

## Electronics and electrical engineering Elektronika ir elektros inžinerija

### DAUGIASLUOKSNIO PLANARINIO INDUKTORIAUS TYRIMAS

Audrius LUČINSKIS\*

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

Gauta 2018 m. birželio 14 d.; priimta 2018 m. birželio 20 d.

**Santrauka.** Nagrinėjamas mikrosekundinės trukmės magnetinių impulsų iki 1T generavimas. Pateikta daugiasluoksnio planarinio induktoriaus konstrukcija, leidžianti gauti homogenišką 1T magnetinį lauką. Straipsnyje pateikti elektromagnetinio lauko pasiskirstymo ir induktoriaus išilimo skaičiavimo rezultatai, pasiūlyta konstrukcija su  $Al_2O_3$  padėklų išilimui sumažinti.

**Reikšminiai žodžiai:** planarinis induktorius, magnetinis laukas, IGBT, baigtinių elementų metodas, šilumos pasiskirstymas.

#### Įvadas

Impulsiniai magnetiniai laukai yra plačiai taikomi įvairiose mokslo srityse. Pastaruoju metu vis daugiau susidomėjimo sulaukia impulsinių magnetinių laukų pritaikymas biomedicinoje.

Biomedicinoje naudojami impulsiniai magnetiniai laukai nuo 40 mT iki 10 T (Matthew et al., 2008; Liu et al., 2012; Kardos ir Rabussay, 2012). Pagrindinis tikslas – ištirti kaip impulsinis magnetinis laukas veikia skirtingų rūšių biologines ląsteles, biocheminių reakcijų eigą, aktyviųjų medžiagų pernašą, padidina membranos pralaidumą. Taip pat impulsiniai elektromagnetiniai laukai naudojami tiriant ląstelių gyvybingumą, vaistų ir kitų cheminių medžiagų transportavimo galimybes ląstelių lygmenyje.

Impulsiniams magnetiniams laukams, kurių impulsų trukmė yra mikrosekundžių ruože, generuoti naudojami didelės galios IGBT raktai, kurie puikiai tinka impulsiniams generatoriams, kai reikia komutuoti kA eilės srovės kHz dažniu. Stipriam impulsiniam magnetiniam laukui generuoti reikalingos kA eilės srovės, tam raktai turi būti jungiami nuosekliai ir lygiagrečiai būtinai galiai pasiekti.

Impulsinių magnetinių laukų pritaikymas siekiant pralaidinti ląstelių membranas sulaukė dar didesnio dėmesio, kai buvo pastebėta, kad elektroporacijos metu tarp elektrodų ir bandinių vyksta elektrocheminiai vyksmai, kurie neigiamai veikia gaunamus rezultatus (Reberšek ir Miklavčič, 2011).

Impulsinių magnetinių laukų poveikis biologiniams objektams yra bekontaktis, todėl tokia technologija turi didelį taikymo potencialą.

#### 1. Induktoriaus parametrų skaičiavimas

Pagrindiniai induktoriaus parametrai, kurie lemia impulso trukmę ir formą, yra induktoriaus induktyvumas ir jo aktyvioji varža. Induktoriaus induktyvumas apskaičiuojamas pagal toliau pateiktą formulę:

$$L = \mu_0 \mu_r N^2 \frac{d}{h}, \quad (1)$$

čia  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m – vakuomo magnetinė skvarba;  $\mu$  – santykinė skvarba;  $N$  – vijų skaičius;  $d$  – ritės skersmuo;  $h$  – ritės aukštis.

Tačiau ši formulė taikoma tik tuomet, kai  $d \ll h^2$ . Šiame darbe naudojamos ritės skersmuo – 3 mm, o aukštis – 0,1 mm, todėl šis skaičiavimo metodas netinka. Todėl mikroinduktoriaus induktyvumui skaičiuoti naudojama Wheelerio formulė:

$$L = \frac{10\pi\mu_0 N^2 r^2}{9r + 10h}, \quad (2)$$

čia  $r$  – induktoriaus spindulys, kiti parametrai identiški (1).

