

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЦАП AD5535 ДЛЯ ПИТАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

*А. С. Селюнин¹, Н. В. Анфимов, А. В. Рыбников, Д. В. Федосеев,
В. И. Шаров*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Изучена работа высоковольтного 32-канального ЦАП AD5535 для питания кремниевых фотоумножителей (Si-ФЭУ). За счет встроенных высоковольтных буферных усилителей выходное напряжение регулируется в диапазоне до 200 В, что обеспечивает применение для широкого класса Si-ФЭУ, в том числе для их последовательного включения. Существенный выходной ток 500 мкА/канал позволяет запитывать матрицы и сборки Si-ФЭУ. В документации производителя указана существенная температурная зависимость ~ 200 ppm/°C, что ограничивает применение данного ЦАП для питания Si-ФЭУ. Продемонстрирована высокая стабильность относительно температуры данного чипа, но поскольку это не гарантируется производителем, был разработан экспресс-метод поканального измерения температурной зависимости для массового применения ЦАП AD5535.

The work of a high-voltage 32-channel DAC AD5535 for biasing silicon photomultipliers (SiPM) is studied. Built-in high-voltage buffer amplifiers allow the output voltage regulation in the range of up to 200 V, which provides application for a broad range of SiPM types, including their serial connection. The significant output current of 500 μ A/channel allows biasing of SiPM arrays and assemblies. The producer's documentation indicates a significant temperature dependence of ~ 200 ppm/°C, which limits the use of the DAC for powering SiPM. The excellent temperature stability of the chip is demonstrated. Still, since the manufacturer does not guarantee this, an express method of channel-by-channel measurement of temperature dependence was developed for mass use of the DAC AD5535.

PACS: 85.60.Ha

1. ПИТАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

Кремниевый фотоумножитель (Si-ФЭУ) — полупроводниковый лавинный фотодиод, состоящий из множества микроячеек, работающих в режиме «Гейгера». В настоящее время Si-ФЭУ получили широкое применение в технике физического эксперимента, измерительной, медицинской, промышленной и прочей аппаратуре в качестве

¹E-mail: selyunin@jinr.ru

фотодетекторов для регистрации световых потоков малой интенсивности. Современные детекторы частиц, использующие Si-ФЭУ, могут содержать тысячи и десятки тысяч каналов, что требует применения многоканальных систем питания. Дополнительная причина использования большого числа каналов в системе питания — разброс рабочих напряжений Si-ФЭУ, в ряде случаев достигающий нескольких вольт для изделий одного типа. Типичная величина тока, потребляемого Si-ФЭУ, — от единиц наноампер до десятков микроампер. Рабочее напряжение таких приборов обычно лежит в диапазоне от 25 до 100 В. Например, для широко распространенного прибора типа Hamamatsu MPPC S13360 данная величина составляет 50–60 В при комнатной температуре [1]. Типовая схема включения Si-ФЭУ приведена на рис. 1, а.

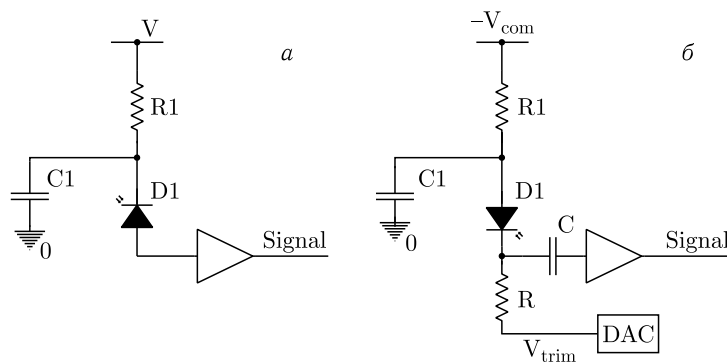


Рис. 1. Схематическое питание Si-ФЭУ и считывание: а) схема однополярного питания; б) схема питания со смещением катода и анода

