



ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის
ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტის ელექტრული
და ელექტრონული ინჟინერიის დეპარტამენტი

გიორგი ლომიძე
გიორგი დოლიძე
ლევან გიორგობიანი

ელექტრომაგნიტური ხმაურის გაზომვა დაბალსიხშირულ
დიაპაზონში

ხელმძღვანელი: ასისტენტ-პროფესორი ზურაბ შერმადინი

თბილისი, 2020 წელი

სარჩევი

ნახაზების სია.....	3
ცხრილების სია	3
სურათების სია.....	3
გრაფიკების სია.....	4
ანოტაცია	5
შესავალი	6
სტანდარტები	8
შეზღუდვები.....	9
ზომის და ექსპერიმენტული სივრცის შეზღუდვა	9
უსაფრთხოების ზომები	9
დროის და სირთულის შეზღუდვები	9
ეკონომიკური გავლენა	10
გარემოზე ზემოქმედების შეზღუდვა.....	10
პროექტის სოციალური გავლენა.....	10
ექსპერიმენტალური დანადგარის ფუნქციონირება	11
ექსპერიმენტალური დანადგარის ბლოკ-სქემა	11
დაბალსიხშირული სიგნალების გენერატორი	13
ოპერაციული გამაძლიერებელი.....	13
ტრანსფორმატორი	14
ანალიზური შემოწმება	17
მაგნიტური ველის ეკრანირება.....	26
სენსორის კალიბრაცია	28
გაზომვები სხვადასხვა ტიპის ეკრანის შემთხვევაში.....	31
ბრტყელი მართკუთხა ფორმის ეკრანი	31
ცილინდრული ფორმის ღია ეკრანი	33
ცილინდრული ფორმის ეკრანი	35
ცილინდრული ფორმის ეკრანი მცირე ზომის ნახვრეტით	36
ცილინდრული ფორმის ეკრანი კვადრატული ხუფით	39
პროგრამული უზრუნველყოფა	42
დასკვნა	43
ბიუჯეტი.....	45
ბიბლიოგრაფია	46
აპენდიქსი	48
C++ პროგრამულ ენაზე შექმნილი პროგრამული უზრუნველყოფის სკრიპტი.	48
ტრანსფორმატორის ოპტიმალური ხვიათა რაოდენობის გამოსათვლელი სკრიპტი (OCTAVE).....	50
ანალიზური შემოწმებისთვის შექმნილი სკრიპტი (OCTAVE)	52

ნახაზების სია

ნახაზი 1. ექსპერიმენტალური დანადგარის ბლოკ-სქემა	11
ნახაზი 2. ერთი ხვიის სიმულაცია EMCOS STUDIO-ს გამოყენებით.....	17
ნახაზი 3. EMCOS STUDIO -ს გამოყენებით ერთი ხვიის მოდელირება 11 გამზომი წერტილით.....	22
ნახაზი 4. ერთი ხვიის მიერ აღძრული მაგნიტური ველის ძალწირები	23
ნახაზი 4. EMCOS STUDIO-ში მოდელირებული გამომსხივებელი კოჭა რვა გამზომი წერტილით	29
ნახაზი 5. გამომსხივებელი კოჭისა და მართკუთხა ბრტყელი სპილენძის ეკრანის სიმულაცია EMCOS STUDIO-ს გამოყენებით	32
ნახაზი 6. სპილენძის ცილინდრული ფორმის ღია ეკრანის მოდელირება.....	34
ნახაზი 7. სპილენძის ცილინდრული ფორმის ეკრანის მოდელი	35
ნახაზი 8. 27 MM დიამეტრის ხვრელის მქონე სპილენძის ეკრანის მოდელირება.....	37
ნახაზი 9. ცილინდრული ეკრანის მოდელირება კვადრატული ხუფით.....	39

ცხრილების სია

ცხრილი 1. ინტერფერენციის ზოგადი სქემა.....	6
ცხრილი 2. ICNIRP სტანდარტები. ცვლადი ელექტრული და მაგნიტური ველების დასაშვები დონეების ზღვრები. [6]	8
ცხრილი 3. სენსორის კალიბრაციისთვის შესრულებულ გაზომვათა ცხრილი	28
ცხრილი 3. მიღებული შედეგების შენახვა .DAT გაფართოებით	42
ცხრილი 4. პროექტის ბიუჯეტი.....	45

სურათების სია

სურათი 1. ექსპერიმენტული დანადგარის ლაბორატორიული სახე.....	12
სურათი 2. სიგნალების გენერატორი GZ-118	13
სურათი 3. გამაძლიერებელი TDA1562Q.....	13
სურათი 4. N30 ტიპის მაგნიტური ტოროიდალური გულარი	14
სურათი 5. N30 ტიპის მაგნიტური ტოროიდალური გულარის გამოყენებით შექმნილი ტრანსფორმატორი	16
სურათი 6. მართკუთხა ფორმის სპილენძის ფირფიტა. ზომა - 23 X 27 CM.....	31
სურათი 7. სპილენძის ცილინდრული ფორმის ღია ეკრანი.....	33
სურათი 8. სპილენძის ცილინდრული ფორმის ეკრანი.....	35
სურათი 9. ცილინდრული ფორმის ეკრანი 27MM დიამეტრის ზომის ხვრელით.....	37
სურათი 10. ცილინდრული ეკრანი კვადრატული ხუფით. მასალა - სპილენძი. სისქე 0.2 MM.....	39

გრაფიკების სია

გრაფიკი 1. წყაროს სეგმენტში დენის აბსოლუტური მნიშვნელობების დამოკიდებულება სიხშირეზე.	18
გრაფიკი 2. წყაროს სეგმენტში სიმულირებული და ანალიზური გზით მიღებულ დენის აბსოლუტური მნიშვნელობებს შორის განსხვავება პროცენტებში სიხშირის მიხედვით.	18
გრაფიკი 3. წყაროს სეგმენტში იმპედანსის რეალური ნაწილის დამოკიდებულება სიხშირეზე.	19
გრაფიკი 4. წყაროს სეგმენტში სიმულირებული და ანალიზური გზით მიღებულ იმპედანსის რეალურ ნაწილს შორის განსხვავება პროცენტებში სიხშირის მიხედვით.	20
გრაფიკი 5. კოჭის ინდუქციურობის სიხშირეზე დამოკიდებულება	20
გრაფიკი 6. სიმულირებული და ანალიზური გზით მიღებულ ინდუქციურობებს შორის განსხვავება პროცენტებში სიხშირის მიხედვით.	21
გრაფიკი 7. EMCOS STUDIO- ს გამოყენებით 11 გამზომი წერტილის სიმულაციის შედეგად მიღებული მონაცემები.	22
გრაფიკი 8. კოჭის მაგნიტური ველის მანძილზე დამოკიდებულება.	23
გრაფიკი 9. განსხვავება ანალიზურ და სიმულირებულ ველებს შორის.	25
გრაფიკი 10. პროგრამა ORIGINLAB-ის გამოყენებით ნაჩვენები მონაცემთა განაწილების გრაფიკი	30
გრაფიკი 11. სიმულაციური და გაზომილი მაგნიტური ველის შედარების შედეგები ბრტყელი მართკუთხა ეკრანის შემთხვევაში.	32
გრაფიკი 12. ცილინდრული ფორმის ღია ეკრანის შემთხვევაში ექსპერიმენტული და სიმულაციური შედეგების შედარება	34
გრაფიკი 13. მოცემულია სრული ეკრანის შემთხვევაში მაგნიტური ველის სიდეების დამოკიდებულება სიმულაციისა და გაზომვებისას გამომსახივებელი კოჭიდან 113 და 143 MM - ზე	36
გრაფიკი 14. 27 MM დიამეტრის ხვრელი მქონე ეკრანის შემთხვევაში სიმულაციური და გაზომილი მაგნიტური ველის სიდიდის შედარება	38
გრაფიკი 15. 50 MM დიამეტრის ხვრელიანი ეკრანის შემთხვევაში მაგნიტური ველის სიდეების დამოკიდებულება სიმულაციისა და გაზომვებისას გამომსახივებელი კოჭიდან 113 და 143 MM- ზე	38
გრაფიკი 16. 25 X 25 ბრტყელი კვადრატული ხუფის მქონე ცილინდრული ეკრანის გაზომილი და სიმულაციის შედეგად მიღებული ველების შედარება. მანძილი სენსორსა და გამომსახივებელ კოჭას შორის 113 MM	40
გრაფიკი 17. მაგნიტური ველის ექსპერიმენტალურად გაზომილი სიდიდეების დამოკიდებულება კვადრატულხუფიან, ცილინდრულ და 25 MM ხვრელის მქონე ეკრანებს შორის	40
გრაფიკი 18. მაგნიტური ველის სიმულაციურად გამოთვლილი სიდიდეების დამოკიდებულება კვადრატულხუფიან, ცილინდრულ და 25 MM ხვრელიან ეკრანებს შორის	41

ანოტაცია

ტექნოლოგიურ ეპოქაში ყველგან გვხვდება როგორც ბუნებრივი, ასევე ადამიანის საქმიანობის შედეგად წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური გამოსხივება. გარდა სასურველისა, რომელიც ატარებს საჭირო ინფორმაციას, არსებობს არასაჭირო გამოსხივება. გარემოში ხდება ამ ორი ტიპის ზედდება, ინტერფერენცია და წარმოიქმნება ელექტრომაგნიტური ხმაურები. ისინი შემთხვევითი სიგნალებია და არ არიან სასურველი ინფორმაციის მატარებლები.

ინტერფერენციის თავიდან ასარიდებლად, საჭირო გახდა ელექტრომაგნიტური თავსებადობის პრობლემის გადაჭრა, რათა გარემოში სხვადასხვა ელექტრულ მოწყობილობებს არ ჰქონდეთ ერთმანეთზე მავნე ზემოქმედება. ამიტომაც, რომ რიც დაწესებულებებში, სადაც აპარატურის გამართულ მუშაობაზეა დამოკიდებული ადამიანების სიცოცხლე, შეზღუდულია ელექტრული მოწყობილობების გამოყენება - კლინიკები, თვითმფრინავები, ლაბორატორიები და სხვა.

