

KARAKTERISTIKAT E SISTEMIT TË EKSPOZIMIT TË TRE ÇIFTEVE TË BOBINAVE KUADRATE

^aDhurata KUQI*, ^bEntela GAVOÇI, ^cTheodhor KARAJA

^a Msc. Departamenti i Fizikës, Universiteti Politeknik i Tiranës, SHQIPERI

^b Msc. Departamenti i Fizikës, Universiteti "Luigj Gurakuqi" Shkodër, SHQIPERI

^c Prof. Dr. Departamenti i Fizikës, Universiteti i Tiranës, SHQIPERI

PËRMBLEDHJE

Qëllimi i këtij shkrimi është studimi analitik dhe zgjedhja optimale e përmasave të sistemit të ekspozimit që do të përdoret për vërtetimin eksperimental të "hipotezave të teorisë së rezonancës jonike", një nga teoritë më të diskutueshme sot në literaturën bashkëkohore të biofizikës, për efektet e mundshme të fushave elektromagnetike të frekuencave shumë të ulëta ELF (*extremely low frequency*) mbi sistemet biologjike. Të gjitha hipotezat e rezonancës bazohen në zbatimin e njëkohshëm të fushave magnetike konstante dhe të ndryshueshme në kohë (p.sh. sinusoidale). Kushti që të sigurohet rezonanca është prania e fushës magnetike konstante DC (B_0) paralele me fushën magnetike të ndryshueshme AC ($B_1 \cos \omega t$) me frekuencë dhe intensitet të ulët. Për të verifikuar të tilla hipoteza, është i nevojshëm ndërtimi i një sistem ekspozimi i aftë të krijojë kombinim të përshtatshëm të fushës magnetike statike dhe të ndryshueshme të kontrolluar përgjatë tre drejtimeve. Teknika patch-clamp, duke qenë një teknikë elektrofiziologjike që realizon matjen direkt të rrymave jonike totale në qelizat membranore madje edhe në një kanal jonik të vetëm, është zgjedhur si metodë për të studiuar eksperimentalisht efektet e mundshme të fushave elektromagnetike të

frekuencave shumë të ulëta ELF (*extremely low frequency*) në përcjellshmërinë jonike.

Në këtë shkrim është paraqitur: *studimi analitik* i sistemit të ekspozimit të përbërë nga tre çifte ortogonale bobinash kuadrate, i tillë që të përfshijë brenda vëllimit të tij të gjithë konfiguracionin e teknikës patch-clamp, të sigurojë plotësimin e kushteve të rezonancës jonike si dhe të homogjenitetit të fushës magnetike.

Fjalët kyçe: fushë elektromagnetike e frekuencave shumë të ulëta ELF (*extremely low frequency*), bobinat e Helmholtz-it, rezonancë jonike, fushë magnetike konstante DC, fushë magnetike e ndryshueshme AC.

ABSTRACT

The aim of this paper is analytical study and optimal choosing of the exposure system sizes, which can be used for experimental verification of "the theory ionic resonance's hypotheses", one of theory most controversial today in the biophysics literature for the possible effects of extremely low frequency (ELF) fields with bio systems. All the theory resonance is based on the contemporaneous application of the static and variable magnetic fields. The condition of the resonance is the presence of the static magnetic field DC (B_0) parallel to

the variable magnetic field AC ($B_1 \cos \omega t$) with low frequency and intensity. In order to verify such hypotheses, an exposure system able to generate suitable combinations of static and oscillating magnetic fields controlled along the three space directions is needed. The Patch-Clamp is a powerful electrophysiological technique that allows direct measurement of the total current across the entire cell membrane, as well as of single channel currents thus representing a unique tool to study the effects of extremely low frequency (ELF) on ion conductance. In this paper are described: *analytical study* of the exposure system composed from three pairs of square orthogonal coils, with the characteristic as described above, reaching a good compromise between magnetic field homogeneity and accessibility to the Patch Clamp set-up.

