

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 62–555.621.7

**МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННЫЙ
ИСТОЧНИК НАПРЯЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ КРЕМНИЕВОГО
ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ**

©2026 г. В. В. Рахманов^{a,*}, С. В. Двойнишников^{a,b,**}, В. Г. Меледин^{a,b},
Г. В. Бакакин^a, К. С. Зубанов^b

^a *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе*

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

^b *Новосибирский национальный исследовательский государственный университет*

Россия 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

**e-mail: rahmanov@inbox.ru*

***e-mail: dv.s@mail.ru*

Поступила в редакцию 09.12.2025 г.

После доработки 20.01.2026 г.

Принята к публикации 30.01.2026 г.

Представлен микропроцессорный термокомпенсированный источник напряжения смещения, обеспечивающий стабилизацию коэффициента усиления кремниевого фотоумножителя (Si-ФЭУ) в диапазоне температур 10–60 °С. Компенсация температурной зависимости осуществляется путем динамической коррекции напряжения смещения в соответствии с измеренной температурой и индивидуальными параметрами конкретного фотоумножителя. Экспериментальные исследования, проведенные на двух образцах Si-ФЭУ PM3325-WB-D0, подтвердили эффективность предложенного подхода: разброс коэффициента усиления не превышает $\pm 1.5\%$ для избыточного напряжения, большего или равного 1 В, и $\pm 2.5\%$ для более низких значений избыточного напряжения. Представленный микропроцессорный термокомпенсированный источник напряжения смещения может быть масштабирован для многоканальных систем и адаптирован под различные типы микропиксельных кремниевых фотоумножителей.

1. ВВЕДЕНИЕ

Кремниевые микропиксельные лавинные фотоумножители (Si-ФЭУ) находят широкое применение в медицине, физике высоких энергий и ядерной физике, астрофизике и научно-

измерительном оборудовании [1–4]. Особенностью микропиксельных лавинных фотоприемников является сильная зависимость коэффициента преобразования фототока от температуры кристалла [5]. В спектрометрии, при измерениях энергии частиц, в лидарных системах и других случаях необходимо стабильное усиление фотоприемника. При неконтролируемом изменении сигнала амплитудные или пороговые методы оценки уровня мощности, времени пролета либо энергии импульса дают некомпенсируемые ошибки измерения [6].

Si-ФЭУ конструктивно представляет собой матрицу лавинных фотодиодов с технологически сформированными гасящими резисторами, поэтому для компенсации температурной зависимости коэффициента усиления могут применяться методы, разработанные для лавинных фотодиодов [7]. Существуют и специализированные методы компенсации, предназначенные непосредственно для Si-ФЭУ [8–10]. Однако они либо недостаточно универсальны для термокомпенсированных многоканальных систем, либо требуют модификаций кристалла, возможных только на этапе их производства.

Работа посвящена созданию микропроцессорного термокомпенсированного источника напряжения смещения кремниевых фотоумножителей для фотометрии и оптико-электронного приборостроения. Источник обеспечивает компенсацию температурной зависимости коэффициента усиления Si-ФЭУ путем регулирования напряжения смещения в зависимости от температуры, измеряемой внешним миниатюрным термистором, размещенным в непосредственной близости от кристалла фотоприемника. Применение микропроцессорного управления обеспечило независимость коэффициентов термокомпенсации для каждого канала многоканальной системы кремниевых фотоумножителей.

2. КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ

Для кремниевых фотоумножителей с ростом температуры пропорционально увеличивается значение напряжения пробоя V_{bd} , что приводит к снижению коэффициента усиления при неизменном напряжении смещения V_b источника питания [11]:

$$V_{bd}(T) = V_{bd}(T_0) [1 + \beta (T - T_0)], \quad (1)$$

где T – текущая температура, T_0 – температура, для которой приводится паспортное значение напряжения пробоя V_{bd} , β – коэффициент температурной зависимости порядка 10^{-3} K^{-1} .

Производители микропиксельных фотоумножителей приводят в документации коэффициент k , являющийся произведением $V_{bd}(T_0)$ на β и имеющий размерность K^{-1} . Тогда выражение (1) можно записать как

$$V_{bd}(T) = V_{bd}(T_0) + k (T - T_0), \quad (1)$$

где k – коэффициент температурной зависимости для V_{bd} .

При этом коэффициент усиления Si-ФЭУ пропорционален избыточному (overvoltage) напряжению, превышающему напряжение пробоя V_{ov} :

$$V_{ov} = V_b - V_{bd}, \quad (2)$$

где V_b – напряжение смещения источника питания.