აღნიშნული პრობლემების უკეთ შესწავლისა და გადაწყვეტის ოპტიმალური გზების ძიებისთვის, გთავაზობთ ერთ-ერთი აქტუალური პრობლემის გამოკვლევას ელექტრომაგნიტური თავსებადობის დარგში. კერძოდ, დაბალი სიხშირის მაგნიტური ველის გაჟონვის შესწავლას ეკრანის ხვრელში. ამ ამოცანის გადაწყვეტა მნიშვნელოვან წვლილს შეიტანს როგორც ჩვენი ცოდნისა და გამოცდილების ამაღლებისთვის, ასევე საავტომობილო წარმოების დარგში არსებული ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი პრობლემის - ელექტრული და ელექტრონული კომპონენტების ინტერფერენციის მოვლენის გამოკვლევაში.

მსგავსი ამოცანები გამოკვლეულია კომპანია EMCoS [1] მიერ და ასახულია სამეცნიერო სტატიების სახით [2, 3]. სადაც აღნიშნული პრობლემა განხილულია ეკრანში დამატებითი ხვრელის არსებობის გარეშე. მოცემულ საბაკალავრო პროექტში გთავაზობთ დაბალი სიხშირის მაგნიტური ველის გაჟონვის ამოცანის გამოკვლევას ელექტრულ ხელსაწყოებსა და სადენების ეკრანში ხვრელის არსებობის დროს.

შესავალი

ხშირად ელექტრული და ელექტრონული მოწყობილობები ხდებიან ხმაურის წყაროები და მახლობელ სხვა მოწყობილობებზე მავნედ ზემოქმედებენ. პრობლემის აღმოსაფხვრელად, შესაძლებელია მივმართოთ რამდენიმე ხერხს: შეიზღუდოს წყაროს მავნე გამოსხივება ან მოხდეს მისი ეფექტური ეკრანირება, ან გაიზარდოს მიმღების გარჩევადობა მოცემულ სიხშირეებზე.



Lightning	Wires	IC
RF Transmitter	Antennas	RF Receiver
High Speed Data Transfer	Common Ground	High Speed Data Transfer.
AC/DC Motors	Power Wires	Display
Welding devices	Parasitic Capacitances	Phones
Display	Parasitic Inductances	Electronic Control Units

ცხრილი 1. ინტერფერენციის ზოგადი სქემა

ელექტრომაგნიტური თავსებადობის პრობლემის გადასაჭრელად, უპირველესად, საჭიროა დადგინდეს ინტერფერენციის მიზეზი და წყარო. ამისთვის აუცილებელია გაიზომოს ელექტრომაგნიტური ხმაურების აბსოლუტური სიდიდე, მოხდეს წყაროს იდენტიფიცირება და მოიძებნოს მისი აღმოფხვრის ეფექტური გზა. პრობლემის გადაჭრის ერთ-ერთი მოსახერხებელი გზა სადენებისა და ელექტრონული მოწყობილობების ეფექტური ეკრანირებაა. თუმცა, ხშირად საჭიროა მაეკრანირებელ მოწყობილობებში ხვრელის გაკეთება, სადენების შეყვანა/გამოყვანის, გამზომი სენსორების ჩამონტაჟების ან სხვა მიზეზების გამო. ლითონში არსებული ზედაპირული ეფექტებიდან და ტალღის სიგრძის

სხვადასხვაობიდან გამომდინარე, მაღალი სიხშირის ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ეკრანირება შედარებით მარტივი ამოცანაა, ვიდრე დაბალი სიხშირისა.

მოცემულ პროექტში გთავაზობთ ICNIRP სტანდარტის შესაბამის სიხშირულ დიაპაზონში ელექტრომაგნიტური ხმაურების გაზომვას, კერძოდ, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, დაბალი სიხშირის მაგნიტური ველის გაჟონვის შესწავლას ეკრანის ხვრელში.

მაგნიტური ველის გამომსხივებელ წყაროსა და მიმღებ მოწყობილობას შორის მოთავსდა ეკრანი. ანტენით მიღებული სიგნალი ჯერ გაძლიერდა, შემდეგ გარდაიქმნა ციფრულ სიგნალად და მიეწოდა კომპიუტერს ინფორმაციის დასამუშევრად.

მიღებული მონაცემების დამუშავება და მოდელირება მოხდა კომპანია EMCOS-ის მფლობელობაში არსებული პროგრამული პაკეტების გამოყენებით [4]. პროგრამულ პაკეტებზე წვდომა შეთანხმებულია კომპანიის მმართველ ორგანოებთან და აქტიურად ხდებოდა მხარდაჭერა ექსპერიმენტების დროს.

სტანდარტები

დღესდღეობით საქართველოში არ არსებობს რეგულაციები, რომლებიც შეზღუდვადნენ მოწყობილობების მაქსიმალურ ელექტრომაგნიტურ ხმაურს. მრავალ წამყავნ ქვეყანას კი, უკვე აქვს სტანდარტები და სხვადასხვა რეგულაციები შემუშავებული ელექტრომაგნიტური გამოსხივების დასაშვებ სიდიდეებთან დაკავშირებით. მაგალითად, ICNIRP (The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) [5] იძლევა რეკომენდაციებს და აყალიბებს სტანდარტებს მავნე NIR (non-ionizing radiation) გამოსხივებებისას ჯანმრთელობისა და გარემოს დაცვისთვის. გადაწყვეტით დავრდნობოდი ICNIRP სტანდარტებს, რადგან ყველა დანარჩენთან შედარებით, ვფიქრობთ, ეს უკანასკნელი უფრო სრულყოფილადაა ჩამოყალიბებული და კვლევებზე დაფუძნებული ელექტრომაგნიტური გამოსხივების დაბალსიხშირულ არეში. NIR მოიცავს ელექტრომაგნიტურ გამოსხივების ულტრაიისფერ, სინათლის, ინფრაწითელ და მექნიკურ (ულტრაბგერით) დიაპაზონებს. ყოველდღიურ ცხოვრებაში NIR-ის წყაროებია მზე, საყოფაცხოვრებო მოწყობილობები, ტელეფონები, WI-FI, კომპიუტერები, ავტომობილის ელექტრული მოწყობილობები და სხვ.

ნახაზ 2-ზე მოყვანილია გამოსხივების დასაშვები ნორმების ICNIRP სტანდარტები დაბალსიხშირულ დიაპაზონში.

Frequency range	E-field strength (V m ⁻¹)	H-field strength (A m ⁻¹)	B-field (μT)
up to 1 Hz	—	3.2×10^4	4×10^4
1–8 Hz	10,000	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$
8–25 Hz	10,000	$4,000/f$	$5,000/f$
0.025–0.8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$
0.8–3 kHz	$250/f$	5	6.25
3–150 kHz	87	5	6.25
0.15–1 MHz	87	$0.73/f$	$0.92/f$
1–10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$	$0.92/f$
10–400 MHz	28	0.073	0.092
400–2,000 MHz	$1.375f^{1/2}$	$0.0037f^{1/2}$	$0.0046f^{1/2}$
2–300 GHz	61	0.16	0.20

ცხრილი 2. ICNIRP სტანდარტები. ცვლადი ელექტრული და მაგნიტური ველების დასაშვები დონეების ზღვრები. [6]

შეზღუდვები

ზომის და ექსპერიმენტული სივრცის შეზღუდვა

- პირელი შეზღუდვა, რომელიც პროექტის განხორციელებისათვის გასათვალისწინებელია, არის ანტენის ზომა. ელექტრული ველის ეფექტური დეტექტირებისთვის მიმღები ანტენის ზომები ტალღის სიგრძის თანაზომადი უნდა იყოს. რადგან დაბალი სიხშირის ელექტრომაგნიტური გამოსხივების გაზომვა უნდა მოხდეს, ელექტრული ველის დეტექტირებისთვის ეფექტური ანტენის ზომები ჩვენი ამოცანისთვის შეუსაბამოა. ამიტომ, გაცილებით მოსახერხებელია, თუ ორიენტაციას ავიღებთ ელექტრომაგნიტური გამოსხივების მაგნიტური ველის დეტექტირებაზე. შედეგად, გადაწყდა ექსპერიმენტები ჩატარდეს ცვლადი მაგნიტური ველის გამოყენებით, შესაბამისად მიმღები ანტენაც კომპაქტური და მცირე ზომის იქნება.
- მეორე შეზღუდვა ეხება ექსპერიმენტული დანადგარის კომპაქტურობას, რადგან ის უნდა განთავსდეს საუნივერსიტეტო გარემოში, კერძოდ ელექტრული და ელექტრონული ინჟინერიის დეპარტამენტის მფლობელობაში არსებულ ლაბორატორიაში. ამდენად, მთლიანი ექსპერიმენტული რგოლი მარტივად მოთავსებადი უნდა იყოს 4-5 კვადრატული მეტრის ფართობზე.

უსაფრთხოების ზომები

- ექსპერიმენტის დროს, უსაფრთხოების მიზნით, არ გამოიყენება 20 ვოლტზე მაღალი ძაბვები, გარდა კომპიუტერისა, რომელიც მიერთებულია 220 V ძაბვის ქსელში. ასეთ შემთხვევაში დაცული იქნება უსაფრთხოების სტანდარტული ზომები.

დროის და სირთულის შეზღუდვები

- პროექტის სირთულის მინიმუმამდე დაყვანა დასმული ამოცანის ერთ-ერთი მნშვნელოვანი ეტაპია. ვინაიდან მოცემული პროექტი საბაკალავრო ნაშრომს წარმოადგენს, დროისა და ცოდნის შეზღუდვის გამო, შედგა კომპანია EMCOS-თან მჭიდრო თანამშრომლობა, რომელმაც მოიცვა, როგორ თეორიულ ანალიზში მათ მხარდაჭერა, ასევე ექსპერიმენტის დაგეგმვის და მისი სწორად ჩატარების საკითხებზე კონსულტაცია.

ეკონომიკური გავლენა

- ერთ-ერთი გავრცელებული შეზღუდვაა ენერგოეფექტურობაა. ჩვენი პროექტის ენერგო-საჭიროება არ აღემატება რამდენიმე ასეული ვატ-საათ ენერგო დანახარჯს. ძირითადი ენერგო მოხმარება მოდის ინფორმაციის დამმუშავებელ კომპიუტერზე.
- პროექტის განხორციელებისთვის შესაძენი მასალების და ხარჯების მინიმალიზაციის მიზნით მაქსიმალურად გამოვიყენეთ დეპარტამენტის მფლობელობაში არსებული ხელსაწყო-დანადგარები და გამზომი მოწყობილობები. შევიძინეთ მხოლოდ ის აუცილებელი კომპონენტები, რომელიც ვერ მოიძებნება საცდელ ლაბორატორიაში.

