



Naziv  
dokumenta:

**Protokol o ispitivanju pogonskog  
sklopa IGBT modula**

Autori:

Mr. Ante Krietić  
Prof. dr. sc. Božo Terzić

Rev.

0.0

Datum:

Listopad, 2019.

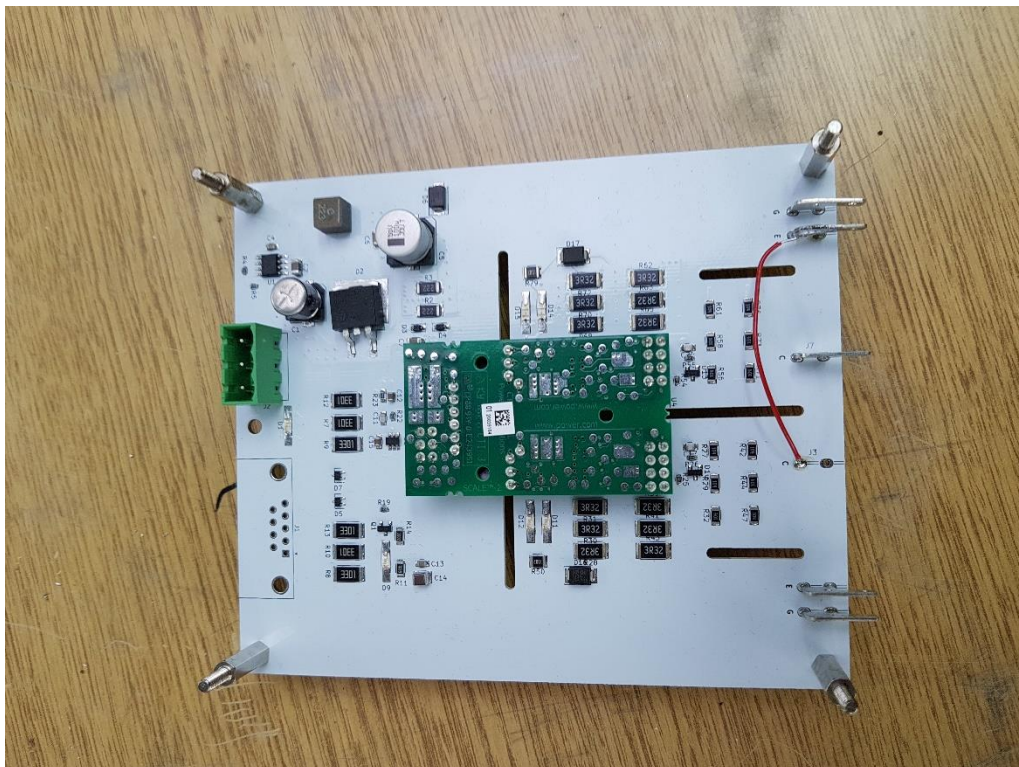
## **Sadržaj:**

1. Uvod
2. Pogonski sklop (driver) 2SC0115T2A0-12
3. Aktivne prenaponske zaštite
4. Zaštita od kratkog spoja
5. Prenaponska zaštita pomoću kondenzatora
6. Utjecaj temperature IGBT modula i vanjskog induktiviteta na prenapone
7. Utjecaj otpora u krugu geita na prenapon tijekom isključenja IGBT-a

## 1. Uvod

Tijekom postupka projektiranja šesterokanalnog pogonskog sklopa (engl. „driver“) za trofazni IGBT izmjenjivač snage 100 kVA izradio se prototip dvokanalnog pogonskog sklopa na kojem su izvršena odgovarajuća testiranja radi optimiranja i provjere osnovnih funkcija kao što su: uklapanje i isklapanje IGBT-a, djelovanje zaštite od kratkog spoja, djelovanje aktivne prenaponske zaštite, utjecaj otpora geita i temperature IGBT modula na neke od zaštitnih funkcija.

Pogonski sklop temelji se na dvokanalnom visokointegriranom modulu tipa 2SC0115T2A0-12, proizvođač SCALE. Sklop se testira na trofaznom izmjenjivaču koji je realiziran pomoću tri IGBT modula tipa SKM400GB12T4.



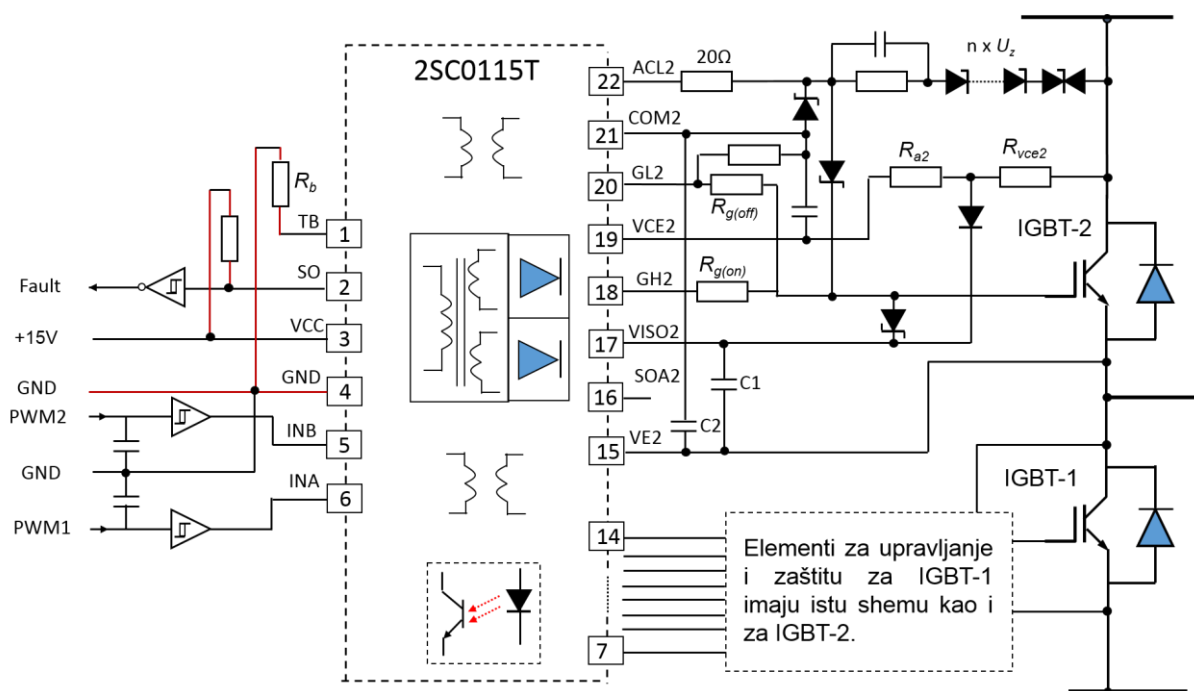
Slika 1. Prototip dvokanalnog pogonskog sklopa

## 2. Pogonski sklop (driver) 2SC0115T2A0-12

Osnovne značajke dvokanalnog driver-a 2SC0115T2A0-12:

- Visokointegrirana tehnologija za pouzdano i optimalno upravljanje IGBT modulima
- „Plug and play” princip podrazumijeva minimum potrebnog znanja za projektiranje upravljačkih sklopova s ovim driver-om
- Driver se primjenjuje za IGBT module do napona 1200 V
- Maksimalna frekvencija sklapanja - 50 kHz
- Osnovne funkcije:
  - uključenje/isključenje IGBT-a unutar modula s dva tranzistora
  - upravljački krug svakog IGBT-a ima izolirano DC/DC napajanje
  - zaštita od kratkog spoja IGBT-a
  - aktivna prenaponska zaštita IGBT-a
  - podnaponska zaštita upravljačkih krugova

Blokovska shema drivera je prikazana na slici 2.



SI.2 Blokovska shema drivera 2SC0115T2A012-T

Ulazne stezaljke i funkcije na primarnoj strani:

- **VCC** – Naponi istosmjernog napajanja elektronike na primarnoj strani trebaju biti 15 V=
- **INA, INB** – upravljački PWM digitalni ulazi mogu biti u širokom naponskom području od 3.3 do 15 V, premda se preporučuje veća razina upravljačkog napona (15 V)
- **SO** - Ovo je digitalni izlaz u spoju „open collector”, a služi za detekciju greške („fault”) koja može biti: podnapon napona napajanja primarnog kruga, podnapon napona napajanja sekundarnog kruga, kratki spoj ili preopterećenje IGBT-a. U stanju bez greške izlaz ima stanje logičke „1”, a u trenutku nastanka greške prelazi u logičko stanje „0”.
- **TB** – Vrijeme blokiranja upravljačkih impulsa na geit IGBT-a nakon pojave greške. Ovo vrijeme se određuje postavljanjem odgovarajućeg otpora na između stezaljki TB i GND.

Izlazne stezaljke i funkcije na sekundarnoj strani:

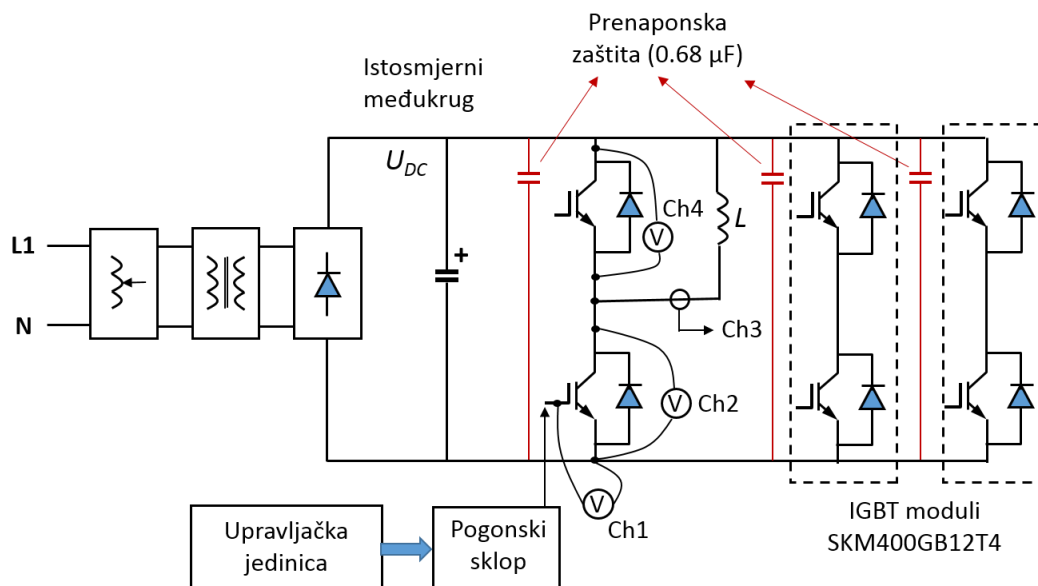
- **GL2, GH2** – izlazi preko kojih dolaze upravljački signali na geit-ove IGBT-a. Signal za uključenje IGBT-a dolazi preko izlaza GH2 i ima vrijednost +15V, dok signal s kojim se IGBT isključuje dolazi preko izlaza GL2 i ima negativnu vrijednost -8V. U seriju s ovim upravljačkim izlazima se postavljaju otpori  $R_{g(on)}$  i  $R_{g(off)}$  koji omogućuju različite brzine uključjenja i isključenja IGBT-a.
- **VISO2, VE2, COM2** – Izlaz VE2 spaja se direktno na emiter IGBT-a i predstavlja neutralnu (srednju) točku napajanja, dok VISO2 je pozitivni napon napajanja a COM2 je negativni napon napajanja. Između stezaljki VE2 i VISO2, te VE2 i COM2 postavljaju se keramički kondenzatori koji imaju vrijednost ovisno o potrebnom naboju geita za upravljanje IGBT-a.
- **VCE2** – Ova stezaljka je preko otpora spojena na kolektor IGBT-a, a služi se mjerenje napona collector-emiter radi kratkospojne ili prekostrujne zaštite. Otpornik  $R_{vce2}$  treba biti tako odabran da pri maksimalnom naponu (npr. 1200 V) ne teče struja veća od 1 mA. Može se koristiti jedan visokonaponski otpor ili serijski spoj otpora, ali se mora voditi računa o snazi otpora.
- **ACL2** – Preko ove stezaljke realizira se tzv. napredna aktivna prenaponska zaštita IGBT-a. Kada kod isključenja tranzistora napon kolektor-emiter prijeđe unaprijed određenu vrijednost koja je definirana serijskim spojem zener dioda ( $n \times U_z$ ), tada zener diode provedu i preko geita povećavaju napon geit-emiter i omogućuju djelomično ponovno uključjenje IGBT-a koji tada radi u aktivnom području. Na taj se način smanjuju prenaponi na IGBT-u. Taj proces predstavlja osnovnu aktivnu prenaponsku zaštitu kod koje se ne djeluje na upravljački signal na stezaljki GL2 koji u procesu isključenja ima negativnu vrijednost. U tom slučaju se povećava struja i gubici na otporu  $R_{g(off)}$ . Da bi se to spriječilo ovaj driver ima naprednu aktivnu prenaponsku zaštitu koja za vrijeme prorade zaštite preko otpora od 20  $\Omega$  i stezaljke ACL2 djeluje tako da blokira izlaz za gašenje tranzistora GL2, pa kroz njega ne može teći struja i na taj način se eliminiraju gubici na otporu  $R_{g(off)}$ .

