

Интеллектуальный сенсор для измерительных систем, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик

В.А. Микитевич, А.И. Свистун, А.В. Самарина, К.В. Пантелеев, А.Л. Жарин

Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 08.02.2023

Принята к печати 15.03.2023

Измерительные приборы и системы, содержащие датчики, требующие синусоидальное возбуждающее воздействие, широко используются в информационно-измерительной технике как в производственных условиях, так и в исследовательской практике. В качестве примеров можно привести различные типы металлоискателей, вихретоковые дефектоскопы, анализаторы жидких сред, электрометры с динамическим конденсатором и др. Целью работы являлась разработка оптимальной архитектуры и алгоритмов работы интеллектуальных сенсоров, предназначенных для использования в измерительных системах, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик.

В настоящей работе описан предложенный авторами подход к построению интеллектуальных сенсоров на базе современных микроконтроллеров, отличительной особенностью которого является непрерывная генерация синусоидальных воздействий и считывание откликов в фоновом режиме, а также выставление флагов готовности для обработки данных в основном процессе микропроцессора, что обеспечивает бесперебойное выполнение фоновых процессов, главным из которых является генерация синусоидального возбуждающего воздействия.

Данный подход опробован при разработке систем картирования поверхностей зарядочувствительными методами, такими как зонд Кельвина, на основе динамического конденсатора, и зонд поверхностной фото-ЭДС для случая полупроводников.

Ключевые слова: интеллектуальный сенсор, синусоидальное возбуждение – отклик, вибрирующий конденсатор, зонд Кельвина, зонд поверхностной фото ЭДС.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-18-26

Адрес для переписки:

Жарин А.Л.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: anatology.zharin@gmail.com

Address for correspondence:

Zharin A.L.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: anatology.zharin@gmail.com

Для цитирования:

В.А. Микитевич, А.И. Свистун, А.В. Самарина,
К.В. Пантелеев, А.Л. Жарин.
Интеллектуальный сенсор для измерительных систем, работающих
по схеме синусоидальное возбуждение – отклик.
Приборы и методы измерений.
2023. – Т. 14, № 1. – С. 18–26.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-18-26

For citation:

U.A. Mikitsevich, A.I. Svistun, A.V. Samarina, K.U. Pantsialeu,
A.L. Zharin.
[Intelligent Sensor for Measurement Systems with Sinusoidal
Excitation – Response].
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 1, pp. 18–26 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-18-26

Intelligent Sensor for Measurement Systems with Sinusoidal Excitation - Response

U.A. Mikitsevich, A.I. Svistun, A.V. Samarina, K.U. Pantsialeyeu, A.L. Zharin

Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 08.02.2023

Accepted for publication 15.03.2023

Abstract

Measuring devices and systems containing sensors that require sinusoidal excitation are widely used in information and measurement technology both in production conditions and in research practice. Examples include various types of metal detectors, eddy current flaw detectors, analyzers of liquid media, electrometers with a dynamic capacitor, etc. The aim of the work was to develop the optimal architecture and algorithms for the operation of intelligent sensors intended for use in measuring systems operating according to the sinusoidal excitation – response scheme.

This paper describes the approach proposed by the authors to the construction of intelligent sensors based on modern microcontrollers, the distinctive feature of which is the continuous generation of sinusoidal excitation and reading responses in the background, as well as setting the readiness flags for data processing in the main process of the microprocessor, which ensures uninterrupted execution of background processes, the main of which is the generation of a sinusoidal excitatory action.

This approach has been tested in the development of charge-sensitive surface mapping systems, such as the Kelvin probe based on a vibrating capacitor, and the surface photo voltage probe for the case of semiconductors.