გარემოზე ზემოქმედების შეზღუდვა

- ელექტრომაგნიტური გამოსხივების შეზღუდვა აუცილებელია ადამიანზე მავნე ზემოქმედების და გარემოს ელექტრომაგნიტურად დაბინძურების თავიდან ასაცილებლად. ამდენად, ხელოვნურად გენერირებული დაბალი სიხშირის მაგნიტური ველი იყო $6 \mu T$ -ზე მცირე.

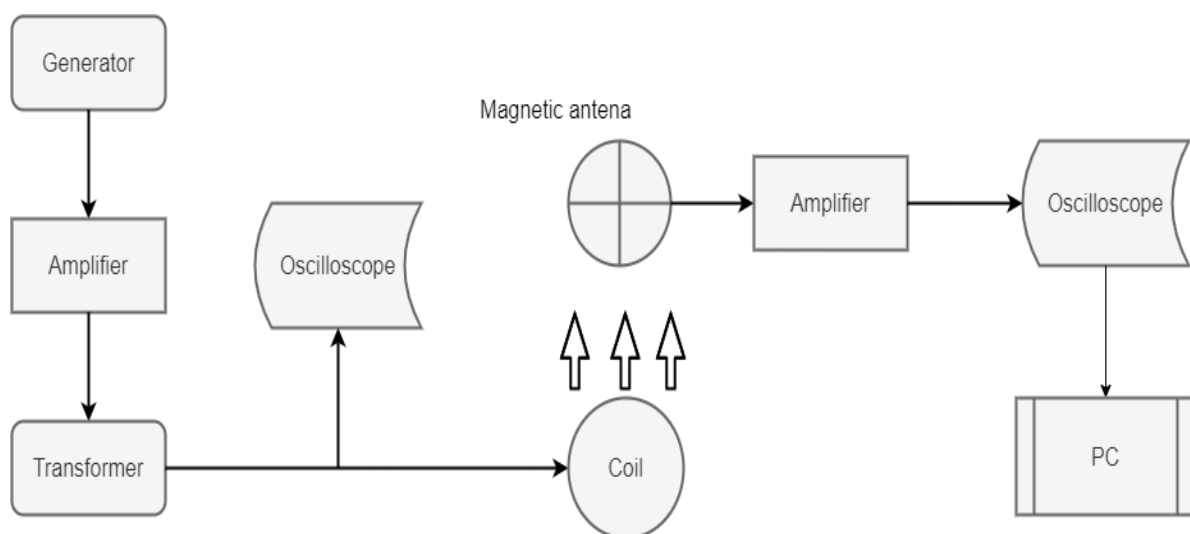
პროექტის სოციალური გავლენა

- წარმოდგენილი პროექტი მოიცავს აქტუალურ თემას, როგორცაა ელექტრომაგნიტური გამოსხივების მავნე ზემოქმედება ადამიანზე. კერძოდ, თანამედროვე ავტომობილებში ელექტრონული მოწყობილობების მზარდი გამოყენება ბაღებს კითხვას მათი გამოსხივების ხასიათსა და სიდიდეზე. საჭიროა ამ არასასურველი გამოსხივების იდენტიფიცირება და აღმოფხვრა. მავნე გამოსხივებების პრევენციისთვის ერთ-ერთი ეფექტური და გავრცელებული მეთოდია ელექტრონული მოწყობილობებისა და გამტარი სადენების ეკრანირება. დღევანდელ მანქანათმშენებლობის ინდუსტრიაში ერთ-ერთი აქტუალური კითხვა სწორედი ისაა, თუ რადმენად ეფექტურია ეკრანირება და რამდენად უზრუნველყოფს ის არასასურველი გამოსხივების პრევენციას, გასაკუთრებით ეკრანში ხვრელების არსებობის დროს. წარმოდგენილი პროექტის განხორციელება მნიშვნელოვან წვლილს შეიტანს მოცემული პრობლემის გადაჭრის გზების ძიებაში და იქნება წინ გადადგმული ნაბიჯი ადამიანის ჯანმრთელობისა და უსაფრთხოების ნორმების განვითარებისათვის.

ექსპერიმენტალური დანადგარის ფუნქციონირება

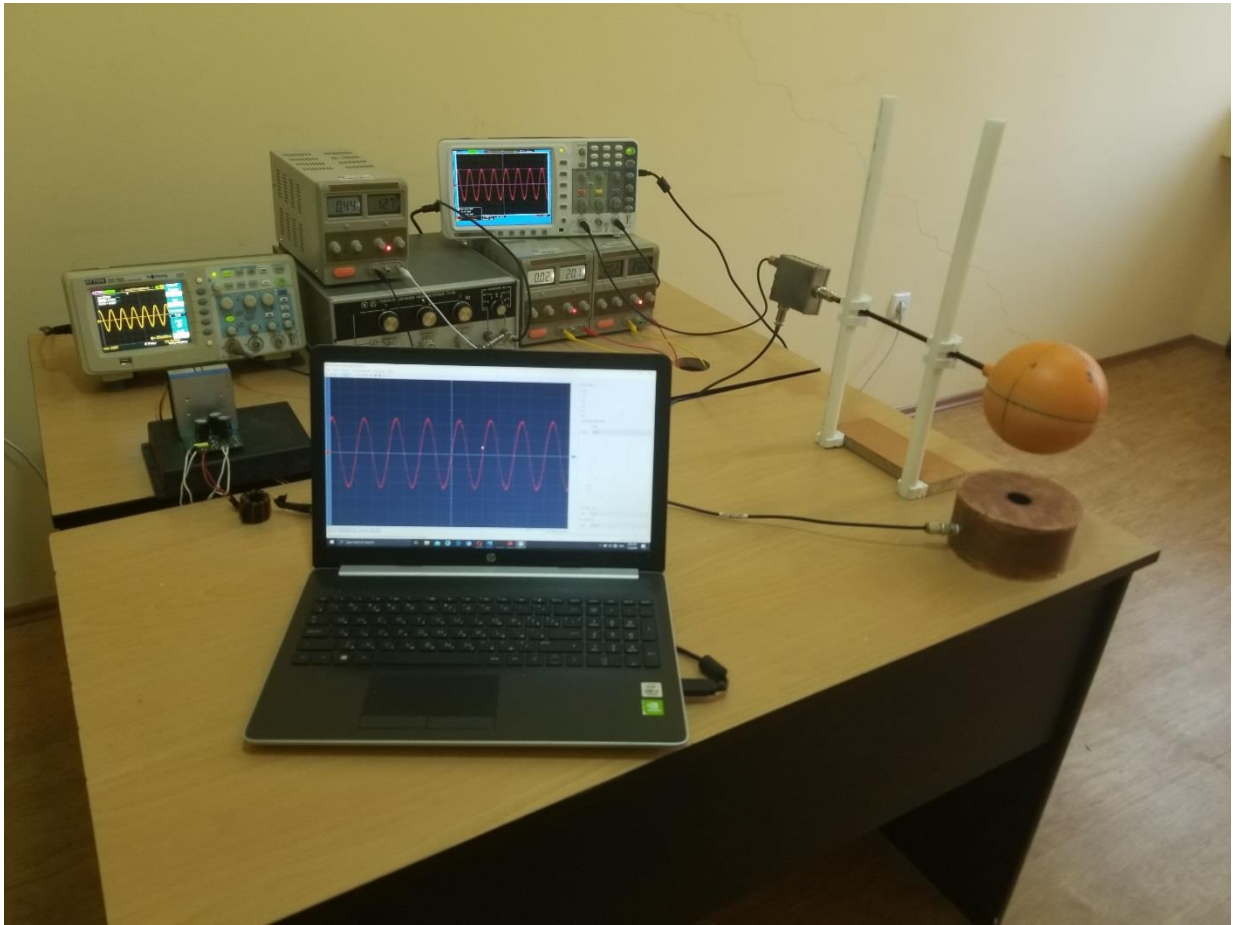
კომპაქტური ხელსაწყო კონცეფცია, რომელიც რეალურ დროში შეასრულებს გაზომვებს და მოგვცემს შედეგებს ასეთია: გენერატორიდან გამოდის 25 kHz სიხშირის სიგნალი, რომელსაც არ აქვს საკმარისი სიმძლავრე მოცემული ამოცანისთვის. ამრიგად, ვიყენებთ სიგნალის გამამძლიერებელს - TDA1536Q. შემდეგ სიგნალი მიეწოდება ტრანსფორმატორს, სადაც ხდება როგორც დენის გაძლიერება, ასევე იმპედანსის შეთანხმება გამომსხივებელ კოჭასთან. კოჭაში გამავალი ცვლადი დენი ქმნის მაგნიტურ ველს. გამოსხივებული მაგნიტური ველი სენსორის კოჭაში აღძრავს ძაბვას. მიღებული სიგნალი გამამძლიერებლის გავლით მიეწოდება ანალოგურ-ციფრულ გარდაქმნელს (ADC). თვის მხრივ, ADC-ს უკავშირდება კომპიუტერს. მოცემული ამოცანისთვის შექმნილი პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით შესაძლებელი ხდება მიღებული ინფორმაციის დაკალიბრება და მაგნიტური ველის სიდიდის აბსოლუტური მნიშვნელობის ჩვენება. მონაცემები ინახება სხვადასხვა გაფართოების ფაილებში, ამრიგად მარტივი ხდება ინფორმაციის მოთხოვნის შესაბამისად დამუშავება, ტრანსპორტირება და ვიზუალიზაცია.

ექსპერიმენტალური დანადგარის ბლოკ-სქემა



ნახაზი 1. ექსპერიმენტალური დანადგარის ბლოკ-სქემა

ექსპერიმენტული დანადგარი ასე გამოიყურება



სურათი 1. ექსპერიმენტული დანადგარის ლაბორატორიული სახე

პირველ ოსცილოგრაფზე აითვლება გამომსხივებელ კოჭაზე მოდებული ძაბვის სიდიდე, ხოლო მეორე ოსცილოგრაფი აჩვენებს სენსორიდან მიღებულ ინფორმაციას, რომელიც, თავის მხრივ USB კაბელით უკავშირდება კომპიუტერს და ხდება მონაცემების პირდაპირ რეჟიმში ჩაწერა და დამუშავება.

