

Electronics and electrical engineering Elektronika ir elektros inžinerija

DIDELĖS GALIOS MIKROSEKUNDINIŲ IMPULSŲ GENERATORIUS

Martynas ŠAPUROV ^{1*}, Aldas DERVINIS ², Edvardas BIELSKIS³, Vytautas BLEIZGYS ⁴

^{1, 2, 3}Fizinių ir technologijos mokslų centras, Vilnius, Lietuva

^{1, 4}Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

³Šiaulių universitetas, Šiauliai, Lietuva

Gauta 2019 m. spalio 30 d.; priimta 2019 m. lapkričio 7 d.

Santrauka. Darbe pateikti didelės galios mikrosekundinių impulsų generatoriaus kūrimo ir tyrimo rezultatai. Generatorius skirtas elektroporacijai, t. y. ląstelių poveikiui trumpu stipriu elektrinio lauko impulsu. Jo generuojamų impulsų amplitudė yra 50–3500 V, tiekiamą į apkrovą srovė – iki 250 A, impulsų trukmė – $3 \mu\text{s}^{-1}$ ms. Pateikti generatoriaus sprendimai ir jo tyrimų rezultatai gauti modeliuojant bei eksperimentiškai.

Reikšminiai žodžiai: dvitaktis keitiklis, generatorius, elektroporacija, didelės galios impulsas.

Įvadas

Darbe pateikti didelės galios mikrosekundinių impulsų generatoriaus kūrimo ir tyrimo rezultatai. Generatorius skirtas elektroporacijai, t. y. ląstelių poveikiui trumpu stipriu elektrinio lauko impulsu. Formuojant elektrinį lauką elektroporacijai būtina atsižvelgti ne tik į pagrindinius generuojamų impulsų parametrus: impulso amplitudę ir trukmę, bet ir į impulso formos parametrus: kylančio ir besileidžiančio fronto statumą bei impulso amplitudės stabilumą. Šiame darbe pristatytas didelės galios mikrosekundinių impulsų generatorius, sukurtas Fizinių ir technologijos mokslų centro Elektroninių sistemų laboratorijoje. Jis taikomas bioelektrocheminiams tyrimams.

1. Didelės galios mikrosekundinių impulsų generatoriaus kūrimas

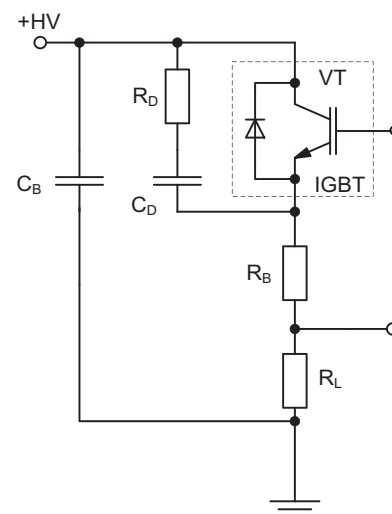
Tinkamus didelės galios mikrosekundinių impulsų parametrus: reikiamą kylančio ir besileidžiančio frontų statumą, impulso amplitudės stabilumą, impulsų atsikartojamumą – galima užtikrinti taikant impulsams formuoti MOSFET arba IGBT tranzistorių raktus.

Vientaktis impulsų generatorius

Vientakčio impulso generatoriaus (angl. *high side switch*) schema raktui realizuoti naudojamas vienas IGBT tran-

zistorius. Vientakčio impulsų generatoriaus principinė elektrinė schema pateikiama 1 paveiksle (Behlke Power Electronics GmbH, 2014).

Vientakčio impulso generatoriaus schemoje (1 paveikslas) C_B yra buferinis kondensatorius, montuojamas kuo arčiau tranzistoriaus, skirtas parazitinio induktyvumo sukeltiems viršįtampiams (angl. *flyback voltages*)



1 paveikslas. Vientakčio impulsų generatoriaus principinė elektrinė schema

Figure 1. The circuit diagram of high-side switch

*Autorius susirašinėti. El. paštas martynas.sapurov@vgtu.lt

panaikinti (Behlke Power Electronics GmbH, 2014). Viršįtamčio amplitudė

$$U_i = L di / dt,$$

čia U_i – viršįtamčio amplitudė; L – parazitinis induktyvumas (angl. *stray inductance*); di / dt – srovės, tekančios per apkrovą R_L , laiko išvestinė.

