УДК 621.385
DOI: 10.15587/2706-5448.2021.225239

РОЗРОБКА ПОРТАТИВНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ТА СТАТИЧНИХ СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК WOLED

Гельжинський І. І., Куцій С. А., Верига А. Д., Іванюк Х. Б., Дудок Т. Г.

Об'єктом дослідження даної роботи є параметри органічних світлодіодів, а саме потужність і світловий потік. Визначення цих параметрів можна здійснити за допомогою фотодіоду та вимагає проведення вимірювання темнового струму сенсора (фотодіоду), вимірювання струму фотодіоду при освітленні його досліджуваним світлодіодом. А також врахувати залежність між світловим потоком сприйнятим сенсором і його вихідним струмом, та врахувати спектральну характеристику сенсора. На основі проведених вимірів розрахувати досліджувані параметри світлодіоду. Проведення даних вимірювань вимагає лабораторних приладів і організації робочого місця, а подальші обчислення є рутинною роботою.

Підвищити точність вимірювань можна вдосконаливши існуючі методики вимірювань необхідних параметрів, а автоматизувати процес вимірювань і обрахунків є можливим з використанням сучасної мікропроцесорної радіоелементної бази. Широко розповсюдженими такими радіоелементами є мікроконтролери. Вони мають необхідну периферію для самостійної роботи та мають обчислювальні потужності достатні для реалізації потрібного вимірювального пристрою. Його застосування дозволяє автоматизувати процес вимірювання, проводити необхідні розрахунки, зберігати коректуючі константи, накопичувати та обробляти отримані дані, проводити аналіз цих отриманих даних, обмінюватися даними з комп'ютером та ін. Отже, робота направлена на розроблення методики, яка уможливить одночасне вимірювання потужності та світлового потоку площинних джерел світла. А також на реалізування цієї методики в приладі та програмному забезпеченні з можливістю вимірювання потужності джерела світла в довільній смузі спектрального видимого діапазону. Таким чином можна визначити, яку потужність у ватах випромінює джерело світла при динаміці струмів живлення у смугах оптичного діапазону, знаючи спектр цього джерела без використання скляних фільтрів. Отже, результатом застосування методики є визначення потужності світлового випромінювання (у ватах) або світлового потоку (у люменах) випромінювача (джерела світла).

Ключові слова: *смуги оптичного діапазону, потужність випромінювання світлодіоду, WOLED, програмне забезпечення мікроконтролера.*

1. Вступ

Загально визнано, що при виборі джерела освітлення споживачі в основному зосереджуються на більш високих значеннях енергоефективності

джерел світла. У порівнянні з традиційними джерелами світла, неорганічні світлодіоди демонструють досить високу ефективність, яка в даний час може майже вдвічі перевищувати ефективність люмінесцентних ламп [1]. Коли мова йде про якість кольору, то як неорганічні світлодіоди, так і флуоресцентні лампи мають як мінімум два недоліки. Першим недоліком є досить низький індекс передачі кольору (CRI) [2], тобто міри здатності джерела світла адекватно відображати кольори освітлюваних об'єктів, в порівнянні з природним джерелом світла. Другим недоліком – зміщення випромінювання в синю область спектра, що певною мірою є небезпечним для здоров'я людини [3]. В цьому контексті в органічних світловипромінюючих діодах білого кольору випромінювання (WOLED) шкідливе синє випромінювання може бути в значній мірі усунуто конструкційно-технологічними підходами [4]. Отже, WOLED як альтернативне джерело світла, що демонструє співставну по ефективності роботи та одночасно кращу якість кольоропередачі, однозначно є надзвичайно перспективним базовим елементом новітніх систем освітлення. Беручи до уваги, що одними з фундаментальних параметрів джерел світла як елемента системи освітлення, є потужність та світловий потік як кількісна характеристика випромінювання. В плані термінів придатності, зазвичай, LT50, LT70 та LT95 використовують для підтвердження надійності WOLED, що означає зменшення яскравості, відповідно, до 50 %, 70 % та 95 % [5]. Важливо проводити постійний моніторинг даних параметрів в процесі експлуатації WOLED систем освітлення. Таким чином, *об'єктом дослідження* обрано параметри органічних світлодіодів, а саме потужність і світловий потік. А *мета роботи* полягає в розробленні портативного пристрою, що уможливлює одночасне вимірювання потужності та світлового потоку.

