

*Розглянуто проблему автоматизації лабораторного експерименту. Розроблено та реалізовано універсальний програмно-апаратний комплекс, який включає в себе блок управління, блок реєстрації сигналу та програмну клієнтську частину для управління та математичної обробки вимірюючого сигналу. Платформа може слугувати базою для автоматизації широкого спектру експериментальних задач*

*Ключові слова: автоматизація експерименту, управління, вимірювання сигналу, лабораторний експеримент, синхронне детектування*

*Рассматривается проблема автоматизации лабораторного эксперимента. Разработан и реализован универсальный программно-аппаратный комплекс, который содержит в себе блок управления, блок регистрации сигнала и программную клиентскую часть для управления и математической обработки сигнала. Платформа может служить базой для автоматизации широкого спектра экспериментальных задач*

*Ключевые слова: автоматизация эксперимента, управление, измерение сигнала, лабораторный эксперимент, синхронное детектирование*

# ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

**А. А. Галуза**

Доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Институт электрофизики и  
радиационных технологий НАН Украины  
ул. Гуданова, 13, г. Харьков, Украина, 61024  
E-mail: alexey.galuza@gmail.com

**И. В. Коленов**

Аспирант\*  
E-mail: ivan.kolenov@gmail.ru

**А. И. Беляева**

Доктор физико-математических наук, профессор\*  
E-mail: aibelyaeva@mail.ru

\*Кафедра общей и экспериментальной физики  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»  
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

## 1. Введение

В настоящее время практически каждый экспериментатор сталкивается с необходимостью автоматизации экспериментальных установок. Это задача возникает как при создании нового оборудования, так и при модернизации уже имеющегося. В обоих случаях установка не может считаться современной, если процессы измерения и первичной обработки экспериментальных данных не автоматизированы. Помимо простого ускорения процедуры измерений автоматизация позволяет качественно улучшить характеристики установки и может дать возможность ставить эксперимент, принципиально невозможный при ручном способе измерений.

## 2. Анализ существующих решений

Промышленностью предлагается большое количество готовых решений как для управления механическими и электронными частями автоматизируемой установки, так и для сбора и обработки данных [1 – 3]. Однако, такие решения, избыточны, дороги (от \$500), ориентированы на промышленное использование и не

предлагают готового комплексного подхода к решению задачи, поскольку их еще нужно согласовать с оборудованием и разработать программное обеспечение для управления экспериментом. Соответственно, они зачастую не могут быть использованы непосредственно самим экспериментатором для решения его конкретной задачи, поскольку последний далеко не всегда имеет достаточный для этого уровень знаний электроники и программирования. Кроме того, подобные «доработки» требуют значительных временных затрат и отвлекают от основной деятельности. Некоторые простые решения уже устарели [4]. Поэтому, актуальным является создание современной программно-аппаратной платформы (набора аппаратных и программных средств), на базе которой исследователь мог бы с минимальными затратами ресурсов самостоятельно автоматизировать конкретный эксперимент.

## 3. Постановка задачи

Любой эксперимент состоит в измерении отклика исследуемого объекта на некоторые внешние воздействия. Например, это может быть зависимость электропроводности объекта от его температуры, коэффи-

циента отражения зеркала из исследуемого материала от длины волны света, и т.д. Т.е., эксперимент заключается в регистрации зависимости некоторого набора параметров исследуемого объекта от набора параметров, задающих внешнее воздействие. При этом измеряемые параметры исследуемого объекта, как правило, преобразуются в напряжение при помощи соответствующих датчиков.

Параметры внешнего воздействия в большинстве случаев задаются положением некоторых механических регуляторов (барабан длин волн монохроматора, угол поворота алидады гониометра и т.д.). При такой обобщенной схеме эксперимента система автоматизации должна обеспечивать возможности:

- 1) измерения и оцифровки набора сигналов (напряжений) и их передачу в ПК;
- 2) обработки полученных данных в ПК;
- 3) выдачи команд на исполнительные механизмы, задающие положения механических регуляторов.

