

# Testiranje razvojne pločice za paralelno balansiranje IGBT-ova

---

**Lovrić, Branimir**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:721029>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-05**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**Testiranje razvojne pločice za paralelno balansiranje  
IGBT-ova**

**Završni rad**

**Branimir Lovrić**

**Osijek, 2019.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 12.09.2019.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada**

Ime i prezime studenta:	Branimir Lovrić
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	4138b, 19.09.2018.
OIB studenta:	80567856891
Mentor:	Prof. dr. sc. Denis Pelin
Sumentor:	Andrej Brandis
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Testiranje razvojne pločice za paralelno balansiranje IGBT-ova
Znanstvena grana rada:	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
Predložena ocjena završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	12.09.2019.
Datum potvrde ocjene Odbora:	25.09.2019.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 27.09.2019.

Ime i prezime studenta:	Branimir Lovrić
Studij:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	4138b, 19.09.2018.
Ephorus podudaranje [%]:	1

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Testiranje razvojne pločice za paralelno balansiranje IGBT-ova**

izrađen pod vodstvom mentora Prof. dr. sc. Denis Pelin

i sumentora Andrej Brandis

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# Sadržaj

Sadržaj.....	2
1. Uvod.....	5
1.1. IGBT.....	6
2. Maketa.....	7
2.1 Algoritmi.....	9
2.1.1 Nsim.....	10
2.1.2 NNr.....	10
3. Mjerenja na maketi.....	11
3.1 Setovi mjerenja.....	12
3.2 Rezultati mjerenja.....	14
Nsim algoritam.....	15
NNr algoritam.....	26
4. Zaključak.....	33
Literatura.....	34
Sažetak.....	35
Abstract.....	35
Životopis.....	36

# 1. Uvod

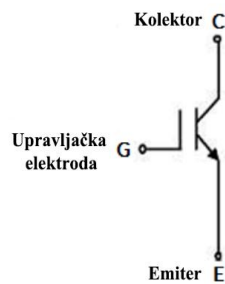
U suvremenom svijetu gdje elektronske komponente brzo napreduju i proizvođači od njih traže maksimalnu učinkovitost i potrebno je testirati ponašanje tranzistora pri raznim temperaturama i opterećenjima. Iz razloga što je jedna od značajki IGBT tranzistora njihova velika pouzdanost, automobilska industrija je među prvima krenula u razvoj naprednih IGBT modula koji se mogu pronaći u većini hibridnih kao i električnih vozila.

U benzinsko-hibridnom sistemu, proces pretvorbe električne energije uključuje pretvarač i izmjenjivač za pretvorbu energije generirane pomoću motora u električnu energiju kojom se pune i prazne baterije također kao i za pokretanje motora. Sistem pretvorbe električne energije koristi IGBT modul kao glavnu pretvaračku komponentu. IGBT moduli su se proteklih dvadeset godina koristili u industrijskim postrojenjima, ali razvoj pouzdanijih IGBT-ova s boljim performansama utječe na uporabu u automobilskoj industriji.[1]

U ovom završnom radu bit će prikazane strujno-temperaturne karakteristike IGBT tranzistora pri raznim opterećenjima s ciljem testiranja paralelnog rada IGBT-ova pri opterećenju te analiziranje rezultata na temelju prikupljenih informacija o strujama i naponima pri različitim algoritmima upravljanja temperaturom. U radu će biti objašnjen tip IGBT tranzistora kao i maketa koja se koristila u mjerenjima.

## 1.1. IGBT

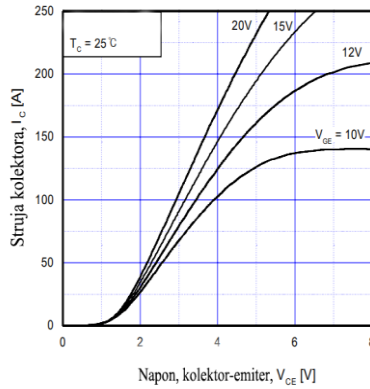
Sklop IGBT-a je zasnovan na bipolarnom tranzistoru i MOSFET-u. IGBT je elektronička komponenta koja se koristi u sklopnom načinu rada. IGBT komponenta se sastoji od tri priključnice a to su kolektor (C), upravljačka elektroda (G) i emiter (E). IGBT kao upravljiva sklopka vodi struju u jednom smjeru, preuzima na sebe pozitivni napon (blokiranje) u stanju nevođenja. [2] Obilježava ga naponsko upravljanje te relativno velika snaga koju može prenositi, kao i visoka frekvencija odnosno brzina rada. [3]



Sl. 1.1 Simbol IGBT-a

IGBT-ovi korišteni u ovom mjeranju su Fairchild G80N60-Ultrafast. Njih karakterizira mala vodljivost i mali gubici uslijed isključivanja/uključivanja tranzistora, nizak napon zasićenja, visoka ulazna impedancija. Primjenjuju se kada je potrebna kontrola rada motora i kod energetskih pretvarača gdje je potrebna visoka frekvencija rada.[4]

Na Sl. 1.2 se vide izlazne karakteristike tranzistora Fairchild G80N60-Ultrafast pri temperaturi od 25°C koji se koristio u ovim mjeranjima.



**Sl. 1.2** Izlazne karakteristike Fairchild G80N60-Ultrafast tranzistora

## 2. Maketa

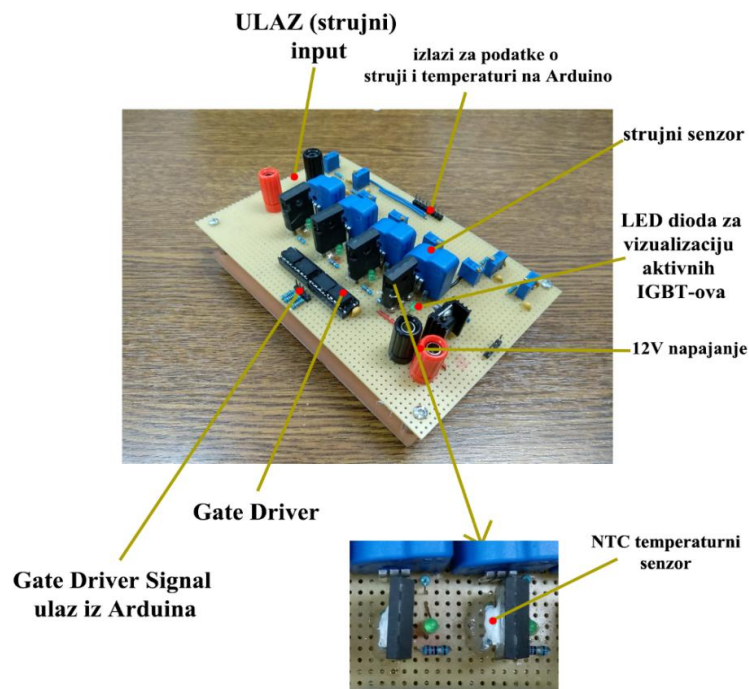
Sastavljena maketa za testiranje paralelnog rada IGBT-ova ima sljedeće ciljeve:

- razvijanje najoptimalnijeg algoritma za testiranje na maketi
- razvoj Matlab koda pomoću kojega će se prikupljati podaci iz mjerenja
- upoznavanje s vremenskim i temperaturnim konstantama sustava
- izrada baze podataka različitih mjerenja za kasniju usporedbu

Maketa koja se koristi u ovom mjerenju se sastoji od dizajnirane pločice sa zalemljenim komponentama na koju su pričvršćene četiri nožice kako bi se izbjegli slučajni kratki spojevi.

Na Sl.2.1 prikazana su četiri paralelno povezana IGBT-a koja se naizmjenično uključuju i isključuju po potrebi i zahtjevima programa Matlab i Arduino. Uz svaki IGBT se nalazi i LED dioda koja se uključuje i svijetli zelenom bojom kada IGBT vodi. Svaki IGBT je povezan na driver koji ima ulogu prilagođavanja napona upravljanja IGBT-a.

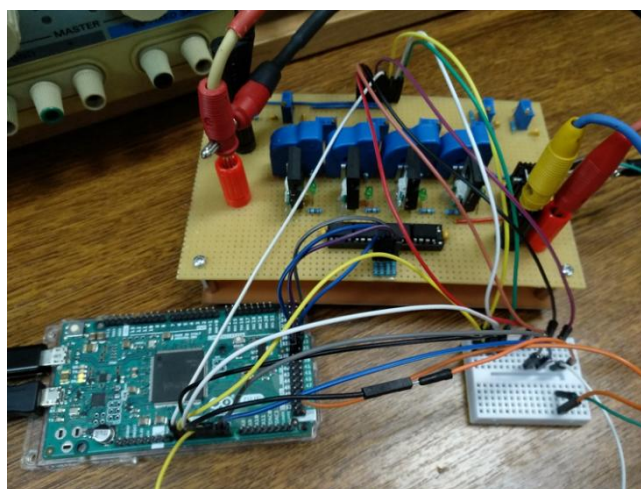




**Sl. 2.1** Maketa za testiranje paralelnog rada IGBT-ova

Podaci o temperaturi IGBT-a se dobivaju pomoću NTC temperaturnih senzora koji su pričvršćeni na površinu svakog IGBT-a. Dok se podaci o struji koja prolazi kroz IGBT dobivaju iz strujnih senzora koji se nalaze u krugu svakog IGBT-a.

