

# IGBT TRANZISTORA LINEĀRĀ REŽĪMA IZMANTOŠANA PĀRSTRĀVAS IEROBEŽOŠANAI *INRUSH CURRENT LIMITATION BY UTILIZATION OF LINEAR MODE OF IGBT TRANSISTOR*

Autori: **Kaspars Kroičs**, e-pasts: [Kaspars.Kroics@rtu.lv](mailto:Kaspars.Kroics@rtu.lv), **Rodions Saltanovs**, e-pasts:  
[r.saltanovs@transfoelectric.com](mailto:r.saltanovs@transfoelectric.com).

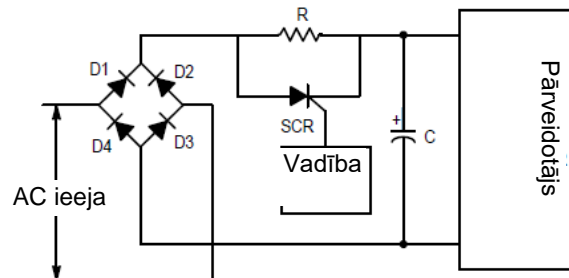
Rīgas Tehniskā Universitāte, Āzenes iela 12-1, Rīga, Latvija

**Abstract.** *Input filter is essential part of each switched mode power supply design. Important issue that must be solved in the design process is control of the high inrush current due to rapid rise of the voltage during initial connection of the power to the power supply. In the paper a single IGBT or MOSFET transistor is applied to control  $dv/dt$  in order to limit the high current spikes during initial power turn on or to limit overcurrent in microarc oxidation process. This inrush current limiting technique is beneficial because  $dv/dt$  control reduces the electromagnetic interference due to current and voltage spikes. As inrush current limiting device has minimal parts count the design is cost effective and reliable.*

**Keywords:** *microarc oxidation process , IGBT driver, inrush current limiting.*

## Ievads

Mūsdienās ļoti plaši tiek izmantoti impulsveida energoelektroniskie pārveidotāji. Šādu pārveidotāju ieejā pulsāciju mazināšanai tiek izmantoti kapacitīvie vai induktīvie filtri. Pieslēdzot barošanas spriegumu pārveidotājam atkarībā no jaudas un filtra kapacitātes, strāva filtra kondensātorā sākotnējā brīdī var sasniegt nepieļaujami lielu vērtību, tāpēc šo strāvu ir nepieciešams ierobežot.

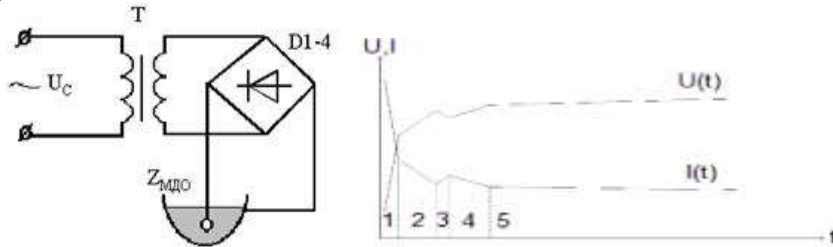


1. att. Pārstrāvas ierobežošana ar priekšuzlādes rezistoru [1]

Pārstrāvas ierobežošana parasti tiek izmantotas pasīvas metodes, pieslēdzot virknē rezistoru uz īsu laiku kondensatora uzlādei, šāds risinājums ir redzams 1. attēlā. Rezistora pieslēgšanai var tikt izmantots gan elektromehāniskais relejs, gan tranzistors vai tiristors kā redzams attēlā. Tas tiek pieslēgts uz brīdi, kas nepieciešams filtra kondensatora uzlādei līdz spriegumam, kas tuvs barošanas spriegumam. Tāpat var tikt izmantoti negatīvi no sprieguma atkarīgu pretestību (NTC) [2], vai dažos gadījumos induktīvu filtru. Šīs pārstrāvas ierobežošanas metodes ir diezgan lielas un samērā dārgas.

