

ОСОБЕННОСТИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ МНОЖЕСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ

А. Ю. Бодин¹, О. Н. Бодин², М. Н. Крамм³

^{1,3} Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

² Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹ Bodin98@mail.ru, ² iit@pnzgu.ru, ³ krammmn@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цифровизация медицинской информации является основным физическим процессом, определяющим характеристики медицинских информационных систем. Цифровые инструменты современной медицины позволяют совершать прорывы в самом подходе к лечению и профилактике заболеваний. В связи с этим совершенствование аналого-цифрового преобразования открывает новые возможности для системы современного здравоохранения. Целью статьи является разработка структуры аналого-цифрового преобразования электрокардиосигнала множественных отведений. *Материалы и методы.* Рассмотрена функциональная схема специализированного аналого-цифрового преобразователя с учетом мультиплексирования аналоговых каналов, произведен расчет чувствительности и необходимого быстродействия канала связи. Рассчитан объем цифровых данных, формируемых на выходе аналого-цифрового преобразователя. Определено влияние количества аналого-цифровых преобразователей на коэффициент мультиплексирования. *Результаты.* Приведен макет блока регистрации множественных отведений электрокардиосигнала, произведено моделирование работы аналого-цифрового преобразователя, получены временные диаграммы процессы регистрации группы отведений. *Выводы.* Функционирование скрининговой системы неинвазивной электрокардиодиагностики с множественной регистрацией электрокардиосигналов соответствует парадигме современного здравоохранения на ориентацию ранней диагностики и профилактики заболеваний. На основе проведенного анализа, макетирования и моделирования обоснован выбор коэффициента мультиплексирования для системы множественной регистрации электрокардиосигнала.

Ключевые слова: система неинвазивной электрокардиодиагностики, множественная регистрация электрокардиосигналов, аналого-цифровое преобразование, моделирование

Для цитирования: Бодин А. Ю., Бодин О. Н., Крамм М. Н. Особенности аналого-цифрового преобразования в системе множественной регистрации электрокардиосигналов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 96–104. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-12

FEATURES OF ANALOG-TO-DIGITAL CONVERSION IN MULTIPLE ELECTROCARDIOSIGNAL RECORDING SYSTEM

A.Yu. Bodin¹, O.N. Bodin², M.N. Kramm³

^{1,3} National Research University "MPEI", Moscow, Russia

² Penza State Technological University, Penza, Russia

¹ Bodin98@mail.ru, ² iit@pnzgu.ru, ³ krammmn@mail.ru

Abstract. *Background.* Digitalization of medical information is the main physical process that determines the characteristics of medical information systems. Digital tools of modern medicine allow for breakthroughs in the very approach to treatment and prevention of diseases. In this regard, improving analog-to-digital conversion opens up new opportunities for the modern healthcare system. The purpose of the article is to develop a structure for analog-to-digital conversion of multiple-lead ECS. *Materials and methods.* The functional diagram of a specialized analog-to-digital converter (ADC) is considered, taking into account the multiplexing of analog channels, the sensitivity and required speed of the communication channel are calculated. The volume of digital data generated at the output of the analog-to-digital converter is calculated. The effect of the number of ADCs on the multiplexing coefficient is determined. *Results.* The paper presents a layout of the ECS multiple-lead registration unit, simulates the operation of the analog-to-digital converter, and obtains timing diagrams of the registration processes of a group of leads. *Conclusions.* The operation of the screening system of non-invasive electrocardiological diagnostics (SNEDS) with multiple registration of electrocardiographic signals corresponds to the paradigm of modern healthcare on the orientation of early diagnosis and prevention of diseases. Based on

the analysis, prototyping and modeling, the choice of the multiplexing coefficient for the system of multiple registration of electrocardiographic signals (ECS) is substantiated.

Keywords: non-invasive electrocardiological diagnostics system, multiple registration of electrocardiographic signals, analog-to-digital conversion, modeling

For citation: Bodin A.Yu., Bodin O.N., Kramm M.N. Features of analog-to-digital conversion in multiple electrocardiosignal recording system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3):96–104. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-12

Введение

В настоящее время разработаны и реализованы методы определения электрофизиологических характеристик сердца и реконструкции пространственных характеристик источников электрической активности сердца (ЭАС) по сигналам многоэлектродных кардиоотведений. Метод ЭКГ-картирование сердца [1–4] является одним из наиболее информативных методов исследования электрической активности миокарда. Метод позволяет получить максимальную информацию об особенностях электрического поля сердца в любой момент деполяризации и реполяризации желудочков. При регистрации ЭКГ униполярные электроды располагаются на передней, задней и боковых поверхностях грудной клетки, а также на животе. Получаемая таким образом пространственно-временная и амплитудно-временная информация может быть представлена в виде нескольких разновидностей картограмм.