HYRJE

Pothuajse në të gjitha eksperimentet laboratorike *in vivo* dhe *in vitro* të cilat synojnë që të vlerësojnë efektet e fushave magnetike të frekuencave shumë të ulëta, ELF, në organizmat e gjalla [1] si edhe për të kuptuar mekanizmat e mundshëm të bashkëveprimit të tyre, përdoren kryesisht për ekspozim bobinat elektrike.

Sistemet e ekspozimit me formë të thjeshtë gjeometrike që përdoren për të krijuar fushë magnetike, mund të klasifikohen në dy klasa kryesore: sisteme me bobinë kuadrate dhe sisteme me bobinë rrethore, ku secila është e përbërë nga dy ose më shumë bobina.

Një nga sistemet e bobinave më të përdorura është çifti i bobinave të Helmholtz-it. Në konstruksionin klasik të Helmholtz-it, bobinat (rrethore ose kuadrate, të pëshkuara nga rryma elektrike) janë të vendosura në një largësi të tillë që derivati i parë dhe i dytë hapësinor i fushës magnetike të krijuar përgjatë boshtit të bobinave, në qendrën e simetrisë të sistemit, të jenë zero. Ky kusht siguron njëtrajtshmëri të fushës (të rendit të dytë) në këtë zonë.

Për të verifikuar eksperimentalisht të ashtuquajturat "hipotezat e rezonancës" [2, 3, 4, 5] është i nevojshëm realizimi i një kombinimi të fushës magnetike statike dhe asaj alternative, paralele

midis tyre, sipas drejtimin vertikal [6], si dhe të kontrollohet në mënyrë të saktë fusha gjeomagnetike lokale (të arrihet anulimi i përbërëseve x dhe y të saj, në përgjithësi shumë të vegjël).

Zgjedhja e formës së sistemit të ekspozimit u kushtëzua nga set-up-i i konfiguracionit të teknikës patch-clamp.

Në figurën 1 paraqitet një formë e thjeshtë e set-up-it të teknikës patch-clamp, e cila përbëhet nga: a) një mikroskop invertitor (për vrojtimin e qelizave), i vendosur në një tavolinë jo vibruese/lëkundëse brenda kafazit të Faradejit; b) një amplifikator i përshtatshëm për voltage-clamping [7] e potencialit të membranave qelizore dhe krijimin/shkaktimin e një impulsi për hapjen e kanaleve varëse-të tensionit; c) një mikromanipulator për pozicionimn e pipetave elektrodë në brendësi të qelizës; d) një kompjuter për drejtimin e amplifikimit, krijimin/shkaktimin e impulsit dhe regjistrimin e të dhënave.

Duke patur paraqysh pjesët përbërëse të set-up

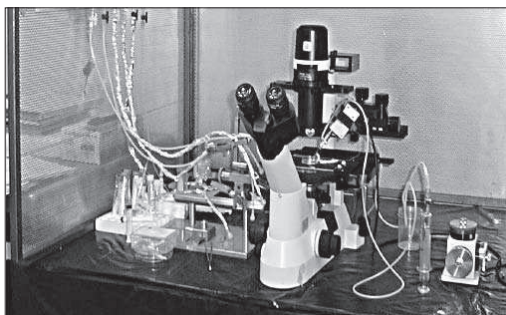


Figura 1. Set-up i teknikës patch-clamp

të teknikës patch-clamp, formën dhe përmasat e tyre, u mendua të konstruktohej sistemi i përbërë nga çifte bobinash kuadrate [8] me përmasa të mëdha, që nuk kanë saktësisht konfiguracionin e Helmholtz-it, nuk ndodhen afër kampionit biologjik dhe të tilla që të përfshijnë brenda vëllimit të tyre konfiguracionin e teknikës patch-clamp [9, 10] (të ndodhen brenda kafazit të Faradejit). Humbja e homogjenitetit, shkaktuar nga mungesa e konfiguracionit të Helmholtz-it, kompensohet nga përmasat e mëdha të bobinave. Por, duhet të theksohet se homogjeniteti i fushës kërkohet vetëm në zonën qendrore, me përmasa shumë të