დაბალსიხშირული სიგნალების გენერატორი

სასურველი სიხშირის სიგნალის მისაღებად მოცემულ ამოცანაში გამოიყენება დაბალსიხშირული სიგნალების გენერატორი GZ-118-ს.



სურათი 2. სიგნალების გენერატორი GZ-118

მოცემული გენერატორის მუშა დიაპაზონი არის 10 Hz -დან 200 kHz-მდე. იგი გამოირჩევა გამოსავალი სიგნალი სიხშირის მაღალი სიზუსტით. ამასთან, გამოსავალი სიგნალის სიხშირე რეგულირდება მცირე ბიჯით. გენერატორს აქვს როგორც 50 Ohm, ასევე 600 Ohm გამოსავალი პორტი. გენერირებული სიხშირის ცდომილება წარმოადგენს 1%-ს.

ოპერაციული გამაძლიერებელი

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, გენერატორის მიერ აღძრული სიგნალის სიმძლავრე არაა საკმარისი მოცემული ამოცანისთვის. ამრიგად, ვიყენებთ გამაძლიერებელ TDA1562Q-ს.



სურათის 3. გამაძლიერებელი TDA1562Q

TDA1562Q არის მაღალი ხარისხის, მცირე ხმაურების მქონე, ოპერაციული გამაძლიერებელი. მისი მაქსიმალური სიმძლავრეა 70 ვატი. კვება 8-18 ვოლტის ფარგლებში; ერთპოლარული; ოპტიმალური ძაბვა 14.4 V. უქმი მუშაობისას გამოსავალზე ძაბვა არის 100 mV, ხოლო დენი 50 μ A. ოპტიმალური დატვირთვის წინაღობა არის 4 Ohm.

ტრანსფორმატორი

როგორც ცნობილია, ჩვენს მიერ შერჩეული დაბალსიხშირული სიმძლავრის გამაძლიერებელი TDA1562Q გათვლილია 4 Ohm დატვირთვაზე. გამომსხივებელი კოჭის კომპლექსური წინაღობა არის $Z = 0.430 + j 2.356$ Ohm, ხოლო აბსოლუტური მნიშვნელობა 2.395 Ohm-ის ტოლია. აქედან გამომდინარე, საჭირო გახდა შემათანხმებელი ტრანსფორმატორის გამოყენება. ამ მიზნისთვის შეირჩა N30 (MnZn) მაგნიტური მასალის ტოროიდალური გულარი, რომლის სამუშაო სიხშირე განისაზღვრება 10-400 kHz ფარგლებში, ხოლო მაგნიტური გაჯერების ველი B_{max} არის 240 – 380 მილიტესლას რიგის [1].



სურათი 4. N30 ტიპის მაგნიტური ტოროიდალური გულარი

ოპტიმალური ხვიათა რიცხვის გამოსათვლელად ვისარგებლეთ მაგნიტური გულარის მაქსიმალური სიმძლავრის და პირველად გრაგნილში ხვიათა რიცხვის გამოსათვლელი ფორმულებით [8, 9, 10]:

$$P_{max} = S_c \times S_o \times f \times B_{max}/150 \quad (12.1)$$

$$N_1 = \frac{2500 \times U_1}{f \times B_{max} \times S_c} \quad (12.2)$$

$$N_2 = \frac{2500 \times U_1}{f \times B_{max} \times S_c} \quad (12.3)$$

სადაც

$$S_c = \frac{(D-d)h}{2} \text{ და } S_o = \frac{\pi d^2}{4},$$

ხოლო $d = 1.929 \text{ cm}$ და $D = 3.04 \text{ cm}$ - ტოროიდის შიდა და გარე დიამეტრია, შესაბამისად. $h = 1.3 \text{ cm}$ ტოროიდის სიმაღლეა. $f = 25 \text{ kHz}$ ტრანსფორმატორის სამუშაო სიხშირეა, ხოლო B_{max} მაგნიტური გულარის მაგნიტური გაჯერების ველი. TDA1562Q-ს მაქსიმალური დასაშვები სიმძლავრე 70 ვატია, თუმცა ჩვენი ამოცანის შესასრულებლად და ტრანსფორმატორის მაქსიმალურად ეფექტური მუშაობისთვის ვირჩევთ 50 ვატს. U_1 პირველადი გრაგნილის ძაბვის ამპლიტუდური მნიშვნელობა განისაზღვრება TDA-ს გამოსავალი ძაბვით 4 Ohm დატვირთვაზე, რომელიც მიახლოებით 14 ვოლტის ტოლია, მისი 12 ვოლტით კვების შემთვევაში (TDA-ს აქვს DC/DC გარდამქნელი, რომელიც ერთი პოლარობის ძაბვას გარდაქმნის ორი პოლარობის +/-24 ვოლტ ძაბვად). (1) ფორმულიდან ვითვლით ტოროიდაში მაგნიტური ველის სიმკვრივეს, მოცემული $P_{max} = 50$ ვატი სიმძლავრის შემთვევაში, საიდანაც ვპოულობთ ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის $N_1 = 15$ ხვიათა რიცხვს, ხოლო $N_2 = N_1/n$, სადაც n ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი და ვითვლით ველის შემქმნელი კოჭის Z კომპლექსურ დატვირთვაზე მაქსიმალური 50 ვატის განვითარების შემთხვევისათვის. მეორად გრაგნილში მაქსიმალური კომპლექსური ძაბვა იქნება:

$$U_{2max} = \sqrt{P_{max} \times Z} \quad (12.4)$$

სადაიდანაც შეგვიძლია ვიპოვოთ ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი, პირველადი და მეორადი ძაბვების აბსოლუტური მნიშვნელობების შეფარდებით:

$$n = \frac{|U_1|}{|U_2|} = 1.3 \quad (12.5)$$

შედეგად მეორადი გრაგნილის ხვიათა რიცხვი გამოდის $N_2 = 15/1.3 = 11.5$

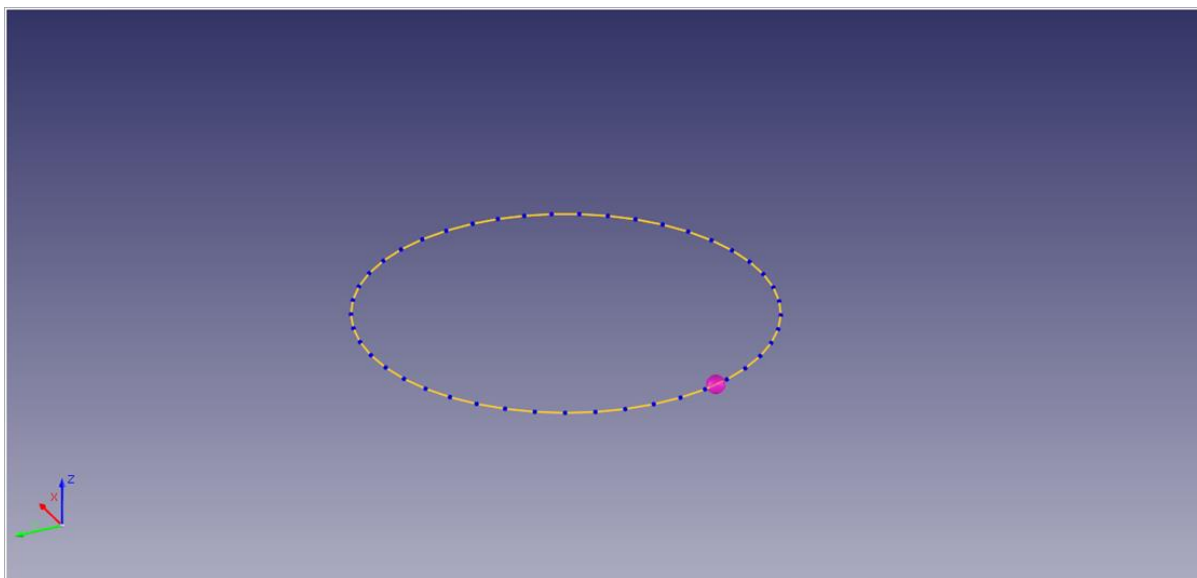


სურათი 5. N30 ტიპის მაგნიტური ტოროიდალური გულარის გამოყენებით შექმნილი ტრანსფორმატორი

ტოროიდის შემთვევითი გაჯერების, ან ტემპერატურული ეფექტით გამოწვეული გაჯერების თავიდან აცილების მიზნით, ავირჩიეთ ორი გაერთიანებული მაგნიტური გულარი, შედეგად, მივიღეთ $n = 2$ ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი და $N_2 = 11$ და $N_1 = 22$ ხვიათა თანაფარდობა.

ანალიზური შემოწმება

ანალიზური ამოხსნა აუცილებელი გახდა, რათა სიმულაციური შედეგების სისწორე დადგენილიყო და EMCoS Studio-ს შედეგების სიზუსტე განსაზღვრულიყო. ერთი ხვიისთვის მოხდა შედარება ანალიზურად და სიმულაციურად დათვლილი მაგნიტური ველის ინდუქციებისა.



ნახაზი 2. ერთი ხვიის სიმულაცია EMCoS Studio-ს გამოყენებით

ხვიის დიამეტრი $D = 75 \text{ mm}$

მავთულის დიამეტრი $d = 0.5 \text{ mm}$

მავთულის მასალა - სპილენძი

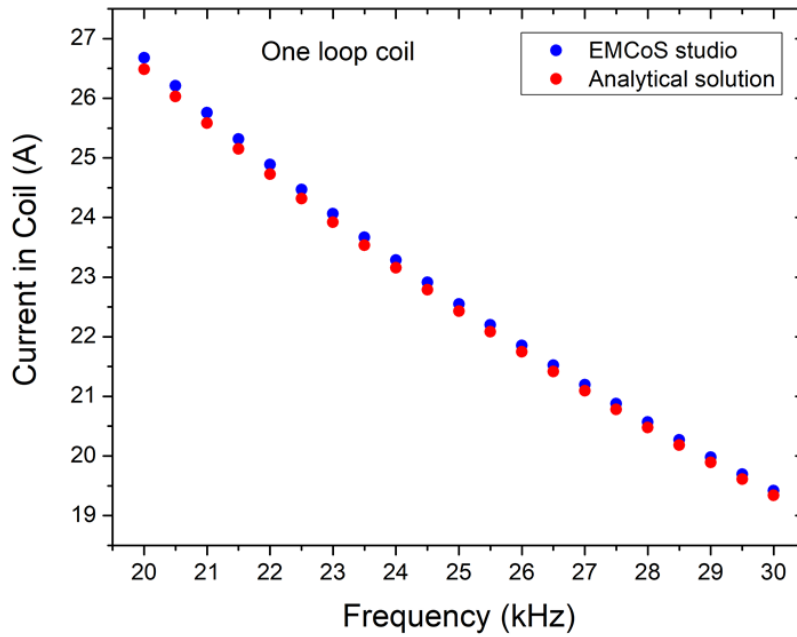
წყაროს ძაბვა - 1 V

გამოთვლები ჩატარდა $20 \text{ kHz} - 30 \text{ kHz}$ სიხშირული დიაპაზონისთვის.

