

Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская, К. Ю. Крайнова, П. Е. Голубков, Б. П. Сибринин

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОВОРОТА ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ СПЕКТРОФОТОМЕТРА

T. O. Zinchenko, E. A. Pecherskaya, K. Yu. Krainova, P. E. Golubkov, B. P. Sibrinin

AUTOMATED SYSTEM FOR TURNING THE DIFFRACTION GRATING OF THE SPECTROPHOTOMETER

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования являются спектрофотометры с ручным управлением дифракционной решеткой. Предмет исследования – система поворота в спектрофотометрах с ручным управлением дифракционной решетки. Цель заключается в разработке автоматической системы поворота дифракционной решетки с применением шагового двигателя. **Материалы и методы.** Для описания автоматической системы поворота дифракционной решетки разработаны структурная, функциональная и принципиальная схемы драйвера шагового двигателя и блока управления питанием драйвера. Программное обеспечение создано в среде разработки *Arduino* (основана на среде *Processing*). **Результаты.** Предложен подход к реализации автоматической системы поворота дифракционной решетки, основанный на применении шагового двигателя. Данный подход позволяет заметно уменьшить погрешность выставления длин волн по сравнению с оборудованием, имеющим ручное управление. **Выводы.** Предложенная автоматизированная система управления спектрофотометрическим оборудованием позволяет повысить эффективность процесса измерений посредством модернизации механической системы, а именно, благодаря замене системы ручного поворота дифракционной решетки на систему с применением современных шаговых двигателей. На вал червячной передачи управления поворотом дифракционной решетки установлен шаговый двигатель с полным шагом $1,8^\circ$. При этом драйвер, управляющий шаговым двигателем, позволяет работать в микрошаговом режиме (1/8) от шага, что позволяет в 8 раз увеличить количество шагов двигателя на один оборот, а также сделать перемещение более плавным и мягким. Усовершенствованному автоматизированному спектрофотометру присуща меньшая погрешность выставления длин волн по сравнению с оборудованием, имеющим ручное управление.

A b s t r a c t. Background. The object of the study are spectrophotometers with manual control of the diffraction grating. The subject of research is the rotation system in spectrophotometers with manual control of the diffraction grating. The aim of the work is to develop an automatic system for turning a diffraction grating using a stepper motor. **Materials and methods.** To describe the automatic system for turning the diffraction grating, structural, functional, and schematic diagrams of a stepper motor driver and a driver power control unit are developed. The software system is described in the Arduino language (based on the Wiring language) and the Arduino development environment (based on the Processing environment). **Results.** An approach to the implementation of an automatic system for turning a diffraction grating, based on the use of a stepping motor, is proposed. This approach allows to significantly reduce the error of setting wavelengths, compared with equipment having manual control. **Conclusions.** The proposed automated control system for spectrophotometric equipment makes it possible to increase the efficiency of the measurement process by upgrading the me-

chanical system, namely, by replacing the system of manual rotation of the diffraction grating with a system using modern stepper motors. On the shaft of the worm gear for controlling the rotation of the diffraction grating, a stepper motor is installed with a full step of 1.8°. In this case, the driver that controls the stepper motor allows you to work in microstep mode (1/8) from the step, which allows you to increase the number of motor steps by one turn 8 times, and also make the movement smoother and softer. The advanced automated spectrophotometer has a smaller error in setting wavelengths, compared with equipment that has manual control.

К л ю ч е в ы е с л о в а: спектрофотометр, дифракционная решетка, шаговый двигатель, спектрофотометрический метод, полоса поглощения, микроконтроллер.

К e y w o r d s: spectrophotometer, diffraction grating, stepping motor, spectrophotometric method, absorption band, microcontroller.

