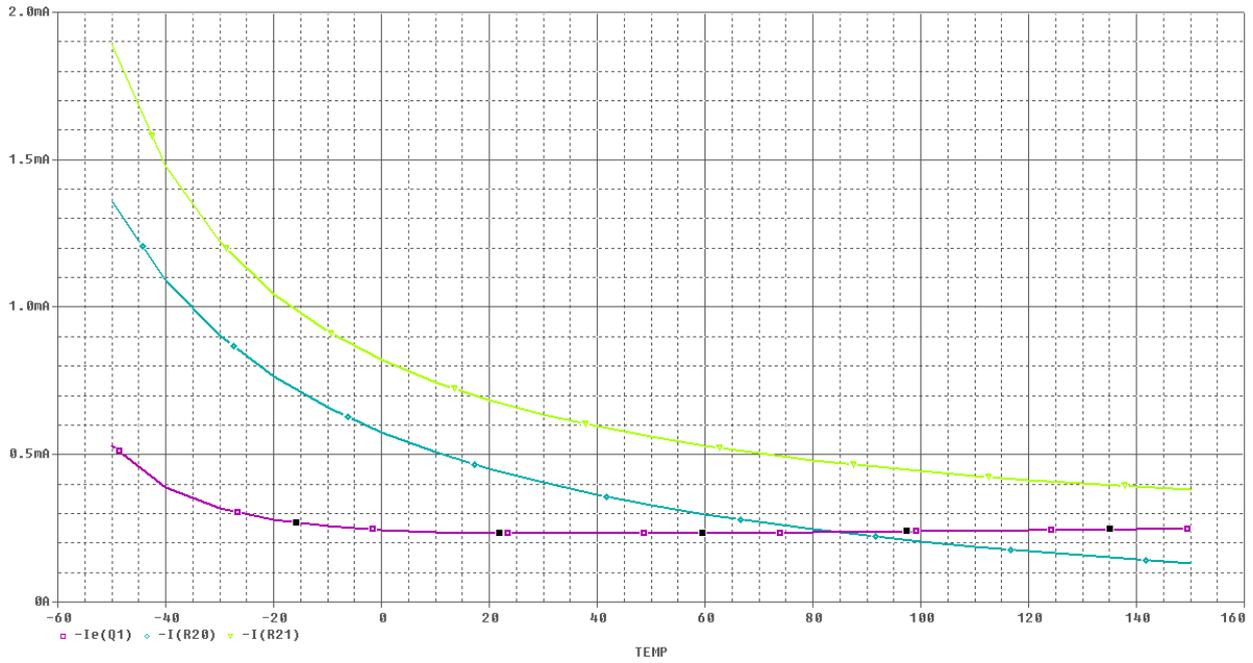


Рис. 6. График зависимости токов от температуры в диапазоне $-50\dots+150\text{ }^{\circ}\text{C}$

В данном случае при почти одинаковом вкладе в суммарный ток зависимости токов от температуры носят разный характер. Если зависимость тока делителя от температуры нелинейна, то ток эмиттера транзистора остается практически неизменным во всем температурном диапазоне.

Стабильность тока эмиттера транзистора обусловлена уменьшением тока базы при нагреве, что почти полностью компенсирует эффект увеличения тока коллектора биполярного транзистора при нагреве. На рис. 7 показана зависимость тока базы и тока коллектора транзистора в температурном диапазоне $-50\dots+150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Такое распределение токов делителя и транзистора позволяет сформировать практически любую суммарную зависимость тока от температуры за счет изменения параметров схемы термокомпенсации или введения в нее дополнительных элементов.