2. Методика проведення дослідження

Основною суттю методики є певний дуалізм – вона передбачає вимірювання одночасно потужності (ПоверМетр) та світлового потоку (Люкс Метр). Методика реалізується наступним чином:

– проводиться вимірювання та нормування спектру джерела;

– здійснюється нормування чутливості давача;

– проводиться вимірювання сигналу від давача, в тому числі при зміні параметрів джерела світла;

– обчислюються потужність джерела та світловий потік, створеного давачем (в тому числі при зміні параметрів джерела світла).

Основною перевагою методики, яка реалізована в портативному пристрої та програмному забезпеченні, – можливість вимірювання потужності площинного джерела світла у довільній смузі спектрального видимого діапазону. Таким чином можна визначити, яку потужність у Ватах дає джерело у смугах, наприклад, 480÷510 нм та 630÷650 нм, знаючи спектр цього джерела без використання скляних фільтрів і проблем, з ними пов'язаних.

Отже, метою застосування методики є визначення потужності світлового випромінювання (у ватах) або світлового потоку (у люменах) випромінювача

(джерела світла) або «статично» (без зміни параметрів джерела) або «динамічно» (зі зміною параметрів джерела).

Методика вимірювань може бути застосована для особливо «делікатного» встановлення параметрів джерела світла з метою досягнення необхідної величини потужності світлового випромінювання (або світлового потоку). Тобто ми можемо визначити, які параметри джерела світла слід встановити для того, щоб досягнути необхідної потужності світлового випромінювання (у ватах) або світлового потоку (у люменах) для тих чи інших наукових чи господарських (прикладних) завдань.

У випадку, коли світловий потік не є монохроматичним, слід враховувати залежність квантової ефективності від довжини хвилі. Для вирішення цієї проблеми необхідно володіти інформацією про:

– спектральний розподіл джерела випромінювання ($I(\lambda)$ – залежність інтенсивності від довжини хвилі);

– залежність квантової ефективності давача від довжини хвилі ($S(\lambda)$ – залежність квантової ефективності від довжини хвилі).

Для цього враховано залежність квантової ефективності давача (Hamamatsu) від довжини хвилі в діапазоні 340÷800 нм.

Спектральний розподіл можна отримати за допомогою наявного спектрометра. Цей розподіл підлягає наступній обробці:

– згладжуванню (ліквідація випадкових викидів тощо);

– «прибиранню» постійної складової;

– нормуванню.

В результаті отримується залежність інтенсивності від довжини хвилі, придатна для практичного застосування. Це дозволяє обчислити вклад кожної компоненти спектру в сумарний відгук давача (сенсора). Знаючи вклад кожної компоненти спектру в сумарний відгук давача та квантову ефективність для кожної з цих компонент очевидним є розрахунок сумарної нормованої квантової ефективності для даного джерела випромінювання:

$$P_g = \frac{S}{S_n}\,[W], \tag{1}$$

де P_g – загальна потужність; S – відгук сенсора; S_n – нормована квантова ефективність сенсора.

Таким чином, для коректного вимірювання потужності випромінювання необхідно для кожного типу джерела випромінювання розрахувати ефективну квантову ефективність.

3. Результати дослідження та обговорення

3.1. Практична реалізація приладу

Основним вузлом схеми приладу є вимірювальна камера, схема якої представлена на рис. 1. Вона виготовлена з алюмінієвої заготовки циліндричної

форми. Всередині проточений конус, діаметр основи якого такий, щоб в нього щільно фіксувався оптичний сенсор марки S2387-1010R [6] або S7686 [7] (Японія). Вершина конусу має діаметр дещо більший за діаметр діоду, параметри якого підлягають дослідженню.