Введение

Спектрофотометрический метод анализа основан на спектрально-избирательном поглощении потока световой энергии при прохождении его через исследуемый раствор. Метод позволяет определять концентрации отдельных компонентов смесей окрашенных веществ, имеющих максимум поглощения при различных длинах волн, он более чувствителен и точен, чем фотоэлектрокolorиметрический метод. Известно, что фотоколориметрический метод анализа применим только для анализа окрашенных растворов, бесцветные растворы в видимой области спектра обладают незначительным коэффициентом поглощения [1]. Однако многие бесцветные и слабо окрашенные соединения (особенно органические) обладают характерными полосами поглощения в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, что используют для их количественного определения. Спектрофотометрический метод анализа применим для измерения светопоглощения в различных областях видимого спектра, в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, что значительно расширяет его аналитические возможности [2].

Применение спектрофотометрии в ультрафиолетовой и видимой областях спектра основано на поглощении электромагнитного излучения соединениями, содержащими хромофорные и ауксохромные группы. Поглощение излучения в этих областях связано с возбуждением электронов s -, p - и n -орбиталей основного состояния и переходами молекул в возбужденные состояния: $s:s^*$, $n:s^*$, $p:p^*$ и $n:p^*$.

Переходы $s:s^*$ находятся в далекой ультрафиолетовой области, например, для парафинов характерна длина волны 120 нм. Переходы $n:s^*$ наблюдаются в ультрафиолетовой области. Линии, соответствующие переходам $p:p^*$, например, в спектрах гетероциклических соединений проявляются в области 250–300 нм и имеют высокую интенсивность.

Полосы поглощения, соответствующие переходам $n:p^*$, находятся в ближней ультрафиолетовой и видимой областях спектра. Они характерны для соединений, в молекулах которых имеются хромофорные группы. Переходы типа $n:p^*$ часто оказываются запрещенными, и соответствующие полосы поглощения обладают очень малой интенсивностью [3].

Переходы типа $p:p^*$ могут сопровождаться переходом электрона с орбитали, локализованной главным образом на одной группе, на орбиталь, локализованную на другой группе. Такие переходы сопровождаются переносом электрона с одного атома на другой и соответствующие спектры называются спектрами с переносом заряда. Последние характерны для различных комплексов (например, ароматических соединений с галогенами), интенсивно поглощающих в видимой и ультрафиолетовой областях. Таким образом, спектр поглощения объекта зависит от его молекулярного состава, что предоставляет широкие возможности для качественного и количественного определения различных веществ.

В настоящее время основные эксплуатационные и метрологические параметры спектрофотометров, произведенных в России, соответствуют мировому уровню развития и реализации систем спектрофотометрии. Однако актуальной является задача модернизации электронной части таких систем с целью повышения эффективности процесса измерений, введения автоматизации. Анализ технических характеристик спектрофотометров (например, производителей *Genesystm*, *Yuchengtech*, *Inesa*, *Industrial Scientific* и др.), выпускаемых в

настоящее время с классической оптической схемой, показал, что для эксплуатации наиболее важны такие метрологические характеристики, как погрешность и повторяемость установки длины волны, наименьший спектральный интервал, спектральный диапазон, наличие цифрового выхода и дисплея.

Авторами разработан универсальный блок управления спектрофотометром, который может быть применен к различным типам спектрофотометров. Примеры построения автоматизированных интеллектуальных систем, предназначенных для исследования материалов нано- и микроэлектроники рассмотрены авторами в работах [4, 5]. В данной статье рассмотрена структура блока управления спектрофотометром на примере спектрофотометра типа СФ-46, технические характеристики которого представлены в [6].

Принцип действия спектрофотометра

В основу работы спектрофотометра СФ-46 положен принцип измерения отношения двух световых потоков: потока, прошедшего через исследуемый образец, и потока, падающего на исследуемый образец. Структурная схема спектрофотометра представлена на рис. 1.

