

## РАЗВОЈ УРЕЂАЈА ВИСОКЕ ТАЧНОСТИ У ФУНКЦИЈИ АКТИВНОГ ОПТЕРЕЋЕЊА ПРИ ВЕЛИКИМ СТРУЈАМА, УЗ ЕЛИМИНИСАЊЕ УТИЦАЈА "GND" ПЕТЉЕ НА ТЕСТНИ СИГНАЛ

### DEVELOPMENT OF HIGH-ACCURACY DEVICES IN THE FUNCTION OF ACTIVE LOAD AT HIGH CURRENTS, WHILE ELIMINATING THE INFLUENCE OF THE "GND" LOOP ON THE TEST SIGNAL

Дарко Бабијановић, Факултет техничких наука, Нови Сад

#### Област – МЕХАТРОНИКА

**Кратак садржај** – Рад се заснива на пројектовању активног оптерећења за тестирање извора напајања и параметризовања батеријских ћелија. Састоји се од три кључне целине, истраживања, пројектовања и тестирања. Истраживање је показало да је постојање линеарног активног оптерећења веома оскудно. Пројектовање је реализовано у три целине: механички склоп, електронско решење и писање софтвера. Приликом склапања уређаја, редом су тестиране све целине система.

**Кључне речи:** Активно оптерећење, тестни сигнал, МОСФЕТ, мерење напона, аналогна регулациона петља, операциони појачавач.

**Abstract** – The work is based on designing an active load for testing the power sources and parameterizing the battery cells. It consists of three key units, research, design and testing. Research has shown that the existence of a linear active load is very rare. The design was realized in three units: mechanical assembly, electronic solution and software. When assembling the device, all parts of the system were tested.

**Keywords:** Active load, test signal, MOSFET, voltage measurement, analog control loop, operational amplifier

#### 1. УВОД

Идеја за овај рад потекла је у сарадњи са компанијом „Тајфун ХИЛ“ из Новог Сада.

Компанија се бави производњом уређаја за симулирање и тестирање енергетских система. Како се аутомобилска индустрија све више развија, потреба за оваквим системима је све већа. Фирма је одлучила да део посла преусмери према овој индустрији и то у виду симулација и тестова за батеријске ћелије, које се користе као главни извор енергије у електричним аутомобилима. Циљ овог рада је да се направи функционалан уређај

Потребно је направити једносмерно оптерећење, који

#### НАПОМЕНА:

Овај рад је проистекао из мастер рада чији је ментор био др Владимир Рајс, ван. проф.

ће се користити за тестирање и калибрацију модела батерија такозвани „DC load“, који ће кориснику

омогућити да зада константно оптерећење у виду струје, којом ће оптеретити тестни сигнал.

#### 2. ЗАДАТАК РАДА

Кроз задатак рада је објашњена разлика између активних и пасивних оптерећења. Тема овог рада се заснива на пројектовању активног оптерећења, како би се могло управљати жељеним вредностима напона и струје. Цео систем се заснива на регулисању протока струје кроз коло помоћу активних и пасивних електронских компоненти.

##### 2.1. Циљ рада и спецификација уређаја

Главни циљ јесте пројектовање аналогне контролне петље која управља МОСФЕТ-ом у улози објекта управљања. Предност аналогне петље у односу на дигиталну јесте управљање без утицаја шума који протиче од брзих дигиталних управљачких сигнала.

Четири целине кроз које се може описати рад јесу:

- 1) Тестирање струја до 5 А са напоном реда величина 100 mV (ово је могуће постићи због саме конструкције МОСФЕТ-а, а такође зависи и од тестираног уређаја и његове унутрашње отпорности)
- 2) Анализа постојећих техника активних оптерећења и уклањање њихових недостатака
- 3) Проблематика мерења, предности и мане контактне и безконтактне методе мерењ струје
- 4) Пројектовање уређаја тако да има могућност

