

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI PROJEKT

**Upravljačko sklopovlje za prikupljanje i  
obradu senzorskih signala na CubeSat  
nanosatelitu**

Filip Jurić

Zagreb, lipanj 2021.

**Student:** Filip Jurić

**Naslov teme:**

Upravljačko sklopovolje za prikupljanje i obradu senzorskih signala na CubeSat nanosatellitu

**Naslov teme (engleski):**

Control Hardware for Sensor Signals Acquisition and Processing on CubeSat Nanosatellite

**Mentor:**

Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Džapo

**Kratki opis:**

Upoznati se s tehnološkim odrednicama i ograničenjima kod projektiranja i implementacije rješenja temeljenih na CubeSat nanosatellitima. Proučiti projektnu dokumentaciju nanosatelita koji se razvija u okviru FERSAT projekta. Proučiti specifikacije i zahtjeve na PDH (*Payload Data Handler*) računalo unutar satelita i odabrati odgovarajući mikrokontroler s ARM Cortex-M arhitekturom. Projektirati tiskanu pločicu sukladno tehničkim zahtjevima koja treba sadržavati sljedeće cjeline: podsustav za napajanje, mikrokontroler s ARM Cortex-M arhitekturom, sklopovski nadzorni sustav za kontrolu izvođenja programa (vanjski *watchdog*), Flash memoriju za pohranu senzorskih podataka, CAN sučelje za komunikaciju s glavnim upravljačkim računalom, sučelja prema drugim podsustavima na satelitu (kamera, senzorska pločica s optičkim i UV senzorima, X-band odašiljač). Pripremiti proizvodnu dokumentaciju i testirati funkcionalnost razvijenog sklopovlja.

*Ovaj završni projekt posvećujem djedu Petru.*

## Sadržaj

1.	Uvod .....	1
2.	Blok shema sklopovlja i opis sustava .....	3
3.	Električna shema sklopovlja .....	4
3.1.	Mikrokontroler .....	4
3.1.1.	Napajanje mikrokontrolera .....	5
3.1.2.	Vanjski izvor brzog signala takta .....	6
3.1.3.	Programiranje mikrokontrolera .....	7
3.1.4.	Odabir boot memorije .....	7
3.2.	Napajanje tiskane pločice .....	8
3.2.2.	Prvi prekidački silazni regulator napona .....	9
3.2.3.	Drugi prekidački silazni regulator napona .....	11
3.2.4.	Invertirajući regulator napona .....	11
3.3.	Sklopovski nadzorni sustav za kontrolu izvođenja programa .....	12
3.4.	Flash memorija .....	14
3.5.	Kamera .....	16
3.6.	CAN i UART komunikacija .....	19
3.7.	Glavni konektor .....	22
3.8.	Indikatorske svjetleće diode .....	23
3.9.	Konektor za RF modul .....	25
4.	Tiskana pločica .....	26
4.1.	Mehanički parametri tiskane pločice .....	32
4.2.	Smještaj komponenti i tiskane veze .....	34
5.	Izrada tiskane pločice i komponente .....	36
6.	Zaključak .....	37
	Literatura .....	38

# 1. Uvod

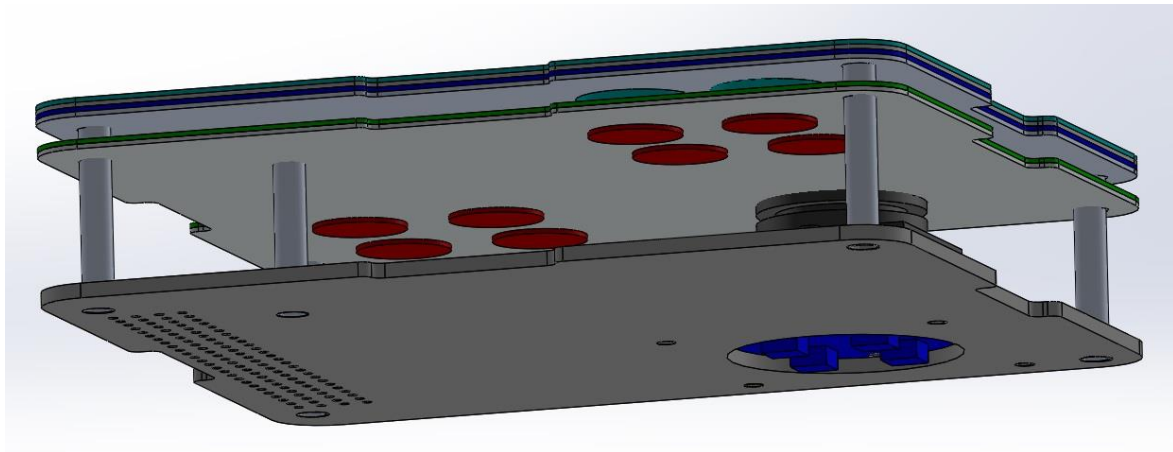
Ovaj završni projekt je dio većeg projekta FERSAT u kojem se planira izraditi, lansirati i koristiti CubeSat nanosatelit u orbiti visine između 500 km i 600 km. CubeSat je općenito satelit u obliku kocke sastavljen od kocaka veličine 10 cm x 10 cm x 10 cm i mase do 1.33 kg (1U veličina) kojih ima već preko 200 u svemiru. U okviru FERSAT projekta će se napraviti satelit osnovne 1U veličine i koristit će se za prikupljanje i slanje informacija o:

- svjetlosnom onečišćenju na Zemlji (pratit će se udio rasvjete na bazi svjetlećih dioda u odnosu na konvencionalnu rasvjetu – fluorescentno i natrijevo svjetlo),
- temperaturi tla i mora,
- biljnom pokrovu na području Hrvatske,
- vremenskim promjenama u magnetskom polju Zemlje,
- gustoći elektrona u ionosferi (po prvi put s PureB detektorom na čijem je razvoju sudjelovao Fakultet elektrotehnike i računarstva),
- lokaciji ozonske rupe.

U okviru ovog završnog projekta je projektirana (korištenjem Altium Designer alata) i izrađena tiskana pločica koja je sastavni dio PDH (engl. *Payload Data Handler*) sustava satelita koja se sastoji od sljedećih glavnih dijelova:

- podsustav za napajanje,
- mikrokontroler s ARM Cortex-M arhitekturom,
- sklopovski nadzorni sustav za kontrolu izvođenja programa (vanjski *watchdog*),
- Flash memorija za pohranu senzorskih podataka,
- CAN sučelje za komunikaciju s glavnim upravljačkim računalom,
- sučelja prema drugim podsustavima na satelitu (kamera, senzorska pločica s optičkim i UV senzorima, X-band odašiljač).

Položaj ove tiskane pločice je na dnu unutar PDH sustava satelita iznad kojih se nalaze ostale tiskane pločice PDH sustava (eng. *stack-up*) senzorska i X-Band odašiljačka tiskana pločica. Trodimenzionalni model PDH sustava se može vidjeti na Slika 1.



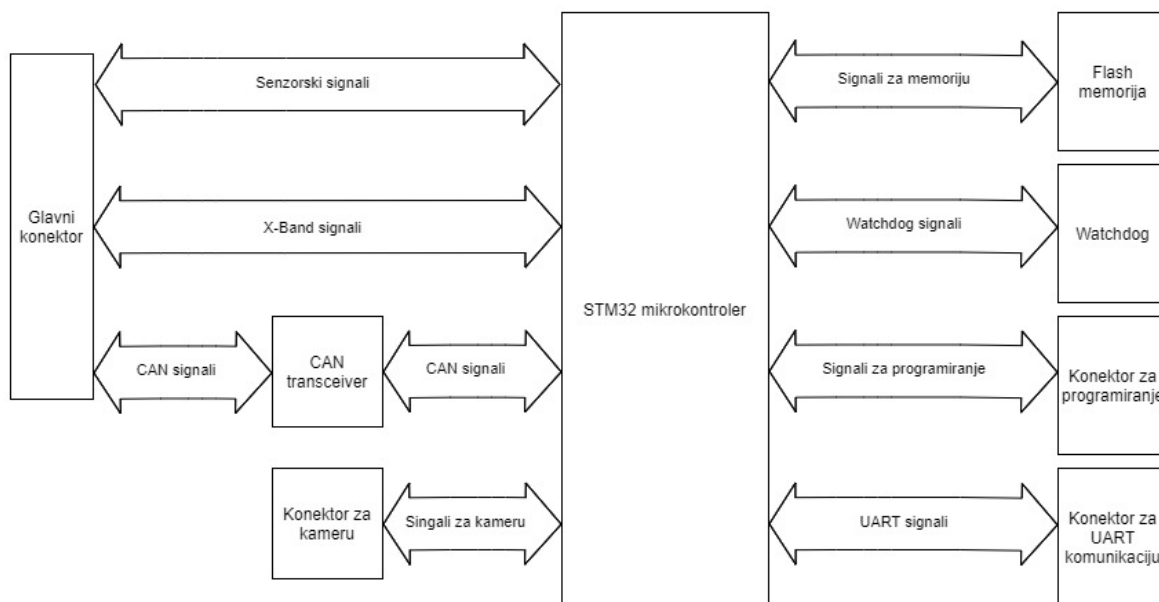
Slika 1 Mehanički izgled PDH sustav satelita

Naposlijetku je pripremljena proizvodna dokumentacija te je ispitana funkcionalnost razvijenog sklopovlja.

Napomena: ova tiskana pločica će se prvenstveno koristiti za probnu verziju satelita i testiranja uz pomoć drona, dok će krajnja verzija ove tiskane pločice vjerojatno doživjeti neke promjene.

## 2. Blok shema sklopovlja i opis sustava

Blok shema razvijenog sklopovlja (bez podsustava za napajanje, indikatorskih svijetlećih dioda i vanjskih kristala) je prikazana na Slika 2.

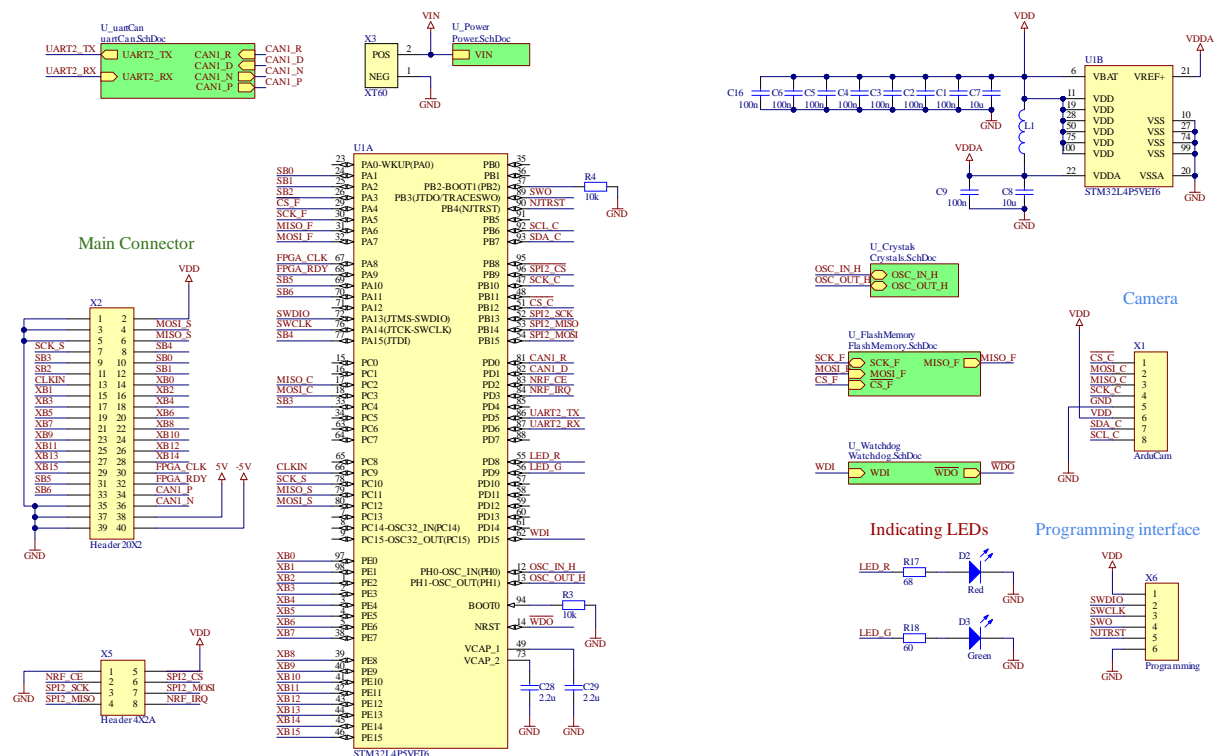


Slika 2. Blok shema sklopovlja

Na blok shemi nije prikazan podsustav za napajanje, indikatorske svijetleće diode te konektor za RF modul jer će on postojati samo na probnoj tiskanoj pločici za testiranje dronovima, dok na tiskanoj pločici koja će biti u satelitu on neće biti prisutan. Vidimo kako senzorski signali stižu u sustav putem glavnog konektora na lijevoj strani kako bi se mogli obrađivati mikrokontrolerom i spremati u Flash memoriji. Nakon obrade moguće ih je slati na Zemaljsku postaju X-Band odašiljačem do kojeg se stiže putem glavnog konektora. Također je moguće slikati fotografije kamerom, obrađivati ih mikrokontrolerom, spremati u Flash memoriji i također slati X-Band odašiljačem. Na sustavu postoji i sklopovski nadzorni sustav za kontrolu izvođenja programa (radi dodatne sigurnosti rada sustava) kao i konektori za programiranje i za UART komunikaciju sa sustavom. Za potrebe komunikacije s glavnim upravljačkim računalom na satelitu, koristi se CAN komunikacija.