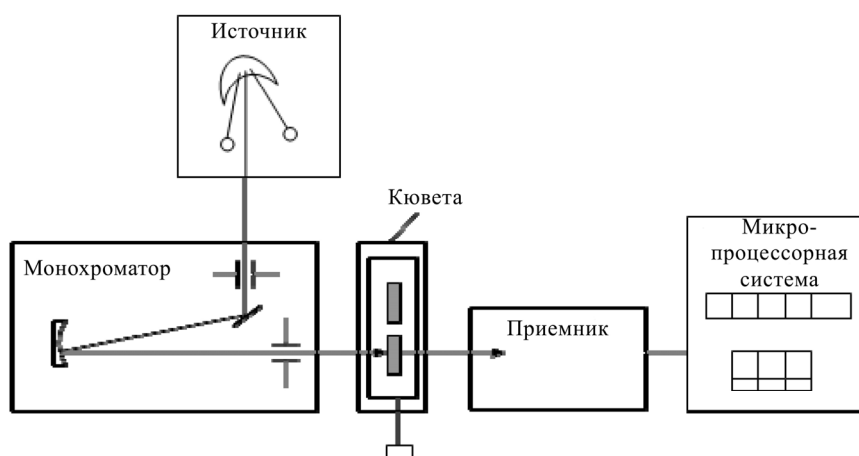


Рис. 1. Структура спектрофотометра СФ-46

Световой пучок из осветителя попадает в монохроматор через входную щель и разлагается дифракционной решеткой в спектр. В монохроматический поток излучения, поступающий из выходной щели в кюветное отделение, поочередно вводятся контрольный и исследуемый образцы. Излучение, прошедшее через образец, попадает на катод фотоэлемента в приемно-усилительном блоке. Электрический ток, проходящий через резистор R_n , который включен в анодную цепь фотоэлемента, создает на резисторе падение напряжения, пропорциональное потоку излучения, падающему на фотокатод.

Усилитель постоянного тока с коэффициентом усиления, близким к единице, обеспечивает передачу сигналов на вход микропроцессорной системы (далее – МПС), МПС по команде оператора поочередно измеряет и запоминает напряжения U_T , U_0 и U , пропорциональные темновому току фотоэлемента, потоку, прошедшему через контрольный образец, и потоку, прошедшему через исследуемый образец [7].

После измерения МПС рассчитывает коэффициент пропускания T исследуемого образца по формуле

$$T = \frac{U - U_t}{U_0 - U_T} \cdot 100.$$

Значение измеренной величины отображается на цифровом фотометрическом табло.

На рис. 2 представлена оптическая схема рассматриваемого спектрофотометра. Излучение от источника I или I' падает на зеркальный конденсор 2, который направляет его на плоское поворотное зеркало 3 и даст изображение источника излучения в плоскости линзы 4, расположенной вблизи входной щели 5 монохроматора. Монохроматор построен по

вертикальной автоколлимационной схеме. Прошедшее через входную щель излучение падает на вогнутую дифракционную решетку *б* с переменным шагом и криволинейным штрихом. Решетка располагается на сферической поверхности, поэтому, помимо диспергирующих свойств, она обладает способностью фокусировать спектр.