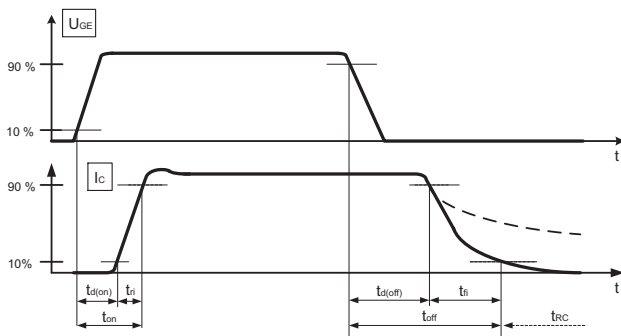
C_B turi būti beinduktyvis kondensatorius, tinkamą šio kondensatoriaus talpą lemia spausdintinės plokštės konstrukciniai sprendimai (laidininkų ilgis, linkimo kampas, atstumas tarp laidininkų). Šio kondensatoriaus talpa parenkama priartėjimo metodu. Kondensatorius C_D ir rezistorius R_D sudaro nuosekliają RC grandinę (angl. *RC snubber scheme*), prijungtą tarp tranzistoriaus kolektoriaus ir emiterio išvadų. RC grandinėle skirta tranzistoriaus U_{CE} viršįtampiams mažinti, R ir C nominalai parenkami konkrečiam tranzistoriui, atsižvelgiant į gamintojo pateikiamus tranzistoriaus parametrus (Hickman ir Cook, 2001). Kondensatorius C_D parenkamas beinduktyvis, diskinės konstrukcijos, rezistorius R_D taip pat parenkamas beinduktyvis. Rezistorius R_B yra balastinis, skirtas tranzistoriaus srovei I_{CE} apriboti. Rezistorius R_L yra apkrovos, kurią sudaro mėginio indas, elektroporacijoje vadinamas kiuvete, varža (Saulis et al., 2012). Impulsinei srovei tekant per kiuvetėje elektroporuojamą medžiagą, priklausomai nuo elektroporuojamos medžiagos, kinta R_L parametrai. Vientakčio generatoriaus impulso forma pateikiama 2 paveiksle (STMicroelectronics, 2014).

Impulsuose, pateiktuose 2 paveiksle, I_C yra tranzistoriaus kolektoriaus grandinės srovė, tekanti per apkrovą R_L , U_{GE} yra tranzistoriaus užtūros ir emiterio įtampa, valdanti tranzistorių. Tranzistoriaus atidarymo t_{on} ir uždarymo t_{off} laikai apskaičiuojami šiomis formulėmis (STMicroelectronics, 2014):

$$t_{on} = t_{d(on)} + t_{ri},$$

$$t_{off} = t_{d(off)} + t_{fi} + t_{RC},$$

čia $t_{d(on)}$ – įjungimo vėlinimo laikas (angl. *turn-on delay*); t_{ri} – srovės I_C kilimo laikas (angl. *current rise time*); $t_{d(off)}$ – išjungimo vėlinimo laikas (angl. *turn-off delay*); t_{fi} – srovės I_C kritimo laikas (angl. *current fall time*); t_{RC} – apkrovos R_L laiko pastovioji $\tau = RC$.



2 paveikslas. Vientakčio generatoriaus formuojamo impulso įtampos ir srovės forma

Figure 2. The shape of voltage and current pulses formed using high-side switch

Dydžiai $t_{d(on)}$, t_{ri} , $t_{d(off)}$, t_{fi} yra dinaminiai tranzistoriaus parametrai, nepriklausantys nuo apkrovos R_L (Rebersek et al., 2014). Laiko pastovioji t_{RC} kinta srovei I_C tekant per rezistorių R_L ir turi įtakos impulso formai. 2 paveiksle impulso srovė I_C pateikiama vientisa linija, kai R_L yra induktyvinio pobūdžio, ir punktyrine linija, kai R_L yra talpinio pobūdžio, impulso galinis frontas yra lėkštas ir priklauso nuo R_L , todėl jo formos neįmanoma valdyti.