Табела 2.1 Детаљна спецификација по каналу уређаја

|            | Канал       | Напон   | Струја           | Снага (Импулсно) |
|------------|-------------|---------|------------------|------------------|
| Улаз       | 1           | 0-100 V | 0.1 mA – 20 A    | 200 W (300W)     |
|            | 2           | 0-100 V | 0.1 mA – 20 A    | 200 W (300 W)    |
| „СС“ режим | Опсег       |         | Тачност          | Резолуција       |
|            | 0 – 1 A     |         | ±0.05%FS ±0.1 mA | 0.1 mA           |
|            | 0 – 5 A     |         | ±0.05%FS ±0.5 mA | 1 mA             |
|            | 0 – 30 A    |         | ±0.1%FS ±3 mA    | 1 mA             |
| „CR“ режим | 0.01 - 1    |         | ±0.1%FS ±1 mΩ    | 1 mΩ             |
|            | 1 – 10 Ω    |         | ±0.1%FS ±5 mΩ    | 10 mΩ            |
|            | 10 – 1000 Ω |         | ±0.1%FS ±10 mΩ   | 100 mΩ           |
| „CP“ режим | 0 – 15 W    |         | ±0.1%FS ±10 mW   | 10 mW            |
|            | 0 – 150 W   |         | ±0.1%FS ±100 mW  | 100 mW           |

мерења струје у високој класи тачности

У наставку је приказана детаљна спецификација по каналу уређаја.

## 2.2. Постизање максималне резолуције при 20 А као и при 5 А опсегу

Уређај је по спецификацији пројектован тако да може да оптерети батерију максималном снагом од 200 W континуално, односно 300 W импулсно, али водећи рачуна да су максималне вредности напона 100 V и струје 20 А. Како је за контролу струје коришћен МОСФЕТ са веома малом унутрашњом отпорношћу, могуће је остварити велике струје са малим напонем на дрејну, реда величина 100 mV.

## 2.3. Елиминисање „GND петље“ приликом мерења струје

Приликом пројектовања уређаја, потребно је обратити пажњу да тестни сигнал (ДУТ-„Device under test“) што мање изгуби на својој величини, односно да након уласка сигнала у уређај не дође до пада напона на излазу. Како би се тај проблем максимално умањило, потребно је направити што краћу путању струје, да не би приликом затварања струјног кола дошло до значајних падова напона услед отпорности бакарних водова у штампаној плочи.

## 2.4. Четворожично мерење струје на отпорнику и струјном сензору

Четворожичним начином мерења пада напона на отпорнику се одстрањује утицај пада напона услед отпорности и капацитивности самих каблова, односно водова на штампаној плочи или спојева уколико се ради о мерењу помоћу инструмента. Овај принцип подразумева да се кроз један пар доводи напајање на отпорник, односно омогућава проток струје кроз њега, док се други пар водова везује што је ближе могуће отпорнику и даље се водовима једнаке дужине доводи до компоненте за мерење пада напона. Приликом дигиталног управљања, постоји могућност кориговања грешке креирањем „lookup“ табеле у контролеру, који ће на основу ње бирати наредне вредности.

## 2.5. Пројектовање уређаја за мерења струје у опсегу 20 А као и 10 mA

Како би се постигла жељена тачност, потребно је користити брзе, прецизне и поуздане компоненте. Кључне компоненте за постизање задате тачности су МОСФЕТ, операциони појачавач у улози регулатора и струјни сензор. Потребно је извршити избор компоненти како би систем радио са што мање осцилација и што тачније приказивао жељену вредност струје.