Источник питания для кремниевых фотоумножителей должен иметь высокую температурную и временную стабильность выходного напряжения. Проблема создания многоканальных источников питания для Si-ФЭУ может быть решена путем применения интегральных микросхем многоканальных цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) с достаточным разрешением и стабильностью. Однако выходное напряжение большинства ЦАП не всегда достаточно для непосредственной работы с Si-ФЭУ. Это требует принятия мер по расширению диапазона выходного напряжения путем введения дополнительной внешней обвязки, что усложняет схему и в ряде случаев может привести к ухудшению ее характеристик. Другим путем решения данной задачи является использование многоканального низковольтного ЦАП, например [2], совместно с общим источником смещения для питания группы Si-ФЭУ. В этом случае регулировка рабочего напряжения с высоким разрешением требуется лишь в узком диапазоне. Схематично такой способ включения Si-ФЭУ показан на рис. 1, б. Пример использования такой схемы питания можно найти в работе [3]. Постоянное отрицательное напряжение V_{com} , общее для всех каналов, подается на катод фотодиода через резистор R1. На анод через разделительный резистор R с выхода ЦАП поступает напряжение V_{trim} . Регулировка напряжения на фотодиоде производится в пределах $(V_{com}, \dots, V_{com} + V_{trim})$. Связь с входом (внешнего) усилителя — по переменному току, через разделительный конденсатор C, что не всегда желательно при работе с высокими нагрузками. Также подключение ЦАП к входу усилителя способно привести к ухудшению шумовых характеристик канала.

В ряде случаев целесообразно использовать схему однополярного питания (см. рис. 1, *a*), а сигнал считывать по постоянному току. Такой подход лишен недостатков, описанных выше, однако требует использования ЦАП с регулировкой в широком диапазоне напряжений, перекрывающих рабочее напряжение Si-ФЭУ. Хорошим кандидатом является ЦАП фирмы Analog Devices AD5535 [4]. Однако производитель гарантирует температурную стабильность не хуже $\sim 200 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, что при характерном напряжении питания Si-ФЭУ составляет порядка $\sim 10 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$. Это может существенно ограничивать применение данного устройства.

В настоящей работе представлено исследование температурной зависимости выходного напряжения 32-канального высоковольтного ЦАП AD5535 и показано, что для большинства микросхем она на порядок лучше заявленной. Это позволяет использовать ЦАП AD5535 для питания Si-ФЭУ при условии отбора микросхем с удовлетворительными характеристиками. Также представлен экспресс-метод для селекции ЦАП по температурной стабильности для массового производства источников питания кремниевых фотоумножителей.

2. ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ МИКРОСХЕМЫ AD5535

2.1. Микросхема AD5535. Микросхема AD5535 от Analog Devices представляет собой 32-канальный ЦАП с разрешением 14 бит, снабженный встроенными высоковольтными усилителями с коэффициентом усиления $A = 50$ (рис. 2). Микросхемы AD5535 поставляются в 124-выводном CSP_BGA корпусе и имеют встроенный внутренний измерительный диод (термодатчик), который позволяет мониторить температуру кристалла. Максимальное выходное напряжение U_{max} — от 50 до 200 В в зависимости от выбранного опорного напряжения U_{ref} — рассчитывается по формуле (1). Максимальный ток нагрузки — 550 мкА на канал. Производитель гарантирует линейность выходного напряжения в диапазоне от 7 В до U_{max} . Как правило, при эксплуатации в физических установках источник питания может испытывать значительные температурные вариации, поэтому важно, чтобы зависимость выходного

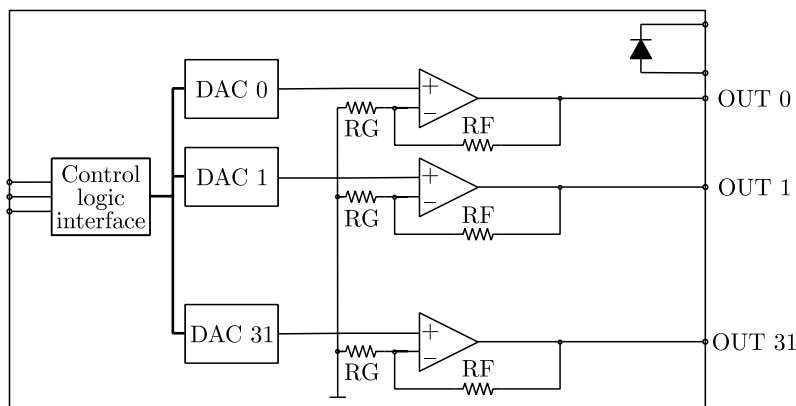


Рис. 2. Упрощенная блок-схема ЦАП AD5535B

напряжения от температуры была несущественной. Паспортное значение температурного дрейфа составляет $-200 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$:

$$U_{\max} = U_{\text{ref}} A, \quad (1)$$

где $A = 50$ — усиление высоковольтного усилителя.

