Arduino - merna labaratorija pod haubom

8 u 1 set alata za testiranje i merenje



Burkhard Kainka

Agencija Eho
www.infoelektronika.net

- Sva prava zadržana. Nijedan deo ove knjige ne sme biti reprodukovan u bilo kom materijalnom obliku, uključujući fotokopiranje ili slučajno ili nenamerno smeštanje na bilo koji elektronski medijum sa ili uz pomoć bilo kog elektronskog sredstva, bez pismenog odobrenja nosioca autorskih prava osim u skladu sa odredbama zakona o autorskim pravima, dizajnu i patentima iz 1988. godine ili pod uslovima izdatim od Copyright Licensing Agency Ltd, 90 Tottenham Court Road, London, England W1P 9HE. Prijave za pismene dozvole radi štampanja bilo kog dela ove publikacije upućuje se izdavaču ove knjige.

- Izjava: Autor i izdavač su uložili najveće napore da bi se obezbedila tačnost informacija sadržanih u ovoj knjizi. Autor i izdavač ne mogu da pretpostave neprijatnosti i ovom izjavom isključuju bilo kakvu odgovornost za bilo koju stranku koja bi imala gubitke ili štetu uzrokovanu greškama ili propustima u ovoj knjizi, bez obzira da li su greške ili propusti nastali usled nemara, nezgode ili bilo kog drugog razloga.

ISBN 978-86-80134-56-7
Arduino - merna labaratorija pod haubom

Naslov originala: The Arduino-Inside Measurement Lab
Autor: Burkhard Kainka

Prevod: Vladislav Stefanović
Recenzent: Vladimir Savić
Izdaje i štampa: Agencija Eho, Niš
e-mail: redakcija@infoelektronika.net

Tiraž: 200
Godina izdanja: 2024

CIP - Каталогизација у публикацији Народна библиотека Србије, Београд

004.383/.384
681.586

КАИНКА, Буркхард, 1953-
Arduino : merna labaratorija pod haubom : 8 u 1 set alata za testiranje i merenje / Burkhard Kainka ; [prevod Vladislav Stefanović]. - Niš : Agencija Eho, 2024 (Niš : Agencija Eho). - 128 str. : ilustr. ; 24 cm

Prevod dela: The Arduino-Inside Measurement Lab. - Tiraž 200.

ISBN 978-86-80134-56-7

a) Микроконтролери -- Примена b) Мерни инструменти, сензорски -- Примена

COBISS.SR-ID 147987465

Sadržaj

Predgovor **7**

Poglavlje 1 • Priprema **8**

1.1 Izbor kontrolera 8
1.2 Arduino Nano 9
1.3 Izvor napajanja 11
Poglavlje 2 • Preliminarna ispitivanja 13
2.1 Izlazni portovi 13
2.2 Analogni ulazi i izlazi 16
2.3 Serial Plotter 18
2.4 PWM Signalni Generator 21
2.5 Generisanje signala testerastog oblika 23
2.6 Direktna digitalna sinteza 25

Poglavlje 3 • Programiranje u GCC-u **28**

3.1 Brzi izlazi porta 28
3.2 Izlaz PWM-a 28
3.3 Tajmerski prekid 32
3.4 Brzi generator sinusnog talasa 33
3.5 AD baferovanje 39

Poglavlje 4 • Laboratorija 'MSR' **46**

4.1 Dvokanalni DDS generator 47
4.2 Binarni serijski prenos 48
4.3 Postavljanje frekvencije. 51
4.4 Vremena odstupanja i rad sa dva kanala 54
4.5 Okidač (Triggering) 58
4.6 Izlaz jednosmernog napona 60

Poglavlje 5 • Dodatni ulazi i izlazi **63**

5.1 DDS podešavanje faze 63
5.2 Generator signala do 8 MHz 64
5.3 Merenje frekvencije 68
5.4 Dodatni analogni ulazi 72
5.5 Merenje kapaciteta od 1 pF 74
5.6 Merenje otpornosti do 1 MΩ 76
5.7 Merenje otpora od 1 Ω 78

