Дмитрий Викторович Мясоедов – старший преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3279-0994.

Рашид Нагимович Назаров – преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей. Қазақстан; e-mail: naz-2009@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Авторлар туралы мәліметтер

Бақытгүл Қадырханқызы Копабаева – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: kbahyt_73@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5387-507X.

Александр Дмитриевич Золотов* – техника ғылымдарының кандидаты, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Индира Бекенқызы Қарымсақова – PhD, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: indviki@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1496-3188.

Дмитрий Викторович Мясоедов – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы; Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3279-0994.

Рашид Нағимұлы Назаров – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушысы, Shakarim university, Семей. Қазақстан; e-mail: naz-2009@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Information about the authors

Bakhytgul Kopabayeva – doctoral student at the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: kbahyt_73@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5387-507X.

Alexander Zolotov* – candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Indira Karymsakova – PhD, associate professor at the department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: indviki@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1496-3188.

Dmitry Myasoedov – Senior Lecturer at the Department of Automation and Information Technology, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3279-0994.

Nazarov Rashid – Lecturer at the Department of Automation and Information Technology, Shakarim University, Semey. Kazakhstan; e-mail: naz-2009@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Поступила в редакцию 01.06.2026
Поступила после доработки 01.08.2026
Принята к публикации 18.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-13

МРНТИ: 59.14.31

CC BY 4.0
Check for updates

Е. Жантлесов[*], С. Алтынбек[2], В. Грузин[1], А.Тогусов[3], М. Шекеев[4]
[1]ТОО «R&D Центр» «Казахстан инжиниринг»,
Республика Казахстан, г. Астана, улица Ауэзова 2, н.п.1.
[2]ESIL University-Astana, Республика Казахстан, г. Астана, ул. А. Жубанова, 7
[3]Департамент военного образования и науки МО РК,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Достык, 14
[4]Школа № 220, Республика Казахстан, г. Алматы
[*]e-mail: Yerbolzh@mail.ru

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ МНОГОКАНАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ СИНХРОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ

Аннотация: *В статье представлена программно-аппаратная архитектура многоканального измерительного модуля, предназначенного для синхронной регистрации,*

©Е. Жантлесов, С. Алтынбек, В. Грузин, А.Тогусов, М. Шекеев, 2026

аппаратной обработки и передачи цифровых данных. Предложенная архитектура основана на использовании восьми аналого-цифровых преобразователей AD9226 и программируемой логической интегральной схемы Xilinx Spartan-6 XC6SLX9, обеспечивающей синхронный захват данных, формирование цифровых кадров и их передачу по двухпроводному интерфейсу DATA–CLK. Разработан кадровый протокол передачи данных, обеспечивающий контроль последовательности кадров, автоматическое восстановление синхронизации при ошибках передачи и возможность масштабирования системы. Изготовлен и экспериментально исследован прототип восьмиканального измерительного модуля, подтвердивший корректность синхронной регистрации сигналов, устойчивость передачи данных и работоспособность FPGA-алгоритмов и специализированного программного обеспечения. Полученные результаты подтверждают возможность применения предложенной архитектуры при создании масштабируемых многоканальных информационно-измерительных систем для цифровой обработки сигналов.

Статья подготовлена в рамках выполнения научного проекта грантового финансирования на 2024-2026 годы ИРН AP 234042/0223 «Обоснование параметров и разработка системы обнаружения и визуализации источников радиоизлучения» (исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан).

Ключевые слова: *программно-аппаратная архитектура, многоканальный измерительный модуль, синхронная регистрация сигналов, FPGA; Xilinx Spartan-6, аналого-цифровое преобразование, цифровая обработка сигналов, кадровый протокол, многоканальные информационно-измерительные системы.*

Введение

Развитие цифровых информационно-измерительных систем сопровождается увеличением требований к скорости регистрации сигналов, объёму обрабатываемой информации и точности пространственного анализа. Многоканальная синхронная регистрация данных сегодня является основой работы широкого класса технических систем, включая ультразвуковую диагностику, средства неразрушающего контроля, интеллектуальные транспортные комплексы, робототехнические системы, беспилотные транспортные средства, цифровые антенные решётки, системы радиочастотного мониторинга и оборудование для настройки базовых станций беспроводной связи.

Объединяющим признаком таких систем является наличие нескольких пространственно разнесённых приёмных каналов, данные с которых должны регистрироваться одновременно с высокой временной точностью [1]. Только при выполнении этого условия становится возможным применение методов цифрового формирования диаграммы направленности, пространственной фильтрации, корреляционной обработки, когерентного накопления и определения координат источников сигналов. Поэтому качество синхронизации измерительных каналов и стабильность их характеристик оказывают непосредственное влияние на точность последующей обработки.

В настоящее время доступны различные платформы сбора данных и программно-определяемые радиосистемы, однако большинство из них рассчитано либо на небольшое число каналов, либо требует применения дорогостоящих высокоскоростных аналого-цифровых преобразователей и программируемых логических интегральных схем. Кроме того, коммерческие решения нередко содержат функции, не востребованные в специализированных измерительных комплексах, что приводит к увеличению стоимости оборудования и ограничивает возможности его адаптации под конкретные задачи.

Одним из эффективных способов построения многоканальных измерительных систем является использование модульной архитектуры. В этом случае отдельные измерительные модули выполняют синхронную регистрацию сигналов, формирование цифровых кадров и передачу информации в вычислительную систему. Такой подход позволяет рационально использовать аппаратные ресурсы, упростить модернизацию комплекса и при необходимости увеличить количество измерительных каналов без изменения принципов построения всей системы.