Однако эти методы требуют существенных аппаратных и временных ресурсов, что не позволяет проводить скрининговые обследования с построением карт распределения потенциала для профилактики сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ), связанных с наличием нарушений в возбуждении миокарда.

При проведении массовых обследований в рамках скрининговой системы неинвазивной электрокардиодиагностики (СНЭКД) осуществляется цифровизация всех этапов «технологического конвейера». Производится регистрация, хранение и обработка ЭКС множественных отведений, выполняется отображение результатов обработки. Структурная схема СНЭКД приведена на рис. 1 [5].

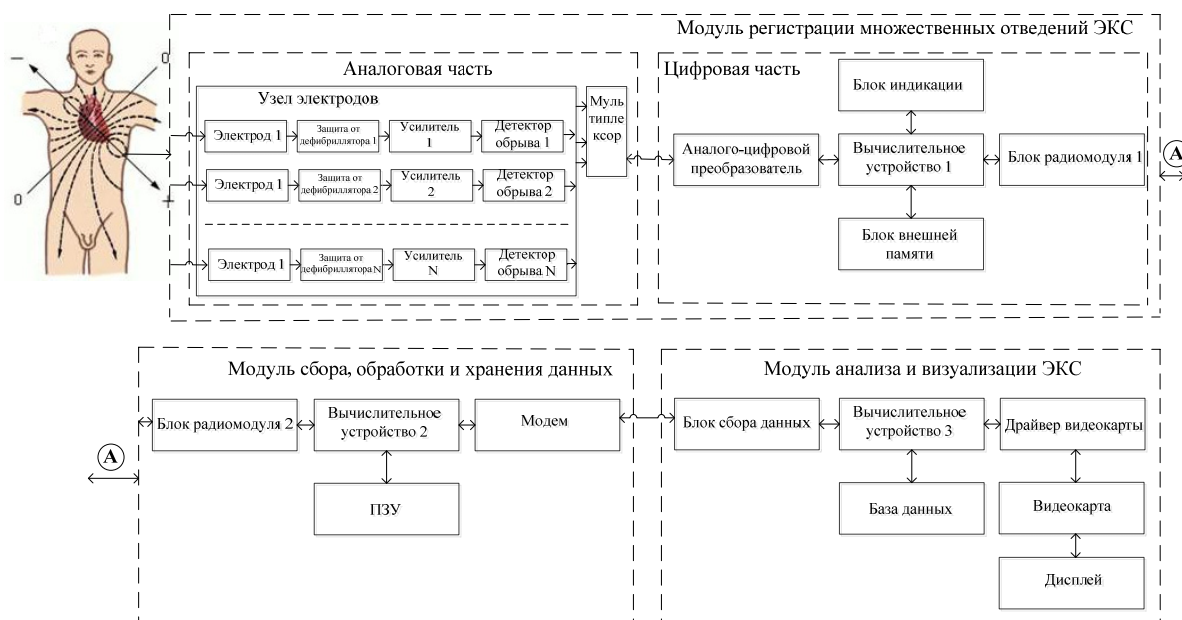


Рис. 1. Структурная схема СНЭКД

По мнению автора [6], функционирование СНЭКД с множественной регистрацией электрокардиосигналов осуществляется в соответствии с основным трендом трансформации современного здравоохранения: переходу к абсолютно новой модели здравоохранения, так называемой 4П-медицине, которая получила свое название от четырех основополагающих принципов: персонализация, предиктивность, превентивность и партисипативность.

В фокусе 4П-медицины находится индивидуальный подход с целью раннего доклинического выявления заболеваний и разработки комплекса профилактических мер, основываясь на всестороннем знании состояния пациента и заинтересованности пациента в активной форме

вовлечения себя в заботу о своем здоровье. Если классическая медицина имеет дело с проявлениями болезни (в первую очередь речь идет о хронических болезнях), то 4П-медицина направлена на то, чтобы выделить факторы риска, определить предрасположенность пациента к тем или иным болезням и предотвратить их.

Как следует из анализа рис. 1, модуль регистрации множественных отведений ССНЭКД содержит аналоговую и цифровую части. Поскольку регистрируются ЭКС в аналоговом виде, а хранятся ЭКС в цифровом виде, то необходимо аналого-цифровое преобразование ЭКС множественных отведений. В функционировании ССНЭКД с множественной регистрацией электрокардиосигналов участвуют процессы аналого-цифрового (АЦП) и цифроаналогового (ЦАП) преобразований. АЦП является одним из фундаментальных «строительных» блоков современных информационно-измерительных систем на этапе сбора данных.