Для кремниевых фотоумножителей характерно достаточно низкое рабочее напряжение питания — менее 100 В (для большинства моделей на рынке). Таким образом, диапазон рабочих напряжений (до 200 В) микросхемы AD5535 указывает на возможность ее использования в системах питания Si-ФЭУ с применением однополярной схемы питания и считывания сигнала по постоянному току (см. рис. 1, а). В данной работе проводилось изучение температурных характеристик микросхемы AD5535 и их анализ на предмет возможности использования в системах питания Si-ФЭУ.

2.2. Изучение температурной стабильности выходного напряжения микросхемы AD5535. Характеристики кремниевых фотоумножителей сильно зависят от температуры и напряжения смещения, что требует их стабилизации во время эксплуатации Si-ФЭУ. На практике при эксплуатации Si-ФЭУ добиваются их стабильной температуры с точностью до нескольких градусов Цельсия. Таким образом, необходимо также обеспечить стабильное напряжение смещения кремниевых фотоумножителей. Большинство современных кремниевых фотоумножителей работают при перенапряжении V_{OV} на 3–5 В больше, чем их напряжение пробоя. Обеспечение стабильности работы Si-ФЭУ на уровне 1% приемлемо для большинства приложений, соответственно, это требует стабильности перенапряжения Si-ФЭУ на уровне 30–50 мВ. Таким образом, накладываются требования по стабильности выходного напряжения на системы питания кремниевых фотоумножителей.

Согласно документации, предоставляемой производителем микросхемы AD5535, зависимость выходных характеристик ЦАП – буферный усилитель от температуры составляет $200 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Такой температурный дрейф напряжения микросхемы критичен для стабильной работы кремниевых фотоумножителей. Таким образом, перед применением микросхем AD5535 в качестве источника питания кремниевых фотоумножителей возникает необходимость их паспортизации на предмет стабильности выходного напряжения в зависимости от температурного режима работы микросхемы.

В настоящей работе представлена методика изучения зависимости выходного напряжения микросхемы AD5535 от температуры, которая позволяет эффективно и быстро¹ получать кривую зависимости $U(t)$ в пределах рабочего температурного диапазона работы микросхемы. Таким образом можно провести оценку стабильности выходного напряжения отдельно взятой микросхемы. Для исследования нами была разработана² печатная плата со смонтированными микросхемами AD5535 и источниками опорного напряжения, которая позволяет управлять микросхемой при помощи последовательного периферийного интерфейса (SPI) и имеет выводы всех каналов ЦАП на отдельном разъеме. Внешний многоканальный коммутатор, управляемый

¹По сравнению с измерениями в термокамере с регулируемой температурой.

²Данное изделие разработано для производства многоканальных источников питания Si-ФЭУ [5].

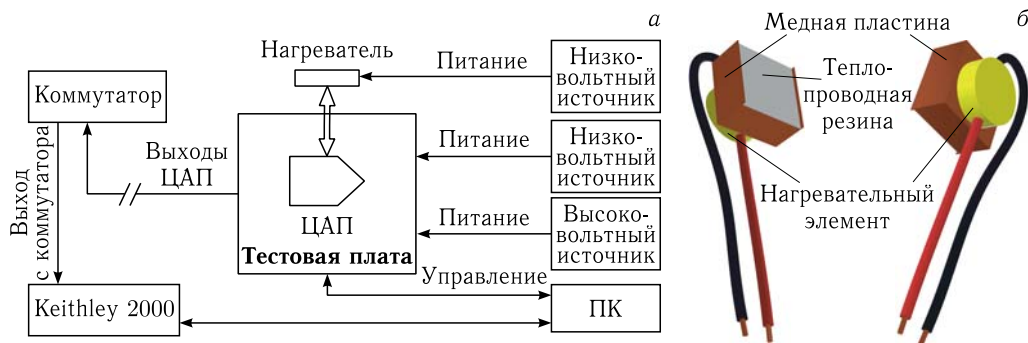


Рис. 3. а) Блок-схема температурных тестов микросхемы AD5535; б) нагреватель, используемый в тестах

