

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА  
ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗАННЫМ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НА БАЗЕ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ**

**Белобров А. Ю., Ивченков Н. В.**

В статье рассматривается программно-аппаратный комплекс для дистанционного управления стендом взаимосвязанного электропривода, который позволяет изучать принципы построения, как отдельного современного электропривода, так и системы управления технологическим объектом (мостовым краном). Он может быть использован в дисциплинах, связанных с изучением микропроцессорных устройств и цифровых систем управления электромеханическими комплексами, программированием и наладкой встраиваемых систем, в рамках организации удаленных лабораторных работ.

В статті розглянуто програмно-апаратний комплекс для дистанційного керування стендом взаємозв'язаного електроприводу, який дозволяє вивчати принципи побудови як окремого сучасного електроприводу, так і системи керування технологічним об'єктом (мостовим краном). Він може бути використаний в дисциплінах, пов'язаних з вивченням мікропроцесорних пристроїв і цифрових систем керування електромеханічними комплексами, програмуванням і налагодженням вбудованих систем, в рамках організації віддалених лабораторних робіт.

The article discusses a hardware and software complex for remote control of interconnected electric drive, which allows of studying the principles of how the individual modern electric drive and control systems of technological object (an overhead crane) are constructed. It can be used in the subjects connected with the study of microprocessors and digital control systems of electromechanical complexes, programming and adjusting of embedded systems when organising the remote laboratory work.

Белобров А. Ю.

Ивченков Н. В.

студент ДГМА  
AlekseyWhite007@mail.ru  
канд. техн. наук,  
доц. каф. ЭСА ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.313

**Белобров А. Ю., Ивченков Н. В.**

### **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗАННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НА БАЗЕ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ**

В современных условиях для качественной подготовки специалистов-электромехаников возникает необходимость ознакомления обучающихся с технологическими процессами и получения ими практического опыта работы с электрооборудованием для закрепления теоретических знаний. Одним из важнейших источников получения практических навыков для студентов является лабораторный практикум. Развитие и совершенствование лабораторной базы является одной из приоритетных задач для высших учебных заведений. Кроме того, использование новых информационных технологий позволяет во многом повысить эффективность и качество образовательного процесса. Такими средствами в настоящее время выступают так называемые встраиваемые системы (Embedded Systems), основанные на микроконтроллерных и микропроцессорных устройствах. Особый интерес вызывают системы дистанционного управления промышленным оборудованием с использованием различных беспроводных технологий. Использование подобных систем в лабораторном практикуме, имитирующем технологические установки, позволит расширить функциональные возможности оборудования и наглядно показать преимущества современных технологий. В качестве технологического процесса, рассматриваемого в лабораторном практикуме и представляющий собой пример взаимосвязанного электропривода, может быть принят процесс перемещения груза электрическим краном, являющийся распространенным общепромышленным технологическим процессом.

Цель работы – разработка программно-аппаратного комплекса для изучения дистанционного управления кранового электропривода с использованием встраиваемых систем.

Лабораторный стенд для исследования взаимосвязанного электропривода представляет собой мостовой кран, имеющий для каждого рабочего движения в трех плоскостях, следующие самостоятельные механизмы:

- механизм подъема и опускания груза, расположенный на тележке, и представляющий собой лебедку с полиспастом и крюком;
- механизм передвижения крана в горизонтальной плоскости, приводимый в движение двумя электроприводами левой и правой части моста;
- механизм обслуживания зоны работы крана (передвижения тележки).

Электропривод всех механизмов построен по схеме «преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель» (ПЧ–АД), являющийся наиболее распространенным для современных кранов.