В первом приближении усиление Si-ФЭУ линейно зависит от значения V_{ov} :

$$G = mV_{ov}, \quad (3)$$

где G – коэффициент усиления, m – константа. Тогда из выражений (1) и (2) следует, что зависимость коэффициента усиления от температуры имеет вид

$$G(T) = m [(V_b - V_{bd}(T_0)) - m k (T - T_0)]. \quad (4)$$

Значение m на практике велико (около $0.35 \cdot 10^6 \text{ В}^{-1}$), и величина $m k (T - T_0)$ вносит существенный вклад в стабильность коэффициента усиления. Так, для Si-ФЭУ КЕТЕК РМ3325-WB величина $k = 0.022 \text{ В} \cdot \text{К}^{-1}$, а $m = 0.34 \cdot 10^6$, и произведение $m k$ будет порядка 7480 К^{-1} . При изменении температуры фотоумножителя от T_1 до T_2 разница в усилении ΔG составит

$$\Delta G(T_1 - T_2) = m k (T_1 - T_2). \quad (5)$$

При $T_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ и максимальном коэффициенте усиления $G = 1.7 \cdot 10^6$ величина температурного изменения коэффициента усиления $G(T)$ уменьшится на 22%. При более низких значениях усиления G процентное изменение коэффициента усиления будет еще более значимым, вплоть до падения усиления до нуля.

Поэтому компенсация температурной зависимости коэффициента усиления Si-ФЭУ за счет пропорционального изменения напряжения смещения V_b является необходимым условием применения кремниевых фотоумножителей в фотометрии и оптико-электронном приборостроении.

На рис. 1 схематично изображена структура одного канала управления микропроцессорного термокомпенсированного источника напряжения смещения Si-ФЭУ. Масштабирование до многоканальной системы осуществляется увеличением числа каналов цифро-аналоговых (DAC) и аналого-цифровых преобразователей (ADC), а также пропорциональным увеличением количества модулей преобразования сопротивления термисторов в аналоговое напряжение ($R_T \setminus U$) и высоковольтных усилителей (HV-AMP).

Рис. 1. Схематичное изображение микропроцессорного термокомпенсированного источника напряжения смещения для одного канала управления

Обратная связь для коррекции коэффициента усиления фотоумножителя осуществляется изменением выходного напряжения смещения V_b в зависимости от температуры Si-ФЭУ. Значение температуры фотоприемника определяется миниатюрным малоинерционным термистором R_T при его тепловом контакте с Si-ФЭУ. Преобразование сопротивления R_T осуществляется при помощи модуля $R_T \setminus U$, далее ADC-данные о значении сопротивления

поступают в микроконтроллер (MPU). Затем в зависимости от измеренной температуры посредством DAC и HV-AMP корректируется выходное значение напряжения смещения Si-ФЭУ.

Настройка параметров для каждого фотоприемника осуществляется с персонального компьютера записью коэффициентов температурной зависимости k для каждого Si-ФЭУ в энергонезависимую память MPU. Коррекция коэффициента k может потребоваться, если производитель не указал этот коэффициент в документации, а также из-за производственного технологического разброса. Кроме того, требуется коррекция данного коэффициента в зависимости от конкретных параметров теплового контакта термистора и Si-ФЭУ.

Кроме коэффициентов k также предусмотрена возможность корректировать калибровочные коэффициенты преобразования напряжения каналов DAC в напряжение смещения V_b . Это может потребоваться для учета разброса номиналов резисторов, задающих коэффициент усиления в модуле HV-AMP. Также доступна корректировка коэффициентов преобразования температуры в напряжение в зависимости от конкретных параметров используемых термисторов.

На рис. 2 представлена схема высоковольтного усилителя HV-AMP. Установочное напряжение V_{DAC} с выхода DAC поступает на схему преобразования униполярного сигнала в биполярный, реализованную на операционном усилителе LMV358. Затем сигнал усиливается при помощи высоковольтного операционного усилителя. В качестве микросхемы высоковольтного усилителя используется OPA454 в режиме двухполярного питания. Схема позволяет использовать фотоприемники как с прямым, так и с обратным включением фотоумножителя. Максимальное выходное напряжение схемы составляет ± 49 В, а при двухполярном питании равно ± 50 В. При переходе на однополярное питание диапазон выходного напряжения может быть увеличен вдвое. Дрейф входного напряжения смещения усилителя не превышает ± 4 мВ. При коэффициенте усиления 17.7 это обеспечивает дрейф выходного напряжения не более ± 71 мВ, что при значении выходного напряжения, равном 25 В, соответствует относительной нестабильности не хуже $\pm 0.28\%$.

Рис. 2. Схема высоковольтного усилителя HV-AMP

В качестве DAC использовалась 4-канальная 12-битная микросхема MCP4728 с внешним источником опорного напряжения V_{ref} .