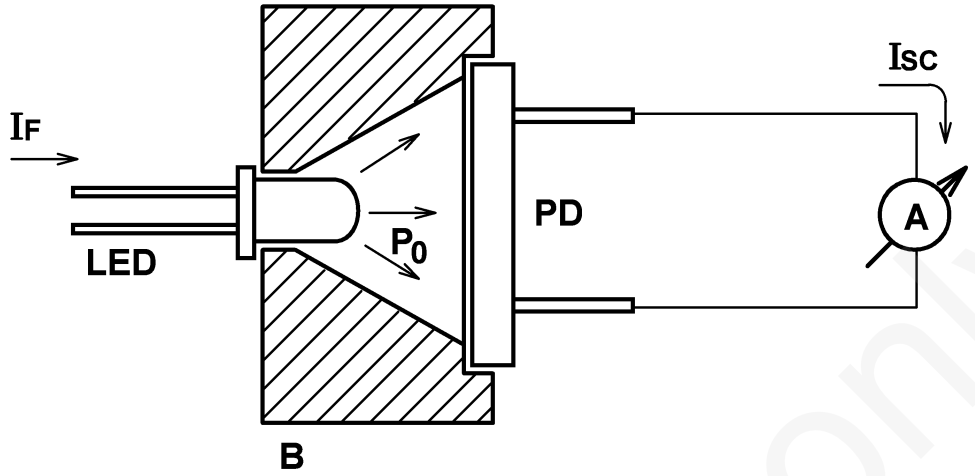

Рис. 1. Схема камери вимірювання повної емісії світлодіоду:
A – амперметр з діапазоном вимірювання 1÷10 мА; PD – сенсор S2387-1010R; B – алюмінієвий блок покритий зсередини золотом

Повна потужність світлового потоку, випромінюваного досліджуваним світлодіодом визначається як:

$$P_0 \approx \frac{I_{SC}}{S}[W], \tag{2}$$

де P_0 – повна емісія; I_{SC} – струм фотодіоду; S – фоточутливість кремнієвого фотодіоду, опираючись на графік спектрального відгуку в документації на сенсор S2387-1010R: $S \approx 0.58$ A/W $(\lambda = 930$ нм$)$, або для S7686: $S \approx 0.38$ A/W $(\lambda = 550$ нм$)$.

Сенсор PD підключається в схему електричну попереднього підсилювача, який має можливість корекції «нуля» та регулювання коефіцієнту підсилення (рис. 2). Попередній підсилювач зібрано на операційному підсилювачі TLC271 (США) [8]. Напруга на виході підсилювача пропорційна струму, який протікає через WOLED, і подається на вольтметр або інший вимірювальний пристрій. В ланці оберненого зв'язку є можливість перемикатися між діапазонами вимірювання шляхом підключення резисторів різних номіналів. Калібрувальним підлаштовувальним резистором VR проводиться компенсація темнового струму сенсора та виставляється «нуль».

For reading only

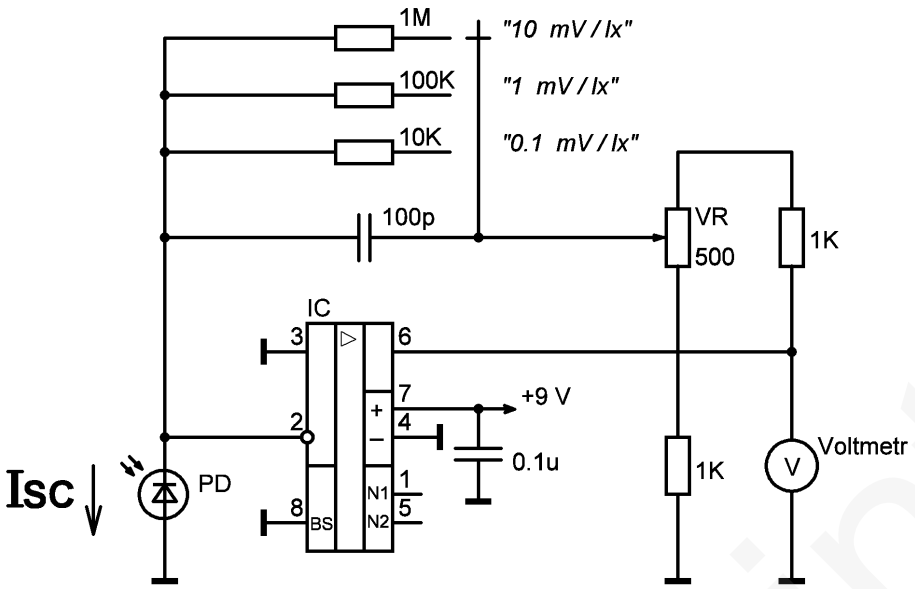

Рис. 2. Схема електрична функціональна попереднього підсилювача люмінометра: VR – калібрувальний підлаштовувальний резистор; IC – мікросхема операційного підсилювача TLC271; PD – сенсор S2387 (68 uA/100 *lx*) або сенсор S7686 (0.45 uA/100 *lx*)