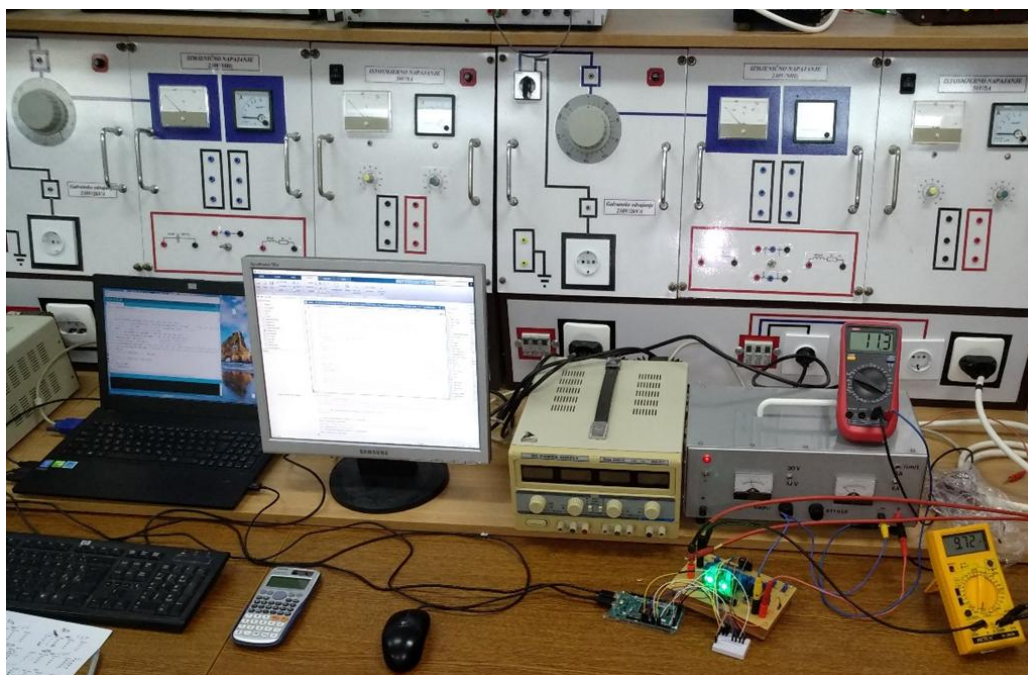
Na slici 2.2 u donjem lijevom kutu se vidi Arduino Due pločica koja ima ulogu upravljanja tranzistorima i prikupljanja podataka. Arduino Due je ploča bazirana na 32-bitnom ARM jezgrenom mikro kontroleru koji ima 54 digitalna ulaza / izlaza pinova, 12 analognih ulaza. [5]



**Sl. 2.2** Prikaz makete s Arduino DUE pločicom

Radno mjesto koje je prikazano na Sl. 2.3 se sastoji od:

- dva izvora istosmjernog napona ( $U_{max}=1000V$ ,  $I_{max}=10A+10A$ )
- pomoćnog napajanja od 12V
- maketa na kojoj se vrši mjerenje
- Arduino DUE pločica
- računalo - sa softverom Matlab za obradu podataka
- multimetar – služi za kontrolu napona i struje



Sl. 2.3 Prikaz strujnog izvora i radnog mjesta

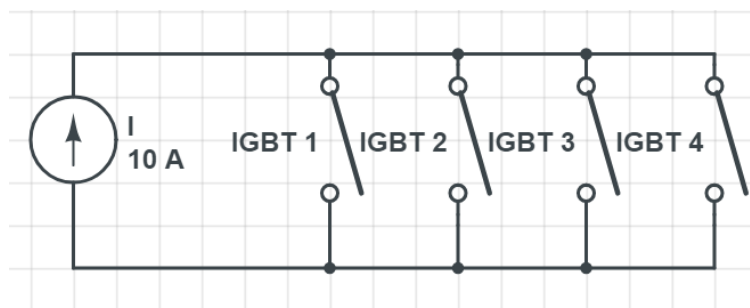
## 2.1 Algoritmi

U ovom poglavlju će se detaljnije opisati dva algoritma koja će se izvoditi u mjeranju. Za testiranje paralelnog rada IGBT-ova, napisana su 2 algoritma upravljanja, Nsim, gdje svi tranzistori rade zajedno i NNr gdje postoji rezervni tranzistor. Ovi algoritmi odabrani su zbog svoje jednostavnosti i lako se primjenjuju na napravljenoj maketi.

### 2.1.1 Nsim

Nsim algoritam se zasniva na tome da u istom trenutku radi od jedan do tri IGBT-a ovisno o tome koliki je zadani parametar „Br.IGBT“ u setu mjerenja. Broj IGBT (Br.IGBT) se inicijalizira u programu Arduino prije svakog mjerenja. Mjerenja se provode po principu da se tranzistori krenu zagrijavati od „sobne temperature“ koja je u laboratoriju iznosila  $23.5^{\circ}\text{C}$  do zadane maksimalne temperature (Maks.Temp) te nakon toga prestanu voditi i hlade za zadani  $\Delta T$ . Taj proces se ponavlja određeni broj puta dok ne završi mjerenje, odnosno dok ne istekne zadani parametar „Vrijeme“.

U program Arduino se unose promjenjivi parametri i nakon toga pritiskom na tipku „Start“ u programu Arduino se pokreće mjerenje. Mjerenja u Nsim algoritmu se vrše sa strujom od 10 A kako ne bi došlo do prebrzog zagrijavanja. Na Sl. 2.4 u simboličkom prikazu se vidi paralelni spoj četiri IGBT tranzistora na kojima se vrši mjerenje za Nsim algoritam ovisno o unesenim parametrima.



Sl. 2.4 Simbolički prikaz Nsim algoritma

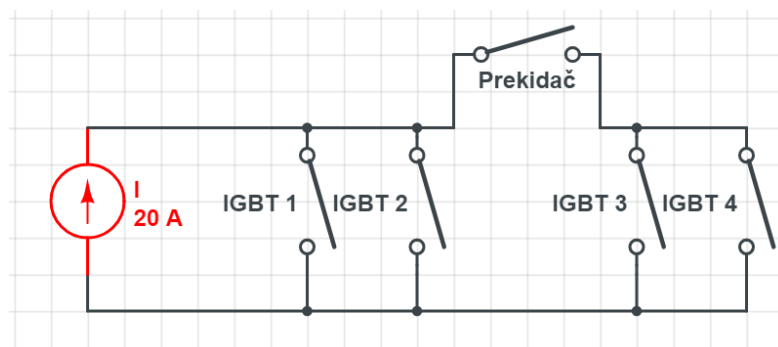
### 2.1.2 NNr

Za razliku od Nsim algoritma, gdje svi IGBT-ovi rade istovremeno, u NNr algoritmu postoji odabrani broj rezervnih tranzistora. Ovaj algoritam je razvijen iz razloga da se vidi utjecaj aktiviranja rezervnog tranzistora ukoliko se nekih od tranzistora pregriju. Cilj ovog mjerenja jest taj da u svakom trenutku mjerenja radi barem jedan tranzistor. U programu Arduino unosi se broj osnovnih tranzistora koji će u trenutku  $t=0s$  početi s radom i broj rezervnih tranzistora koji će se upaliti nakon što osnovni tranzistori dosegnu svoju maksimalnu zadanu temperaturu (Maks.Temp). Temperature se također kontroliraju kroz program u Arduino sučelju.

Mjerenja se vrše za 2 procesa:

- Prvi proces: 2+1, gdje dva predstavlja broj osnovnih tranzistora a jedan predstavlja rezervni tranzistor
- Drugi proces: 2+2, u ovom algoritmu se koriste dva osnovna i dva rezervna tranzistora.

U simboličkom prikazu na Sl. 2.5 se vidi paralelni spoj četiri IGBT tranzistora s prekidačem. U NNr algoritmu mjerenja odabran je strujni izvor od 20A iz razloga što u istom trenutku radi više IGBT-ova. Prekidač uklopi kada IGBT 1 ili IGBT 2 dosegnu svoje maksimalne zadane temperature (Maks.Temp). Tada u rad stupaju IGBT 3 i IGBT 4 i imaju svrhu balansiranja kruga tj. u svakom trenutku tijekom mjerenja radi najmanje jedan IGBT tranzistor.



Sl. 2.5 Simbolički prikaz paralelnog spoja IGBT-ova za NNr algoritam

### 3. Mjerenja na maketi

Kao što je spomenuto u prethodnom poglavlju testiranja će se provoditi sa dva algoritma. Nsim algoritam se sastoji od sedam setova mjerenja dok se NNr algoritam sastoji od četiri seta mjerenja.

Svaki set mjerenja se sastoji od promjenjivih ulaznih varijabli a to su:

- **Br.IGBT** - broj IGBT-ova korištenih u mjerenju (1,2,3 ili 4 IGBT-a)
- **Maks. Temp** - maksimalna temperatura, odabrana vršna temperatura kada se IGBT mora isključiti (4 različite vrijednosti)
- $\Delta T$  - vrijednost promjene temperature, vrijednost koja definira koliko se IGBT treba ohladiti (u ° C) prije nego što se ponovo može uključiti (3 različite vrijednosti)

U Tab. 3.1 je prikazan jedan set mjerenja sa svim parametrima koji se podešavaju u programima Matlab i Arduino.

**Tab. 3.1** Prikaz jednog seta mjerenja

Br IGBT	Maks. Temp	$\Delta T$	Vrijeme
1	300	15	120
1	500	15	120
1	700	15	120

Temperatura navedena u tablicama setova mjerenja je parametarska i ona služi kako bi računalo uspješno obradilo podatke. U Tab. 3.2 je prikazan omjer parametarske temperature koja se unosi u programe Matlab i Arduino i njoj ekvivalentne temperature u Celzijevim stupnjevima.

**Tab. 3.2** Omjer parametarske temperature i temperature u Celzijevim stupnjevima

T [parametar]	T [°C]
300	56
500	75
700	92
900	109
15	5
50	7.5
80	6
100	14

### 3.1 Setovi mjerenja

Setovi mjerenja koji su rađeni sa Nsim algoritmu su prikazani u Tab. 3.3.

**Tab. 3.3** Setovi mjerenja za prvi algoritam

Prvi set mjerenja za Nsim algoritam				Drugi set mjerenja za Nsim algoritam			
Br IGBT	Maks. Temp	$\Delta T$	Vrijeme	Br IGBT	Maks. Temp	$\Delta T$	Vrijeme
1	300	15	120	1	300	50	120
1	500	15	120	1	500	50	120
1	700	15	120	1	700	50	120
1	900	15	120	1	900	50	120
Treći set mjerenja za Nsim algoritam				Četvrti set mjerenja za Nsim algoritam			
Br IGBT	Maks. Temp	$\Delta T$	Vrijeme	Br IGBT	Maks. Temp	$\Delta T$	Vrijeme
1	300	80	120	2	300	50	120
1	500	80	120	2	500	50	120
1	700	80	120	2	700	50	120
1	900	80	120	2	900	50	120
Peti set mjerenja za Nsim algoritam				Šesti set mjerenja za Nsim algoritam			
Br IGBT	Maks. Temp	$\Delta T$	Vrijeme	Br IGBT	Maks. Temp	$\Delta T$	Vrijeme
2	300	80	120	3	300	50	120
2	500	80	120	3	500	50	120
2	700	80	120	3	700	50	120
2	900	80	120				
Sedmi set mjerenja za Nsim algoritam							
Br IGBT	Maks. Temp	$\Delta T$	Vrijeme				
3	300	80	120				
3	500	80	120				
3	700	80	120				

Setovi mjerenja koji su rađeni u NNr algoritmu su prikazani u Tab. 3.4.