Poglavlje 6 • Merenja i eksperimenti 80
6.1 Poduzorkovanje 80
6.2 Ispitivanje pri višim frekvencijama 82
6.3 Merenja sinhronog signala 84
6.4 Frekventni odziv niskopropusnog filtera 86
6.5 Niskopropusni LC filter 89
6.6 LC rezonanca 91
6.7 Tranzistorsko test kolo 93
Poglavlje 7• Proširenje firmware-a 97
7.1 Alternativne funkcije DDS-a 97
7.2 Sinusni talas sa polovinom amplitude. 98
7.3 Trougao i testera 99
7.4 Predstavljanje X-Y 101
7.5 Sweep generator 104
7.6 RAMP funkcija 106
7.7 Merenje karakterističnih krivih 110
Poglavlje 8 • Primeri primene 114
8.1 Emiterski pratilac 114
8.2 Emiterski pratilac kao konvertor impedanse 115
8.3 Sallen-Key filter 116
8.4 Generator frekvencije otkucaja (Beat-Frequency Generator) 117
8.5 Operacioni pojačavač 120
8.6 Udvostručavanje napona 121
8.7 Prolazni filter (All-pass Filter) 123
8.8 Pojasni filter (Bandpass Filter) 125
Poglavlje 9 • Dodatak 128
A.1 Spisak materijala 128
A.2 Crtanje prototable 128
A.3 Softverska podrška 128

Predgovor

Dobro opremljena laboratorija za elektroniku prepuna je izvora napajanja, mernih instrumenata, opreme za testiranje i generatora signala. Pored toga, postoje alati, komponente i mnoštvo verzija i projekata na kojima radite. Laboratorija može biti tesna. Nije li bolje imati jedan kompaktni uređaj za gotovo sve zadatke? Kompaktan i svestran, jeftin i jednostavan za kupovinu sve-u-jednom uređaj.

Nakon nekoliko pokušaja sa drugim sistemima, izbor je pao na Arduino Nano. Na ovoj osnovi planira se izraditi što univerzalniji PC interfejs za merenje i kontrolu. Jednostavno se priključuje na USB kabl i, u zavisnosti od softvera, formira sondu digitalnog voltmetra ili računarskog osciloskopa, generator signala, podesivi izvor napona, frekvencijski merač, ommetar, merač kapaciteta, snimač karakteristika krive i još mnogo toga.

Ovde opisani sklopovi i metode nisu pogodni samo za zadatke u laboratoriji, već se mogu koristiti u drugačijim situacijama. Tehnike iz ove knjige mogu se koristiti u tim slučajevima, kao polazna tačka za razvoj softvera u željenom pravcu.

Ostanite kreativni!
Burkhard Kainka

Softver i dodatne informacije o knjizi:
https://www.b-kainka.de/MeasurementLab.html

Poglavlje 1 • Priprema

Razvoj univerzalnog mernog sistema fokusirao se na upotrebu digitalnog računarskog osciloskopa u kombinaciji sa generatorom signala. Odlučujući faktor je granična vrednost frekvencije.

1.1 Izbor kontrolera

U prvom eksperimentu testirao sam Bluepill ploču sa STM32 kontrolerom. Ovaj Cortex M3 kontroler sa radnom frekvencijom do 72 MHz ima veoma brz AD konvertor i integrisani USB interfejs. U osnovi, sve zadatke može obaviti isti kontroler. Analogni podaci se čuvaju dok se istovremeno vrednosti tabele DDS prenose na brze PWM izlaze kako bi se generisali sinusni signali ili drugi oblici talasa.

Eksperimenti su išli dosta daleko, ali na kraju su neki smetajući faktori postali poznati. Za predstojeće zadatke važno je da uzorkovanje i izlazi funkcionišu u brzom i veoma tačnom vremenskom ograničenju. Postignute su brzine uzorkovanja do 100 kHz pri frekvenciji PWM od 125 kHz sa po dva izlazna i dva ulazna kanala. Međutim, stalno je postojao blagi poremećaj unutar vremenskog ograničenja, izazvan istovremenim zahtevima USB interfejsa. Ako se stvarno merenje i izlaz signala izvršavaju unutar prekidača tajmera na 100 kHz, ne bi trebao biti dozvoljen drugi prekid. Čim se doda drugi prekid tajmera ili, kao u ovom slučaju, USB prekid, potpuno ujednačena vremenska mreža se završava.