Целью статьи является разработка структуры аналого-цифрового преобразования ЭКС множественных отведений.

Таким образом, с учетом цифровой трансформации здравоохранения актуальность темы статьи заключается в необходимости совершенствования существующих ССНЭКД на основе многоэлектродной регистрации ЭКС.

Материалы и методы

Функциональная схема и чувствительность специализированного АЦП. При многоканальной регистрации ЭКС важно иметь достаточную разрешающую способность для регистрации низкоамплитудных сегментов сигнала. Разрешение АЦП или чувствительность определяется разрядностью АЦП, показывает, насколько точно амплитуда сигнала будет представлена в цифровом виде. Чем выше разрешение, тем точнее фиксируются малые изменения потенциала сигнала.

Рассчитаем чувствительность АЦП с разрядностью 24 бита и уровнем опорного сигнала 2,4 В. Данными характеристиками обладают специализированные для работы с биопотенциалами АЦП [7]:

$$U_{\min} = \frac{U_{ref}}{(2^{res}-1)-1} = \frac{2,4}{2^{23}-1} \approx 0,28 \text{ мкВ}, \quad (1)$$

где $U_{\min}$ – минимальный уровень сигнала, регистрируемый АЦП (чувствительность); U_{ref} – значение опорного сигнала, res – разрядность АЦП.

Функциональная схема АЦП, специализированного для работы с биопотенциалами, приведена на рис. 2 [8].

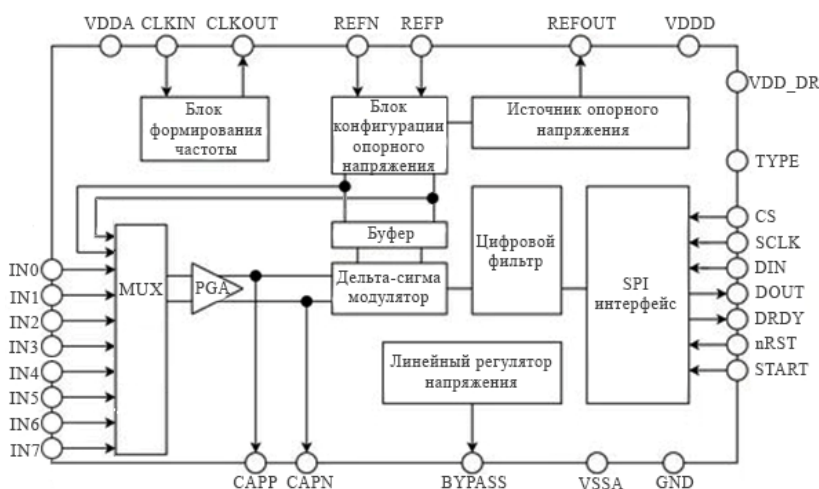


Рис. 2. Функциональная схема специализированного АЦП

Согласно рис. 2 блок аналого-цифрового преобразования в ССНЭКД состоит из восьми измерительных входов, PGA (Programmable Gain Amplifier) – модуля программируемого коэффициента усиления, блока формирователя частоты, дельта-сигма модулятора, SPI интерфейса и других блоков.

Мультиплексирование аналоговых каналов

Мультиплексирование аналоговых каналов (объединение данных с нескольких каналов (электродов) в общий поток для обработки одним АЦП) в предлагаемом подходе к анализу состояния сердца позволяет уменьшить аппаратные затраты на жилет, количество линий передач ЭКС и более эффективно использовать АЦП.

Важной характеристикой мультиплексирования является скорость переключения между каналами. Эта скорость должна быть достаточно высокой, чтобы данные с каждого канала обновлялись с требуемой частотой дискретизации. Например, если для каждого из 12 каналов требуется частота дискретизации 1000 Гц, мультиплексор должен обеспечивать переключение с частотой 12 000 переключений в секунду. Для достижения синхронности всех каналов после мультиплексирования используется программное или аппаратное введение временных меток, что позволяет разделить данные для последующего анализа.

Для решения задачи многоканальной регистрации сигнала [7] необходимо выбрать наиболее оптимальный подход для достижения необходимого количества каналов с помощью формулы

$$K_{MUL} = \frac{N_{electrodes}}{N_{ADC} N_{adc\ channel}}, \quad (2)$$

где K_{MUL} – коэффициент мультиплексирования; $N_{electrodes}$ – количество множественных отведений; N_{ADC} – количество АЦП; $N_{adc\ channel}$ – количество каналов АЦП.