В настоящей работе рассматривается архитектура восьмиканального измерительного модуля, предназначенного для синхронной регистрации промежуточных сигналов с частотой до 5 МГц [2]. При разработке устройства были определены основные параметры системы, включая частоту дискретизации, разрядность аналого-цифрового преобразования, объём регистрируемых данных и аппаратную платформу цифровой обработки. Все операции синхронного захвата информации, формирования цифровых кадров и передачи данных

реализованы аппаратно на базе программируемой логической интегральной схемы, что обеспечивает детерминированное время обработки и позволяет использовать модуль в составе масштабируемых многоканальных измерительных комплексов.

Целью работы является разработка и экспериментальная проверка восьмиканального измерительного модуля, обеспечивающего синхронную регистрацию промежуточных сигналов, аппаратное формирование цифровых кадров и передачу данных в вычислительную систему для их последующей пространственной обработки и анализа.

Методы и материалы

Методика разработки измерительного модуля предусматривает синхронную регистрацию аналоговых сигналов по нескольким измерительным каналам с их последующим аналого-цифровым преобразованием, аппаратной обработкой и передачей результатов в вычислительную систему. Такой подход предназначен для построения многоканальных измерительных комплексов, в которых пространственная обработка сигналов требует высокой точности определения амплитудных и фазовых соотношений между каналами. Достижение необходимой точности обеспечивается синхронной регистрацией сигналов и идентичностью характеристик всех измерительных трактов [3-5].

Разработка измерительного модуля проводилась поэтапно. На первом этапе были определены требования к параметрам регистрации сигналов и сформированы основные технические характеристики системы. Далее выполнен выбор элементной базы, после чего разработана аппаратная архитектура устройства и изготовлен экспериментальный образец. Заключительным этапом стали экспериментальные исследования, направленные на проверку работоспособности разработанного модуля.

Структурная схема измерительной системы представлена на рисунке 1.

Разработанный модуль включает восемь независимых каналов аналого-цифрового преобразования, синхронизируемых общим источником тактовой частоты. В каждом канале используется аналого-цифровой преобразователь AD9226, обеспечивающий регистрацию входных сигналов. Управление процессом синхронного сбора данных, их временное буферизование, формирование цифровых кадров и организация последовательной передачи информации реализованы аппаратно на программируемой логической интегральной схеме Xilinx Spartan-6 XC6SLX9, установленной на плате Mojo FPGA [6].

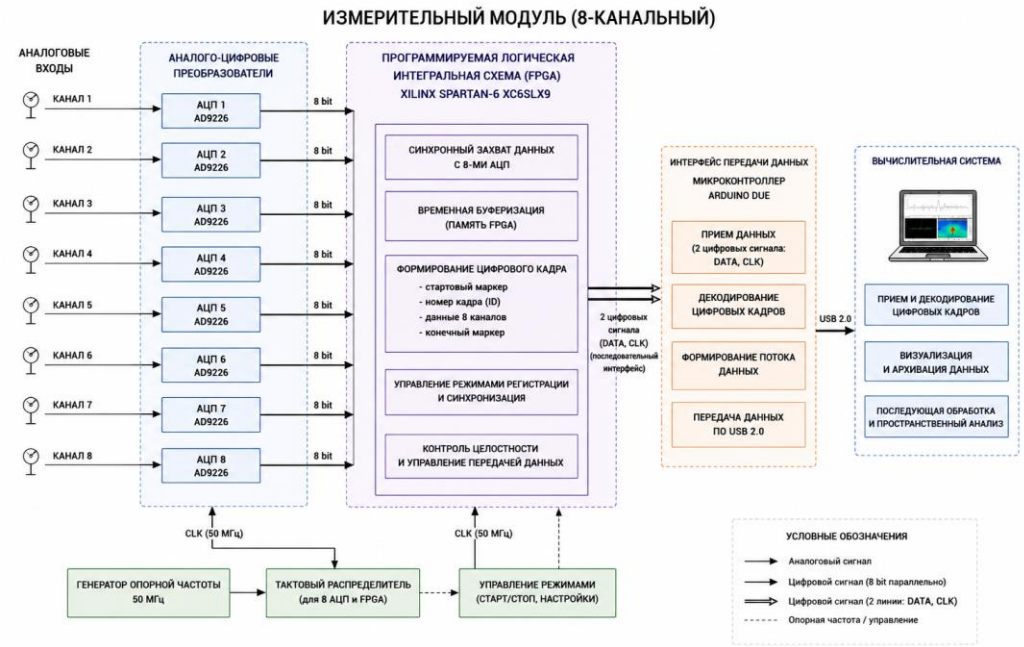


Рисунок 1 – Структурная схема измерительной электроники

При проектировании измерительного модуля особое внимание уделялось обеспечению синхронной регистрации сигналов во всех измерительных каналах. С этой целью все аналого-цифровые преобразователи работают от общего источника тактовой

частоты 50 МГц, что обеспечивает совпадение моментов дискретизации и исключает временные рассогласования между каналами. После преобразования цифровые данные одновременно поступают в FPGA, где выполняются их синхронный захват, временная буферизация и объединение в единый цифровой кадр.

Формирование кадров осуществляется аппаратными средствами FPGA без участия центрального процессора. Каждый кадр содержит стартовый маркер, номер кадра, данные восьми измерительных каналов и конечный маркер. Использование уникального номера кадра позволяет контролировать последовательность передаваемой информации и обеспечивает корректную синхронизацию программного обеспечения при её приёме.

Обмен данными между измерительным модулем и микроконтроллером организован по двум цифровым линиям: линии передачи данных (DATA) и линии синхронизации (CLK). Такое решение позволило существенно сократить количество межсоединений без нарушения временной согласованности передаваемой информации. Приём последовательного потока выполняет микроконтроллер Arduino Due, который декодирует сформированные FPGA кадры и передаёт их в персональный компьютер по интерфейсу USB.

При создании многоканальных измерительных комплексов важным требованием является возможность увеличения числа измерительных каналов без изменения архитектуры аппаратной и программной частей системы. В задачах цифрового формирования диаграммы направленности, цифровой фокусировки и пространственной реконструкции количество одновременно работающих каналов может достигать 128–256 и более. Реализация подобных систем на одной печатной плате значительно усложняет трассировку высокоскоростных соединений, снижает технологичность изготовления и затрудняет дальнейшую модернизацию.