თავდაპირველად მოხდა ანალიზური და სიმულაციური მეთოდებით გამოთვლილი დენის აბსოლუტური მნიშვნელობის სიხშირეზე დამოკიდებულების შედარება.

ანალიზური გამოთვლა: $I = U/Z$ (13.1)

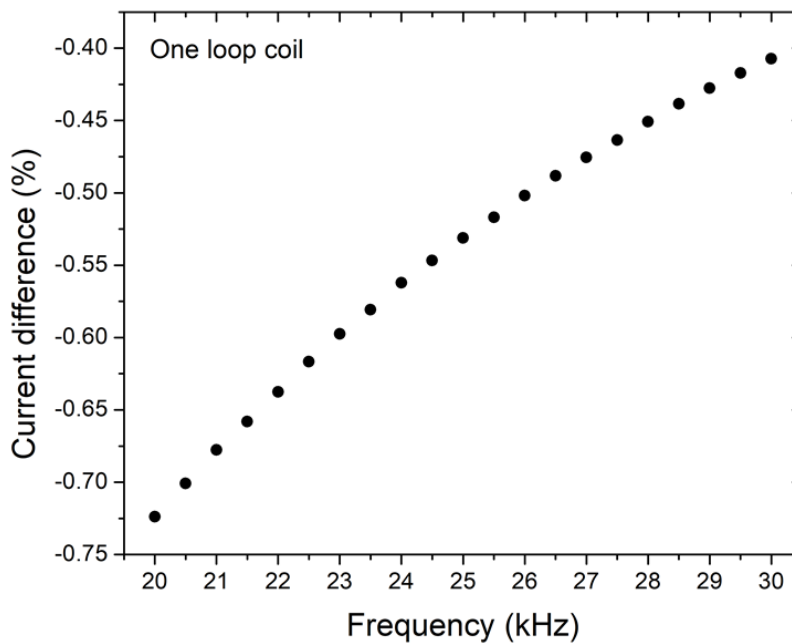
სადაც $Z = R_{dc} + j2\pi fL$ (13.2)



გრაფიკი 1. წყაროს სეგმენტში დენის აბსოლუტური მნიშვნელობების დამოკიდებულება სიხშირეზე.

ლურჯი ფერით აღნიშნულია EMCoS Studio პროგრამით სიმულირებული დენი, ხოლო წითელი ფერით ანალიზურად დათვლილი.

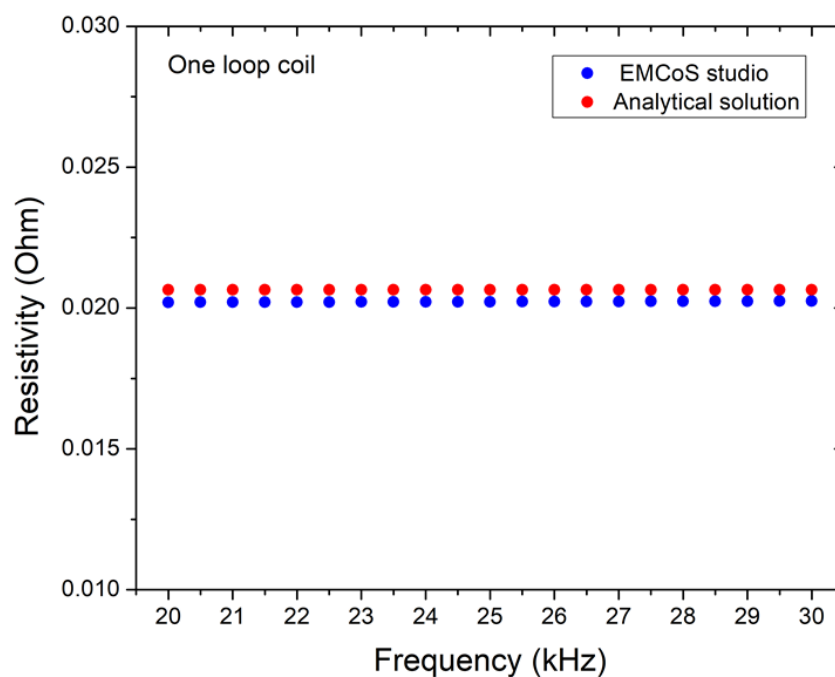
გრაფიკ 1-ზე გადაზომილია დენის აბსოლუტური მნიშვნელობები, $\text{abs}(I)$.



გრაფიკი 2. წყაროს სეგმენტში სიმულირებული და ანალიზური გზით მიღებულ დენის აბსოლუტური მნიშვნელობებს შორის განსხვავება პროცენტებში სიხშირის მიხედვით.

დენის აბსოლუტური მნიშვნელობის გამოთვლის შემდეგ დადგინდა ზემოთ მოცემული ხვიის წინალობის სიხშირეზე დამოკიდებულების განსხვავება ანალიზური და სიმულაციური გამოთვლებისას.

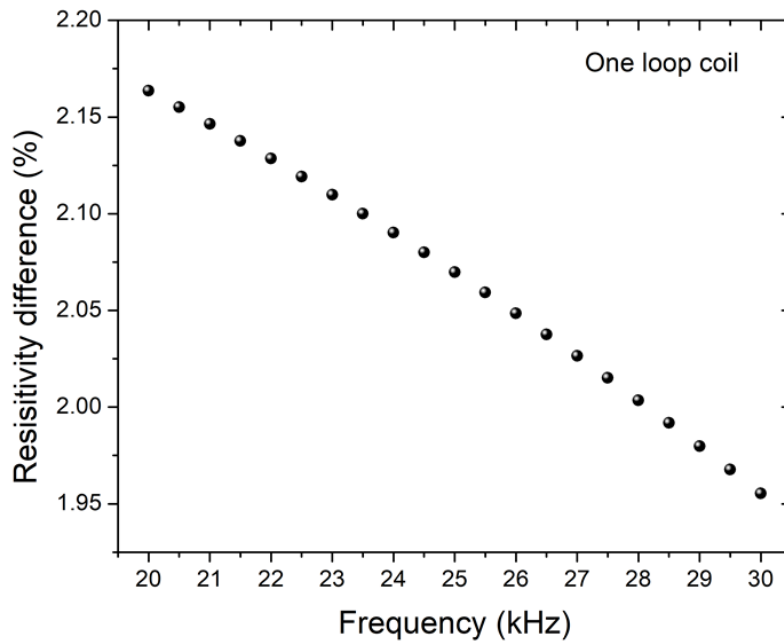
ანალიზური გამოთვლა:
$$R_{dc} = \frac{\rho l}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (13.3)$$



გრაფიკი 3. წყაროს სეგმენტში იმპედანსის რეალური ნაწილის დამოკიდებულება სიხშირეზე.

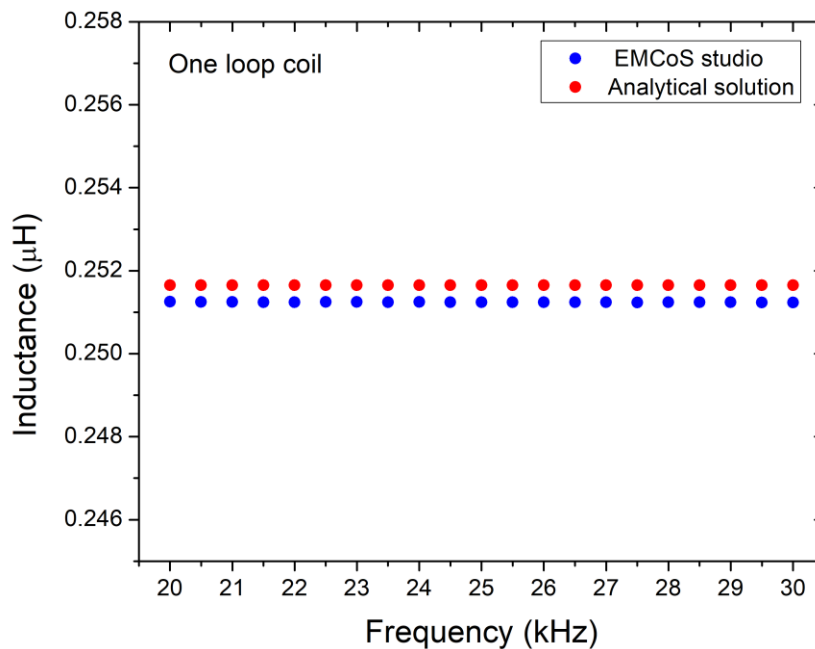
სიმულაციით მიღებული: $R = \text{real}(Z)$ (13.4)

სადაც $Z=U/I$ (13.5)



გრაფიკი 4. წყაროს სეგმენტში სიმულირებული და ანალიზური გზით მიღებულ იმპედანსის რეალურ ნაწილს შორის განსხვავება პროცენტებში სიხშირის მიხედვით.

ამის შემდეგ მოხდა ანალიზური და სიმულაციური გზით მიღებული ინდუქციურობის სიხშირეზე დამოკიდებულების შედარება.