Измерение сопротивления NTC-термистора выполняется с помощью резистивного делителя, сформированного прецизионными резисторами с допуском не более 0.1% и стабильным опорным напряжением $V_{ref} = 2.5$ В (рис. 3). Для достижения суммарной погрешности измерения не хуже 1% применяется источник опорного напряжения REF192, обеспечивающий нестабильность не более $\pm 0.08\%$ во всем рабочем температурном диапазоне.

Рис. 3. Схема модуля преобразования температуры в напряжение

В качестве согласующего усилителя может применяться любой усилитель с однополярным питанием, способный работать возле нулевых напряжений по входу и имеющий не превышающее величину одного разряда АЦП напряжение смещения. В реализованной схеме использован операционный усилитель LMV358 с типичным входным смещением 0.8 мВ. Температурный дрейф входного напряжения усилителя с коэффициентом усиления, равным 2, пренебрежимо мал ($2.7 \text{ мкВ}\cdot\text{K}^{-1}$) и не влияет на суммарную погрешность преобразователя.

Преобразователь обеспечивает измерение температуры в диапазоне от 10 до 60 °С с использованием NTC-термистора номиналом 10 кОм. Выбор данного диапазона температур обусловлен областью применения фотоумножителей в составе лабораторных оптических приборов, не предназначенных для работы в условиях отрицательных температур.

В качестве ADC использовался 10-разрядный преобразователь, встроенный в микроконтроллер ATmega328, с внешним источником опорного напряжения V_{ref} .

Примененные при разработке микропроцессорного термокомпенсированного источника напряжения смещения схемотехнические решения должны обеспечивать стабильность коэффициента усиления Si-ФЭУ не хуже $\pm 1\%$ в температурном диапазоне 10–60 °С.

3. ТЕСТОВЫЙ СТЕНД

Для оценки реальной стабильности коэффициента усиления Si-ФЭУ с микропроцессорным термокомпенсированным источником опорного напряжения в диапазоне температур от 10 до 60 °С был создан тестовый стенд, схематично представленный на рис. 4.

Рис. 4. Схема тестового стенда

В ходе эксперимента фотоприемник первоначально охлаждался до 10 °С, после чего в процессе нагрева до 60 °С одновременно регистрировались

- температура (с помощью NTC-термистора);
- амплитуда выходных импульсов V_{out} (цифровым осциллографом Tektronix TDS 3054).

Нагрев осуществлялся как естественным путем за счет тепловыделения элементов платы фотоприемника, так и принудительно с использованием внешнего нагревателя для достижения более высоких температур. Стабильность коэффициента усиления Si-ФЭУ оценивалась по относительному изменению амплитуды выходного сигнала фотоприемника V_{out} .

Оптический сигнал формировался светодионом VD_1 BL-L502UBC с длиной волны 470 нм и источником импульсов на основе функционального генератора Nantek HDG6202B. Длительность светового импульса была равна 1 мкс при частоте следования 10 кГц.

Скважность сигнала в 1% обеспечивает полную перезарядку всех ячеек микропиксельного фотоумножителя между импульсами.

В экспериментах использовался кремниевый фотоэлектронный умножитель КЕТЕК РМ3325-WB-D0 (13920 микроячеек, максимальный коэффициент усиления $1.74 \cdot 10^6$) в безвыводном исполнении, установленный на плату усилителя сигнала. С учетом технологического разброса напряжения пробоя V_{bd} для каждого экземпляра Si-ФЭУ индивидуально измерялись калибровочные параметры, которые затем записывались в энергонезависимую память микроконтроллера. Исследовались два образца фотоумножителя (с прямой и обратной полярностями включения) на одной и той же плате усилителя. Оптическая часть тестового стенда размещалась в светонепроницаемом корпусе для исключения влияния внешней засветки.

Для оценки долговременной стабильности излучающей оптической части проведены дополнительные исследования на установке, схематично показанной на рис. 5. Светодиод VD_1 был жестко закреплен внутри светонепроницаемой трубы напротив фотоприемника VD_2 на основе фотодиода ФД-24К. Фотодиод нагружен резистором номиналом 10 кОм, выходной сигнал регистрировался осциллографом DSO.

Рис. 5. Схема установки для исследования долговременной стабильности излучателя

В течение трех часов проводились измерения амплитуды сигнала с фотодиода. Изменения амплитуды сигнала в данном эксперименте не превышали 0.2%. Столь малую нестабильность передающей части тестового стенда можно не учитывать в дальнейших экспериментах.

Кроме того, проводилось сравнение показаний NTC-термистора с эталонной термопарой К-типа. Расхождение между ними в диапазоне 25–70 °С не превышало 1.3 °С, что является приемлемым результатом для целей данного эксперимента.