Поэтому разработанная система имеет модульную структуру [7]. Её базовым элементом является восьмиканальный измерительный модуль, включающий восемь аналого-цифровых преобразователей и программируемую логическую интегральную схему, выполняющую регистрацию, буферизацию и передачу данных. Расширение системы достигается простым добавлением новых идентичных модулей, что позволяет наращивать количество измерительных каналов без изменения принципов построения комплекса.

Вместе с тем модульная архитектура требует обеспечения единого временного основания для всех модулей. Каждый FPGA запускается внешним триггерным сигналом, однако различия во времени его распространения по соединительным линиям, а также особенности инициализации отдельных устройств могут привести к смещению начала регистрации данных. Даже рассогласование в один такт способно существенно снизить эффективность последующей когерентной обработки сигналов.

Для обеспечения синхронной работы всех измерительных модулей используется отдельная линия синхронизации, по которой одновременно передаётся общий тактовый сигнал частотой 50 МГц. Передача каждого информационного бита осуществляется относительно этого сигнала, благодаря чему для всех модулей формируется единая временная шкала независимо от момента их запуска. По второй цифровой линии последовательно передаются данные, сформированные FPGA [8].

При передаче больших объёмов цифровой информации возможны одиночные ошибки или потеря отдельных битов. В непрерывном последовательном потоке такие нарушения приводят к смещению границ кадров и потере синхронизации между передающей и принимающей сторонами.

Для повышения помехоустойчивости разработан собственный кадровый протокол передачи данных, обеспечивающий автоматическое восстановление синхронизации после возникновения ошибок. Каждый кадр имеет фиксированный формат и включает пять последовательных полей (рис. 2).

В качестве признака начала кадра используется уникальная двоичная последовательность 01100, за которой передаётся двенадцатиразрядный идентификатор кадра FRAME_NUMBER[11:0]. После него следует разделительный маркер 0011100, однозначно обозначающий начало информационной части. Полезные данные имеют длину 64 бита, что соответствует одновременной передаче результатов измерений восьми каналов. Завершает кадр стоп-маркер 00111111111100, используемый для определения окончания передачи и контроля корректности приёма.

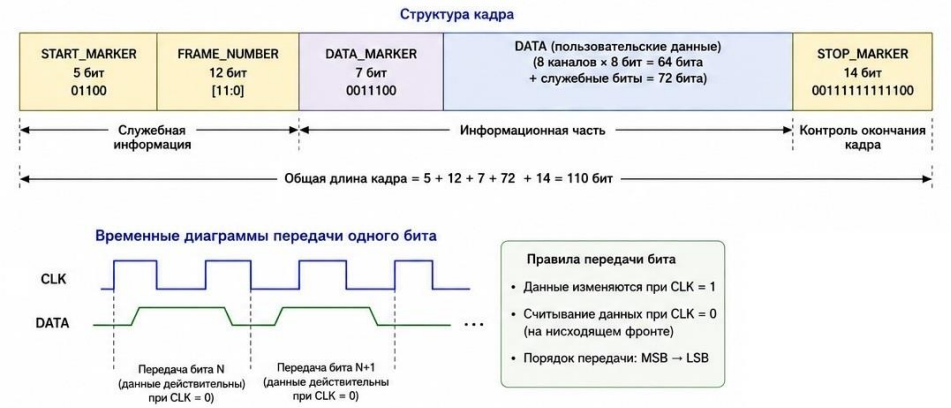


Рисунок 2 – Протокол передачи данных

Применение уникальных стартового, разделительного и конечного маркеров позволяет автоматически восстановить синхронизацию при возникновении ошибок передачи отдельных битов. В случае потери синхронизации принимающее программное обеспечение анализирует входной поток до обнаружения очередного стартового маркера, после чего корректно определяет границы кадра и продолжает приём данных без остановки измерительной системы.

Разработанный кадровый протокол обеспечивает возможность масштабирования системы, повышает устойчивость передачи данных к ошибкам и поддерживает синхронную работу большого количества измерительных модулей. Это позволяет использовать предложенную архитектуру при построении распределённых измерительных комплексов, содержащих 64, 128, 256 и более измерительных каналов.

Выбор основных параметров измерительного модуля осуществлялся с учётом необходимости достижения баланса между точностью регистрации сигналов, объёмом передаваемых данных, вычислительной нагрузкой и стоимостью аппаратной реализации. В качестве промежуточной частоты принято значение 5 МГц, широко используемое в радиотехнических и измерительных системах. Частота дискретизации 50 Мвыб/с обеспечивает десять отсчётов на период сигнала, что является достаточным для реализации алгоритмов корреляционной обработки, когерентного накопления и пространственного анализа. Применение восьмиразрядного аналого-цифрового преобразования обеспечивает необходимый динамический диапазон при умеренном объёме цифровой информации, а глубина регистрации 4096 отсчётов позволяет повысить достоверность результатов последующей обработки.

Для проверки работоспособности предложенной архитектуры был изготовлен опытный образец измерительного модуля [9]. В ходе испытаний одновременно регистрировались промежуточные сигналы по восьми измерительным каналам, оценивалась корректность синхронной работы аналого-цифровых преобразователей, проверялись алгоритмы формирования цифровых кадров и исследовалась устойчивость передачи данных в вычислительную систему. Проведённые эксперименты подтвердили работоспособность разработанного решения и возможность его использования в составе масштабируемых многоканальных измерительных комплексов.

Проведённые исследования показали, что требуемые характеристики измерительной системы достигаются при рациональном выборе частоты дискретизации, разрядности аналого-цифрового преобразования, глубины регистрации данных и аппаратной платформы цифровой обработки. Основные параметры разработанного измерительного модуля приведены в таблице 1.