с ПК, подключался к данному разъему. Таким способом осуществлялось последовательное подключение выходов всех каналов ЦАП к прецизионному мультиметру Keithley 2000 для контроля выходного напряжения на каждом из каналов. Данные с Keithley 2000 считывались при помощи ПК. Нагрев кристалла микросхемы до требуемой в измерении температуры осуществлялся при помощи внешнего съемного нагревателя. Температура кристалла считывалась с внутреннего термодатчика (диода) микросхемы и передавалась на ПК. Схема измерений приведена на рис. 3, а.

Съемный нагреватель — медная пластина, которая плотно сочленяется с корпусом исследуемой микросхемы. Нагрев кристалла микросхемы происходит за счет теплообмена с медной пластиной, нагрев которой осуществляется при помощи смонтированного на ней нагревательного элемента (см. рис. 3, б). Внешний источник питания используется для питания и регулирования тока, проходящего через нагревательный элемент, что в итоге приводит к нагреву сборки микросхема + нагреватель до требуемой в текущем измерении температуры. Такая схема позволяет осуществлять нагрев микросхемы вплоть до максимальной, указанной в паспортных данных рабочей температуры в 85°C .

Изучена стабильность выходного напряжения от температуры $U(t)$ у 32 микросхем AD5535BKBCZ производителя Analog Devices. Рабочий диапазон напряжений микросхемы AD5535 зависит от величины внешнего опорного напряжения U_{ref} , подаваемого на микросхему. В установке использовались два источника опорного напряжения (ИОН): $U_{\text{ref}} = 2,5\text{ В}$ и $U_{\text{ref}} = 4,096\text{ В}$, что соответствует 125 и 200 В рабочего диапазона напряжений микросхемы и полностью перекрывает диапазон рабочих напряжений всех широко используемых Si-ФЭУ. Диапазон исследуемых температур составлял порядка $\sim 55^{\circ}\text{C}$. Первоначально измерялись температура и напряжение на 32 выходах микросхемы при комнатной температуре окружающей среды. Последнее измерение проводилось при нагретой до 85°C микросхеме. По результатам измерений мы получаем кривую зависимости напряжения на каждом канале микросхемы от ее температуры (рис. 4). Для более наглядного представления данных была построена кривая отклонения выходного напряжения каждого канала микросхемы от установленного при комнатной температуре напряжения (рис. 5). Часть микросхем была изучена с использованием $U_{\text{ref}} = 2,5\text{ В}$, а другая часть с $U_{\text{ref}} = 4,096\text{ В}$.