Keywords: intelligent sensors with sinusoidal excitation - response, vibrating capacitor, Kelvin probe, surface photo voltage probe.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-18-26

Адрес для переписки:

Zharin A.L.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: anatoly.zharin@gmail.com

Address for correspondence:

Zharin A.L.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: anatoly.zharin@gmail.com

Для цитирования:

В.А. Микитевич, А.И. Свистун, А.В. Самарина,
К.В. Пантелеев, А.Л. Жарин.
Интеллектуальный сенсор для измерительных систем, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик.
Приборы и методы измерений.
2023. – Т. 14, № 1. – С. 18–26.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-18-26

For citation:

U.A. Mikitsevich, A.I. Svistun, A.V. Samarina, K.U. Pantsialeyeu, A.L. Zharin.
[Intelligent Sensor for Measurement Systems with Sinusoidal Excitation – Response].
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 1, pp. 18–26 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-18-26

Введение

Чаще всего понятие «интеллектуальный сенсор» используется для обозначения датчиков нового поколения, которые используют современные вычислительные возможности и более сложные алгоритмы обработки информации, позволяющие улучшить их функциональные характеристики. Современные интеллектуальные сенсоры обладают такими уникальными свойствами как самокалибровка, самодиагностика и адаптация, а также способностью компенсировать изменения внешней среды. Исходя из анализа получаемых данных интеллектуальный сенсор позволяет обеспечивать истинность измерений и возможность взаимодействия с другими интеллектуальными устройствами. Информационная обработка обеспечивает улучшение и интерпретацию собранных данных, а также максимизацию эффективности системы посредством нормирования и сжатия данных, обнаружение события и принятие решения [1–2].

Появление на рынке быстродействующих и недорогих встроенных микропроцессорных средств привело к появлению нового поколения сенсоров, в состав которых входит микропроцессор. Такие интеллектуальные сенсоры позволяют осуществлять сложную обработку полученных сигналов с учётом нелинейностей и посторонних влияний, а также извлекать из них полезную информацию более высокого уровня. Интеллектуальные сенсоры также позволяют рациональное изменение режимов работы на основе анализа получаемых сигналов. Кроме того, они обеспечивают дуплексную передачу информации через шины локального управления, что может быть использовано для передачи полученных данных, изменения конфигурации и удалённого тестирования и калибровки интеллектуальных сенсоров.

Измерительные приборы и системы, содержащие датчики, требующие синусоидальное возбуждающее воздействие, широко используются в информационно-измерительной технике как в производственных условиях, так и в исследовательской практике. В качестве примеров можно привести различные типы металлоискателей, вихретоковых анализаторов металлов, анализаторов жидких сред, электрометров с динамическим конденсатором и др.

Целью настоящей работы являлась разработка оптимальной архитектуры и алгоритмов работы интеллектуальных сенсоров, предназначенных для использования в измерительных системах, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик.

Обобщенная архитектура сенсоров, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик

На рисунке 1 представлена обобщённая схема измерительных устройств, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик. В таких устройствах генератор возбуждения (3) задаёт требуемую частоту синусоидальных колебаний, которые с помощью драйвера (1) создают синусоидальное возбуждение физических параметров образца. Отклик физических параметров на возбуждение регистрируется соответствующим датчиком и усиливается предусилителем (2). Далее сигнал подаётся на фазочувствительный усилитель (4), на который также подаётся опорный сигнал от генератора возбуждения (3). Как правило, фазочувствительный усилитель осуществляет синхронное детектирование сигнала и последующее интегрирование, т. е. на его выходе получается напряжение, пропорциональное амплитуде переменного сигнала, причём увеличение времени интегрирования увеличивает помехозащищённость системы.

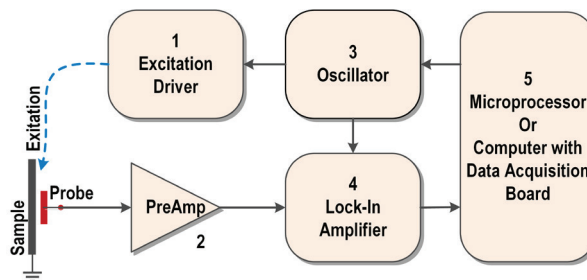


Рисунок 1 – Обобщённая схема измерительных устройств, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик: 1 – драйвер возбуждения; 2 – предусилитель; 3 – генератор возбуждения; 4 – фазочувствительный усилитель – интегратор; 5 – микропроцессор или ПК с платой сбора данных