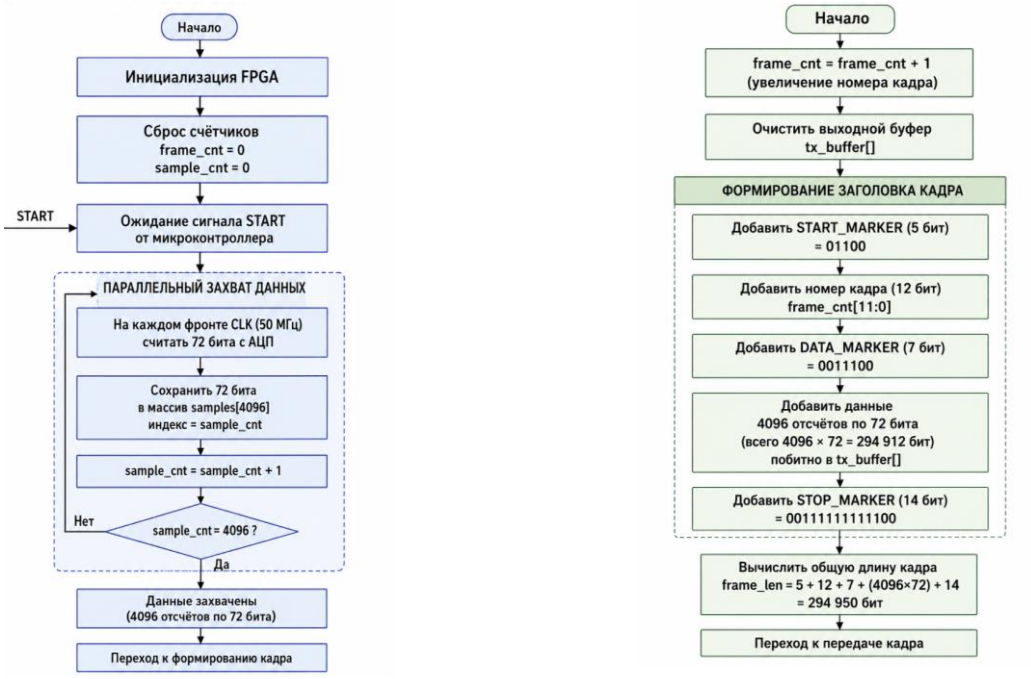
Представленные в таблице 1 параметры были реализованы в экспериментальном образце измерительного модуля и положены в основу алгоритмов функционирования программируемой логической интегральной схемы. Выбранные параметры обеспечивают достаточную точность регистрации промежуточных сигналов при сохранении умеренного

объёма передаваемых данных и позволяют реализовать обработку информации в режиме реального времени без существенного усложнения аппаратной части.

Таблица 1 – Параметры измерительного модуля

№	Параметр	Значение
1	Количество каналов:	8
2	Промежуточная частота:	5 МГц
3	Частота дискретизации:	50 Мвыб/с
4	Разрядность:	8 бит
5	Глубина регистрации:	4096 отсчётов
6	FPGA	Xilinx Spartan-6 XC6SLX9
7	Интерфейс	FPGA → МК: DATA + CLK
8	Интерфейс ПК:	USB

Основными задачами FPGA являются синхронная регистрация данных со всех измерительных каналов, аппаратное формирование цифровых кадров и организация их последовательной передачи в вычислительную систему [10]. Для реализации указанных функций разработаны специализированные алгоритмы управления процессом сбора и передачи данных, представленные на рисунках 3 и 4. На рисунке 3 приведены алгоритмы запуска измерения и формирования цифрового кадра, а на рисунке 4 – алгоритм последовательной передачи данных по двухпроводному интерфейсу DATA-CLK.



а б

а – алгоритм старта измерения; б – алгоритм формирования кадра

Рисунок 3 – Алгоритм работы программы прошивки ПЛИС по сбору данных

Как следует из рисунка 3, работа FPGA начинается после поступления сигнала запуска измерения [9]. На первом этапе выполняется инициализация внутренних счётчиков и буферов памяти, после чего осуществляется синхронный захват данных одновременно со всех восьми аналого-цифровых преобразователей. Зарегистрированные значения последовательно записываются во внутреннюю память FPGA до достижения заданной глубины регистрации. После завершения сбора данных автоматически формируется цифровой кадр передачи, включающий стартовый маркер, номер кадра, разделительный маркер, информационную часть и конечный маркер. Аппаратная реализация алгоритма обеспечивает детерминированное время обработки, исключает влияние программных задержек и гарантирует синхронность регистрации по всем измерительным каналам. После формирования кадра FPGA переходит к его последовательной передаче по двухпроводному цифровому интерфейсу DATA-CLK. Алгоритм передачи данных представлен на рисунке 4.