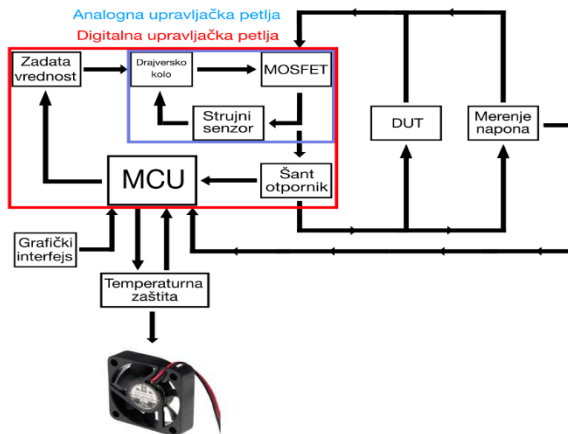
## 3. ИСТРАЖИВАЊЕ

У овој области ће бити детаљније објашњен избор главних компоненти за функционисање аналогног дела овог система. Како би се постигла контрола струје, потребно је направити систем са повратном спрегом. Компонента која има улогу да контролише протикање струје јесте МОСФЕТ. Уколико се на гејт МОСФЕТ-а доведе напон нижи од његовог прага провођења, он ће бити закочен и кроз њега не тече струја. Како се напон  $V_{gs}$  повећава, канал МОСФЕТ-а се постепено отвара и кроз њега протиче све већа количина струје. МОСФЕТ у

овој конфигурацији ради у омској области, при чему је однос напона  $V_{gs}$  и струје линеаран.

Затворена управљачка петља се остварује уз помоћ струјног сензора, који нам приказује тренутну вредност струје и операционог појачавача који има улогу регулатора јер му је задатак да изједначи измерену вредност струје са задатом.

У наставку је приказан блок дијаграм уређаја.



Слика 3.1 Приказ блок дијаграма уређаја

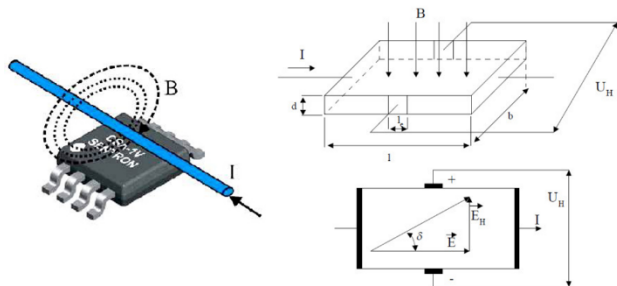
### 3.1. Избор компоненти

Када је реч о коришћеним компонентама, потребно је да буду брзе, прецизне и да раде без осцилација. МОСФЕТ (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) је једна од кључних компоненти у овом систему. Његова улога је да пропушта задату количину струје. У овом раду коришћен је МОСФЕТ са индикованим каналом, Н каналног типа. Предност коришћеног МОСФЕТ-а је његова структура, која је сачињена од много малих, паралелно повезаних транзистора, те му таква структура омогућава равномерно дељење струје, а самим тим и једнако грејање у свим тачкама (на тај начин се избегава „hot spot“). Такође је коришћење линеарног МОСФЕТ-а поједноставило његово управљање, па регулацијом напона на гејту, можемо очекивати спорију промену ширине канала, за разлику од уобичајеног МОСФЕТ-а, где је ова промена веома брза (минимална промена на гејту доводи до веома брзог отварања/затварања канала, па је регулација отежана).

Један од начина мерења струје јесте пропуштањем струје кроз отпорник и мерења пада напона на њему (тзв. шант отпорник). Познавајући тачну отпорност и мерењем пада напона на отпорнику, помоћу Омовог закона се може израчунати струја која протиче кроз отпорник. Отпорник је коришћен у конфигурацији за „low side current sensing“, односно мерење пада напона на отпорнику при чему је један крај повезан на нулти потенцијал, односно масу, а други је директно на сорс транзистора.

Како је поменуто у претходном поглављу, за мерење струје је коришћен струјни сензор произвођача „Allegro MicroSystems“ а модел је „ACS724LLCTR-05AU-T“. Овај модел струјног сензора се заснива на Холовом ефекту. Приликом протикања струје кроз сензор, индукује се магнетно поље које се детектује интегрисаним колом у

чипу (*Hall IC*) и конвертује се у напон који је на излазу пропорционалан струји. На наредној слици је приказан принцип рада Холовог сензора.



Слика 3.2 Принципи Холовог сензора [2]

Поред наведеног сензора, коришћен је још један, како би се вредност измерене струје проследила у микроконтролер и оставила могућност дигиталне регулације од стране контролера. Коришћен сензор је „INA310A1“ и он мери пад напона на шант отпорнику.