Tāpat strāvas īslaicīgas pārstrāvas ierobežošana ir nepieciešama daudzos citos procesos. Šajā rakstā tiks apskatīta strāvas ierobežošana mikroloka oksidācijas procesā (MLO). MLO – elektroķīmiskais metālu un to sakausējumu virsmu oksidācijas process elektrolītiskā plazmā lai uz tām iegūtu oksīda klājumus. Mikroloka apstrādei var tikt pakļauti metāli: Al, Mg, Ti, Zr, Nb, Ta un citi. MLO pamatā ir anoda oksidācijas (anodēšanas) process. Sprieguma impulsa padošanas momentā elektrolītā sākas lādiņu pārdale, kuras rezultātā formējas adsorbētu jonu slānis uz anoda virsmas. Veidojas elektrisks dubultslānis, kurš noved pie sprieguma krituma pārdales. Vielas pārnese caur dubultslāni ir atkarīga no dubultslāņa uzbūves un polarizācijas

apstākļiem. Pie anoda polarizācijas notiek skābekļa pārnese no anjoniem un (vai) šķīduma molekulām uz anodējamo metālu. Pēc kāda laika uz metāla virsmas veidojas oksīda slānis. Iegūtā pagaidu anoda plēve būtiski ietekmē tālākās oksīda slāņa formēšanas stadijas. Augot dielektriskās plēves biežumam aug arī potenciāls, kurš ir nepieciešams lai nodrošinātu jonu migrāciju caur plēvi. Izmantoti avoti [3], [4].

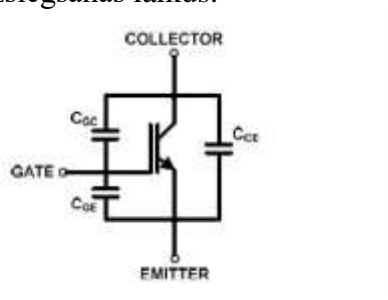


2. att. Vienkāršākā MLO procesa barošanas shēma; strāvas  $I(t)$  un sprieguma  $U(t)$  izmaiņu līknes MLO procesa laikā: 1 – barjerslāņa veidošanās; 2 – porainā slāņa veidošanās; 3 – mikroizlādes rašanās; 4,5 – MLO stadija

Vienkāršākā un lētākā MLO procesa barošanas shēma ir parādīta 2. att. [5]–[7]. Taču tai ir būtisks trūkums: kā redzams no sprieguma un strāvas raksturlīknes sākuma momentā strāva ir jāierobežo, šim nolūkam shēma ir papildināta ar IGBT tranzistoru, kas tiks izmantots kā aktīvo elementu, kas ierobežo strāvu. Šāds risinājums ļautu iztikt bez papildus jaudīgiem elementiem, samazinot iekārtas izmaksas, atkarībā no absorbējamās jaudas būtu gan nepieciešams uzlabot IGBT tranzistora dzesēšanu, vai vajadzības gadījumā izvēlēties IGBT tranzistoru ar lielāku nominālo jaudu.

### Materiāli un metodes

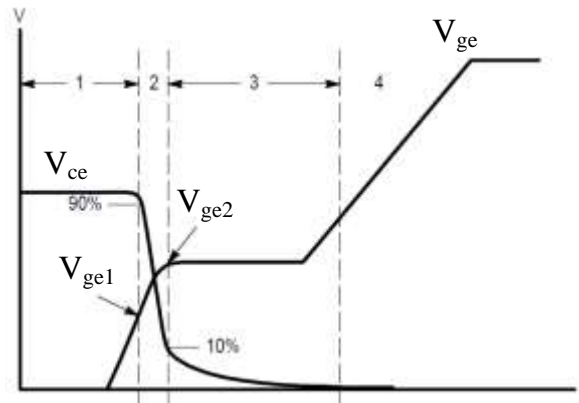
IGBT tranzistoru izejot no vadības viedokļa lielā mērā ar pietiekošu precizitāti var izmantot 3. attēlā parādīto shēmu. IGBT ieslēgšanās un izslēgšanās dinamiskās raksturlīknes nosaka starpelektrodu parazitiskās kapacitātes: CGE - kapacitāte aizvars - emitters, CCE - kapacitāte kolektors - emitters CGC - kapacitāte aizvars - kolektors. Šīs kapacitātes izsauc aiztures nosaka IGBT ieslēgšanās un izslēgšanās laikus.