**Tab. 3.4** Setovi mjerenja za drugi algoritam

Prvi set mjerenja za NNr algoritam				Drugi set mjerenja za NNr algoritam			
Br IGBT	Max. Temp	$\Delta T$	Vrijeme	Br IGBT	Max. Temp	$\Delta T$	Vrijeme
2+1	300	50	120	2+1	500	80	120
2+1	500	50	120	2+1	700	80	120
2+1	700	50	120	2+1	900	80	120

Treći set mjerenja za NNr algoritam			
Br IGBT	Max. Temp	$\Delta T$	Vrijeme
2+2	300	50	120
2+2	500	50	120
2+2	700	50	120

Četvrti set mjerenja za NNr algoritam			
Br IGBT	Max. Temp	$\Delta T$	Vrijeme
2+2	300	100	120
2+2	500	100	120
2+2	700	100	120

Podaci iz tablice se unose u programe Arduino i Matlab te se vrše mjerenja i podatci se spremaju u obliku dva grafa. Prvi graf pokazuje ovisnost temperature o vremenu, a drugi graf pokazuje ovisnost struje o vremenu. Ti grafovi će u pojedinim slučajevima biti spojeni u jedan graf radi lakše vizualizacije rezultata mjerenja i rada pojedinog IGBT-a.

### 3.2 Rezultati mjerenja

Svaki set se sastoji od tri ili četiri mjerenja i od toga svako mjerenje sadržava tri podatka o temperaturi i dva podatka o vremenu hlađenja i zagrijavanja tranzistora.

**Mjerenje** – broj mjerenja

$T_{maks}$  (°C) – maksimalna temperatura do koje se tranzistor zagrijava

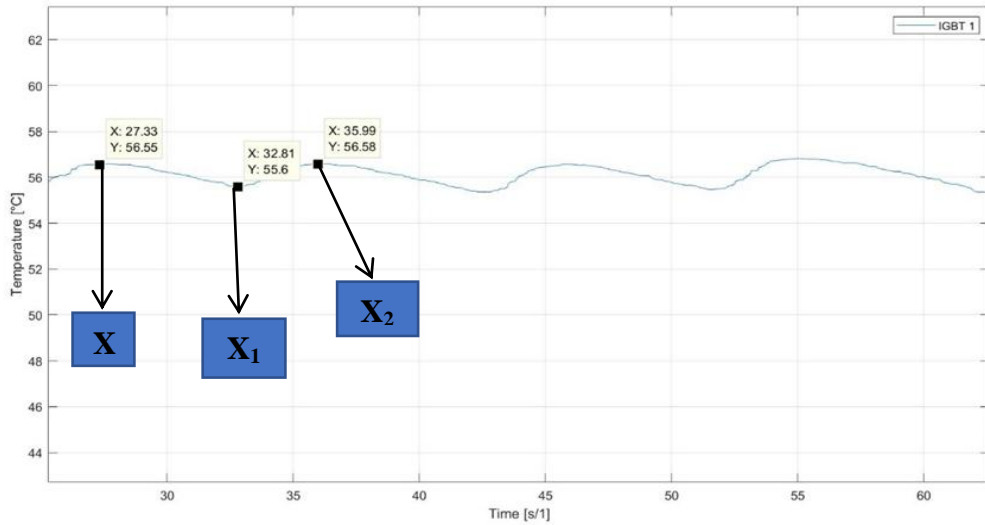
$T_{min}$  (°C) – temperatura do koje se tranzistor hladi i nakon toga ponovno uključuje

$\Delta T$  (°C) – razlika maksimalne i minimalne temperature, temperaturna promjena

$t_h$  (s) – vrijeme hlađenja, vrijeme odmora

$t_z$  (s) – vrijeme zagrijavanja, vrijeme vođenja

Na Sl. 3.1 se vidi uvećana ovisnost temperature o vremenu s naznačenim točkama pomoću kojih se određuje vrijeme hlađenja  $t_h$  (s) i vrijeme ponovnog zagrijavanja  $t_z$  (s).



### Sl. 3.1 Uvećana ovisnost temperature o vremenu

Vrijeme zagrijavanja  $t_z$  se računa po formuli (3-1) tako što se oduzme vrijeme u točki  $X_1$  od vremena iz točke  $X_2$ .

$$t_z = t_{x_2} - t_{x_1} [s] \quad (3-1)$$

Vrijeme hlađenja  $t_h$  se računa po formuli (3-2) tako što se oduzme vrijeme u točki  $X$  od vremena iz točke  $X_1$ .

$$t_h = t_{x_1} - t_x [s] \quad (3-2)$$

### Nsim algoritam

U ovom poglavlju će biti prikazana obrada dobivenih rezultata mjerenja za Nsim algoritam.

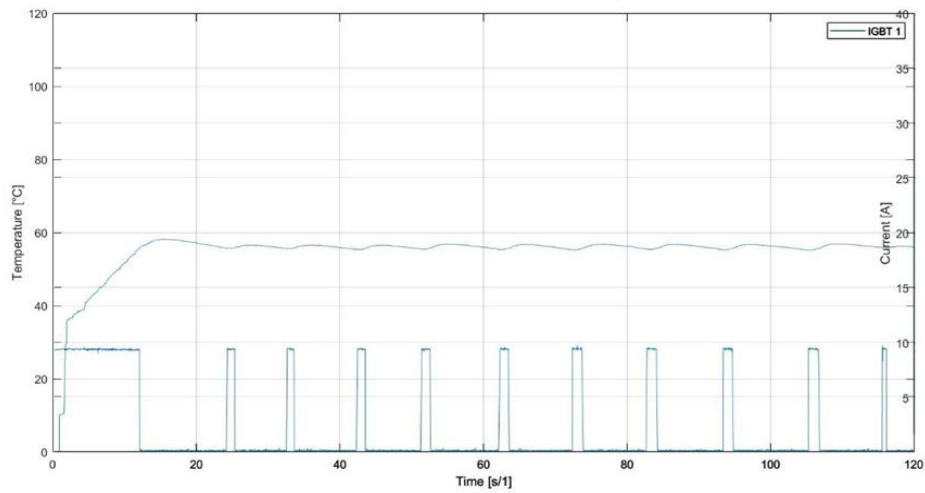
U Tab. 3.5 su prikazani rezultati za prvi set mjerenja sa Nsim algoritmom.

**Tab. 3.5** Podatci prvog seta mjerenja

Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	56.63	55.61	1.02	3.25	5.56
2.	75.53	74.34	1.19	3.12	4.94
3.	92.14	90.95	1.19	2.74	3.42
4.	109.26	108.13	1.13	2.92	3.65

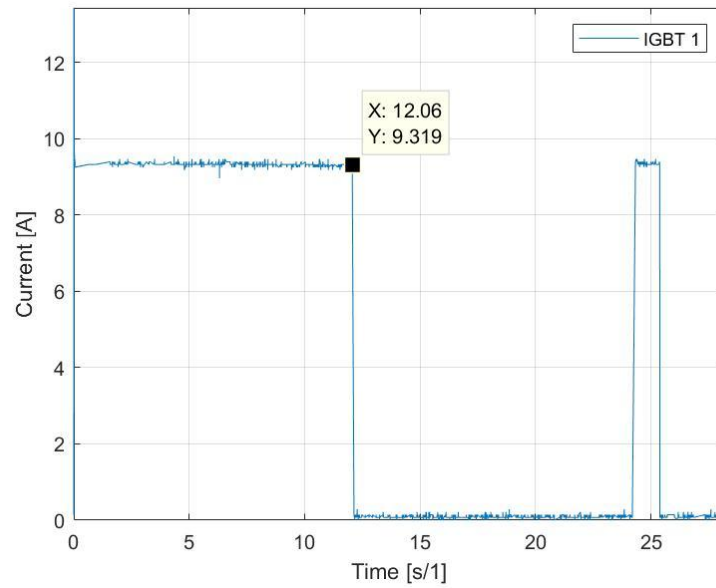


Na Sl. 3.2 se vidi strujno temperaturna karakteristika za prvo mjerenje. Iz grafa se vidi kako se IGBT 1 zagrije i ohladi 11 puta u 120 sekundi.

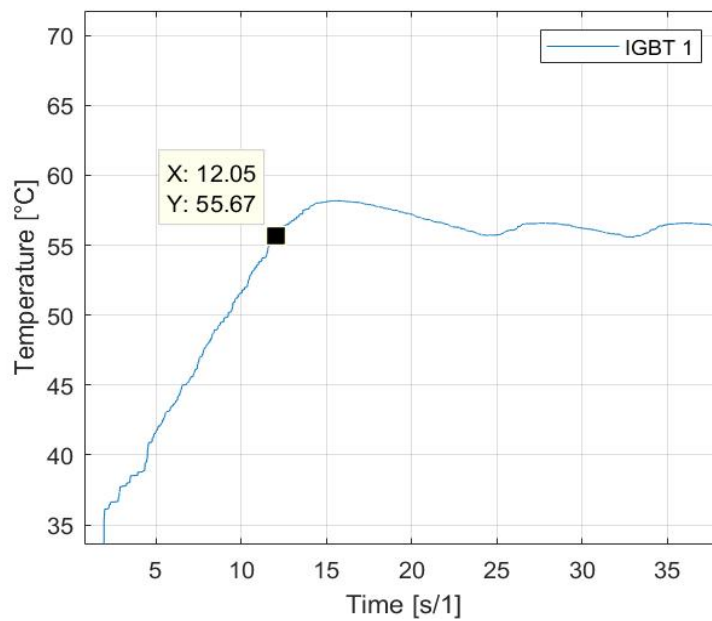


### Sl. 3.2 Prikaz strujno temperaturne karakteristike

Iz Sl. 3.3 se može zaključiti kako je struja prestala prolaziti kroz IGBT 1 u trenutku  $t$  koji iznosi 12.06s, a iz Sl. 3.4 se vidi kako temperatura raste kroz naredne 3 sekunde i tek onda počinje opadati. Pretpostavka je da se ta pojava javlja zbog sporog prijelaza temperature iz PN spoja do temperaturnog mjernog uređaja koji se nalazi na površini IGBT-a. Nakon tog porasta i narednog hlađenja, temperaturna krivulja izgleda kontinuirano i  $\Delta T$  u prvom setu iznosi 1.1°C.