Pored toga, bilo je problema sa isporukom. Opšta kriza poluprovodnika 2021. godine značila je da je bilo teško doći do Bluepill ploče, pa se i to završilo na ovaj način. Doviđenja, Bluepill!

Postoje i drugi STM kontroleri. Korišćena je razvojna ploča STM32 Nucleo sa Cortex-M0 kontrolerom F040R8 do 64 MHz. Osnovna razlika bila je ta što nema interni USB interfejs i prenosi svoje podatke preko serijskog interfejsa. Kontroler prenosi svoje podatke samo tokom merenja i gotovo da ga ne "opterećuje" serijskim prenosom podataka. U stvari, to je potpuno eliminisalo obradu signala. Zapravo, projekat je bio na dobrom putu. Ali morao bih da izgradim posebnu ploču sa STM32 kontrolerom i USB/serijskim pretvaračem, što bi na kraju bilo relativno skupo.

Kada se upoznate sa 32-bitnim mikrokontrolerima, prvo što obično primetite je visoka brzina takta. Viša frekvencija treba da omogući brzu obradu signala u realnom vremenu. Međutim, često postoji frustracija, jer se čini da sofisticiraniji softver negira prednost u brzini. Ovo, kao i problemi sa nabavkom, ponovo su učinili neke postojeće 8-bitne kontrolere zanimljivijim.

U trećem pokušaju korišćen je 8051-kompatibilni N76E003 od Nuvoton-a. Ima 16kB memorije i radi na 16MHz. Njegova glavna prednost je više tajmera i ugrađeni PWM modul. To je omogućilo postizanje takta od 50 KHz, pri čemu se mogu meriti i analogni podaci za osciloskop i izlaz DDS podataka na PWM. Sve vremenski zahtevne operacije izvršiće se u jednoj rutini tajmera.

Tokom daljeg razvoja, zahtevi su se povećali jer je trebalo uključiti funkciju okidača i istovremeno meriti vreme otvaranja brojača frekvencije. Zbog toga je brzina uzorkovanja morala biti smanjena na 32 kHz.

U ovom trenutku me je zanimalo: Šta bi Atmega328 mogao da uradi u poređenju sa tim? Prvo sam ga testirao sa Bascom-om i bio sam prijatno iznenađen. Iako kontroler koji se koristi u Arduinu ima samo tri tajmera, jedan tajmer se može koristiti istovremeno i za PWM izlaz i za prekid tajmera. Brzina uzorkovanja je sada jednaka PWM izlaznoj frekvenciji 62,5 kHz. Pored toga, može se koristiti serijska brzina prenosa od 1 Mbit/s, čineći međuskladištenje izmerenih vrednosti nepotrebnim. Ovo efektivno omogućava istu brzinu koja je postignuta sa STM32. Pored toga, dokazano je da se mnoge dodatne funkcije uklapaju u prekid bez trošenja previše vremena.

To su bila četiri pokušaja sa istim ciljem. Pobednik do sada bio je ATmega328 na Arduino Nano-u. Sistem je jeftin, široko korišćen, i mnogi čitaoci već imaju ovu ploču. Međutim, ovo nije nužno tačno za Bascom, iako je prvobitna želja bila da radim sa Arduino IDE, ako je isto moguće. Međutim, Arduino skice nisu sposobne za rad u realnom vremenu, jer se dešavaju stvari u pozadini koje ne morate nužno videti. To je razlog zašto je Bascom u većini slučajeva mnogo brži od Arduino-C.