Figure 1 – Generalized structure of measuring devices with sinusoidal excitation – response: 1 – excitation driver; 2 – preamplifier; 3 – excitation generator; 4 – phase-sensitive amplifier – integrator; 5 – microprocessor or PC with data acquisition board

Полученное напряжение далее оцифровывается АЦП микроконтроллера или платой сбора данных (*Data Acquisition Board*) персонального компьютера (5). Затем полученная информация обрабатывается компьютером и/или микроконтроллером. По сути, в таких системах основная обработка сигналов осуществляется средствами аналоговой электроники, а уже полученная информация о параметрах синусоидального отклика (амплитуде и, при необходимости, фазе) оцифровывается для дальнейшей обработки и визуализации.

Такой подход к построению измерительных устройств имеет достаточно сложную и громоздкую архитектуру, аналоговые цепи подвержены действию шумов и наводок, а также они имеют низкое быстродействие из-за необходимости интегрирования сигналов. Быстродействие особенно важно в случае применения таких измерительных устройств в сканирующих системах, позволяющих картировать измеряемый параметр.

Архитектура интеллектуальных сенсоров, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик

С выходом на рынок 32 разрядных микроконтроллеров с ядром Кортекс (*Cortex*) у разработчиков измерительной техники открылись новые возможности, что позволяет полностью изменить архитектуру измерительных устройств. В таких микроконтроллерах помимо мощного 32 разрядного вычислительного ядра (*CPU*), позволяющего обработку вплоть до 64 разрядных чисел с плавающей запятой, содержится широкий набор аналоговых и цифровых периферийных устройств. Кроме того, в них появились модули, которые ранее имелись только в процессорах персональных компьютеров, а именно арифметический сопроцессор, многоканальный прямой доступ к памяти (*DMA*) и сложный многоуровневый обработчик прерываний. Это позволяет использовать связи периферийных устройств в фоновом режиме без участия *CPU*, т. е. контроллер *DMA* используется для высокоскоростного перемещения данных между периферией и/или памятью без участия *CPU*.

В настоящей работе использован микроконтроллер компании *ST Microelectronics*

из низко потребляющего семейства *STM32L4*, а именно *STM32L476* [3, 4]. Выбор низко потребляющего микроконтроллера обусловлен более низким уровнем собственных электромагнитных шумов по сравнению с базовыми. Кроме того, в нём значительно расширен функционал периферийных устройств, и, что особенно важно, введён аппаратный оверсэмплинг аналого-цифровых преобразователей (*ADC*) позволяющий увеличить разрядность со стандартных 12 до 16 бит, т. е. повысить точность измерений.

Использование микроконтроллера позволяет изменить традиционную схему измерений. В нашем случае позволяет непрерывно генерировать синусоидальное возбуждения с одновременной оцифровкой отклика и полученные массивы данных обрабатывать в едином усилительно обрабатывающем тракте для получения конечных результатов. Такой подход исключает погрешности, присущие традиционным измерителям, и может быть использован в различных устройствах, работающих по схеме возбуждение – отклик, например, в измерителях контактной разности потенциалов с динамическим конденсатором (зонд Кельвина).

На рисунке 2 представлена предлагаемая схема измерительных устройств, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик с использованием микроконтроллера *STM32L476*. При её разработке ставилась задача максимального использования периферийных устройств микропроцессора для упрощения внешних аналоговых электронных узлов.

Из внешних аналоговых узлов оставлены только такие специфические, как предусилитель датчика и драйвер возбуждения. В свою очередь используется внутренние операционные усилители с программным управлением коэффициентом усиления микропроцессором, сигнал с которых подаётся на внутренний АЦП (7), где осуществляется оцифровка нескольких заданных периодов синусоидального сигнала. Частота возбуждения задаётся таймером (6), а синусоидальное возбуждающее напряжение генерируется с использованием предзагруженной таблицы одного периода синуса ($N_{\sin} = 128$ точек и более), данные с которого через канал 1 прямого доступа к памяти (3) и под управлением таймера подаются на генератор

широтно-импульсной модуляции (ШИМ) или на ЦАП (4). Выбор ШИМ предпочтителен, т. к. в этом случае создаётся меньше электромагнитных наводок с частотой возбуждения. Таймер генерирует импульсы запуска как генератора ШИМ, так и АЦП, причём ШИМ запускается задним фронтом запускающего импульса, а АЦП – передним [5]. В таком случае АЦП работает с установившемся значением сигнала.