vogla (qark me rreze 5 cm, aq sa janë përmasat e pjatës Petri, ku do të vendoset modeli biologjik) në raport me përmasat e sistemit të ekspozimit. Megjithëse bobinat nuk kanë saktësisht konfiguracionin e Helmholtz-it, ato kanë përparësinë se jo vetëm sigurojnë njëtrajtshmërinë e fushës magnetike në zonën ku do të ekspozohet modeli biologjik, por edhe lejojnë manipulime të shpejta dhe komode të kampionit dhe të mikroelektrodave (të regjistrimit e të stimulimit).

Meqë hipotezat e rezonancës kërkojnë që të kontrollohen me saktësi përbërëset e fushës magnetike, është menduar të ndërtohej një sistem ekspozimi i përbërë jo nga një çift bobinash kuadrate [11], por nga tre çifte bobinash kuadrate të vendosura jo në të njëjtin drejtim [12], por përgjatë tre drejtimeve ortogonale të hapësirës (sistemi tri-boshtor). Një sistem i tillë ekspozimi është origjinal dhe i krijuar nga grupi ynë i punës.

LLOGARITJET TEORIKE

Fusha magnetike e krijuar nga një çift bobinash kuadrate është llogaritur me anë të programit Fortran, duke u bazuar në ligjin e Bio-Savar-Laplasit [12]. Për çiftin e bobinave të paraqitura në figurën 2, përbërëset e fushës magnetike (për trajtim më të hollësishëm shih *Shtojcën*) llogariten me:

1. formulën për llogaritjen e përbërëses B_x të fushës magnetike:

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (-1)^{i+j} \cdot \frac{z + (-1)^{i+j} \cdot \frac{d}{2}}{\left[x + (-1)^i \cdot a \right] + \left[z + (-1)^{i+j} \cdot \frac{d}{2} \right]^2} \cdot \left\{ \frac{y + (-1)^j \cdot a}{\sqrt{\left[x + (-1)^i \cdot a \right] + \left[y + (-1)^j \cdot a \right] + \left[z + (-1)^{i+j} \cdot \frac{d}{2} \right]^2}} - \frac{y + (-1)^{j+1} \cdot a}{\sqrt{\left[x + (-1)^i \cdot a \right] + \left[y + (-1)^{j+1} \cdot a \right] + \left[z + (-1)^{i+j} \cdot \frac{d}{2} \right]^2}} \right\} \quad (1)$$

ku: $2a$ – është përmasa e bobinës kuadrate,
 d – është largësia midis tyre,
 I – intensiteti i rrymës që rrjedh në bobinë
 μ_0 – përshkueshmëria magnetike

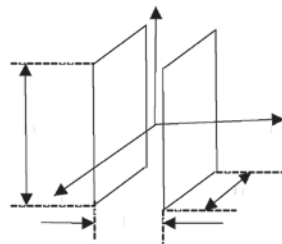


Figura 2 Çifti i bobinave kuadratike

2. formulën për llogaritjen e përbërëses B_y të fushës magnetike:

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (-1)^{i+j} \cdot \frac{z + (-1)^{i+j} \cdot \frac{d}{2}}{\left[y + (-1)^i \cdot a \right] + \left[z + (-1)^{i+j} \cdot \frac{d}{2} \right]^2} \cdot \left\{ \frac{x + (-1)^i \cdot a}{\sqrt{\left[x + (-1)^i \cdot a \right] + \left[y + (-1)^j \cdot a \right] + \left[z + (-1)^{i+j} \cdot \frac{d}{2} \right]^2}} - \frac{x + (-1)^{i+1} \cdot a}{\sqrt{\left[x + (-1)^{i+1} \cdot a \right] + \left[y + (-1)^j \cdot a \right] + \left[z + (-1)^{i+j} \cdot \frac{d}{2} \right]^2}} \right\} \quad (2)$$