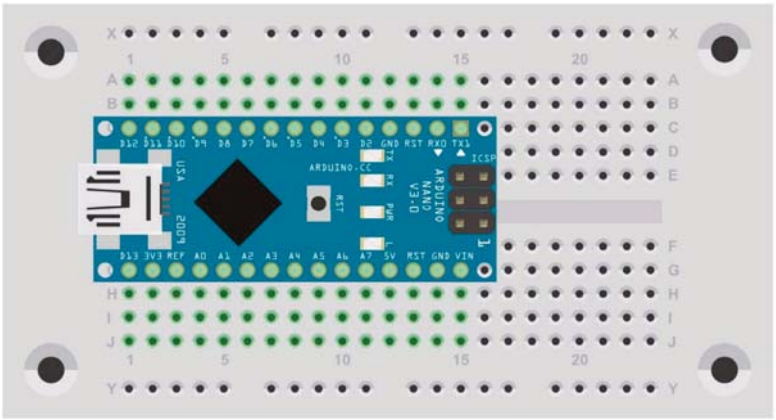
Odlučujući proboj došao je sa shvatanjem da se Arduino IDE takođe može koristiti za čist C. To omogućava korišćenje poznatog programskog okruženja sa pouzdanim bootloaderom i jednostavnom operacijom, istovremeno postižući maksimalnu radnu brzinu kontrolera.

Ovo postavlja osnovne temelje razvoja: Arduino Nano je snabdeven podacima i strujom putem USB kabla i vraća merene vrednosti. Svi rezultati se procenjuju i prikazuju na računaru. Programiranje PC softvera sa VB6 je obrađeno samo usputno, pri čemu korisnik može koristiti već gotove programe. Knjiga se fokusira na razvoj u C-u, optimizaciju procedura merenja i tipičnu upotrebu rezultata merenja.

Ne treba vam mnogo više od proto-ploče i Nano mikrokontrolera. Još uvek ima mesta na ploči za operacioni pojačivač i druge komponente i kola. Ovo takođe pokazuje pravilnu upotrebu digitalnih mernih uređaja. Sa ovim jednostavnim uređajem i malom brzinom uzorkovanja, mnoge greške merenja mogu se pojaviti na isti način kao i kod brzog DSO. Ako radite sa njim u malom obimu, dobićete manje iznenađenja na velikom uzorku. Na ovaj način, rad sa malom mernom laboratorijom služi kao koristan osnovni kurs.

1.2 Arduino Nano

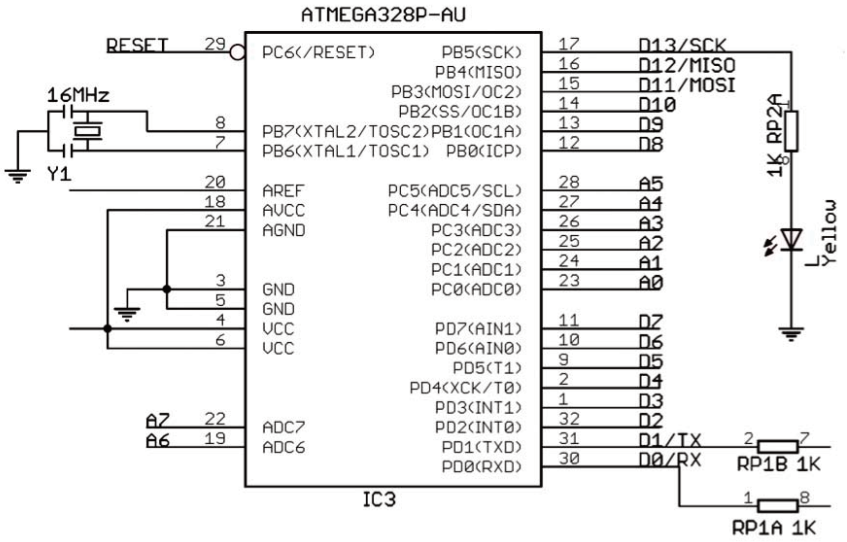
Svi programi za merenje predstavljeni u ovoj knjizi rade i na Arduino Uno i na Arduino Nano. To zavisi samo od kontrolera, ATmega328. Arduino Nano ima prednost što se može postaviti na proto-ploču sa drugim komponentama



Arduino Nano na proto ploči.