Измерения стабильности коэффициента усиления проводились при четырех значениях избыточного напряжения V_{ov} : 0.5, 1, 2, 3 В. Дальнейшее повышение V_{ov} до максимально рекомендованного значения 5 В ограничено динамическим диапазоном выходного напряжения используемого усилителя. Полученные данные, тем не менее, достаточны для оценки работоспособности разработанного микропроцессорного термокомпенсированного источника напряжения смещения кремниевого фотоумножителя.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведены измерения стабильности выходного сигнала $V_{out}(T)$ Si-ФЭУ от температуры в диапазоне 10–60 °С. Температура и амплитуда выходных импульсов регистрировались с

интервалом 10 с. Продолжительность одного цикла измерений составляла около 10 мин, в течение которых фотоприемник нагревался до 60 °С.

На рис. 6, 7 представлены зависимости вариации нормированных значений амплитуды выходных импульсов Si-ФЭУ от температуры для четырех значений избыточного напряжения V_{ov} для образцов с прямым и обратным включениями соответственно. Нормировка амплитуды выходного напряжения $V_{норм}(T)$ проводилась для значений температуры 25 °С: $V_{норм}(T)=V(T)/V(25\text{ °С})$.

Рис. 6. Зависимость нормированных значений выходного импульсного напряжения от температуры для четырех значений

Рис. 7. Зависимость нормированных значений выходного импульсного напряжения от температуры для четырех значений

Анализ представленных данных показывает, что в диапазоне температур 10–60 °С максимальное отклонение нормированной амплитуды выходных импульсов для образца с прямой полярностью включения не превышает $\pm 1.5\%$, а для образца с обратной полярностью не более $\pm 2.5\%$ при всех исследованных значениях V_{ov} .

Наихудшая стабильность наблюдается в обоих случаях при $V_{ov} = 0.5$ В. Согласно данным производителя, линейный рабочий режим Si-ФЭУ начинается с $V_{ov} \geq 2$ В. Тем не менее даже при низких значениях избыточных напряжений разработанный источник напряжения смещения демонстрирует приемлемые результаты. Исключение данных для $V_{ov} = 0.5$ В снижает максимальное отклонение нормированной амплитуды до $\pm 1.5\%$ для обоих образцов.

Для сравнения на рис. 8 представлены зависимости нормированной амплитуды выходных импульсов от температуры при $V_{ov} = 1$ В для некомпенсированного ($k = 0$) и скомпенсированного по температуре режимов работы Si-ФЭУ обоих типов полярности. В отсутствие температурной компенсации амплитуда сигнала как при прямом (P), так и при обратном (N) включении изменяется более чем в 20 раз в диапазоне 10–60 °С.

Рис. 8. Зависимость нормированных значений выходного импульсного напряжения от температуры между некомпенсированным

Дальнейшее повышение точности системы термокомпенсации возможно за счет следующих мер:

- более тщательного подбора элементов преобразователя “сопротивление–напряжение” ($R_T \setminus U$),
- замены встроенного АЦП-микроконтроллера на внешний преобразователь с улучшенными метрологическими характеристиками,
- введения цепи обратной связи для контроля выходного напряжения модулей HV-AMP,
- построения индивидуальных таблиц коэффициентов компенсации k для разных значений избыточного напряжения V_{ov} .

Реализация указанных мер позволит улучшить температурную стабильность коэффициента усиления Si-ФЭУ до уровня не хуже $\pm 1\%$ во всем диапазоне V_{ov} .

Полученные результаты подтверждают возможность применения разработанного микропроцессорного термокомпенсированного источника напряжения смещения для управления Si-ФЭУ в задачах, критичных к стабильности коэффициента усиления.

Достигнутая стабильность превосходит характеристики серийных аналогов. В частности, для интегрированного модуля Hamamatsu C5658 с термокомпенсированным источником питания производитель гарантирует стабильность коэффициента усиления не хуже $\pm 5\%$ лишь в диапазоне 5–35 °С [12], тогда как предложенное решение обеспечивает лучшую стабильность в существенно более широком диапазоне температур (10–60 °С).

Разработанный микропроцессорный термокомпенсированный источник напряжения смещения эффективно устраняет значительную температурную зависимость коэффициента усиления кремниевых фотоэлектронных умножителей независимо от полярности их включения (прямой или обратной).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан микропроцессорный термокомпенсированный источник напряжения смещения для кремниевых фотоэлектронных умножителей, обеспечивающий стабильность коэффициента усиления Si-ФЭУ в широком температурном диапазоне.

Экспериментально подтверждено, что предложенное решение поддерживает отклонение коэффициента усиления на уровне не хуже $\pm 2.5\%$ в диапазоне температур 10–60 °С как для прямой, так и для обратной полярности включения фотоприемника для всего диапазона переизбыточных напряжений.