### 3. Aktivne prenaponske zaštite

Shema prema kojoj su izvedena sva mjerenja u ovom izvještaju je prikazana na slici 3, a na slici 4 prikazana je ilustracija principa rada aktivne prenaponske zaštite. Tijekom pokusa na četverokanalnom digitalnom osciloskopu snimljeni su slijedeće veličine:

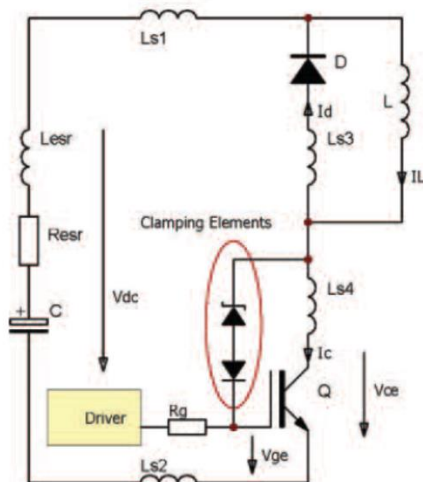
- Ch1 – Napon geit-emiter upravljanog IGBT-a
- Ch2 – Napon kolektor – emiter upravljanog IGBT-a
- Ch3 – Struja tereta kroz prigušnicu
- Ch4 – Napon na neupravljanom IGBT-u

Upravljačka jedinica preko pogonskog sklopa generira samo jedan upravljački impuls ograničenog trajanja (nekoliko mikrosekundi). Uključenjem donjeg IGBT-a struja proteče kroz prigušnicu i počinje rasti. Duljina trajanja upravljačkog impulsa ograničava maksimalni iznos struje kroz prigušnicu.

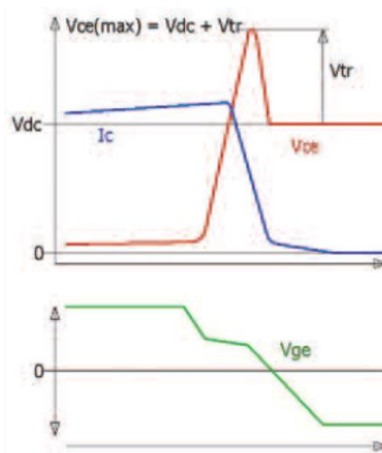


Slika 3. Shema testiranja aktivne prenaponske zaštite

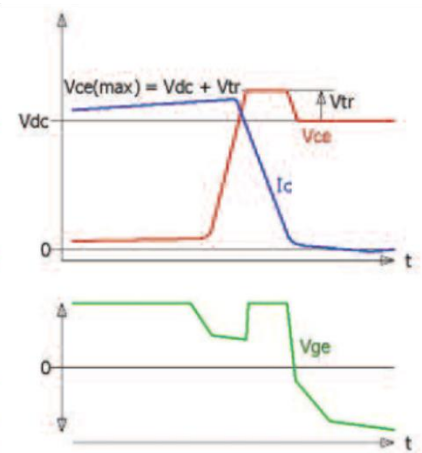
Nadomjesna shema pri isključivanju IGBT-a



Ilustracija napona i struja IGBT-a tijekom isključivanja bez krugova za aktivnu zaštitu („Clamping Elements“)



Ilustracija napona i struja IGBT-a tijekom isključivanja s aktivnom prenaponskom zaštitom



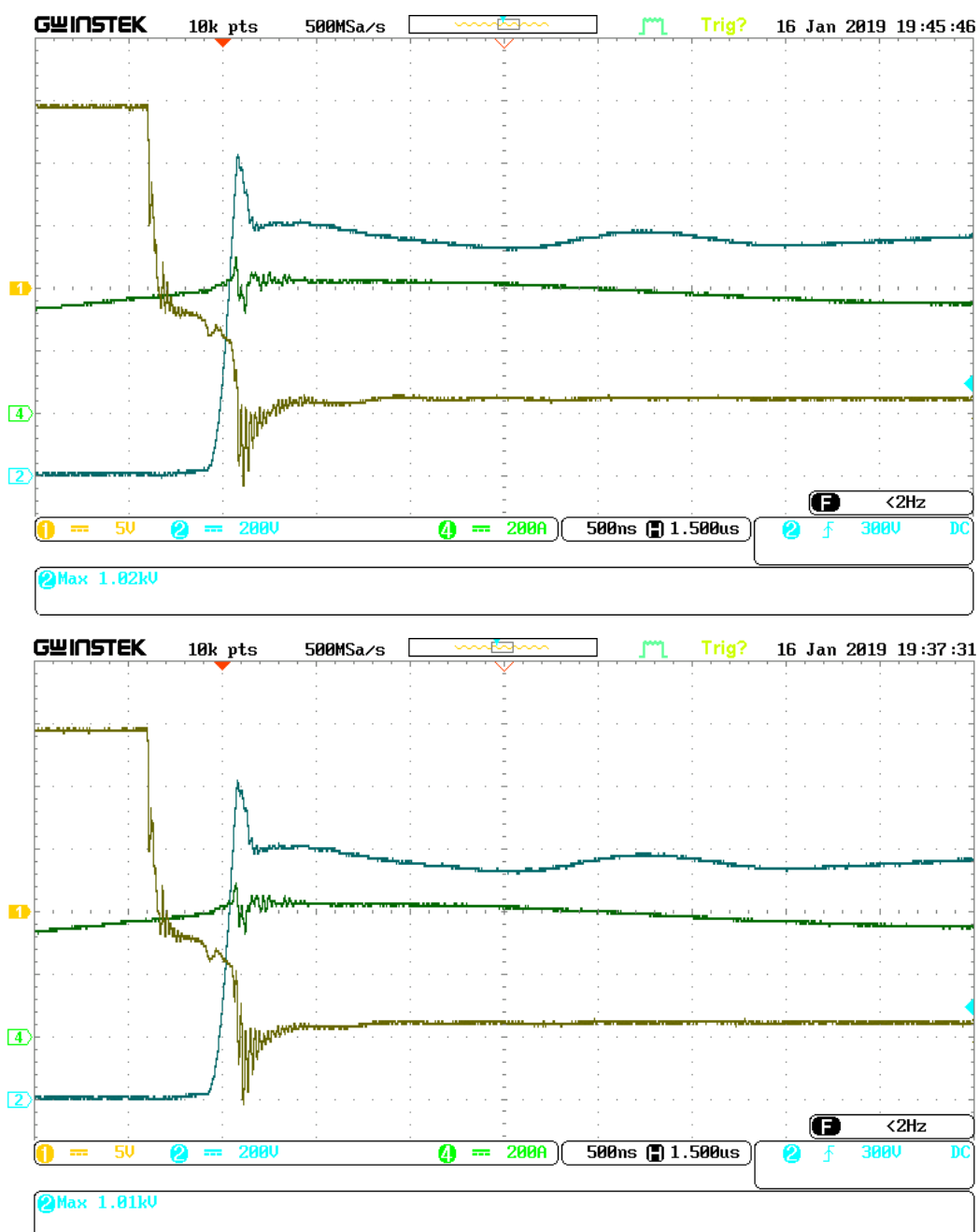
Slika 4. Ilustracija principa rada aktivne prenaponske zaštite

Mjerenja za testiranje aktivne prenaponske zaštite su izvršena sa sljedećim parametrima:

- Induktivitet  $L=11\mu\text{H}$
- napon DC-linka  $U_{DC}=740\text{V}$
- temperatura hladnjaka  $T_H=60^\circ\text{C}$

Provedena su dva seta mjerenja: s i bez aktivirane prenaponske zaštite na driverskoj pločici. U oba slučaja mjerenje je obavljeno uz različita trajanja vremena vođenja IGBT-a (od 4 do  $12\mu\text{s}$ ), čime se mijenja vrijednost struje kod isključenja IGBT-a. Hladnjak je zagrijan na temperaturu od  $60^\circ\text{C}$  budući nazivni maksimalni blokirni napon IGBT-a vrijedi kod temperature od  $20^\circ\text{C}$ , a povećaje se povećanjem temperature. Na taj smo način povećali maksimalno dopušteni blokirni napon tranzistora kod kojeg bi tranzistor mogao eksplodirati.

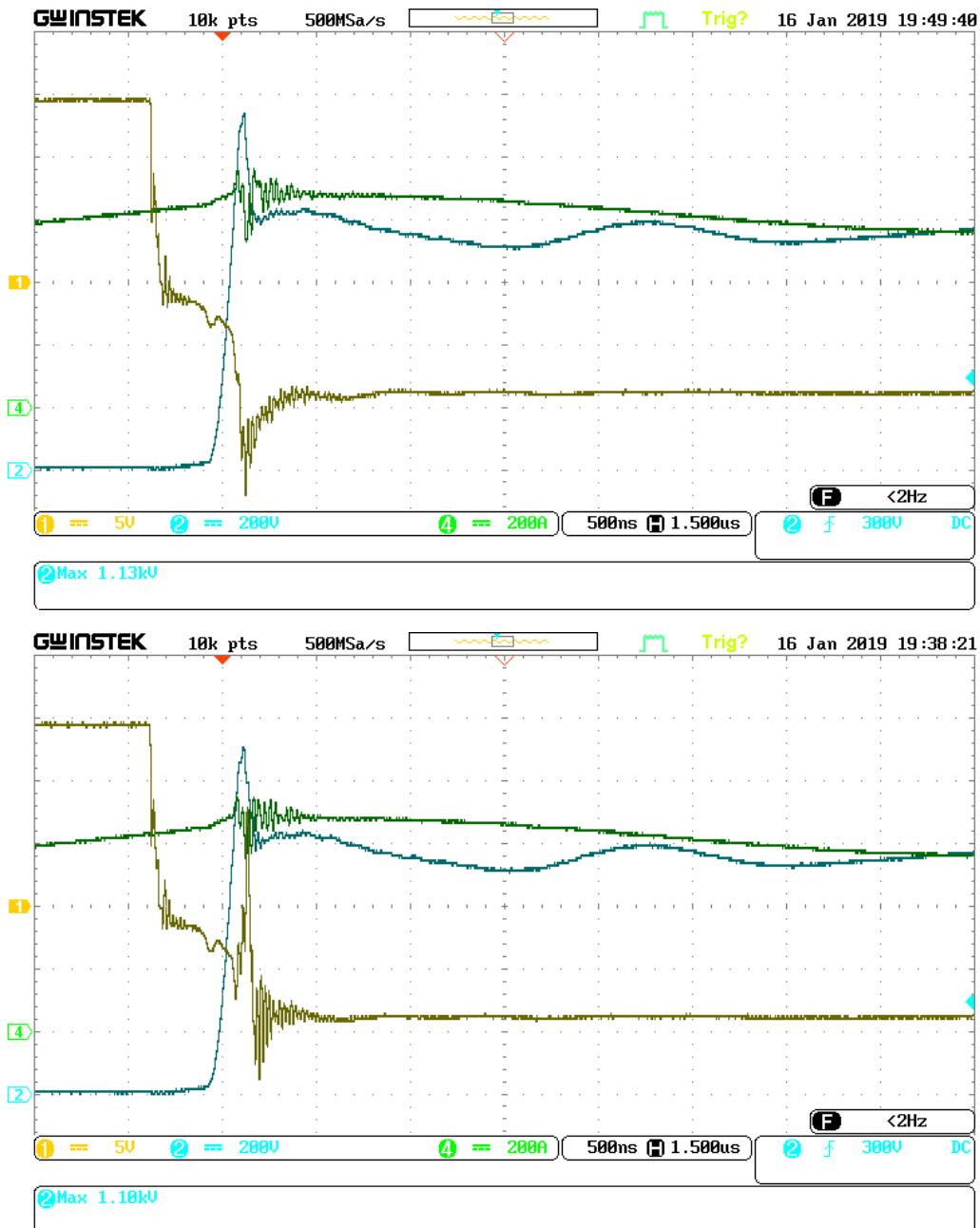
Kod svih mjerenja postavljene su blok kondenzatori za zaštitu od prenapona, kapaciteta  $0.68\mu\text{F}$ , tip ..., i to tako da su postavljena 3 kondenzatora na tri IGBT modula budući su na hladnjak bila montirana sva tri modula od trofaznog izmjenjivača.