### 3. Električna shema sklopovlja

Električna shema sklopovlja je napravljena hijerarhijskim dizajnom u alatu Altium Designer te je glavna shema (eng. *top sheet*) prikazan na Slika 3. U ovom poglavlju će detaljno biti prikazan svaki dio električne sheme.



Slika 3. Električna shema sklopovlja (eng. *top sheet*)

#### 3.1. Mikrokontroler

Sklopovlje se temelji na mikrokontroleru s ARM Cortex-M arhitekturom na kojeg su spojeni svi ostali dijelovi. Odabrani mikrokontroler je STM32L4P5VET6 sa 100-pinskim LQFP (100-LQFP) kućištem te je prikazan na Slika 4. Na električnoj shemi je prikazan kao *multipart* komponenta U1 (U1A i U1B), gdje U1A predstavlja mikrokontroler bez izvoda za napajanje, dok U1A predstavlja dio mikrokontrolera s izvodima za napajanje.





Slika 4. STM32L4P5VET6 u LQFP100 kućištu [1]

### 3.1.2.3.1.1. Napajanje mikrokontrolera

Dio mikrokontrolera zadužen za napajanje je na shemi na Slika 3 prikazan komponentom U1B.

Digitalno sklopovlje mikrokontrolera se napaja putem vanjskog napona VDD (reguliranih 3,3 V) koje se dovodi iz podsustava za napajanje. Njime se napajaju ulazni i izlazni sklopovi za GPIO te Flash memorija. Izvedeno je i interno napajanje unutar mikrokontrolera (pomoću regulatora napona) u iznosu od 1,2 V i njime se napajaju unutrašnji sklopovi GPIO, jezgra i ostalo sklopovlje.

Postoji šest izvoda koje je potrebno spojiti na 3,3 V (VDD) i na svaki od tih izvoda su spojena po dva blokadna keramička kondenzatora – jedan od 100 nF i jedan od 10 uF. Razlog stavljanja blokadnih kondenzatora (što bliže uz izvode napajanja integriranih sklopova) je sprječavanje propada napona na linijama napajanja zbog parazitnih induktiviteta linija. Kada dolazi do promjena stanja unutar digitalnog CMOS integriranog sklopa dolazi do potrebe za strujom iz napajanja. Zbog toga se povlači određena struja iz izvora napajanja koje prije nije bilo na vodovima napajanja (derivacija struje je konačna i ima neki iznos). Ta promjena struje na parazitnim induktivitetima  $L$  vodova napajanja radi pad napona  $u_L$  (pojava propada napona), te ako je promjena struje  $i_L$  (derivacija struje) veća i ako su parazitni induktiviteti vodova napajanja veći, propad napona može prouzrokovati manji iznos napona na integriranom sklopu (ispod dozvoljenih vrijednosti) te on može raditi neispravno:

$$u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (1)$$

Zbog toga se stavljaju blokadni kondenzatori što bliže integriranom sklopu (da vodovi budu kraći i samim time i parazitni induktiviteti manji) koji se u stacionarnom stanju nabiju određenim nabojem  $Q$  tako da se izjednače napon izvora  $U_i$  i napon na kondenzatoru  $U_C$ :

$$U_C = \frac{Q}{C} = U_i \quad (2)$$

U prijelaznoj pojavi kad postoji potreba za strujom u integriranom sklopu koje prije nije bilo, tu potrebu sad može zadovoljiti blokadni kondenzator davajući svoj prije nakupljeni naboj te je pad napona na malim parazitnim induktivitetima vodova od kondenzatora do integriranog sklopa puno manji. Dakle, blokadni kondenzatori niskopropusno filtriraju napon napajanja.

Na izvod VDDA se dovodi vanjski napon napajanja za analogni dio mikrokontrolera koji uključuje analogno digitalne i digitalno analogne pretvornike, operacijska pojačala, komparatore, naponske reference. Za taj izvod se također koriste dva blokadna kondenzatora, jedan od 100 nF i jedan od 10 uF. Na VDDA je u biti spojen filtrirani VDD (3,3 V). Filtracija je izvedena s feritom L1 koji skupa s blokadnim kondenzatorima čini niskopropusni filter za još veću točnost i čistoću napona za osjetljivi analogni i analogno digitalni dio.

Postoji i izvod VBAT za spajanje vanjske baterije koji se inače koristi za RTC (eng. *Real Time Clock*), *backup* registre i SRAM ako je VDD odsutan, no u slučaju nekorištenja on se spaja kratko s VDD, što je ovdje i učinjeno.

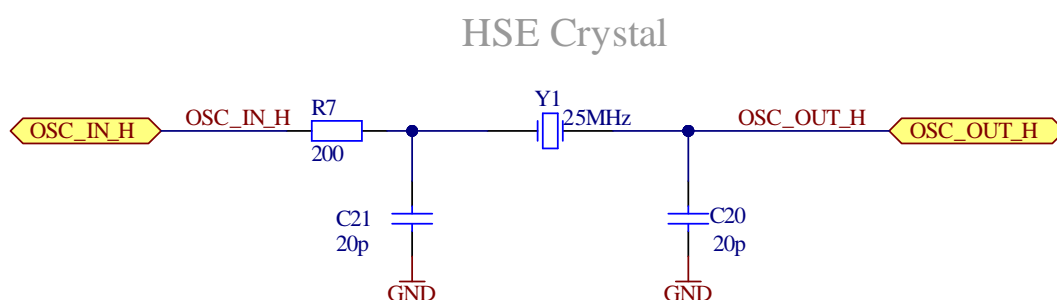
### 3.1.3. Vanjski izvor brzog signala takta

Vanjski izvor brzog signala takta (HSE OSC clock – eng. *High Speed External Oscillator clock*) je ovdje ostvaren pomoću vanjskog kristalnog rezonatora (kvarcni oscilator). Odabrani kristal je ABLS7M2-25.000MHZ-D2Y-T koji je prikazan na Slika 5. Sami način ostvarivanja konstantne frekvencije pomoću kristala je taj da se na kristal dovede izmjenični napon zbog kojeg kristal počinje vibrirati mehanički (piezoelektrični efekt). Mehaničke vibracije kristana na rezonantnoj frekvenciji uzrokuju pojavu električnog napona na svojim krajevima (piezoelektrični efekt) te određene frekvencije. Rezonantna frekvencija ovisi o fizičkim dimenzijama pločice kristala.



Slika 5. ABL57M2-25.000MHZ-D2Y-T [2]

Kristal koji je u paralelnoj rezonanciji skupa s internim digitalnim pojačalom u mikrokontroleru (skupa s dva kondenzatora i jednim otpornikom) čini oscilator (poznatiji još i kao *Pierceov oscilator*) koji nam daje signal frekvencije 25 MHz. Shema kojom je izveden ovaj oscilator je prikazan na Slika 6. Signal takta kojeg nam daje ovako izveden oscilator se može koristiti za SYSCLK (eng. *System Clock*).



Slika 6. Shema za vanjski kristalni oscilator

### 3.1.4. Programiranje mikrokontrolera

Za potrebe učitavanja softvera u Flash memoriju mikrokontrolera i uhodavanje dodan je konektor (konektor X6 na Slika 3) sa šest izvoda u razmaku od 100 mila (*Header 6* konektor dostupan na zavodu). Izvodi su namijenjeni za standardne signale pri programiranju mikrokontrolera.

### 3.1.5. Odabir boot memorije

U prvom megabajtu memorije je mapirana *boot* memorija (prostor u kojeg se preslikava memorija iz koje mikrokontroler izvršava programski kod nakon reset).

Odabir *boot* memorije se obavlja pomoću dva izvoda mikrokontrolera: BOOT0 i BOOT1 dovodeći te izvode u visoko ili nisko stanje. Odabir se vrši na način prikazan u Tablica 1. Odabir *boot* memorije

Tablica 1. Odabir *boot* memorije

BOOT0	BOOT1	Odabrana <i>boot</i> memorija
0	X	Flash memorija
1	0	Sistemska memorija
1	1	SRAM

Sistemska memorija je ROM (eng. *Read Only Memory*) u kojem se nalazi tvornički ugrađen *boot loader*. Ako je odabrana ona kao *boot* memorija onda se pokreće *boot loader* te se inicijalizira sklopovlje mikrokontrolera, učitava korisnikov program preko određenog sučelja te pohranjuje ga u Flash memoriju.

Flash memorija je memorija u koju korisnik stavlja svoj program te je ona ovdje odabrana kao *boot* memorija koja će se preslikati u prvi megabajt memorije. Taj odabir se može vidjeti na Slika 3. Vidimo kako su i BOOT0 i BOOT1 spojeni na masu.

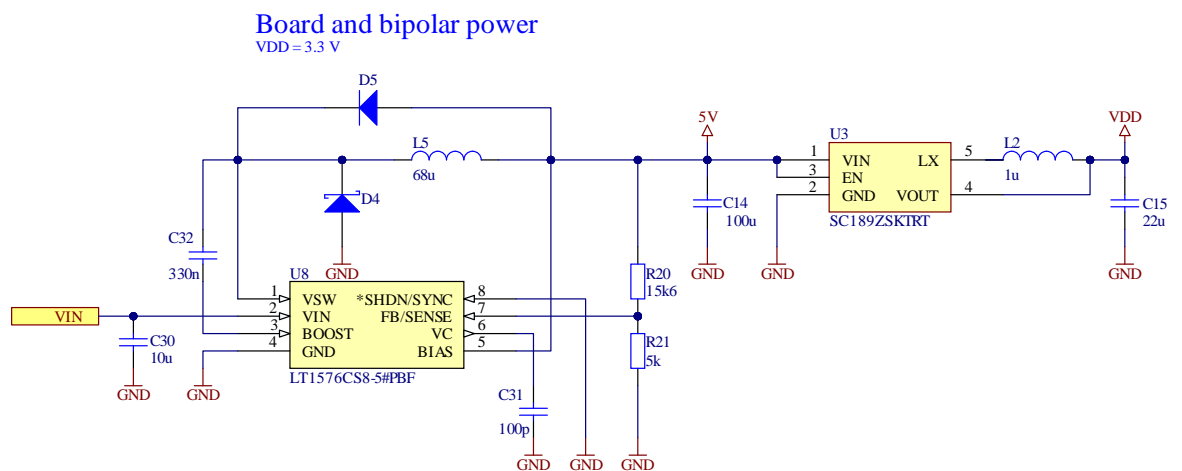
## 3.2. Napajanje tiskane pločice

Napajanje koje se dovodi na tiskanu pločicu se dovodi putem konektora XT60 (konektor X3 na Slika 3) dolazi iz izvora napona čiji je raspon od 5 V do 25 V. U podsustavu za napajanje moraju postojati izvori napajanja sljedećih karakteristika:

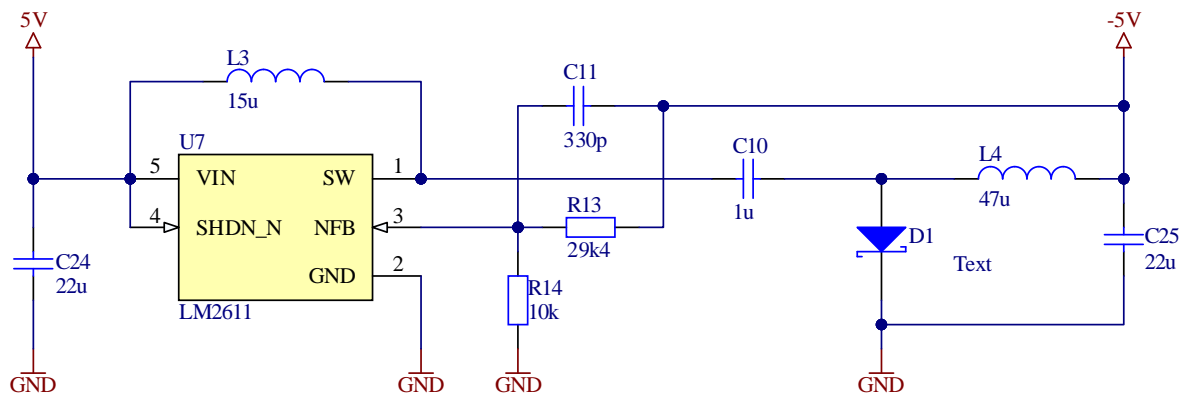
- regulirani napon od 5 V za potrebe PDH sustava s dozvoljenom strujom do 2 A
- regulirani napon od -5 V za potrebe ostatka PDH sustava
- regulirani napon od 3,3 V za potrebe ove tiskane pločice

Za sve ove potrebe su korišteni prekidački regulatori zbog mnogo veće efikasnosti od linearnih regulatora i smanjivanja potrošnje pločice na minimum (oko 5 W).

Dio sheme zadužen za napajanje je prikazan na Slika 7 i na Slika 8.



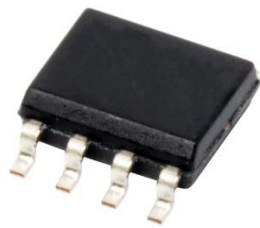
Slika 7. Dio sheme podsustava za napajanje za dobivanje reguliranih napona od 5 V i 3.3 V



Slika 8. Dio sheme podsustava za napajanje za dobivanje reguliranog napona od -5 V

### 3.2.2. Prvi prekidački silazni regulator napona

Ulazni neregulirani napon koji može biti u rasponu od 5 V do 25 V spušta se na reguliranih 5 V pomoću silaznog prekidačkog naponskog (*buck*) regulatora LT1576CS8-5#PBF (U8 na Slika 7) tvrtke *Analog Devices* te je prikazan na Slika 9.



Slika 9. LT1576CS8-5#PBF u SO8 kućištu [3]

Koristeći korisničku dokumentaciju regulatora sastavljen je dio sheme za spuštanje i reguliranje napona na 5 V. Očekivana efikasnost ovog regulatora je 85%. Napon interne reference (za pojačalo pogreške) iznosi 1,21 V, te su prema tome odabrani iznosi otpornika R20 i R21 kako bi naponsko djelilo odgovaralo izlaznom naponu od 5 V. Izvod FB/SENSE unutar regulatora idu na pojačalo pogreške na invertirajuću stezaljku, dok je na neinvertirajućoj stezaljci napon interne reference  $U_{REF} = 1,21$  V. Regulator će raditi tako da smanji razliku („grešku“) između stezaljki pojačala pogreške odnosno da dovede svoje stezaljke na isti potencijal. Pošto je neinvertirajuća stezaljka konstantno na 1,21 V, invertirajuća stezaljka će se namjestiti na 1,21 V. Upravo je točka između otpornog dijelila R20 i R21 spojena na invertirajuću stezaljku pojačala pogreške te će iznositi 1,21 V. Prema korisničkim uputama, dobar odabir za otpor R21 je 5 k $\Omega$ , pa znajući to i znajući na kojem je potencijalu točka između njih, iznos otpornika R20 računamo ovako ( $U_{IZ}$  je ovdje 5 V):

$$R20 = \frac{R21 \cdot (U_{IZ} - U_{REF})}{U_{REF}} \quad (3)$$

Koristeći jednadžbu (3) dolazimo do vrijednosti otpora  $R20 = 15,6$  k $\Omega$ . Time smo namjestili izlazni napon prvog regulatora na 5 V.

Zavojnica (L5 na Slika 3) koja je dio niskopropusnog filtra napona kojeg daje integrirani sklop je odabrana prema uputama korisničke dokumentacije gdje piše da za struje tereta veće od 1 A (što sad je slučaj) uzmemo zavojnicu s induktivitetom 60  $\mu$ H. U katalogu distributera komponenti je pronađena SMD zavojnica koja može podnijeti odgovarajuću struju no s induktivitetom od 68  $\mu$ H što je približno preporučenoj vrijednosti od 60  $\mu$ H.

Preporučena Schottkyjeva dioda je bila *through hole* pa je pronađena u katalogu distributera komponenti SMD Schottkyjeva dioda (D4 na Slika 3). sličnih svojstava (strujnih i naponskih mogućnosti). Ovdje se koristi Schottkyjeva dioda umjesto obične signalne diode iz razloga što su Schottkyjeve diode brže od običnih i imaju manji pad napona na sebi

prilikom vođenja (odabrana ima pad napona od 0,5 V dok obične signalne imaju obično oko 0,7 V).

Na sličan način su odabrane i ostale komponente (koristeći korisničku dokumentaciju – eng. *datasheet*).

Ovih reguliranih 5 V se ne koristi na ovoj tiskanoj pločici već se putem glavnog konektora odvodi do senzorske tiskane pločice, gdje je to potrebno.

### 3.2.3. Drugi prekidački silazni regulator napona

Svrha drugog po redu prekidačkog silaznog (*buck*) regulatora napona je spuštanje prethodno dobivenih 5 V (s prvim prekidačkim silaznim regulatorom) na reguliranih 3.3 V potrebnih za napajanje ove tiskane pločice. Za ove potrebe odabran je SC189ZSKTRT naponski regulator (U3 na Slika 7) tvrtke *Semtech* te je prikazan na Slika 10.



Slika 10. SC189ZSKTRT u SOT-23-5 kućištu[4]

Ulazni naponi koje on može izdržati su od 2,9 V do 5,5 V i može izdržati struju do 1,5 A. Efikasnost ovog regulatora će biti oko 89% u normalnom radu. Korištenje ove komponente je jednostavno jer nema potrebe ni za vanjskom diodom ni za otporničkim dijelilom te je prema korisničkoj dokumentaciji sastavljena potrebna shema. Komponente koje su se pritom koristile su odabrane uz vrijednosti iz korisničke dokumentacije te zahtjeva na struje i napone koje ta komponenta treba izdržati.

### 3.2.4. Invertirajući regulator napona

Za senzorsku pločicu je potrebno bipolarno napajanje od 5 V i -5 V te će se ova dva napona dovesti s ove tiskane pločice preko glavnog konektora. Napon od -5 V se dobiva od prethodno dobivenih 5 V putem invertirajućeg (eng. *buck boost*) regulatora napona (U7 na

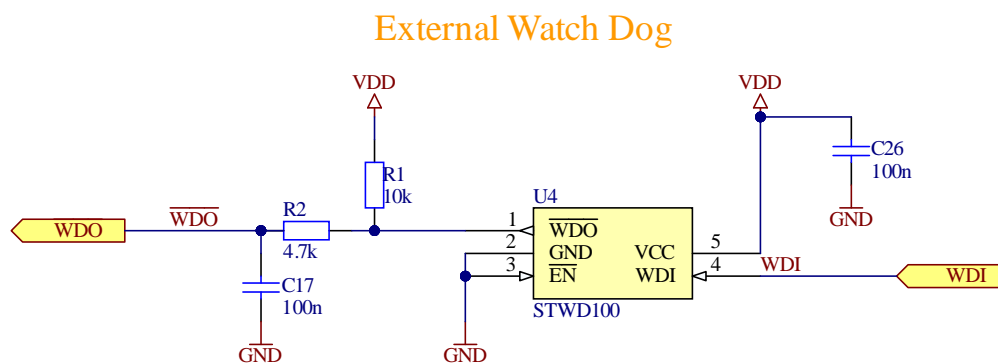
Slika 8). Odabrani uzlazni regulator napona je LM2611AMF tvrtke *Texas Instruments* prikazanog na Slika 11. U *datasheetu* su pronađene upute za korištenje ovog regulatora kao pretvornika napona od 5 V na napon od -5 V te je sastavljena shema prema njima. Efikasnost ovog regulatora će se kretati oko 75% u normalnom radu.



Slika 11. LM2611AMF u SOT-23-5 kućištu[25]

### 3.3. Sklopovski nadzorni sustav za kontrolu izvođenja programa

Radi dodatne sigurnosti i redundancije dodan je na tiskanu pločicu i sklopovski nadzorni sustav za kontrolu izvođenja programa (vanjski *watchdog*). Dio sheme na kojoj je *watchdog* je na Slika 12.

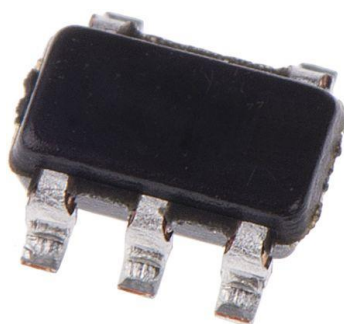


Slika 12. Shema podsustava za sklopovski nadzorni sustav za kontrolu izvođenja programa



U osnovi, *watchdog* ima interno brojilo koje se, u normalnom radu, uvijek resetira tako da brojilo nikad ne dosegne neku određenu vrijednost (tj. da nikad ne prođe neko određeno vrijeme). Ako izvođenje programa dođe do blokade *watchdog* neće biti resetiran na vrijeme te će *watchdog* na svom izlazu dati signal za resetiranje sustava.

Odabrani integrirani sklop (U4 na Slika 12) za ovu funkciju je STWD100 tvrtke *STMicroelectronics* te je prikazan na Slika 13. Za siguran rad, spojen je blokadni kondenzator od 100 nF (C26 na Slika 12).



Slika 13. STWD100NYWY3F u SOT-23-5 kućištu[5]

Ovaj integrirani sklop ima sljedeće izvode:

- \*WDO (eng. *WatchDog Output*)
- WDI (eng. *WatchDog Input*)
- \*EN (eng. *Enable*)
- GND (eng. *Ground*)
- VCC (eng. *Supply voltage*)

\*WDO je izlaz *watchdog* sklopa aktivan nisko. Ako iz bilo kojeg razloga interno brojilo ne bude resetirano (ako prođe neko kritično vrijeme *twd*), ovaj izlaz postaje aktivan. Za slučaj izvoda kao otvorenog odvoda (eng. *open drain*) spojen je pritezni (eng. *pull up*) otpornik (R1 na Slika 12) od 10 k $\Omega$  prema napajanju VDD, tako da kad \*WDO postaje aktivan, izvod će biti na čvrstom potencijalu mase odnosno nisko, dok kad je \*WDO neaktivan izvod će biti na potencijalu napajanja (VDD) odnosno visoko preko priteznog otpornika. Upravo jer je ovaj izlaz aktivan nisko, možemo ga spojiti na izvod NRST mikrokontrolera. Izvod NRST mikrokontrolera služi za dovođenje vanjskog reseta aktivnog nisko, što se upravo poklapa s našim potrebama. Preporuka je da se između izvoda \*WDO i NRST postavi u seriju otpornik iznosa 4.7 k $\Omega$  kako bi se suzbile potencijalne kolizije kad

jedan izvod (npr. \*WDO) želi postaviti liniju nisko, a druga visoko (npr. NSRST), te je to ovdje i učinjeno.