В соответствии с предустановленным числом периодов ($N_{periods}$) накопления данных АЦП осуществляет $N_{sin} \times N_{periods}$ отсчётов,

при этом полученные значения через канал 2 прямого доступа к памяти (8) заполняют буфер данных (9). Указанные выше процедуры выполняются в фоновом режиме без участия процессора (10). По окончании заполнения буфера данных выставляется флаг готовности данных, который постоянно проверяется процессором. В случае готовности данных процессор приступает к их обработке, а фоновые процессы продолжают обрабатывать получение следующего пакета данных независимо от работы процессора.

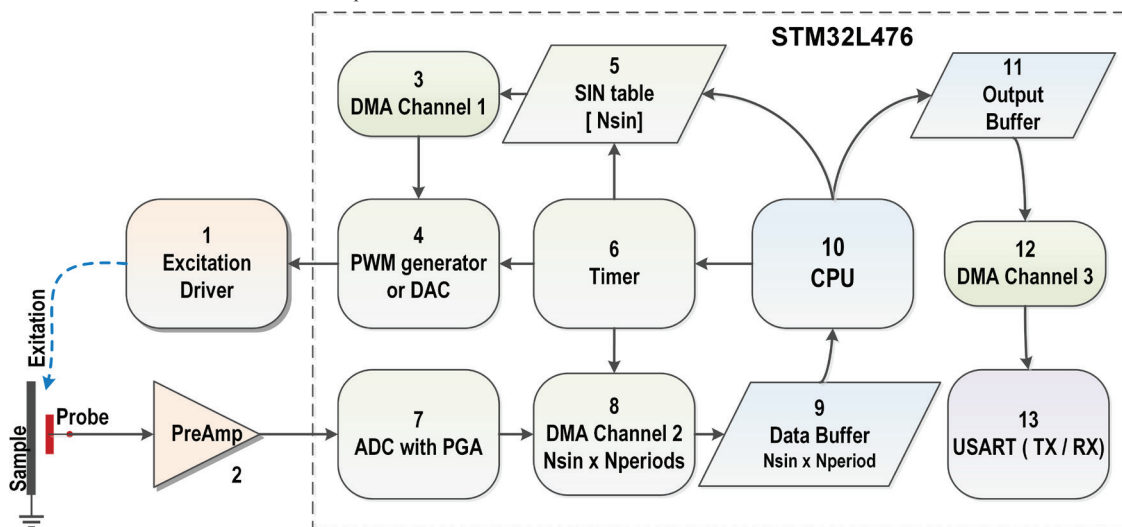


Рисунок 2 – Схема измерительных устройств, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик с использованием микроконтроллера *STM32L476*: 1 – драйвер возбуждения; 2 – предусилитель; 3 – канал 1 прямого доступа к памяти; 4 – генератор широтно-импульсной модуляции или цифроаналоговый преобразователь; 5 – таблица синусоидального сигнала; 6 – таймер; 7 – аналого-цифровой преобразователь с программируемым усилителем на входе; 8 – канал 2 прямого доступа к памяти; 9 – буфер промежуточных данных; 10 – процессор; 11 – буфер готовых данных; 12 – канал 3 прямого доступа к памяти; 13 – модуль вывода данных и получения команд

Figure 2 – The structure of measuring devices with sinusoidal excitation – response using the *STM32L476* microcontroller: 1 – excitation driver; 2 – preamplifier; 3 – channel 1 of direct memory access; 4 – pulse-width modulation generator or digital-to-analog converter; 5 – table of sinusoidal signal; 6 – timer; 7 – analog-to-digital converter with a programmable gain amplifier at the input; 8 – channel 2 of direct memory access; 9 – intermediate data buffer; 10 – processor; 11 – ready data buffer; 12 – channel 3 of direct memory access; 13 – module for data exchange and receiving commands

После окончания обработки данных процессор заполняет буфер готовых данных (11) и выставляет флаг готовности, который инициализирует запуск модуля вывода данных (13) через канал 3 прямого доступа к памяти (12). Таким образом, процесс передачи данных на внешние устройства также осуществляется в фоновом режиме параллельно с работой процессора и фонового процесса получения следующего пакета данных.