Операциони појачаваач се користи за регулацију струје, односно поређење задате и остварене величине, тежећи ка томе да их изједначи.

#### 4. ПРОЈЕКТОВАЊЕ УРЕЂАЈА

Уређај је потребно направити у форми самосталног уређаја и омогућити управљање преко „CAN“ комуникационог протокола.

Уређај је са механичке стране пројектован тако да се не предњој страни налазе прикључци за тестни сигнал, као и екран и енкодер за избор режима рада, односно комуникацију са корисником, док су са задње стране постављени конектор и прекидач за напајање, конектори за приказивање сигнала струје сваког МОСФЕТА и конектор за „CAN“ комуникацију. Уређај је пројектован у 2U кућишту, како би се омогућила једноставнија уградња у електричне ормане.

Када је реч о пројектовању електронике за уређај, пројектована је једна штампана плоча. На њој се може издвојити део за напајање, аналогни управљачки део за контролу струје, температурна заштита, као и

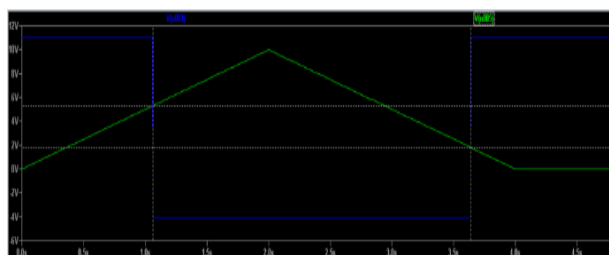
у улози регулатора, који има задатак да изједначи мерену вредност са струјног сензора и задату вредност од стране корисника.

Иако је аналогна петља примарни циљ, систем је пројектован тако да постоји и регулација дигиталним путем, помоћу микроконтролера и одговарајућих компоненти за обраду сигнала. Мерењем пада напона на шант отпорнику и враћањем те вредности у микроконтролер, могуће је направити алтернативно решење и у потпуности занемарити утицај аналогне контролне петље. У овом случају је потребно направити „lookup“ табелу која нам омогућава да коригујемо вредности струје у односу на претходна мерења.

Приликом пројектовања, потребно је обратити пажњу да је спецификацијом прописан избор између три режима:

1. CC (*constant current*)-режим константне струје  
У овом режиму се од корисника тражи да унесе струју којом жели да оптерети тестни сигнал, а уређај одржава ту вредност струје константном, без обзира на то колико се оптерећење доведе на ДУТ (*device under test*).
2. CR (*constant resistance*)-режим константног отпора  
Овај се режим најчешће користи при тестирању напонских извора, попут батерија. Без обзира на мењање вредности напона тестног сигнала, уређај се понаша као фиксни отпорник, а вредност отпора се одржава регулацијом струје кроз МОСФЕТ.
3. CP (*constant power*)-режим константне снаге  
У овом режиму се задаје снага којом ће ДУТ бити константно оптерећен. Уколико се ради о ДУТ-у који представља напонски извор, како би се одржала задата снага, потребно је регулисати струју.

Још једна од целина у овом раду је модул за мерење напона ДУТ-а, што нам омогућава и постизање претходно поменутих режима рада. Приликом мерења напона, постоји аутоматски избор опсега, како би мерење било што прецизније и поузданије, а такође је и пројектована пренапонска заштита за АД конвертор. Аналогно-дигитални конвертор се користи за претварање аналогног сигнала, у овом случају напона, у дигитални сигнал који је природан за микроконтролер.



Како би се спречило очитивање превисоког напона, које може да оштети АД конвертор, пројектована је пренапонска заштита помоћу хистерезиса. На наредној слици се може видети сигнал на излазу компаратора који поседује хистерезис (обележен плавом бојом), док је зеленом приказан референтни сигнал, односно напон који меримо.