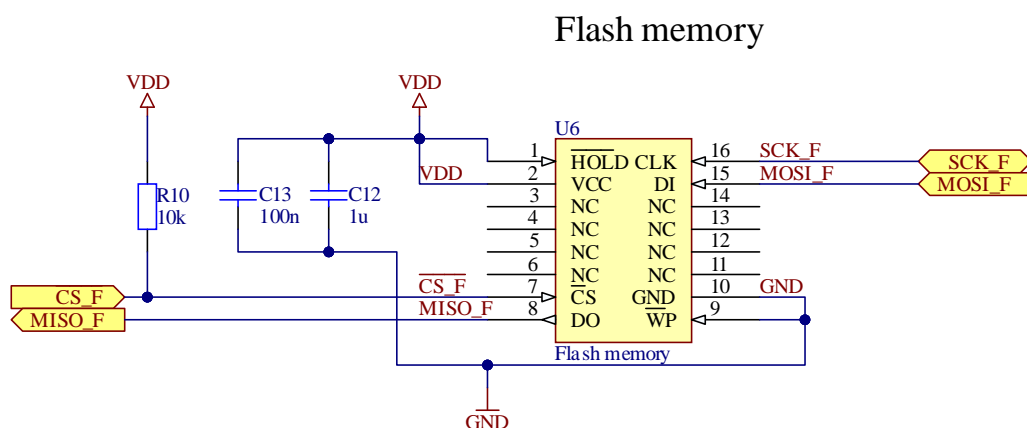
WDI je ulaz *watchdog* sklopa na kojeg se dovodi signal koji (u normalnom radu) resetira interno brojilo *watchdog* sklopa unutar kritičnog vremena  $t_{WD}$ . Sve dok na WDI dolazi signal koji resetira brojilo na vrijeme, \*WDO je visoko i nema zahtjeva za resetiranjem sustava. Ako je signal na WDI izvodu kraći od 1  $\mu s$ , zanemarit će se. WDI je spojen na izvod PD15 mikrokontrolera.

\*EN je također ulazni izvod te služi za omogućavanje rada *watchdog* sklopa (eng. *chip enable input*) te je aktivan nisko. Ako je signal na \*EN kraći od 100 ns, zanemarit će se. Ovdje je ovaj izvod jednostavno trajno spojen na potencijal mase (GND) te je *watchdog* uvijek aktivan.

GND i VCC su izvodi za napajanje samog integriranog sklopa te pošto VCC može biti u intervalu od 2.7 V do 5.5 V, ovi su izvodi spojeni na GND i VDD, respektivno.

### 3.4. Flash memorija

Flash memorija u ovom sustavu se koristi za pohranu senzorskih signala i podataka. Flash memorija koja je već ranije odabrana kada se radilo na programskoj podršci za satelit je Winbond W25N01GVZEIG (U6 na Slika 14). U razvojnom sustavu za programsku podršku se koristima Flash memorija u WSON kućištu dok će se na satelitu i na ovoj tiskanoj pločici koristiti memorija sa SOIC16 kućištem. Za siguran rad integriranog sklopa postavljeni su blokadni kondenzatori C13 od 100 nF i C12 od 1  $\mu F$  koji se vide na Slika 14.



Slika 14. Shema podsustava za pohranu senzorskih signala

Komunikacija kojom će se razmjenjivati signali između Flash memorije i mikrokontrolera je ostvarena putem SPI sučelja (konkretno SPI1 mikrokontrolera). SPI (eng. *Serial Peripheral Interface*) je sinkroni serijski način prijenosa podataka između tzv. *master* i *slave* uređaja kojeg je razvila tvrtka *Motorola*. Često se koristi za povezivanje mikrokontrolera s vanjskim perifernim jedinicama i integriranim sklopovima zbog njegove jednostavnosti i brzine (okvirno 10 Mbit/s), pa je on i ovdje korišten. Primjer korištenja SPI sučelja između dva uređaja je prikazan na Slika 15, pri čemu su korištene SPI linije:

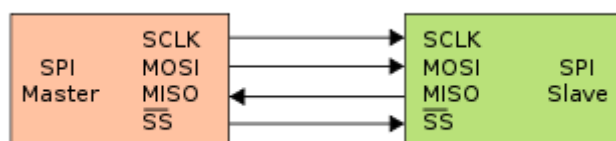
- SS/CS (eng. *Slave Select/Chip Select*)
- MOSI (eng. *Master Out Slave In*)
- MISO (eng. *Master In Slave Out*)
- SCK (eng. *Serial Clock*)

SS/CS je linija aktivna nisko te putem nje *master* uređaj bira određeni *slave* uređaj s kojim će razmjenjivati podatke. Dakle, *master* uređaj mora postaviti ovu liniju na nisko (potencijal mase) kako bi aktivirao komunikacijsko sučelje *slave* uređaja.

MOSI je linija kojom *master* uređaj šalje podatke odabranom *slave* uređaju.

MISO je linija kojom odabrani *slave* uređaj šalje podatke *master* uređaju.

SCK je linija za takt vremenskog vođenja komunikacije kako bi se ostvarila sinkrona komunikacija (svaki bit se prenosi sinkrono taktu).



Slika 15. Shematski prikaz korištenja SPI sučelja [6]

Pošto ova komponenta ima dosta N/C izvoda (eng. *not connected*) koji se ne spajaju nigdje, navest ću izvode koji se koriste i imaju električnu svrhu:

- HOLD\* (eng. *Hold Input*)
- CS\* (eng. *Chip Select*)
- DO (eng. *Data Output*)
- DI (eng. *Data Input*)

- CLK (eng. *Serial Clock Input*)
- WP\* (eng. *Write Protect Input*)
- VCC
- GND

HOLD\* je izvod koji je spojen na potencijal VDD (visoko) kako (u aktivnom stanju) DO ne bi bio u stanju visoke impedancije i kako DI i CLK signali ne bi bili zanemareni.

CS\* je izvod na kojeg se spaja SPI linija SS/CS (koja je aktivna nisko) i putem njega se omogućuje ili onemogućuje rad *slave* uređaja (Flash memorije). Kad je ovaj izvod postavljen visoko, izvodi DO, DI, \*WP i \*HOLD su u stanju visoke impedancije. Dok je u ovom onemogućenom (neodabranom) stanju, potrošnja je svedena na male *stand-by* razine. Ako je ovaj izvod postavljen nisko, *slave* uređaj (Flash memorija) je odabrana i razmjena podataka s *master* uređajem (mikrokontroler) se može odvijati. U takvom stanju potrošnja naraste na aktivne razine. Pri *paljenju* i *gašenju* Flash memorije \*CS mora biti na potencijalu napajanja (VDD) te se to ostvaruje s priteznim (eng. *pull up*) otpornikom iznosa 10 k $\Omega$  (R10 na Slika 14). Ova linija je spojena na izvod PA4 mikrokontrolera.

DO je izvod na kojeg se spaja SPI linija MISO. *Master* uređaj (mikrokontroler) čita podatke iz Flash memorije (*slave*) putem ove linije na padajući brid signala takta.

DI je izvod na kojeg se spaja SPI linija MOSI. *Master* uređaj (mikrokontroler) piše podatke u Flash memoriju (*slave*) putem ove linije na rastući brid signala takta.

CLK je izvod na kojeg se spaja SPI linija SCK te služi za sinkronizaciju komunikacije između mikrokontrolera (*master*) i Flash memorije (*slave*).

WP\* je izvod koji se može koristiti za sprječavanje upisa u *Status Register*. Kako je spojen na masu, ostvarena je zaštita upisa u *Status register* u tzv. *Software Protection mode*.

VCC i GND su izvodi napajanja integriranog sklopa, te pošto VCC može biti između -0,6 V do 4,6 V, ovi su izvodi spojeni na VDD i GND, respektivno.

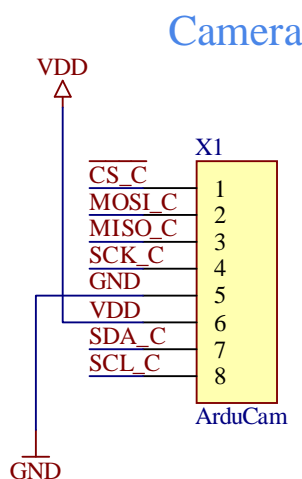
### 3.5. Kamera

Uz pomoć ove kamere satelit će slikati fotografije u svemiru. Konkretna kamera je već odabrana te je riječ o ArduCAM-Mini-5MP-Plus modulu koji se temelji na OV5643 senzoru te je prikazan na Slika 16. Ovaj kamera-modul ima 8 izvoda koji će se na ovu tiskanu

pločicu spojiti putem konektora X1 koji se vidi na Slika 3. Električna shema sklopovlja (eng. *top sheet*) te na Slika 3.7.



Slika 16. ArduCAM-Mini-5MP-Plus [7]



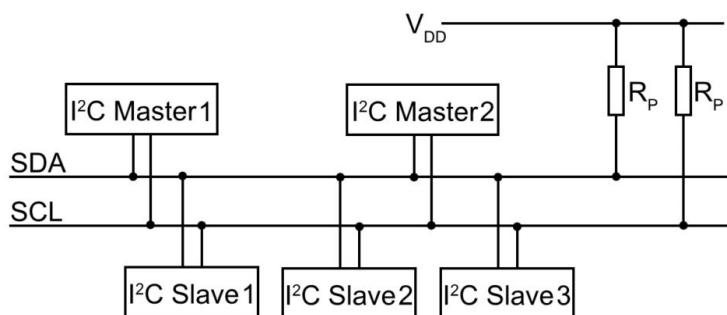
Slika 17. Konektor za kameru

Kamera će ostvariti komunikaciju s mikrokontrolerom putem SPI (konkretno SPI2 sučelje mikrokontrolera) i I2C/TWI (konkretno I2C1 sučelja mikrokontrolera) sučelja. I2C/TWI (eng. *Inter-Integrated Circuit/Two-Wire Interface*) je sinkroni komunikacijski protokol koji koristi svega dvije linije (SCL i SDA) s više *master* i *slave* uređaja te je razvijen u tvrtki *Philips*. Brzina je sporija od SPI protokola (okvirno stotine kbit/s) te se koristi za spajanje sporijih vanjskih periferijskih jedinica. Prikaz korištenja I2C sučelja za komunikaciju je na Slika 18. Obje linije moraju biti spojene preko priteznog (eng. *pull up*) otpornika na potencijal napajanja (visoko) jer se komunikacija odvija postavljanjem linija na nisko (potencijal mase).

SCL (eng. *Serial Clock*) je linija na kojoj je takt signala vođenja komunikacije kojom se ostvaruje sinkrona komunikacija.

SDA (eng. *Serial Data*) je linija kojom *master* uređaj šalje podatke odabranom *slave* uređaju.

Ovdje svi uređaji mogu biti *master* ili odabrani *slave* (svaki uređaj ima svoju adresu). Prijenos podataka započinje tzv. startnim uvjetom (prijelaz visokog stanja u nisko na liniji SDA dok je SCL linija visoko) bilo kojeg (novonastalog *master*) uređaja, te slanjem 7 bitne adrese potrebnog *slave* uređaja. Nakon toga se govori želi li se čitati ili pisati nakon čega slijede potvrde (eng. *acknowledge*) i podaci te na kraju stop uvjet (prijelaz iz SDA linije iz niskog u visoko dok je SCL linija visoko) za prekid komunikacije. Ovdje vidimo kako su nam potrebni pritezni (eng. *pull up*) otpornici kako bi držali SDA i SCL liniju visoko, dok to uređaji ne promijene postavljajući potencijal mase na liniju.



Slika 18. Primjer korištenja I2C/TWI sučelja za komunikaciju [8]

Spomenuti izvodi koje kamera ima su:

- CS (eng. *Chip Select*)
- MOSI (eng. *Master Out Slave In*)
- MISO (eng. *Master In Slave Out*)
- SCLK (eng. *Serial Clock*)
- SDA (eng. *Serial Data*)
- SCL (eng. *Serial Clock*)
- GND
- VCC

CS je ulazni izvod spojen na SPI liniju SS/CS te služi za odabir *slave* uređaja. Ova linija je spojena na PB12 izvod mikrokontrolera.

MOSI je ulazni izvod spojen na SPI liniju MOSI te služi sa primanje podataka SPI protokolom od *master* uređaja (mikrokontroler). Ova linija je spojena na PB15 izvod mikrokontrolera.

MISO je izlazni izvod spojen na SPI liniju MISO te služi za slanje podataka SPI protokolom *master* uređaju (mikrokontroler). Ova linija je spojena na PB14 izvod mikrokontrolera.