გრაფიკი 5. კოჭის ინდუქციურობის სიხშირეზე დამოკიდებულება

ანალიზური გამოთვლისთვის გამოიყენება ფრედერიკ გროვერის ფორმულა [12]:

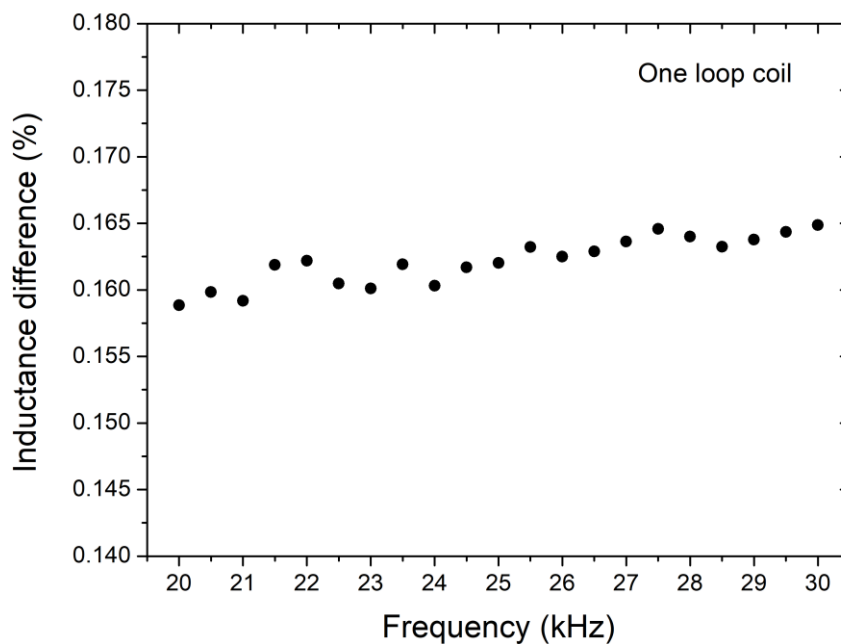
$$L = 0.0002\pi D \left[\ln\left(\frac{8D}{d}\right) - 1.75 \right] \quad (13.6)$$

L - ინდუქციურობა (μH)

D - ხვიის დიამეტრი (mm)

d - მავთულის დიამეტრი (mm)

გროვერის მიერ შემუშავებული ემპირიული ფორმულის მეშვეობით შესაძლებელია ერთი ხვიის ინდუქციურობის გამოთვლა. მოცემული ფორმულა საუკეთესო გამოსათვლელი საშუალებაა მსგავსი შმეთხვევებისთვის, რადგანაც სიზუსტე საკმაოდ დიდია პრაქტიკული მიზნებისთვის. კერძოდ, როცა, ხვიის დიამეტრის შეფარდება მავთულის დიამეტრთან მეტია ხუთზე, ცდომილება დაახლოებით არის ერთი პროცენტის ფარგლებში.

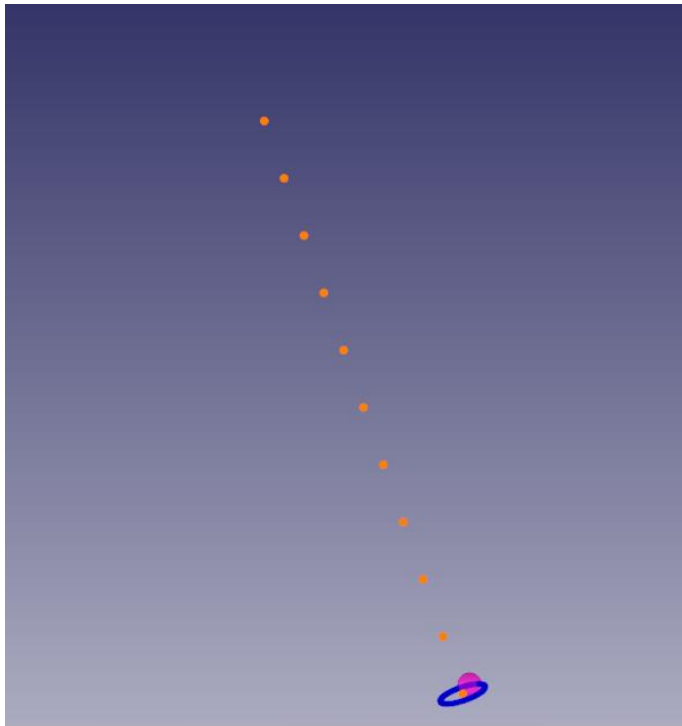


გრაფიკი 6. სიმულირებული და ანალიზური გზით მიღებულ ინდუქციურობებს შორის განსხვავება პროცენტებში სიხშირის მიხედვით.

სიმულაციით მიღებული: $L = \text{imag}(Z)$ (13.7)

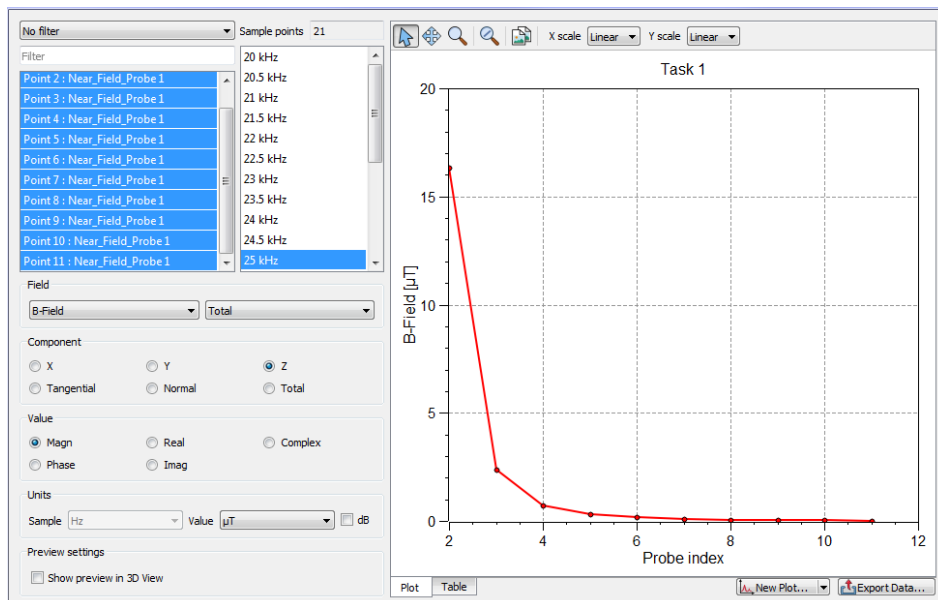
სადაც $Z=U/I$ (13.8)

გაკეთდა მაგნიტური ინდუქციის სიმულაციური გამოთვლა Z-ღერძის გასწვრივ 1 მ-მდე, 0.1 მ ბიჯით.

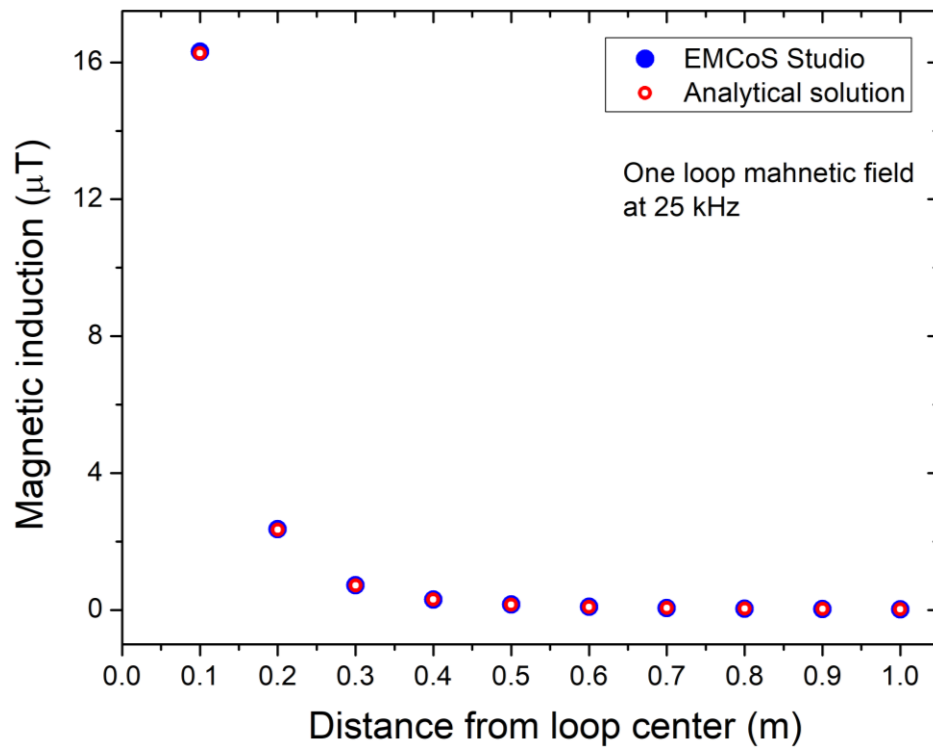


ნახაზი 3. EMCoS Studio -ს გამოყენებით ერთი ხვიის მოდელირება 11 გამზომი წერტილით

სიმულაციის შედეგად მიიღება შემდეგი მონაცემები:

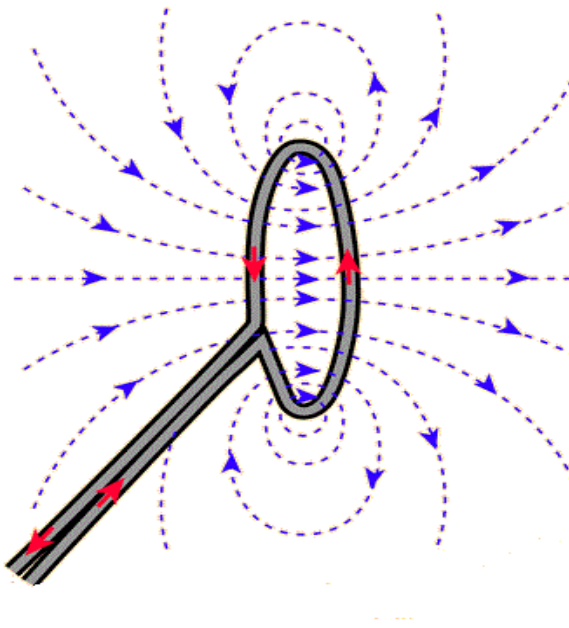


გრაფიკი 7. EMCoS Studio- ს გამოყენებით 11 გამზომი წერტილის სიმულაციის შედეგად მიღებული მონაცემები



გრაფიკი 8. კოჭის მაგნიტური ველის მანძილზე დამოკიდებულება.

Z ღერძის გასწვრივ მაგნიტური ველის ინდუქციის ანალიზური გამოთვლა შესრულდა ბიო-სავარის კანონის გამოყენებით. ელექტრული დენი ხვიაში ქმნის მაგნიტურ ველს, რომელიც მეტწილად კონცენტრირებულია ხვიის ცენტრში, ვიდრე ხვიის გარეთ.