Разработанная архитектура допускает масштабирование до многоканальных систем детектирования и может применяться для одновременной стабилизации усиления массива Si-ФЭУ-детекторов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-79-20007, <https://rscf.ru/project/25-79-20007/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Grigoriev E., Akindinov A., Breitenmoser M. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2007. V. 571. № 1–2. P. 130. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.10.046>.

2. *Otte A.N., Dolgoshein B., Hose J. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. V. 53. № 2. 636. <https://doi.org/10.1109/TNS.2006.870575> .
3. *Dinu N.* // Photodetectors: Materials, Devices and Applications. / Ed. by B. Nabet. Woodhead Publishing, 2016. Ch. 8. P. 255. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-445-1.00008-7> .
4. *Rakhmanov V.V., Dvoynishnikov S.V., Meledin V.G., Pavlov V.A., Semenov D.O.* // J. Phys.: Conf. Ser. V. 2057. P. 012088. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2057/1/012088>.
5. *Рахманов В.В., Качурин С.К., Меледин В.Г., Бакакин Г.В.* // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2025. Т. 8. № 1. С. 138. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2025-8-138-145>.
6. *Аникин Ю. А.* Исследование закрученного потока в кубическом контейнере доплеровским полупроводниковым анемометром для жидкостей с плохой оптической разрешимостью: дисс. кандидата техн. наук. Новосибирск, 2011.
7. *Chughtai M.T.* // Eng. Technol. Appl. Sci. Res. 2019. V. 9. № 1. P. 3774. <https://doi.org/10.48084/etasr.2475> .
8. *Kaplan A.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2009. V. 610. № 1. P. 114. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.05.137> .
9. *Licciulli F., Marzocca C.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2015. V. 62. №. 1. P. 228. <https://doi.org/10.1109/TNS.2015.2388580> .
10. *Chang-ge Zi, Jin-fan Chang, Ming-jie Yang, Feng-fan Yang, Yu-Sheng Wang,* // Radiat. Detect. Technol. Method. 2023. V. 7. P. 571. <https://doi.org/10.1007/s41605-023-00422-z>
11. *McKay K.G.* // Phys. Rev. 1954.V. 94. № 4. P. 877. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.94.877> .
12. APD module C5658. <https://www.hamamatsu.com/us/en/product/optical-sensors/apd/apd-module/C5658.html> .

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схематичное изображение микропроцессорного термокомпенсированного источника напряжения смещения для одного канала управления.
- Рис. 2.** Схема высоковольтного усилителя HV-AMP.
- Рис. 3.** Схема модуля преобразования температуры в напряжение.
- Рис. 4.** Схема тестового стенда.
- Рис. 5.** Схема установки для исследования долговременной стабильности излучателя.
- Рис. 6.** Зависимость нормированных значений выходного импульсного напряжения от температуры для четырех значений V_{ov} (0.5, 1, 2 и 3 В) для образца Si-ФЭУ с прямым включением.
- Рис. 7.** Зависимость нормированных значений выходного импульсного напряжения от температуры для четырех значений V_{ov} (0.5, 1, 2 и 3 В) для образца Si-ФЭУ с обратным включением.
- Рис. 8.** Зависимость нормированных значений выходного импульсного напряжения от температуры между некомпенсированным ($k = 0$) и скомпенсированным режимами работы фотоприемника (Р – прямое включение, N – обратное включение).

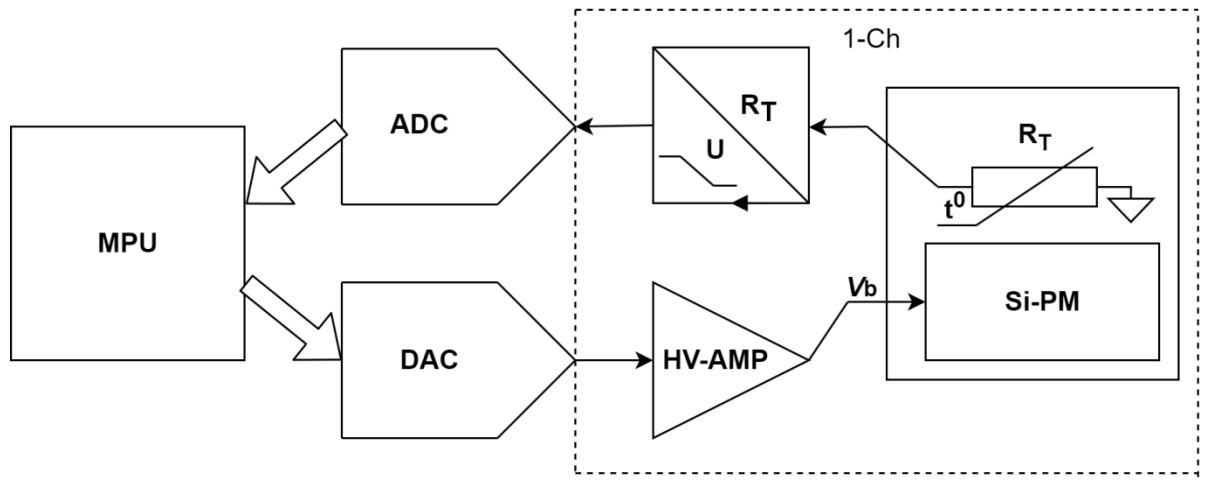


Рис. 1.