3. formulës për llogaritjen e përbërëses B_z të fushës magnetike është:

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (-1)^{i+j} \cdot \left\{ \frac{y + (-1)^j \cdot a}{\left[y + (-1)^i \cdot a \right] + \left[z + (-1)^{i+j} \cdot \frac{d}{2} \right]^2} \cdot \left[\frac{x + (-1)^i \cdot a}{\sqrt{\left[x + (-1)^i \cdot a \right] + \left[y + (-1)^j \cdot a \right] + \left[z + (-1)^{i+j} \cdot \frac{d}{2} \right]^2}} - \frac{x + (-1)^{i+1} \cdot a}{\sqrt{\left[x + (-1)^{i+1} \cdot a \right] + \left[y + (-1)^j \cdot a \right] + \left[z + (-1)^{i+j} \cdot \frac{d}{2} \right]^2}} \right] + \frac{x + (-1)^i \cdot a}{\left[x + (-1)^i \cdot a \right] + \left[z + (-1)^{i+j} \cdot \frac{d}{2} \right]^2} \cdot \left[\frac{y + (-1)^j \cdot a}{\sqrt{\left[x + (-1)^i \cdot a \right] + \left[y + (-1)^j \cdot a \right] + \left[z + (-1)^{i+j} \cdot \frac{d}{2} \right]^2}} - \frac{y + (-1)^{j+1} \cdot a}{\sqrt{\left[x + (-1)^i \cdot a \right] + \left[y + (-1)^{j+1} \cdot a \right] + \left[z + (-1)^{i+j} \cdot \frac{d}{2} \right]^2}} \right] \right\} \quad (3)$$

Formulat e mësipërme (1), (2) dhe (3) përdoren për të llogaritur fushën magnetike të krijuar nga secili çift i bobinave kuadrate, të vendosura përgjatë tre drejtimeve ortogonale të hapësirës.

STUDIMI I FUSHËS MAGNETIKE DHE I ZONAVE TË NJËTRAJTSHMËRISË

Çifti i bobinave vertikale

Në figurën 3 është paraqitur skema e çiftit të bobinave vertikale. Përbërëset e fushës magnetike në brendësi të sistemit llogaritet me anë të formulave (1), (2) dhe (3). Fusha totale është:

$$\vec{B} = \vec{B}_x + \vec{B}_y + \vec{B}_z$$

ku: B_x është përbërësja sipas boshtit x të fushës magnetike; B_y është përbërësja sipas boshtit y të fushës magnetike; B_z është përbërësja sipas boshtit z të fushës magnetike.

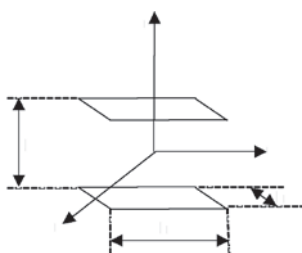


Figura 3. Çifti i bobinave vertikale

Njëtrajtshmëria e fushës në përqindje, përshkruhet duke përdorur $B_{tot}(0, 0, 0)$, si vlera e fushës magnetike në origjinën e sistemit, si referues dhe duke përcaktuar njëtrajtshmërinë u si raport:

$$u = \left| \frac{B_{tot}(x, y, z) - B_{tot}(0, 0, 0)}{B_{tot}(0, 0, 0)} \right| \cdot 100\%$$

Me anë të programit kompjuterik Maple 9.5 është studiuar shpërndarja e fushës totale si dhe zonat e saj të njëtrajtshmërisë. Fusha totale është studiuar në planet yo , xoz dhe xoy . Rryma që rrjedh në spira është $I=1A$, vlera e fushës magnetike në origjinën e sistemit është $B_{tot}(0,0,0) = 26.82 \cdot 10^{-7}T$. Në figurat 4, 5, 6 janë paraqitur shpërndarja e fushës magnetike totale si edhe zonat e saj të njëtrajtshmërisë 1% e 0.5%, përkatësisht në planet yo , xoz dhe xoy .