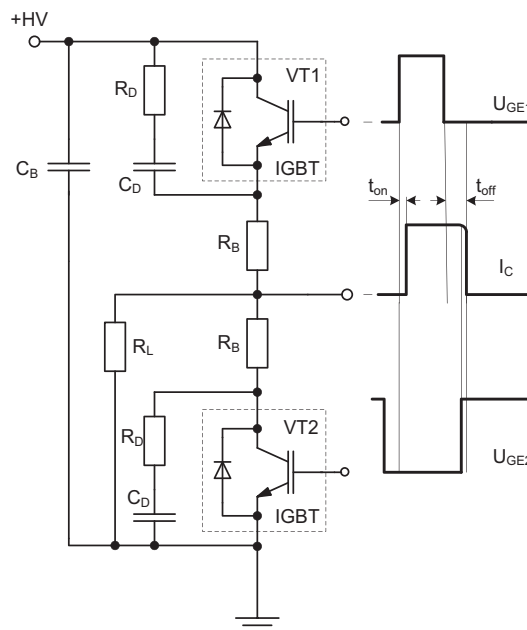
Dvitaktis impulsų generatorius

Taisyklingos formos impulsams, nepriklausantiems nuo apkrovos R_L , generuoti naudojamas dvitaktis (angl. *push-pull*) impulsų generatorius. Dvitakčiame generatoriujie naudojami du MOSFET arba IGBT tranzistoriai, veikiantys rakto režimu (3 paveikslas). Viršutinis generatoriaus tranzistorius naudojamas kylančio, apatinis – besileidžiančio impulso frontams formuoti. Dvitakčio impulsų generatoriaus principinėje elektrinėje schemoje U_{GE1} yra viršutinio tranzistoriaus, o U_{GE2} – apatinio tranzistoriaus valdymo įtampos (Behlke Power Electronics GmbH, 2014).

Naudojant dvitaktį generatorių, tranzistorius VT2 įjungiamas tuoj pat po to, kai tranzistorius VT1 uždarymas, momentiniam apkrovos R_L talpumo iškrovimui. Šiuo atveju besileidžiantis impulso frontas yra pastovus, nepriklausantis nuo apkrovos R_L . Išjungimo laikas t_{off} apskaičiuojamas formule:

$$t_{off} = t_{d(off)} + t_{fi} / 2,$$

čia $t_{d(off)}$ – išjungimo vėlinimo laikas (angl. *turn-off delay time*), t_{fi} – srovės I_C kritimo laikas (angl. *current fall time*).



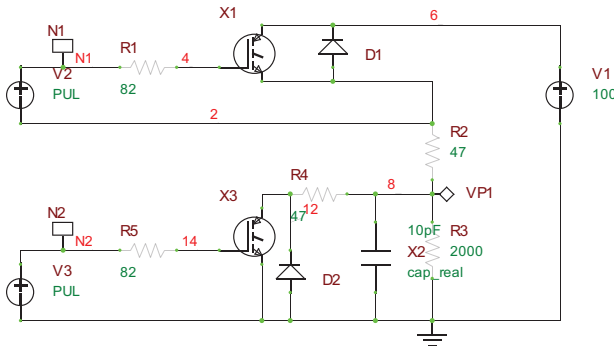
3 paveikslas. Dvitakčio impulsų generatoriaus principinė elektrinė schema

Figure 3. The circuit diagram of push-pull switch

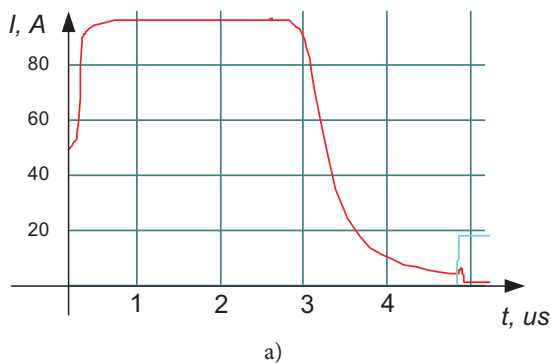
Dvitakčio generatoriaus išjungimo laikas t_{off} nepriklauso nuo apkrovos R_L laiko pastoviosios t_{RC} , todėl galima pasiekti statesnį besileidžiantį impulso frontą.