**Sl. 3.3** Uvećani prikaz isklapanja IGBT-a



**Sl. 3.4** Uvećani prikaz promjene temperature pri isklapanju IGBT-a

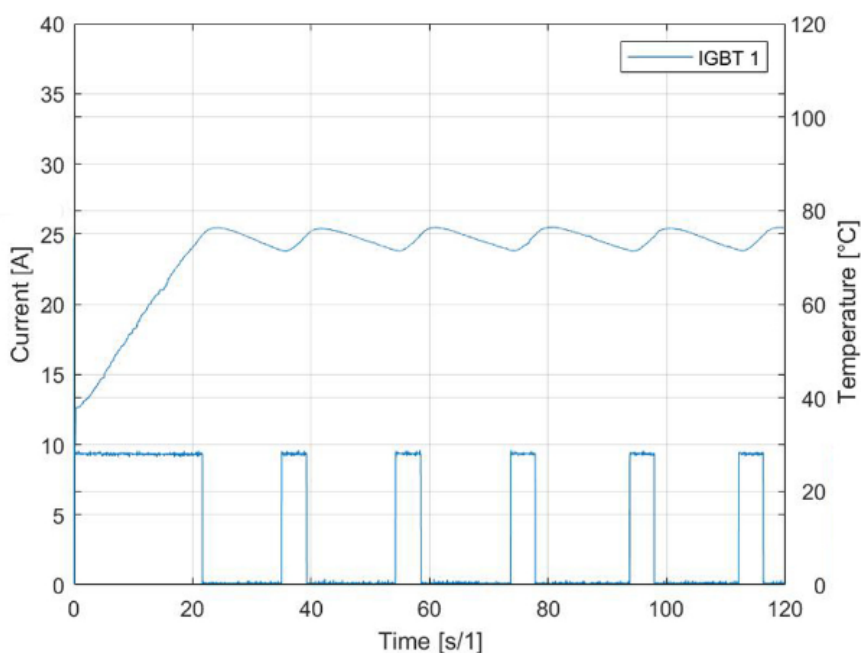
U Tab. 3.6 su prikazani rezultati za drugi set mjerenja sa Nsim algoritmom.

**Tab.3.6** Podatci drugog seta mjerenja

Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	57.98	51.46	6.52	6.84	29.39
2.	76.31	71.37	4.94	5.93	11.7
3.	92.65	88.04	4.61	6.06	8.88
4.	109.7	105	4.7	6.35	8.54

Iz seta mjerenja odabrano je reprezentativno drugo mjerenje jer se želi prikazati promjena temperature ( $\Delta T$ ).

Iz Sl. 3.5 se vidi dobiveni rezultat za drugo mjerenje. Može se zaključiti kako se IGBT zagrijava 21.3 sekunde u prvom ciklusu zagrijavanja. To vrijeme iznosi toliko zato što se počinje zagrijavati od „sobne temperature“. Svako sljedeće zagrijavanje sve je kraće iz razloga što se mora zagrijati za zadani  $\Delta T$ , odnosno  $5^{\circ}\text{C}$ , a već se nalazi na temperaturi od  $71.37^{\circ}\text{C}$ . Iz Sl. 3.5 se također vidi kako IGBT obavi šest ciklusa zagrijavanja i hlađenja u zadanom vremenskom periodu od 120 sekundi.



Sl. 3.5 Grafički prikaz rezultata za drugo mjerenje

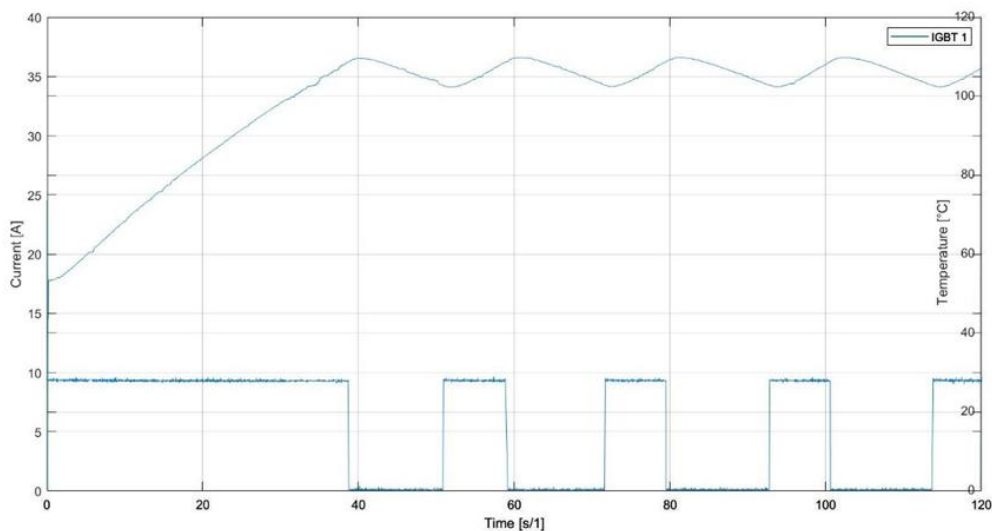
U Tab. 3.7 su dobiveni podatci za treći set mjerenja sa Nsim algoritmom.

Tab. 3.7 Podatci trećeg seta mjerenja

Mjerenje	$T_{\text{maks}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{min}} (^{\circ}\text{C})$	$\Delta T (^{\circ}\text{C})$	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	58.18	47.58	10.6	8.82	82.29
2.	76.24	68.89	7.35	8.02	17.9
3.	92.78	85.46	7.45	8.08	13.47
4.	109.6	102.3	7.3	8.73	11.97

Iz seta mjerenja odabrano je reprezentativno četvrto mjerenje jer se želi prikazati kako je potrebno više vremena da se IGBT zagrije za veći  $T_{maks}$ .

Iz Sl. 3.6 se može zaključiti kako je vrijeme početnog zagrijavanja puno veće nego u prethodna dva slučaja, to se događa iz razloga što je maksimalna temperatura podešena na  $109^{\circ}\text{C}$ .



**Sl. 3.6** Prikaz rezultata četvrtog mjerenja

U Tab 3.8 se vidi usporedni prikaz dobivenih podataka mjerenja u slučaju kada se IGBT zagrijava do jednake temperature (Maks.Temp) ali je promjena temperature ( $\Delta T$ ) različita. Cilj ovog prikaza jest taj da se uoče mjerne nepravilnosti i njihov iznos.

**Tab. 3.8** Prikaz parametara gdje se mijenja parametar  $\Delta T$

Br IGBT	Maks. Temp	$\Delta T$	Vrijeme
1	500	15	120
1	500	50	120
1	500	80	120

Iz Tab. 3.8 se vidi iako je parametar Maks.Temp zadan u programu Arduino isti za sva mjerenja, ali ne odgovara najpreciznije izmjerenoj maksimalnoj temperaturi  $T_{maks}$  iz Tab. 3.9 . Do odstupanja može doći iz raznih razloga poput promijene temperature laboratorija, mjerno odstupanje pojedinog NTC temperaturnog senzora, itd.

**Tab. 3.9** Prikaz dobivenih rezultata za parametre iz Tab. 3.8

Mjerenje	$T_{maks}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{min}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	75.53	74.34	1.19	3.12	4.94
2.	76.31	71.37	4.94	5.93	11.7

3.	76.24	68.89	7.35	8.02	17.9
----	-------	-------	------	------	------

Iz Tab. 3.9 se vidi kako temperatura zagrijavanja ( $t_z$ ) raste s porastom promjene temperature ( $\Delta T$ ). To znači da je vrijeme vođenja ( $t_z$ ) IGBT-a veće za veću temperaturnu razliku ( $\Delta T$ ), odnosno IGBT vodi duže da se zagrije za  $7.35^\circ\text{C}$  nego za  $1.19^\circ\text{C}$ .

Također, vrijeme hlađenja ( $t_h$ ) raste s porastom promjene temperature ( $\Delta T$ ). To znači da je vrijeme hlađenja ( $t_h$ ) IGBT-a veće za veću temperaturnu razliku ( $\Delta T$ ).

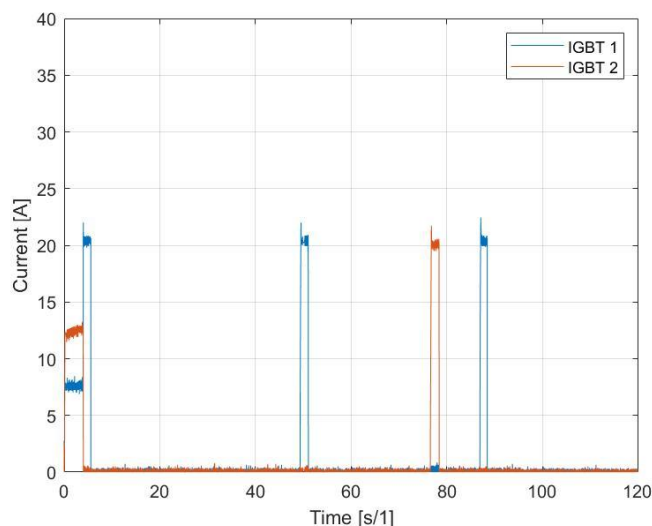
U Tab. 3.10 su dobiveni podatci za četvrti set mjerenja sa Nsim algoritmom.

U ovom slučaju se u mjerenju koriste dva IGBT tranzistora, prva četiri mjerenja se odnose za IGBT 1 dok se druga četiri mjerenja odnose na IGBT 2.