Sl. 5. Napon geita (oker-5v/d.s.) i napon kolektor-emiter (plava-200V/d.s.) IGBT-a, te struja kroz induktivitet (zelena-200 A/d.s.) tijekom isklapanja IGBT-a kod struje od oko **400 A**, bez uključene (gornja slika) i s uključenom (donja slika) aktivnom prenaponskom zaštitom.

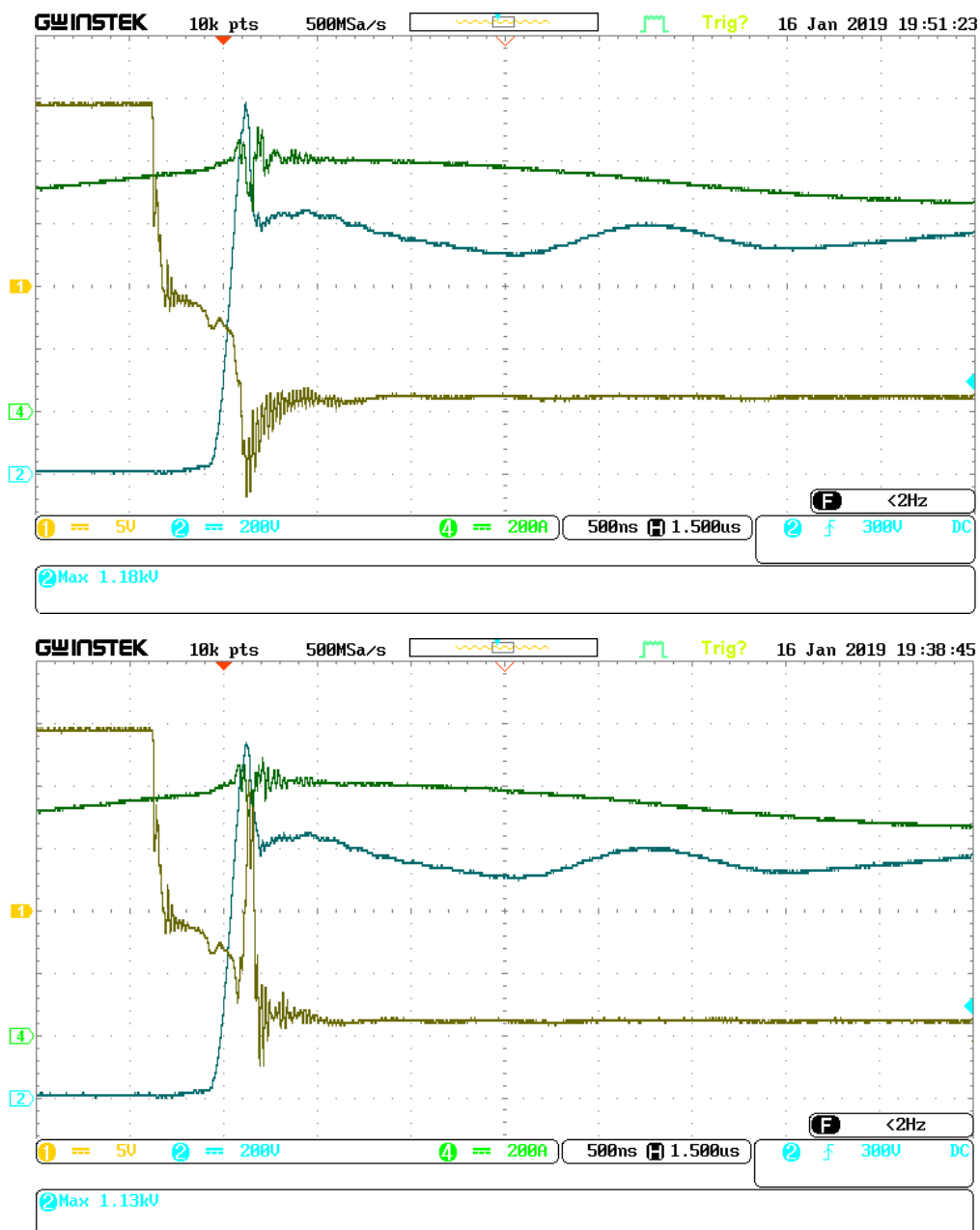
**Komentar:** U oba slučaja nije aktivirana aktivna prenaponska zaštita jer napon kolektor-emiter kod kojeg se aktivira ova zaštita nije bio dovoljno visok.





Sl. 6. Napon geita (oker-5v/d.s.) i napon kolektor-emiter (plava-200V/d.s.) IGBT-a, te struja kroz induktivitet (zelena-200 A/d.s.) tijekom isklapanja IGBT-a kod struje od oko **620 A**, bez uključene (gornja slika) i s uključenom (donja slika) aktivnom prenaponskom zaštitom.

**Komentar:** U slučaju kada nije aktivirana aktivna prenaponska zaštita (gornja slika) maksimalni napon je 1130 V, a na donjoj slici je zaštita aktivirana pa je maksimalni napon 1100 V. Aktivacija zaštite je vidljiva kroz porast napona geita u trenutku maksimalnog napona emiter-kolektor.



Sl. 7 .Napon geita (oker-5v/d.s.) i napon kolektor-emiter (plava-200V/d.s.) IGBT-a, te struja kroz induktivitet (zelena-200 A/d.s.) tijekom isklapanja IGBT-a kod struje od oko **780 A**, bez uključene (gornja slika) i s uključenom (donja slika) aktivnom prenaponskom zaštitom.

**Komentar:** U slučaju kada nije aktivirana aktivna prenaponska zaštita (gornja slika) maksimalni napon je 1180 V, a na donjoj slici je zaštita aktivirana pa je maksimalni napon 1130 V. Aktivacija zaštite je vidljiva kroz porast napona geita u trenutku maksimalnog napona emiter-kolektor.

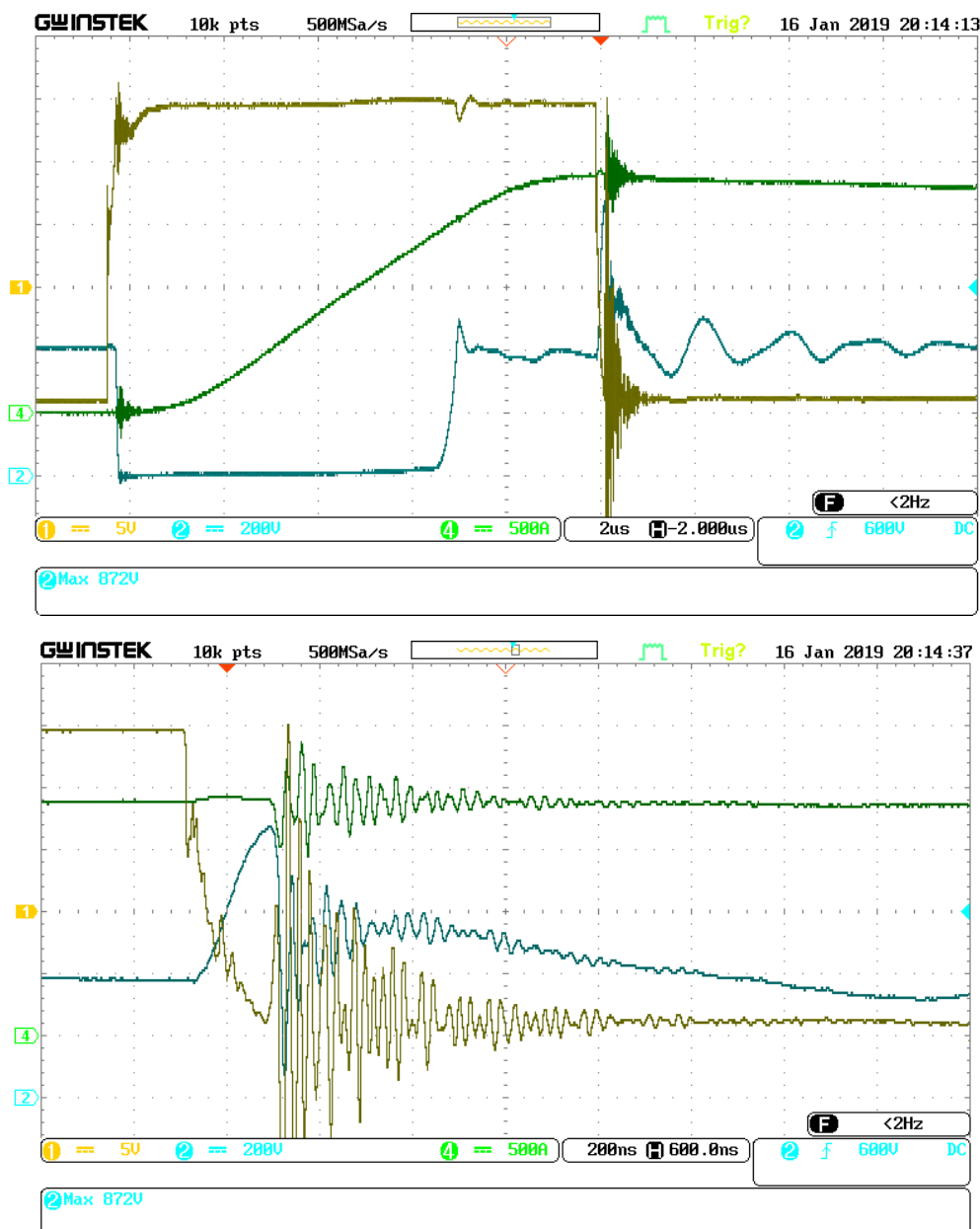
## 1. Zaštita od kratkog spoja

U ovim mjerenjima testirana je funkcionalnost drivera za zaštitu IGBT-a u slučaju kratkog spoja (DESAT FAULT), koja je praktički realizirana kao zaštita od izlaska iz područja zasićenja za vrijeme vođenja IGBT-a.

Provedena su dva seta mjerenja: uz serijski induktivitet kruga kratkog spoja  $L=11\mu\text{H}$  i  $L=1\mu\text{H}$ . U oba slučaja izvršeno je mjerenje uz različite iznose napona istosmjernog kruga:  $U_{\text{DC}} = 400\text{V}$ ,  $600\text{V}$  i  $740\text{V}$ . Temperature hladnjaka bile su: za  $L= 11\mu\text{H} \Rightarrow T_{\text{H}}=42-45\text{C}$ , za  $L=1.6 \mu\text{H} \Rightarrow T_{\text{H}}=40\text{C}$