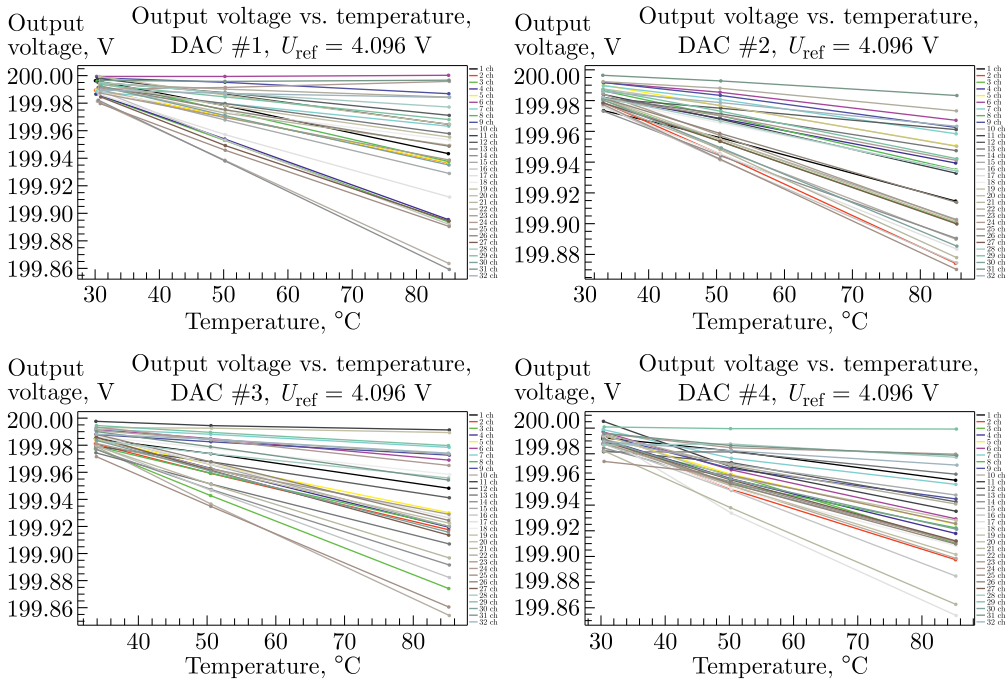


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения на 32 каналах 4 микросхем AD5535

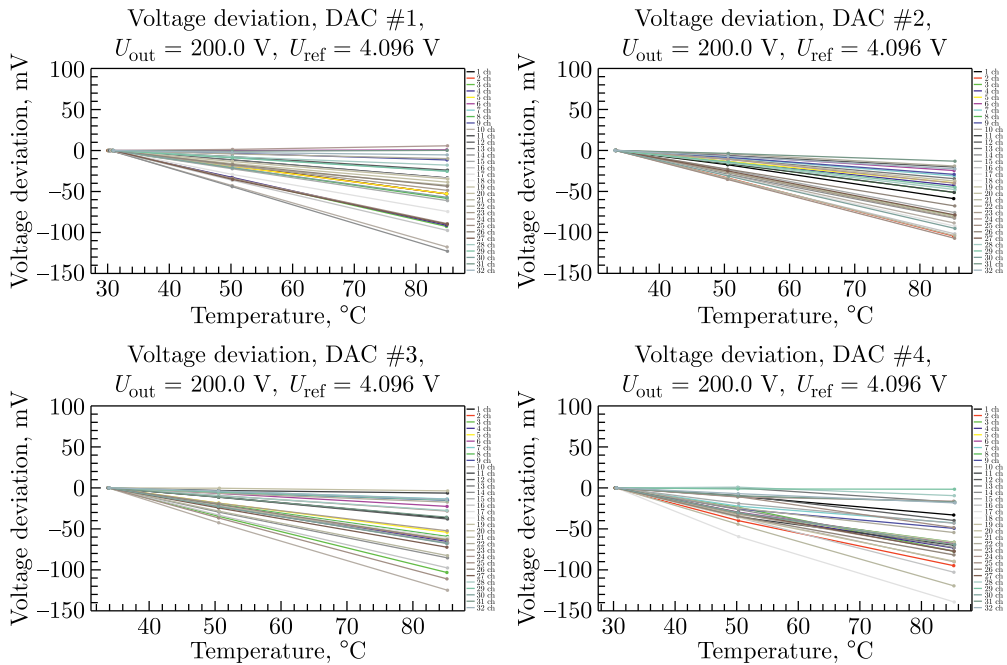


Рис. 5. Отклонение выходного напряжения на каналах 4 микросхем AD5535 в зависимости от температуры. Первоначальное выходное напряжение получено при комнатной температуре