Силовая часть включает асинхронные трехфазные электродвигатели (M1 - M4) и интеллектуальные трехфазные IGBT-модули (АИН1 - АИН4) со встроенными датчиками тока и напряжения, реализующими обратные связи в замкнутых системах управления. Для реализации систем управления электроприводами стенда используются микропроцессорные комплекты на основе встраиваемых сигнальных контроллеров (DSC) серии TMS320F28xxx фирмы Texas Instruments. Вычислительная мощность комплектов и их развитая периферия позволяет реализовать как скалярные, так и векторные цифровые системы управления электроприводами стенда. Для реализации наиболее ресурсоемкого способа управления электроприводом (бездатчиковое векторное управление) затрачивается не более 10–26% вычислительной мощности [1]. Таким образом, можно дополнительно осуществлять управление технологическим процессом перемещения груза, не прибегая к расширению числа вычислительных устройств стенда. Управление силовой частью АИН осуществляется по технологии ШИМ, с

использованием выходов ePWM комплектов. Аналоговые сигналы датчиков тока и напряжения оцифровываются модулями ADC. Сигналы конечных выключателей (SQ1\_1 – SQ3\_2) и устройств с дискретными входами или выходами обрабатываются устройствами ввода-вывода общего назначения GPIO. Для связи комплектов между собой и управляющим устройством верхнего уровня предлагается использовать сеть, реализованную средствами комплектов (I2C). Опционально, комплекты позволяют использовать импульсные энкодеры (G1–G4) с подключением к интерфейсу eQEP.

На рис. 1 изображена структурная схема лабораторного комплекса.

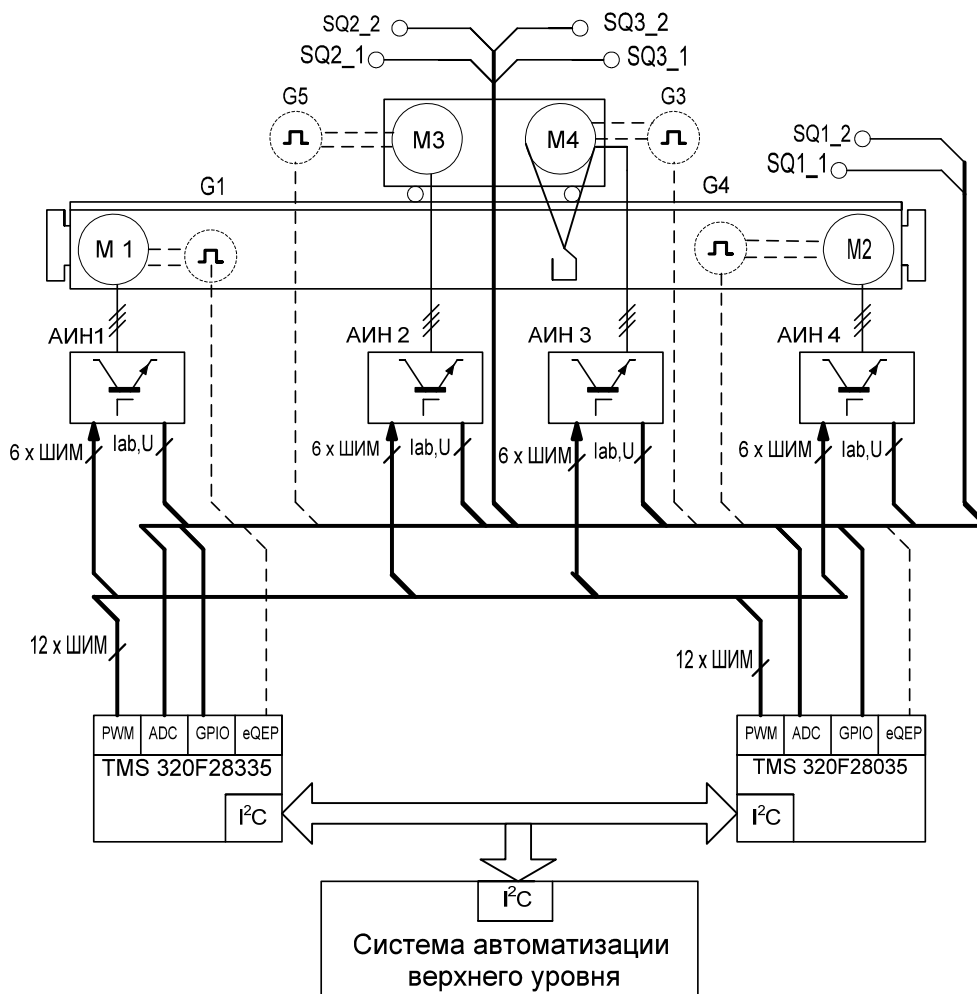


Рис. 1. Структурная схема лабораторного комплекса

Обратная связь по положению, ускорению и повороту моста крана, а также крюковой подвески может быть реализована с помощью датчиков ускорения (акселерометров) и гироскопов. Ранее применение подобных устройств сопрягалось со значительными материальными затратами. Современные портативные устройства подобного типа являются относительно дешевыми и зачастую совмещают в себе несколько устройств.