ნახაზი 4. ერთი ხვიის მიერ აღძრული მაგნიტური ველის ძალწირები

მაგნიტური ველის ინდუქცია ხვიის ცენტრში გამოითვლება ქვემოთ მოცემული ფორმულით:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \oint dL = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} 2\pi R = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (13.9)$$

I - დენის ძალა (A)

R - ხვიის რადიუსი (m)

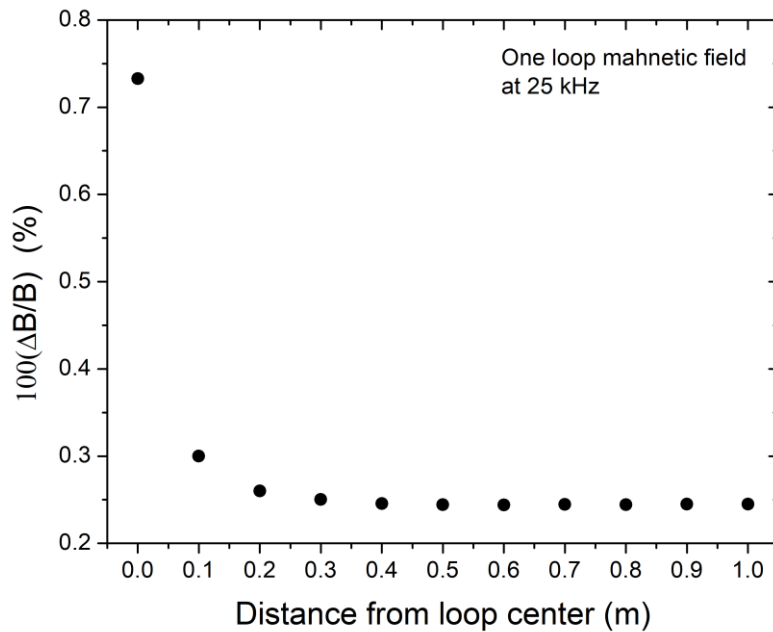
B - მაგნიტური ველის ინდუქცია (T)

ბიო-სავარის გამოყენება ცენტრალური ღერძის გასწვრივ ველის დასათვლელად საჭიროებს ინტეგრირებას Z კომპონენტის მიმართ:

$$dB_z = \frac{\mu_0 I dL}{4\pi} \frac{R}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (13.10)$$

სიმეტრიის გამო მოცემულ ფორმულაში შემავალი ცვლადები მუდმივია, გარდა dL კომპონენტისა, რომელიც ინტეგრირების დროს იძლევა წრის გარშემოწერილობას. შესაბამისად მაგნიტური ველის ინდუქცია დაითვლება შემდეგნაირად:

$$B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (13.11)$$



გრაფიკი 9. განსხვავება ანალიზურ და სიმულირებულ ველებს შორის

შედეგად, ჩატარდა EMCoS Studio-ს გამოყენებით მიღებული შედეგების ანალიზური შემოწმება. სადაც ერთხვითი კოჭის შემთხვევაში ანალიზური ამონახსნის შედარება მოხდა სიმულაციით მიღებულ შედეგებთან. კერძოდ, ერთხვითი წრიულ კოჭაზე მოდებულ იქნა 1 ვოლტის მქონე ძაბვის წყარო და 20-დან 30 კილოჰერცამდე დიაპაზონში შემოწმდა მაგნიტური ველის ინდუქციის მნიშვნელობები კოჭის ცენტრიდან Z ღერძის მიმართულებით თანაბრი ბიჯით დაშორებული წერტილებისათვის. სიმულაციით და ანალიტიკურად მიღებული მნიშვნელობები დიდი სიზუსტით ემთხვევიან ერთმანეთს. მათ შორის ცდომილება არ აღემატება 2%-ს და უმეტეს შემთხვევაში 1%-ზე ნაკლებია.

მაგნიტური ველის ეკრანირება

ელექტრომაგნიტური ველის შეზღუდვის და მისი გარემოში არასასურველი გამოსხივების პრევენციის ეფექტური გზა არის მისი ეკრანირება. ეკრანირება განსაკუთრებით ეფექტურია მაღალი სიხშირების შემთხვევაში, ზედაპირული ეფექტებიდან გამომდინარე. მაგრამ პრობლემა იქმნება - როცა სიხშირე დაბალია და ეკრანის სისქე მცირეა მეტალში შეღწევადობის სიღრმესთან შედარებით. დაბალი სიხშირის მაგნიტური ველის ეკრანირების ეფექტური გზა არის ეკრანად ფერომაგნიტური მასალის გამოყენება. თუმცა, ეს მეთოდი პროექტის თვითღირებულებას ზრდის და ხშირ შემთხვევაში ეს შეიძლება ტექნიკურად სიმძნელებთანაც იყოს დაკავშირებული.

ზოგად შემთხვევაში, მაგნიტური ველის განტოლება მოიცემა შემდეგი გამოსახულებით [13, 14]:

$$\nabla^2 H - \varepsilon\mu_0\mu_r \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} - \sigma\mu_0\mu_r \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (14.1)$$

სადაც, ε ნივთიერების დიელექტრიკული შეღწევადობაა, σ ნივთიერების გამტარებლობა, μ_0 და μ_r ვაკუუმის და ნივთიერების მაგნიტური ამთვისებლობა, შესაბამისად.

თუ მაგნიტური ველის დამაბულობას გამოვსახავთ გამოსახულებით:

$$H = H_0 e^{-i2\pi f t} \quad (14.2)$$

და შევიტანთ (14.1) -ში, სადაც f ეკრანზე დაცემული მაგნიტური ველის სიხშირეა ჰერცებში, მივიღებთ გამოსახულებას:

$$\nabla^2 H + (2\pi f)^2 \varepsilon\mu_0\mu_r H + i2\pi f \sigma\mu_0\mu_r H = 0 \quad (14.3)$$

შესაბამისი სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით:

$$\nabla^2 H = \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \quad (14.4)$$

სადაც, z ზედაპირის მართობული კოორდინატია, მივიღებთ:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} + (2\pi f)^2 \varepsilon\mu_0\mu_r H + i2\pi f \sigma\mu_0\mu_r H = 0 \quad (14.5)$$

რომლის ზოგადი ამონახსნი მოიცემა თანაფარდობით:

$$H = H_0 e^{(\alpha+i\beta)z} \quad (14.6)$$

სადაც α ტალღის მილევის მაჩვენებელი კოეფიციენტია, ხოლო β ფაზური კომპონენტია და განსაზღვრავს მაგნიტური ველის მილევას და გავრცელების პირობებს. ამ კოეფიციენტების განსაზღვრა ცალკე ამოცანას წარმოადგენს და ჩვენი განხილვის სფეროს სცილდება.

აღსანიშნავია, რომ

$$\beta = \sqrt{\pi f \sigma \mu_0 \mu_r} \quad (14.7)$$

β არის ნივთიერებაში მაგნიტური ველის შეღწევადობის ის სიღრმე, რომლის დროსაც ველის დამაბულობა მცირდება e -ჯერ. მაგნიტური ველის შეღწევადობის ეს სიღრმე გამოსახება თანაფარდობით:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu_0 \mu_r}} \quad (14.8)$$

მაღალ სიხშირეებზე არამაგნიტური, მაგრამ გამტარი ნივთიერებები კარგ ეკრანირების ეფექტს იძლევიან ედი დენების (eddy currents) ეფექტური გენერირების გამო ეკრანის ზედაპირზე. ხოლო, დაბალ სიხშირეებზე არამაგნიტური და გამტარი ნივთიერების გამოყენებისას, მისი ეფექტურობის გასაზრდელად უნდა მოხდეს ძალიან დიდი გამტარებლობის მქონე ნივთიერების გამოყენება. ასეთი მაღალი გამტარებლობა აქვს ზეგამტარ ნივთიერებებს, რომელთა გამოყენება ეკრანირებისთვის ცალკე ტექნიკურ და ფინანსურ პრობლემებთან არის დაკავშირებული. თუმცა, საკმაოდ ეფექტურია ათეული კილოჰერცი და მეტი სიხშირის მაგნიტური ველების ეკრანირება მაღალი გამტარებლობის მქონე ნივთიერების საშუალებით. ასეთი ნივთიერებებია მაგალითად: ალუმინი, სპილენძი, ვერცხლი.

ეკრანში ხერელის არსებობის შემთხვევაში მოვლენის ანალიზური აღწერა საკმაოდ რთულ და კომპლექსურ ამოცანას წარმოადგენს [15]. რომლის განხილვაც სცილდება ჩვენი კომპეტენციის ფარგლებს. შესაბამისად, პროექტის ფარგლებში გთავაზობთ ამოცანის აღწერის ექსპერიმენტულ მეთოდს, რომელიც თავის მხრივ შედარდება EMCos Studio-ს საშუალებით სიმულირებულ შედეგებთან.

სენსორის კალიბრაცია

ამოცანაში გამოყენებული სენსორი არის ტრიაქსიალური კოჭა. მასში მაგნიტური ველის გავლის შემდეგ იგი გამოსავალზე იძლევა ძაბვას. ძაბვის სიდიდე დამოკიდებულია განმჭოლი მაგნიტური ველის სიდიდეზე. კალიბრაციის მიზანი იყო დამოკიდებულების შესწავლა გამოსავალზე ძაბვის სიდიდესა და განმჭოლ ველს შორის.

სენსორის კალიბრაციისთვის ჩატარდა გაზომვები უეკრანო გამომსხივებელი კოჭის გამოყენებით სხვადასხვა დაშორებებზე. სენსორის განთავსების ადგილები შერჩეულ იქნა გამომსხივებელ კოჭაზე მოდებული სიგნალის წყაროს სიმძლავრის მიხედვით. კალიბრაციისთვის ჩატარდა 300-ზე მეტი გაზომვა.