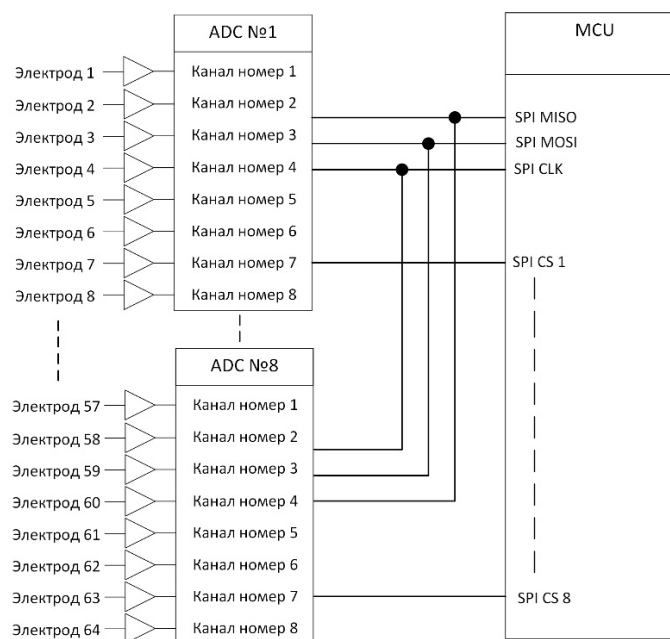
В табл. 1 представлены варианты построения многоканальной системы отведений для регистрации электрокардиосигналов при использовании специализированного для работы с биопотенциалами АЦП [8].

Таблица 1

Влияние количества АЦП на коэффициент мультиплексирования

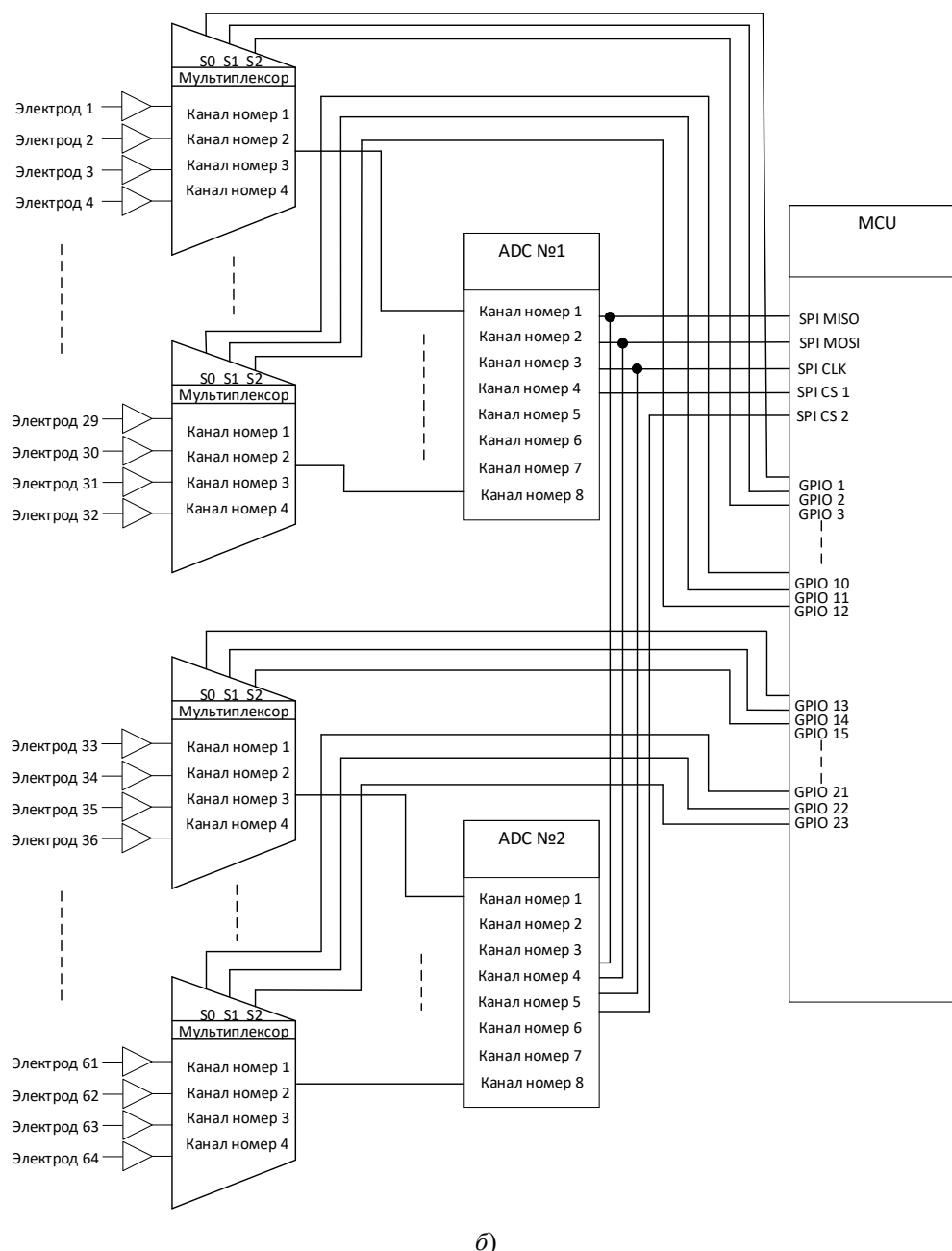
Количество каналов множественных отведений ЭКС	Количество каналов АЦП	Количество АЦП	Коэффициент мультиплексирования (K_{MS})
64	8	1	8
64	8	8	1
64	8	2	4