Pored originalnog Arduino Nano-a, postoje nekoliko vrlo jeftinih replika. Sve one koriste isti raspored pinova i mogu se koristiti za eksperimente u ovoj knjizi. Razlikuju se u nekim tehničkim detaljima i često u USB priključku. Većinom se koristi USB mini konektor. Ima prednost veće mehaničke čvrstoće, što favorizuje eksperimentalni rad. Međutim, USB Micro ili USB C kablovi su sada češći.

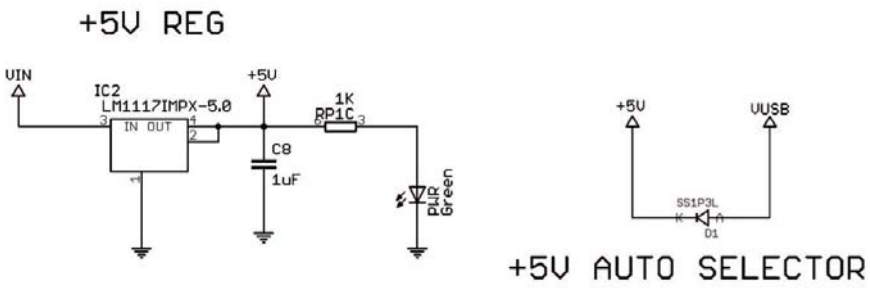
Spoljni konektori preimenovani su u D0 do D13 i A0 do A7 prema Arduino stilu, i mogu se adresirati sa Arduino IDE pod tim imenima. Ali za detaljnije programiranje važno je takođe znati originalna imena kontrolera.



Odlomak šeme Arduina Nano-a.

1.3 Izvor napajanja

Originalni Arduino Nano koristi FT232RL USB konvertor čiji interni regulator napona takođe obezbeđuje 3.3 V napajanje za spoljašnju elektroniku. Pored toga, postoje i nekoliko kopija koje koriste jeftiniji CH340 USB konvertor. Ovaj takođe ima 3.3 V izlaz ali sa manjom kapacitetom struje. Neke kopije stoga koriste dodatni regulator napona, dok druge koriste CH340 izlaz ili ostavljaju 3.3 V izlaz potpuno slobodnim.



Kao i svaki Arduino, Nano može dobiti svoj 5 V radni napon ili preko USB-a ili preko spoljnog izvora napajanja sa bar 7 V do Vin. Originalni Nano koristi Schottky diodu u seriji sa USB napajanjem, čiji propusni napon smanjuje radni napon za do 0.3 V. Ova dioda sprečava oštećenje računara ako se Nano slučajno napaja većim naponom.

Nekim Nano klonovima nedostaje serijski povezana Schottki dioda kako bi se obezbedio puni radni napon. Često su dve diode povezane antiparalno između VCC i GND. Ovo pruža zaštitu od pogrešno polarizovanog napona, ali ne i od prenapona na VCC.

"Prenapon? To se meni nikad neće desiti", rekao bi svako. Ali dok sam pisao ovu knjigu, ipak se desilo. Budući da je Nano istovremeno programiran kao osciloskop i kao generator signala, podesiv u širokim granicama, trebalo je da ispitam prekidačko ponašanje reed releja, koji je povezan sa laboratorijskim izvorom napajanja od 30 V preko prekidačkog tranzistora. Moralo je doći do greške i 30 V je direktno stiglo do analognog ulaza A0 a odatle, preko interne zaštitne diode, do porta konektora ATmega na VCC liniju. Nano je preživeo skoro neoštećen, samo je pin A0 imao unutrašnji prekid sa GND-om nakon toga. Ali USB hub i web kamera povezana s njim istovremeno su uništeni. Kasnije se otkriveno da je USB hub imao serijsku diodu, što je verovatno sprečilo veću štetu mikrokontroleru.