Примером такого устройства, используемого в стенде, является трехосевой акселерометр-гироскоп MPU-6050 (InvenSense) [6].

Его основными характеристиками являются:

- напряжение питания 2,375 – 3,46 В;
- потребляемый ток до 4 мА;
- интерфейс передачи данных – I2C;
- максимальная скорость I2C – 400 кГц;

- вход для других датчиков I2C;
  - внутренний генератор на 8 МГц.
- Функции MPU6050:
- трехосевой MEMS гироскоп с 16 битным АЦП;
  - трехосевой MEMS акселерометр с 16 битным АЦП;
  - Digital Motion Processor (DMP);
  - slave I2C для подключения к микроконтроллеру;
  - master I2C для подключения к микросхеме дополнительного датчика;
  - регистры данных датчиков;
  - FIFO;
  - прерывания;
  - температурный сенсор;
  - самопроверка гироскопа и акселерометра;
  - регистр идентификации устройства.

Данные измерений датчиков можно считывать как из регистров хранения, так и пользоваться функциями FIFO. Имеется отдельный регистр под названием «Who am I», значение, записанное в этом регистре постоянно и его можно только считать, можно использовать как идентификатор устройства, значение в регистре 104 или 0x68. Отдельным выводом является выход прерываний, который настраивается регистрами настройки под определенные события.

На рис. 2 изображен внешний вид модуля MPU6050.

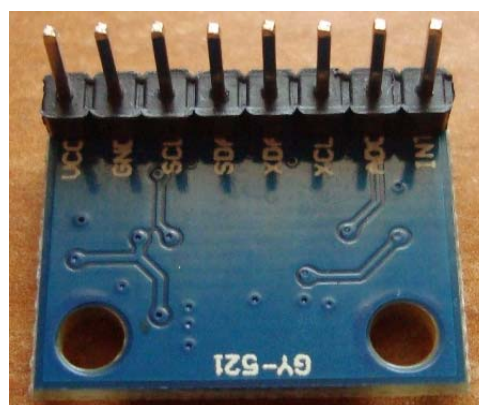
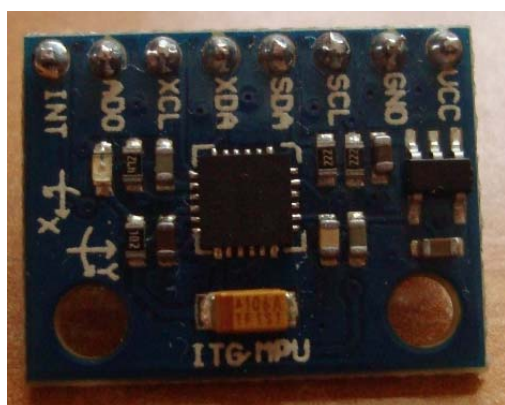


Рис. 2. Внешний вид модуля MPU6050

Микросхема MPU6050 содержит акселерометр и гироскоп, а помимо этого еще и температурный сенсор. MPU6050 является главным элементом модуля GY-531. Помимо этой микросхемы на плате модуля расположена необходимая обвязка MPU6050, в том числе подтягивающие резисторы интерфейса I<sup>2</sup>C, а также стабилизатор напряжения на 3,3 вольта с малым падением напряжения с фильтрующими конденсаторами. Размер платы модуля GY-521 10 x 20 мм. Схема модуля MPU6050 изображена на рисунке 3.