Структурные схемы вариантов построения модуля регистрации множественных отведений для 64 каналов с различными коэффициентами мультиплексирования приведены на рис. 3.



а)

Рис. 3. Структурная схема АЦП:
а – с коэффициентом $K_{MS} = 1$ (начало)



б)
Рис. 3. Структурная схема АЦП:
б – с коэффициентом $K_{MS} = 4$ (окончание)

Системы регистрации множественных отведений ЭКС с коэффициентом мультиплексирования выше 1 (рис. 3) требуют меньшее количество АЦП. Уменьшение количества АЦП значительно снижает конечную стоимость изделия, так как специализированные АЦП – наиболее дорогая часть системы ССНЭКД.

Результаты и обсуждение

Рассчитаем объем цифровых данных, формируемых на выходе аналого-цифрового преобразователя. Значение потенциалов ЭКС преобразуется в двоичный код согласно следующей формуле [8]:

$$DR_{adc\ channel} = \frac{U_{adc\ channel}}{U_{min}}, \quad (3)$$

где $DR_{adc\ channel}$ – двоичный код, содержащий информацию о значении потенциала; $U_{adc\ channel}$ – значение потенциала отведения; U_{min} – минимальный уровень сигнала (см. формулу 1).

Тогда объем формируемых АЦП данных о текущих значениях потенциалов множественных отведений за интервал дискретизации описывается следующей формулой:

$$ADC_{data\ size} = (N_{cmd\ size} + (DR_{adc\ channel\ size} \cdot N_{electrodes})) = (16 + (24 \cdot 64)) = 1552\ bit, \quad (4)$$

где $ADC_{data\ size}$ – размер цифрового кода в битах; N_{cmd} – размер специфической команды для АЦП, запускающей процесс преобразования, в общем случае имеет длину 16 бит [8]; $DR_{adc\ channel\ size}$ – размер цифрового кода, содержащий информацию о значении потенциала; $N_{total\ channel}$ – количество каналов.

Другими словами, объем данных, необходимых для формирования значений одного отсчета ЭКС множественных отведений, равен 1552 *bit*.

Рассчитаем общий объем формируемой информации о значениях отсчетов потенциалов множественных отведений ЭКС за интервал времени 1 с:

$$ADC_{total\ size} = F_{ECG\ sample} \cdot ADC_{data\ size} = 1000 \cdot 1552 = \frac{1552000\ bit}{8} = 194000\ byte, \quad (5)$$

где $F_{ECG\ sample}$ – частота дискретизации блока регистрации равная 1000 Гц [9]; $ADC_{data\ size}$ – размер цифрового кода в битах (см. формулу (4)).

Таким образом, в процессе аналого-цифровых преобразований за 1 с регистрации формируется массив данных равный 194 000 байтам.

Сформированный АЦП массив данных в реальном масштабе времени записывается в блок памяти модуля регистрации множественных отведений (см. рис. 1).

Следует отметить, что рассчитанный объем информации соответствует размеру данных, содержащихся в одном кардиоцикле (КЦ) с частотой сердечных сокращений (ЧСС) 60 уд./мин, или одно сокращение в секунду. Этот сердечный ритм соответствует нормальному ритму сердца. Согласно рекомендациям ВОЗ [10], нормальный сердечный ритм в покое изменяется в пределах от 55 до 80 уд./мин. ЧСС в покое от 55 до 40 уд./мин свидетельствует о брадикардии, а ЧСС в покое от 80 до 115 свидетельствует о тахикардии. Значения ЧСС в покое менее 40 и более 120 уд./мин являются жизнеугрожающими и требуют незамедлительного врачебного вмешательства.