При разработке системы в первую очередь принимались во внимание следующие критерии: надежность, простота реализации и использования, доступность и стоимость комплектующих.

#### 4. Общее описание системы

В качестве исполнительных механизмов были выбраны шаговые двигатели (ШД), т.к. они имеют ряд достоинств: относительная простота управления, точность и стабильность позиционирования, малая величина шага, большой статический момент [5].

Общая блок-схема системы автоматизации широкого класса экспериментов с помощью разработанной платформы приведена на рис. 1, где ПК – персональный компьютер, БУДШД – блок управления шаговыми двигателями, ДШД – драйвер шаговых двигателей, ШД – шаговый двигатель, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ИУ – измерительный усилитель, ОУ – объект управления.

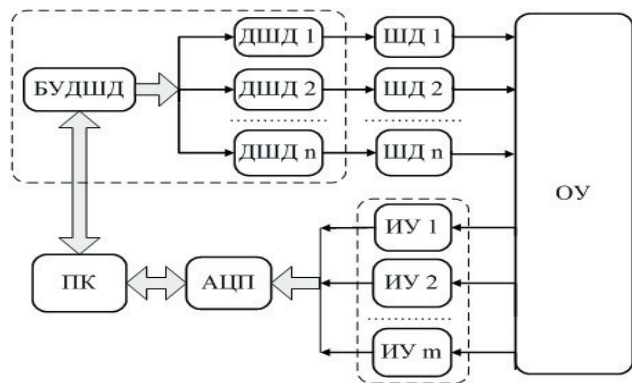


Рис. 1. Общая блок-схема системы автоматизации эксперимента с помощью программно-аппаратной платформы

В качестве АЦП для измерения и оцифровки сигналов предлагается использовать стандартную звуковую карту (ЗК) персонального компьютера (нами была использована C-Media M-CM18738). К преимуществам данного решения можно отнести: 1) простоту

использования, 2) доступность и дешевизну при достаточно высоких метрологических характеристиках, 3) возможность увеличения количества каналов путем добавления дополнительных звуковых карт. Недостатки: 1) для измерения абсолютных величин требуется калибровка, 2) динамический диапазон ЗК достаточно узкий (обычно, 0÷1 В), 3) ЗК нижней ценовой категории имеют относительно высокие собственные шумы.

Таким образом, устройство сопряжения, состоящее из двух частей: 1) блока управления ШД и 2) блока измерительных усилителей (ИУ) (выделены пунктиром на схеме) – единственный нестандартный элемент.

Блок измерительных усилителей в данной работе не рассматривается, т.к. конструкция усилителя, служащего для согласования сигнала датчика с входом АЦП, зависит от датчика и АЦП. К примеру, при использовании фотоэлектронных умножителей для преобразования светового потока в электрический ток, может применяться преобразователь ток-напряжение [6].

Блок управления ШД состоит из блока управления драйверами шаговых двигателей (БУДШД) и самих драйверов шаговых двигателей (ДШД).

Программная часть платформы состоит из прошивки микроконтроллера и библиотеки функций для написания клиентской части со стороны ПК.

Далее рассмотрим детально блок управления шаговыми двигателями и методику измерения сигнала.

#### 5. Блок управления шаговыми двигателями

Блок сопряжения драйверов ШД с ПК собран на основе микроконтроллера ATmega8 фирмы Atmel. Принципиальная схема блока приведена на рис. 2.

Из всего разнообразия интерфейсов ПК для подключения БУШД к компьютеру был выбран стандартный СОМ порт, который работает по протоколу RS232 [7] из-за простоты программирования со стороны ПК. Кроме того, большинство современных микроконтроллеров имеют как минимум один интерфейс UART (протокол RS232, но с логическими уровнями TTL [6]), что избавляет разработчика от его программной реализации в контроллере. Недостатком этого интерфейса является его наличие не во всех современных ПК. Эта проблема решается с помощью специальных преобразователей USB-UART [8]. Для преобразования логических уровней между МК и ПК была использована микросхема MAX232, включенная по стандартной схеме из технической документации (рис. 2).