3. att. IGBT ekvivalentā shēma [8]

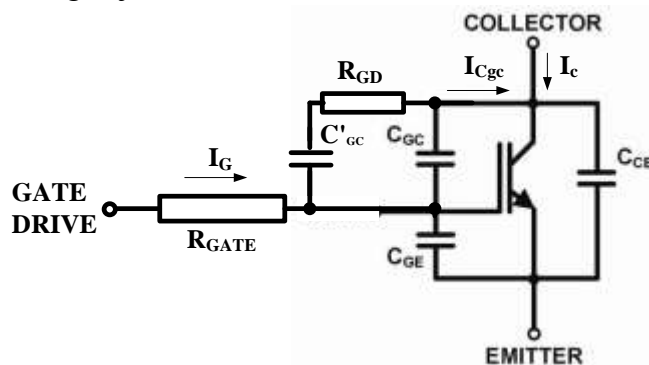
IGBT tranzistoru datu lapā tiek dotas šādas kapacitātes: ieejas kapacitāte:  $C_{iss} = C_{ge} + C_{gc}$ , ja  $C_{ce}$  ir īsslēgts; reversā pārvades kapacitāte  $C_{riss} = C_{gc}$  un izejas kapacitāte:  $C_{oss} \approx C_{ce} + C_{gc}$ , ja  $C_{ge}$  ir īsslēgts. Tas, cik ātri šīs kapacitātes tiek uzlādētas un izlādētas, nosaka IGBT tranzistora slēgšanās laiku. 4. attēlā parādīts tranzistora ieslēgšanās process, padodot uz gate spriegumu. Parādīto līkni var iedalīt 4 reģionos. 1. reģionā tranzistors atrodas aizvērtā stāvoklī, notiek sākotnēja ieejas kapacitātes  $C_{iss}$  uzlāde līdz spriegums sasniedz vērtību  $V_{GE1}$ . Reģionā 2 tranzistors sāk atvērties, spriegums  $V_{DS}$  sāk strauji samazināties, jo kapacitāte  $C_{gc}$  ir relatīvi neliela un var tikt pietiekoši ātri izlādēta. Spriegumam  $V_{cg}$  samazinoties tālāk kapacitāte  $C_{GC}$  kļūst dinamiska (3. reģions) un strauji aug, šī kapacitāte tad arī dominē kā ieejas kapacitāte, praktiski visa draivera strāva tiek izmantota, lai tā var tikt izlādēta pietiekoši ātri. Reģionā 3  $V_{ge}$

saglabājas faktiski nemainīgs,  $V_{ce}$  samazinās līdz sasniedz piesātinājuma līmeni. Tālāk reģionā 4  $V_{ge}$  palielinās līdz tam pieliktajam barošanas spriegumam, , bet tas vairs neatstāj ietekmi uz spriegumu  $V_{ce}$  un kolektora strāvu.