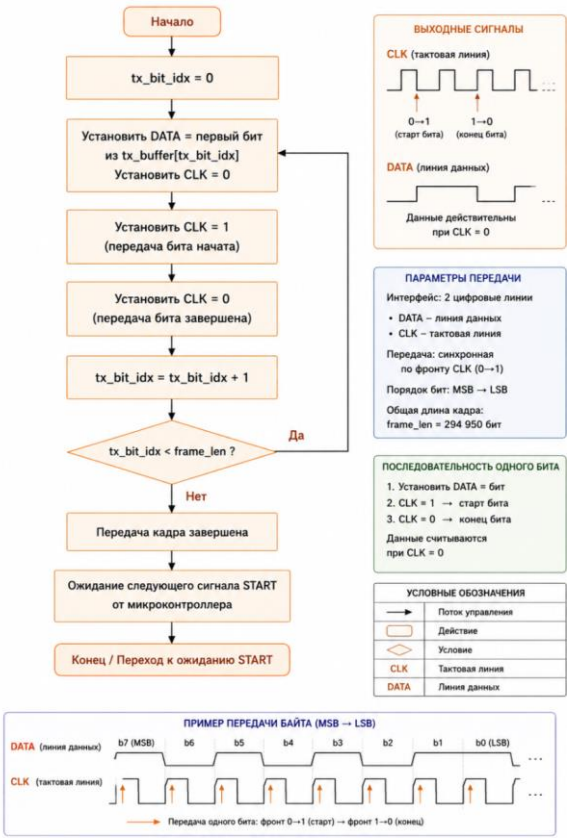


Рисунок 4 – Алгоритм передачи данных по двум цифровым линиям

Результаты

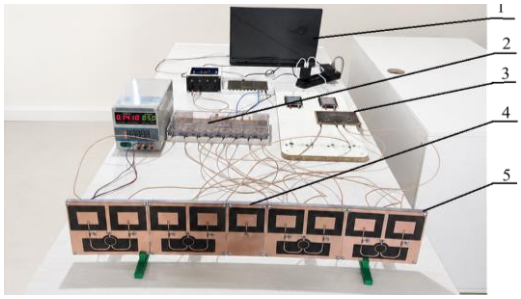
Экспериментальные исследования проводились на изготовленном восьмиканальном измерительном модуле, предназначенном для синхронной регистрации промежуточных сигналов, их аппаратной обработки и последующей передачи в вычислительную систему. В отличие от универсальных систем сбора данных, разработанное устройство ориентировано на одновременную регистрацию сигналов по нескольким каналам в режиме реального времени и может применяться в составе многоканальных измерительных комплексов, использующих методы пространственной обработки информации.

Внешний вид экспериментального образца приведён на рисунке 5. Измерительный модуль выполнен в виде компактной печатной платы, на которой размещены восемь аналого-цифровых преобразователей AD9226, программируемая логическая интегральная схема Xilinx Spartan-6 XC6SLX9, узел распределения тактовой частоты и микроконтроллер Arduino Due, осуществляющий передачу сформированных данных в персональный компьютер по интерфейсу USB.



Рисунок 5 – Экспериментальный образец восьмиканального измерительного модуля.

Для оценки практической применимости разработанный измерительный модуль был интегрирован в экспериментальный радиолокационный комплекс, предназначенный для регистрации промежуточных сигналов приёмных каналов. Структура экспериментальной установки представлена на рисунке 6.

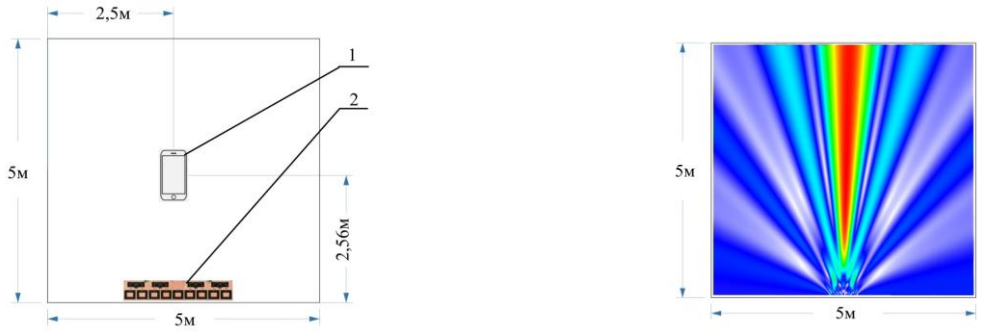


1 – вычислительный модуль для регистрации и обработки промежуточных сигналов; 2 – измерительная электроника; 3 – модуль распределения мощности; 4 – центральный излучающий элемент; 5 – восьмиканальная антенная система

Рисунок 6 – Размещение измерительного модуля в составе экспериментального радиолокационного комплекса.

В качестве источника радиоизлучения использовался смартфон Samsung S25, функционирующий в режиме точки доступа стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi) (рисунок 7, а). Принимаемые сигналы регистрировались восьмиканальной антенной системой и после гетеродинного преобразования поступали на разработанный измерительный модуль. В каждом измерительном канале выполнялось аналого-цифровое преобразование промежуточного сигнала, после чего FPGA обеспечивала синхронный захват данных, формирование цифровых кадров и их передачу в вычислительный модуль для последующей обработки.

Полученные экспериментальные данные обрабатывались разработанным специализированным программным обеспечением, реализующим приём кадров, их декодирование и алгоритмы пространственной обработки многоканальных сигналов [10]. По результатам обработки была сформирована карта пространственного распределения интенсивности принимаемого радиоизлучения, позволившая определить направление на источник излучения (рис. 7, б).



а б

а – схема проведения эксперимента; б – реконструкция изображения;
1 – сотовый телефон в качестве источника радиоизлучения; 2 – 8-канальный антенный модуль

Рисунок 7 – Схема проведения пилотных экспериментов и результаты пространственной обработки зарегистрированных сигналов

Проведённые испытания подтвердили устойчивую работу измерительного модуля при длительной непрерывной регистрации сигналов. Специализированное программное обеспечение обеспечивало приём и декодирование цифровых кадров, автоматическое восстановление синхронизации при ошибках передачи, визуализацию зарегистрированных данных и их пространственную обработку в режиме реального времени.

Модульная архитектура системы позволяет увеличивать количество измерительных каналов путём подключения дополнительных измерительных модулей без изменения принципов функционирования аппаратной и программной частей комплекса. Использование унифицированного формата цифровых кадров обеспечивает совместимость всех элементов системы и упрощает её масштабирование. Благодаря этому предложенное решение может применяться при создании многоканальных измерительных комплексов различного назначения, включая системы пространственной обработки радиосигналов, акустические массивы, ультразвуковые диагностические комплексы, системы неразрушающего контроля и интеллектуальные транспортные системы.

Заключение

В статье разработана и экспериментально проверена программно-аппаратная архитектура восьмиканального измерительного модуля для синхронной регистрации промежуточных сигналов и передачи цифровых данных в вычислительную систему. Аппаратная реализация на базе восьми аналого-цифровых преобразователей AD9226 и FPGA Xilinx Spartan-6 XC6SLX9 обеспечила одновременный захват данных по всем измерительным каналам, их временную буферизацию и формирование цифровых кадров с детерминированными временными параметрами.