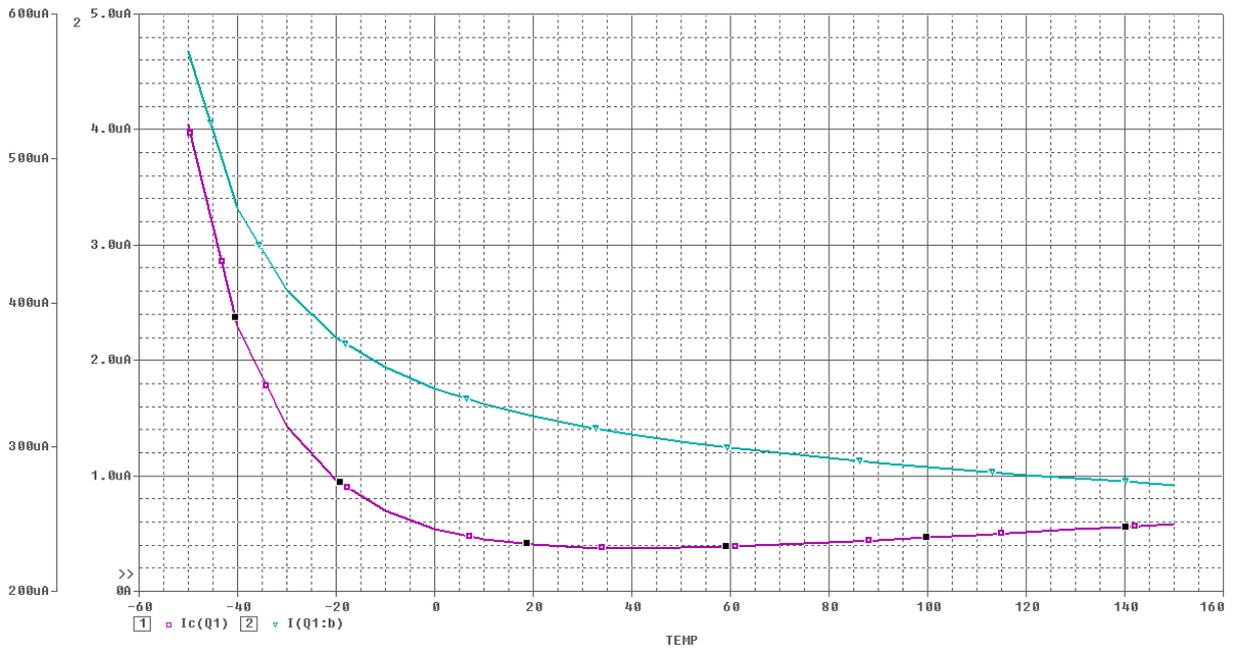


Рис. 7. Зависимость тока базы (синяя кривая) и тока коллектора (фиолетовая кривая) от температуры

Например, на рис. 8 представлены результаты моделирования измерительного моста при изменении ТКС верхнего резистора в цепи смещения транзистора (R13) до $\alpha = -0,01$.

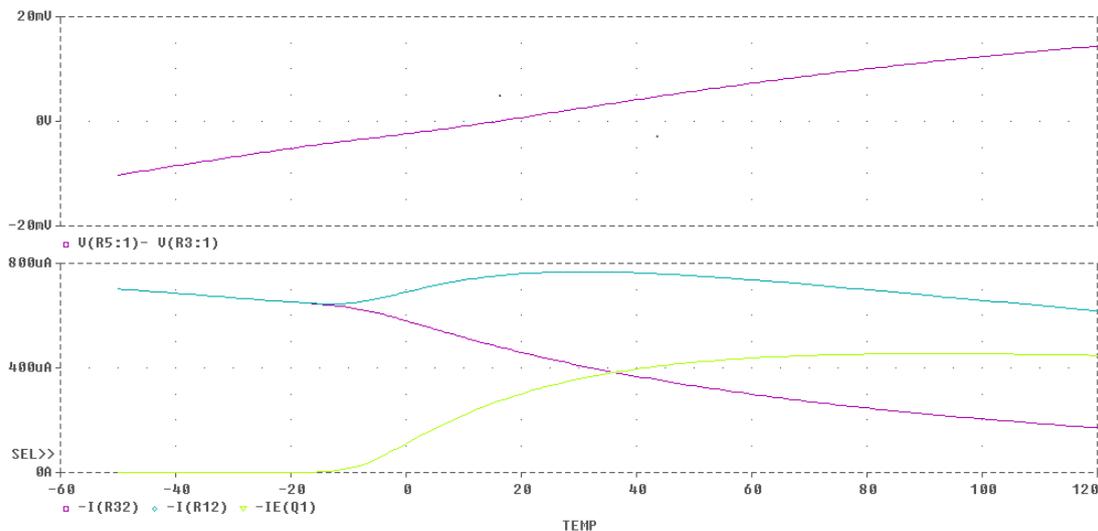


Рис. 8. Разбаланс измерительного моста (вверху) и распределение токов (внизу) при изменении ТКС R13 до $\alpha = -0,01$