Usput, Nano replika uglavnom korišćena u paketima izdavačke kuće Franzis bi sprečila ovu štetu baš kao i originalni Nano, jer oba imaju Schottky diodu u seriji sa USB napajanjem.

Još jedna zamka vreba sa svim Nano-ima: veza VIN obično ostaje slobodna kada se kontroler napaja preko USB-a. Ako je povežete sa GND, regulator napona od 5 V

prelazi u zabranjeno stanje, što može dovesti do latchinga. Regulator se zatim aktivira kao tiristor i može se jako zagrejati. Takođe, relativno veliki kondenzator između VIN i GND može izazvati ovo stanje pri paljenju zbog velike struja punjenja. Stoga bi ovaj pin trebalo ostaviti slobodnim ako ne želite da priključite spoljni izvor napajanja.

Opšte mere predostrožnosti uglavnom se odnose na korišćenje napajanja. Spoljni izvor napajanja na Vin treba koristiti samo u izuzetnim slučajevima jer se u tom slučaju mora voditi računa. Najsigurniji način je napajanje putem USB porta, sa USB hubom između za još veću sigurnost. Mana je često smanjeni napon na VCC-u, gde se umesto 5.0 V često ima samo 4.5 V. Ako USB hub ima spoljno napajanje, ono se može povezati ako je potrebna visoka preciznost. VCC takođe služi kao referentni napon za AD konvertor.

Ako je potreban veći unutrašnji napon, može se koristiti udvostručavanje napona, što je opisano u odeljku 8.6. U ovom slučaju, moguće greške su manje opasne jer kolo ne može isporučivati velike struje.

Sve veze sa spoljnim svetom, na primer, ka spoljnim mernim objektima, trebalo bi pažljivo proveriti. Radi sigurnosti, dodatni serijski otpornici od 1 kΩ do 10 kΩ mogu biti povezani u seriji sa testnim vodovima, što pruža efikasno ograničenje struje u slučaju greške.

Poglavlje 2 • Preliminarna ispitivanja

Na početku će se ovde diskutovati i koristiti uobičajene Arduino skice. One vam omogućavaju da testirate različite ulaze i izlaze, upoznate se sa tipičnim metodama merenja, a istovremeno i ispitaju koliko brzo kontroler može raditi s njima.

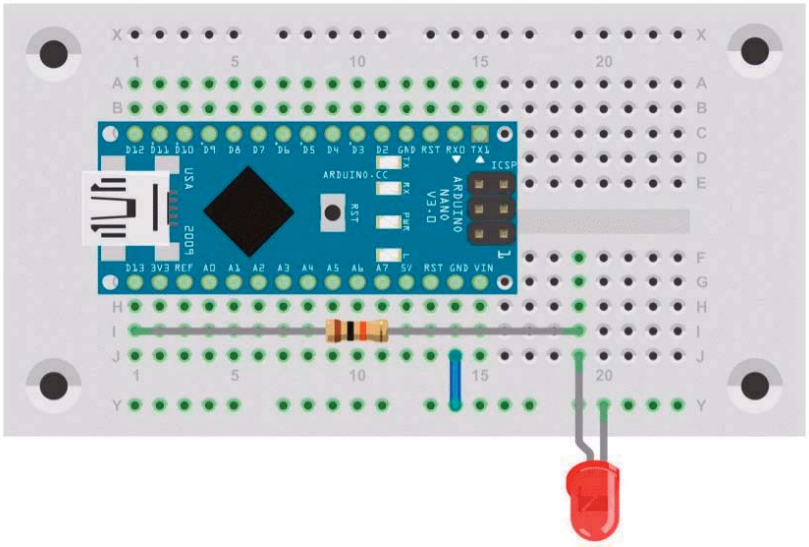
2.1 Izlazni portovi

Kada god želim da testiram Arduino, prvo učitavam program "Blink" iz primera (grupa 01. Osnove).

```
void setup() { pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}
void loop() {
 digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
 delay(1000);
 digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
 delay(1000);
}
```

Ugrađena LED dioda tada će treptati na 0.5 Hz, jer je uključena jednu sekundu, a zatim isključena, takođe na jednu sekundu.