Nga grafikët vihet re se zona e njëtrajtshmërisë 0.5% sigurohet në qendër të çiftit të bobinave rreth një zone me rreze 6.5 cm, ndërkohë që modeli biologjik që do të ekspozohet do të vendoset në pjata Petri me rreze 5 cm.

I njëjti studim është realizuar edhe për dy çiftet e tjera të bobinave (anësore dhe ballore).

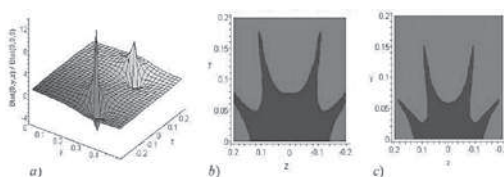


Figura 4 a) Pamja e shpërndarjes të fushës totale $B_{tot}(\theta, y, z)$ të normuar me vlerën e saj në origjinë $B_{tot}(0, 0, 0)$ në planin yo ; b) zona e njëtrajtshmërisë të $B_{tot}(\theta, y, z)$ 1%; c) zona e njëtrajtshmërisë të $B_{tot}(\theta, y, z)$ 0.5%.

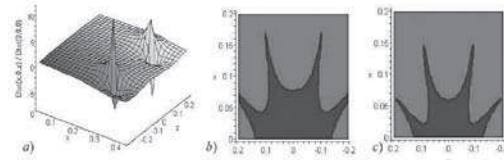


Figura 5 a) Pamja e shpërndarjes të fushës totale $B_{tot}(x, \theta, z)$ të normuar me vlerën e saj në origjinë $B_{tot}(0, 0, 0)$ në planin xoz ; b) zona e njëtrajtshmërisë të $B_{tot}(x, \theta, z)$ 1%; c) zona e njëtrajtshmërisë të $B_{tot}(x, \theta, z)$ 0.5%.

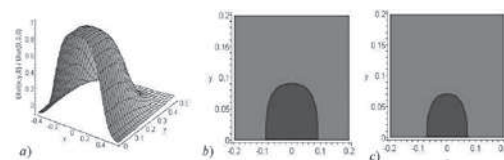


Figura 6 a) Pamja e shpërndarjes të fushës totale $B_{tot}(x, y, \theta)$ të normuar me vlerën e saj në origjinë $B_{tot}(0, 0, 0)$ në planin xoy ; b) zona e njëtrajtshmërisë të $B_{tot}(x, y, \theta)$ 1%; c) zona e njëtrajtshmërisë të $B_{tot}(x, y, \theta)$ 0.5%.

Duke patur parasysh përmasat e kabinës së Faradejit, ku vendosen pajisjet e teknikës patch-clamp (mikroskopi, amplifikatori, mikromanipulatori), përmasat dhe format e tyre, parashikimet teorike për njëtrajtshmërinë e fushës magnetike, të realizuar me anë të programit kompjuterik Maple 9.5 si edhe sigurimin e kushteve të rezonancës jonike u përcaktuan përmasat e bobinave kuadrate. Përmasat e çiftit të bobinave vertikale u përcaktuan duke patur parasysh; a) kushtet e rezonancës jonike, që kërkojnë një kombinim të fushës magnetike statike dhe asaj alternative, paralele midis tyre, sipas drejtimit vertikal; b) sigurimin e njëtrajtshmërisë së fushës magnetike në një zonë me përmasa rreth 5 cm (sa diametri i pjatës Petri, ku vendoset modeli biologjik); c) përmasat e mikroskopit (lartësia e tij) dhe të kafazit të Faradejit. Përmasat e bobinave kuadrate vertikale dolën 58 cm dhe largësia midis tyre 34 cm.