Как видно на рис. 8, в данном случае разбаланс моста во всем температурном диапазоне носит линейный характер и уменьшился до 20 мВ, что в два раза меньше по сравнению с исходным вариантом схемы термокомпенсации. Распределение токов носит сложный характер. При отрицательных температурах основной вклад в ток измерительного моста вносит ток делителя. При положительных – ток транзистора.

Заключение

Встроенная схема термокомпенсации на базе биполярного транзистора позволяет значительно улучшить температурную стабильность ИПД. Однако возможности такой схемы могут быть значительно расширены за счет введения в нее дополнительных элементов, формирующих ток цепи делителя и ток транзистора. Формирование этих двух составляющих тока измерительного моста может быть выполнено с различными температурными зависимостями, что дает дополнительные возможности по дальнейшему улучшению температурных параметров ИПД.

1. Проведенное моделирование показало, что встроенная схема термокомпенсации обеспечивает значительное улучшение температурной стабильности ИПД во всем температурном диапазоне по сравнению с простым измерительным мостом.

2. Полученные графики демонстрируют различный характер зависимости токов делителя и транзистора схемы измерительного моста от температуры.

3. Введение дополнительных элементов в схему термокомпенсации позволяет сформировать необходимую зависимость тока измерительного моста от температуры, что дает возможность более эффективно скомпенсировать температурную погрешность ИПД.

Эти выводы обуславливают необходимость проведения более подробного анализа влияния дополнительных элементов с заданным ТКС на работу встроенной схемы термокомпенсации. Анализ подобной схемотехнических решений будет посвящена следующая статья цикла.

Список литературы

1. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. М. : Энергоатомиздат, 1983. 132 с.
2. 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.
3. Пилюгина Ю. А., Скворцов А. М., Толмачев В. А. Химическое микроstructuring поверхности монокристаллического кремния // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2004. № 14. С. 256–261.

4. Андреев К. А., Тиняков Ю. Н., Шахнов В. А. Математические модели гибридных чувствительных элементов датчиков давления // Датчики и системы. 2013. № 9. С. 2–10.
5. Логинов Ю. Ю., Мозжерин А. В., Брильков А. В. Влияние упругих напряжений на формирование структурных дефектов в полупроводниках // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2013. № 2. С. 198–200.
6. 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.
7. 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.
8. 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. Vaganov V.I. *Integral'nye tenzopreobrazovateli = Integral strain converters*. Moscow: Energoatomizdat, 1983:132. (In Russ.)
2. Adamova A.A., Sementsov S.G., Bagdasarov D.A. Modeling of 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.)
3. Pilyugina Yu.A., Skvortsov A.M., Tolmachev V.A. Chemical microstructuring of the surface of monocrystalline silicon. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Bulletin of the St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2004;(14):256–261. (In Russ.)
4. Andreev K.A., Tynyakov 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.)
5. Loginov Yu.Yu., Mozzherin A.V., Bril'kov A.V. The influence of elastic stresses on the formation of structural defects in semiconductors. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetnev*. 2013;(2):198–200. (In Russ.)
6. Avaeva L.G., Sergeeva N.A., Mileschin 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.)
7. 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.)
8. 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

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)

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)

Александр Викторович Бецов

доктор технических наук, доцент,
начальник кафедры информационных технологий,
Академия управления МВД России
(Россия, г. Москва, ул. Зои и Александра
Космодемьянских, 8)
E-mail: aumvd10@mail.ru

Aleksandr V. Betskov

Doctor of technical sciences, associate professor,
head of the sub- department of information technology,
Management Academy of the Ministry
of the Interior of the Russian Federation
(8 Zoi i Aleksandra Kosmodemyanskikh street,
Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 15.12.2023

Поступила после рецензирования/Revised 25.12.2023

Принята к публикации/Accepted 10.02.2024