4. att. IGBT tranzistora atvēršanās elektriskais process

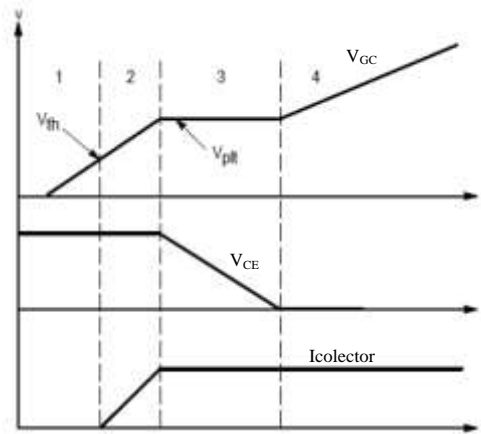
Tātad,  $V_{ce}$  izmaiņu nosaka 2. un 3. reģions. Ja sprieguma  $V_{ce}$  izmaiņu varētu sadalīt vienmērīgāk uz reģioniem 2 un 3, tad tas atļautu kontrolēt sprieguma  $V_{ce}$  pieauguma straujumu neatkarīgi no slodzes vērtības, šādu principu varētu arī izmantot, lai kontrolētu pārstrāvu sākuma momentā nelineāras slodzes gadījumā.



5. att. IGBT tranzistors papildināts ar kapacitāti  $C'_{gc}$

Lai nodrošinātu strāvas pieaugumu tuvu lineāram arī reģionā 3, var tikt pievienots papildus kondensators starp aizvaru un kolektoru  $C'_{gc} \gg C_{gc}$ . Ja šis kondensators ir daudz lielāks nekā iekšējā kapacitāte  $C_{gc}$ . Šis papildus kondensators darbojas kā integrators un tiek izmantots, lai precīzi noteiktu pārslēgšanās profilu. Šīs kapacitātes pievienošana ļaut izvairīties no  $C_{gc}$  nelineārajiem efektiem, jo kapacitāte  $C'_{gc}$  dominē  $V_{ce}$  izmaiņas procesā. Iespēja kontrolēt sprieguma izmaiņu lineāri, dod iespēju kontrolēt arī pārstrāvu, šo pārstrāvu ierobežo IGBT tranzistors lineārā režīmā. Tas ir iespējams, jo strāvu, kas plūst caur kondensatoru, saista šāda sakarība:  $i_c = C \frac{dV}{dt}$  (ja slodzei ir kapacitīvs raksturs) vai arī kāda cita nelineāra sakarība.

Tālākā aprakstā tiks izmantota informācija no literatūras [9], [10], [11]. 5. attēlā parādītā shēma var tikt izmantota, lai vadītu  $dv/dt$  IGBT slēgšanās laikā. Rezistors  $R_G$  ir draivera virknes rezistors,  $R_{GD} \ll R_G$  ir maza nomināla rezistors, kurš tiek pieslēgts virknē  $C'_{gc}$ , lai slāpētu nevēlamās augstākās frekvences svārstības. Aizvara (gate) pretestība ir jāizvēlas ar lielāku vērtību nekā to izvēloties tradicionālā slēguma gadījumā, jo šī vērtība noteiks  $C'_{gc}$  uzlādes straujumu.



6. att. Aptuvenie procesi piedāvātajā shēmā

6. attēlā parādīti aptuvenie procesi, papildinot IGBT tradicionālo draiveri ar papildus elementiem. Šīs līknes tiks analizētas, lai noteiktu nepieciešamo elementu vērtības. Reģiona 1 tiek uzlādēta ekvivalentā ieejas kapacitāte, kuru šai gadījumā lielākoties nosaka  $C'_{gc}$ , šī konstantā kapacitāte dod lineāri augošu aizvara strāvu un spriegums  $V_{GE}$  aug eksponenciāli. Tranzistora ieslēgšanās aizkave ir laiks, kas nepieciešams, lai uzlādētu spriegumu starp aizvaru un emiteru līdz sliekšņa spriegumam  $V_{th}$ . Šo laiku nosaka aizvara (gate) pretestība  $R_G$ ,  $C_{ge}$ ,  $C'_{gc}$ , draivera spriegums.