Разработанный кадровый протокол с использованием стартового, разделительного и конечного маркеров, а также идентификатора кадра обеспечивает контроль последовательности передаваемых данных и автоматическое восстановление синхронизации после возникновения ошибок. Передача информации по двухпроводному интерфейсу DATA-CLK позволила сократить количество соединений при сохранении временной согласованности цифрового потока.

Экспериментальные исследования подтвердили устойчивую работу измерительного модуля при длительной регистрации сигналов, корректное функционирование FPGA-алгоритмов и специализированного программного обеспечения. В ходе пилотного эксперимента обеспечены приём, декодирование, визуализация и пространственная обработка зарегистрированных многоканальных данных в режиме реального времени.

Модульный принцип построения позволяет увеличивать количество измерительных каналов путём объединения нескольких идентичных модулей в единую синхронизированную систему. Полученные результаты показывают возможность применения предложенной архитектуры при создании масштабируемых информационно-измерительных комплексов для пространственной обработки радиосигналов, акустических массивов, ультразвуковой диагностики, неразрушающего контроля и интеллектуальных транспортных систем.

Список литературы

1. Жантлесов Е.Ж. Обоснование параметров и разработка аппаратно-программного комплекса радио- и акустической томографии статических объектов: диссертация на соискание степени доктора философии (PhD) / Е.Ж. Жантлесов // Национальный университет обороны Республики Казахстан. – Астана, 2020. – 151 с. ()
2. Грузин В.В. Классификация методов определения, измерения и обработки пространственных координат источника радиоизлучения / В.В. Грузин, Е.Ж. Жантлесов, А.В. Доля: свидетельство о внесении сведений в Государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом, № 56103. Дата регистрации: 27.03.2025.
3. Die getaktete Gruppenstrahlertechnik und ihre Anwendungen / A. Bulavinov et al // Moderne Systemtechnik bei Prüfungen mit Ultraschall : Seminar des FA Ultraschall, 12–13 November 2007. – Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, 2007. – 16 S. https://www.ndt.net/article/dgzfp-ut-2007/Inhalt/v08.pdf (дата обращения: 24.08.2026).
4. Джусупбеков Т.Х. Структура комплекса технических средств обнаружения и формирования радиолокационного портрета военной техники / Т.Х. Джусупбеков, Е.Ж. Жантлесов, А.Т. Бердибеков // Вестник Национального университета обороны Республики Казахстан. – 2022. – № 4 (95). – С. 99-103.
5. Жантлесов Е.Ж. Обоснование параметров и создание радиолокационного прибора разведки: монография / Е.Ж. Жантлесов, Т.Х. Джусупбеков, Е.Л. Макаров. – Астана: Национальный университет обороны Республики Казахстан, 2024. – 100 с.
6. Bernstein J.B. Reliability prediction with MTOL / J.B. Bernstein, A. Bensoussan, E. Bender // Microelectronics Reliability. – 2017. – Vol. 68. – P. 91-97. https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.09.005.
7. Oztekin H.A modular approach to FPGA-based microcomputer architecture design for educational purpose / H. Oztekin, F. Temurtas, A. Gulbag // Computer Applications in Engineering Education. – 2014. – Vol. 22, № 2. – P. 272-282. https://doi.org/10.1002/cae.20553.
8. Control and diagnostics system generator for complex FPGA-based measurement systems / W.M. Zabołotny et al // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 21. – Art. 7378. https://doi.org/10.3390/s21217378.
9. Жантлесов Е.Ж. Научно-техническое обоснование параметров специализированной радиостанции для задач обнаружения и пространственной визуализации источников радиоизлучения в интересах гражданской защиты и радиоэлектронной разведки / Е.Ж. Жантлесов, А.К. Тогусов, А.В. Доля // Сардар. – 2025. – № 3(51). – С. 111-120.

10. Жантлесов Е.Ж. Программное обеспечение измерительного модуля для регистрации и передачи многоканальных сигналов источников радиоизлучения : компьютерная программа / Е.Ж. Жантлесов: свидетельство о внесении сведений в Государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом, № 121996. Дата регистрации: 08.07.2026.