SCLK je ulazni izvod spojen na SPI liniju SCLK na kojoj je signal takta vođenja te služi za sinkronizaciju razmjene podataka između *master* (mikrokontroler) i *slave* (kamera) uređaja. Ova linija je spojena na PB13 izvod mikrokontrolera.

SDA je ulazno-izlazni izvod spojen na I2C/TWI liniju SDA koja služi za razmjenu podataka između *master* i *slave* uređaja koji mogu biti mikrokontroler i kamera. Ova linija je spojena na PB7 izvod mikrokontrolera.

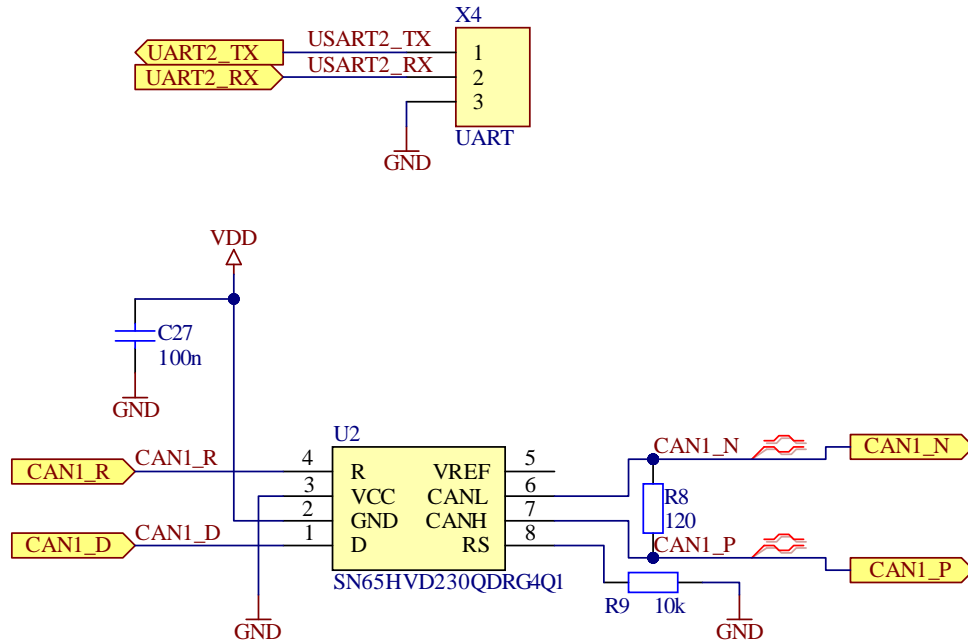
SCL je ulazni izvod spojen na I2C/TWI liniju SCL na kojoj je signal takta vođenja te služi za sinkronizaciju razmjene podataka između *master* i *slave* uređaja. Ova linija je spojena na PB6 izvod mikrokontrolera.

VCC i GND su izvodi za napajanje te su spojeni na potencijale VDD i GND respektivno jer SPI na mikrokontroleru radi s 3.3 V.

### **3.6. CAN i UART komunikacija**

Za potrebe povezivanja ove tiskane pločice, PDH sustava satelita s glavnim računalom satelita koriste se CAN i UART komunikacijska sučelja. Prikaz sheme za CAN i UART komunikaciju se vidi na Slika 19.

## UART and CAN communication



Slika 19. Shema podsustava za CAN i UART komunikacijska sučelja

CAN (eng. *Control Area Network*) je komunikacijsko sučelje koje može raditi s brzinama do 1 Mbit/s, izvorno namijenjeno za automobilske primjene i povezivanje elektroničkih kontrolnih jedinica (ECU – eng. *Electronic Control Unit*) tj. čvorova te je razvijeno u tvrtki *Bosch*. Svi CAN čvorovi (uređaji) su spojeni (ožičeni I) na dvije linije ovog sučelja (CAN1\_N i CAN1\_P na Slika 19). Te dvije linije se izводе kao diferencijalni par (na tiskanoj pločici što bliže jedna drugoj – ovo je ostvareno u Altium Designeru direktivom eng. *Differential Pair Routing*) s nominalom karakterističnom impedancijom 120 Ω. Upravo zbog te karakteristične impedancije se postavlja otpornik istog iznosa (R8 na Slika 19) koji služi za zaključivanje tih linija. Karakteristična impedancija linije bez gubitaka (ako zanemarimo omski otpor linija i omsku vodljivost između linija) iznosi:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = R_0 \quad (3)$$

gdje su  $L$  i  $C$  (parazitni) induktivitet linija i (parazitni) kapacitet između linija. Faktor refleksije na ulazu ( $Z_I$  je impedancija nadomjesnog naponskog izvora spojen na ulazni kraj linija) ili na izlazu ( $Z_I$  je impedancija spojena na izlaznom kraju linija) iznosi:

$$\Gamma = \frac{Z_I - Z_0}{Z_I + Z_0} \quad (4)$$



te vidimo da ako je:

$$Z_1 = Z_0 \quad (5)$$

onda je faktor refleksije jednak nuli i linija je uspješno zaključena karakterističnom impedancijom te je refleksija na liniji spriječena.

Diferencijalnim parom se prenosi diferencijalni signal, na jednoj liniji je jedan signal, dok je na drugoj isti takav, ali suprotnog predznaka. Na *odredištu* se ta dva signala oduzimanjem (nekim diferencijalno izvedenim pojačalom) u biti (po apsolutnoj vrijednosti) zbroje i nastaje jedan signal (u odnosu na potencijal mase). Pošto su linije bliske jedna drugoj, ako neka elektromagnetska smetnja unese signal u jednu liniju, uvest će (skoro) istu takvu i u drugu liniju (ne suprotnog predznaka kao što je slučaj kod korisnog signala), te će se na *odredištu* oduzimanjem ti signali smetnji jednostavno poništiti (gotovo pa sasvim) i ostaje korisni signal.

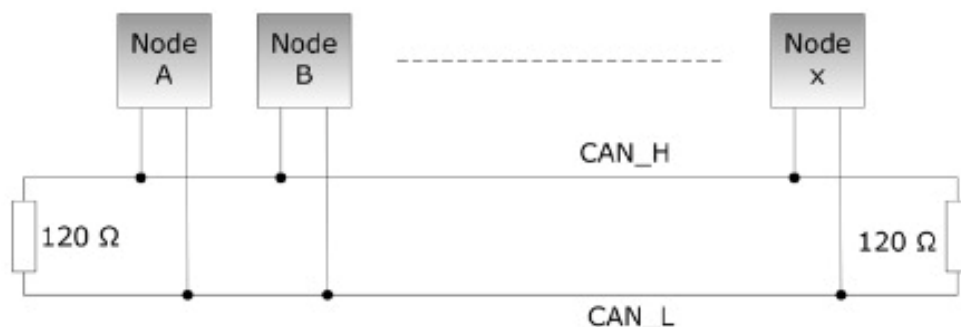
Za potrebe CAN komunikacije vidimo Slika 19 da je jedan čvor CAN mreže korišteni mikrokontroler koji je na CAN linije spojen preko CAN *transceiver* sklopa SN65HVD230QDRG4Q1 (U2 na shemi) prikazan na Slika 20. Za njegov siguran rad spojen je blokadni kondenzator C27 iznosa 100 nF. Ovaj integrirani sklop pretvara signale iz mikrokontrolera u diferencijalne CAN signale nominalne razine i obrnuto, pretvara ulazne CAN diferencijalne signale u signale koji idu na mikrokontroler.



Slika 20. SN65HVD230QDRG4Q1 u SOIC-8 kućištu [9]

CAN1\_R linije (izvod R CAN *transceiver* sklopa) je spojena na mikrokontroler na izvod PD0, dok je CAN1\_D linija (izvod D CAN *transceiver* sklopa) spojena na PD1 izvod mikrokontrolera. Diferencijalni par CAN1\_N (CANL izvod) i CAN1\_P (CANH izvod) ide preko glavnog konektora na glavno računalo satelita.

Karakteristično korištenje CAN sučelja je prikazano na Slika 21.



Slika 21. Korištenje CAN sučelja za komunikaciju [10]

Također, postoji i UART sučelje (konkretno USART2 sučelje mikokontrolera). UART (eng. *Universal Asynchronous Reciever-Transmitter*) je jednostavno asinkrono serijsko komunikacijsko sučelje koje ima tri linije:

- TX (eng. *Transmitter*)
- RX (eng. *Reciever*)
- GND

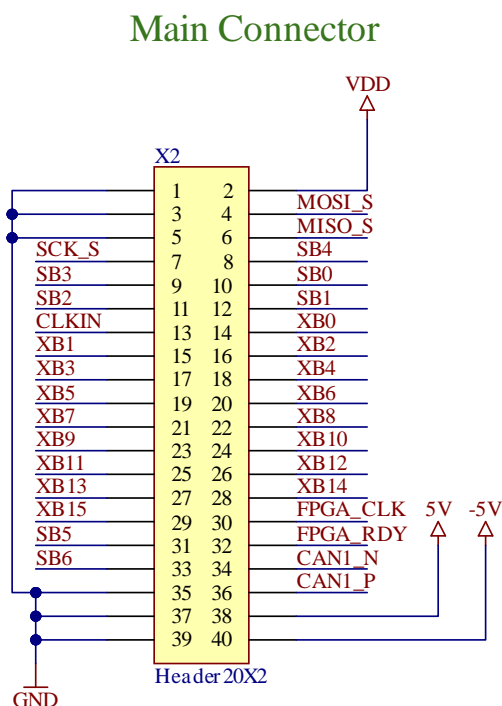
TX (slanje) i RX (primanje) su dvije podatkovne linije, dok je GND točka referentnog potencijala. Potrebno je povezati TX jednog uređaja na RX drugog i obrnuto, te je potrebno povezati direktno GND linije. Komunikacija se započinje start bitom (nisko), zatim slijede podatkovni bitovi te na kraju stop bit (visoko).

TX linija je spojena na PD5 izvod mikokontrolera, dok je RX linija spojena na PD6. Povezanost s glavnim računalom satelita pomoću ovog sučelja je ostvarena konektorom X4.

### 3.7. Glavni konektor

Povezanost ove tiskane pločice s ostalim podsustavima unutar PDH sustava satelita i s glavnim računalom satelita se ostvaruje pomoću glavnog konektora na lijevoj strani (X2 na Slika 3). Ovim konektorom je ostvarena povezanost sa senzorskom tiskanom pločicom PDH sustava odakle stižu senzorski signali te s X-Band odašiljačem PDH sustava koji će slati obrađene senzorske signale na zemaljsku postaju. Također se ovim konektorom odvođe

naponi napajanja u iznosima od 5 V i -5 V za potrebe ostatka PDH sustava. Odabrani konektor je 2x20 pinski SSQ-120-03-T-D. Glavni konektor shematski možemo također vidjeti na Slika 22.

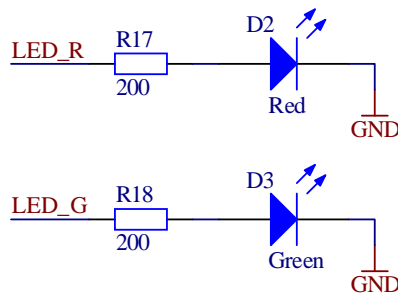


Slika 22. Glavni konektor na električnoj shemi

### 3.8. Indikatorske svjetleće diode

Dodane su i indikatorske svjetleće diode (D2 - crvena i D3 - zelena na shemi) skupa sa svojim otpornicima za ograničavanje struje R17 i R18 u iznosu od 200  $\Omega$ . Ovo možemo vidjeti na Slika 3 te na Slika 23. Odabrana crvena svjetleća dioda je APTR3216SURCK dok je zelena svjetleća dioda APTL3216CGCK-01 te su obje od proizvođača *Kingbright*.

## Indicating LEDs



Slika 23. Indikatorske svjetleće diode na električnoj shemi

Njihova svrha je olakšavanje programiranja, uhodavanja i debugiranja mikrokontrolera i cijelog sustava. One služe jednostavno da ih programer može paliti i gasiti kroz svoj kod kad god to bude korisno.