Приметимо да је до прага напонског прекорачења излаз

Слика 4.1 Приказ функције хистерезиса

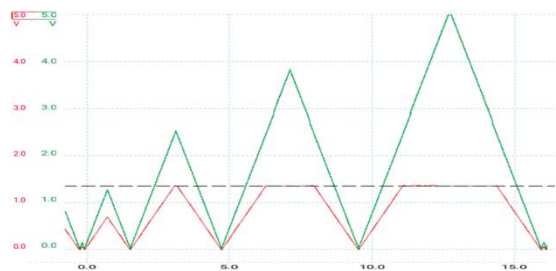
операционог појачаваача висок, док након преласка прага, излаз постаје низак. Како би излаз поново постао висок,

микроконтролерски склоп задужен за обраду свих дигиталних сигнала у систему.

Аналогна управљачка петља је основни задатак овог рада. На тржишту је тренутно веома мали број аналогних уређаја, те овај рад добија посебан значај. Аналогна петља је отпорнија на брзе дигиталне промене у виду шума, које се могу појавити и услед коришћења прекидачких регулатора напона, те су стога коришћени

линерани регулатори. Само управљање, односно регулација струје се врши путем операционог појачаваача

није довољно да напон падне испод прага, већ је потребно да опадне на 80% његове вредности.



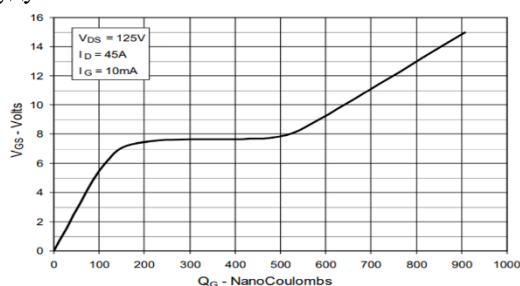
Слика 4.2 Приказ струје задате путем микроконтролера

Софтверски део уређаја је задужен за контролу како дигиталне управљачке петље, тако и за комуникацију са корисничким интерфејсом, температуру заштити, мерење напона и комуникацију са другим уређајима путем „CAN“ порука. У тест фази рада је коришћен микроконтролер „STM32F405“ у комбинацији

са 16-битним ДА конвертором којим је задавана вредност струје. Приказан је сигнал са осцилоскопа, где је црвеном бојом приказана мерена вредност струје (тестирано је напајање са прекострујном заштитом, те је из тог разлога струја ограничена на 1,4 А), а зеленом бојом задата вредност струје путем микроконтролера.

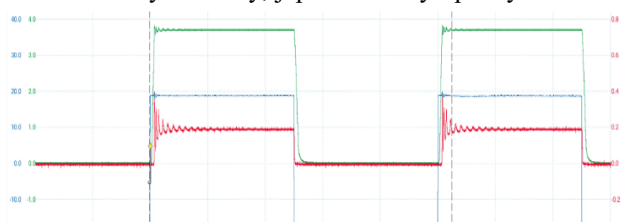
## 5. ОПИС РЕАЛИЗОВАНОГ СИСТЕМА

Главна компонента којом управљамо у систему је МОСФЕТ, па нам стабилност целог система зависи од његових могућности. Мана оваких МОСФЕТ-ова је што поседују велику капацитивност, којом се споро управља, односно време затварања канала је доста велико. На карактеристици поларисања гејта се може уочити Милеров плато, који показује да постоји капацитивност између гејта и сорса, те да је потребно прво капацитивност напунити како би се омогућио даљи рад МОСФЕТ-а и због тога долази до споријег реаговања на побуду.



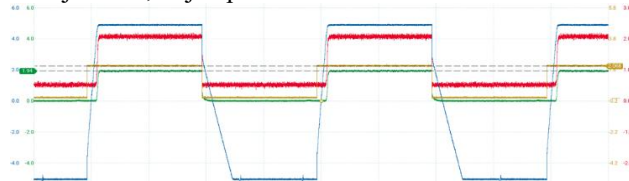
Слика 5.1 Карактеристика поларисања Гејта и Милеров плато

Да бисмо добили реалан управљачки сигнал без осцилација, потребно нам је да МОСФЕТ буде најбржа компонента у систему, јер на његову брзину не можемо



Слика 5.2 Одзив система на степ побуду без филтра

да утичемо као на струјни сензор и операциони појачавач, чије брзине можемо смањити.