**Tab. 3.10** Podatci četvrtog seta mjerenja

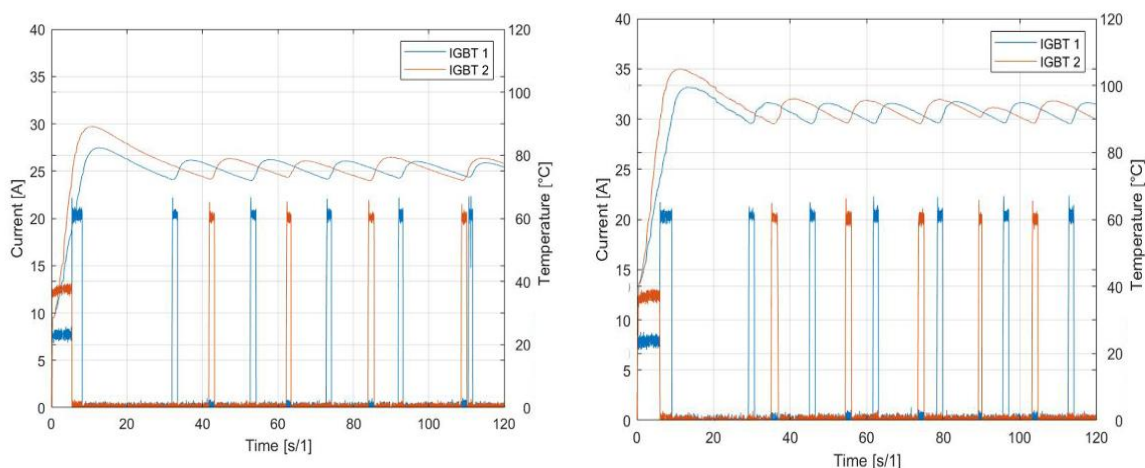
<b>IGBT 1</b>					
Mjerenje	$T_{\text{maks}} (^\circ\text{C})$	$T_{\text{min}} (^\circ\text{C})$	$\Delta T (^\circ\text{C})$	$t_z (s)$	$t_h (s)$
1.	60.6	51.8	8.8	6.6	31.3
2.	78.5	72	6.5	5.3	16.6
3.	94.8	88.7	6.1	5.3	11.4
4.	108.8	101.6	7.2	5.6	12.5
<b>IGBT 2</b>					
Mjerenje	$T_{\text{maks}} (^\circ\text{C})$	$T_{\text{min}} (^\circ\text{C})$	$\Delta T (^\circ\text{C})$	$t_z (s)$	$t_h (s)$
1.	61.6	51.9	9.7	5.14	-
2.	78.8	73.2	6.6	4.51	16.3
3.	95.7	89.4	6.3	4	11.1
4.	109.2	102.8	6.4	4.9	12.2

Iz Sl. 3.7 se može vidjeti neravnoteža u raspodjeli struje u početnom trenutku  $t=0s$ . IGBT 2 (crvena) povlači veći iznos struje i samim time brže dolazi do zadane temperature  $T_{\text{maks}}$ .



**Sl. 3.7** Prikaz ovisnosti struje o vremenu za prvo mjerenje

Iz Sl. 3.8 lijevo se vide rezultati za drugo mjerenje, a desno se vide rezultati za treće mjerenje četvrtog seta Nsim algoritma. U oba mjerenja  $\Delta T$  je jednak, odnosno iznosi  $6^{\circ}\text{C}$  i cilj je prikazati utjecaj  $T_{\text{maks}}$ . Maksimalna temperatura za drugo mjerenje sa Sl. 3.8 lijevo postavljena na  $75^{\circ}\text{C}$ , a za treće mjerenje na  $92^{\circ}\text{C}$ . Sa Sl. 3.8 se primjećuje kako je potreban veći vremenski period kako bi se IGBT ohladio za isti  $\Delta T$  i iznosi 16.3 sekundi dok hlađenje za isti  $\Delta T$  s temperature od  $92^{\circ}\text{C}$  iznosi 11.2 sekundi. Temperaturna razlika sustava koji se nalazi na  $75^{\circ}\text{C}$  je manja od onoga koji se nalazi na  $92^{\circ}\text{C}$  i iz tog razloga je potreban duži vremenski period za hlađenje.



**Sl. 3.8** Rezultati za drugo (slika lijevo) i treće mjerenje (slika desno)

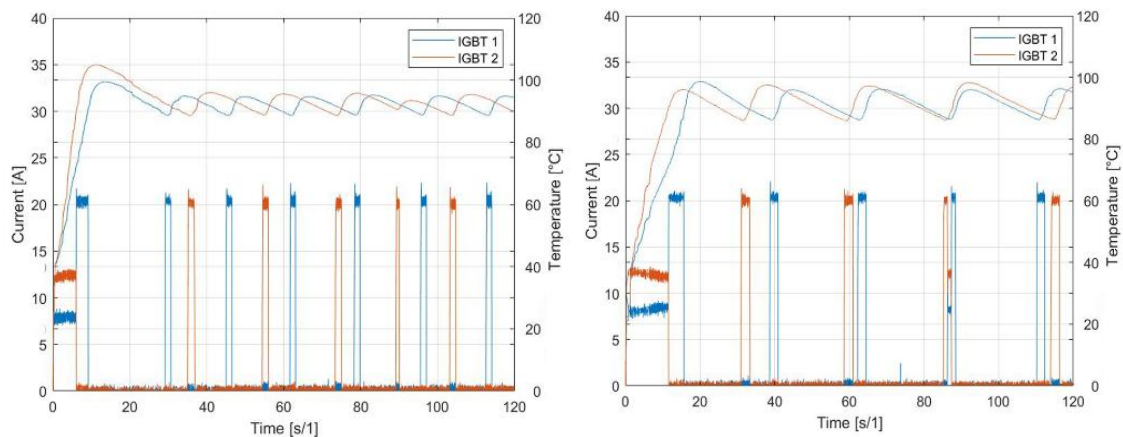
U Tab. 3.11 su dobiveni podatci za peti set mjerenja sa Nsim algoritmom.

U ovom slučaju se u mjerenju koriste dva IGBT tranzistora, prva četiri mjerenja se odnose za IGBT 1 dok se druga četiri mjerenja odnose na IGBT 2.

**Tab. 3.11** Podatci petog seta mjerenja

IGBT 1					
Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	61.1	53.1	8	4.74	33.32
2.	79.64	69.58	10.06	5.6	25.68
3.	98.63	86.22	12.41	5.23	19.54
4.	115.8	103.5	12.3	4.75	17.69
IGBT 2					
Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	62.1	53.1	9	4.56	33.35
2.	79.46	69.34	10.12	6.64	22.93
3.	97.12	86.2	10.92	5.6	21.52
4.	114.4	102.8	11.6	5.67	19.1

U nastavku se vide usporedni rezultati za treće mjerenje i cilj je prikazati utjecaj  $\Delta T$ . Sl. 3.9 lijevo prikazuje rezultate trećeg mjerenja iz četvrtog seta kada je  $\Delta T=50$ . Sl. 3.9 desno prikazuje rezultate trećeg mjerenja petog seta kada je  $\Delta T=80$ . Usporedno gledajući slike primjećuje se kako dva IGBT-a rade puno ujednačenije u slučaju kada je  $\Delta T=50$ . U radu nema preklapanja osim u početnom trenutku kada se oba zagrijavaju do maksimalne temperature.



**Sl. 3.9** Rezultati trećeg mjerenja za četvrti set (lijevo) i rezultati trećeg mjerenja za peti set (desno)

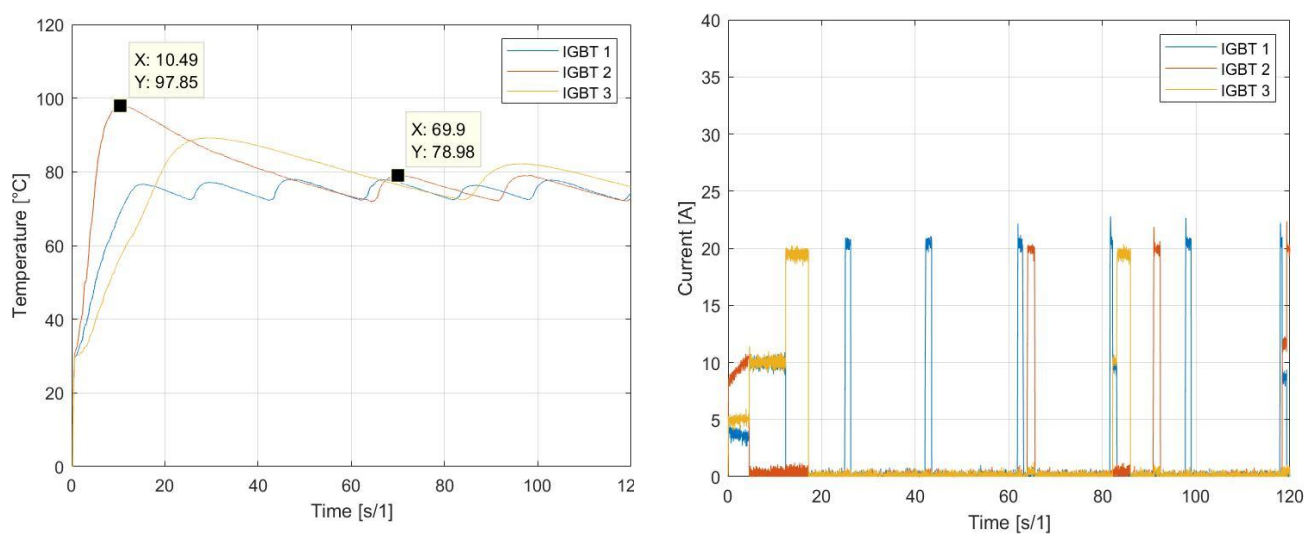
U Tab. 3.12 su dobiveni podatci za šesti set mjerenja sa Nsim algoritmom.

U ovom slučaju se u mjerenju koriste tri IGBT tranzistora, prva tri mjerenja se odnose za IGBT 1, druga tri mjerenja odnose na IGBT 2, dok se posljednja tri mjerenja odnose za IGBT 3.

**Tab. 3.12** Podatci šestog seta mjerenja

IGBT 1					
Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	59.76	52.72	7.04	4.76	24.77
2.	76.6	72.55	4.05	3.77	10.35
3.	93.1	88.93	4.17	3.7	7.97
IGBT 2					
Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	75.44	54.36	21.08	4.07	31.08
2.	78.97	72.19	6.78	4.95	21.72
3.	94.66	89.08	5.52	5.92	12.82
IGBT 3					
Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	70.29	52.97	17.32	9.7	87.03
2.	89.17	72.49	16.68	11.74	55.3
3.	105.3	89.05	16.25	11.49	42.51

Sl. 3.10 prikazuje usporedni prikaz temperature i struje za drugo mjerenje. Zaključuje se kako IGBT 2 prvi dosegne maksimalnu temperaturu iz razloga što u početnom trenutku povuče najveći iznos struje.