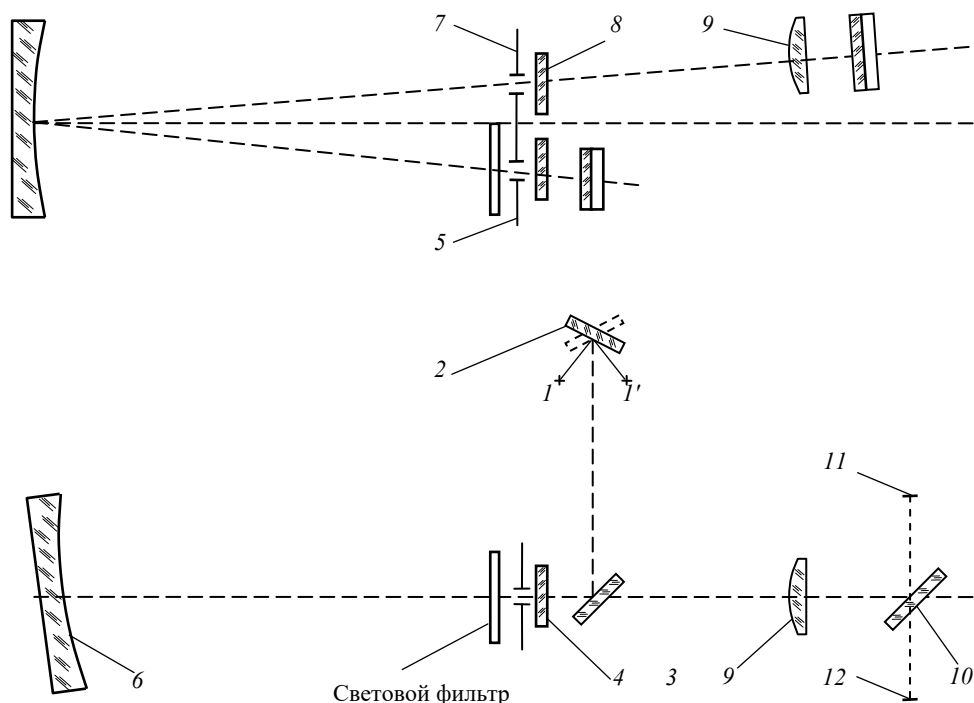


Рис. 2. Оптическая схема спектрофотометра:

1, 1' – источники света; 2 – зеркальный конденсор; 3 – поворотное зеркало; 4 – линза;
5 – входная щель монохроматора; 6 – дифракционная решетка; 7 – выходная щель монохроматора;
8 и 9 – линзы; 10 – поворотное зеркало; 11 и 12 – фотоэлементы; 13 – светофильтр

Применение переменного шага и криволинейного штриха значительно уменьшает абберационные искажения вогнутой дифракционной решетки и позволяет получить высокое качество спектра во всем рабочем диапазоне длин волн.

Дифрагмированный пучок фокусируется в плоскости выходной щели 7 монохроматора, расположенной над входной щелью 5. Сканирование осуществляется поворотом дифракционной решетки, при этом монохроматическое излучение различных длин волн проходит через выходную щель 7, линзу 8, контрольный или измеряемый образец, линзу 9 и с помощью поворотного зеркала 10 попадает на светочувствительный слой фотоэлемента 11 или 12.

Структура блока управления спектрофотометром

Структурная схема блока управления спектрофотометром СФ-46 представлена на рис. 3.

Разработанная система управления строится на основе аппаратной платформы *Arduino Uno*, базирующейся на микроконтроллере *AtMega328*. Данная платформа позволяет программировать микроконтроллеры без извлечения микроконтроллера из схемы, что позволяет многократно калибровать и перезаписывать программное обеспечение в короткие сроки [10].

Для питания данной платформы может использоваться источник питания с напряжением от 7 до 12В. Внутри платформы данное напряжение преобразуется стабилизатором напряжения в допустимое значение питания микроконтроллера (5В).

К 8 цифровым выходам *Arduino* подключена 16-символьная кнопочная панель, служащая для задания длины волны, устанавливаемой на спектрофотометре. Полученные данные отображаются на *LCD* экране, подключенном через шину *I2C* к аналоговым выходам *Arduino Uno*, чтобы сократить количество используемых проводов. Так же на экране отображаются некоторые системные сообщения, необходимые оператору для работы. Питание шины *I2C* и, соответственно, экрана осуществляется от стабилизатора напряжения с платформы *Arduino* [11].