References

1. Zhantlesov E.Zh. Obosnovanie parametrov i razrabotka apparatno-programmnogo kompleksa radio- i akusticheskoi tomografii staticheskikh ob"ektov: dissertatsiya na soiskanie stepeni doktora filosofii (PhD) / E.Zh. Zhantlesov // Natsional'nyi universitet oborony Respubliki Kazakhstan. – Astana, 2020. – 151 s. (In Russian).
2. Gruzin V.V. Klassifikatsiya metodov opredeleniya, izmereniya i obrabotki prostranstvennykh koordinat istochnika radioizlucheniya / V.V. Gruzin, E.Zh. Zhantlesov, A.V. Dolya: svidetel'stvo o vnesenii svedenii v Gosudarstvennyi reestr prav na ob"ekty, okhranyaemye avtorskim pravom, № 56103. Data registratsii: 27.03.2025. (In Russian).
3. Die getaktete Gruppenstrahlertechnik und ihre Anwendungen / A. Bulavinov et al // Moderne Systemtechnik bei Prüfungen mit Ultraschall : Seminar des FA Ultraschall, 12–13 November 2007. – Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, 2007. – 16 S. https://www.ndt.net/article/dgzfp-ut-2007/Inhalt/v08.pdf (data obrashcheniya: 24.08.2026). (In English).
4. Dzhusupbekov T.Kh. Struktura kompleksa tekhnicheskikh sredstv obnaruzheniya i formirovaniya radiolokatsionnogo portreta voennoi tekhniki / T.Kh. Dzhusupbekov, E.Zh. Zhantlesov, A.T. Berdibekov // Vestnik Natsional'nogo universiteta oborony Respubliki Kazakhstan. – 2022. – № 4 (95). – S. 99-103. (In Russian).
5. Zhantlesov E.Zh. Obosnovanie parametrov i sozdanie radiolokatsionnogo pribora razvedki: monografiya / E.Zh. Zhantlesov, T.Kh. Dzhusupbekov, E.L. Makarov. – Astana: Natsional'nyi universitet oborony Respubliki Kazakhstan, 2024. – 100 s. (In Russian).
6. Bernstein J.B. Reliability prediction with MTOL / J.B. Bernstein, A. Bensoussan, E. Bender // Microelectronics Reliability. – 2017. – Vol. 68. – P. 91-97. https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.09.005. (In English).
7. Oztekin H.A modular approach to FPGA-based microcomputer architecture design for educational purpose / H. Oztekin, F. Temurtas, A. Gulbag // Computer Applications in Engineering Education. – 2014. – Vol. 22, № 2. – P. 272-282. https://doi.org/10.1002/cae.20553. (In English).
8. Control and diagnostics system generator for complex FPGA-based measurement systems / W.M. Zabołotny et al // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 21. – Art. 7378. https://doi.org/10.3390/s21217378. (In English).
9. Zhantlesov E.Zh. Nauchno-tekhnicheskoe obosnovanie parametrov spetsializirovannoi radiostantsii dlya zadach obnaruzheniya i prostranstvennoi vizualizatsii istochnikov radioizlucheniya v interesakh grazhdanskoi zashchity i radioehlektronnoi razvedki / E.Zh. Zhantlesov, A.K. Togusov, A.V. Dolya // Sardar. – 2025. – № 3(51). – S. 111-120. (In Russian).
10. Zhantlesov E.Zh. Programmnoe obespechenie izmeritel'nogo modulya dlya registratsii i peredachi mnogokanal'nykh signalov istochnikov radioizlucheniya : komp'yuternaya programma / E.Zh. Zhantlesov: svidetel'stvo o vnesenii svedenii v Gosudarstvennyi reestr prav na obekty, okhranyaemye avtorskim pravom, № 121996. Data registratsii: 08.07.2026. (In Russian).

Источник финансирования: *Статья подготовлена в рамках выполнения научного проекта грантового финансирования на 2024-2026 годы ИРН AP 234042/0223 «Обоснование параметров и разработка системы обнаружения и визуализации источников радиоизлучения» (исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан).*

Е. Жантлесов[*], С. Алтынбек[2], В. Грузин[1], А. Тогусов[3], М. Шекеев[4]
[1]«Kazakhstan Engineering» R&D орталығы» ЖШС,
Қазақстан Республикасы, Астана қ., Әуезов көшесі 2, н. Т. 1.
[2]ESIL University-Astana, Қазақстан Республикасы, Астана қ., а. Жұбанов к-сі, 7
[3]ҚР Қорғаныс министрлігінің Әскери білім және ғылым департаменті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Достық даңғылы, 14
[4]Алматы қ. № 220 мектеп
[*]e-mail: Yerbolzh@mail.ru

СИГНАЛДАРДЫ СИНХРОНДЫ ТІРКЕУГЕ АРНАЛҒАН КӨПАРНАЛЫ ӨЛШЕУ МОДУЛІНІҢ БАҒДАРЛАМАЛЫҚ-АППАРАТТЫҚ АРХИТЕКТУРАСЫН ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа: *Мақалада синхронды тіркеуге, аппараттық өңдеуге және цифрлық деректерді беруге арналған көпарналы өлшеу модулінің бағдарламалық-аппараттық архитектурасы ұсынылған. Ұсынылған архитектура сегіз AD9226 аналогтық-цифрлық түрлендіргіші мен Xilinx Spartan-6 XC6SLX9 бағдарламаланатын логикалық интегралдық схемасын пайдалануға негізделген. Бұл шешім деректерді синхронды қабылдауды, цифрлық кадрларды қалыптастыруды және оларды екі сымды DATA–CLK интерфейсі арқылы беруді қамтамасыз етеді. Кадрлардың реттілігін бақылауды, деректерді беру кезіндегі қателер туындаған жағдайда синхрондауды автоматты түрде қалпына келтіруді және жүйені ауқымдауға мүмкіндік беретін кадрлық деректерді беру хаттамасы әзірленді. Сегіз арналы өлшеу модулінің прототипі дайындалып, эксперименттік зерттеулер жүргізілді. Зерттеу нәтижелері сигналдарды синхронды тіркеудің дұрыстығын, деректерді берудің тұрақтылығын, FPGA алгоритмдері мен мамандандырылған бағдарламалық қамтамасыз етудің жұмысқа қабілеттілігін растады. Алынған нәтижелер ұсынылған архитектураны сигналдарды цифрлық өңдеуге арналған ауқымдалатын көпарналы ақпараттық-өлшеу жүйелерін құру кезінде қолдануға болатынын көрсетеді.*

Мақала 2024-2026 жылдарға арналған гранттық қаржыландыру бойынша ИРН AP234042/0223 «Радиоизлучение көздерін анықтау және визуализациялау жүйесінің параметрлерін негіздеу және әзірлеу» ғылыми жобасы аясында дайындалды (зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылады).