PËRFUNDIME

Në këtë punim është analizuar sistemi i ekspozimit i përbëhet nga tre çifte ortogonale bo-

binash kuadrate, të vendosura sipas drejtimeve të boshteve koordinativ, i cili do të përdoret për të verifikuar eksperimentalisht hipotezat e rezonancës. Mbi bazën e studimit teorik, ku janë pasur parasysh kushtet e rezonancës jonike, pjesët përbërëse të set-up-it të teknikës patch-clamp, forma dhe përmasat e tyre, është bërë zgjedhja optimale e përmasave të bobinave kuadrate. Megjithëse bobinat nuk kanë saktësisht konfiguracionin e Helmholtz-it, ato sigurojnë njëtrajtshmërinë e fushës magnetike deri në 0.5% në zonën qendrore (zona e pjatës Petri) ku do të vendoset modeli biologjik që do të ekspozohet dhe studiohet. Sistemi i ekspozimit i analizuar ka disa përparësi: megjithëse është një zgjedhje kompromisi, midis përmasave të set-up-it të teknikës patch-clamp, si edhe plotësimin të kushteve të rezonancës jonike, ai siguron njëtrajtshmërinë e fushës magnetike në zonën ku do të vendoset modeli biologjik, si edhe lejon kontrollin e pavarur të përbërësve të fushës magnetike sipas tre drejtimeve ortogonale.

BIBLIOGRAFIA

1. BIHNI V.N., SAVIN A.V. 2003. *Effects of weak magnetic fields on biological systems: physical aspects*. Physics-Uspexhi 46 (3) 259 ± 291
2. LIBOFF A.R. 1985. *Cyclotron resonance in membrane transport*. In: Chiabrera A., Nicolini C., Schwan H.P., editors. *Interactions between electromagnetic field and cells*. London: Plenum 281-296.
3. LIBOFF A.R. 1997. *Electric-field ion cyclotron resonance*, Bioelectromagnetics, 18(1): 85-7, 1997.
4. LEDNEV V.V. 1991. *Possible mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems*. Bioelectromagnetics 12: 71-75.
5. BLANCHARD J.P., BLACKMAN C.F. 1994. *Clarification and application of an ion parametric resonance model for magnetic field interactions with biological systems*. Bioelectromagnetics 15: 217-238.
6. ZHADIN M.N., DERYUGINA O.N., PISACHENKO T.M. 1999. *Influence of combined DC and AC magnetic fields on rat behavior*. Bioelectromagnetics 20: 378-386.
7. ERIC R., KANDEL, SCHWARTZ J.H., Jessell T.M. 2001. *Principles of neural science* (third edition): 104-118.
8. ALAMGIR A.K.M., FANG J., GU C., HAN Z. 2005. *Square Helmholtz coil with homogeneous field for magnetic measurement of longer HTS tapes*. Physica C 424, 17-24.
9. SAKMAN B., NEHER E. 1995. *Single Channel Recording*, Plenum Press, New York.
10. OBO M., KONISHI Sh., OTAKA Y., KITAMURA S. 2002. *Effect of Magnetic Field Exposure on Calcium*

Channel Currents Using Patch Clamp Technique. Bioelectromagnetics 23: 306-314.

11. LEE S.G., KANG C.S., CHANG J.W., 2007. *A square-loop Helmholtz coil system for the evaluation of a single-layer second-order high-Tc SQUID gradiometer*, Physica C 460-462, 1472-1474.

12. THOMAS T.K.L. 2004. *Tri-axial Square Helmholtz coil for Neutron EDM Experiment*.

SHTOJCA

Llogaritja teorike e fushës magnetike të një çifti bobinash kuadrate

Fusha magnetike e krijuar nga një çift bobinash kuadrate është llogaritur duke u bazuar në ligjin e Bio-Savar-Laplasit.

Supozojmë se çifti i bobinave ka pamjen siç paraqitet në figurën Sh.1, ku:

$2a$ është përmasa e bobinës kuadrate

d është largësia midis tyre.