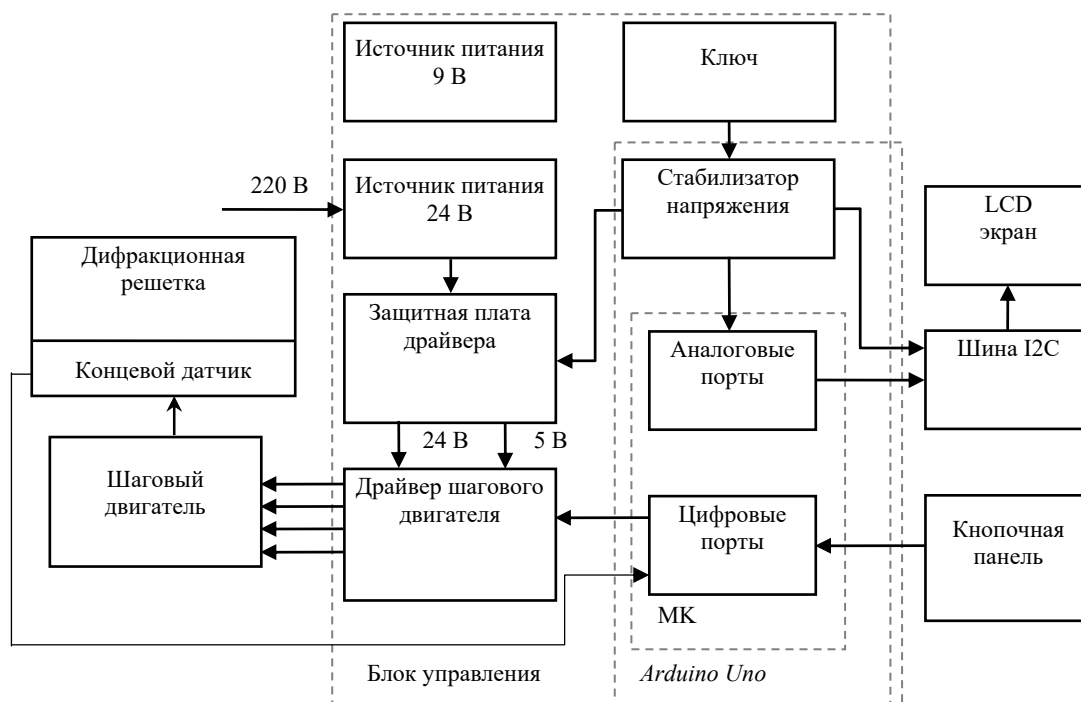


Рис. 3. Структурная схема блока управления спектрофотометром сф-46

Данные, обработанные микроконтроллером, посылаются на драйвер шагового двигателя в виде тактового сигнала, где один такт соответствует одному шагу двигателя. Микросхема *TA8435H*, входящая в состав драйвера двигателя при поступлении цифрового сигнала с помощью электронных ключей, пропускает сигналы 24В на четыре провода обмоток шагового двигателя таким образом, чтобы совершить один шаг двигателя в нужном направлении.

Для питания двигателя используется источник напряжения 24В, подключаемый к управляющей микросхеме, имеющей напряжение питания 5В. Если на *TA8435H* подается высокое напряжение от источника 24В, в то время как логика микросхемы не запитана от 5В, чип выйдет из строя. С этой целью предусмотрена защитная плата драйвера, пропускающая высокое напряжение только спустя время задержки после подачи 5В. Блок управления напряжением осуществляет задержку подачи напряжения 24В на плату-драйвер шагового двигателя.

Шаговый двигатель с помощью механической передачи соединен с дифракционной решеткой, которая и отвечает за изменение длины волны в спектрофотометре.

Шаговые двигатели работают без обратной передачи сигналов, т.е. микроконтроллер не может определить текущий угол поворота дифракционной решетки во время работы или после отключения питания. Для того чтобы избежать сбоя в работе спектрофотометра, в одном из крайних положений дифракционной решетки находится концевой датчик. При включении питания микроконтроллера шаговый двигатель перемещает ее в крайнее положение до тех пор, пока не сработает концевой датчик, т.е. в нулевую точку отсчета.