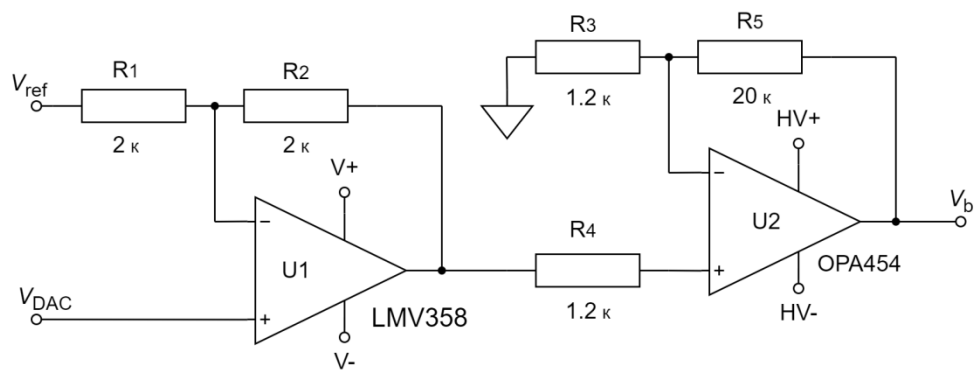


Рис. 2.

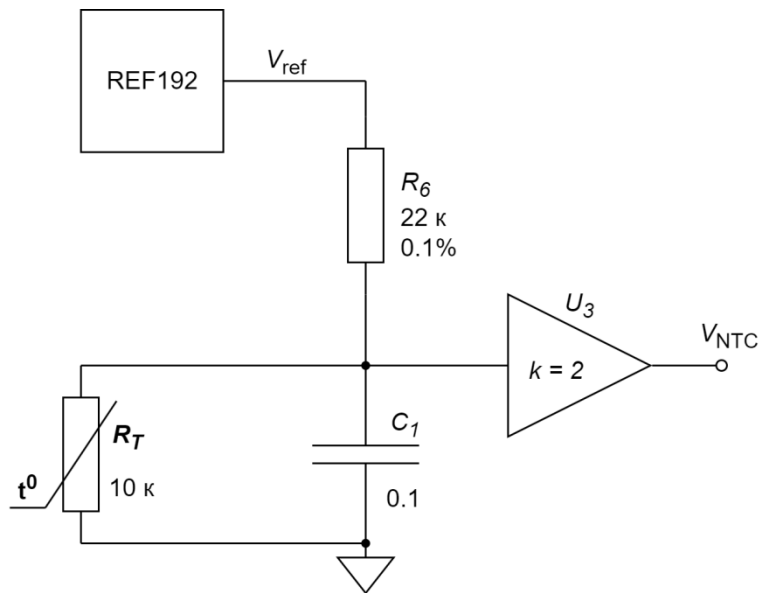


Рис. 3.