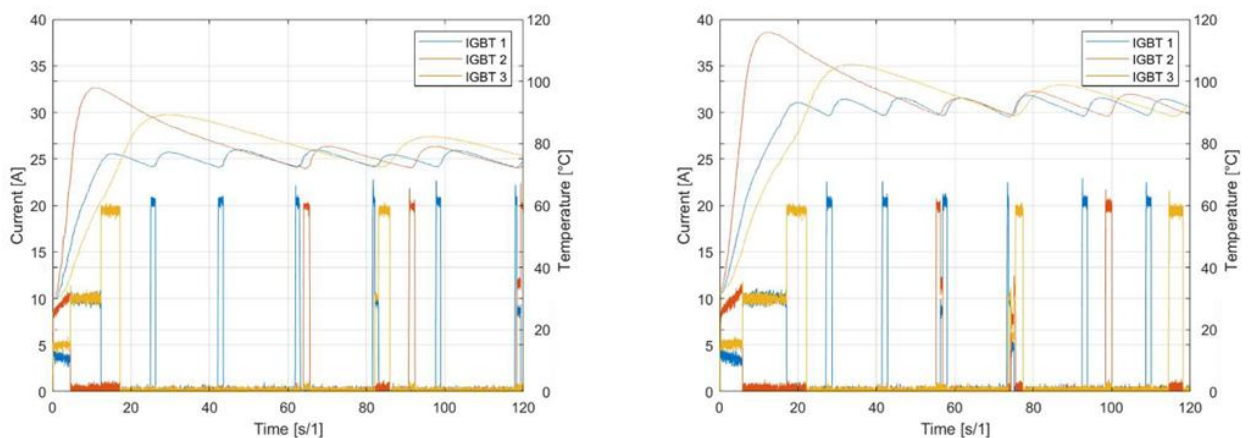


**Sl. 3.10** Usporedni prikaz ovisnosti temperature i struje o vremenu za drugo mjerenje



U ovom se slučaju na Sl. 3.10 na krivulji IGBT 2 (crvena) vidi strujno nadvišenje (engl. overshoot). Naime, do njega dolazi u slučaju kada se koristi više tranzistora spojenih u paralelni spoj. Iz grafa struje se vidi kako je IGBT 2 povukao najveću struju u trenutku kada je ona počela protjecati krugom. Iz tog razloga IGBT 2 je došao na najveću temperaturu prvi. Struja je kroz IGBT 2 prestala protjecati kada je dosegao temperaturu koja je bila zadana u programu Arduino no ona na grafu još raste iz razloga što je potrebno određeno vrijeme dok ta temperatura prijeđe iz PN spoja do NTC temperaturnog mjernog uređaja koji se nalazi na površini IGBT-a. [6]

Iz Sl. 3.11 se vidi usporedni prikaz rezultata za drugo i treće mjerenje. Iz tog usporednog prikaza se može vidjeti utjecaj maksimalne temperature koja je za drugo mjerenje iznosila 75°C, a za treće mjerenje 92°C. Iz obje slike se vidi kako IGBT 1 ima najpravilniji rad, odnosno nema strujnog i temperaturnog nadvišenja.



**Sl. 3.11** Usporedni prikaz rezultata za drugo (lijevo) i treće mjerenje (desno)

Sa Sl. 3.11 se vidi kako u oba slučaja u vremenu od 0-10s struja koja protječe kroz IGBT 2 (crvena) raste, kroz IGBT 1 (plava) opada, a IGBT 3 (žuta) je konstantna. Dolazi do disbalansa raspodjele struje što rezultira i naglim rastom temperature u tranzistoru IGBT 2.

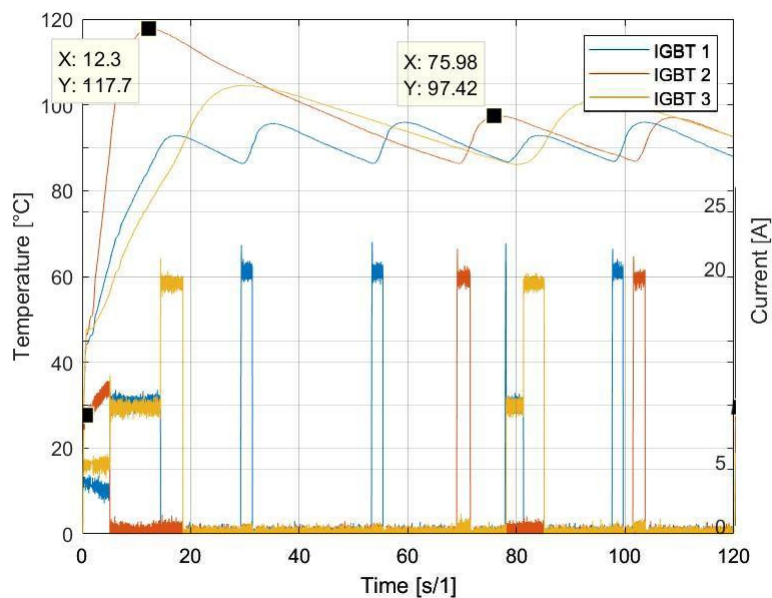
U Tab. 3.13 su dobiveni podatci za sedmi set mjerenja sa Nsim algoritmom.

U ovom slučaju se u mjerenju koriste tri IGBT tranzistora, prva tri mjerenja se odnose za IGBT 1, druga tri mjerenja odnose na IGBT 2, dok se posljednja tri mjerenja odnose za IGBT 3.

**Tab. 3.13** Podatci sedmog seta mjerenja

IGBT 1					
Mjerenje	T <sub>maks</sub> (°C)	T <sub>min</sub> (°C)	ΔT (°C)	t <sub>z</sub> (s)	t <sub>h</sub> (s)
1.	60.75	49.67	11.08	7.1	40.3
2.	76.63	73.03	3.6	3.24	10.83
3.	95.53	86.39	9.14	5.23	19.14
IGBT 2					
Mjerenje	T <sub>maks</sub> (°C)	T <sub>min</sub> (°C)	ΔT (°C)	t <sub>z</sub> (s)	t <sub>h</sub> (s)
1.	77	50.58	26.42	-	110.446
2.	97.85*, 78.86	72.17	6.69	4.06	22.95
3.	117.7*, 97.44	86.36	11.08	7.08	26.17
IGBT 3					
Mjerenje	T <sub>maks</sub> (°C)	T <sub>min</sub> (°C)	ΔT (°C)	t <sub>z</sub> (s)	t <sub>h</sub> (s)
1.	70.17	-	-	-	-
2.	89.18	72.65	9,49	12.76	54,4*
3.	104.5	86.19	18.31	14.82	50.99

U ovom sedmom setu mjerenja radi se s tri IGBT tranzistora i vidi se pojava da se određeni IGBT tranzistor ( većinom treći) ne stigne zagrijati do postavljene temperature i ponovno ohladiti za zadanu temperaturnu razliku ( $\Delta T$ ). Iz tog razloga iz grafa se ne može očitati vrijeme zagrijavanja  $t_z$  i vrijeme hlađenja  $t_h$ . Također se primjećuje i ranije opisana pojava „Overshootinga“, pošto je ta pojava specifična samo za prvo zagrijavanje, uz te vrijednosti temperature i vremena nalazi se \*(zvjezdica).



**Sl. 3.12** Grafički prikaz rezultata za treće mjerenje

U ovom se usporednom prikazu iz Sl. 3.12 vidi kako se pojedini tranzistor zagrijava dok kroz njega prolazi struja određene vrijednosti. Početna struja nije iste vrijednosti za

svaki tranzistor i zbog tog razloga IGBT 2(crvena) i IGBT 3(žuta) dođu prije do maksimalne temperature, u većini slučajeva tranzistori koji imaju veću struju u početku mjerenja probiju zadanu temperaturu pa im treba duži vremenski period kako bi se vratili na temperaturu  $T_{\min}$  i ponovno započeli ciklus zagrijavanja.

Nakon odrađenih mjerenja za Nsim algoritam dolazi se do glavnih zaključaka. Promatrat će se dvije temperature  $T_{\max 1}=106^{\circ}\text{C}$  i  $T_{\max 2}=55^{\circ}\text{C}$ . Zaključuje se kako je za zagrijavanje do temperature  $T_{\max 1}$  potrebno više vremena nego zagrijavanje do temperature  $T_{\max 2}$ . Ako se za  $T_{\max 1}$  i  $T_{\max 2}$  promatra jednaka temperaturna razlika ( $\Delta T$ ) dolazi se do zaključka da se IGBT brže ohladi pri većim maksimalnim temperaturama. Pri većim maksimalnim temperaturama dolazi do kraćeg strujnog nadvišenja (2s), dok pri manjim maksimalnim temperaturama kao  $T_{\max 2}$  to nadvišenje iznosi 4s.

Promatrajući  $T_{\max 2}=55^{\circ}\text{C}$  i povećanje struje s 10A na 20A ima sljedeće utjecaje na dobivene podatke:

- Zagrijavanje do maksimalne temperature se odvija puno brže 1,9s umjesto prethodnih 6,6s
- Hlađenje traje puno duže 19,6 umjesto 15,4s
- Disbalans struje (engl. overshooting) je puno izraženiji pri struji od 20A i iznosi 3,7s, a za struju od 10A je iznosio 2,2s

## NNr algoritam

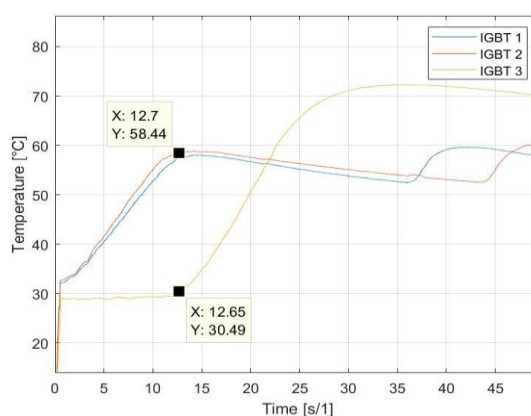
Tab 3.14 prikazuje dobivene podatke za prvi set mjerenja kada se koriste dva osnovna i jedan rezervni IGBT.