Модуль вывода данных и получения команд (13) постоянно находится в состоянии ожидания внешних команд, при получении которых он с помощью ещё одного канала прямого доступа к памяти размещает их в буфере и выставляет соответствующий флаг. Процессор при обнаружении флага дешифрирует и выполняет команды, что также не влияет на выполнение основного фонового процесса.

Базовые алгоритмы микроконтроллера для реализации измерительных устройств, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик

Обычно в микроконтроллерных устройствах для считывания, обработки, вывода данных и др. используется тактирование системным таймером (*SysTick*), а в более сложных системах используются различные операционные системы реального времени (*RTOS*). В нашем случае необходим главный процесс, а именно, генерирование синусоидального возбуждения с синхронной оцифровкой отклика. Синусоидальное возбуждение должно быть непрерывным, что особенно важно в системах обладающей инерцией. Такими системами являются датчики с механическим возбуждением, например, камертонные датчики, пьезодатчики, измерители с динамическим конденсатором и др., работающие на частоте механического резонанса. В таких датчиках даже кратковременные перерывы или сдвиги фазы возбуждающего воздействия могут приводить к сбоям в работе измерительных систем.

В данной измерительной системе авторами предлагается отказаться от традиционных системных таймеров и операционных систем реального времени, а для тактирования использовать периоды колебаний основного процесса, т. е. возбуждающего воздействия. Кроме того, после окончания заданного числа периодов ($N_{periods} = 4$ и более) в памяти микроконтроллера будет заполнен буфер данных ($N_{sin} \times N_{periods}$ точек), из которых средствами цифровой обработки данных (*DSP*) могут рассчитываться необходимые параметры периодического сигнала, а также, в случае необходимости, возможно производить предварительную фильтрацию и нормализацию данных. Такой подход позволяет получать статистически обработанные параметры сигнала такие, как амплитуда и фаза, а также, в случае необходимости, его спектральные характеристики.

На рисунке 3 представлены базовые алгоритмы программного обеспечения микроконтроллера для реализации измерительных устройств, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик.

После включения микроконтроллера происходит конфигурация его тактовой частоты,

а затем конфигурация портов ввода/вывода, таймера, контроллеров прямого доступа памяти и прерываний, АЦП, аналогового сторожевого компаратора, ЦАП, модуля вывода/вывода данных и др. Также инициализируются необходимые флаги, переменные и буферы. Производится запуск фоновых процессов и контроллера прерываний.

Подпрограммы прерываний (*ISP*) выполняют только минимально необходимый набор команд и выставляют соответствующий флаг для дальнейшей обработки процессором.

Если в процессе измерительного цикла возникает одно или более прерывание от аналогового сторожевого компаратора (*ISR ADC AWD*), свидетельствующее о превышении сигналом заданного уровня, процессор уменьшает коэффициент усиления внутренних операционных усилителей, т. е. выполняет самоподстройку.

После выполнения конфигурации и запуска необходимой периферии и фоновых процессов программа уходит в бесконечный цикл, в котором на максимальной скорости процессора производится опрос флагов. При обнаружении активного флага он сбрасывается и выполняется соответствующая подпрограмма обработки, после выполнения которой проверка остальных флагов прекращается и начинается следующий цикл опроса флагов. Таким образом, за один цикл проверки выполняется обработка только одного активного флага, благодаря чему осуществляется разделение подпрограмм обработки флагов по времени. Флаги в программе расположены в порядке их значимости, что позволяет установить четкую иерархию их обработки.

Интеллектуальный сенсор может работать как в непрерывном режиме, так и по запросу извне через интерфейс ввода/вывода. В непрерывном режиме после выполнения измерительного цикла осуществляется запуск следующего измерительного цикла, т. е. внешнее устройство получает данные после окончания каждого измерительного цикла. В зависимости от полученной через интерфейс ввода/вывода команды конфигурации автоматический запуск прекращается, и запуск осуществляется от внешнего запроса. Такой режим необходим в сканирующих системах при картировании измеряемого параметра, где запуск измерительного цикла должен осуществляться после окончания перемещения датчика.