Reģionā 2 tranzistors sāk atvērties, kolektora strāvas izmaiņu var aprakstīt ar šādu izteiksmi:

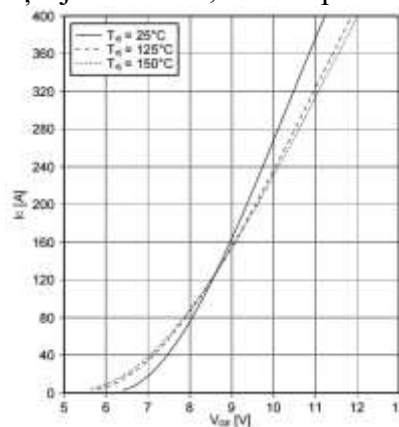
$$\frac{dI_{colector}}{dt} = g_f \cdot \frac{dV_{GS}}{dt} \quad (1)$$

kur  $g_f$  ir šķērsvadītspēja, lai nodrošinātu kolektora strāvu. Šī laika perioda robežās kolektora spriegums ir tuvu konstantam.

Reģionā 3 notiek  $V_{CE}$  pāreja uz piesātināšanās režīmu līdz kolektora strāva ir sasniegusi nominālo slodzes strāvu,  $V_{GE}$  paliek  $V_{plt}$  līmenī.  $V_{CE}$  samazinās lineāri arī 3 reģionā atšķirībā no 4. attēlā parādītā. Pilnīga tranzistora atvēršanās ir pabeigta kad  $V_{CE}$  ir sasniedzis 10 procentus. Tā kā kolektora strāva ir konstanta šajā reģionā, tad  $V_{GE}$  (šajā gadījumā tas ir  $V_{plt}$ ) var aprēķināt sekojoši:

$$V_{plt} = V_{th} + \frac{I_{parslodzes}}{g_f} \quad (2)$$

$I_{parslodzes}$  - maksimāli pieļaujamā strāva, kuru nepieciešams ierobežot.



7. att. FF200R17KE4 IGBT tranzistora voltampēru raksturlikne [12]

Spriegums  $V_{plt}$  aprēķinam nepieciešamo vadītspēju var noteikt no ražotāju dokumentācijā pieejamās IGBT voltampēru raksturliknes, kas ir redzama 7. att.:

$$g_f = \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{GE}} \right|_{V_{CE}=\text{const.}} \quad (3)$$

Tā kā  $V_{GE}=V_{plt} = \text{const.}$  reģionā 3, tad aizvara strāva var tikt izteikta šādi:

$$I_g = \frac{(V_{gate} - V_{plt})}{R_G} \quad (4)$$

Tā kā šīs strāvas lielākā daļa plūst caur kapacitāti  $C'_{gc}$ , tad iepriekš uzrakstītās izteiksmes var pārveidot:

$$I_{gd} \approx C'_{gd} \frac{dV_{DE}}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{dV_{DE}}{dt} = \frac{I_G}{C'_{GC}} = \frac{(V_{gate} - V_{plt})}{R_G \cdot C'_{gc}} \quad (6)$$

$$\frac{dV_{DE}}{dt} = \frac{V_{gate} - V_{plt}}{R_G \cdot C'_{ge}} \quad (7)$$

Reģionā 4  $V_{CE}$  sasniedz piesātinājuma spriegumu  $V_{sat}$ ,  $V_{GE}$  turpina pieaugt līdz sasniedz draivera barošanas sprieguma vērtību  $V_{gate}$ .

Lai noteiktu papildus slēdzamo elementu vērtības, ir jānosaka nepieciešamais tranzistora aktīvā režīma laiks, ja slodze ir kapacitīva, tad šo laiku var noteikt pēc sekojošas izteiksmes:

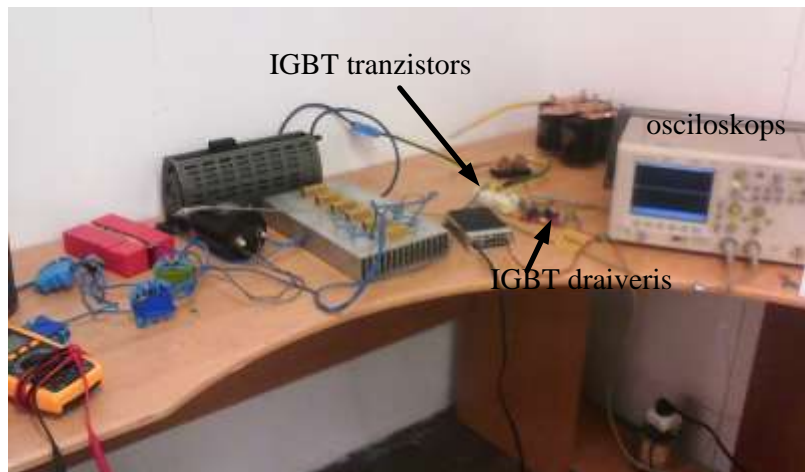
$$dt = C_{slodzes} \cdot \frac{V_{DC}}{I_{pielaujama}} \quad (8)$$

Tālāk ir iespējams aprēķināt nepieciešamo "platto" spriegumu, izmantojot datu lapas parametrus un izteiksmi (2). Kapacitāti  $C'_{gc}$  izvēlas izejot no sekojoša apsvērums:  $C'_{gc} \gg C_{ge} + C_{gc}$ . Izmantojot izteiksmi (5), var tikt aprēķināta nepieciešamā aizvara (gate) strāva  $I_g$ . Zinot šo strāvu, var tikt aprēķināta nepieciešamā  $R_G$  vērtība:

$$R_G = \frac{V_{gate} - V_{plt}}{I_g} \quad (9)$$

$R_{GD}$  vērtību izvēlas no nosacījuma, lai izpildās:  $R_G \gg R_{GD}$ .

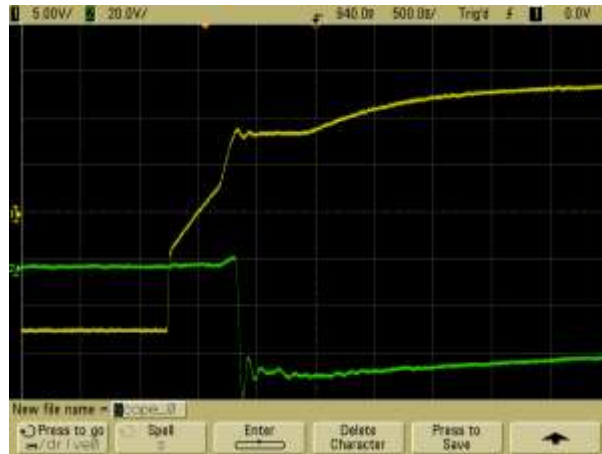
### Rezultāti



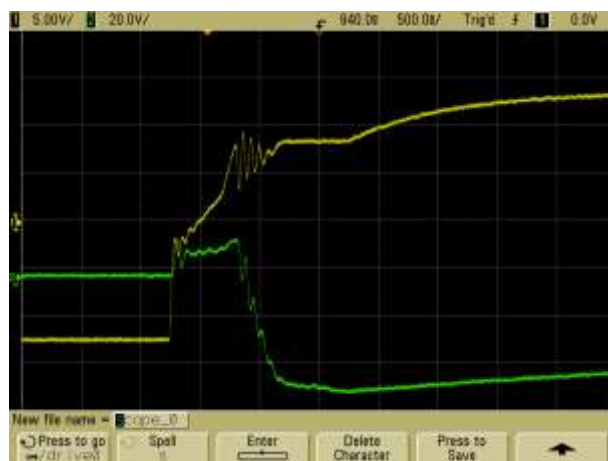
8. att. Eksperiments ar FF200R17KE4 IGBT lineārajā režīmā