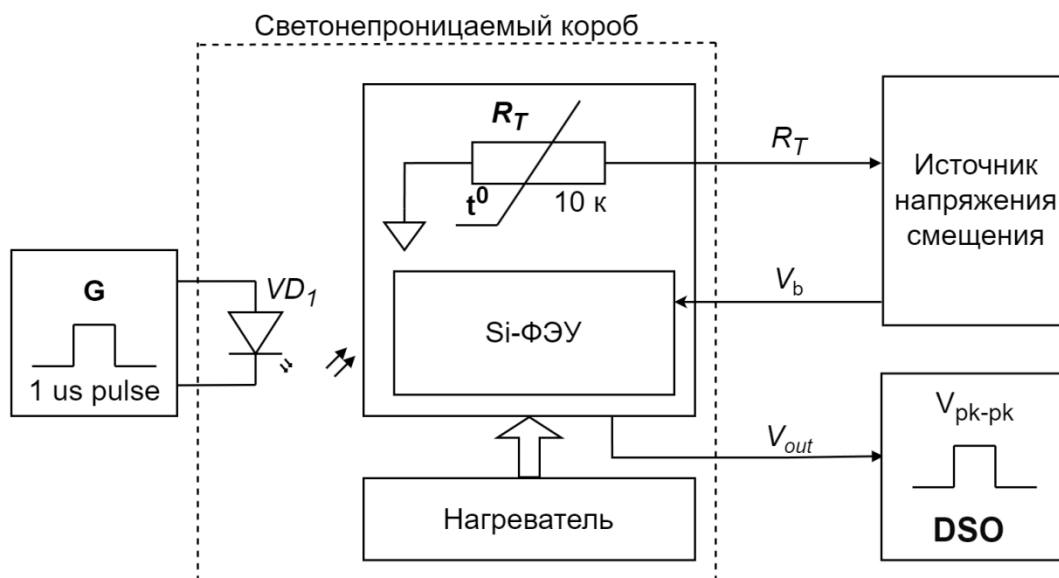


Рис. 4.

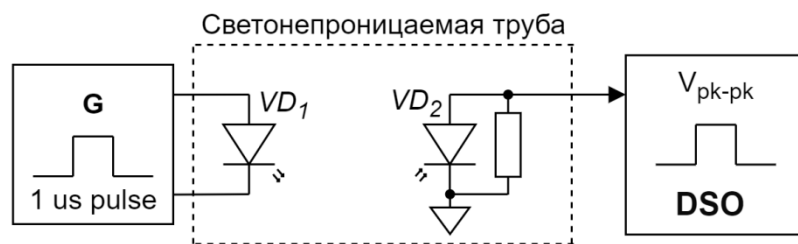


Рис. 5.

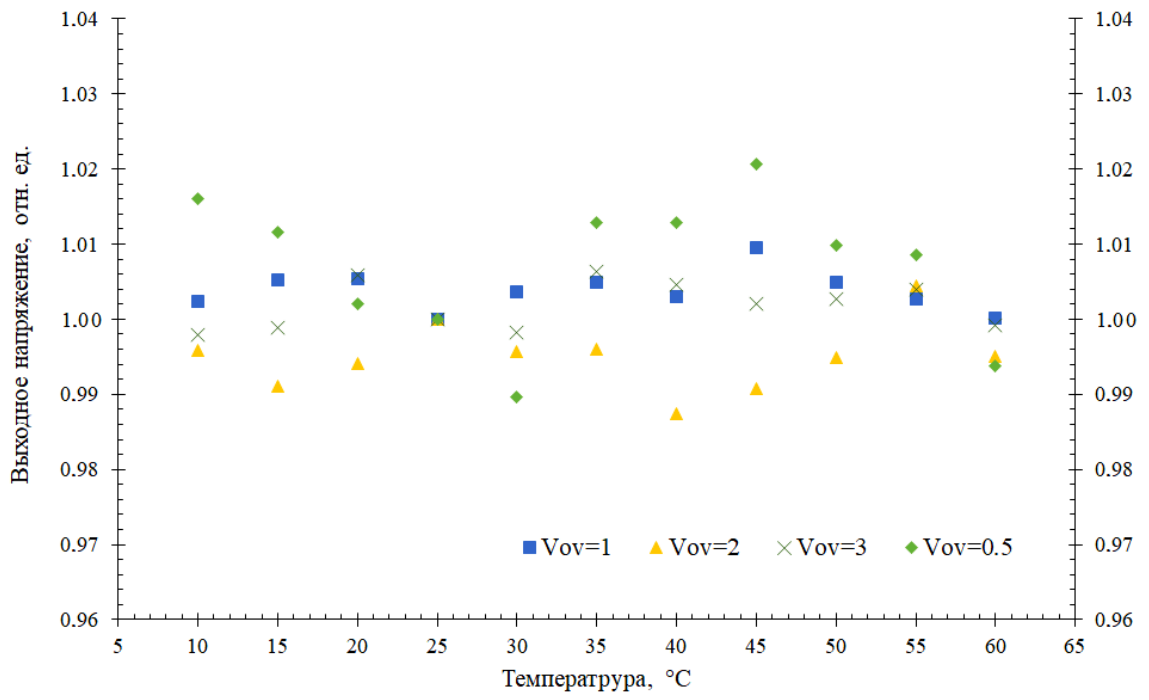


Рис. 6.