С учетом сказанного объем информации, соответствующий размеру данных, содержащихся в одном КЦ с ЧСС 40 уд./мин, будет равен 129 334 байт, а с ЧСС 115 уд./мин будет равен 371 834 байт.

Для расчета фактической скорости получения данных о группе каналов был собран прототип, представленный на рис. 4, состоящий из двух специализированных 8-канальных АЦП [8], размещенных на отдельных печатных платах, отладочной платы с микроконтроллером [11].

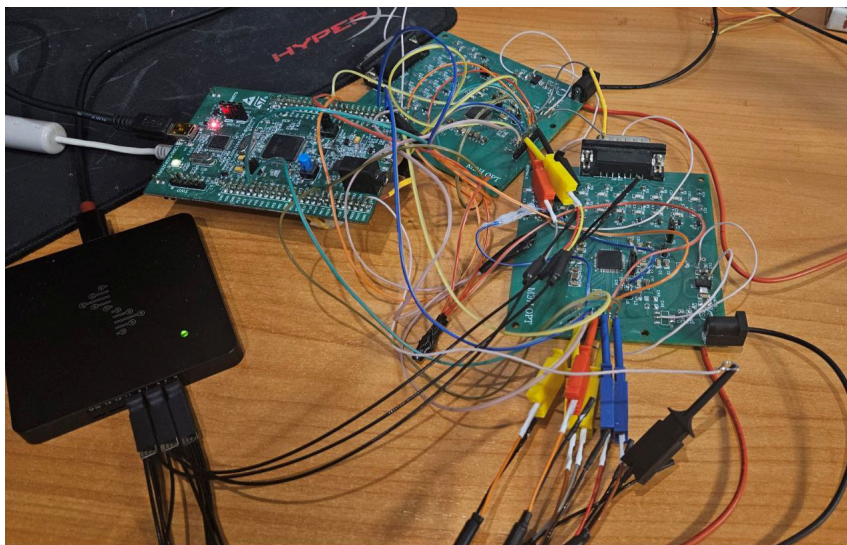


Рис. 4. Макет для расчета скорости передачи и коэффициента мультиплексирования

Для анализа времени получения данных о группе каналов множественных отведений ЭКС к макету (на рис. 4) был подключен логический анализатор [12].

На рис. 5 нулевой канал логического анализатора подключен к линии SPI MISO, 1-й канал к SPI MOSI. 2-й канал к SPI CLK, 3-й канал к SPI CS первого АЦП, 4-й канал к SPI CS второго АЦП, 5-й канал к DRDY (сигнал оповещения о готовности данных) первого АЦП, 6-й канал к DRDY второго АЦП, 7-й и 8-й каналы подключены к сигналу START – начало преобразований.