Lai pārbaudītu iepriekš apskatīto shematisko risinājumu praksē tika izveidota 8. attēlā parādītā shēma, kas sastāv no slodzes, IGBT tranzistora un draivera ar barošanas avotu. Papildus tradicionālajam draiverim tika palielināta aizvara pretestība, aprēķinot to pēc formulas 7.9. un pieslēgts papildus kondensators  $C'_{gc}$ . Šādu slēgumu var izmantot tajā gadījumā, ja slodze ir nelineāra - slodzes ekvivalentā pretestība ir maza uzreiz pieslēdzot spriegumu - šāds process ir novērojams pieslēdzot lielas kapacitātes kondensatoru līdzspriegumam. Vai arī otrs gadījums,

kad šāda shēma var tikt pielietota, ir tad, ja ar ātrdarbīgu analogu shēmu tiek detektēta pārlietu liela strāva, šī shēma padod impulsu uz draivera shēmu aizvērt tranzistoru. Tranzistors tiek vērts ciet lineārajā režīmā, ko var panākt ar papildus kapacitāti starp emiteru un aizvaru  $C'_{ge}$ , kad strāva samazinās līdz pieļaujamajam līmenim, tad signāls no pārstrāvas aizsardzības devēja pazūd un IGBT tranzistors tiek atvērts lēnām ierobežojot strāvu. Lineārā režīma ilgums var tikt aprēķināts, zinot mikroloka oksidācijas procesa aptuveno ilgumu, tādējādi pietiekami precīzi šādā veidā var tikt ierobežota strāvas pīķa vērtība.



9. att. Eksperiments ar IGBT tranzistoru ieslēgšanu bez papildus kondensatora ( $V_{GE}$  - dzeltenā krāsā,  $i_C$  - zaļā līkne)



10. att. Eksperiments ar FF200R17KE4 IGBT lineārajā režīmā, pieslēdzot papildus kondensatoru  $C'_{gc}$  ( $V_{GE}$  - dzeltenā krāsā,  $i_C$  - zaļā līkne)

Vispirms tika veikts eksperiments bez šī papildus kondensatora, kā redzams 9. attēlā. Izmantojot iepriekš aprakstīto papildus kondensatora  $C'_{gc}$  pieslēgumu draiverim, tika iegūtas līknes, kas ir redzamas 10. attēlā. No līknēm ir redzams, ka šādā veidā var tikt ierobežots strāvas pieaugums, izmantots tranzistora lineārais režīms, lai ierobežotu pārstrāvu nelineāras slodzes gadījumā.

Kā trūkumu šādai shēmai var minēt to, ka draiverim ir nepieciešama lielāka jauda, ir lielāki zudumi, jo jāpārlādē lielākas kapacitātes kondensators, taču jauda, kas tiek zaudēta draivera shēmā ir daudzas reizes mazāka nekā gadījumā, ja strāvas ierobežošanai tiek izmantots strāvu ierobežojošais rezistors.





**11. att. Tradicionālais priekšuzlādes rezistors ar releju un rakstā apskatītās metodes pielietojums, izmantojot MOSFET tranzistoru ar draiveri**

Tāpat tika izmēģināta MOSFET tranzistora izmantošana priekšuzlādes rezistora vietā kondensatora filtra uzlādei, abi risinājumi ir parādīti 11. attēlā. Rezistora pieslēgšanai tiek izmantots relejs, kad priekšuzlāde ir beigusies, rezistora šuntēšanai tiek izmantots kontaktors, kura komutācijai arī var izmantot releju. Savukārt otrajā gadījumā ir izmantots MOSFET tranzistors ar draiveri un papildus kondensatoru, lai nodrošinātu vēlamo lineārā režīma laiku. Tranzistors ir jāpapildina ar pietiekošas termālās vadītspējas radiatoru, jo lineārā režīma jauda tiek izkliedēta tranzistorā, taču šis process ir īss.

### Secinājumi

- Filtra uzlāde vai mikroloka oksidācija ir procesi, kuros ir nepieciešama strāvas ierobežošana, joprojām plaši šim nolūkam tiek izmantotas pasīvās metodes.
- IGBT un MOSFET tranzistori, papildinot tos ar nelielu skaitu pasīvo elementu var tikt izmantoti, lai ierobežotu pārstrāvu filtru uzlādei vai arī citos dinamiski mainīgas slodzes gadījumos, piemēram, mikroloka oksidācijas procesā.
- Izmantojot tranzistorus lineārajā režīmā jāreķinās ar papildus siltuma izdalīšanos pusvadītājā, tāpēc tranzistors atbilstoši jādzesē.
- Papildus būtu jāpēta tas, vai elektromagnētiskie traucējumi neizsauc patvaļīgu tranzistora izslēgšanos.