Слика 5.2 Одзив система на степ побуду са филтром 330 pF

Без филтарског кондензатора сензор има пропусни опсег од 120 kHz. Додавањем кондензатора пропусни опсег се заједно са шумом смањује, што је од великог значаја. На претходне две слике се може уочити утицај без кондензатора и са кондензатором од 330 pF. У наредној табели су приказане вредности струје и напона на сваком МОСФЕТ-у у каналу појединачно. Јасно се може видети да сва 4 МОСФЕТ-а прилично једнако деле струју и да дужина вода од ДУТ-а до МОСФЕТ-а нема утицај након подешавања офсета

Табела 5.1 Резултати мерења детаљно, до 10.5 А

|       |        | 1.5mA | 1.025mA [V] | 1.025mA [V] | 1.025mA [V] | 1.025mA [V] | 1.025mA [V] | 1.025mA [V] | 1.025mA [V] |
|-------|--------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| fet 1 | ACS    |       | 0.5287      | 0.7152      | 0.9191      | 1.3153      | 1.5188      | 2.5262      |             |
|       | SHUNT  |       | 0.0012      | 0.0125      | 0.025       | 0.0492      | 0.0617      | 0.1235      |             |
|       | INA310 |       | 0.0248      | 0.2524      | 0.501       | 0.9845      | 1.2328      | 2.4833      |             |
| fet 2 | ACS    |       | 0.5225      | 0.709       | 0.9123      | 1.3079      | 1.5113      | 2.5171      |             |
|       | SHUNT  |       | 0.0011      | 0.0126      | 0.0253      | 0.0497      | 0.0623      | 0.1248      |             |
|       | INA310 |       | 0.0235      | 0.2521      | 0.5015      | 0.9876      | 1.2373      | 2.4734      |             |
| fet 3 | ACS    |       | 0.5244      | 0.7113      | 0.9149      | 1.3112      | 1.5149      | 2.5223      |             |
|       | SHUNT  |       | 0.0011      | 0.0127      | 0.0253      | 0.05        | 0.0626      | 0.1253      |             |
|       | INA310 |       | 0.0226      | 0.2519      | 0.5022      | 0.9892      | 1.239       | 2.4783      |             |
| fet 4 | ACS    |       | 0.5256      | 0.7124      | 0.9158      | 1.3115      | 1.5147      | 2.5208      |             |
|       | SHUNT  |       | 0.0012      | 0.0127      | 0.0255      | 0.0502      | 0.0629      | 0.1259      |             |
|       | INA310 |       | 0.0241      | 0.2544      | 0.5071      | 0.9971      | 1.2489      | 2.4962      |             |

струје за сваки канал.

Приказана су мерења на струјном сензору „ACS“, шант отпорнику и струјном сензору INA310 који мери пад напона на отпорнику и враћа вредност у микроконтролер.

## 6. ЗАКЉУЧАК

Уређај је пројектован тако да испуњава све тражене спецификације. Иако је замишљено да се користи само шант отпорник за мерење струје, њему је приступљено на други начин, употребом струјног сензора.

Када је реч о унапређењу уређаја, остављена је могућност писања софтвера за екран, како би се омогућила једноставнија комуникација са корисником, као и читавање мерених вредности на самом екрану, без употребе додатне опреме, попут осцилоскопа и струјних сонди.

## 7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] МОСФЕТ: <https://www.electronicshub.org/mosfet/>
- [2] Холлов ефект: <https://www.automatika.rs/baza-znanja/senzori/holov-senzor.html>
- [3] Хистерезис: <http://www.labbookpages.co.uk/electronics/resNetworks/comparator.html>
- [4] др Жељко Деспотовић - Мосфет као прекидач снаге

## Кратка биографија:

Дарко Бабијановић рођен 24. 5. 1999. године у Новом Саду, где је завршио основну школу и средњу електротехничку. Школовање је наставио на Факултету техничких наука, где је и дипломирао на смеру меатроника 2022. године. Након завршених ОАС, уписује и 2024. године завршава мастер студије.