Induktoriaus aktyviosios varžos dydis gali būti apskaičiuotas pagal tolesnę formulę:

$$R_L = R_{DC} \left( 1 + P_1 + u_{eff} P_2 \left[ \frac{\delta}{p} \right]^2 \right), \quad (3)$$

čia  $P_1$  ir  $P_2$  – nuo dažnio priklausantys paviršinio ir artumo efekto veiksniai;  $u_{eff}$  – geometrinis didinimo daugiklis;  $\delta$  – laido skersmuo;  $p$  – tarpas tarp dviejų ritės vijų.

\*Autorius susirašinėti. El. paštas [audrius.lucinskis@vgtu.lt](mailto:audrius.lucinskis@vgtu.lt)

## 2. Magnetinio lauko skaičiavimas

Induktorių laikant uždaru vienos vijos kontūru, magnetinio srauto tankis, kurį sukuria srovė  $I$  atkarpoje  $dl$ , apskaičiuojamas pagal Biot-Savart'o dėsnį (Grainys, 2012):

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{1}{r^2} dl \times \vec{r}. \quad (4)$$

Vienos vijos induktoriaus, kurio spindulys  $R$ , ašinis magnetinio srauto tankis apskaičiuojamas taip:

$$B(z) = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{2\pi R^2}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (5)$$

Tokiu atveju magnetinio srauto tankis induktoriaus centre, kai  $z = 0$ , skaičiuojamas pagal formulę:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad (6)$$

Esant keliems induktoriams, suminis magnetinio srauto tankis gali būti apskaičiuotas pagal superpozicijos principą (Grainys ir Novickij, 2010):

$$|H| = \sqrt{\left(\sum_{m=1}^n H_{m,x}\right)^2 + \left(\sum_{m=1}^n H_{m,y}\right)^2 + \left(\sum_{m=1}^n H_{m,z}\right)^2}, \quad (7)$$

čia  $H_x, H_y, H_z$  – magnetinio lauko dedamosios  $x, y, z$  ašimis.

Tekant 1 kA srovei induktoriuje išsiskiria šiluma, kuri gali būti apskaičiuota pagal (V. Novickij, Grainys, & J. Novickij, 2013):

$$Q(t) = \int_0^t I^2(t) R dt, \quad (8)$$

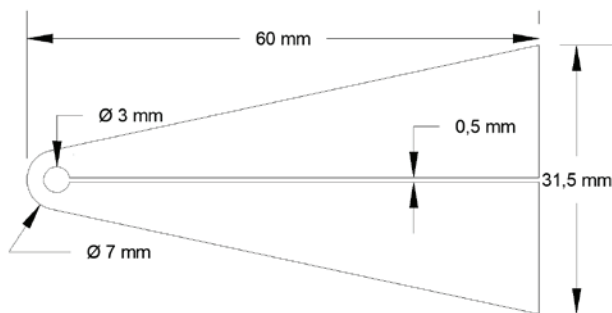
čia  $R$  – induktoriaus varža;  $I$  – inuktoriumi tekanti srovė.

Šilumos išsiskyrimas induktoriuje yra neigiamas veiksnys, nes šiluma veikia tiriamąjį objektą, keičia biocheminių reakcijų greitį ir pobūdį (Novickij et al., 2013).

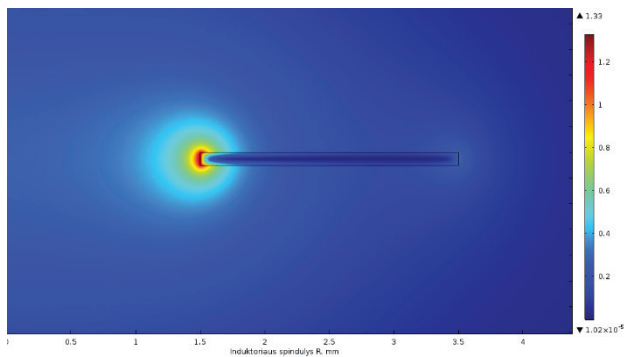
## 3. Magnetinio lauko modeliavimo rezultatai

Planarinė technologija yra gerai išvystyta, todėl skirtingų formų induktoriai gali būti pagaminti fotolitografijos būdu.