**Tab. 3.14** Podatci prvog seta mjerenja

<b>Osnovni tranzistor IGBT 1</b>					
Mjerenje	$T_{\max}$ (°C)	$T_{\min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	59.59	52.55	7.04	5.1	22.20
2.	76.36	73.38	2.98	3.55	7.49
3.	94.18	89.09	5.09	4.06	11.41
<b>Osnovni tranzistor IGBT 2</b>					
Mjerenje	$T_{\max}$ (°C)	$T_{\min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	59.21	52.03	7.18	5.2	23.25
2.	76.58	72.46	4.12	5.32	12.22

3.	93.72	89.15	4.57	4.57	11.41
Rezervni tranzistor IGBT 3					
Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	71.9	30.49	41.41	20.53	-
2.	85.05	69.95	15.01	12.9	57.85
3.	105	84.71	20.29	10.02	56.59

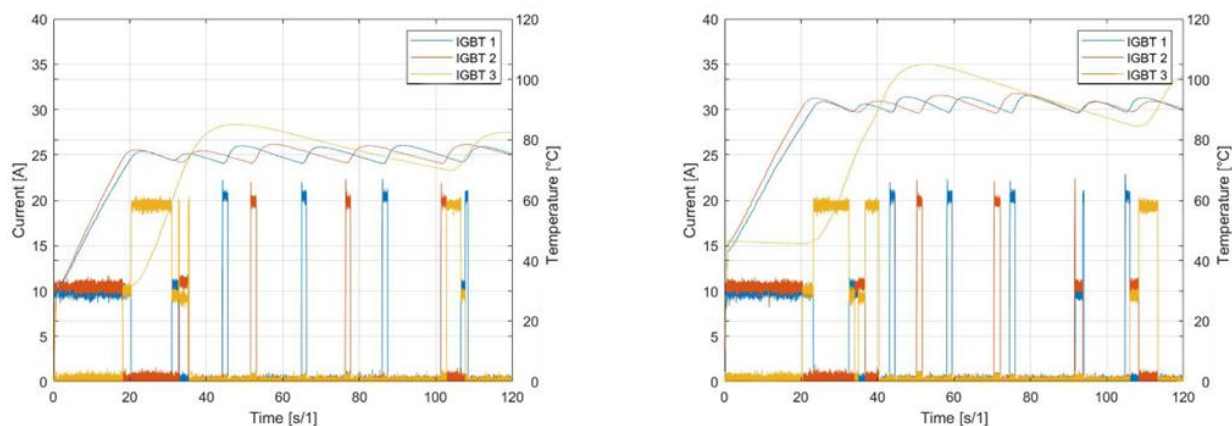
Iz seta mjerenja odabrano je reprezentativno prvo i drugo mjerenje jer se želi prikazati koje je vrijeme potrebno za postizanje maksimalne temperature i koliko ono ovisi o iznosu temperature.



Sl. 3.13 Uvećani prikaz uključenja IGBT 3

Iz Sl. 3.13 se vidi kako u trenutku  $t=12,7s$  IGBT 1 i IGBT 2 dosegnu maksimalnu zadanu temperaturu i u točno tom trenutku pali se rezervni IGBT 3(žuta).

Iz Sl. 3.14 se vidi usporedni prikaz rezultata za prvo i drugo mjerenje prvog seta NNr algoritma. Također se i vidi utjecaj maksimalne temperature. Promatrajući grafove se može zaključiti kako maketa radi u boljoj ravnoteži kada je  $\Delta T$  manji, odnosno vidi se kako je puno pravilniji rad IGBT-ova u lijevom grafu kada je  $\Delta T=50$ , a maksimalna temperatura je manja nego u drugom mjerenju.



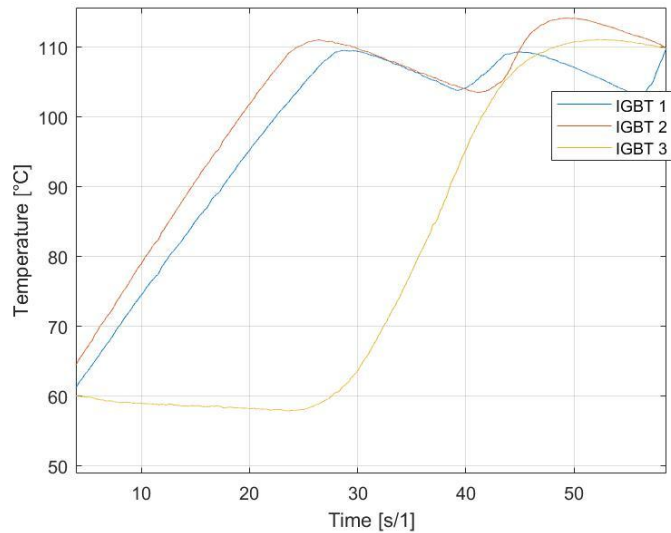
Sl. 3.14 Usporedni prikaz rezultata za prvo (lijevo) i drugo mjerenje (desno)

Tab 3.15 prikazuje dobivene podatke za prvi set mjerenja kada se koriste dva osnovna i jedan rezervni IGBT.

Tab. 3.15 Podatci drugog seta mjerenja

Osnovni tranzistor IGBT 1					
Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	79.43	70.23	9.2	5.69	30.54
2.	92.54	86.73	5.81	3.86	12.58
3.	113.2	103.8	9.4	4.12	19.59
Osnovni tranzistor IGBT 2					
Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	80.71	69.53	11.18	7.12	41.23
2.	96.11	86.35	9.76	6.43	22.06
3.	114.2	103.7	10.5	6.31	20.16
Rezervni tranzistor IGBT 3					
Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	89.72	59.91	29.81	16.15	-
2.	98.92	82.2	16.72	11.10	55
3.	119.5	101.3	19.2	14.82	34.24

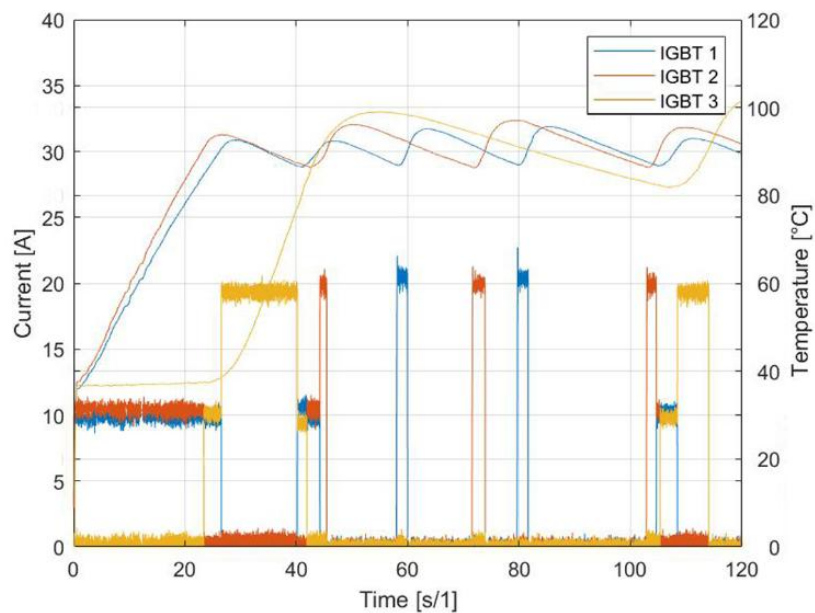
Iz seta mjerenja odabrano je reprezentativno drugo mjerenje jer se želi prikazati koje je vrijeme potrebno za postizanje maksimalne temperature i na grafu uvećani proces uključivanja rezervnog IGBT-a.



**Sl. 3.15** Uvećani prikaz temperaturne karakteristike

Iz Sl. 3.15 se vidi uvećani prikaz uključenja IGBT 3 u trenutku kada se IGBT 1 i IGBT 2 zagriju do zadane maksimalne temperature.

Iz Sl. 3.16 se vidi prikaz strujno temperaturne karakteristike za drugo mjerenje. IGBT 3 (žuta) je rezervni IGBT koji se uključuje nakon što IGBT 1(plava) i IGBT 2 (crvena) dosegnu maksimalnu zadanu temperaturu( $T_{maks}$ ).



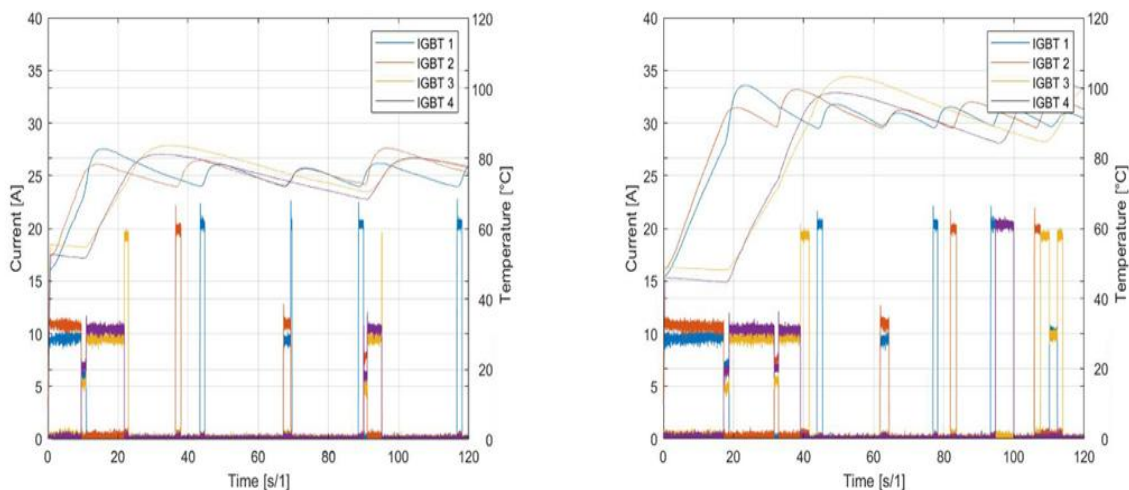
**Sl. 3.16** Prikaz ovisnosti struje i temperature o vremenu za drugo mjerenje

Tab 3.16 prikazuje dobivene podatke za prvi set mjerenja kada se koriste dva osnovna i dva rezervna IGBT-a.