Стенд является универсальным по отношению к системе управления. При неизменной силовой части, возможно подключение различных управляющих устройств, помимо рассматриваемых комплектов (TI TMS320F2xxx), таких, как одноплатные компьютеры RASPBERRY PI2 и подобных.

При программировании микроконтроллеров программные модули могут быть написаны на языке Ассемблер конкретного процессора или на языке высокого уровня C/C++.

Основное преимущество программирования на языке высокого уровня состоит в универсальности языка – его аппаратной независимости от типа процессора. Функцию адаптации к конкретному процессору выполняет программа компилятор. Главный недостаток – более высо-

кие требования к ресурсам процессора, как по производительности, так и по объему памяти программ/данных. В связи с ростом производительности современных микроконтроллеров, увеличением объема встроенной памяти, развитием двух-ядерных архитектур центрального процессора с аппаратной поддержкой вычислений с фиксированной и плавающей точкой, специальных средств оптимизации выходного кода этот недостаток постепенно нивелируется [2, 3].

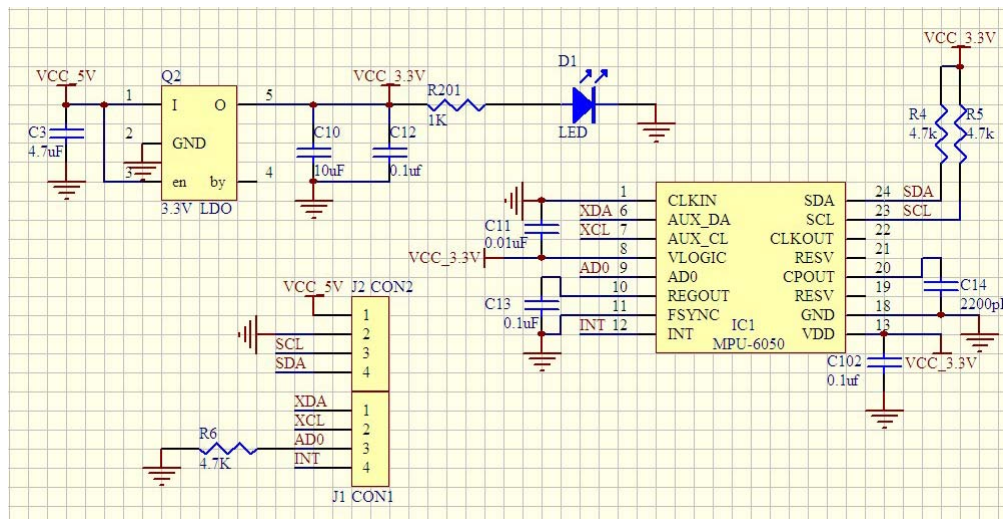


Рис. 3. Схема модуля MPU6050

Программирование разнообразных микроконтроллеров и микрокомпьютеров, таких как Arduino, Raspberry Pi – одно из самых актуальных занятий. Конструирование устройств на этих платформах вышло за рамки профессиональных программистов: эти платы используются для создания роботов, станков, 3D-принтеров, квадрокоптеров, IoT-устройств (умный дом), серверов и даже Hi-Fi-аудиоинтерфейсов [8].

К сожалению, рынок микроконтроллеров сильно сегментирован. Их программирование осуществляется через различные среды и интерфейсы. Ситуацию призван изменить проект под названием Blynk [8].

Blynk представляет собой облачный сервис для создания графических пультов управления и подходит для широкого спектра микрокомпьютеров и микроконтроллеров. Там, где раньше для сбора информации с датчиков нужно было писать полноценный интерфейс ввода-вывода или приобретать дополнительные модули, теперь можно обойтись пятиминутной работой в среде Blynk [8].

Работа с данным приложением требует определённых навыков. Сначала необходимо связать компьютер или смартфон с программируемой платой. Программа поддерживает соединение с платами посредством множества самых разных интерфейсов:

- USB (Serial);
- Adafruit CC3000 WiFi;
- Official Arduino WiFi Shield;
- Official Ethernet Shield (W5100);
- ENC28J60;
- ESP8266 (WiFi modem);
- SeeedStudio Ethernet Shield V2.0 (W5200);
- RN-XV WiFly;
- ESP8266.