Fusha magnetike e krijuar nga përcjellësi me gjatësi $2a$ (Fig. Sh. 2) është:

$$\frac{\mu_0 I}{4\pi s} \cdot (\sin\theta_2 - \sin\theta_1) \vec{s} \times \vec{r} \quad (\text{Sh.1})$$

ku: μ_0 është përshkueshmëria magnetike,

$s = \sqrt{y^2 + z^2}$ largësia e pikës (x, y, z) nga boshti x

θ_1, θ_2 këndet nën të cilat shihet përcjellësi $2a$ nga pika (x, y, z) ,

$\vec{s} = \frac{(0, y, z)}{\sqrt{y^2 + z^2}}$ është vektori njësi i hequr nga

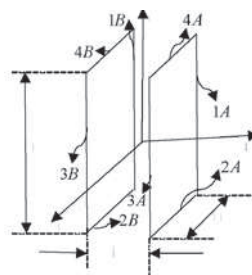


Figura Sh.1 Çifti i bobinave kuadratike

pika (x, y, z) pingul me boshtin x .

Theksojmë se:

$$\sin\theta_1 = \frac{x-a}{\sqrt{(x-a)^2 + s^2}} \quad (\text{Sh.2})$$

$$\sin\theta_2 = \frac{x+a}{\sqrt{(x+a)^2 + s^2}} \quad (\text{Sh.3})$$

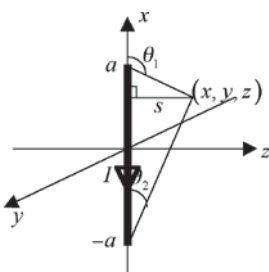


Figura Sh.2 Rryma rrjedh në përcjellësin vertikal

$$\vec{s}_{XX}^r = \left(0, \frac{z}{\sqrt{y^2 + z^2}}, -\frac{y}{\sqrt{y^2 + z^2}} \right) \quad (\text{Sh.4})$$

Fusha e krijuar nga secili përcjellës i katrorit gjendet duke bërë transformimet e nevojshme. Fusha magnetike e krijuar bobina kuadrate (bobina A) është superpozim i fushës së krijuar nga secili përcjellës. Në të njëjtën mënyrë llogaritet edhe fusha magnetike e krijuar nga bobina tjetër kuadrate (bobina B), por duke bërë zëvendësimet përkatëse të d me $-d$.

Fusha totale e krijuar nga çifti i bobinave kuadrate është superpozim i fushës së krijuar nga secili bobinë kuadrate. Pra:

$$\vec{B}_{tot} = (\vec{B}_{1A} + \vec{B}_{2A} + \vec{B}_{3A} + \vec{B}_{4A}) + (\vec{B}_{1B} + \vec{B}_{2B} + \vec{B}_{3B} + \vec{B}_{4B})$$

me përbërëset: $\vec{B}_{tot} (B_x, B_y, B_z)$

Përbërësja B_x është:

$$B_x = (B_{x2A} + B_{x4A}) + (B_{x2B} + B_{x4B})$$

dhe llogaritet me formulën Sh. 5:

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{z+d/2}{[(x-a)^2 + (z+d/2)^2]} + \frac{\left\{ \frac{y-a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-a)^2 + (z+d/2)^2}} - \frac{y+a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y+a)^2 + (z+d/2)^2}} \right\}}{4\pi} + \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{z+d/2}{[(x+a)^2 + (z+d/2)^2]} + \frac{\left\{ \frac{y-a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y-a)^2 + (z+d/2)^2}} - \frac{y+a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y+a)^2 + (z+d/2)^2}} \right\}}{4\pi} - \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{z-d/2}{[(x-a)^2 + (z-d/2)^2]} + \frac{\left\{ \frac{y-a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-a)^2 + (z-d/2)^2}} - \frac{y+a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y+a)^2 + (z-d/2)^2}} \right\}}{4\pi} + \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{z-d/2}{[(x+a)^2 + (z-d/2)^2]} + \frac{\left\{ \frac{y-a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y-a)^2 + (z-d/2)^2}} - \frac{y+a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y+a)^2 + (z-d/2)^2}} \right\}}{4\pi}$$