**Tab. 3.16** Podatci trećeg seta mjerenja

<b>Osnovni tranzistor IGBT 1</b>					
Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	62.95	52.16	10.79	5.25	54.63
2.	78.39	71.96	6.43	7.15	18.65
3.	94.58	88.61	5.97	5.13	12.85
<b>Osnovni tranzistor IGBT 2</b>					
Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	59.33	52.64	6.69	6.41	50.21
2.	79.74	72	7.74	7.56	21.53
3.	96.47	88.79	7.68	5.21	13.46
<b>Rezervni tranzistor IGBT 3</b>					
Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	62.3	50.32	11.98	14.52	100.24
2.	80.05	70.54	9.51	14.15	58.53
3.	103.2	84.59	18.61	11.9	56
<b>Rezervni tranzistor IGBT 4</b>					
Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	62.4	50.32	12.08	14.43	100.56
2.	81.09	68.45	12.64	13.54	60.65
3.	98.56	84.24	14.32	13.24	48.65

Iz Sl. 3.17 se vidi usporedni prikaz za drugo i treće mjerenje trećeg seta mjerenja u NNr algoritmu. Lijeva slika prikazuje rezultate drugog mjerenja kada je  $T_{maks}=500$  i vidi se kako je sustav do dvadesete sekunde radio po principu da se IGBT 1 i 2 zagriju do  $T_{maks}$  a nakon toga se uključuju IGBT 3 i 4. Nakon toga se ne primjećuje nikakav uzorak u ponašanju IGBT-a. Na sl 3.17 desno se prikazuju rezultati trećeg mjerenja kada je  $T_{maks}=700$ .



Sl. 3.17 Usporedni prikaz ovisnosti temperature i struje o vremenu za drugo (lijevo) i treće (desno) mjerenje

Tab 3.17 prikazuje dobivene podatke za prvi set mjerenja kada se koriste dva osnovna i dva rezervna IGBT-a.

Tab. 3.17 Podatci četvrtog seta mjerenja

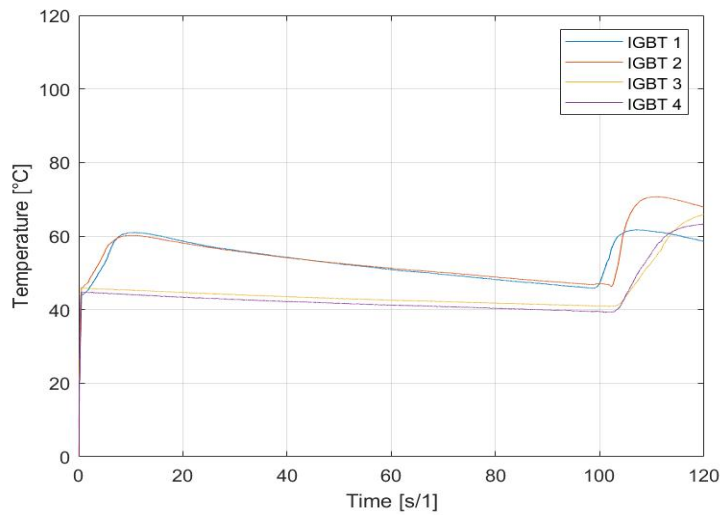
Osnovni tranzistor IGBT 1					
Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	60.92	47.09	13.83	14.63	89.56
2.	82.63	68.42	14.21	7.3	39.15
3.	97	85.33	11.67	5.25	23.56
Osnovni tranzistor IGBT 2					
Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	60.92	46.55	14.37	13.65	91.25
2.	81.73	68.56	13.17	9.52	45.13
3.	101.9	84.87	17.03	8.14	40.27
Rezervni tranzistor IGBT 3					
Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	-	-	-	-	-
2.	83.37	-	-	27.21	-
3.	106.6	-	-	-	-
Rezervni tranzistor IGBT 4					
Mjerenje	$T_{maks}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$t_z$ (s)	$t_h$ (s)
1.	-	-	-	-	-
2.	81	66.42	14.58	14.2	65.38
3.	105.4	-	-	-	-

Iz seta mjerenja odabrano je reprezentativno prvo i treće mjerenje jer se želi prikazati utjecaj vremena koliko traje mjerenje.

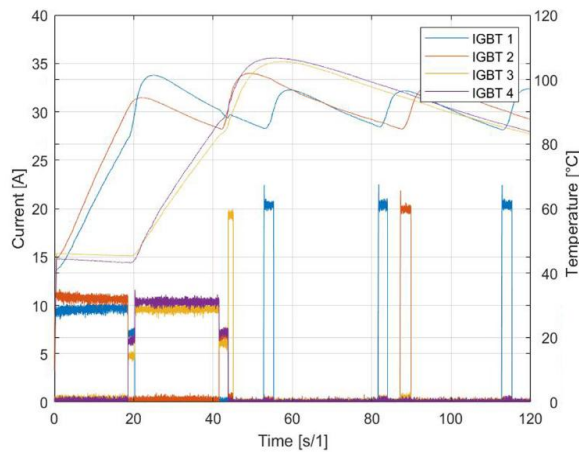
U ovom specifičnom slučaju sa Sl. 3.18 iz prvog mjerenja se vidi kako vrijeme od 120 sekundi nije dovoljno za kompletan proces zagrijavanja i hlađenja. Iz tog razloga podatci za rezervne tranzistore nisu očitani. Sl. 3.18 prikazuje temperaturnu karakteristiku za prvo mjerenje.



Još jedan od razloga zašto tranzistori ne obave kompletan proces jest taj što je vrijednost promjene temperature postavljena na 100, odnosno treba im veliki vremenski interval da se ohlade za taj iznos. Iz Sl. 3.19 se vidi kompletan prikaz rezultata za treće mjerenje. Može se zaključiti da kao i u prvom mjerenju, vrijeme od 120 sekundi nije dovoljno da se IGBT ohladi nakon što se uključio kao rezervni tranzistor u 20. sekundi.



**Sl. 3.18** Prikaz ovisnosti struje i temperature o vremenu za prvo mjerenje



**Sl. 3.19** Rezultati za treće mjerenje

## 4. Zaključak

Svrha ovih mjerenja bila je usporediti rad IGBT-a pri različitim temperaturama i temperaturnim razlikama, kao i rad jednog IGBT-a, više IGBT-ova paralelno i kombinirani rad s rezervnim IGBT.

Iz dobivenih podataka vidi se da vrijeme hlađenja i zagrijavanja ovisi o vrijednosti temperaturne razlike, odnosno o razlici maksimalne i minimalne temperature te raste proporcionalno s njima. Što je veća temperaturna razlika to će biti veće vrijeme hlađenja i zagrijavanja. Ako se promatra jednaka vrijednost temperaturne razlike, zaključuje se kako će se tranzistori brže ohladiti na višoj temperaturi nego pri manjim temperaturama, neovisno o algoritmu rada i broju tranzistora, to je povezano s izmjenom temperature toplinskog sustava i okoline.

Nsim algoritam karakterizira rad IGBT-ova istovremeno što u pojedinim slučajevima može predstavljati prepreku ako je potreban kontinuirani rad tranzistora kroz određeni vremenski period.

NNr algoritam predstavlja rješenje u području kontinuiranog rada kroz određeni vremenski period, ali ima ograničenje u broju korištenih tranzistora u određenom trenutku jer uvijek moraju postojati rezervni tranzistori koji će se aktivirati kada osnovni dosegnu svoju maksimalnu temperaturu.

Na temelju rezultata zaključuje se da je optimalan rad sa NNr algoritmom kada se koriste dva osnovna i jedan rezervni tranzistor. Pri tom režimu rada iz grafa vidi se kako u svakom trenutku radi barem jedan tranzistor i ne postoje velike oscilacije u obliku temperature.

Utjecaj temperature se također mijenja ugradnjom hladnjaka koji se ugradi na površinu tranzistora. Pretpostavka je da hladnjak uvelike doprinosi bržem hlađenju i odvođenju topline iz same komponente te olakšava kontrolu rada tranzistora. U budućnosti se

preporučuje da se ista mjerenja izvrše s hladnjakom na tranzistoru što bi dovelo do realne usporedbe njegovog utjecaja s mjerenjima koja su izvršena bez te komponente. U spojevima koji se koriste u svakodnevnoj upotrebi, hladnjaci su neizostavna komponenta spoja.

## Literatura

- [1] FujiElectric-[https://www.fujielectric-europe.com/de/leistungshalbleiter/automotive\\_products/igbt\\_modules](https://www.fujielectric-europe.com/de/leistungshalbleiter/automotive_products/igbt_modules) (datum pristupa 4.8.2019)
- [2] Završni rad, Mjerenja karakteristika poluvodičkih sklopnih komponenata, Nikola Kristić, Osijek 2018. (datum pristupa 4.8.2019)
- [3] [http://www.elektronika.co.rs/index.php?route=journal2/blog/post&journal\\_blog\\_post\\_id=15](http://www.elektronika.co.rs/index.php?route=journal2/blog/post&journal_blog_post_id=15)
- [4] <http://www.datasheetcafe.com/g80n60-datasheet-pdf-igbt/>
- [5] Arduino <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoDue> (datum pristupa 6.8.2019)
- [6] Closed-Loop Gate Drive for High Power IGBTs, Fang Z. Peng, Lihua Chen, Washington, DC, USA, 2009 (datum pristupa 7.9.2019)

## **Sažetak**

U ovom završnom radu prikazani su rezultati dobiveni mjerenjem na razvojnoj pločici za paralelno balansiranje IGBT-a, te teorijska i praktična analiza IGBT komponente koja se koristila u mjerenju. Opisano je radno mjesto kao i oprema koja se koristila u mjerenju. Mjerenja su rađena pomoću dva algoritma, a to su Nsim i NNr. Snimljene su strujne i temperaturne karakteristike za svaki set mjerenja iz kojih se pomoću obrade podataka računa vrijeme zagrijavanja i hlađenja pojedine IGBT komponente.

Ključne riječi: IGBT, paralelni rad, strujno nadvišenje, temperatura, vrijeme zagrijavanja, vrijeme hlađenja, algoritam rada

## **Abstract**

This final paper represents all the data obtained from measurement on a developmental plate for parallel balancing of IGBTs, as well as theoretical and practical analysis of the IGBT component used in the measurement. The workplace and the equipment used in the measurement are described. Measurements were made using two algorithms, named Nsim and NNr. The current and temperature characteristics for each set of measurements are taken from which the heating and cooling time of each IGBT component is calculated by means of data processing.

Keywords: IGBT, parallel operation, current overshooting, temperature, warm-up time, cooling time, operation algorithm

## **Životopis**

Branimir Lovrić rođen je u Osijeku 31. svibnja 1997. godine. Živi u Đakovu, gdje je pohađao osnovnu školu. Nakon osnovne škole upisuje Gimnaziju Antuna Gustava Matoša (prirodoslovno-matematički smjer).

Nakon srednjoškolskog obrazovanja, upisuje nekadašnji Elektrotehnički fakultet u Osijeku, sada Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku na Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera. Na drugoj godini preddiplomskog smjera elektrotehnike opredjeljuje se za smjer elektroenergetika.