Основная функция микроконтроллера в данной схеме состоит в повороте нужного ШД на заданное количество шагов (градусов). Непосредственно переключение обмоток ШД выполняется ДШД.

Для управления одним ДШД требуется 8 сигнальных выводов МК. ATmega8 имеет всего 18 выводов, которые можно использовать для данной цели. Таким образом, напрямую можно подключить всего 2 ДШД, что недостаточно для многих задач. Поэтому возникает задача увеличения эффективной разрядности портов МК. Для ее решения был применен последовательно-параллельный преобразователь (ППП) на основе восьмиразрядных сдвиговых регистров HC595.

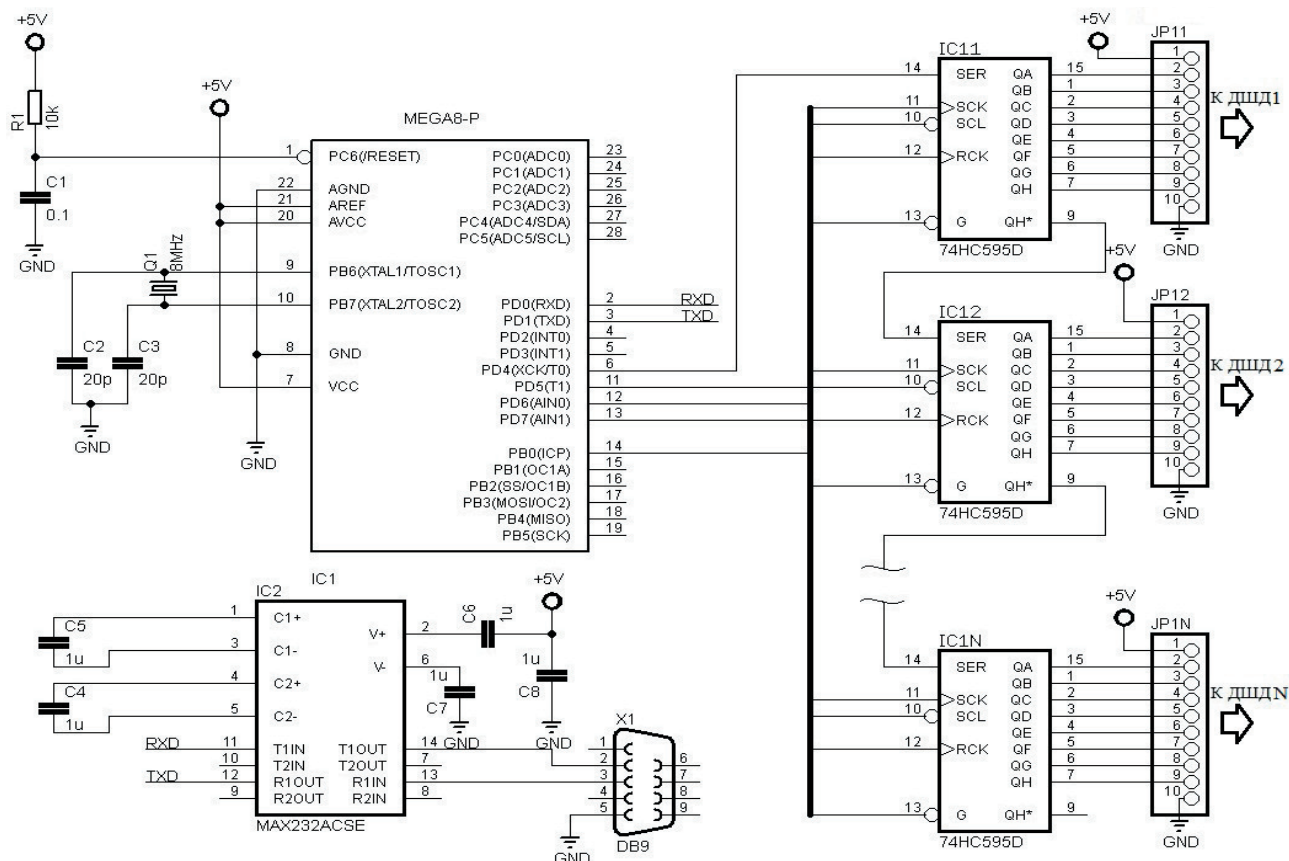


Рис. 2. Принципиальная схема блока управления драйверами ШД

Регистры HC595 имеют 5 управляющих входов: SER – последовательный вход данных, SCK – тактовый вход для сдвига данных по положительному фронту импульса, SCL – сброс регистров, RCK – тактовый вход для вывода данных на выходы регистров (1-7-й и 15-й выводы микросхемы) по положительному фронту, G – вход включения HC595. Выход 9 служит для каскадирования регистров.

Работа с ППП сводится к следующему. На входе SER устанавливается нужный бит и подается положительный импульс на вход SCK. Эта процедура проводится  $8 \times N$  раз (пока не будут записаны данные во все сдвиговые регистры). Далее подается положительный импульс на вход RCK и записанные данные подаются на выход регистра (выводы QA – QH).

Такая схема ППП позволяет управлять теоретически сколь угодно большим количеством ШД при помощи пяти выводов МК.

Для управления ШД были разработаны драйвера ШД (ДШД), которые подключаются к схеме управления через разъемы JP11-JP1N (рис. 3).