Застосування мікроконтролера (однокристальної електронно-обчислювальної машини (ЕОМ)) дозволяє автоматизувати процес вимірювання, проводити необхідні розрахунки, зберігати коректуючі константи, накопичувати та обробляти отримані дані, проводити аналіз цих отриманих даних, обмінюватися даними з комп'ютером, та ін. Схема електрична функціональна приладу люмінометра на основі мікроконтролера представлена на рис. 3.

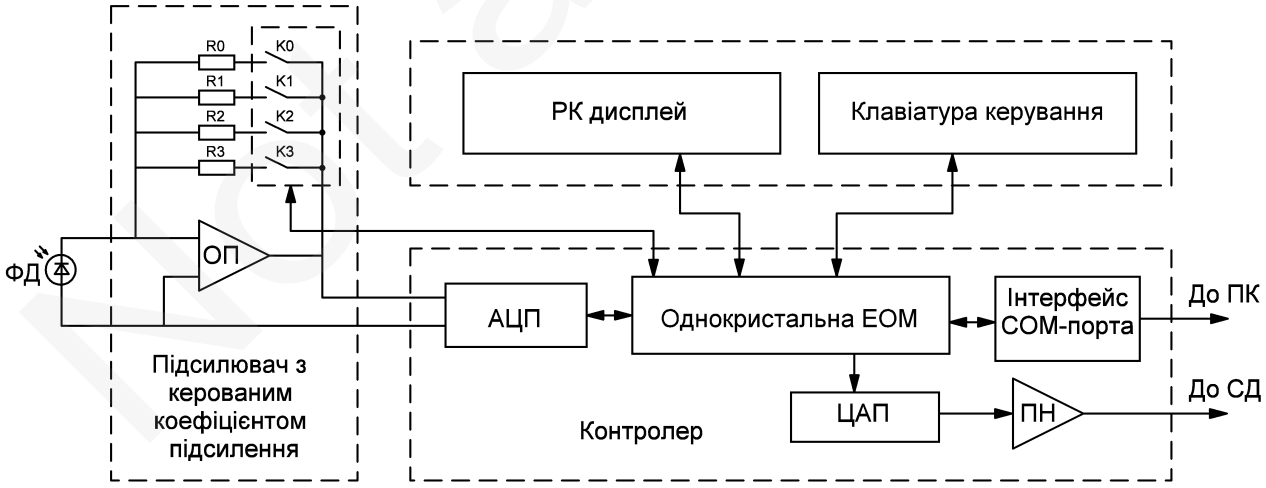

Рис. 3. Схема електрична функціональна приладу люмінометра: ФД – фотодіод; ОП – операційний підсилювач; R0÷R3 – опори зворотного зв'язку ОП (для зміни коефіцієнту підсилення); K0÷K3 – комутатори опорів зворотного зв'язку ОП; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ЦАП – цифро-аналговий перетворювач; ПН – підсилювач напруги; ПК – персональний комп'ютер; СД – світлодіод**. Примітка:** блок живлення не відображено

Прилад складається з таких функціональних вузлів: контролер – платформа «Arduino UNO» (Індія) [9], рідкокристалічний дисплей, фотоприймач Hamamatsu S2387 (Японія), підсилювач струму з керованим коефіцієнтом підсилення, блок живлення. Всіма вузлами приладу керує мікроконтролер.

Мікроконтролер формує через цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) аналогову напругу пропорційну цифровому коду. Ця напруга підсилюється підсилювачем напруги (ПН) і так керує роботою досліджуваного світлодіоду (СД). Далі сигнал з сенсора (ФД) підсилюється попереднім підсилювачем з керованим коефіцієнтом підсилення. Вибір коефіцієнту підсилення здійснюється ключами K0÷K3, які в свою чергу керуються мікроконтролером. Підсилений аналоговий сигнал перетворюється аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП), оцифрований сигнал обробляється мікроконтролером згідно запрограмованого алгоритму.

Керування роботою приладу здійснюється з клавіатури, підключеної до мікроконтролера, а виведення інформації про режими роботи та установки здійснюється на дисплей. Обмін даними з комп'ютером проводиться через інтерфейс COM-порта.