Ugrađeni LED je povezan sa pinom D13 preko serijskog otpornika. Ovde možete povezati dodatni spoljni LED sa sopstvenim serijskim otpornikom. Sa modernim, visoko efikasnim LE diodama, dovoljna je struja manja od 1 mA. Zbog toga se ovde preporučuje otpornik od 10 kΩ.

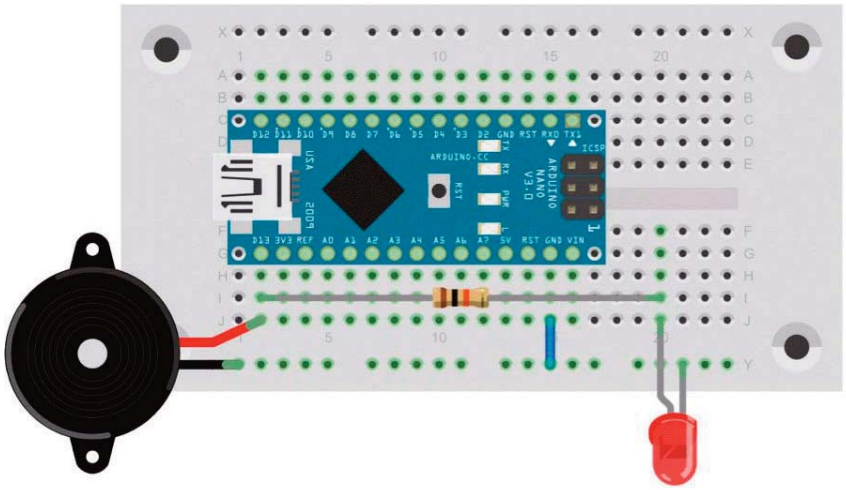


Dodatno povezivanje spoljne LED diode.

Sada možete eksperimentisati sa vremenima čekanja ili "zadržavanja". Da li je treptanje brzinom od 25 Hz još uvek primetno oku? Vreme čekanja treba smanjiti na ukupno 40 ms.

```
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
  delay(20);
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
  delay(20);
}
```

Sa daljim smanjenjem na dva puta po 1 ms, već može biti generiran ton od 500 Hz. Piezo zvučnik ima dovoljno visoku otpornost da se može priključiti direktno na port. Trebalo bi da čujete čist ton. Dakle, prvi utisak je da je Arduino "sposoban da radi u realnom vremenu u opsegu milisekundi".

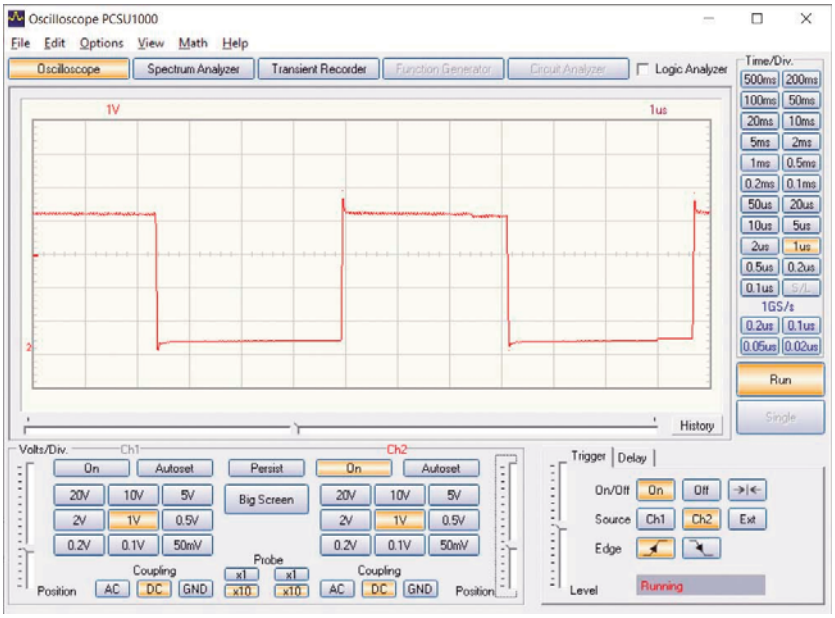


Povezivanje piezo zvučnika.