В простейшем случае минимальный угол поворота ШД определяется его устройством, а именно, количеством полюсов статора [5]. Включение одной обмотки приводит к фиксации ротора возле одного из соответствующих ей полюсов. Выключение одной обмотки и включение следующей приводит к повороту ротора к следующему полюсу и т.д. Такой режим работы называется шаговым. Если одновременно включить две обмотки, обеспечив в них одинаковый ток, то ротор можно зафиксировать в среднем положении между полюсами (полушаговый режим). В общем случае, регу-

лируя ток в соседних обмотках, можно зафиксировать ротор в любом промежуточном по отношению к полюсам статора положении (микрошаговый режим), что позволяет значительно уменьшить минимальный шаг.

Реализация микрошагового режима является нетривиальной задачей, поэтому основой ДШД была выбрана специализированная микросхема LS8290, которая позволяет реализовывать микрошаговый режим вращения ШД (вплоть до  $1/32$  номинального шага) (рис. 3). Данный контроллер имеет 4 вывода для управления четырехфазным двигателем (выводы 18-21) и 2 вывода для регулировки тока при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ) (выводы 22-23). К этим выводам можно подключать как 2 H-моста для биполярной схемы включения двигателя, так и 4 транзистора для управления униполярным ШД. В конкретном случае использовались ШД с биполярной схемой включения (поскольку они имеют больший вращательный момент), поэтому в качестве силовой части используются H-мосты L298N.

Ток в обмотках двигателя регулируется следующим образом. В зависимости от этапа в цикле микрошага [8] и опорного напряжения  $V_{ref}$  встроенный ЦАП формирует напряжение, которое сравнивается с напряжением на токовых шунтах R3 и R4, включенных последовательно с H-мостами. Когда напряжение на каком-либо шунте достигает напряжения на выходе ЦАП, соответствующий вывод ШИМ отключается, тем самым отключая соответствующую обмотку ШД. Частота считывания показаний напряжения с токовых шунтов задается RC цепочкой, подключенной к выводу TBLINK.