2. Vientakčio ir dvitakčio generatorių tyrimas modeliuojant

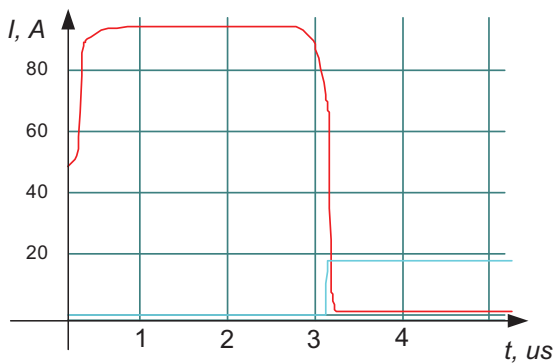
Vientakčio ir dvitakčio keitiklių tyrimas modeliuojant buvo atliktas *B2Spice* modeliavimo aplinkoje. *B2Spice* modelis pateikiamas 4 paveiksle, modeliavimo rezultatai – 5 paveiksle.



4 paveikslas. *B2Spice* dvitakčio generatoriaus modelis
Figure 4. *B2Spice* model of push-pull switch



a)



b)

5 paveikslas. Vientakčio generatoriaus (a) ir dvitakčio generatoriaus (b) suformuoti srovės impulsai (raudona spalva) ir tranzistorių valdymo įtampa (žydra spalva)
Figure 5. Current pulses (red) and gate-emitter voltages (blue) of the high-side (a) and push-pull (b) switches

B2Spice modelyje V1 – komutuojamos įtampos šaltinis (modeliuojant pasirinkta 100 V įtampa), V2, V3 – tranzistorius valdantys įtampos šaltiniai; X1, D1 ir X3, D2 IGBT tranzistoriai su atbulinę įtampą šuntuojančiais diodais; R1, R5 – užtūros srovės ribojimo rezistoriai; R2, R4 – balastiniai rezistoriai; R3, X2 – grandinė, imituojanti apkrovą R_L . Elektroporacijoje impulso srovė I_c siekia iki 250 A, todėl modeliuojant pasirinktas IGBT puslaidininkinis tranzistorius, kurio maksimali impulso srovė I_{max} siekia 400 A.

Modeliuojant įrodyta, kad, taikant dvitaktį impulsų generatorių, besileidžiantis frontas yra valdomas – galima pasiekti statesnį besileidžiantį frontą, nei taikant vientaktį generatorių.

3. Didelės galios mikrosekundinių impulsų generatorius

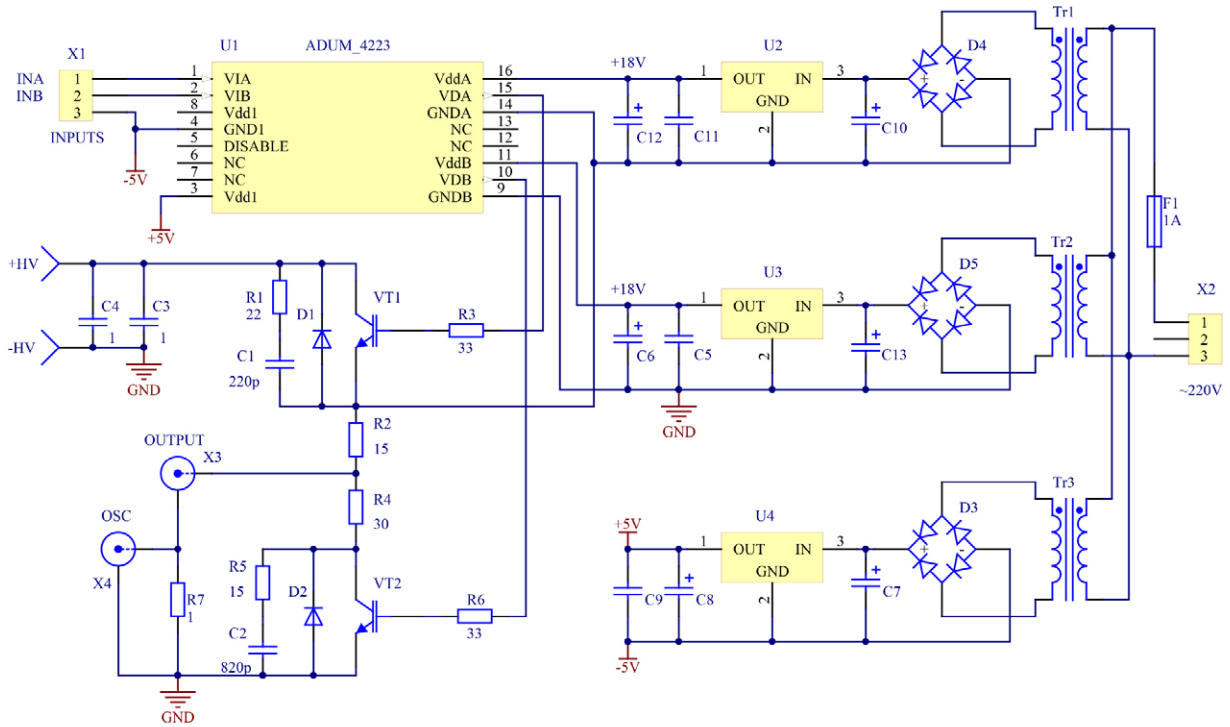
Didelės galios mikrosekundinių impulsų generatorius, pristatomas šiame darbe, buvo sukurtas naudojant dvitakčio generatoriaus principą. Sukurto generatoriaus tyrimui buvo suprojektuotas tyrimų maketas. Generatoriaus principinė elektrinė schema pateikiama 6 paveiksle.