Anoda crvene svjetleće diode je preko otpornika R17 spojena na PD8 izvod mikrokontrolera, dok je anoda zelene diode preko otpornika R18 spojena na PD9 izvod mikrokontrolera, a katode su spojene na masu. Svjetleće diode su spojene direktno na izvode mikrokontrolera (bez korištenja tranzistorskih sklopki) jer ulazno-izlazni izvodi mikrokontrolera mogu dati maksimalno 20 mA struje, dok će kroz svjetleće diode teći struje iznosa:

$$I_R = \frac{VDD - U_R}{R17} = \frac{3.3 - 1.95}{200} = 6.75 \text{ mA}$$

$$I_G = \frac{VDD - U_G}{R18} = \frac{3.3 - 2.1}{200} = 6 \text{ mA}$$

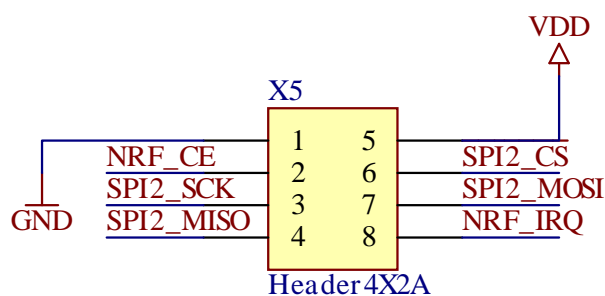
gdje su:

- $I_R$  – struja crvene svjetleće diode
- $U_R$  – napon koljena odabrane crvene svjetleće diode
- $I_G$  – struja zelene svjetleće diode
- $U_G$  – napon koljena odabrane zelene svjetleće diode.

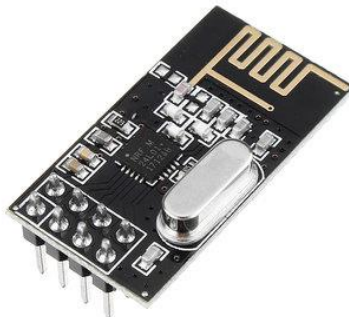
Iz ovoga vidimo kako ulazno-izlazni izvodi mikrokontrolera to mogu podnijeti.

### 3.9. Konektor za RF modul

Pošto će se ova verzija tiskane pločice koristiti prvenstveno za prva testiranja koristeći dronove, dodan je konektor za RF modul nRF24L01 (prikazan na Slika 25) koji radi na frekvenciji od 2,4 GHz te koristi GFSK modulaciju za prijenos podataka i pomoću kojeg će se moći slati podaci za upravljanje dok sustav bude na dronu u zraku. Za te je potrebe dodan 8 pinski konektor X5 kojeg možemo vidjeti na Slika 3. Električna shema sklopovlja (eng. *top sheet*) te na Slika 24. Konektor za RF modul



Slika 24. Konektor za RF modul



Slika 25. nRF24L01 modul [27]

## 4. Tiskana pločica

Nakon što je u Altium Designeru razvijena konačna električna shema tiskane pločice, projektirana je tiskana pločica (eng. *Printed Circuit Board*, PCB) u istom alatu. Konačna verzija tiskane pločice je prikazana na Slika 27, Slika 28 i na Slika 29. Trodimenzionalni prikazi tiskane pločice u Altium Designeru su prikazani na Slika 30 te na Slika 31. Za većinu komponenti su dodani i 3D modeli, dok se za neke vide samo lemne točke (eng. *pad*).

Odlučeno je da sama tiskana pločica bude četveroslojna iz više razloga:

- dobra visokofrekvencijska svojstva,
- dobro rješenje za elektromagnetsku kompatibilnost (eng. EMC – *ElectroMagnetic Compatibility*),
- mogućnost visoke gustoće slaganja komponenti,
- minimizirane smetnje u masi,
- lakše povezivanje komponenti (eng. *routing*).

Dva vanjska sloja tiskane pločice su signalni slojevi (eng. *layer*) dok su dva unutarna sloja dvije bakrene ploče (eng. *plane*) kako je to prikazano na slojevitoj strukturi (eng. *stack-up*) na Slika 26. Vidimo kako je jezgra (eng. *core*) tiskane pločice FR-4<sup>1</sup> izolator (dielektrik) s čije se gornje strane nalazi jedan cijeli vodljivi sloj od bakra (*ploča bakra*) koja nam služi kao sloj mase (eng. *ground plane*). Ispod jezgre se nalazi još jedan cijeli bakreni vodljivi sloj (*ploča bakra*) koja nam služi kao sloj potencijala napajanja (eng. *power plane*) koji je na potencijalu VDD (3.3 V) u odnosu na potencijal mase. Također je vidljivo kako se iznad bakrenog sloja mase i ispod bakrenog sloja napajanja nalaze izolatori tj. dielektrici (eng. *prepreg*<sup>2</sup>). Naposljetku, vidimo kako imamo nakon izolatorskih slojeva i signalne slojeve (gornji i donji – eng. *top and bottom layer*) na kojima su bakreni vodovi (eng. *tracks*) kojima putuju signali. . Na Slika 28 i Slika 29 su vodovi na gornjem signalnom sloju u crvenoj boji, dok su signalni vodovi na donjem signalnom sloju i plavoj boji radi lakšeg prepoznavanja.

---

<sup>1</sup> Od eng. *flame resistant* – otporan na gorenje. Vrsta dielektričnog materijala od staklenih vlakni.

<sup>2</sup> Od eng. *pre-impregnated* – kompozit od vlakana pomiješanih s različitim polimerima.

#	Name	Material	Type	Weight
	Top Overlay		Overlay	
	Top Solder	Solder Resist	Solder Mask	
1	Top Layer		Signal	1oz
	Dielectric 2	PP-006	Prepreg	
2	GND Plane	CF-004	Plane	1oz
	Dielectric 1	FR-4	Core	
3	Power Plane	CF-004	Plane	1oz
	Dielectric 3	PP-006	Prepreg	
4	Bottom Layer		Signal	1oz
	Bottom Solder	Solder Resist	Solder Mask	
	Bottom Overlay		Overlay	

Slika 26. Raspored vodljivih i izolirajućih slojeva tiskane pločice

Signali na ovoj tiskanoj pločici su velikom većinom digitalni signali. Naravno, u stvarnom svijetu je sve analogno, pa tako i naši *digitalni* signali su u biti analogna aproksimacija idealnih pravokutnih signala. Što bolja aproksimacija tog idealnog pravokutnog signala, to je taj signal više *digitalan* i naravno to se više sastoji od visokofrekvencijskih komponenti (harmonika). Dakle, digitalne signale trebamo promatrati kao brze analogne visokofrekvencijske signale koji su izvor visokofrekventnih elektromagnetskih smetnji. Kada vod čini petlju svojom geometrijom, on tvori tzv. petljastu antenu (eng. *loop antenna*). Brzina  $c$  elektromagnetskog vala valne duljine  $\lambda$  i frekvencije  $f$  u nekom materijalu je konstantna i može se prikazati izrazom:

$$c = \lambda \cdot f \quad (6)$$

Pošto je brzina konstantna, kako je frekvencija viša to je valna duljina proporcionalno manja. Kada je frekvencija izmjeničnog električnog signala na njoj takav da je odgovarajuća valna duljina sumjerljiva dimenzijama vodova, zračenje elektromagnetskih valova u prostor je učinkovitije. Kod malih petljastih antena, zračenje elektromagnetskih valova je učinkovito ako je promjer petlje veći od oko 5% valne duljine. Dakle, što je manja petlja koju čine vodovi kojima *putuju* visokofrekvencijski električni signali, manje je i neželjeno elektromagnetsko zračenje u prostor na druge uređaje (eng. *radiated electromagnetic interference* – EMI). Upravo iz tog razloga je dobro koristiti cijelu jednu bakrenu ploču za masu (eng. *ground plane*) ispod signalnih vodova. Povratni put visokofrekvencijskih struja se prirodno stvara kao zrcalna slika na (niskoimpedantnom) sloju mase odmah ispod signalnog sloja zbog kapacitivno-induktivnih sprega i time tvori minimalnu petlju. Kod niskofrekventnih (i istosmjernih) signala, povratni put kroz *ground plane* bi jednostavno bio

najkraći put jer ima najmanji omski otpor. Kod visokofrekventnih signala do izražaja dolazi utjecaj (parazitnih) kapaciteta  $C$  na impedanciju jer na omski otpor ne utječe frekvencija  $f$ , dok na reaktanciju kapaciteta ( $X_C$ ) utječe:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (7)$$

Vidimo da s porastom frekvencije reaktancija kapaciteta opada i ona postaje utjecajni čimbenik pri visokim frekvencijama. Kako postoji kapacitivna sprega između dva vodiča odvojena izolatorom (signalni sloj i sloj mase odvojeni *preprag* izolatorom) impedancija postaje značajno manja na visokim frekvencijama točno ispod signalnog voda na *ground plane*-u (jer je udaljenost između signalnog sloja i sloja mase minimalna, pa time kapacitet maksimalan). Pored kapaciteta, na visokim frekvencijama dolazi do izražaja utjecaj (parazitnih) induktiviteta  $L$  na impedanciju jer na reaktanciju induktiviteta ( $X_L$ ) utječe frekvencija  $f$ :

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (8)$$

Vidimo da s porastom frekvencije reaktancija induktiviteta raste i ona također postaje utjecajni čimbenik pri visokim frekvencijama. Kako svaki vodič ima parazitni induktivitet koji je veći što je i njegova duljina veća, pokušat će se minimizirati taj induktivitet, kako bi se minimizirala induktivna reaktancija i kako bi struja tekla putem manje impedancije. Upravo iz tih razloga je onda petlja koju čine visokofrekventne struje minimalna (minimalnog promjera) te je i petljasta antena minimalnih učinkovitosti.

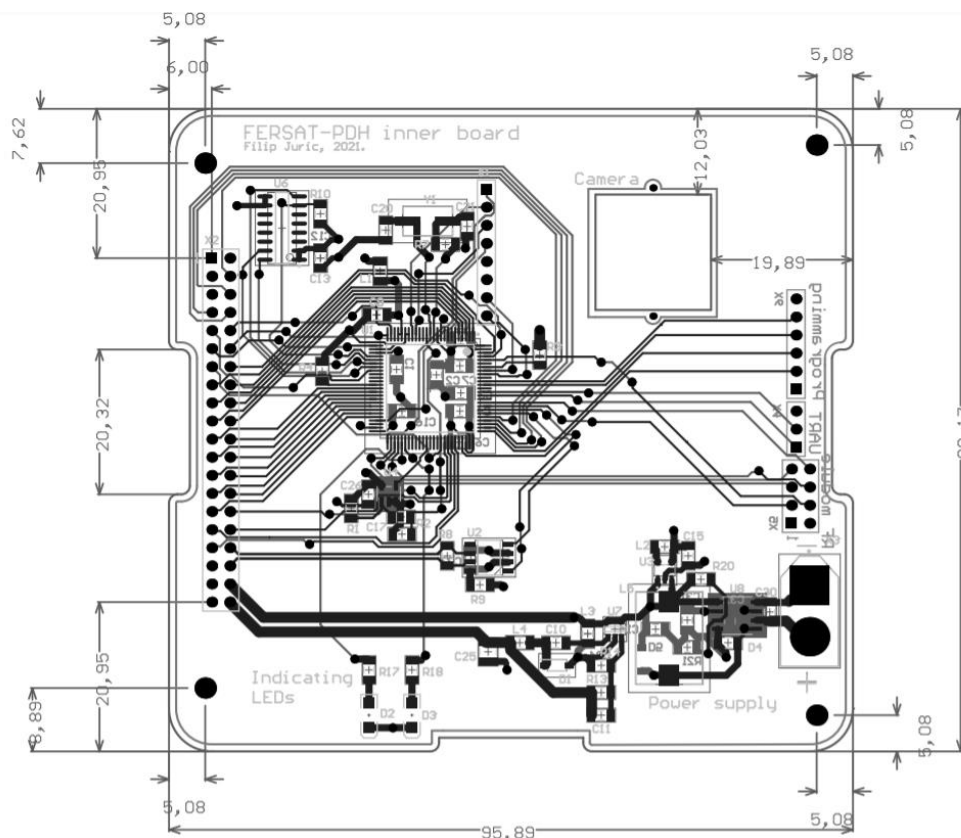
Također, samim time što je *ground plane* jedna bakrena ploča, ona je niskoimpedantna i predstavlja mali otpor povratnim strujama. Kada i bude potrebe za nekim većim strujama, pad napona koji će se stvoriti na vodu mase će biti manji upravo zbog niske impedancije koju *ground plane* ima. Također i *power plane* predstavlja nisku impedanciju te su padovi napona na vodu napajanja minimizirani. Do značajnijeg utjecaja pada napona na vodovima napajanja do integriranih komponenti može doći zbog parazitnih induktiviteta, no taj problem je riješen s blokadnim kondenzatorima koji su postavljeni što bliže integriranim sklopovima.