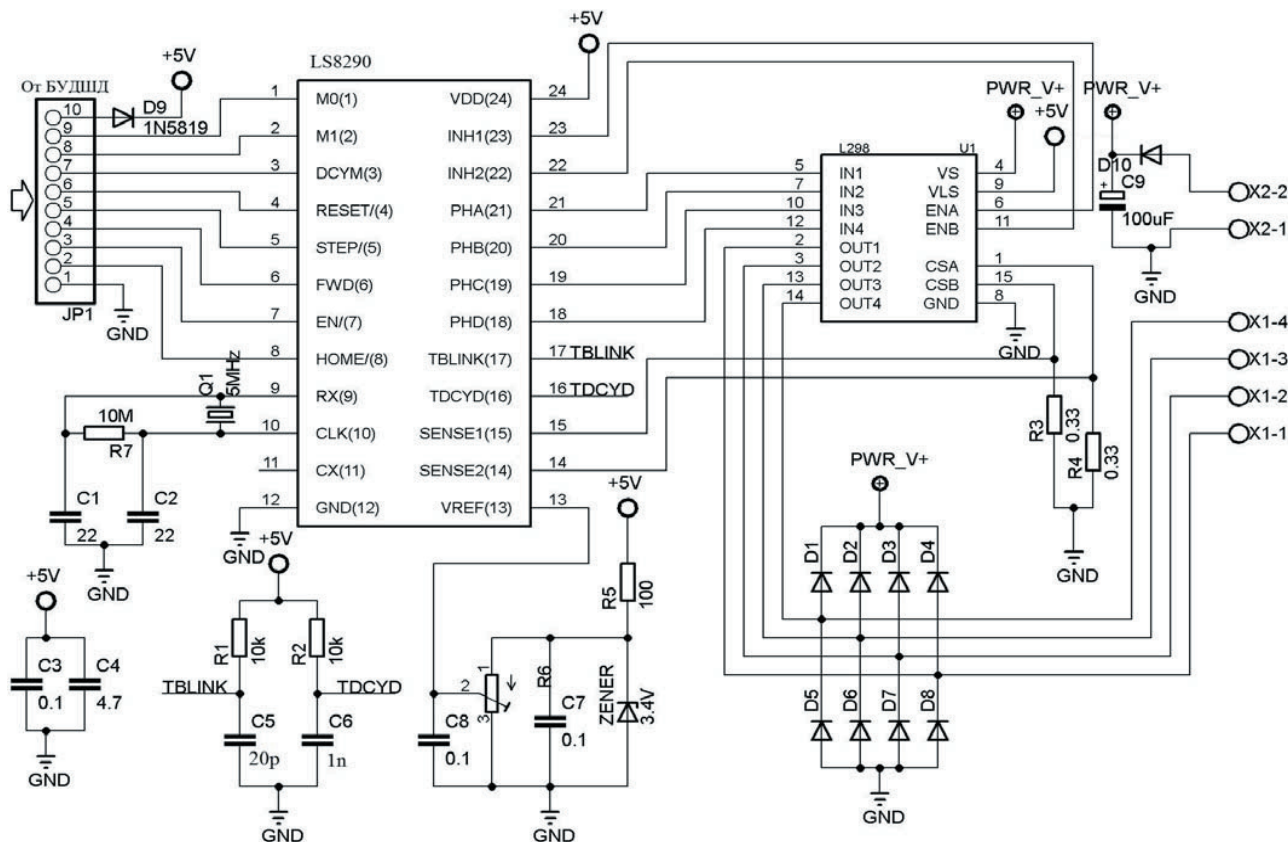


Рис. 3. Принципиальная схема драйвера шагового двигателя

Выводы 1 и 2 контроллера LS8290 задают кратность дробления шага, выводы 3 и 16 задают режим ШИМ [8], вывод 4 позволяет сбросить LS8290 в начальное состояние, по возрастающему фронту импульса на выводе 5 микросхема выполняет шаг заданной кратности, вывод FWD задает направление вращения двигателя, вывод EN позволяет отключать микросхему путем подачи на него высокого логического уровня, 8-й вывод возвращает ротор ШД на начало цикла дробления шага. Более подробная информация о данных микросхемах и других схемах включения приведена в фирменной документации [9]. Диоды D1 – D8 служат для шунтирования тока самоиндукции обмоток, концы которых подключаются к разъемам X1-1 – X1-4.

### 6. Методика измерения сигнала

Выше были рассмотрены вопросы, связанные с управлением регуляторами, которые задают параметры эксперимента. Не менее важной является задача корректной регистрации измеряемого полезного сигнала. Проблема состоит в том, что сигнал с детектора после усиления представляет собой, как правило, сумму полезного сигнала с помехами различной природы (пульсации и шумы источников питания, нулевой сигнал детектора и его шумы, паразитные сигналы, которые могут попадать в детектор, минуя основной измерительный канал и т.д.). Особенно эта проблема актуальна для типичной ситуации слабых низкочастотных узкополосных сигналов, уровень которых

может быть значительно ниже уровня помех. В таких случаях для уверенной регистрации полезных сигналов необходимо применять особые методики, одной из которых является синхронное детектирование (СД) [10].