Įvertinus standartinių kiuvečių matmenis, prototipui pasirinkamas induktorius, kurio vidinis skersmuo 3 mm. Induktoriaus aukštį lemia metalizacijos sluoksnis, kuris standartiniu atveju yra lygus 0,1 mm. Planarinio induktoriaus konstrukcija ir matmenys pavaizduoti 1 paveiksle.



1 paveikslas. Planarinio induktoriaus konstrukcija  
Figure 1. Structure of planar coil



2 paveikslas. Vieno sluoksnio planarinio induktoriaus magnetinio srauto tankio pasiskirstymo skaitinis modelis  
Figure 2. Magnetic field density in one layer planar coil

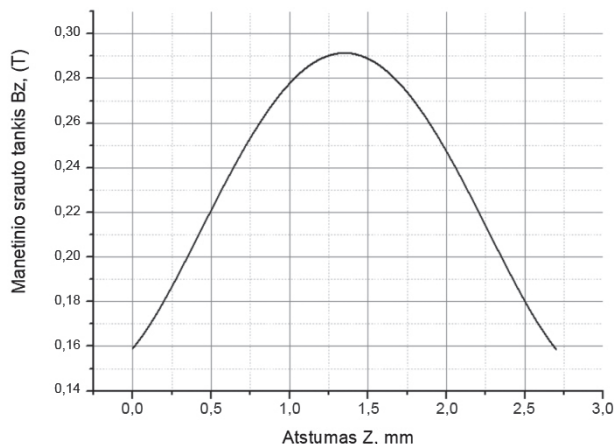
Pasitelkus baigtinių elementų skaičiavimo metodą ir programinį paketą COMSOL, sudarytas magnetinio lauko srauto tankio pasiskirstymo planariniame induktoriuje skaitinis modelis (2 paveikslo raudona spalva rodo didžiausią magnetinio lauko srauto tankį).

Iš 2 paveikslo matyti, kad didžiausias magnetinio lauko srauto tankis susidaro prie pat induktoriaus, vidinėje jo pusėje. Artėjant link induktoriaus centro, laukas sparčiai mažėja.

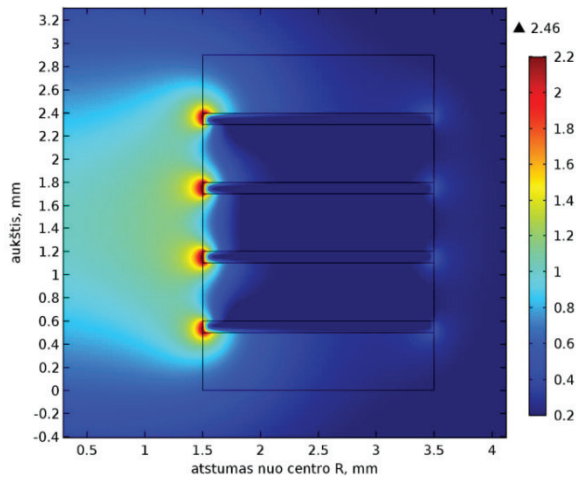
Iš 3 paveikslo matyti, kad tekant impulsinei 1 kA srovei vieno sluoksnio planarinio induktoriaus centre sukuriamas maksimalus magnetinio srauto tankis, kuris lygus 290 mT. Tokio induktoriaus magnetinis laukas nėra homogeniškas.

Siekiant padidinti magnetinio srauto tankį iki 1T pasiūlyta daugiasluoksnė (4 sluoksnių) planarinio induktoriaus konstrukcija. Konstrukciją sudaro keturi identiški planariniai induktoriai, kurių metalizacijos storis – 0,1 mm, o izoliacijos storį lemia 0,5 mm tekstolito lakšto storis.