Isto tako jedna pogodnost četveroslojne tiskane pločice je definitivno jednostavnije povezivanje komponenti (*routing*). Kad god postoji potreba za napajanjem (VDD) ili za masom (GND) jednostavno su dostupni pomoću prospoja između vodljivih slojeva (*via*) pored komponenti kojima je to potrebno.



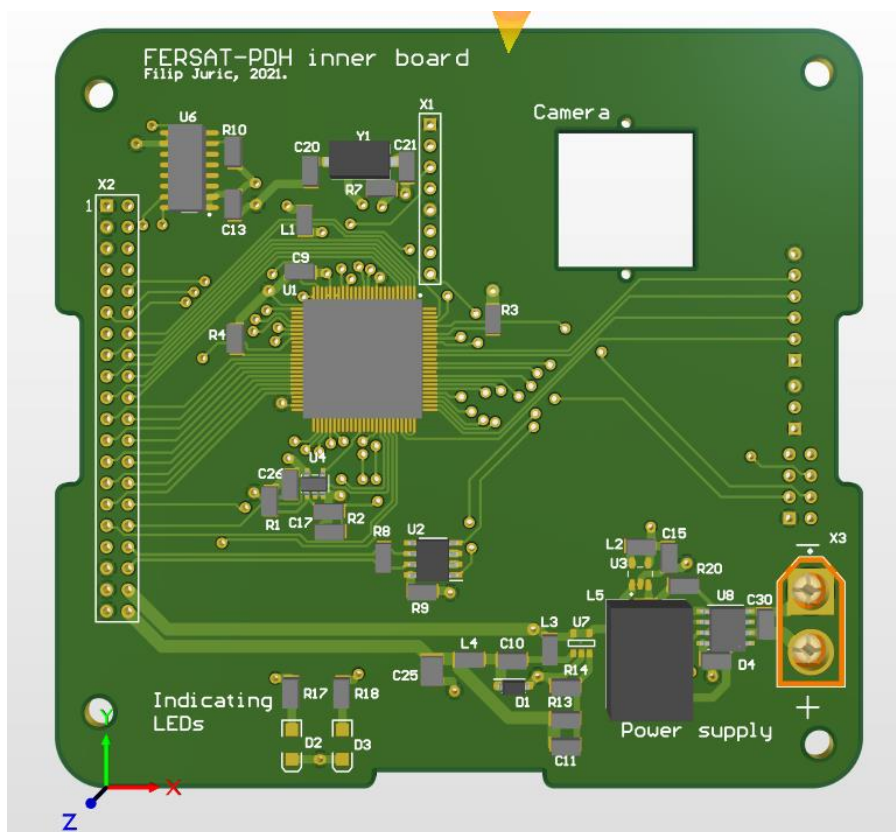
Upravo iz tog razloga (i razloga da imamo dva signalna sloja) je moguće više komponenti naslagati na manji prostor, što je ovdje bilo bitno prvenstveno za blokadne kondenzatore za koje je potrebno da budu što bliže uz svoj integrirani sklop. Općenito, prostor nije bio problem kod ove tiskane pločice zbog takve prirode mehaničkih zahtjeva i parametara (dimenzije samog satelita).

Dodatno, vidimo kako se iznad gornjeg i ispod donjeg signalnog sloja nalazi i sloj zaustavnog laka (eng. *solder mask*) koji služi kao zaštita bakrenih vodova od oksidacije i slučajnih kratkih spojeva pri lemljenju. Vidimo kako se onda iznad gornjeg i ispod donjeg zaustavnog laka nalaze slojevi sitotiska (eng. *silkscreen layer* ili *overlay*) za nanošenje oznaka i obrisa komponenti, potpisa, oznaka izvoda (pin 1) i ostalih vrsta teksta (žuta boja).

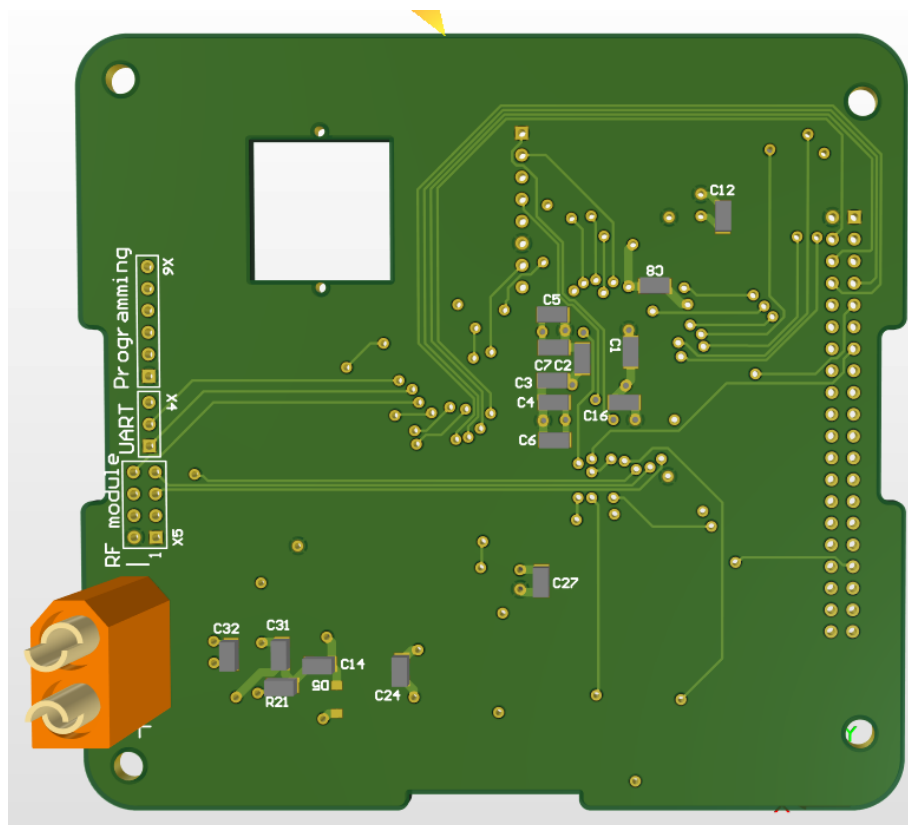


Slika 27. Dvodimenzionalni prikaz tiskane pločice





Slika 30. Trodimenzionalni prikaz gornje strane tiskane pločice



Slika 31. Trodimenzionalni prikaz donje strane tiskane pločice

## 4.1. Mehanički parametri tiskane pločice

Kod dizajna tiskane pločice, najčešće su mehanički parametri oni od kojih se kreće s dizajnom (eng. *starting point*), pa tako je to i ovdje slučaj. Mehanički parametri koji su ovdje bili bitni su:

- dimenzije i oblik tiskane pločice,
- položaj kamere,
- položaj glavnog konektora,
- položaj rupa za vijke.

Dimenzije i oblik tiskane pločice su dobiveni od kolega koje su radili na mehanici satelita i koji su surađivali s tvrtkama koje će proizvesti sami satelit. Mehaničke dimenzije i oblik koje moja tiskana pločica mora imati su prikazani na Slika 32 (sve dimenzije su u milimetrima). Svi ključni mehanički parametri prikazani su ostvareni, uz tri glavne razlike:

- glavni konektor na lijevoj strani,
- rupe za izvode kamere,
- donje uvlačenje.

Donje uvlačenje je zbog jednostavnosti izvedeno bez unutarnjih zaobljenja, već s oštrim rubovima što se može vidjeti na Slika 27, Slika 28 i Slika 29. Pošto će ova uvlačenja koristiti za postavljanje tiskane pločice na šine, dodatani (jako mali – dijelovi milimetra) prazni prostor proizveden ovim oštrim kutovima neće raditi problem. Ostala uvlačenja su ostvarena prema zahtjevima.

Dodane su rupe za izvode kamere (koji nisu prikazani na mehaničkoj skici) kako bi se mogao ostatak tiskane pločice i samog satelita funkcionalno i električni spojiti. Sami položaj rupa je onda naknadno oređen mjerenjem na konkretnom modulu kamere.

Glavni konektor koji se nalazi na lijevoj strani će biti drugačiji nego što se to može vidjeti na mehaničkoj skici. Konektor koji će se koristiti je dvoredni 40-pinski (20 izvoda u svakom redu) te je njegova pozicija određena simetrično od gornjeg i donjeg ruba tiskane pločice (20.95 mm od gornjeg i 20.95 mm od donjeg ruba tiskane pločice) te se postavio 6 mm od lijevog ruba tiskane pločice.

Rupa za kameru postoji zbog malog volumena satelita te da bi mogla stati kamera u satelit, napravljene su rupe kroz tiskane pločice kroz koje može proći.



## 4.2. Smještaj komponenti i tiskane veze

Nakon što je izrađena tiskana pločica u alatu Altium Designer sa zadanim mehaničkim parametrima, počelo se sa smještajem komponenti. Smještaj komponenti nije bio zahtjevan zbog relativno velikih dimenzija tiskane pločice (postoji dosta slobodnog prostora na njoj i nakon što su smještene i povezane sve komponente).

Prvo što se smjestilo su glavni konektor i konektor za kameru koji su imali zadanu poziciju.

Nakon toga se smjestio mikrokontroler otprilike na sredinu tiskane pločice, što je najbolji polazišna točka jer su svi ostali podsustavi elektroničkog sustava povezani s njim, direktno ili indirektno. Po potrebi je bio pomican nakon postavljanja ostalih komponenti i konektora na otprilike optimalnu poziciju - bliže glavnom konektoru te je zarotiran tako da je što manje komponenti između mikrokontrolera i konektora (jer između njih postoji značajan broj vodova).

Ostali podsustavi su postavljeni relativno na mikrokontroler – uz onu stranu mikrokontrolera gdje trebaju biti spojeni naposljetku, kako bi vodovi mogli biti što manji.

Svi blokadni kondenzatori su postavljeni što bliže svojoj *matičnoj komponenti* kako bi se smanjila duljina (a samim time i parazitni induktivitet) vodova. Za ovo je često korišten donji signalni sloj kad ponestane prostora na gornjem siglanom sloju (često su blokadni kondenzatori na donjem signalnom sloju postavljeni točno ispod blokadnih kondenzatora iste komponente na gornjem vodljivom sloju).

Podsustav zadužen za napajanje je smješten uz donji desni rub tiskane pločice (gdje se i nalazi konektor za napajanje). Najveća komponenta ovdje je zavojnica L5 koja je dimenzionirana na te dimenzije kako bi mogla podnijeti potrebne struje.

Zadnje stvari koje su postavljene su indikatorske svjetleće diode koje su postavljene uz donji rub tiskane pločice kako bi njihovi vodovi do mikrokontrolera što manje smetali ostalim vodovima (na taj način su odabrani i konkretni izvodi mikrokontrolera za pogon svjetlećih dioda).

Nakon postavljanja komponenti se počelo s njihovim povezivanjem. Dominantno se koristio gornji signalni sloj (zbog boljih svojstava veze s *ground plane*-om koji je odmah

ispod gornjeg sloja nego s *power plane*-om koji je odmah iznad donjeg sloja). Ovo se manje-više komprimiralo s brojem via.

Vodovi za napajanja (bilo za ulazni napon, bilo za VDD (3.3 V), bilo za 5 V, bilo za -5 V) su ostvareni što je deblje to bilo moguće u pojedinoj situaciji (kako bi se smanjila parazitna impedancija tih vodova za količinu struje koja mora njima teći). Korištene debljine su 60 mila, 50 mila, 40 mila, 30 mila, pa čak i 12 mila (jer je debljina izvoda mikrokontrolera 12 mila). Inače je parazitna impedancija voda napajanja značajno smanjena korištenjem *power plane*-a).