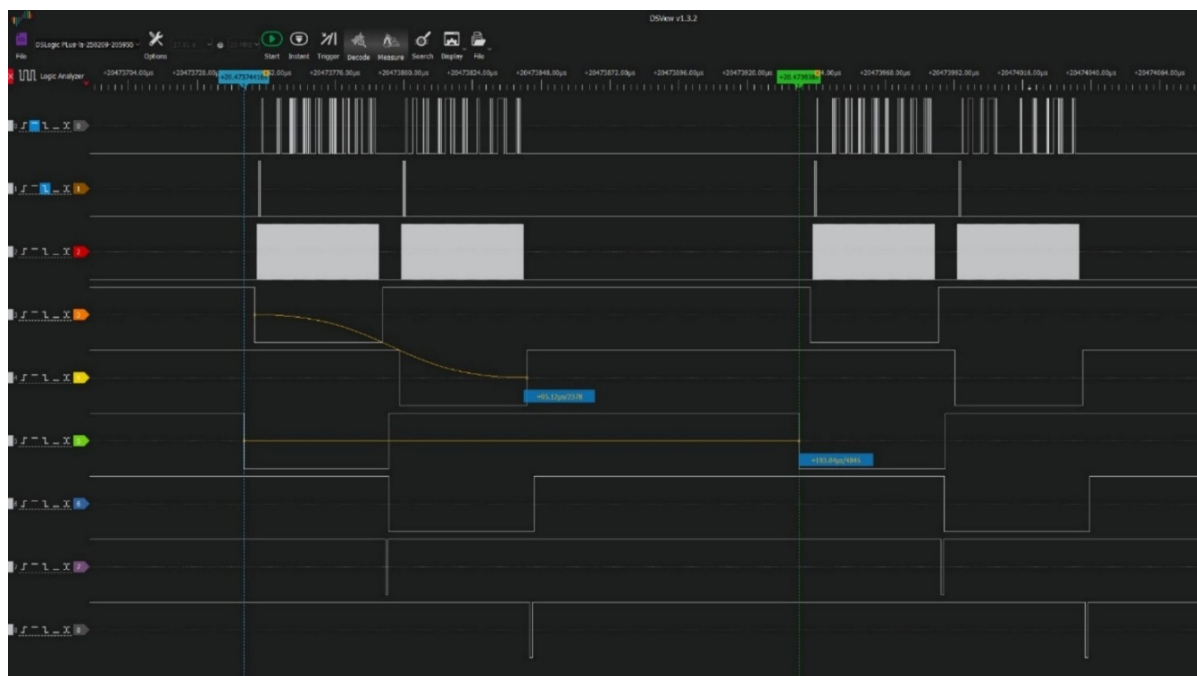


Рис. 5. Временные диаграммы процесса регистрации группы отведений

На рис. 5 интервал времени между спадающим фронтом сигнала на канале 5 и следующим спадающим фронтом, после изменения потенциала на канале 7, соответствует интервалу опроса двух 8-канальных АЦП и равно 193 мкс.

Таким образом, получение данных о 16 каналах занимает 193 мкс.

Выбор коэффициента мультиплексирования зависит от следующих факторов: требуемая частота дискретизации системы, фактическое время получения данных о группе каналов и скорость переключения мультиплексора:

$$K_{MUL_MAX} = \frac{1}{\frac{F_{ECG\ sample}}{t_{obtain\ data} + t_{mul\ switch}}} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{(193 \cdot 10^{-6}) + (1 \cdot 10^{-6})} = 5,155, \quad (6)$$

где $F_{ECG\ sample}$ – требуемая частота дискретизации системы, равная 1000 Гц; $t_{obtain\ data}$ – фактическое время получения данных о группе каналов, равное 193 мкс; $t_{mul\ switch}$ – время переключения мультиплексора (с учетом формирования сигнала с микроконтроллера).

Из этого следует, что максимальный коэффициент мультиплексирования, удовлетворяющий требованиям системы, может быть не выше 5. Для реализации задачи множественной регистрации ЭКС согласно табл. 1 и формулам (2), (6) коэффициент мультиплексирования ССНЭКД был выбран 4. Это позволило реализовать систему регистрации, используя только два специализированных 8-канальных АЦП, при этом значительно снизив стоимость изделия и сохранив свободное место на печатной плате.

Заключение

Функционирование ССНЭКД с множественной регистрацией электрокардиосигналов соответствует парадигме современного здравоохранения на ориентацию ранней диагностики и профилактики заболеваний.

На основе проведенных анализа, макетирования и моделирования выбран по критериям стоимости и быстродействия способ построения АЦП с коэффициентом мультиплексирования, равным 4, в ССНЭКД с множественной регистрации ЭКС.

Список литературы

1. Бокерия Л. А., Голухова Е. З. Клиническая кардиология: диагностика и лечение : в 3 т. М. : Издательство НЦССХ им. А. Н. Бакулева, 2011. 1711 с.
2. Амиров Р. З. Интегральные топограммы потенциалов сердца. М. : Наука, 1973. 108 с.
3. Пат. 2651068 Российская Федерация. Способ неинвазивного определения электрофизиологических характеристик сердца / Бодин А.Ю. [и др.]. № 2017123613 ; заявл. 05.07.2017 ; опубл. 18.04.2018, Бюл. № 11.
4. Крамм М. Н. Методика расчета ЭКГ-карт наружных потенциалов для модели торса человека в виде эллиптического цилиндра // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии : докл. 10-й Междунар. науч.-техн. конф. (ФРЭМЭ 2012). Владимир, 2012. Кн. 1. С. 208–211.
5. Пат. 2764498 Российская Федерация. Способ и устройство регистрации множественных отведений электрокардиосигнала / Бодин А.Ю. [и др.]. № 2020122154 ; заявл. 03.07.2020 ; опубл. 17.01.2022, Бюл. № 2.
6. Карпов О. Э., Храмов А. Е. Информационные технологии, вычислительные системы и искусственный интеллект в медицине. М. : ДПК Пресс, 2022, 480 с.
7. Бодин А. Ю., Крамм М. Н., Бодин О. Н. [и др.]. Особенности регистрации множественных отведений электрокардиосигналов // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии : сб. докл. XV Междунар. науч. конф. (ФРЭМЭ 2022). Владимир, 2022.
8. Специализированные АЦП ADS1298 // Texas Instrument. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/sym-link/ads1296r.pdf>
9. Analog Device. Дельта-сигма АЦП. URL: <https://www.analog.com/en/technical-articles/precision-sar-sigma-delta-converters.html>
10. Рекомендации по вопросам физической активности и малоподвижного образа жизни // Всемирная организация здравоохранения. URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/337001/9789240014909-rus.pdf>
11. Отладочные платы STM32F4DISCOVERY // STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html>
12. Логический анализатор // Dreame Source Lab. URL: <https://www.dreamsourcelab.com/product/dslogic-series>