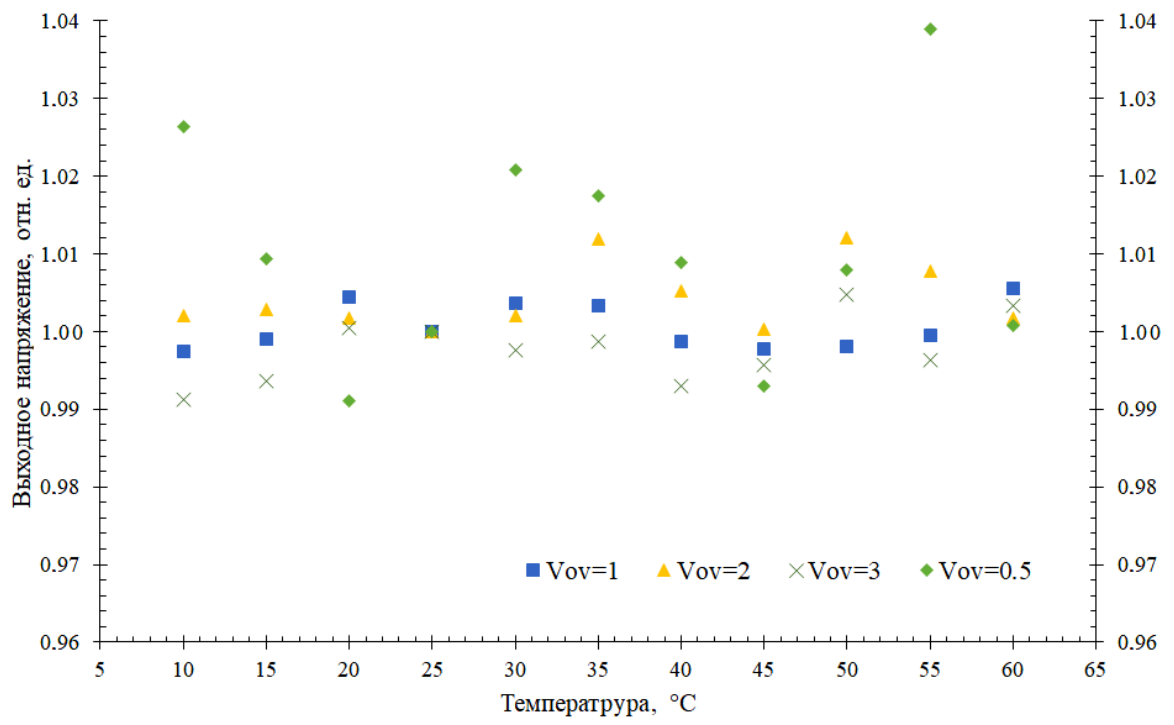


Рис. 7.

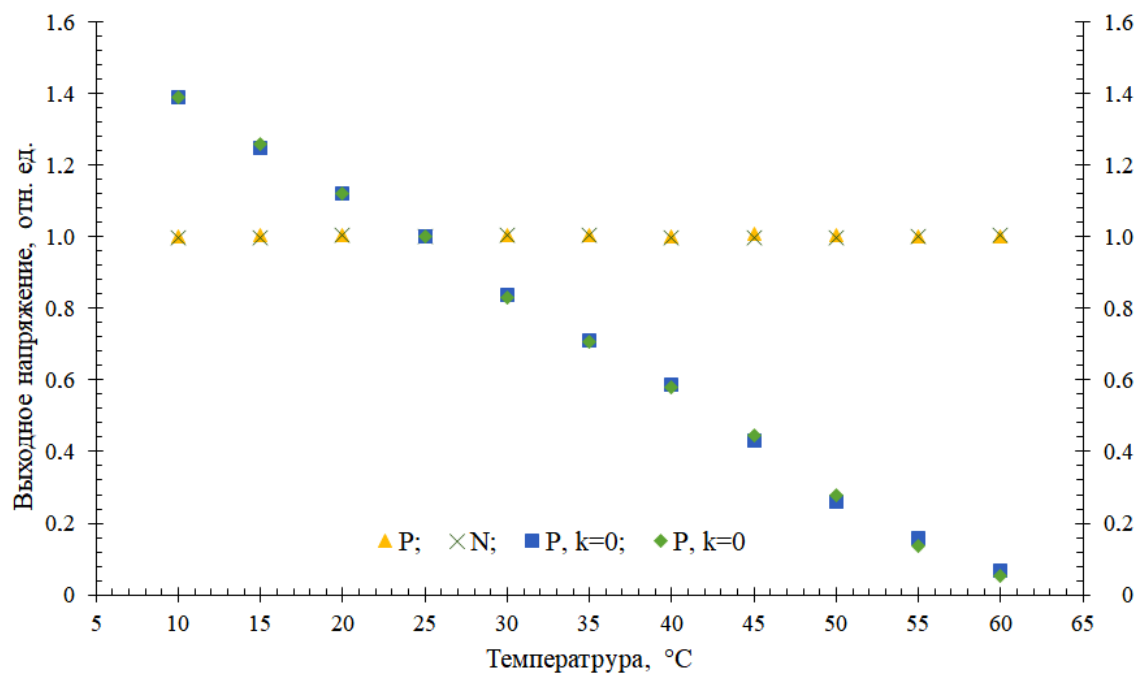


Рис. 8.