Принципиальная схема защитной платы драйвера представлена на рис. 4.

Линия 24В проходит через реле, срабатывающие при поступлении на линию 5В сигнала. Время включения реле после поступления сигнала на линию 5В определяется емкостью конденсатора *C2* и номиналом резистора *R2*. Как только конденсатор заряжается, реле открывается и высокое напряжение 24 поступает на драйвер шагового двигателя.

Часть принципиальной схемы драйвера шагового двигателя представлена на рис. 5.

Основным компонентом драйвера является микросхема *TA8435HQ*. Данная микросхема предназначена для управления биполярными шаговыми двигателями. Она позволяет управлять двигателем минимум по трем проводам. *DIR* – задает направление вращения двигателя подачей высокого или низкого сигнала. *EN* – разрешает работу двигателя (включает подачу напряжения на микросхему). *STEP* – сигнал шага. Кроме этого, у данной микросхемы есть еще один контакт *REF*, при подаче сигнала на который включается режим удержания. На принципиальной схеме видно, что все эти контакты подключены к линии питания + 5В через подтягивающие резисторы, поэтому управление происходит с помощью низких сигналов.

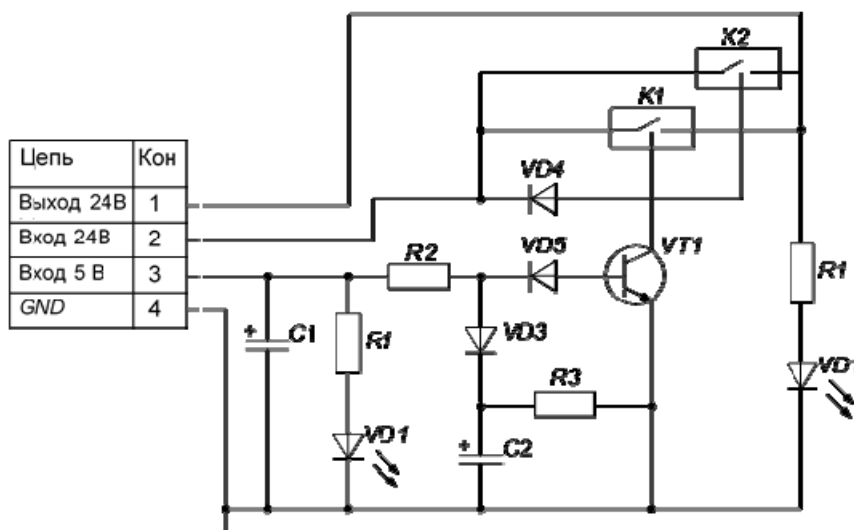


Рис. 4. Принципиальная схема защитной платы драйвера

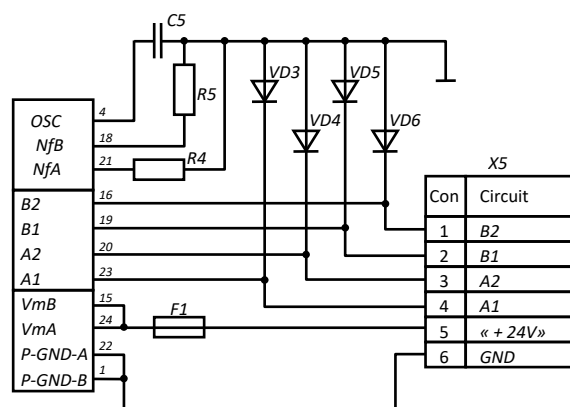


Рис. 5. Часть принципиальной схемы драйвера шагового двигателя

Заключение

Предложенная автоматизированная система управления спектрофотометрическим оборудованием позволяет повысить эффективность процесса измерений посредством модернизации механической системы, а именно, благодаря замене системы ручного поворота дифракционной решетки на систему с применением современных шаговых двигателей. На вал червячной передачи управления поворотом дифракционной решетки установлен шаговый двигатель с полным шагом $1,8^\circ$. При этом драйвер, управляющий шаговым двигателем, позволяет работать в микрошаговом режиме ($1/8$) от шага, что позволяет в 8 раз увеличить количество шагов двигателя на один оборот, а также сделать перемещение более плавным и мягким. Усовершенствованному автоматизированному спектрофотометру присуща меньшая погрешность выставления длин волн по сравнению с оборудованием, имеющим ручное управление. Это достигается посредством того, что шаговому двигателю для выставления длины волны от 190 до 1100 нм потребуется совершить чуть менее 188 000 шагов, т.е. на 1 нм приходится более 200 шагов шагового двигателя. Таким образом, предельная абсолютная погрешность выставления длины волны снижается с $\pm 0,5$ нм (у спектрофотометра с ручным управлением) до $\pm 0,3$ нм благодаря внедрению предложенной автоматизированной системы управления. Рассмотренная автоматизированная система управления спектрофотометром применялась для исследования оптических характеристик прозрачных проводящих оксидов [10–15].

Библиографический список

1. *Korenman, M.* Introduction to Quantitative Ultramicroanalysis / M. Korenman. – Academic Press, 1965.
2. *Sommer, L.* Studies in Analytical Chemistry / L. Sommer. – Elsevier Science, 1989.