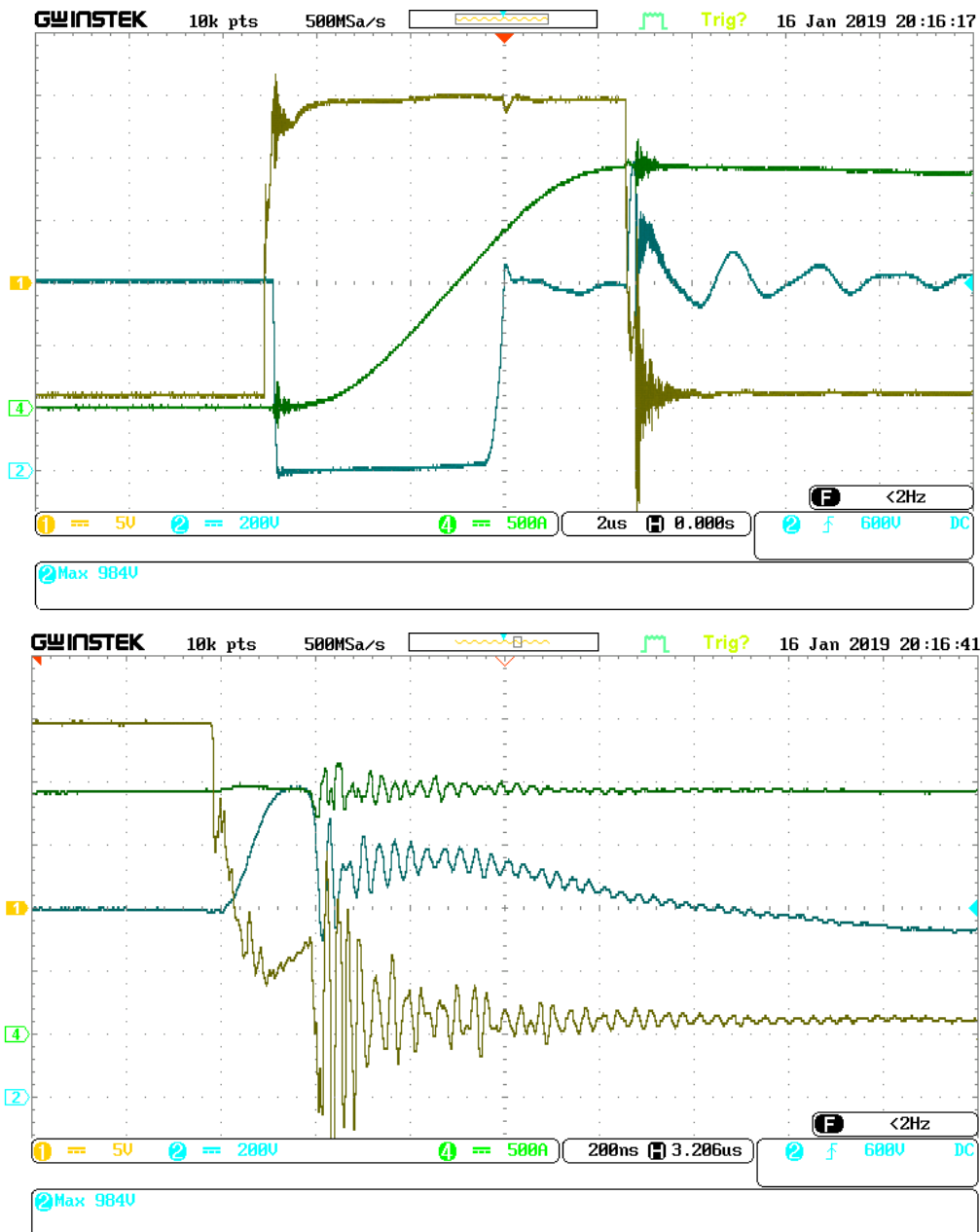
Trajanje vremena vođenja testiranog IGBT-a (realizirano programski preko DSP-a) u oba slučaja je postavljeno na vrijednost znatno veću od vremena prorade zaštite, tako da je prekidanje struje kratkog spoja izvršeno od strane DESAT zaštite SCALE drivera.

Osim ispravnog djelovanja kratkospojne zaštite (DESAT zaštita), u pokusima s  $U_{\text{DC}} = 740\text{V}$  dolazi do prorade i aktivne prenaponske zaštite jer maksimalni napon kolektor-emiter bude veći od  $1000\text{V}$ . Prorada te zaštite se vidi u povećanju napona geita tijekom gašenja IGBT-a kod prorade kratkospojne zaštite.



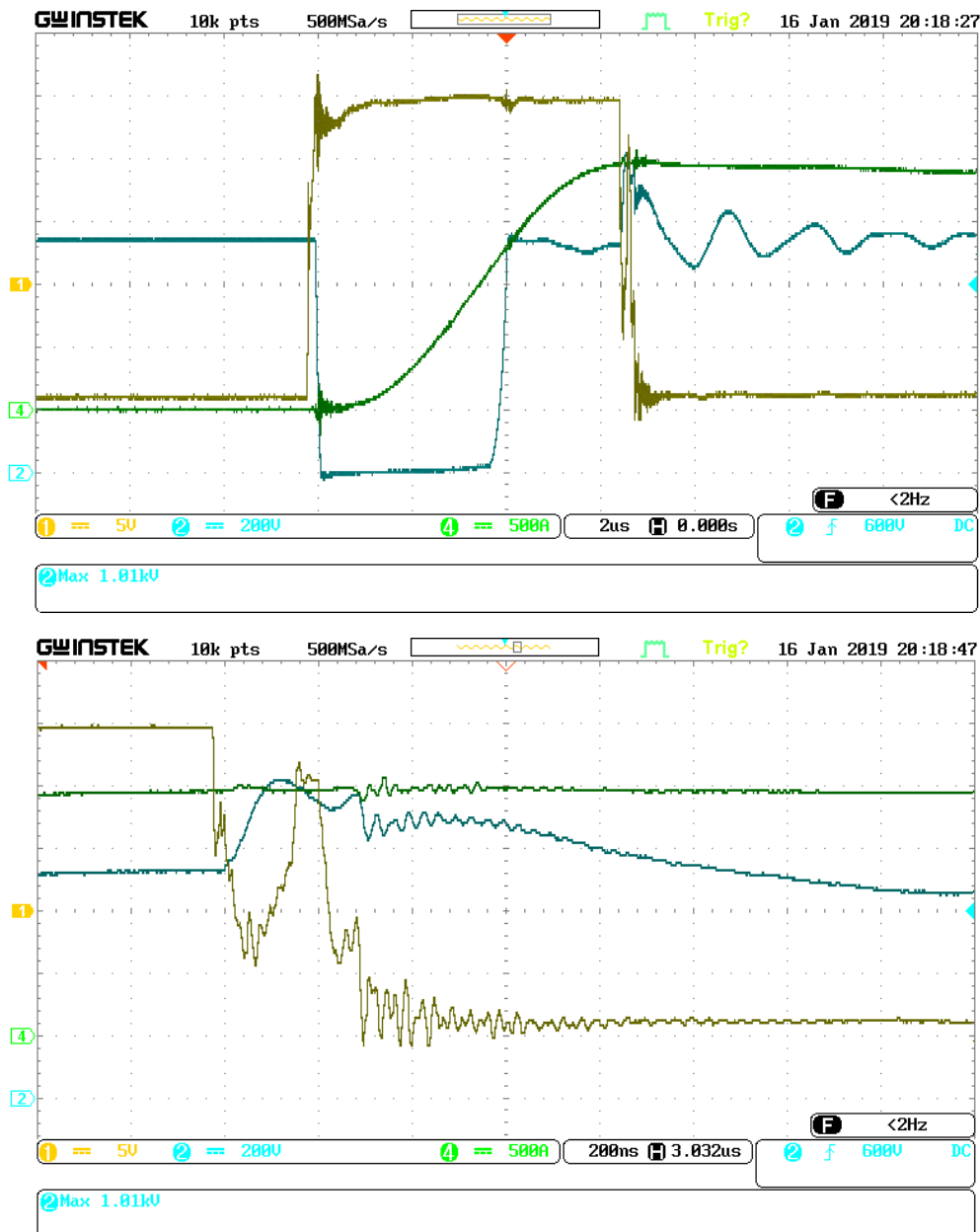
Sl. 8. Napon geita (oker-5v/ds) i napon kolektor-emiter (plava-200V/ds) IGBT-a, te struja kratkog spoja (zelena-500 A/ds) izmjereni s induktivitetom kratkog spoja  $L=1.6\mu\text{H}$  i pri naponu istosmjernog kruga  $U_{DC}=400\text{ V}$ . Isti pokus je prikazan za dvije vremenske baze: 2  $\mu\text{s/d.s.}$  na gornjoj slici i 200 ns/d.s. na donjoj slici.

**Komentar:** Nakon 7  $\mu\text{s}$  trajanja kratkog spoja IGBT izađe iz zasićenja, tj. prijeđe u aktivno područje pri struji od približno 1400 A što se ogleda u porastu napona kolektor-emiter, a nakon toga zaštita proradi za približno 3  $\mu\text{s}$ , pri čemu napon geita pada na negativnu vrijednost i struja IGBT-a pada na nulu što na slici nije vidljivo jer se mjeri struja kroz kratkospojnu prigušnicu koja teče kroz povratnu diodu gornjeg tranzistora nakon njenog gašenja kroz donji IGBT. Na donjoj slici se može primijetiti prenapon od približno 450 V koji nastaje tijekom smanjenja napona geita, tj. gašenja struje kroz IGBT.



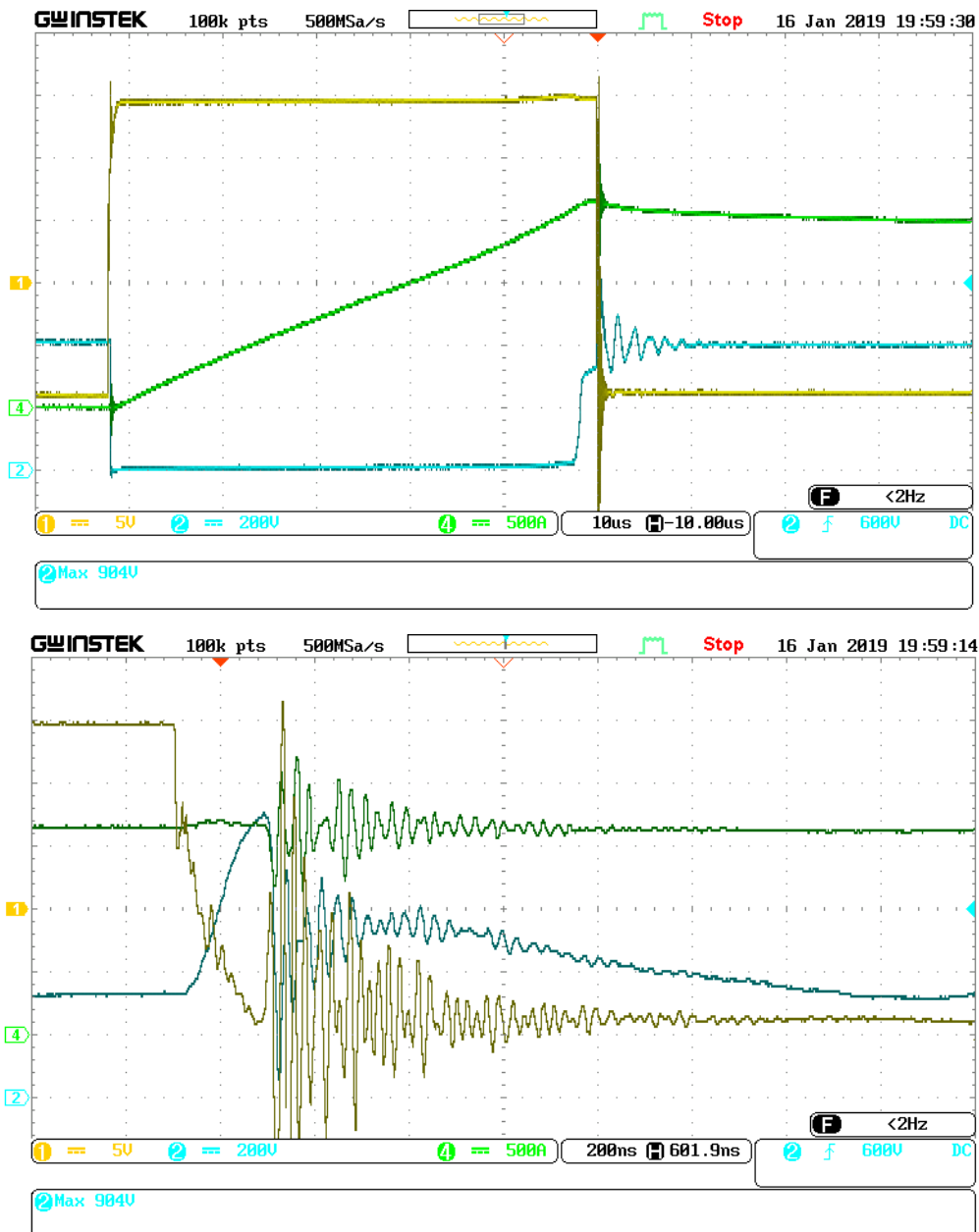
Sl. 9. Napon geita (okor-5v/ds) i napon kolektor-emiter (plava-200V/ds) IGBT-a, te struja kratkog spoja (zelena-500 A/ds) izmjereni s induktivitetom kratkog spoja  $L=1.6\mu\text{H}$  i pri naponu istosmjernog kruga  $U_{DC}=600\text{ V}$ . Isti pokus je prikazan za dvije vremenske baze: 2  $\mu\text{s}$ /d.s. na gornjoj slici i 200 ns/d.s. na donjoj slici.

**Komentar:** Nakon 5  $\mu\text{s}$  trajanja kratkog spoja IGBT izađe iz zasićenja, tj. prijeđe u aktivno područje pri struji od približno 1400 A što se ogleda u porastu napona kolektor-emiter, a nakon toga zaštita proradi za približno 2.5  $\mu\text{s}$ . Na donjoj slici se može primijetiti prenapon od približno 400 V koji nastaje tijekom smanjenja napona geita, tj. gašenja struje kroz IGBT.