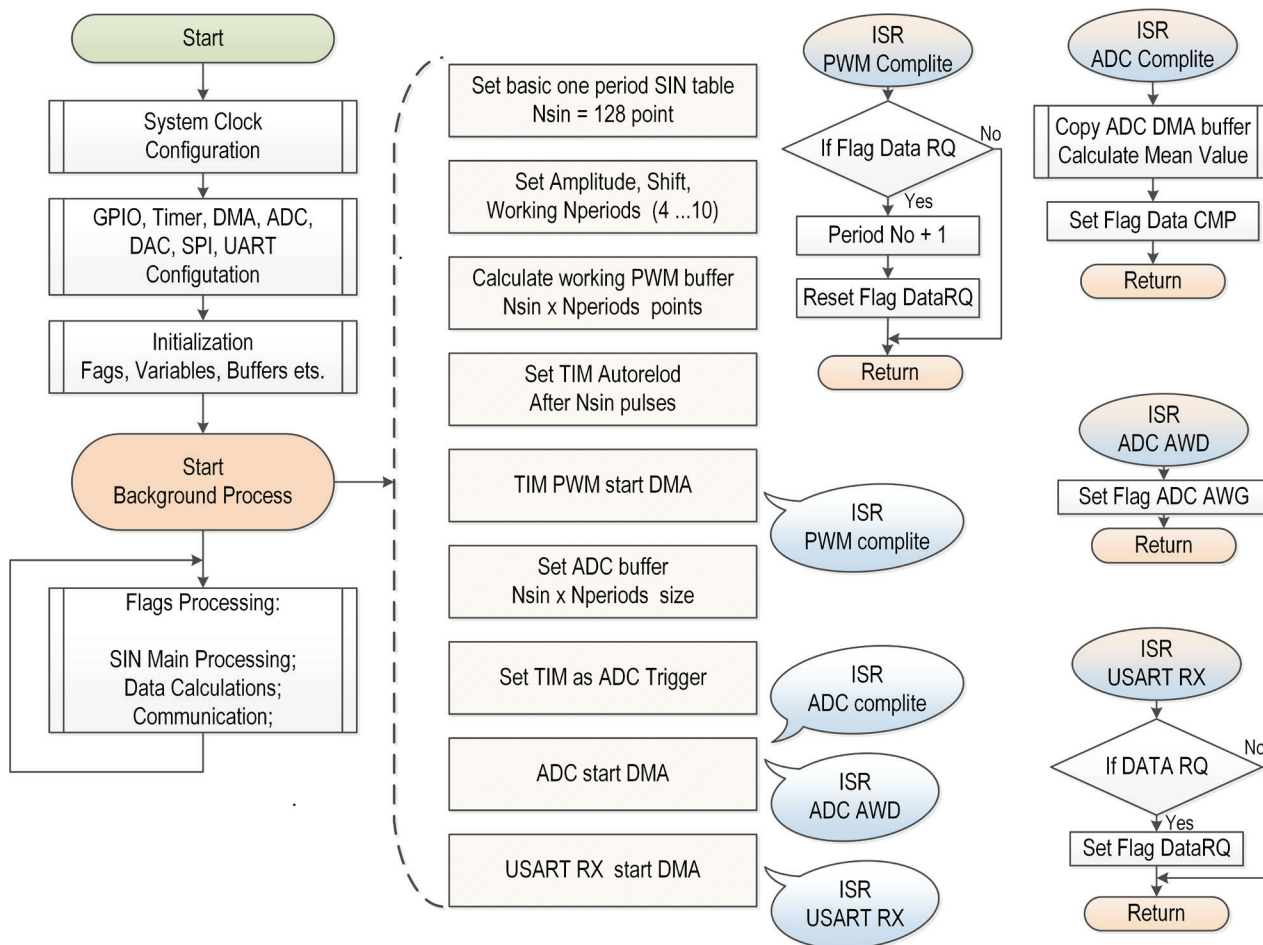


Рисунок 3 – Базовые алгоритмы микроконтроллера для реализации измерительных устройств, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик: PWM – генератор широтно-импульсной модуляции; TIM – таймер; ADC – АЦП; DMA – контроллер прямого доступа к памяти; USART – модуль ввода/вывода данных; AWG – аналоговый сторожевой компаратор; ISR – прерывание