References

1. Bokeriya L.A., Golukhova E.Z. *Klinicheskaya kardiologiya: diagnostika i lechenie: v 3 t. = Clinical cardiology: diagnosis and treatment : in 3 volumes*. Moscow: Izdatel'stvo NTsSSKh im. A.N. Bakuleva, 2011:1711. (In Russ.)
2. Amirov R.Z. *Integral'nye topogrammy potentsialov serdtsa = Integral topograms of heart potentials*. Moscow: Nauka, 1973:108. (In Russ.)
3. Pat. 2651068 Russian Federaton. A method for noninvasive determination of electrophysiological characteristics of the heart. Bodin A.Yu. et al. № 2017123613; appl. 05.07.2017; publ. 18.04.2018, Bull. № 11. (In Russ.)
4. Kramm M.N. Methodology for calculating ECG maps of external potentials for a model of the human torso in the form of an elliptical cylinder. *Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii: dokl. 10-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (FREME 2012) = Physics and radio electronics in medicine and ecology : reports of the 10th International scientific and technical conf. (FRAME 2012)*. Vladimir, 2012;(bk.1):208–211. (In Russ.)
5. Pat. 2764498 Russian Federation. Method and device for recording multiple leads of an electrocardiosignal. Bodin A.Yu. et al. № 2020122154; appl. 03.07.2020; publ. 17.01.2022, Bull. № 2. (In Russ.)
6. Karpov O.E., Khramov A.E. *Informatsionnye tekhnologii, vychislitel'nye sistemy i iskusstvennyy intellekt v meditsine = Information technologies, computing systems and artificial intelligence in medicine*. Moscow: DPK Press, 2022:480. (In Russ.)
7. Bodin A.Yu., Kramm M.N., Bodin O.N. et al. Features of registration of multiple leads of electrocardiosignals. *Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii: sb. dokl. XV Mezhdunar. nauch. konf. (FREME 2022) = Physics and radio electronics in medicine and ecology : collection of reports of the XV International scientific conf. (FRAME 2022)*. Vladimir, 2022. (In Russ.)
8. Specialized ADS1298 ADC. Texas Instrument. Available at: <https://www.ti.com/lit/ds/sym-link/ads1296r.pdf>
9. Analog Device. *Del'ta-sigma ATsP*. Available at: <https://www.analog.com/en/technical-articles/precision-sar-sigma-delta-converters.html>

10. Recommendations on physical activity and a sedentary lifestyle. *Vsemirnaya organizatsiya zdoravookhraneniya = World Health Organization*. (In Russ.). Available at: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/337001/9789240014909-rus.pdf>
11. STM32F4DISCOVERY debugging boards. *STMicroelectronics*. (In Russ.). Available at: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html>
12. Logic Analyzer. *Dream Source Lab*. Available at: <https://www.dreamsourcelab.com/product/dslogic-series>

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Юрьевич Бодин

аспирант,
Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
(Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 17, стр. 1Г)
E-mail: Bodin98@mail.ru

Andrey Yu. Bodin

Postgraduate student,
National Research University "MPEI"
(build. 1G, 17 Krasnokazarmennaya street,
Moscow, Russia)

Олег Николаевич Бодин

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой биомедицинской инженерии,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Oleg N. Bodin

Doctor of technical sciences, professor,
head of the sub-department of biomedical engineering,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukova passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

Михаил Николаевич Крамм

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры основ радиотехники,
Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
(Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 17, стр. 1Г)
E-mail: krammmn@mail.ru

Mikhail N. Kramm

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of fundamentals of radio engineering,
National Research University "MPEI"
(build. 1G, 17 Krasnokazarmennaya street,
Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 02.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 01.04.2025

Принята к публикации / Accepted 05.05.2025