Загалом, прилад досконало вимірює струм сенсора. Діапазони вимірювань струму (динамічний діапазон кожного діапазону – 1024 дискретних рівні):

– I1(мах) до 100 мкА;

– I2(мах) до 200 мкА;

– I3(мах) до 500 мкА;

– I4(мах) до 1000 мА.

Алгоритм роботи приладу має наступну послідовність:

– встановлення мінімального коефіцієнту підсилення (діапазон вимірювань струму до 1000 мА) – так званий пробний вимір;

– вимірювання струмів давача при зміні сигналу що задає параметр роботи джерела світла (від 0 до 3÷15 вольт, задається користувачем, 250 дискретних значень у діапазоні вказаному діапазоні) з використанням цифрового фільтра для «відстроювання» від завад та шумів. Також здійснюється усереднення даних для кожного параметра роботи джерела;

– визначення максимального сигналу $I_{0(max)}$ сенсора та при необхідності – перемикання на інший діапазон вимірювань. Таким чином вибирається діапазон вимірювань, що забезпечить найбільшу точність вимірювань. Оптимально використовується динамічний діапазон АЦП. Критерієм вибору діапазону є: $I_{0(мах)} \le I_{(мах)} \cdot 0,8$ – так званий робочий вимір;

– робочий вимір передаємо на ПК.

3.2. Програмне забезпечення

Остаточні розрахунки потужності та яскравості випромінювання проводяться на комп'ютері у відповідному програмному розробленому забезпеченні (рис. 4). Загалом програмне забезпечення складається з наступних компонент:

– програмне забезпечення контролера реалізовано за допомогою The Arduino Integrated Development Environment – «Arduino Software (IDE)» [10];

– програмне забезпечення (для ПК) для зв'язку з мікроконтролером та розрахунку ефективної квантової ефективності – середовище «Visual Basic Microsoft Visual Studio Community 2019» [11].

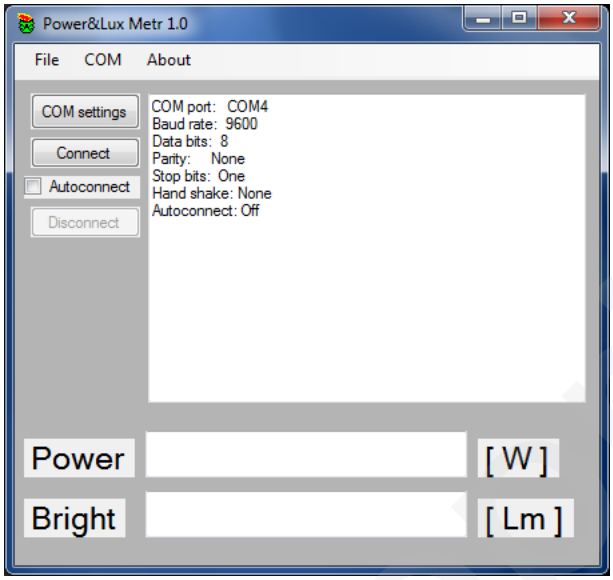

Рис. 4. Зовнішній вигляд інтерфейсу програми взаємодії з приладом

Програмна компонента загалом можна розкласти на три частини.

Частина 1. Вимірювання потужності.

– (А) Приладом вимірюється фотострум, індукований джерелом світла.

– (Б) Спектрометром вимірюється залежність інтенсивності цього джерела від довжини хвилі.

– (В) Залежність квантового виходу ФОТОДІОДА від довжини хвилі є відома з документації на сенсор (паспортизована).

– Знаючи залежності розподілу Б та В розраховується вклад кожної компоненти спектру в загальну потужність джерела світла та перераховується сумарна потужність джерела світла.

Частина 2. Вимірювання світлового потоку.

– (А) Приладом вимірюється фотострум, індукований джерелом світла.

– (Б) Спектрометром вимірюється залежність інтенсивності цього джерела від довжини хвилі.

– (В) Залежність квантового виходу ФОТОДІОДА від довжини хвилі є відома з документації на сенсор (паспортизована).