Figure 3 – Basic microcontroller algorithms for the implementation of measuring devices with sinusoidal excitation – response: PWM – pulse-width modulation generator; TIM – timer; ADC – analog to digital converter; DMA – direct memory access controller; USART – data input/output module; AWG – analog watchdog comparator; ISR – interrupt

В настоящей работе рассмотрена только базовая структура сенсоров на базе микроконтроллеров серии STM32L4. Однако такие микроконтроллеры имеют много интересных с точки зрения измерительной техники особенностей и периферийных устройств.

В работе в качестве примера использован *USART* для связи с внешними устройствами, однако микроконтроллеры поддерживают практически все известные интерфейсы включая *USB*. Кроме того, они имеют контроллер дисплея с сенсорным управлением, т. е. устройства могут быть автономными с выводом результатов на собственный дисплей как в числовом, так и в графическом представлении.

Важными особенностью микроконтроллеров данной серии является гибкая система тактирования, динамическое управление питанием, множество режимов пониженного потребления, набор специализированной периферии для работы в спящих режимах. Это позволяет не только снизить энергопотребление, но и снизить уровень собственных шумов, что непосредственно влияет на погрешность измерений.

Интересной особенностью с точки зрения измерительной техники является появление нового модуля *DFSDM* [6], т. е. модуля цифрового интерфейса сигма-дельта-модуляторов, который в паре с микросхемой внешнего аналогового

интерфейсом работает как обычный АЦП. Микросхему аналогового интерфейса можно размещать в непосредственной близости от источника сигнала и подключать его к микропроцессору двухпроводным цифровым каналом. Это позволяет значительно снизить уровень шумов микропроцессора, действующих на источник сигнала и предусилитель. Обычно разрешение внутренних АЦП микропроцессоров ограничивается 12–16 битами, т. к. высокий уровень их собственных шумов делает увеличение разрешения бессмысленным. Разрешение АЦП на базе *DFSDM* ограничено только временем преобразования и может достигать 24 бит и более. Модуль *DFSDM* поддерживает типичные для АЦП функции: аналоговый сторожевой компаратор, детектор предельных значений и коррекцию смещения.

Заключение

Описаны предлагаемые авторами принципы построения интеллектуальных сенсоров на базе современных микропроцессоров, предназначенных для использования в измерительных системах, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик, отличительной особенностью которых является непрерывная генерация возбуждения и считывание откликов в фоновом режиме, а также выставление флагов готовности для обработки данных в основном процессе микропроцессора, что обеспечивает бесперебойное выполнение фоновых процессов.

Данный подход опробован при разработке систем картирования поверхностей зарядочувствительными методами, такими как зонд Кельвина, на основе динамического конденсатора, и зонд поверхностной фото-ЭДС для случая полупроводников [7–10].

В зависимости от особенностей различных сенсоров предложенная архитектура и окончательная обработка получаемых данных может значительно отличаться. Однако практически все необходимые изменения могут быть внесены на программном уровне, без значительных изменений аппаратной части. Это значительно упрощает процесс разработки и модификации различных сенсоров.

Список использованных источников

1. *Войтович И.Д.* Интеллектуальные сенсоры / И.Д. Войтович, В.М. Корсунский // ИНТУИТ. – 2016. – 1164 с.

2. *Ратхор Т.* Цифровые измерения. АЦП/ЦАП. / Т. Ратхор // Техносфера. – 2006. – 392 с.

3. *Иванов Р.* Семейство микроконтроллеров stm32l4. DSP с батарейным питанием / Р. Иванов // Вестник Электроники. – 2015. – № 4. – С. 10–17.