3. *Schulman, S. G. Fluorescence and Phosphorescence Spectroscopy* / S. G. Schulman. – 1st ed. – Pergamon, 1977.
4. Печерская, Е. А. Методики принятия решений как составная часть интеллектуальной системы поддержки исследований материалов функциональной электроники / Е. А. Печерская, А. В. Бобошко, В. А. Соловьев // *Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий*. – 2011. – № 1. – С. 229–231.
5. Печерская, Е. А. К вопросу об эффективности измерений в технологических процессах / Е. А. Печерская, Р. М. Печерская, Д. В. Рябов, О. Кузнецова // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2013. – Т. 2. – С. 98–99.
6. Technical description and operating instructions of the spectrophotometer SF-46. – Lomophotonic corporation, 1992.
7. *Almeida, A. Programação de Sistemas Embarcados* / A. Almeida, V. Moraes, P. Seraphim. – Brooklin, 2016.
8. Experiences on using Arduino for laboratory experiments of Automatic Control and Robotics / F. A. Candelas, G. J. García, S. Puente, J. Pomares, C. A. Jara, J. Pérez, D. Mira, F. Torres // *IFAC-PapersOnLine*. – 2016. – № 48. – С. 105–110.
9. *Suchocki, P. Specific spectrophotometric method with trifluoroacetic acid for the determination of selenium in selenitetriglycerides* / P. Suchocki, D. Jakoniuk, B. A. Fitak // *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. – 2003. – № 32. – С. 1029–1036.
10. Electrical properties of transparent conductive ATO coatings obtained by spray pyrolysis / E. A. Pecherskaya, T. O. Zinchenko, V. I. Kondrashin, A. S. Kozlyakov, K. O. Nikolaev, J. V. Shepeleva // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – № 225. – P. 012255.
11. Analysis of research methods of electro-physical properties of transparent conducting coatings received by spray pyrolysis / T. O. Zinchenko, Y. A. Pecherskaya, V. I. Kondrashin, A. S. Kozlyakov, Y. V. Shepeleva // *18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*. – Novosibirsk, 2017. – С. 320–323.
12. *Raksha, S. V. Functional materials for dye-sensitized solar cells* / S. V. Raksha, V. I. Kondrashin, E. A. Pecherskaya, K. O. Nikolaev // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. – 2015. – № 7 (4). – P. 04062.
13. *Nikolaev, K. O. Influence of technological parameters on the energy efficiency of oxide solar cells* / K. O. Nikolaev, E. A. Pecherskaya, A. A. Shamin // *19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*. – Novosibirsk, 2018. – P. 19–21.
14. Синтез и свойства нанокристаллических пленок диоксида олова, полученных методом пиролиза аэрозолей / Р. М. Печерская, Е. А. Печерская, А. М. Метальников, В. И. Кондрашин, В. А. Соловьев // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. – 2012. – № 4 (24). – С. 237–241.
15. *Ракуша, С. В. Функциональные материалы для сенсibilизированных красителем солнечных элементов* / С. В. Ракуша, В. И. Кондрашин, Е. А. Печерская, К. О. Николаев // *Физика и технология наноматериалов и структур : сб. науч. ст. 2-й Междунар. науч.-практ. конф.* – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2015. – С. 143–146.