Рассмотрим суть СД. Полезный низкочастотный сигнал  $s(t)$  переносится в область более высоких частот (в 50-100 раз выше, чем занимаемая им спектральная область) путем модуляции, т.е. умножения на опорный периодический сигнал заданной частоты (временной зависимостью сигнала  $s(t)$  в дальнейшем можно пренебречь и полагать его равным константе  $s$ ). Частота модуляции не должна совпадать с частотой возможных периодических помех. На входе синхронного детектора детектируемый сигнал, в общем случае, будет суммой полезного промодулированного сигнала и помех. Полезный сигнал может быть извлечен из измеренного путем демодуляции, которая заключается в перемножении измеренного и опорного сигналов с последующим интегрированием.

Аппаратная схема синхронного детектирования представлена на рис. 4, где ИЯ – исследуемое явление, М – модулятор, Д – датчик, СД – синхронный детектор, УГ - управляющий генератор.

Исследуемое явление является источником полезного сигнала  $S$ . Модулятор  $M$  перемножает полезный сигнал и опорный сигнал  $f(t)$ , полученный от управляющего генератора УГ. При прохождении сигнала от модулятора до СД к нему могут добавляться различные аддитивные помехи. В итоге на вход СД поступает сумма  $x(t) = s \cdot f(t) + n(t)$ . СД умножает эту сумму на опорный сигнал и проводит интегрирование,

результатом которого является искомый сигнал без аддитивных помех, который может подаваться на вход измерительного прибора.



Рис. 4. Схема измерения сигнала при помощи синхронного детектирования

Из схемы видно, что для реализации СД требуется специальное оборудование. Однако, если частота опорного сигнала известна, то аппаратную часть можно упростить, убрав из схемы синхронный детектор. Вместо этого сигнал измеряется целиком при помощи действующего АЦП и передается компьютеру, который выполняет синхронное детектирование программно. При этом опорный сигнал генерируется компьютером в виде массива отсчетов. Программное синхронное детектирование значительно упрощает и удешевляет измерительную часть установки, сохраняя метрологические характеристики на достаточно высоком уровне. Как уже говорилось, демодуляция сводится к вычислению следующего интеграла:

$$s = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot f(t) dt, \quad (1)$$

где  $T$  - время интегрирования, которое должно быть кратным периоду опорного сигнала. В общем случае фаза  $x(t)$  неизвестна и может не совпадать с фазой опорного сигнала. Т.е., вместо интеграла (1) имеет место соотношение:

$$s(\varphi) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t + \varphi_0) \cdot f(t + \varphi) dt. \quad (2)$$

Поэтому, для проведения СД необходимо подобрать фазу  $\varphi$  генерируемого опорного сигнала так, чтобы она совпала с  $\varphi_0$ . Из теории СД следует, что такому значению  $\varphi$  соответствует максимальное значение  $s(\varphi)$  [9]. В результате, рабочее соотношение для программного СД выглядит следующим образом:

$$s = \max_{\varphi} s(\varphi). \quad (3)$$

Как показал численный эксперимент, при детектировании сгенерированный опорный сигнал не обязательно должен точно совпадать по форме с модулирующим сигналом; важно лишь совпадение фазы и частоты. Удобно использовать опорный сигнал в виде меандра, принимающего логические значения  $\pm 1$ . В этом случае  $s(\varphi)$  имеет кусочно-линейный вид.

Решение задачи максимизации в (3) может быть выполнено любым численным методом; в данном случае используется метод «золотого сечения» [11]. Интеграл вычисляется методом парабол [11].