4. RM0351. Reference manual. STM32L4x5 and STM32L4x6 advanced ARM®-based 32-bit MCUs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l4-series.html> (дата доступа: 04.03.2023).

5. Руководство по использованию обычных таймеров STM32 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://microsin.net/programming/arm/an4776-general-purpose-timer-cookbook.html> (дата доступа: 04.03.2023).

6. Знакомство с цифровым интерфейсом сигма-дельта-модуляторов микроконтроллеров STM32. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.compel.ru/lib/136833> (дата доступа: 04.03.2023).

7. *Пантелеев К.В.* Цифровой измеритель контактной разности потенциалов / К.В. Пантелеев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 136–144.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-136-144

8. *Zharin A.* Determination the lifetime of minority charge carriers and iron impurity concentration in semiconductor structures with submicron layers / A. Zharin, K. Pantialeyev, A. Svistun, K. Tyavlovsky // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering, 2020, vol. 2, iss. 4/3, pp. 17–21.

9. *Tyavlovsky A.* Scanning photo stimulated electometry for testing the uniformity of spatial distribution of semiconductor wafers parameters / A. Tyavlovsky, A. Zharin, V. Mikitsevich, R. Vorobey // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering, 2020, vol. 2, iss. 4/11, pp. 47–51.

10. *Pantialeyev K.* Semiconductor wafers testing based on electron work function of surface / K. Pantialeyev, A. Zharin, V. Mikitsevich, O. Gusev // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering, 2020, vol. 2, iss. 5/2, pp. 11–14.

References

1. Voytovich I.D., Korsunsky V.M. *Intellektual'nyye sensory: uchebnoye posobiye* [Intelligent sensors: textbook], 2nd ed. Moscow: INTUIT Publ., 2016, 1164 p.

2. Rathor T. *Tsifrovyye izmereniya. ATSP/TSAP* [Digital measurements. ADC/DAC]. Moscow: Technosphere Publ., 2006, 392 p.

3. Ivanov R. *Semeystvo mikrokontrollerov stm32l4. DSP с батареиным питанием* [Family of stm32l4 microcontrollers. Battery powered DSP]. *Vestnik Elektroniki* [Bulletin of Electronics], 2015, no. 4, pp. 10–17 (in Russian).

4. *RM0351. Reference manual. STM32L4x5 and STM32L4x6 advanced ARM®-based 32-bit MCUs*. [Electronic Resource]. Available at: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0351-stm32l47xxx-stm32l48xxx-stm32l49xxx-and-stm32l4axxx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf (accessed 04.03.2023).

5. *Rukovodstvo po ispol'zovaniyu obychnykh taymerov STM32* [STM32 Conventional Timer Usage Guide]. [Electronic Resource]. Available at: <http://microsin.net/programming/arm/an4776-general-purpose-timer-cookbook.html> (accessed 04.03.2023) (in Russian).

6. *Znakomstvo s tsifrovym interfeysom sigma-del'ta-modulyatorov mikrokontrollerov STM32* [Familiarity with the digital interface of sigma-delta modulators of STM32 microcontrollers]. [Electronic Resource]. Available at:

<https://www.compel.ru/lib/136833> (accessed 04.03.2023) (in Russian).

7. Pantsialeyeu K.U., Svistun A.I., Tyavlovsky A.K., Zharin A.L. Digital contact potential difference probe. *Devices and Methods of Measurements*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 136–144 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-136-144

8. Zharin A., Pantsialeyeu K., Svistun A., Tyavlovsky K. Determination the lifetime of minority charge carriers and iron impurity concentration in semiconductor structures with submicron layers. *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*, 2020, vol. 2, iss. 4/3, pp. 17–21.

9. Tyavlovsky A., Zharin A., Mikitsevich V., Vorobey R. Scanning photo stimulated electrometry for testing the uniformity of spatial distribution of semiconductor wafers parameters. *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*, 2020, vol. 2, iss. 4/11, pp. 47–51.

10. Pantsialeyeu K., Zharin A., Mikitsevich V., Gusev O. Semiconductor wafers testing based on electron work function of surface. *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*, 2020, vol. 2, iss. 5/2, pp. 11–14.