– Знаючи залежності розподілу Б та В та з урахуванням рекомендацій CIE (International Commission of Illumination) розраховується вклад кожної компоненти спектру в загальний світловий потік, створюваний джерелом світла та розраховується світловий потік, створюваний джерелом світла.

Частина 3. Вимірювання потужності у довільному спектральному діапазоні.

– (А) Приладом вимірюється фотострум, індукований джерелом світла.

– (Б) Спектрометром вимірюється залежність інтенсивності цього джерела від довжини хвилі.

– (В) Залежність квантового виходу ФОТОДІОДА від довжини хвилі є відома з документації на сенсор (паспортизована).

– Знаючи залежності розподілу Б та В та з урахуванням потрібного спектрального діапазону (вклад непотрібних ділянок множимо на нуль) розраховується вклад кожної компоненти спектру в загальну потужність джерела світла та перераховується потужність джерела світла в потрібному спектральному діапазоні.

4. Висновки

Запропонована методика, реалізована в портативному пристрої, уможливлює одночасне вимірювання потужності та світлового потоку з можливістю вимірювання потужності джерела в довільній смузі спектрального видимого діапазону. Розроблено пристрій динамічного та статичного вимірювання яскравості WOLED та програмне забезпечення з використанням запропонованої методики, перевагою якого є те, що типовий спектр певного типу джерела світла достатньо виміряти один раз. Всі вимірювання проводяться автоматизовано.

Портативний пристрій з програмним забезпечення можливо застосовувати для вимірювання параметрів як точкових, так і площинних джерел світла з різною яскравістю свічення та з різною шириною спектру випромінювання видимого діапазону, як для використання в наукових, так і господарських цілях. Результати досліджень параметрів органічних світлодіодів, отримані за допомогою запропонованого пристрою, використовуватимуться при подальших розробках нових і вдосконаленні існуючих органічних структур. Пристрій також може застосовуватися на виробництві для контролю та сортування за параметрами світловипромінюючих радіоелементів перед монтажем їх у вироби.

Література

1. Min-Hao Michael Lu, Hack, M., Hewitt, R., Weaver, M. S., Brown, J. J. (2008). Power Consumption and Temperature Increase in Large Area Active-Matrix OLED Displays. *Journal of Display Technology, 4 (1),* 47–53. doi: http://doi.org/10.1109/jdt.2007.900924

2. Park, Y.-S., Kim, K.-H., Kim, J.-J. (2013). Efficient triplet harvesting by fluorescent molecules through exciplexes for high efficiency organic light-emitting diodes. *Applied Physics Letters, 102 (15),* 153306. doi: http://doi.org/10.1063/1.4802716

3. Kamtekar, K. T., Monkman, A. P., Bryce, M. R. (2010). Recent Advances in White Organic Light-Emitting Materials and Devices (WOLEDs). *Advanced Materials, 22 (5),* 572–582. doi: http://doi.org/10.1002/adma.200902148

4. Jou, J.-H., Wu, R.-Z., Yu, H.-H., Li, C.-J., Jou, Y.-C., Peng, S.-H. et. al. (2013). Artificial Dusk-Light Based on Organic Light Emitting Diodes. *ACS Photonics, 1 (1),* 27–31. doi: http://doi.org/10.1021/ph400007w

5. Sudheendran Swayamprabha, S., Dubey, D. K., Shahnawaz, Yadav, R. A. K., Nagar, M. R., Sharma, A. et. al. (2020). Approaches for Long Lifetime Organic Light Emitting Diodes. *Advanced Science, 8 (1),* 2002254. doi: http://doi.org/10.1002/advs.202002254

6. *Si photodiodes. S2387 series*. Available at: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s2387_series_kspd1033e.pdf
7. *Si photodiodes. S7686 series*. Available at: https://hamamatsu.su/files/uploads/pdf/2_фотодиоды_и_ф_д_линейки/кремниевые_фотодиоды_(si)/одиночные_кремниевые/s7686_kspd1040e.pdf
8. *LinCMOS programmable low-power operational amplifier*. Available at: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc271.pdf?ts=1613384669139&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
9. *Arduino UNO*. Available at: https://www.farnell.com/datasheets/1682209.pdf
10. *Arduino Software (IDE)*. Available at: https://www.arduino.cc/en/guide/environment
11. *Visual Studio Community*. Available at: https://visualstudio.microsoft.com/ru/vs/community/

Not a reprint