Кроме настройки соединения, требуется правильно соединить модули будущего устройства. После этого в рабочей форме приложения добавляются доступные модули (виджеты), настроить необходимые адреса выводов и указать желаемые параметры (при необ-

ходимости можно написать свой код). Для создания виджета или программы используется простая для пользователя функция drag'n'drop. Для управления доступна большое количество имитаторов управляющих устройств – переключатели, слайдеры, дисплеи, для каждого из которых можно писать свою логику. Есть отдельные формы для вывода и систематизации информации с требуемых датчиков в виде графиков [8].

Одним из таких устройств, предлагаемых к использованию в процессе выполнения удаленных лабораторных работ, является Wi-Fi модуль ESP8266 (от компании Espressif Systems) [5]. Основной отличительной чертой такого модуля, является факт, что он представляет собой систему на чипе, включающую микроконтроллер с несколькими выводами GPIO (до 16) и радио-модуль Wi-Fi. Высокая степень интеграции чипа позволяет использовать минимум внешних компонентов, необходимых для создания готовой встраиваемой системы (всего 7), с возможностью подключения до 8 Мбит flash-памяти. ESP8266EX включает 32-битный микроконтроллер Tensilica L106, отличающийся сверхнизким энергопотреблением и 16-битным RSIC ядром, с максимальной частотой 160 МГц. С включенной операционной системой реального времени (RTOS) и функционирующим стеком Wi-Fi, еще около 80% процессорных ресурсов доступны пользователю. К преимуществам также можно отнести широкий температурный диапазон (от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ ) позволяющий использовать устройство в промышленном окружении, малые габариты и широкий выбор готовых решений от разных производителей (ESP-01 – ESP14 от AI-Thinker и др.).

С точки зрения программного обеспечения, устройства на базе ESP8266 программируются в доступной для понимания и широко распространенной бесплатной среде Arduino IDE, с установкой необходимых библиотек. Это позволяет, с небольшими затратами на обучение и установку оборудования, использовать подобные устройства в процессе реализации образовательных программ специальных дисциплин, связанных с микропроцессорной техникой и встраиваемыми системами.

Общая структура встраиваемой системы, реализованной с применением беспроводных технологий, на примере лабораторного стенда управления электроприводом мостового крана, представлена на рис. 4.

Кроме стандартных задач управления технологическим процессом, в лабораторном комплексе предлагается решение задачи демпфирования колебаний груза, ухудшающих устойчивость конструкции и негативно влияющих на позиционирование груза.