## 7. Аттестация методики измерения

Аттестация ПО измерительной части платформы проводилась с помощью численных экспериментов,

а также на реальной экспериментальной установке. Для численного эксперимента был сгенерирован сигнал  $x(t)$ , состоящий из смеси полезного сигнала  $s$ , модулированного меандром частотой 72 Гц, и помех. В качестве помех использовались программно сгенерированные белый шум, синусоиды частотой 50 и 100 Гц, постоянная составляющая. Интенсивность шумов являлась одним из варьируемых параметров численного эксперимента. Частота дискретизации была принята 44,1 кГц.

На рис. 5 приведена зависимость погрешности  $\sigma$  программного СД от соотношения сигнал/шум SNR. Расчет проводился в диапазоне SNR от 20 дБ до -20 дБ. Время интегрирования составляло 50 периодов опорного сигнала.

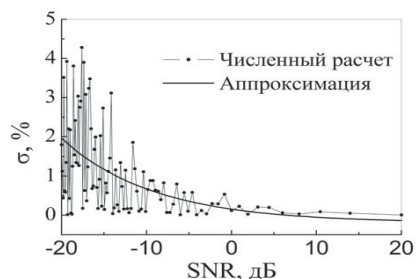


Рис. 5. График зависимости погрешности  $\sigma$  программного синхронного детектора от соотношения сигнал/шум (SNR) и его аппроксимация экспонентой

Из рис. 5 видно, что даже для SNR -20 дБ погрешность не превосходит единиц процентов и с увеличением соотношения сигнал/шум быстро уменьшается. В области больших шумов данная зависимость хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией.

При фиксированном значении SNR погрешность можно уменьшить за счет увеличения времени интегрирования. На рис. 6 приведены расчетные зависимости погрешности от времени интегрирования для значений SNR -12 дБ и -26 дБ, а также их аппроксимации экспоненциальной функцией.

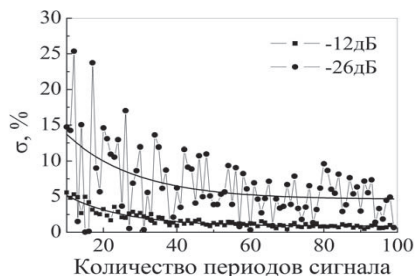


Рис. 6. Зависимости погрешности  $\sigma$  программного синхронного детектора от количества периодов сигнала

Время интегрирования приведено в количестве периодов опорного сигнала.

Из рис. 6 видно, что с увеличением времени интегрирования, тренд погрешности убывает экспоненциально. Данные зависимости также хорошо аппроксимируются экспоненциальными зависимостями.

Кроме численной аттестации были проведены испытания данной системы на реальном приборе (эллипсометр с вращающимся анализатором) [12]. В качестве

полезного сигнала здесь выступает оптическое излучение, детектором служит фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Тракт распространения света открытый, поэтому на измеряемый сигнал накладываются «засветки» от внешних источников света, а также темновой ток ФЭУ, шумы блоков питания ФЭУ, усилителя и т.д. Суммарное значение SNR составило  $\sim 5$  дБ.

На рис. 7 приведена зависимость уровня реального измеренного постоянного сигнала от номера измерения. Измеренные точки имеют среднеквадратичный разброс не более 0,6%, что соответствует расчетам.

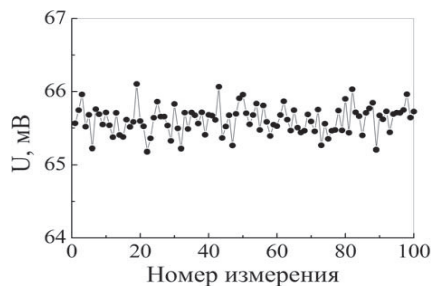


Рис. 7. График зависимости интенсивности сигнала  $U$  от номера измерения

Работа с программным синхронным детектором сводится к вызову единственной функции, в качестве параметров которой передаются массив измеренных данных и несущая частота.

## 8. Программное обеспечение платформы

Программное обеспечение платформы состоит из прошивки микроконтроллера блока управления ДШД и пользовательской библиотеки для создания клиентского ПО со стороны ПК.