Didelės galios impulsų generatoriaus tyrimų makete valdymo grandinėms maitinti naudojamos trys atskiros maitinimo grandinės +5 V – tranzistoriaus valdiklio ADUM 4223 maitinimo įtampa, dvi galvaniškai izoliuotos +18 V IGBT tranzistorių VT1 ir VT2 valdymo įtampos, R3, R6 – užtūros srovės ribojimo rezistoriai, VT1, D1 ir VT2, D2 – IGBT tranzistoriai ir jų šuntavimo diodai, R1, C1 ir R5, C2 – RC grandinės, skirtos tranzistorių U_{CE} viršįtampiams mažinti, C3, C4 – balastiniai kondensatoriai, R2, R4 – balastiniai rezistoriai, R7 – srovės matavimo šunto rezistorius. VT1 ir VT2 – IXYS Corporation IGBT IXEL40N400 tranzistoriai (IXYS Corporation, 2012). Šių tranzistorių maksimali komutuojama įtampa – 4000 V, maksimali impulsinė srovė – 400 A, įjungimo t_{on} – 260 ns ir išjungimo t_{off} – 842 ns laikas, todėl šie tranzistoriai tinka generuoti didelės galios impulsams.

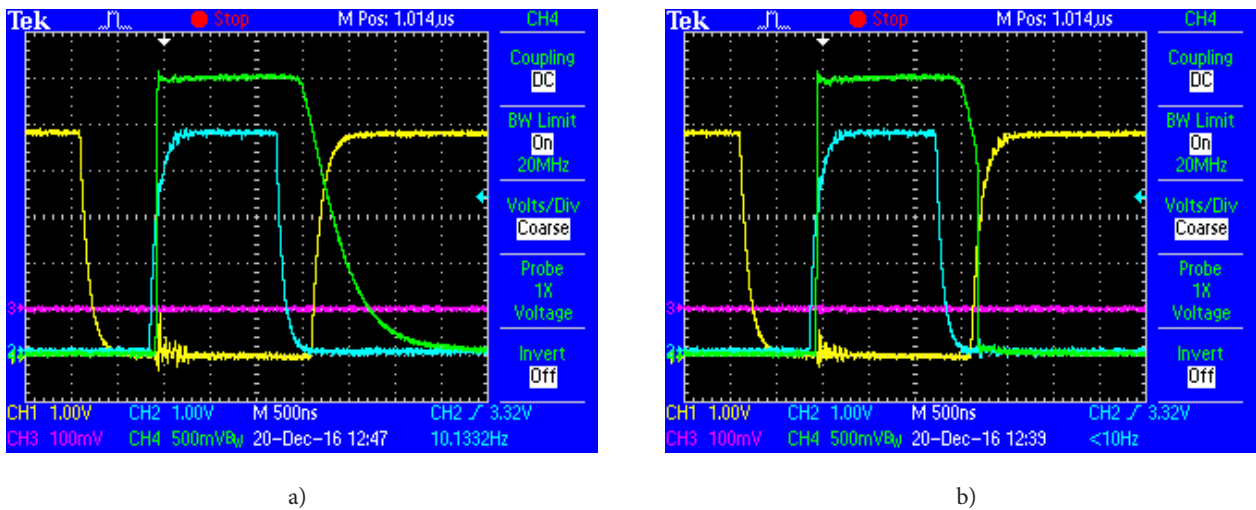
Eksperimentiškai ištirti: vientaktis impulsų generatorius (tyrimui buvo atjungtas apatinis tranzistorius) ir dvitaktis impulsų generatorius. Eksperimentų rezultatai pateikiami 7 paveiksle, žalia spalva pateikiama impulso srovė I_c , žydra – viršutinio tranzistoriaus valdymo įtampa U_{GE1} , geltona – apatinio tranzistoriaus valdymo įtampa U_{GE2} . Eksperimentiškai įrodyta, kad, naudojant dvitaktį impulsų generatorių, besileidžiantis frontas statesnis, nei naudojant vientaktį generatorių. Besileidžiantis frontas yra valdomas apatiniu tranzistoriumi ir nepriklauso nuo apkrovos R_L .