Petlja bez ikakvih kašnjenja daje još bolji utisak. Ključno pitanje je koja se brzina tada postiže. Test prvo pokazuje da LED očigledno stalno svetli. I više se ne oglašava zvučni signal.

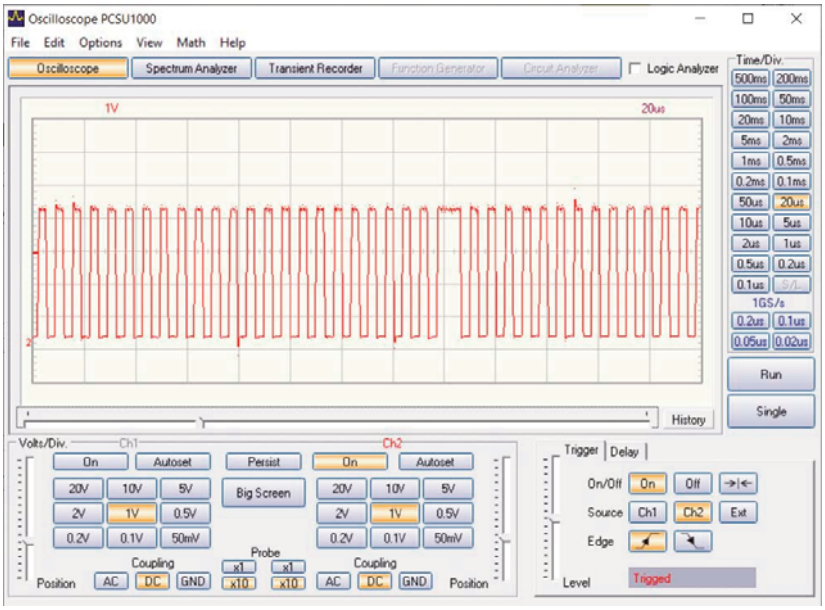
```
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
}
```

Provera osciloskopom pokazuje da je port uključen oko 3 µs i ostaje isključen oko 3.8 µs. Frekvencmetar meri 147 kHz, što daje period od 6.8 µs.



Brzi signali kvadratnog oblika.

Još pažljivijim pregledom primećuje se da se izolovani prekidi od nekoliko mikrosekundi pojavljuju u signalu. Verovatno su uzrokovani vremenom merenja u Arduinu. Prekid tajmera se izvršava u pozadini i periodično prekida program kako bi izmerio vreme. Ovo je važno ako želite izvršavati operacije u definisanim vremenskim intervalima, ali je prilično iritantno za zadatke koji zahtevaju tačnost vremena. Dakle, cilj je onemogućiti sve nepotrebne pozadinske procese. Iako je Arduino pogodan za jednostavne zadatke, kontroler koji se koristi može uraditi mnogo više kada su u pitanju procesi koji zahtevaju tačnost vremena.



Prekid u signalu.

2.2 Analogni ulazi i izlazi

Dobra polazna tačka za obradu analognih veličina je program AnalogInOutSerial iz primera (grupa 03. Analog). Vrši merenja na ulazu A0 i šalje izmerene vrednosti preko serijskog interfejsa brzinom 9600 bauda. Osim toga, podaci se šalju na izlaz kao PWM signal putem kvazi-analognog izlaza na pinu 9.

```
const int analogInPin = A0;
const int analogOutPin = 9;

int sensorValue = 0;
int outputValue = 0

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  sensorValue = analogRead(analogInPin);
  outputValue = map(sensorValue, 0, 1023, 0, 255);
  analogWrite(analogOutPin, outputValue);
  Serial.print("sensor = ");
  Serial.print(sensorValue);
  Serial.print("\t output = ");
  Serial.println(outputValue);
```