References

1. Korenman M. *Introduction to Quantitative Ultramicroanalysis*. Academic Press, 1965.
2. Sommer L. *Studies in Analytical Chemistry*. Elsevier Science, 1989.
3. Schulman S. G. *Fluorescence and Phosphorescence Spectroscopy*. 1st ed. Pergamon, 1977.
4. Pecherskaya E. A., Boboshko A. V., Solov'ev V. A. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologiy* [Innovations based on information and communication technologies]. 2011, no. 1, pp. 229–231. [In Russian]
5. Pecherskaya E. A., Pecherskaya R. M., Ryabov D. V., Kuznetsova O. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2013, vol. 2, pp. 98–99. [In Russian]
6. *Technical description and operating instructions of the spectrophotometer SF-46*. Lomophotonic corporation, 1992.
7. Almeida A., Moraes V., Seraphim P. *Programação de Sistemas Embarcados* [Embedded system programming]. Brooklin, 2016.
8. Candelas F. A., García G. J., Puente S., Pomares J., Jara C. A., Pérez J., Mira D., Torres F. *IFAC-PapersOnLine*. 2016, no. 48, pp. 105–110.
9. Suchocki P., Jakoniuk D., Fitak B. A. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2003, no. 32, pp. 1029–1036.
10. Pecherskaya E. A., Zinchenko T. O., Kondrashin V. I., Kozlyakov A. S., Nikolaev K. O., Shepeleva J. V. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, no. 225, p. 012255.

11. Zinchenko T. O., Pecherskaya Y. A., Kondrashin V. I., Kozlyakov A. S., Shepeleva Y. V. *18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*. Novosibirsk, 2017, pp. 320–323.
12. Raksha S. V., Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A., Nikolaev K. O. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2015, no. 7 (4), p. 04062.
13. Nikolaev K. O., Pecherskaya E. A., Shamin A. A. *19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*. Novosibirsk, 2018, pp. 19–21.
14. Pecherskaya R. M., Pecherskaya E. A., Metal'nikov A. M., Kondrashin V. I., Solov'ev V. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences]. 2012, no. 4 (24), pp. 237–241. [In Russian]
15. Raksha S. V., Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A., Nikolaev K. O. *Fizika i tekhnologiya nanomaterialov i struktur: sb. nauch. st. 2-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Physics and technology of nanomaterials and structures: collection of scientific articles 2nd international. scientific. scient. conf.]. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2015, pp. 143–146. [In Russian]

Зинченко Тимур Олегович

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: scar0243@gmail.com

Zinchenko Timur Olegovich

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Печерская Екатерина Анатольевна

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peal@list.ru

Pecherskaya Ekaterina Anatolevna

doctor of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Крайнова Ксения Юрьевна

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ksenya.kraynova.94@mail.ru

Krainova Kseniya Yur'evna

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Голубков Павел Евгеньевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: golpravpnz@yandex.ru

Golubkov Pavel Evgen'evich

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сибринин Борис Петрович

старший преподаватель,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Sibrinin Boris Petrovich

senior lecturer,
sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Автоматизированная система поворота дифракционной решетки спектрофотометра / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская, К. Ю. Крайнова, П. Е. Голубков, Б. П. Сибринин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 119–126. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-14.