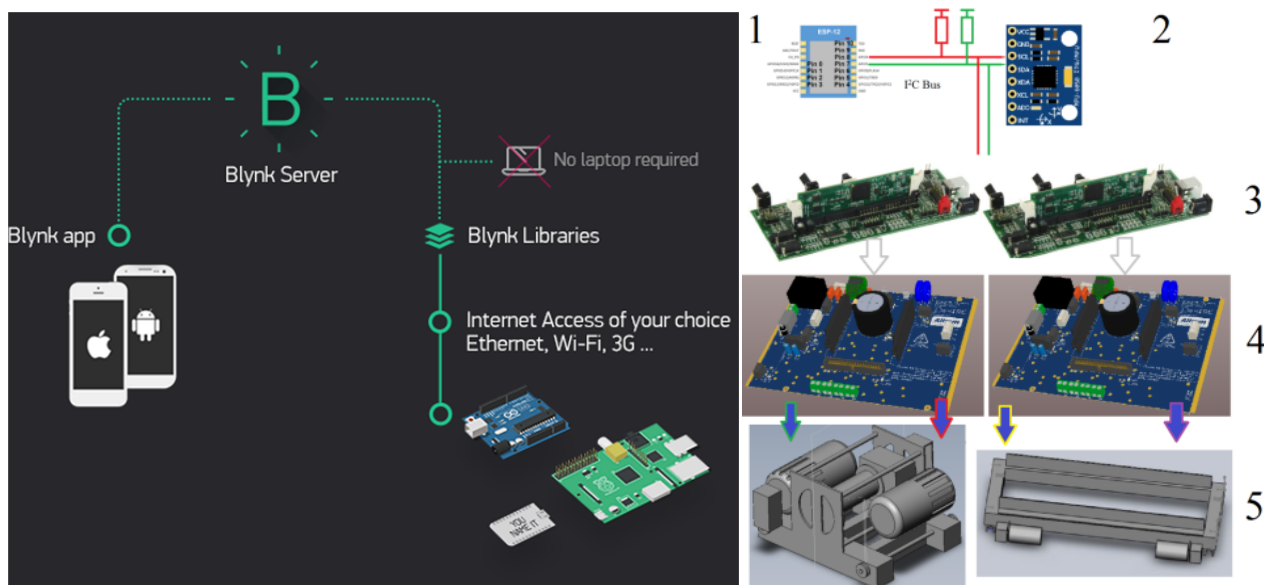


Рис. 4. Общая структура встраиваемой системы с использованием беспроводного модуля ESP8266



На рис. 4 обозначены: модуль ESP8266 Wi-Fi (1), система датчиков на примере акселерометра-гироскопа MPU6050 (2) [2], микропроцессорные комплекты для управления преобразовательной техникой (3), силовые модули преобразователей частоты (4) для управления асинхронными двигателями механизмов передвижения мостового крана (5).

Кроме стандартных задач управления технологическим процессом, в лабораторном комплексе предлагается решение задачи демпфирования колебаний груза, ухудшающих устойчивость конструкции и негативно влияющих на позиционирование груза.

Регулирование по углу отклонения канатов с целью демпфирования колебаний груза возможно с использованием традиционных регуляторов на базе полного математического описания объекта управления, или на основе fuzzy-управления [4].

На систему управления может быть также возложено решение задачи устранения перекосов фермы моста, приводящих к повышенному износу реборд и увеличению нагрузок на конструкцию [7].

### ВЫВОДЫ

Разработанный программно-аппаратный комплекс позволяет изучать принципы построения как отдельного современного электропривода, так и системы управления технологическим объектом (мостовым краном). Он может быть использован в дисциплинах, связанных с изучением микропроцессорных устройств и цифровых систем управления электромеханическими комплексами, программированием и наладкой встраиваемых систем (Embedded Systems), в рамках организации удаленных лабораторных работ.

Комплекс может быть использован в дисциплинах, изучающих технологии промышленных сетей и SCADA-систем, а также для апробации научных задач по созданию систем демпфирования колебаний груза и ограничений перекоса моста крана.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sensorless Field Oriented Control of 3-Phase Induction Motors Using F2833x* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ti.com/>.
2. *Практический курс разработки и отладки программного обеспечения сигнальных микроконтроллеров TMS320x28xxx в интегрированной среде Code Composer Studio: учеб. пособие* / А. С. Анучин, Д. И. Алямкин, А. В. Дроздов и др.; под общ. ред. В. Ф. Козаченко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 270 с
3. *Наливайко А.М. Методика модульного программирования системы векторного управления асинхронным двигателем в среде разработки ccsv4 на базе учебного стенда фирмы texas instruments* / А.М. Наливайко, А.В. Чебаненко, Н.А. Катрушенко // *ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії*. – 2015. – №3. – С.161–170.
4. *Постников В.Г. Фаззи-регулятор электропривода механизма перемещения груза на маятниковом подвесе* / В.Г. Постников // *Тр. МЭИ (ТУ)*. Вып. 680. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – С. 57–63.
5. *ESP8266EX Datasheet* / Espressif Inc, 2016. – 27 p.
6. *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification, Revision 3.4.* / InvenSense, Inc., 2013. – 53 p.
7. *Щедрин, А.В. Исследование работы систем ограничения перекоса моста и систем демпфирования колебаний груза мостовых кранов* / А.В. Щедрин, Коврыжкин А.А. // *Системы управления*. – 2010. – №3. – С.52-55.
8. *Blynk: управление Raspberry и Arduino* – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kickstarter.com/projects/167134865/blynk-build-an-app-for-your-arduino-project-in-5-m/description>