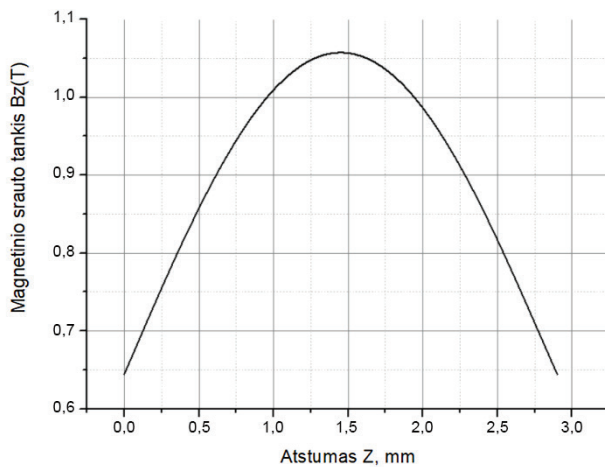
Toks induktorius sukuria 1,05 T magnetinio srauto tankį. Magnetinio lauko pasiskirstymo skaičiavimo rezultatai pateikti 4 ir 5 paveiksluose. Ši konstrukcija leidžia gauti 3 kartus didesnę magnetinį lauką, lyginant su vienasluoksniu induktoriu.



3 paveikslas. Vieno sluoksnio planarinio induktoriaus magnetinio srauto tankio ašinis pasiskirstymas  
Figure 3. Axial magnetic field density in one layer planar coil



4 paveikslas. Daugiasluoksni planarinio induktoriaus magnetinio srauto tankio pasiskirstymas  
Figure 4. Magnetic field density in multilayer planar coil



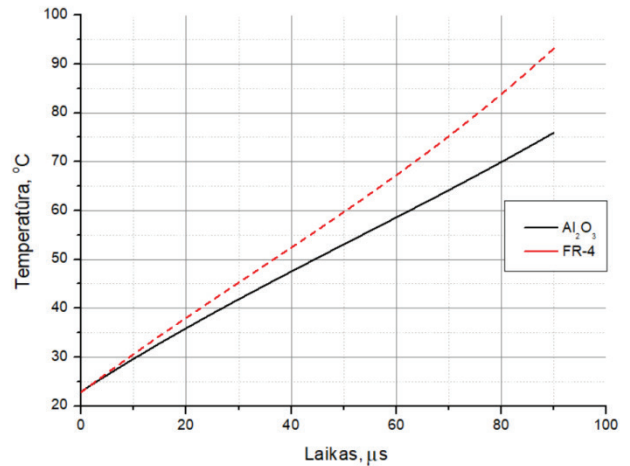
5 paveikslas. Daugiasluoksni planarinio induktoriaus magnetinio srauto ašinis pasiskirstymas  
Figure 5. Axial magnetic field density in multilayer planar coil

#### 4. Induktoriaus įšilimo modeliavimo rezultatai

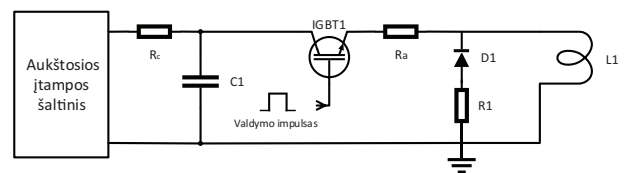
Atliekant biologinius tyrimus, svarbu užtikrinti pastovų temperatūros režimą arba bent būti tikriems, kad eksperimentų metu temperatūros šuolis neviršija leidžiamosios ribos. Siekiant įvertinti įšilimo procesus daugiasluoksniame induktoriuje baigtinių elementų metodu, naudojant programinį paketą COMSOL buvo sukurtas įšilimo skaitinis modelis. Modeliavimo rezultatai pateikti 6 paveiksle.

Daugiasluoksni planarinio induktoriaus konstrukcijoje naudojant stiklo tekstolito izoliavimo medžiagą po 30 pasikartojančių impulsų, vidinis induktoriaus paviršius įkaista iki 93 °C. Toks įšilimas gali būti pražūtingas tiriamam biologiniam objektui.

Tekstolito FR-4 šiluminis laidis yra apie 0,4 W/m·K. Todėl, siekiant padidinti šilumos pernašą konstrukcijoje, buvo pasiūlyta vietoje tekstolito naudoti aluminio oksido ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) padėklus, kurių šiluminis laidis lygus 24 W/m·K, arba 60 kartų didesnis, palyginti su tekstolitu.