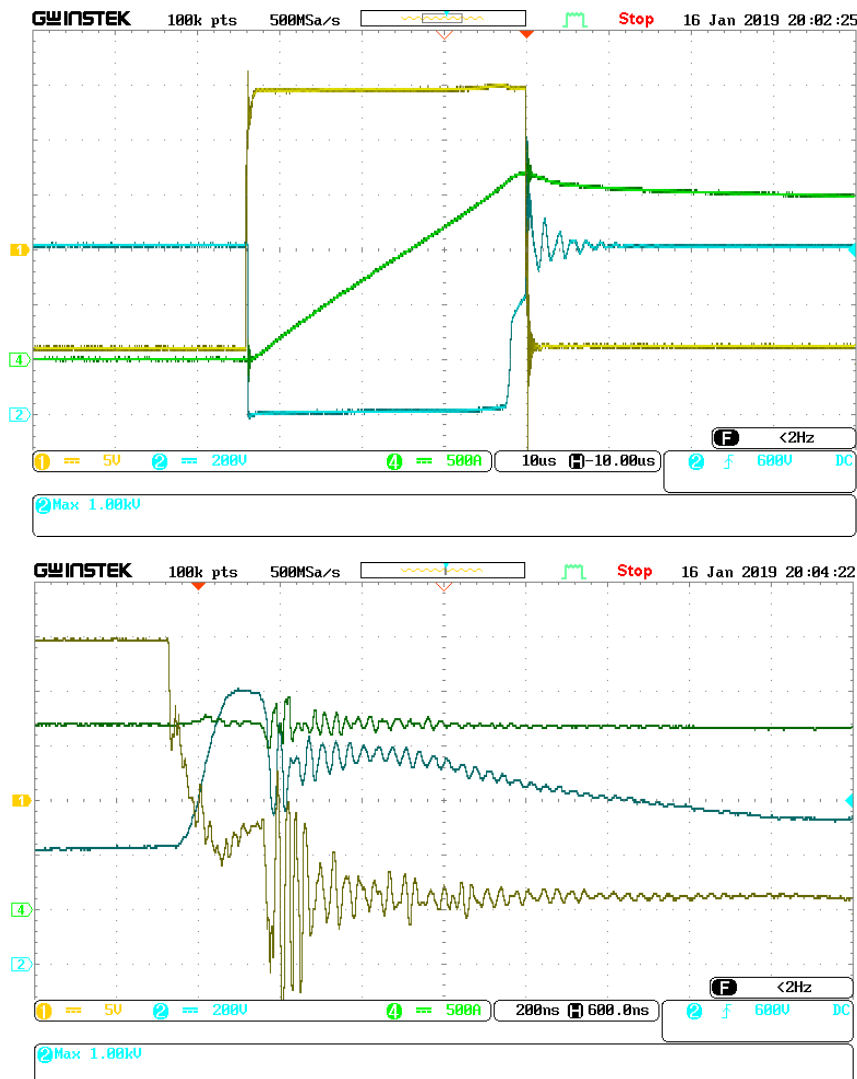
Sl. 10. Napon geita (oker-5v/ds) i napon kolektor-emiter (plava-200V/ds) IGBT-a, te struja kratkog spoja (zelena-500 A/ds) izmjereni s induktivitetom kratkog spoja  $L=1.6\mu\text{H}$  i pri naponu istosmjernog kruga  $U_{DC}=740$  V. Isti pokus je prikazan za dvije vremenske baze: 2  $\mu\text{s/d.s.}$  na gornjoj slici i 200 ns/d.s. na donjoj slici.

**Komentar:** Nakon 4  $\mu\text{s}$  trajanja kratkog spoja IGBT izađe iz zasićenja, tj. prijeđe u aktivno područje pri struji od približno 1400 A što se ogleda u porastu napona kolektor-emiter, a nakon toga zaštita proradi za približno 2.5  $\mu\text{s}$ . Na donjoj slici se može primijetiti prenapon od približno 320 V koji nastaje tijekom smanjenja napona geita, tj. gašenja struje kroz IGBT. Ovdje se aktivira aktivna zaštita od prenapona koja tijekom gašenja IGBT-a ponovno povećaje napon geita što smanjuje brzinu promjene struje tijekom njenog prekidanja i zbog toga se ograničava prenapon na IGBT-u. Aktivna zaštita od prenapona je projektirana tako da prorađuje kod napona kolektor-emiter od približno  $U_{CE}=1050$  V.



Sl. 11 Napon geita (oker-5v/ds) i napon kolektor-emiter (plava-200V/ds) IGBT-a, te struja kratkog spoja (zelena-500 A/ds) izmjereni s induktivitetom kratkog spoja  $L=11\mu H$  i pri naponu istosmjernog kruga  $U_{DC}=400$  V. Isti pokus je prikazan za dvije vremenske baze: 10  $\mu s/d.s$  na gornjoj slici i 200 ns/d.s. na donjoj slici.

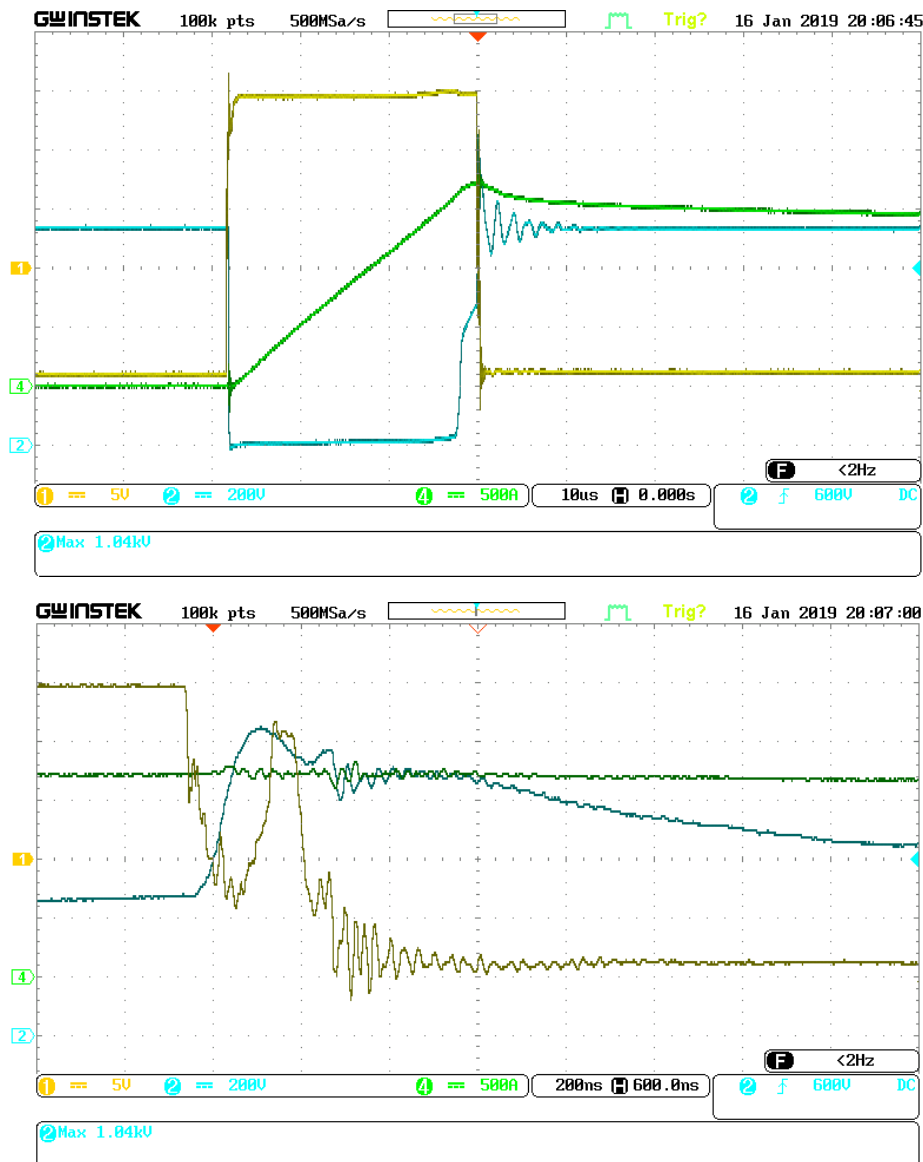
**Komentar:** Nakon 50  $\mu s$  trajanja kratkog spoja IGBT izađe iz zasićenja, tj. prijeđe u aktivno područje pri struji od približno 1400 A što se ogleda u porastu napona kolektor-emiter, a nakon toga zaštita proradi za približno 2.5  $\mu s$ . Na donjoj slici se može primijetiti prenapon od približno 500 V koji nastaje tijekom smanjenja napona geita, tj. gašenja struje kroz IGBT. Aktivna prenaponska zaštita se ne aktivira jer je maksimalni napon kolektor-emiter oko 900 V.



Sl. 12 Napon geita (oker-5v/ds) i napon kolektor-emiter (plava-200V/ds) IGBT-a, te struja kratkog spoja (zelena-500 A/ds) izmjereni s induktivitetom kratkog spoja  $L=11\mu\text{H}$  i pri naponu istosmjernog kruga  $U_{dc}=600\text{ V}$ . Isti pokus je prikazan za dvije vremenske baze: 10  $\mu\text{s/d.s.}$  na gornjoj slici i 200 ns/d.s. na donjoj slici.

**Komentar:** Nakon približno 32  $\mu\text{s}$  trajanja kratkog spoja IGBT izađe iz zasićenja, tj. prijeđe u aktivno područje pri struji od približno 1400 A što se ogleda u porastu napona kolektor-emiter, a nakon toga zaštita proradi za približno 2.5  $\mu\text{s}$ . Maksimalni napon iznosi 1000 V, što znači da je maksimalni prenapon oko 400 V. Napona od 1000 V je granična vrijednost za proradu aktivne zaštite od prenapona, pa se napon geita samo malo poveća pri vrijednosti od  $-5\text{ V}$ , ali se praktički ta zaštita ne aktivira.





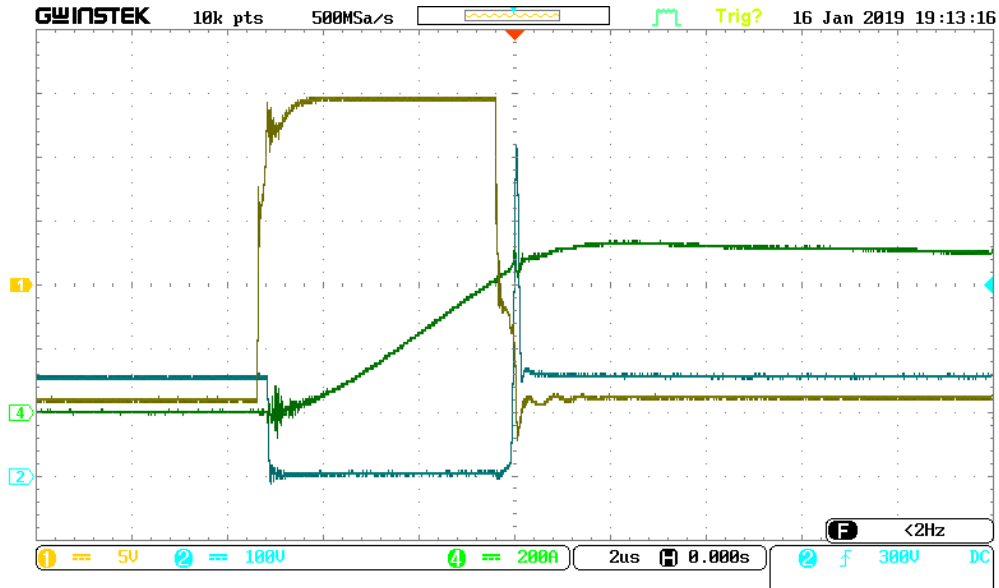
Sl. 13 Napon geita (oker-5v/ds) i napon kolektor-emiter (plava-200V/ds) IGBT-a, te struja kratkog spoja (zelena-500 A/ds) izmjereni s induktivitetom kratkog spoja  $L=11\mu\text{H}$  i pri naponu istosmjernog kruga  $U_{DC}=740\text{ V}$ . Isti pokus je prikazan za dvije vremenske baze: 10  $\mu\text{s/d.s.}$  na gornjoj slici i 200 ns/d.s. na donjoj slici.

**Komentar:** Nakon približno 25  $\mu\text{s}$  trajanja kratkog spoja IGBT izađe iz zasićenja, tj. prijeđe u aktivno područje pri struji od približno 1400 A što se ogleda u porastu napona kolektor-emiter, a nakon toga zaštita proradi za približno 2.5  $\mu\text{s}$ . Maksimalni napon iznosi 1045 V, što znači da je maksimalni prenapon oko 300 V. Maksimalni prenapon se smanjio u odnosu na varijantu s  $U_{DC}=600\text{ V}$  jer je očito djelovanje aktivne prenaponske zaštite koja se vidi u porastu napona geita tijekom prorade kratkospojne zaštite.