Përbërësja B_y është:

$$B_y = (B_{y1A} + B_{y3A}) + (B_{y1B} + B_{y3B})$$

dhe llogaritet me formulën Sh. 6:

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{z+d/2}{[(y-a)^2 + (z+d/2)^2]} + \frac{\left\{ \frac{x+a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y-a)^2 + (z+d/2)^2}} - \frac{x-a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-a)^2 + (z+d/2)^2}} \right\}}{4\pi} - \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{z+d/2}{[(y+a)^2 + (z+d/2)^2]} + \frac{\left\{ \frac{x+a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y+a)^2 + (z+d/2)^2}} - \frac{x-a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y+a)^2 + (z+d/2)^2}} \right\}}{4\pi} + \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{z-d/2}{[(y-a)^2 + (z-d/2)^2]} + \frac{\left\{ \frac{x+a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y-a)^2 + (z-d/2)^2}} - \frac{x-a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-a)^2 + (z-d/2)^2}} \right\}}{4\pi} - \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{z-d/2}{[(y+a)^2 + (z-d/2)^2]} + \frac{\left\{ \frac{x+a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y+a)^2 + (z-d/2)^2}} - \frac{x-a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y+a)^2 + (z-d/2)^2}} \right\}}{4\pi}$$

Përbërësja B_z është:

$$B_z = (B_{z1A} + B_{z2A} + B_{z3A} + B_{z4A}) + (B_{z1B} + B_{z2B} + B_{z3B} + B_{z4B})$$

dhe llogaritet me formulën Sh. 7:

$$B_z = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{y-a}{[(y-a)^2 + (z+d/2)^2]} + \frac{\left\{ \frac{x+a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y-a)^2 + (z+d/2)^2}} - \frac{x-a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-a)^2 + (z+d/2)^2}} \right\}}{4\pi} + \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{x-a}{[(x-a)^2 + (z+d/2)^2]} + \frac{\left\{ \frac{y-a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-a)^2 + (z+d/2)^2}} - \frac{y+a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y+a)^2 + (z+d/2)^2}} \right\}}{4\pi} + \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{y+a}{[(y+a)^2 + (z+d/2)^2]} + \frac{\left\{ \frac{x+a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y+a)^2 + (z+d/2)^2}} - \frac{x-a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y+a)^2 + (z+d/2)^2}} \right\}}{4\pi} - \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{x+a}{[(x+a)^2 + (z+d/2)^2]} + \frac{\left\{ \frac{y-a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y-a)^2 + (z+d/2)^2}} - \frac{y+a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y+a)^2 + (z+d/2)^2}} \right\}}{4\pi} - \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{y-a}{[(y-a)^2 + (z-d/2)^2]} + \frac{\left\{ \frac{x+a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y-a)^2 + (z-d/2)^2}} - \frac{x-a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-a)^2 + (z-d/2)^2}} \right\}}{4\pi} + \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{x-a}{[(x-a)^2 + (z-d/2)^2]} + \frac{\left\{ \frac{y-a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-a)^2 + (z-d/2)^2}} - \frac{y+a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y+a)^2 + (z-d/2)^2}} \right\}}{4\pi} - \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{y+a}{[(y+a)^2 + (z-d/2)^2]} + \frac{\left\{ \frac{x+a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y+a)^2 + (z-d/2)^2}} - \frac{x-a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y+a)^2 + (z-d/2)^2}} \right\}}{4\pi} - \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{x+a}{[(x+a)^2 + (z-d/2)^2]} + \frac{\left\{ \frac{y-a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y-a)^2 + (z-d/2)^2}} - \frac{y+a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y+a)^2 + (z-d/2)^2}} \right\}}{4\pi}$$