Прошивка МК написана на языке C с использованием стандартных библиотек для микроконтроллеров AVR от компании Atmel.

Пользовательская библиотека платформы написана на языке C++ в среде Borland C++ Builder. Библиотека предоставляет собой класс HSPlatform, интерфейс которого состоит из трех рабочих методов:

1) void RotateStepper(int ENum, int Mode, int Dir, int SNum) - принимает номер двигателя, режим дробления шага, направление вращения и количество шагов, преобразует принятые данные в посылку и отправляет ее МК через последовательный интерфейс. По окончании вращения двигателя МК пересылает ПК соответствующую посылку.

2) void MeasureSignal(double\* data1, double\* data2, int length) - принимает указатели на массивы данных и их длину. В первый массив будут записаны данные с «левого» канала ЗК, а во второй – с «правого».

3) double SyncDemod(double\* data, int length, double signal\_frequency) - принимает массив измеренных данных, количество элементов массива и частоту модуляции сигнала.

Выполнив все необходимые операции с данными, метод возвращает значение измеренного сигнала. За программным обеспечением платформы можно обратиться к авторам данной работы.

## 9. Выводы

Разработан универсальный набор аппаратных и программных средств (программно-аппаратная платформа) для автоматизации физического эксперимента, которая позволяет управлять механическими частями установки при помощи шаговых двигателей, проводить измерение малых электрических сигналов, сравнимых с шумом.

Платформа позволяет эффективно решать задачу автоматизации эксперимента различного масштаба в лабораторных условиях без привлечения специалистов в области электроники и системного программирования. Платформа была использована для автоматизации нескольких действующих экспериментальных установок [12, 13] и показала свою эффективность.

## Литература

1. L-CARD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www. URL: <http://www.lcard.ru>.
2. АКОН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www. URL: <http://www.akon.com.ua>.
3. ХОЛИТ Дейта Системс [Электронный ресурс]. - Режим доступа: www. URL: <http://holit.com.ua>.
4. Galuza, A. A. A System for the Automation of a Cryogenic Spectral Ellipsometer [Текст] / A. A. Galuza, K. A. Slatin, A. I. Belyaeva, etc. // Instruments and Experimental Techniques. - 2003. - Vol. 46, No. 4. - P. 477-479.
5. Acarnley, P. Stepping motors: a guide to theory and practice [Текст] / P. Acarnley. – Milton Keynes: Lightning Source UK Ltd, 2007. – 172p.
6. Horowitz, P. The art of electronics [Текст] / P. Horowitz, W. Hill. – New York: Cambridge University Press, 1989. – 1134 p.
7. Axelson, J. Serial port complete [Текст] / J. Axelson. - Madison: Lakeview Research, 2007. – 380p.
8. Axelson, J. USB complete [Текст] / J. Axelson. – Madison: Lakeview Research, 2009. – 504p.
9. LS8290 [Электронный ресурс]. Режим доступа: www. URL: [http://www.lscsi.com/pdfs/Data\\_Sheets/LS8290.pdf](http://www.lscsi.com/pdfs/Data_Sheets/LS8290.pdf).
10. Max, J. Méthodes et techniques de traitement du signal [Текст] / J. Max, J.-L. Lacoume. – Dunod, 2004. - 384 p.
11. Numerical recipes in C: the art of scientific computing / W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery. – New York: Cambridge University Press, 2007. – 1237 p.
12. Беляева, А. И. Спектральный эллипсометрический комплекс для диагностики радиационных превращений в металлах и сплавах [Текст] / А. И. Беляева, А. А. Галуза, В. Ф. Клепиков, и др // Вопросы атомной науки и техники. – 2009. - №2. - С. 191-197.
13. Belyaeva, A. I. Effect of sputtering on the Samples of ITER-Grade Tungsten preliminarily irradiated by tungsten ions: optical investigations [Текст] / A. I. Belyaeva, A. A. Galuza, I. V. Kolenov etc. // The Physics of Metals and Metallography. - 2013. - Vol.114, No.8. - Pp. 703–713.