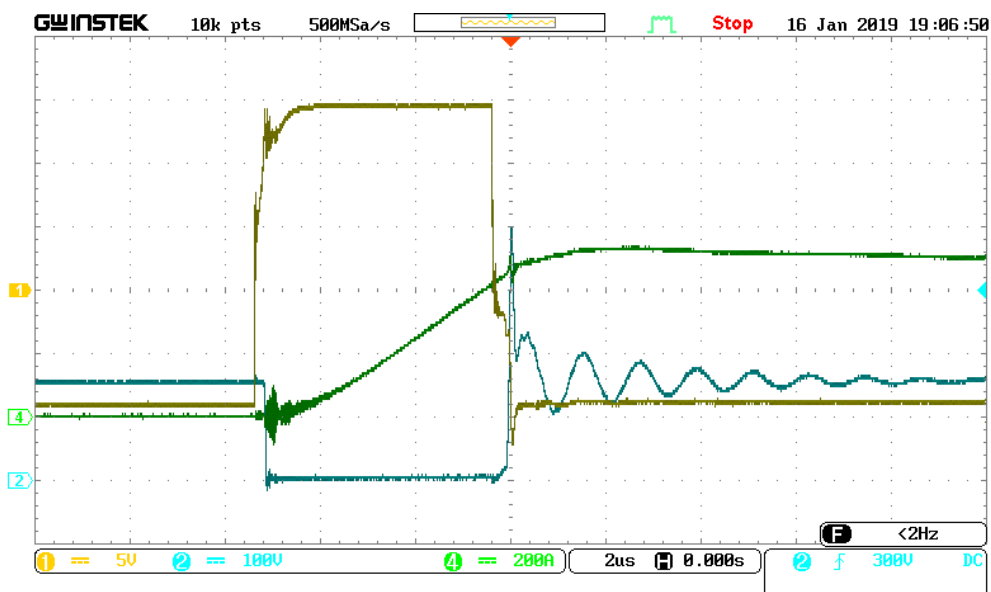
## 2. Prenaponska zaštita pomoću kondenzatora

Koristeći jednaku shemu kao i kod prethodnih pokusa, u ovom poglavlju je prikazana ovisnost prenapona na IGBT-u o broju kondenzatora koji se postavljaju direktno na IGBT module, tj. između „+“ i „-“, stezaljki IGBT modula. U svim mjerenjima korišteni su propilenski film kondenzatori kapaciteta  $0.68\mu\text{F}$ , napona 1600 V. Mjerenja su provedena za tri varijante: (1) bez kondenzatora, (2) s kondenzatorom na testiranom IGBT modulu i (3) sa tri kondenzatora koji se nalaze na sva tri IGBT modula. U svim mjerenjima istosmjerni napon je  $U_{\text{DC}}=150\text{ V}$ , a isklapanje tranzistora se provodi kod struje od približno 500 A.

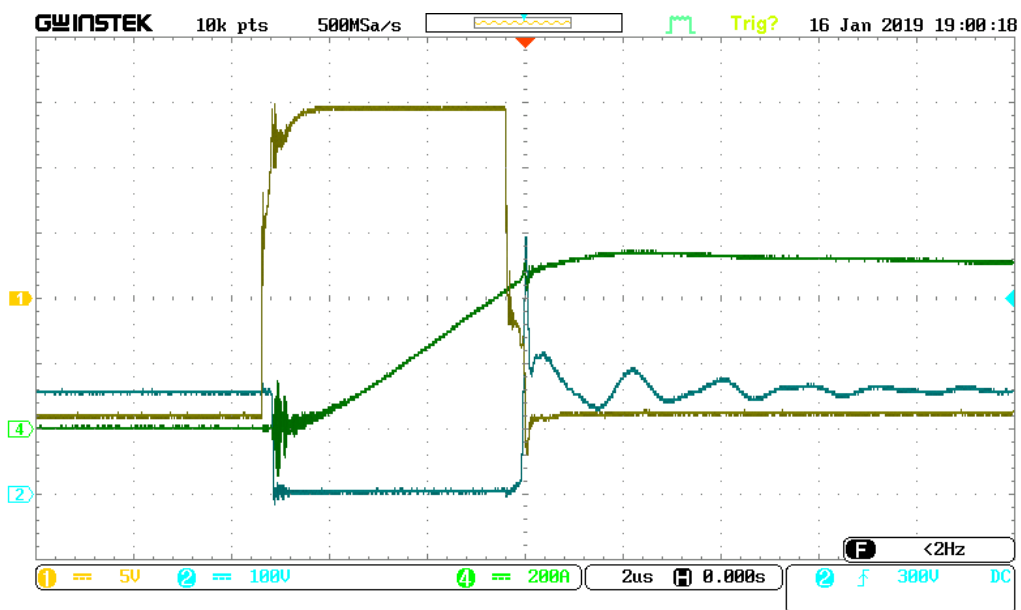
Kao što se može primijetiti sa slika prenapon u varijanti bez kondenzatora iznosi oko 400V, a u obje druge varijante oko 250 V. S obzirom da prenapon ne ovisi o naponu istosmjernog kruga, a proporcionalan je struji, prenapon od 250 V je prihvatljiv ako se pretpostavi da je za pretvarač od 100 kVA maksimalni istosmjerni napon 800 V, a maksimalna struja 150% nazivne, tj. 240 A efektivno ili 350 A maksimalna trenutna vrijednost.



Sl. 14 Napon geita (oker-5v/ds) i napon kolektor-emiter (plava-100V/ds) IGBT-a, te struja tereta (zelena-200 A/ds) tijekom procesa uključanja i isključenja IGBT-a u varijanti **bez kondenzatora** za zaštitu od prenapona



Sl. 15 Napon geita (oker-5v/ds) i napon kolektor-emiter (plava-100V/ds) IGBT-a, te struja tereta (zelena-200 A/ds) tijekom procesa uključenja i isključenja IGBT-a u varijanti s kondenzatorom na testiranom IGBT-u

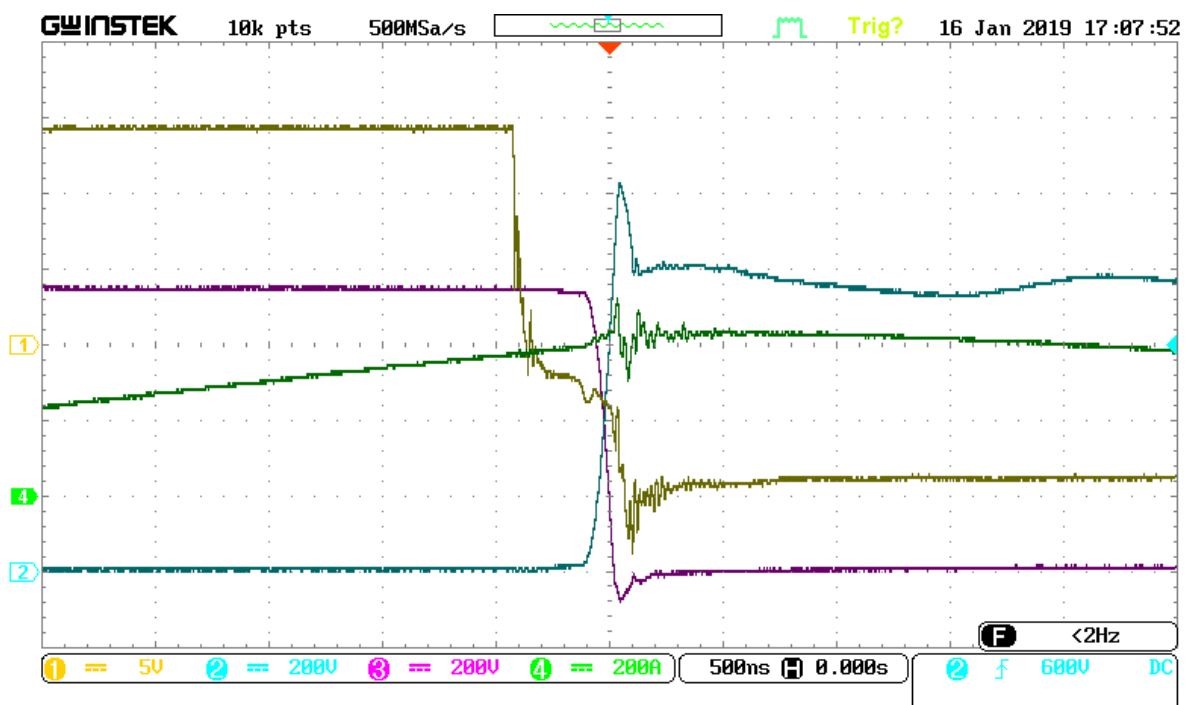


Sl. 16 Napon geita (oker-5v/ds) i napon kolektor-emiter (plava-100V/ds) IGBT-a, te struja tereta (zelena-200 A/ds) tijekom procesa uključenja i isključenja IGBT-a u varijanti s kondenzatorima na sva tri IGBT modula

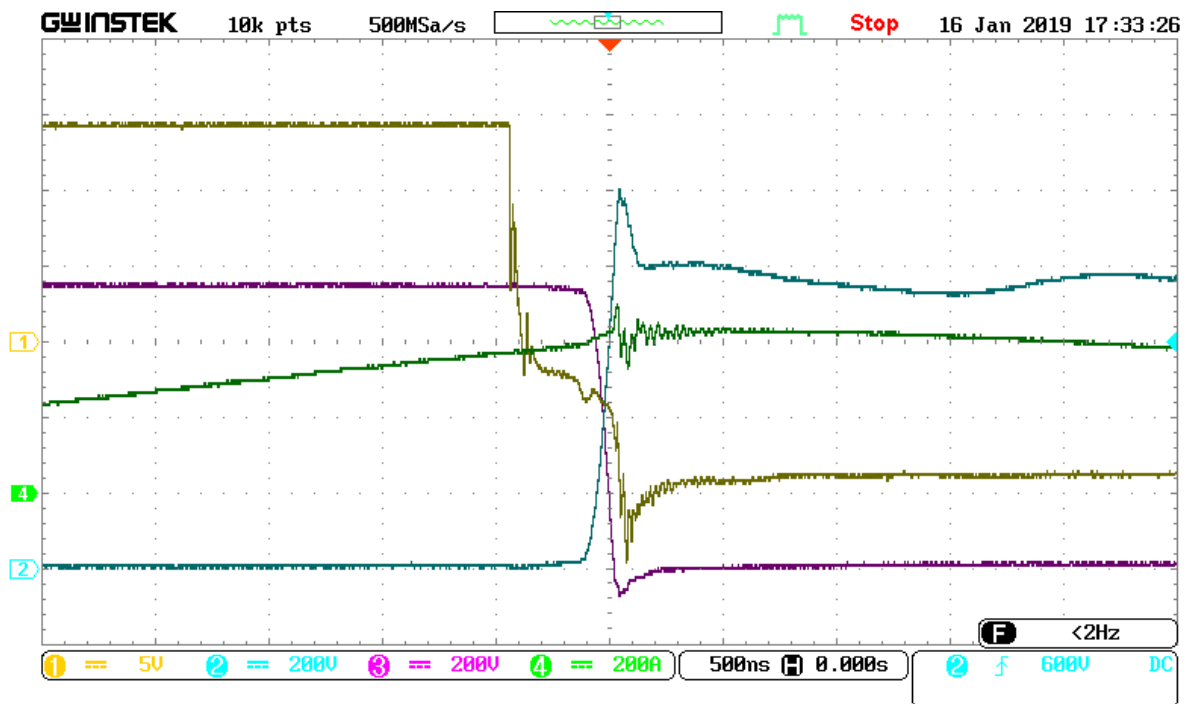
## 1. Utjecaj temperature IGBT modula i vanjskog induktiviteta na prenapone

Poznato je da temperatura IGBT modula utječe na prenapon IGBT-a tijekom njegova isključenja. Koristeći jednaku shemu kao i kod prethodnih pokusa, u ovom poglavlju je prikazana ovisnost prenapona na IGBT-u o temperaturi IGBT modula, tj. temperaturi hladnjaka na koji su moduli montirani. Također mjerenja su izvršena i za dvije vrijednosti induktivite spojenog prema shemi na prvoj slici. Na slikama su prikazane iste veličine kao i u prethodnim pokusima, te je dodatno na kanalu 3 prikazan i napon na IGBT-u kroz koji ne teče struja (vidi shemu na prvoj slici). Hladnjaci su grijani vanjskim izvorima topline.