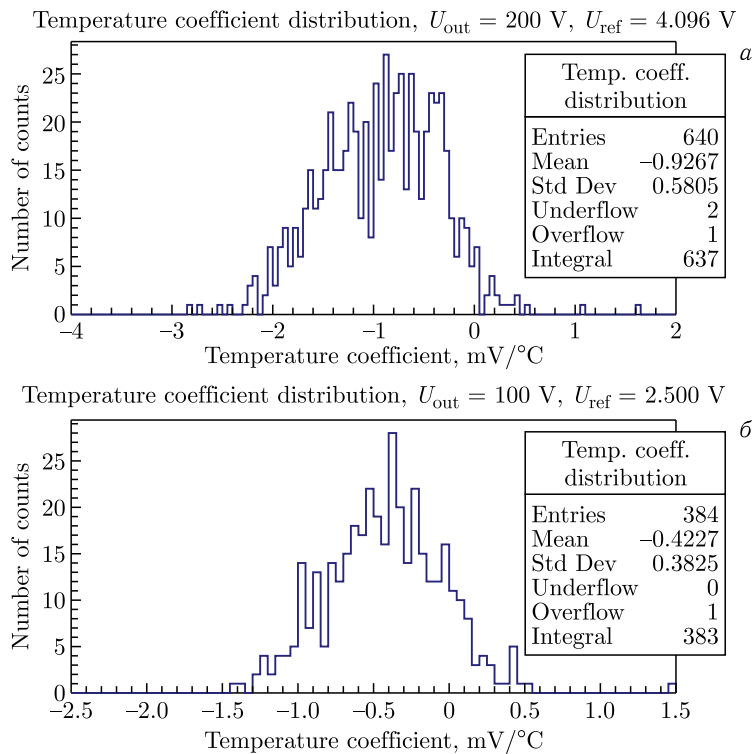


Рис. 6. Распределение температурных коэффициентов для: а) $U_{out} = 200 \text{ В}$ и $U_{ref} = 4,096 \text{ В}$; б) $U_{out} = 100 \text{ В}$ и $U_{ref} = 2,5 \text{ В}$

Величина выходного напряжения в измерениях выбиралась индивидуально для каждой микросхемы и зависела от величины используемого ИОН.

Для анализа стабильности выходного напряжения отдельной микросхемы была произведена аппроксимация линейной функцией полученных зависимостей $U(t)$. Был извлечен параметр k функции аппроксимации — угол наклона кривой, который характеризует изменение выходного напряжения в зависимости от температуры. Для каждой микросхемы получается 32 значения параметра k . Распределение значений параметра k для 20 микросхем, измеренных при $U_{ref} = 4,096 \text{ В}$ и установленном выходном напряжении $U_{out} = 200 \text{ В}$, приведено на рис. 6, а. Необходимо отметить, что значения k для трех каналов у трех микросхем составили: 5,54, -6,36 и -16,36 мВ/°С, и, таким образом, находятся за диапазоном гистограммы (рис. 6, а). На рис. 6, б приведено распределение параметра k для 12 микросхем при $U_{out} = 100 \text{ В}$ и $U_{ref} = 2,5 \text{ В}$. Значение $k = 11,67 \text{ мВ/°С}$ одного из каналов на рис. 6, б находится за диапазоном гистограммы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для изучения температурной зависимости микросхемы AD5535 нами создана установка и разработана методика экспресс-тестирования зависимости выходного напряжения на каналах микросхемы от ее температурного режима. Это позволяет эф-

фактивно и быстро получать коэффициент температурного дрейфа каждого канала микросхемы.

В настоящей работе показано, что температурный дрейф у изученных образцов микросхем не превышает $3 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ при напряжении 200 В , что составляет $15 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, а в случае напряжений до 100 В не превышает $1,5 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$, или менее $7,5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Необходимо отметить, что у некоторых микросхем имеются отдельные каналы, для которых температурный дрейф значительно превышает указанные выше значения. Используемая в работе методика позволяет отбирать микросхемы ЦАП AD5535 с значениями температурного дрейфа выходного напряжения, определяемыми требованиями конкретного приложения.

Широкий диапазон выходных напряжений микросхемы AD5535 и возможность индивидуальной установки напряжения на каждом ее канале является большим преимуществом в выборе данных микросхем для использования в системах питания Si-ФЭУ. Однако необходимо гарантировать требуемую стабильность температурного режима микросхемы. Ввиду полученных в работе данных температурный дрейф для большинства исследованных микросхем AD5535 не превышает $3 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$. В случае использования отобранных микросхем AD5535 (без аномальных каналов) в системах питания кремниевых фотоумножителей необходимо стабилизировать их температурный режим работы в пределах $10\text{--}15^\circ\text{C}$, что обеспечит стабильность характеристик Si-ФЭУ на уровне 1% .

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-42-00023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hamamatsu Photonics. https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s13360_series_kapd1052e.pdf.
2. Texas Instruments. <https://www.ti.com/product/DAC81416>.
3. Anfimov N. et al. Development of the Light Collection Module for the Liquid Argon Time Projection Chamber (LArTPC) // J. Instrum. 2020. V. 15. P. C07022.
4. Analog Devices. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5535B.pdf>.
5. Патент РФ № 217698. Многоканальный источник напряжения для питания кремниевых фотоэлектронных детекторов на основе лавинных диодов / Чепурнов А. С., Шамарин А. Ф., Иониди В. Ю., Федосеев Д. В.

Получено 25 мая 2023 г.