Түйін сөздер: *бағдарламалық-аппараттық архитектура; көпарналы өлшеу модулі; сигналдарды синхронды тіркеу; FPGA; Xilinx Spartan-6; аналогтық-цифрлық түрлендіру; сигналдарды цифрлық өңдеу; кадрлық хаттама; көпарналы ақпараттық-өлшеу жүйелері.*

Y. Zhantlessov[*], S. Altynbek[2], V. Gruzin[1], A. Togusov[3], M. Shekeev[4]
[1]R&D Center «Kazakhstan Engineering» LLP,
Republic of Kazakhstan, Astana, Auezov Street, 2, p. 1.
[2]ESIL University, Republic of Kazakhstan, Astana, A. Zhubanov Street, 7
[3]Department of Military Education and Science of the Ministry of Defense of the Republic of Kazakhstan,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Dostyk Avenue, 14
[4]School № 220 in Almaty, Republic of Kazakhstan
[*]e-mail: Yerbolzh@mail.ru

DEVELOPMENT OF A HARDWARE–SOFTWARE ARCHITECTURE FOR A MULTICHANNEL MEASUREMENT MODULE FOR SYNCHRONOUS SIGNAL ACQUISITION

Abstract: *The article presents the hardware and software architecture of a multi-channel measurement module designed for synchronous data acquisition, hardware signal processing, and digital data transmission. The proposed architecture is based on eight AD9226 analog-to-digital converters and a Xilinx Spartan-6 XC6SLX9 field-programmable gate array (FPGA), which provides synchronous data acquisition, digital frame generation, and data transmission via a two-wire DATA-CLK interface. A frame-based data transmission protocol has been developed to ensure frame sequence control, automatic synchronization recovery in the event of transmission errors, and system scalability. A prototype of the eight-channel measurement module was developed and experimentally evaluated. The experimental results confirmed the correctness of synchronous signal acquisition, the reliability of data transmission, and the proper operation of the FPGA algorithms and the dedicated software. The obtained results demonstrate the feasibility of applying the proposed architecture to the development of scalable multi-channel data acquisition systems for digital signal processing.*

This study was carried out within the framework of the grant-funded research project for 2024-2026, IRN AP234042/0223, «Substantiation of Parameters and Development of a System for Detection and Visualization of Radio Emission Sources», funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan.

Key words: *hardware-software architecture; multichannel measurement module; synchronous signal acquisition; FPGA; Xilinx Spartan-6; analog-to-digital conversion; digital signal processing; frame transmission protocol; multichannel information and measurement systems.*

Сведения об авторах

Ербол Жангабулович Жантлесов[*] – PhD, ведущий научный сотрудник ТОО «R&D Центр» «Казахстан инжиниринг», г. Астана, Республика Казахстан.

Серик Атаконысулы Алтынбек – PhD, ассоцированный профессор кафедры «Информационные системы и технологии» Esil University, Астана, Казахстан, e-mail: Serik_aa@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8435-7773.

Владими Васильевич Грузин – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ТОО «R&D Центр» «Казахстан инжиниринг», г. Астана, Республика Казахстан.

Амангельды Курамангажинович Тогусов – кандидат технических наук, профессор, заместитель начальника Департамента военного образования и науки МО РК, г. Астана, Республика Казахстан.

Мағауия Қайратұлы Шекеев – ученик 11-го класса 220 школы г. Алматы.

Авторлар туралы мәліметтер

Ербол Жанғабылұлы Жантлесов* – философия докторы (Ph.D), «Kazakhstan Engineering» R&D орталығы» ЖШС жетекші ғылыми қызметкері, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Серік Атаконысұлы Алтынбек – PhD, «Ақпараттық жүйелер және технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Esil University, Астана, Қазақстан, e-mail: Serik_aa@bk.ru**.** ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8435-7773.

Владимир Васильевич Грузин – техника ғылымдарының докторы, профессор, «Kazakhstan Engineering» R&D орталығы» ЖШС жетекші ғылыми қызметкері, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Амангелді Құраманғажынұлы Тогусов – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Қазақстан Республикасы Қорғаныс министрлігінің Әскери білім және ғылым департаменті бастығының орынбасары, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Мағауия Қайратұлы Шекеев – Алматы қаласындағы №220 мектептің 11-сынып оқушысы.

Information about the authors

Yerbol Zhangabulovich Zhantlessov* – Ph.D., Leading Researcher, R&D Center «Kazakhstan Engineering» LLP, Astana, Republic of Kazakhstan.

Serik Atakonyssuly Altynbek – PhD, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Esil University, Astana, Kazakhstan, e-mail: Serik_aa@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8435-7773.

Vladimir Vasilyevich Gruzin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher, R&D Center «Kazakhstan Engineering» LLP, Astana, Republic of Kazakhstan.

Amangeldy Kuramangazhinovich Togusov – Candidate of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Department of Military Education and Science, Ministry of Defense of the Republic of Kazakhstan, Astana, Republic of Kazakhstan.

Magauiya Qairatuly Shekeev – is an 11th-grade student at School No. 220 in Almaty.

Поступила в редакцию 19.06.2026
Поступила после доработки 01.07.2026
Принята к публикации 22.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-14

МРНТИ: 87.45.45

CC BY 4.0
Check for updates

Д.Т. Беккасимова, К.Ю. Дербышев, Ә.М. Сүгірбай, Д.О. Кожахметова, А.Д. Золотов*
Шәкәрім университет, 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: azol64@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ CHLORELLA VULGARIS В ЗАКРЫТЫХ ФОТОБИОРЕАКТОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация: *В работе проведён анализ современных математических моделей роста* Chlorella vulgaris *в закрытых фотобиореакторах, применяемых для исследования, прогнозирования и управления процессами культивирования микроводорослей. Рассмотрены основные классы моделей, включая эмпирические и кинетические модели роста, модели светового затухания и распределения освещённости, модели фотоакклимации клеток, а также комплексные динамические модели, учитывающие совместное влияние интенсивности света, концентрации углекислого газа, массопереноса CO_2, уровня pH, температуры, перемешивания среды и других технологических факторов. Особое внимание уделено оценке точности, вычислительной сложности и практической применимости данных моделей для задач автоматизированного управления, мониторинга состояния культуры и оптимизации технологических режимов. Проанализированы возможности интеграции математических моделей с методами оптимального управления, предиктивного*

©Д.Т. Беккасимова, К.Ю. Дербышев, Ә.М. Сүгірбай, Д.О. Кожахметова, А.Д. Золотов, 2026