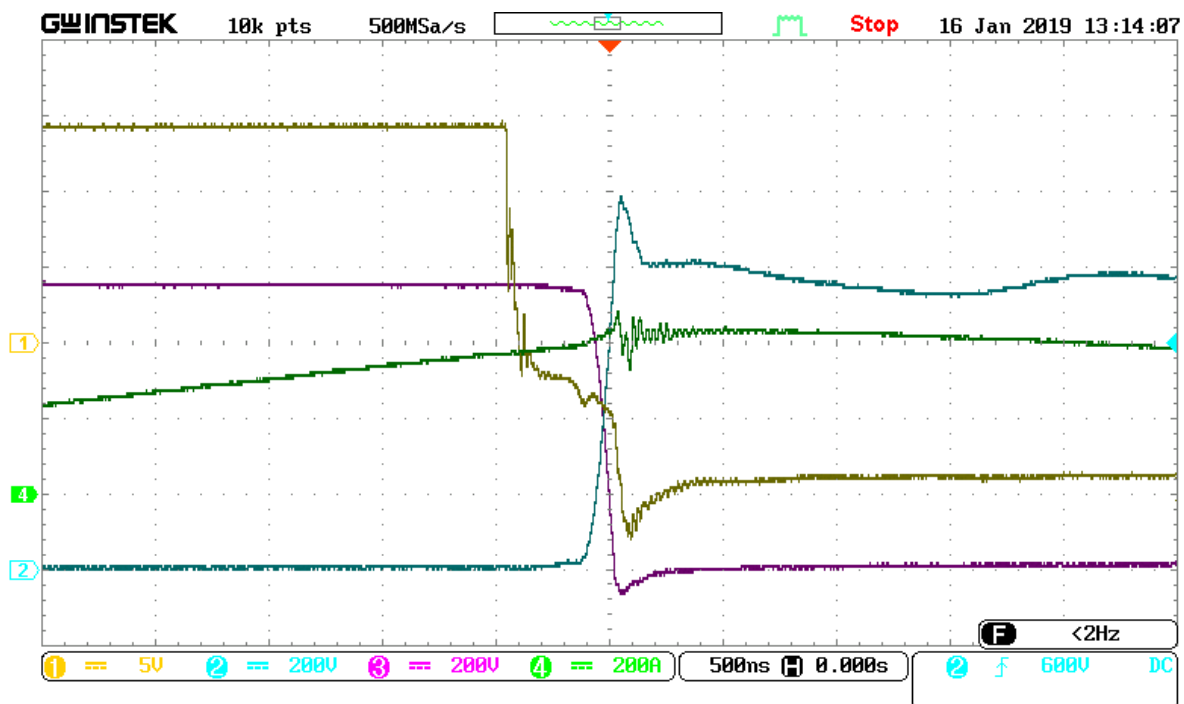
Na slijedeće tri slike prikazani su rezultati mjerenja za 3 temperature hladnjaka: 30°C, 60°C, 90°C, te serijski spojeni induktivitet  $L = 11 \mu\text{H}$ . Također, serijski dodani otpor u krugu geita iznosi  $R_g = 1 \Omega$ . Sa slika se može uočiti da je maksimalni napon/prenapon pri temperaturi od 30°C i iznosi oko 1020 V, a minimalni kod temperature 90°C i iznosi oko 980 V. Dakle prenaponi su manji kod većih temperatura, što je i očekivano. Kod svih mjerenja napon istosmjernog kruga je oko 740 V, a trenutna vrijednost struje u trenutku isključenja oko 400 A.



Sl. 17 Napon geita (oker-5v/ds), napon kolektor-emiter donjeg IGBT-a (plava-200V/ds), napon kolektor-emiter gornjeg IGBT-a (ljubičasta - 200V/ds) te struja tereta (zelena-200 A/ds) tijekom procesa isključenja donjeg IGBT-a pri temperaturi hladnjaka od 30°C i serijski spojenom induktivitetu  $L = 11 \mu\text{H}$

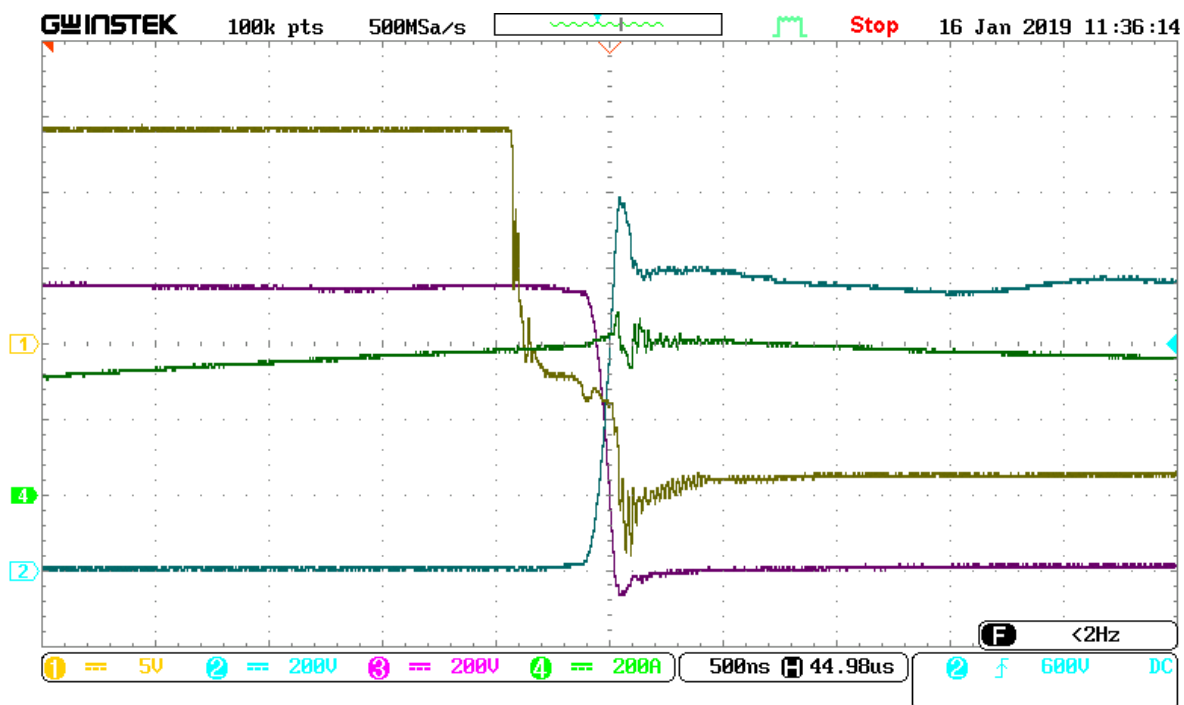


Sl. 18 Napon geita (oker-5v/ds), napon kolektor-emiter donjeg IGBT-a (plava-200V/ds), napon kolektor-emiter gornjeg IGBT-a (ljubičasta - 200V/ds) te struja tereta (zelena-200 A/ds) tijekom procesa isključenja donjeg IGBT-a pri **temperaturi hladnjaka od 60°C** i serijski spojenom **induktivitetu L = 11μH**

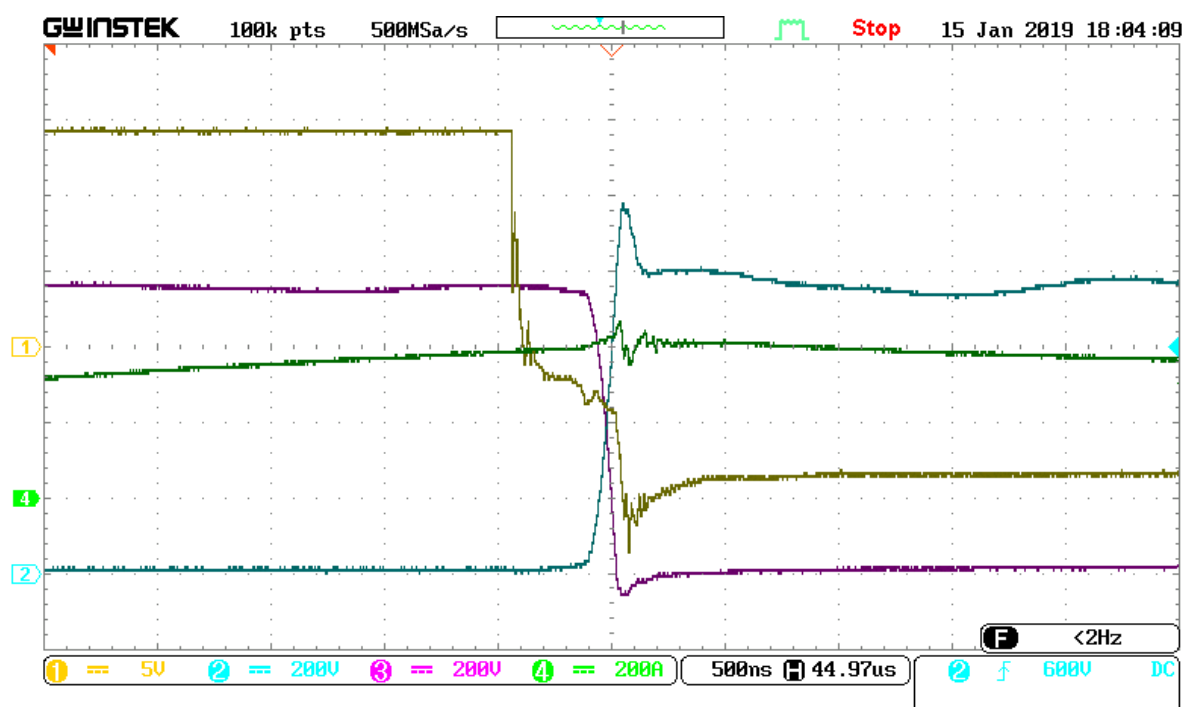


Sl. 19 Napon geita (oker-5v/ds), napon kolektor-emiter donjeg IGBT-a (plava-200V/ds), napon kolektor-emiter gornjeg IGBT-a (ljubičasta - 200V/ds) te struja tereta (zelena-200 A/ds) tijekom procesa isključenja donjeg IGBT-a pri **temperaturi hladnjaka od 90°C** i serijski spojenom **induktivitetu L = 11μH**

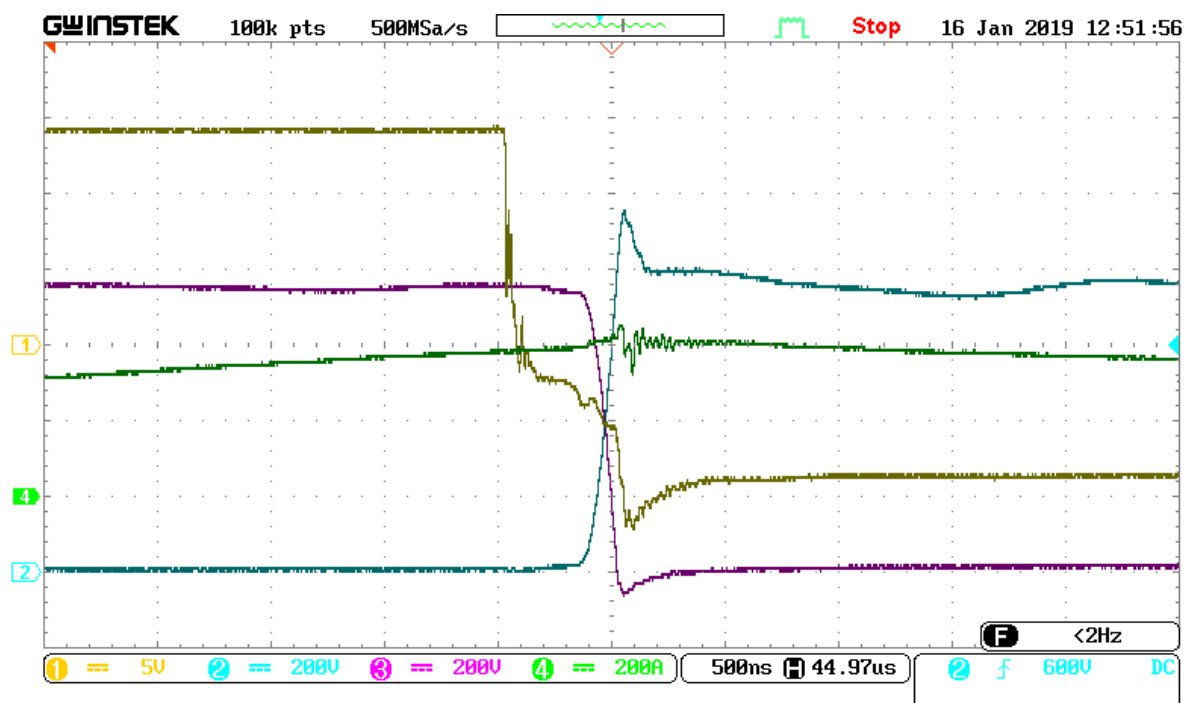
Na slijedeće tri slike prikazani su rezultati mjerenja za 3 temperature hladnjaka: 30°C, 50°C, 90°C, te serijski spojeni induktivitet  $L = 26 \mu\text{H}$ . Sa slika se može uočiti da je maksimalni napon/prenapon pri temperaturi od 30°C i iznosi oko 985 V, a minimalni kod temperature 90°C i iznosi oko 950 V. Dakle prenaponi su manji kod većih temperatura, što je i očekivano. S druge strane, ako se usporede ovi prenaponi s onima koji su prikazani na prethodne tri slike (iste temperature, ali manji serijski induktivitet) može se zaključiti da povećani induktivitet u vanjskom krugu smanjuje prenapon. U ovom slučaju za  $L = 26 \mu\text{H}$  smanjenje prenapona pri istim temperaturama hladnjaka iznosi oko 30 V.