6 paveikslas. Induktoriaus įšilimo modeliavimo rezultatai  
Figure 6. Inductor heating results



7 paveikslas. IGBT impulsinio generatoriaus struktūrinė schema  
Figure 7. Structure scheme of IGBT pulse generator

Daugiasluoksni planarinio induktoriaus suformuoto ant tekstolito ir  $\text{Al}_2\text{O}_3$  padėklų, įšilimo modeliavimo rezultatai pateikti 6 paveiksle. Kaip matoma iš modeliavimo rezultatų maksimalus įšilimas induktoriuje su aluminio oksido padėklu sumažėja 17 °C palyginus su tekstolito konstrukcija.

#### 5. Impulsinio generatoriaus struktūrinė schema

Impulsinis magnetinio lauko generatorius susideda iš aukštosios įtampos šaltinio, kondensatoriaus baterijos, komutuojančiojo rakto ir induktoriaus, kuriame generuojamas magnetinis laukas. Impulsinio generatoriaus struktūrinė schema pavaizduota 7 paveiksle.

Kiekvienas induktorius maitinamas iš atskiro maitinimo šaltinio. Maksimali vieno IGBT rakto komutuojama srovė neviršija 1 kA. Įvertinus tai, kad IGBT raktas funkcionuoja artimu trumpojo jungimo režimu, yra svarbu užtikrinti kuo mažesnius metalizacijos topologijos induktivumą ir varžą už induktoriaus darbo zonos ribos.

#### Išvados

1. Keturių sluoksnių planarinis induktorius, kurio vidinis skersmuo – 3 mm, tekant impulsinei 1 kA srovei, generuoja 1 T amplitudės impulsinį magnetinį lauką.
2. Siekiant padidinti šilumos pernašą iš induktoriaus darbo zonos, vietoje tekstolito siūloma naudoti aluminio oksido ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) padėklus.

3. Daugiasluoksnio impulsinio induktoriaus ant aliuminio oksido padėklo išilimas yra 17 °C mažesnis už tekstolito prototipą, kas gali sumažinti neigiamą temperatūros daromą įtaką atliekant tyrimus su biologiniais objektais.

## Literatūra

- Grainys, A. ir Novickij, J. (2010). The Investigation of 3D magnetic field distribution in multilayer coils. *Elektronika ir elektrotechnika*, 103(7).
- Grainys, A. (2012). Mikrosekundinės trukmės magnetinių impulsų generatorius. *Mokslas – Lietuvos ateitis / Science – Future of Lithuania (Elektronika ir elektrotechnika / Electronics and Electrical Engineering)*, 4(1), 63-66.
- Kardos, J. T., & Rabussay P. D. (2012). Contactless magneto-permeabilization for intracellular plasmid DNA delivery in vivo. *Human Vaccines & Immuno therapeutics*, 8(11), 1707-1713. <https://doi.org/10.4161/hv.21576>
- Liu D., et al. (2012). Magnetoporation and magnetolysis of cancer cells via carbon nanotubes induced by rotating magnetic fields. *Nanoletters*, 12(10), 5117-5121. <https://doi.org/10.1021/nl301928z>
- Matthew, J., Callaghan, et al. (2008). Pulsed elektromagnetic fields accelerate normal and diabetic wound healing by increasing endogenous FGF-2 release. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 121(1), 130-141. <https://doi.org/10.1097/01.prs.0000293761.27219.84>
- Novickij, V., Grainys, A. ir Novickij, J. (2013). Finite element method analysis of microfluidic channel with integrated dielectrophoresis electrodes for biological cell permeabilization and manipulation. *Measurement Science Review*, 13(3), 152-156. <https://doi.org/10.2478/msr-2013-0024>
- Reberšek, M., & Miklavčič, V. (2011). Advantages and disadvantages of different concepts of electroporation pulse generation. *Automatika*, 52(2011), 1, 12-19. <https://doi.org/10.1080/00051144.2011.11828399>

## INVESTIGATION OF PLANAR COIL

### A. Lučinskis

#### Abstract

The article describes the possibility of generation of a microsecond magnetic pulse up to 1 T, investigates planar configurations of mikroinductors and discusses the principal circuit of a magnetic field generator. The transient processes of magnetic field and temperature are calculated applying using finite element method. The Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> plates are recommended for the heat dissipation.

**Keywords:** planar inductor, magnetic field, IGBT, finite element method, heat distribution.