Išvados

Skirtingai nuo vientakčio generatoriaus, dvitaktis generatorius leidžia valdyti ne tik kylantį, bet ir besileidžiantį srovės impulso frontą. Dvitakčio generatoriaus suformuoto impulso besileidžiantis srovės impulso frontas yra stabilus ir nepriklauso nuo apkrovos.



6 paveikslas. Didelės galios impulsų generatoriaus tyrimų maketo principinė elektrinė schema
Figure 6. Circuit diagram of high power switch test bench



7 paveikslas. Vientakčio generatoriaus (a) ir dvitakčio generatoriaus (b) srovė (žalia) ir tranzistorių valdymo įtampos U_{GE1} (žydra), U_{GE2} (geltona)
Figure 7. Current (green) and transistors control voltages U_{GE1} (blue), U_{GE2} (yellow) of high-side (a) and push-pull (b) switches

Pagrindinės sukurto didelės galios mikrosekundinių impulsų generatoriaus savybės:

- generuojamo impulso trukmė – nuo $3\mu\text{s}$ iki 1ms , įtampa srovės impulso metu – nuo 50V iki 3500V , impulso srovė iki 250A ;
- impulsams generuoti pritaikytas dvitakčio generatoriaus principas. Jam realizuoti panaudoti IGBT tranzistorių raktai.

Literatūra

- Behlke Power Electronics GmbH. (2014). *Fast high voltage transistor switches: model Series HTS*. Behlke Power Electronics GmbH.
- Hickman, B. C., & Cook, E. G. (2001). Evaluation of MOSFETs and IGBTs for pulsed power applications. In *Proceedings of the PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science 2001. 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE In-*

- ternational Pulsed Power Conference. *Digest of Papers* (Cat. No. 01CH37251) (pp. 1047–1050, Vol. 2), Las Vegas, NV, USA.
- IXYS Corporation. (2012). *Very high voltage IGBT IXEL40N400*. IXYS Corporation.
- Rebersek, M., Miklavcic, D., Bertacchini, C., & Sack, M. (2014). Cell membrane electroporation-Part 3: the equipment. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 3(30), 8–18. <https://doi.org/10.1109/MEI.2014.6804737>
- Saulis, G., Žurauskienė, N., Stankevič, V., Stirkė, A., Zimkus, A., Novickij, V., Dervinis, A., Stirkiene, B., Saulė, R., Bleizgys, V., Biziulevičienė, G., Kašėta, V., Levitas, B., Naidionova, I., Konakov, A., Dvoreckij, V., Ščerbak, I., & Savickaja, M. (2012). *Gyvųjų ląstelių nanoelektroporatorius (bionanopore)* (metinė ataskaita). Mokslo, inovacijų ir technologijų agentūra.
- STMicroelectronics. (2014). *AN4544 application note IGBT datasheet tutorial* (DocID026535 Rev 1). STMicroelectronics.

DEVELOPMENT OF HIGH POWER MICROSECOND PULSE GENERATOR

M. Šapurov, A. Dervinis, E. Bielskis, V. Bleizgys

Abstract

The developed high power microsecond pulse generator ($U = 50\text{--}3500\text{ V}$, $I < 250\text{ A}$, $t = 3\text{ }\mu\text{s--}1\text{ ms}$) based on the push-pull inverter has been presented. The generator is developed for the electroporation of biological cells. The high power microsecond pulse generator was tested using simulation and experimental investigation.

Keywords: push-pull inverter, switch, electroporation, high power pulse.