Sl. 20 Napon geita (oker-5v/ds), napon kolektor-emiter donjeg IGBT-a (plava-200V/ds), napon kolektor-emiter gornjeg IGBT-a (ljubičasta - 200V/ds) te struja tereta (zelena-200 A/ds) tijekom procesa isključenja donjeg IGBT-a pri temperaturi hladnjaka od 30°C i serijski spojenom induktivitetu  $L = 26 \mu\text{H}$



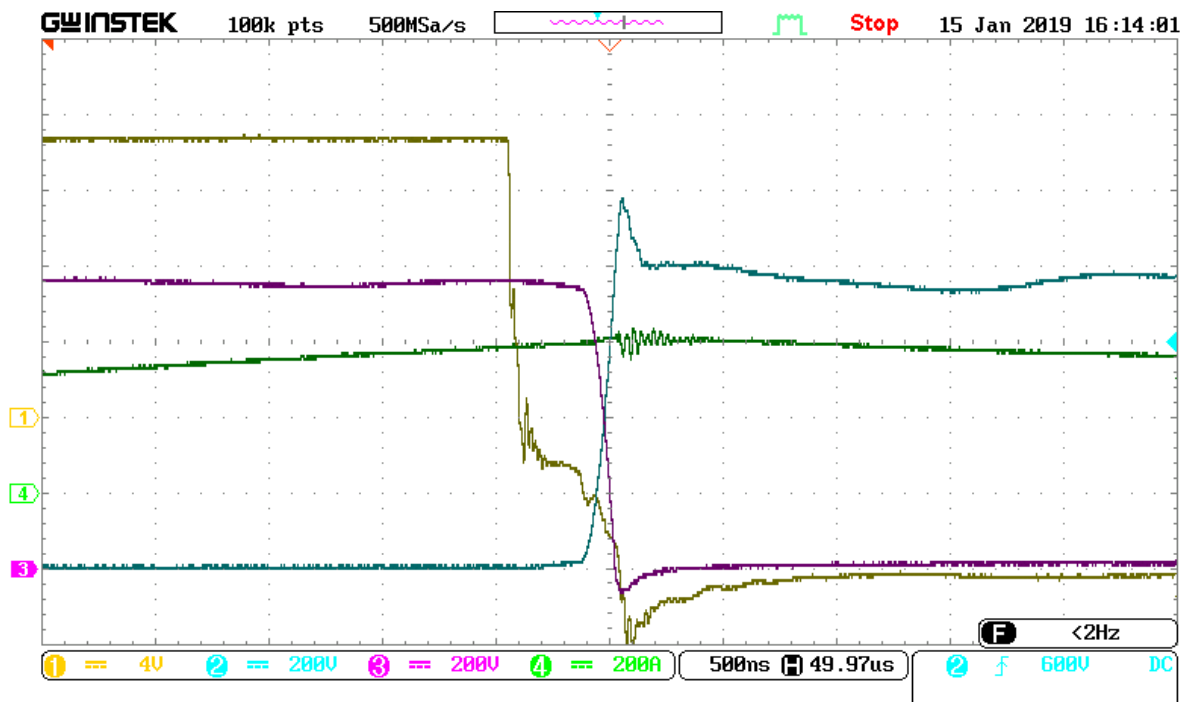
Sl. 21 Napon geita (oker-5v/ds), napon kolektor-emiter donjeg IGBT-a (plava-200V/ds), napon kolektor-emiter gornjeg IGBT-a (ljubičasta - 200V/ds) te struja tereta (zelena-200 A/ds) tijekom procesa isključenja donjeg IGBT-a pri temperaturi hladnjaka od 60°C i serijski spojenom induktivitetu  $L = 26 \mu\text{H}$



Sl. 22 Napon geita (oker-5v/ds), napon kolektor-emiter donjeg IGBT-a (plava-200V/ds), napon kolektor-emiter gornjeg IGBT-a (ljubičasta - 200V/ds) te struja tereta (zelena-200 A/ds) tijekom procesa isključenja donjeg IGBT-a pri temperaturi hladnjaka od 90°C i serijski spojenom induktivitetu  $L = 26 \mu\text{H}$

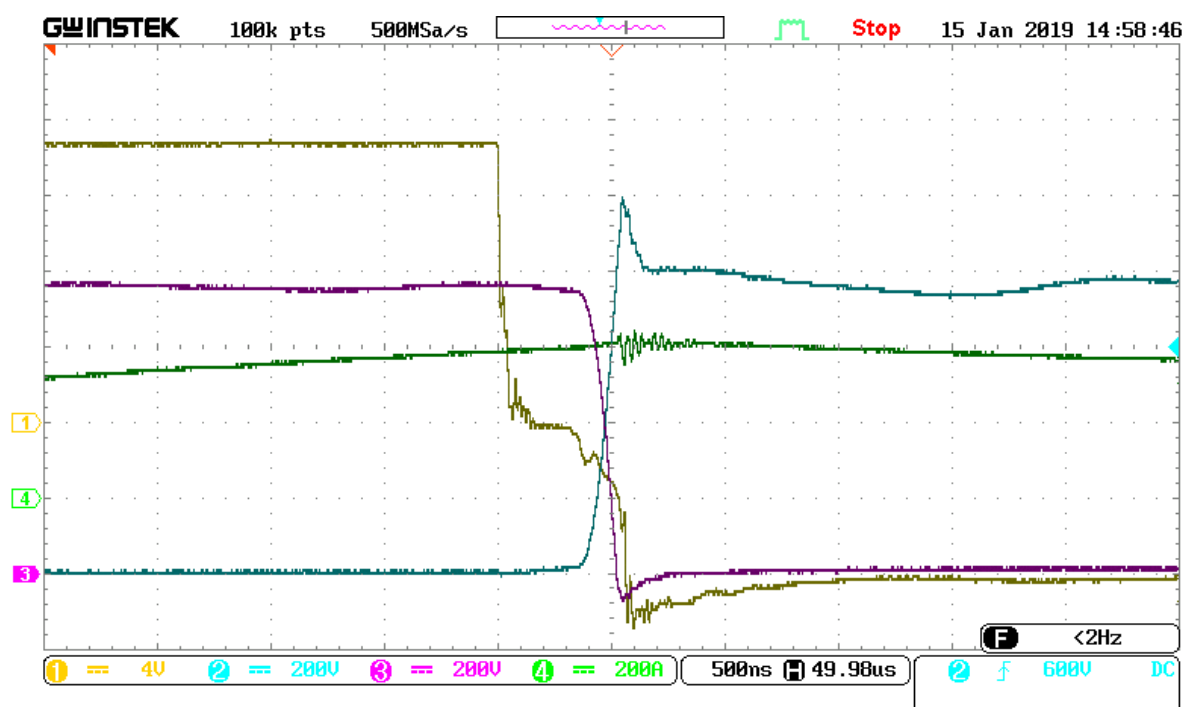
## 2. Utjecaj otpora u krugu geita na prenapon tijekom isključenja IGBT-a

U ovom poglavlju prikazana je ovisnost prenapona o dodanom otporu u krug geita. Mjerenja su izvršena kod napona istosmjernog kruga od 740 V, a trenutna vrijednost struje u trenutku isključenja je približno 400 A. Vanjski induktivitet kruga je  $L = 26 \mu\text{H}$ . Na slijedeće tri slike prikazan je proces isključenja IGBT-a za tri vrijednosti otpora geita  $R_g = 1 \Omega$ ,  $1.6 \Omega$ ,  $2.5 \Omega$ . Sa slika se može zaključiti da je utjecaj otpora geita na iznos prenapona zanemariv.

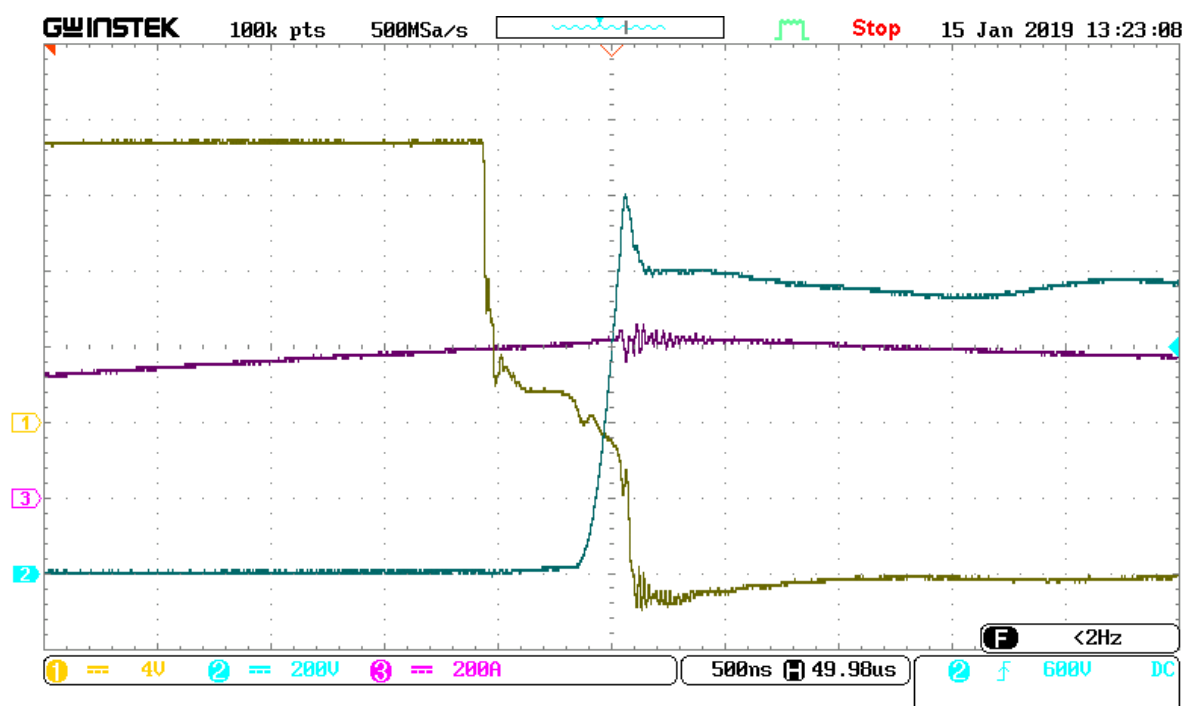


Sl. 23 Napon geita (oker-5v/ds), napon kolektor-emiter donjeg IGBT-a (plava-200V/ds), napon kolektor-emiter gornjeg IGBT-a (ljubičasta - 200V/ds) te struja tereta (zelena-200 A/ds) tijekom procesa isključenja donjeg IGBT-a pri otporu geita  $R_g = 1 \Omega$





Sl.24 Napon geita (oker-5v/ds), napon kolektor-emiter donjeg IGBT-a (plava-200V/ds), napon kolektor-emiter gornjeg IGBT-a (ljubičasta - 200V/ds) te struja tereta (zelena-200 A/ds) tijekom procesa isključenja donjeg IGBT-a pri otporu geita  $R_g = 1.6 \Omega$



Sl. 25 Napon geita (oker-5v/ds), napon kolektor-emiter donjeg IGBT-a (zelena-200V/ds), te struja tereta (ljubičasta-200 A/ds) tijekom procesa isključenja donjeg IGBT-a pri otporu geita  $R_g = 2.5 \Omega$

**Literatura:**

[1] Power Integrations: SCALE™ -2 + 2SC0115T Preliminary Description and Application Manual

[2] Application Manual – Power Semiconduter, SEMIKRON International 2015.