### Summary

In the power supply designs, the large input filter capacitors it is used. The series resistance of the capacitor is low therefore it behaves like short circuits during initial power up of the power supply, this current can destroy the semiconductor devices, burn out the fuses or false trigger the circuit breakers. Traditionally, most of the inrush current limiting is done by using a inductor, or resistors in series with the capacitors, or NTC resistor. Depending on the power rating of these devices, its physical size becomes significant.

In the paper it is analyzed possibility to use IGBT or MOSFET transistors to make active current limiting. An external capacitor is added to the gate–drain to change time during which transistor works in active region thus limiting of the overcurrent. In the paper it is shown equations that can be used to calculate values of necessary addition components. The method is applied to limit overcurrent in the microarc oxidation process and shows good results. Also current limiting device is build to replace traditional current limiting resistor with electromechanical relay control.

### Literatūra

1. Michael Raspotnig “Power supplies with significantly reduced inrush current” [Online]. Available: [http://www.pulspower.com/pdf/an30.01\\_en.pdf](http://www.pulspower.com/pdf/an30.01_en.pdf). [Accessed: 10-Mar-2016].

2. EPCOS “NTC thermistors for inrush current limiting, leaded and coated disks” [Online]. Available: [http://en.tdk.eu/inf/50/db/icl\\_13/B57237\\_S237.pdf](http://en.tdk.eu/inf/50/db/icl_13/B57237_S237.pdf). [Accessed: 10-Mar-2016].
3. Seshadri Seetharaman “Fundamentals of Metallurgy” [Online]. Available: [http://steelcast.ru/d/80122/d/fundamentals\\_of\\_metallurgy.pdf](http://steelcast.ru/d/80122/d/fundamentals_of_metallurgy.pdf). [Accessed: 08-Mar-2016].
4. S. Huang and L. Zhou, “Structure and properties of ceramic coating on Al alloy by plasma microarc oxidation,” in 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2010, pp. 3195–3198.
5. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). М.:ЭКОМЕТ, 2005. 368 с.
6. Гордиенко П.С. Электрохимическое формирование покрытий на алюминии и его сплавах при потенциалах искрения и пробоя. Владивосток, Дальнаука, 1999 –232с.
7. Казанцев И.А., Кривенков А.О. Технология получения композиционных материалов микродуговым оксидированием: монография / И.А. Казанцев, А.О. Кривенков. – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2007.–240 с.
8. Abdus Sattar “Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Basics” [Online]. Available: [http://www.ixys.com/documents/appnotes/ixys\\_igbt\\_basic\\_i.pdf](http://www.ixys.com/documents/appnotes/ixys_igbt_basic_i.pdf). [Accessed: 10-Mar-2016].
9. A. Volke and M. Hornkamp, IGBT Modules - Technologies, Driver and Application, 1st ed. Infineon Technologies AG, Munich, 2011.
10. C. Licitra, S. Musumeci, A. Raciti, A. U. Galluzzo, R. Letor, and M. Melito, “A new driving circuit for IGBT devices,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 10, no. 3, pp. 373–378, May 1995.
11. C. S. Mitter “Active inrush current limiting using MOSFETs” [Online]. Available: <http://www.bonavolta.ch/hobby/files/MotorolaAN1542.pdf>. [Accessed: 10-Mar-2016].
12. Infineon “Datasheet FF200R17KE4” [Online]. Available: [http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF200R17KE4-DS-v02\\_02-en\\_de.pdf?fileId=db3a3043293a15c401293a9dbf5e0018](http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF200R17KE4-DS-v02_02-en_de.pdf?fileId=db3a3043293a15c401293a9dbf5e0018). [Accessed: 08-Mar-2016].