Vodovi mase su također ostvareni što je deblje to bilo moguće na pojedinim mjestima (često ograničenje su bile debljine izvoda komponenti) iz istog razloga, kako bi se smanjila parazitna impedancija vodova za relativno velike struje koje bi trebale teći njima. Korištenjem *ground plane*-a je parazitna impedancija značajno smanjena.

Bipolarno napajanje potrebno za ostatak PDH sustava je dovedeno na glavni konektor što je bliže moglo (odabrani su najbliži izvodi glavnog konektora podsustavu za napajanje). Općenito su vodovi napajanja i mase (tamo gdje ih je bilo potrebno *vući*) ostvareni što kraće i deblje.

Signalni vodovi su se vukli velikom većinom s debljinom od 12 mila jer njima ne teku značajno velike struje i jer su debljine izvoda mikrokontrolera upravo 12 mila. Pokušali su se vući ravni i što kraći vodovi i kad je bilo potrebno koristile su se vie.

Nakon nekoliko iteracija smještaja komponenti i njihovog povezivanja vodovima, postupak je bio gotov te krajnji rezultat je prikazan na Slika 28 i na Slika 29 gdje su crvenom bojom prikazani vodovi na gornjem vodljivom sloju, dok su plavom bojom prikazani vodovi u donjem vodljivom sloju.

## 5. Izrada tiskane pločice i komponente

Nakon što je uspješno projektirana tiskana pločica u alatu Altium Designer, generirane su tzv. *gerber* datoteke te *drill* datoteke koje služe za potpuni opis tiskane pločice (vodljivi bakreni slojevi, sloj zaustavnog laka, podaci o rupama i td.) industrijskim proizvođačima tiskanih pločica. Ove datoteke su proslijeđene kolegama i voditeljima projekta FERSAT koji će naručiti potrebne tiskane pločice kod proizvođača tiskanih pločica *PCBWay*. Pošto je broj tiskanih pločica koje je minimalno potrebno naručiti pet, naručit će ih se upravo pet.

Prije toga su pronađene sve potrebne elektroničke komponente kod različitih distributera elektroničkih komponenti na (*Mouser Electronics*, *Digi-Key Electronics*, *Farnell*). Unutar alata Altium Designer su dodani parametri kataloškog broja, cijene, dobavljača i proizvođača pojedine komponente, te su se na kraju sve komponente sakupile na jednom mjestu (tzv. *košarica*) na pojedinim stranicama elektroničkih distributera.



## 6. Zaključak

U sklopu ovog završnog projekta projektirana je tiskana pločica koja će biti sastavni dio PDH sustava satelita koji se radi u sklopu projekta FERSAT na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Nakon što je proučena problematika i način funkcioniranja PDH sustava satelita, u alatu Altium Designer je projektirana tiskana pločica za upravljanje i obradu senzorskih signala.

Projektirana tiskana pločica sadrži podsustav za napajanje (razvode se tri napona napajanja), mikrokontroler s ARM Cortex-M arhitekturom (za izvođenje obrade senzora i kontrole), sklopovski nadzorni sustav za kontrolu izvođenja programa (vanjski *watchdog*, redundancija u sustavu za dodatnu sigurnost), Flash memoriju za pohranu senzorskih signala, CAN i UART sučelje prema glavnom upravljačkom računalu satelita, sva potrebna sučelja prema drugim podsustavima u satelitu.

Tiskana pločica optimirana je za preliminarna testiranja funkcionalnosti pločice simulacijom ponašanja satelita na dronu. Nakon provedenih testiranja i dodatnog razvoja drugih dijelova sustava (npr. X-band komunikacija), trenutna verzija tiskane pločice bit će nadograđena prije konačne ugradnje u sam satelit. U ovom obliku predstavlja vrijedan alat za praktično testiranje do sada realiziranih dijelova sustava na projektu FERSAT.

# Literatura

- [1] Digi-Key Electronics, <https://www.digikey.com/en/products/detail/stmicroelectronics/STM32L4P5VET6/13158160>, datum pristupa stranici: 9.6.2021.
- [2] Mouser Electronics, <https://hr.mouser.com/ProductDetail/ABRACON/ABLS7M2-25000MHZ-D2Y-T?qs=r5DSylrkXmK%252BKxrHRjrWOA%3D%3D>, datum pristupa stranici: 9.6.2021.
- [3] Mouser Electronics, <https://hr.mouser.com/ProductDetail/Analog-Devices/LT1576CS8-5PBF?qs=ytfclh7QUU0PsCc9nVzAQ%3D%3D>, datum pristupa stranici: 9.6.2021.
- [4] Mouser Electronics, <https://hr.mouser.com/ProductDetail/Semtech/SC189ZSKTRT?qs=rBWM4%252BvDhIck0D%2FgoUNMIQ%3D%3D>, datum pristupa stranici: 9.6.2021.
- [5] Octopart, <https://octopart.com/stwd100nywy3f-stmicroelectronics-12113486>, datum pristupa stranici: 9.6.2021.
- [6] Wikipedia, Serial Peripheral Interface, [https://en.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface](https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface), datum pristupa stranici: 9.6.2021.
- [7] Alibaba.com, [https://guide.alibaba.com/shop/arducam-mini-module-camera-shield-5mp-plus-ov5642-camera-module-for-arduino-uno-mega2560-board\\_1005237127.html](https://guide.alibaba.com/shop/arducam-mini-module-camera-shield-5mp-plus-ov5642-camera-module-for-arduino-uno-mega2560-board_1005237127.html), datum pristupa stranici: 9.6.2021.
- [8] Stackoverflow, <https://stackoverflow.com/tags/i2c/info>, datum pristupa stranici: 9.6.2021.
- [9] Farnell, <https://export.farnell.com/texas-instruments/sn65hvd230qdg4q1/can-transceiver-1mbps-1dr-1rx/dp/3009389>, datum pristupa stranici: 9.6.2021.
- [10] Copperhill technologies, <https://copperhilltech.com/blog/controller-area-network-can-bus-physical-layer-and-bus-topology/>, datum pristupa stranici: 9.6.2021.
- [11] Datasheet komponente W25N01GVZEIG TR, [https://hr.mouser.com/datasheet/2/949/w25n01gv\\_rev1\\_050918\\_unsecured-1489588.pdf](https://hr.mouser.com/datasheet/2/949/w25n01gv_rev1_050918_unsecured-1489588.pdf)
- [12] ArduCam-Mini-5MP-Pus OV5642 Camera Module Hardware Application Note, [http://www.arducam.com/downloads/shields/ArduCAM\\_Mini\\_5MP\\_Plus\\_OV5642\\_Camera\\_Module\\_Hardware\\_Application\\_Note.pdf](http://www.arducam.com/downloads/shields/ArduCAM_Mini_5MP_Plus_OV5642_Camera_Module_Hardware_Application_Note.pdf)
- [13] AN4488 Application note, Getting started with STM32F4xxxx MCU hardware development, [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/dm00115714-getting-started-with-stm32f4xxxx-mcu-hardware-development-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00115714-getting-started-with-stm32f4xxxx-mcu-hardware-development-stmicroelectronics.pdf)
- [14] Datasheet komponente STM32L4P5xx, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l4p5ae.pdf>
- [15] Datasheet komponente STM32F405xx i STM32F407xx, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00037051.pdf>

- [16] Datasheet komponente SSQ-120-03-T-D,  
[https://hr.mouser.com/datasheet/2/527/ssq\\_th-1370157.pdf](https://hr.mouser.com/datasheet/2/527/ssq_th-1370157.pdf)
- [17] Datasheet komponente APTR3216SURCK,  
<https://hr.mouser.com/datasheet/2/216/APTR3216SURCK-53103.pdf>
- [18] Datasheet komponente APTL3216CGCK-01,  
[https://hr.mouser.com/datasheet/2/216/APTL3216CGCK\\_01-1602133.pdf](https://hr.mouser.com/datasheet/2/216/APTL3216CGCK_01-1602133.pdf)
- [19] Datasheet komponente LT1576CS8-5#PBF,  
<https://hr.mouser.com/datasheet/2/609/1576fs-1267673.pdf>
- [20] Datasheet komponente SC189ZSKTRT,  
<https://hr.mouser.com/datasheet/2/761/sc189-1366204.pdf>
- [21] Datasheet komponente LM2611AMF,  
[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2611.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1623242376878&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.be%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2611.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1623242376878&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.be%252F)
- [22] Datasheet komponente ABL57M2-25.000MHZ-D2Y-T,  
<https://hr.mouser.com/datasheet/2/3/ABL57M2-1774905.pdf>
- [23] Datasheet komponente STWD100 Watchdog timer circuit,  
<https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/06/6a/b3/83/9a/c7/4f/22/CD00176077.pdf/files/CD00176077.pdf/jcr:content/translations/en.CD00176077.pdf>
- [24] Datasheet komponente SN65HVD230QDRG4Q1,  
[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd230q-q1.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1623233623463&ref\\_url=https%253A%252F%252Fhu.mouser.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd230q-q1.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1623233623463&ref_url=https%253A%252F%252Fhu.mouser.com%252F)
- [25] Farnell, <https://export.farnell.com/texas-instruments/lm2611amf-nopb/ic-pwm-inverting-1-4mhz-sot23/dp/3121522>
- [26] Datasheet komponente LM2611AMF,  
[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2611.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1623242376878&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.be%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2611.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1623242376878&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.be%252F)
- [27] Aranacorp, <https://www.aranacorp.com/en/using-a-nrf24l01-module-with-arduino/>,  
datum pristupa stranici: 13.7.2021.

## **Senzorska mreža za prikupljanje podataka putem CAN komunikacijskog protokola**

### **Sažetak**

U ovom završnom projektu je projektirana tiskana pločica za upravljanje i obradu senzorskih signala koja će biti sastavni dio CubeSat nanosatelita FERSAT koji se razvija na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. Tiskana pločica je sastavni dio PDH (eng. *Payload Data Handler*) sustava satelita te služi za prikupljanje senzorskih signala i fotografija, njihovo obrađivanje mikrokontrolerom s ARM Cortex-M arhitekturom i spremanje u Flash memoriji te slanje prema X-Band odašiljaču koji ih odašilje prema Zemaljskoj postaji. Također, služi za komunikaciju s glavnim upravljačkim računalom satelita putem CAN komunikacije. Tiskana pločica sadrži i podsustav za napajanje PDH sustava, sklopovski nadzorni sustav za kontrolu izvođenja programa (eng. *watchdog*), vanjski izvor brzog signala takta te par indikatorskih svjetlećih dioda koje se pale programski. Ova tiskana pločica će se prvenstveno koristiti za testiranje na dronu pa sadrži i RF modul pomoću kojeg će se moći slati upravljački signali prema dronu. Nakon razvijene kompletne električne sheme u alatu Altium Designer, projektirana je i sama četveroslojna tiskana pločica u istom alatu pomoću mehaničkih nacrti PDH sustava satelita. Potom su napravljene sve potrebne dokumentacije i naručena tiskana pločica te elektroničke komponente.

**Ključne riječi:** CubeSat nanosatelit, FERSAT, PDH, projektiranje tiskane pločice, mikrokontroler

## **Data Acquisition Sensor Network Based on CAN Communication Protocol**

### **Abstract**

In this final project, a printed circuit board (PCB) for control and processing of sensor signals has been designed, which will be an integral part of the CubeSat nanosatellite FERSAT, which is being developed at the Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb. The printed circuit board is an integral part of the PDH (Payload Data Handler) system of the satellite which is used to collect sensor signals and photos, process them with a microcontroller based on the ARM Cortex-M architecture, save them in a Flash memory and send them to the X-Band transmitter which then in the end sends them to the ground station on the Earth. It also serves to communicate with the satellite's main control computer via the CAN communication protocol. The printed circuit board also contains a subsystem for powering the PDH system, a circuit monitoring system for controlling the execution of the program (watchdog), an external source of a high speed clock signal and a pair of indicator light emitting diodes that light up by the embedded software. This printed circuit board will primarily be used for testing on the drone, so it also contains an RF module that will be able to send control signals to the drone. After the complete electrical scheme was developed in the Altium Designer, a four-layer printed circuit board in the same tool was designed using mechanical drawings of the PDH satellite system. Then all the necessary documentation was made and a printed circuit board and the electronic components were ordered.

**Keywords:** CubeSat nanosatellite, FERSAT, PDH, PCB design, microcontroller