

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 612.122.1

Салахлы
Саид Айдын оглы

Моделирование измерения глюкозы в межклеточной жидкости человека

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание степени магистра

по специальности 7-06-0713-02 Электронные системы и технологии

Научный руководитель

Осипов Анатолий Николаевич
кандидат технических наук, доцент

Минск 2025

ВВЕДЕНИЕ

В мире насчитывается более 400 млн людей, страдающих сахарным диабетом, – это около 5 % населения Земли. Болезнь представляет наибольшую опасность из-за сопутствующих осложнений, среди которых атеросклероз, почечная недостаточность, слепота и другие. Своевременная оценка концентрации глюкозы в крови и вовремя принятые меры для поддержания ее в допустимых пределах помогают сохранять здоровье и жизнь сотням тысяч людей.

На сегодняшний день существуют инвазивные, минимально инвазивные и неинвазивные методы мониторинга глюкозы, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Инвазивные методы, несмотря на высокую точность, связаны с необходимостью забора крови, что снижает комфорт пациента и ограничивает их применение в режиме непрерывного мониторинга. В этой связи всё большее внимание уделяется флуоресцентным методам определения концентрации глюкозы в биологических жидкостях, которые позволяют реализовать непрерывный и минимально инвазивный контроль уровня сахара в крови.

Флуоресцентные сенсоры, благодаря своей высокой чувствительности, селективности и возможности миниатюризации, находят широкое применение в клинической практике и перспективны для создания имплантируемых и носимых устройств. Однако развитие таких систем сталкивается с рядом трудностей, включая влияние автофлуоресценции, фотобелизны, а также временного лага между уровнем глюкозы в крови и межклеточной жидкости. Эти особенности требуют разработки эффективных алгоритмов обработки сигналов, обеспечивающих высокую точность и надёжность измерений.

Целью настоящего исследования является разработка модели процесса измерения глюкозы подкожным датчиком на основе флуоресцентного метода и анализ алгоритмов фильтрации сигнала измерительного модуля флуоресцентного датчика глюкозы, а также компенсация временной задержки между изменением концентрации глюкозы в крови и её отражением в межклеточной жидкости. Решение этих задач позволит повысить информативность и достоверность получаемых данных, что особенно важно при использовании флуоресцентных сенсоров в системах непрерывного мониторинга уровня глюкозы у пациентов с сахарным диабетом.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики

Тема диссертационной работы соответствует пункту 1 «Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии» приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 годы, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь № 156 от 7 мая 2020 г. Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Практическая ценность работы состоит в создании алгоритма фильтрации сигнала измерительного датчика для определения концентрации глюкозы в межклеточной жидкости.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является моделирование процесса измерения глюкозы подкожным датчиком для повышения точности измерений.

В соответствии с поставленной целью в работе сформированы и решены следующие задачи:

- исследовать спектральные характеристики шумов датчика глюкозы, реализованного на основе флюоресцентного метода;
- выбрать фильтры, обеспечивающие наилучшую фильтрацию шумов и внешних помех, возникающих в датчике глюкозы;
- разработать компьютерную модель процесса измерения глюкозы подкожным датчиком;
- провести компьютерное моделирование и оценить влияние помех и шумов на точность измерения глюкозы;
- разработать модель прогнозирования уровня глюкозы в крови на основе данных измерения во внеклеточной жидкости.

Научная новизна и значимость полученных результатов

Научная новизна работы заключается в разработке в среде MATLAB компьютерной модели процесса измерения глюкозы на основе флюоресцентного метода.

Научная значимость заключается в получении количественных оценок влияния шумов измерительного тракта и внешних помех на точность измерения глюкозы.

Положения, выносимые на защиту

Метод фильтрации шумов измерительного канала посредством комбинации медианного и фильтра Баттерворта.

Компьютерная модель процесса измерения глюкозы подкожным датчиком на основе флуоресцентного метода.

Компьютерная модель прогнозирования измерения глюкозы в крови на основе данных измерения во внеклеточной жидкости со средней абсолютной процентной ошибкой 5,83%.

Оценка влияния шума и помех на точность измерения глюкозы, показавшая погрешность измерения 3,2% при уровне шума 5 мВ.

Личный вклад соискателя

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в моделировании сигнала подкожного датчика глюкозы, создании методики подбора оптимального фильтра и написании алгоритма фильтрации сигнала подкожного датчика измерения глюкозы в межклеточной жидкости.

Апробация результатов диссертации

- XIV Международная научно-техническая конференция «Медэлектроника 2024» Минск, 5-6 декабря 2024 года.
- LXIX Международная научно-практическая конференция «Eurasiascience», Москва, 15 мая 2025.

Опубликованность результатов диссертации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 4 печатных работах. В их числе 2 статьи в сборниках материалов научных конференций и 2 тезисов докладов на научных конференциях.

Структура и объем работы

Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трех глав и заключения,

библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации – 55 страниц. Работа содержит 6 таблиц, 33 рисунка. Библиографический список включает 27 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ современных методов контроля уровня глюкозы, включая инвазивные (электрохимические, фотометрические) и неинвазивные (спектроскопические, фотоакустические, рамановские) технологии. Особое внимание уделено флуоресцентным датчикам, как перспективному направлению для непрерывного мониторинга. Рассмотрены их преимущества (высокая чувствительность, минимальная инвазивность) и ключевые проблемы (влияние шумов, временной лаг между кровью и межклеточной жидкостью).

Во второй главе исследованы методы предварительной обработки сигнала, включая медианную фильтрацию для устранения импульсных шумов. Проведен спектральный анализ для определения частотных характеристик полезного сигнала и помех. Рассмотрены типы цифровых фильтров (КИХ, БИХ), их преимущества и недостатки. Обоснован выбор БИХ-фильтров для обработки сигналов датчика. Разработаны критерии оценки качества фильтрации на основе когерентного анализа.

Третья глава посвящена сравнительному анализу фильтров (медианного, Чебышева, Баттерворта) для подавления шумов. Показано, что комбинация медианного фильтра и ФНЧ Баттерворта обеспечивает наилучшее сохранение полезного сигнала при эффективном устранении высокочастотных помех. Проведен когерентный анализ, подтвердивший высокую степень линейной связи (когерентность $>0,99$ на низких частотах) между исходным и отфильтрованным сигналами.

В четвертой главе представлена структурная схема модели обработки сигнала датчика, включая блоки компенсации систематических помех и временной задержки. Для прогнозирования уровня глюкозы в крови на основе данных межклеточной жидкости применен фильтр Калмана, снизивший среднюю абсолютную ошибку до 2,83%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационного исследования были разработаны и проанализированы алгоритмы обработки сигналов подкожного датчика глюкозы, основанного на флуоресцентном методе измерения. Результаты работы показали, что комбинация медианного фильтра и фильтра Баттерворта обеспечивает эффективное подавление шумов и помех, сохраняя при этом информативную часть сигнала. Так, максимальные значения когерентности (близкие к 1) наблюдались на частотах ниже 5 Гц.

Особое внимание было уделено временной задержке между изменениями уровня глюкозы в крови и межклеточной жидкости. Применение фильтра Калмана позволило компенсировать эту задержку и улучшить прогнозирование уровня глюкозы в крови на основе данных непрерывного мониторинга. Средняя абсолютная ошибка прогнозирования составила 2,83%, что подтверждает высокую эффективность предложенного метода.

Было проведено моделирование сигнала подкожного датчика измерения глюкозы. Проведенные исследования выявили предельно допустимые уровни шумов и помех, при которых погрешность измерений не превышает 15%. Это важно для практического применения разработанных алгоритмов в клинических условиях.

Таким образом, результаты диссертационной работы вносят значительный вклад в развитие методов неинвазивного и минимально инвазивного мониторинга глюкозы. Разработанные алгоритмы фильтрации и компенсации временной задержки могут быть использованы для создания более точных и надежных систем непрерывного контроля уровня глюкозы.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1–А. Салахлы, С.А. Моделирование алгоритма измерения глюкозы / С.А. Салахлы, А.Н. Осипов, В.С. Гавриленко, Е.А. Зуев // Материалы XIV Международной научно-технической конференции «Медэлектроника – 2024» – Минск, 2024. – С. 222-225.

2–А. Зуев, Е.А. Алгоритм поиска отпечатка стопы на плантограмме / Е.А. Зуев, А.В. Чураков, С.А. Салахлы, Т.С. Смольская, Э.В. Друц, В.С. Гавриленко // Материалы XIV Международной научно-технической конференции «Медэлектроника – 2024» – Минск, 2024. – С. 234-236.

3–А. Салахлы С. А Оптимизация цифровой обработки сигнала в системах непрерывного мониторинга глюкозы // Сборник статей LXIX международной научно-практической конференции «Eurasiascience». – Москва: «Научно-издательский центр «Актуальность.РФ», 2025. – с. 162-164.

4–А Салахлы С. А Методы обработки сигнала подкожного датчика глюкозы // Сборник статей LXX Международной научно-практической конференции «Eurasiascience». – Москва: «Научно-издательский центр «Актуальность.РФ», 2025 (в печати).