1	140	118.5		2	170	148.5		3	200	178.5		4	250	228.5		5	300	278.5		6	350	328.5		7	400	378.5
V(mod)	[mV/gaz]	B(აT)		V(mod)	[mV/gaz]	B(აT)		V(mod)	[mV/gaz]	B(აT)		V(mod)	[mV/gaz]	B(აT)		V(mod)	[mV/gaz]	B(აT)		V(mod)	[mV/gaz]	B(აT)		V(mod)	[mV/gaz]	B(აT)
0.6	5180	1.356397		0.6	2820	0.70784		0.6	1800	0.411961		0.6	864	0.197463		0.6	488	0.109074		0.6	328	0.066367		0.6	208	0.043305
0.8	6780	1.809329		0.8	3880	0.943786		0.8	2400	0.549381		0.8	1160	0.263284		0.8	664	0.145432		0.8	436	0.088489		0.8	284	0.057739
1	8400	2.261661		1	4820	1.179733		1	3000	0.686601		1	1460	0.329105		1	844	0.18179		1	536	0.110611		1	356	0.072174
1.2	10000	2.713993		1.2	5760	1.476679		1.2	3600	0.823921		1.2	1760	0.394926		1.2	1000	0.218148		1.2	640	0.132733		1.2	432	0.086609
1.4	11600	3.166325		1.4	6780	1.651626		1.4	4200	0.961241		1.4	2080	0.460747		1.4	1160	0.254506		1.4	744	0.154855		1.4	488	0.101044
1.6	13200	3.518657		1.6	7780	1.887572		1.6	4800	1.039562		1.6	2360	0.538568		1.6	1340	0.290864		1.6	848	0.176378		1.6	568	0.115479
1.8	14800	4.070399		1.8	8840	2.123519		1.8	5400	1.235882		1.8	2660	0.592389		1.8	1540	0.327222		1.8	960	0.1991		1.8	632	0.123914
2	16400	4.523322		2	9800	2.359466		2	6000	1.373002		2	2960	0.65821		2	1740	0.363568		2	1060	0.221222		2	712	0.144348
2.2	18000	4.975654		2.2	10800	2.595412		2.2	6600	1.510522		2.2	3260	0.724031		2.2	1940	0.399938		2.2	1170	0.243344		2.2	776	0.158783
2.4	19600	5.427986		2.4	11800	2.831959		2.4	7200	1.647843		2.4	3560	0.789952		2.4	2140	0.436295		2.4	1280	0.265466		2.4	856	0.173218
2.6	21200	5.880318		2.6	12800	3.067305		2.6	7820	1.795163		2.6	3860	0.855673		2.6	2330	0.472653		2.6	1390	0.287589		2.6	928	0.161653
2.8	22800	6.33265		2.8	13800	3.303252		2.8	8420	1.922483		2.8	4160	0.921494		2.8	2520	0.503011		2.8	1500	0.309711		2.8	980	0.202088
3	24400	6.784983		3	14800	3.539198		3	9020	2.059803		3	4460	0.987315		3	2700	0.545369		3	1600	0.331833		3	1060	0.216523
3.2	26000	7.237315		3.2	15800	3.775145		3.2	9600	2.197123		3.2	4760	1.051317		3.2	2880	0.581727		3.2	1700	0.353955		3.2	1120	0.230957
3.4	27600	7.689647		3.4	16800	4.010192		3.4	10240	2.334444		3.4	5060	1.118958		3.4	3060	0.618085		3.4	1800	0.376077		3.4	1200	0.245392
3.6	29200	8.141979		3.6	17800	4.247038		3.6	10820	2.471764		3.6	5360	1.184779		3.6	3260	0.654443		3.6	1910	0.3982		3.6	1280	0.259827
3.8	30800	8.594311		3.8	18800	4.482995		3.8	11400	2.609094		3.8	5660	1.2506		3.8	3460	0.690801		3.8	2020	0.420322		3.8	1360	0.274262
4	32400	9.046644		4	19800	4.718931		4	12000	2.746404		4	5960	1.316421		4	3660	0.727159		4	2120	0.442444		4	1440	0.288637

1	440	418.5		2	400	378.5		3	360	338.5		4	320	298.5		5	280	258.5		6	240	218.5		7	200	178.5
V(mod)	[mV/gaz]	B(აT)		V(mod)	[mV/gaz]	B(აT)		V(mod)	[mV/gaz]	B(აT)		V(mod)	[mV/gaz]	B(აT)		V(mod)	[mV/gaz]	B(აT)		V(mod)	[mV/gaz]	B(აT)		V(mod)	[mV/gaz]	B(აT)
0.6	104	0.03232		0.6	116	0.04376		0.6	150	0.05127		0.6	224	0.08948		0.6	350	0.13885		0.6	540	0.22813		0.6	920	0.41633
0.8	176	0.0431		0.8	192	0.05835		0.8	236	0.0817		0.8	350	0.1131		0.8	512	0.13384		0.8	808	0.30417		0.8	1400	0.59511
1	224	0.05387		1	288	0.07294		1	344	0.10213		1	520	0.14913		1	776	0.2238		1	1240	0.38021		1	2060	0.63389
1.2	272	0.06465		1.2	344	0.08752		1.2	448	0.12255		1.2	648	0.17896		1.2	980	0.27577		1.2	1700	0.45626		1.2	2800	0.83267
1.4	336	0.07542		1.4	420	0.10211		1.4	540	0.14298		1.4	796	0.20879		1.4	1160	0.32173		1.4	1820	0.5323		1.4	3340	0.97145
1.6	384	0.0862		1.6	520	0.1167		1.6	664	0.16341		1.6	1000	0.23862		1.6	1470	0.36769		1.6	2400	0.60834		1.6	4160	1.11023
1.8	432	0.09698		1.8	610	0.13129		1.8	768	0.18383		1.8	1136	0.26944		1.8	1680	0.41365		1.8	2760	0.68439		1.8	4780	1.24901
2	504	0.10775		2	700	0.14588		2	900	0.20426		2	1300	0.29327		2	1960	0.45961		2	3160	0.76043		2	5520	1.38779
2.2	552	0.11853		2.2	770	0.16047		2.2	985	0.22468		2.2	1430	0.3281		2.2	2170	0.50557		2.2	3490	0.83647		2.2	6170	1.52657
2.4	600	0.1293		2.4	820	0.17005		2.4	1080	0.24511		2.4	1580	0.35793		2.4	2380	0.55164		2.4	3840	0.91252		2.4	6880	1.66535
2.6	656	0.14008		2.6	880	0.18964		2.6	1196	0.26554		2.6	1720	0.38775		2.6	2620	0.5975		2.6	4220	0.98856		2.6	7380	1.80413
2.8	712	0.15085		2.8	960	0.20423		2.8	1280	0.28596		2.8	1940	0.41758		2.8	2880	0.64346		2.8	4720	1.0646		2.8	8240	1.9429
3	776	0.16163		3	1040	0.21882		3	1410	0.306394		3	2040	0.44741		3	3040	0.68942		3	5040	1.14065		3	8890	2.08168
3.2	840	0.17241		3.2	1100	0.23241		3.2	1500	0.32682		3.2	2230	0.47724		3.2	3280	0.73538		3.2	5440	1.21669		3.2	9520	2.22046
3.4	884	0.18318		3.4	1180	0.24799		3.4	1680	0.34724		3.4	2380	0.50706		3.4	3520	0.78134		3.4	5760	1.29273		3.4	10020	2.35924

ცხრილი 3. სენსორის კალიბრაციისთვის შესრულებულ გაზომვათა ცხრილი

კალიბრაციის ალოგორითმი შემდეგია - სენსორი ფიქსირდება Z ღერძის გასწვრივ, წინასწარ განსაზღვრულ მანძილზე. კოჭაზე მოდებულია სასურველი აპლიტუდის მქონე სიგნალი, რომლის შედეგადაც იგი ასხივებს მაგნიტურ ველს. მაგნიტური ველი განჭოლავს სენსორის კოჭას და ძაბვას იძლევა გამოსავალზე. როგორც ზემოთ აღინიშნა, სენსორი მიერთებულია ციფრულ ოსცილოგრაფზე, რომელიც საშუალებას იძლევა პირდაპირ რეჟიმში გადავცეთ მიღებული ინფორმაცია

კომპიუტერს. ინფორმაციის დასამუშავებლად შეიქმნა პროგრამა, რომელიც მიღებული ძაბვის მნიშვნელობებს ინახავს excel.xls და data.dat ფაილებში.

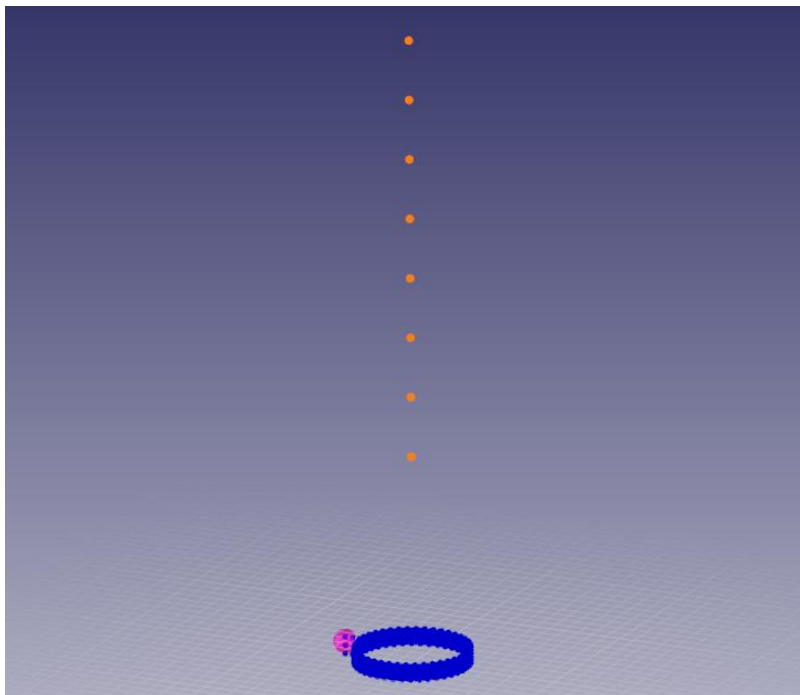
ამრიგად, შესაძლებელი ხდება გამომსხივებელ კოჭაზე მოდებული ძაბვის შესაბამისობა სენსორიდან მიღებულ ძაბვასთან.

ამის შემდეგ იცვლება კოჭაზე მოდებული სიგნალი და ისევ იზომება სენსორიდან მიღებული ძაბვა. ვიღებთ სიგნალის 15 სხვადასხვა მნიშვნელობას - ერთი და იმავე სიხშირითა და ძაბვის სხვადასხვა ამპლიტუდით.

პირველ დაშორებაზე 15 ანათვლის ალების შემდეგ იცვლება სენსორის დაშორება და ისევ აიღება ანათვლები.

გაზომვა ხდება 8 სხვადასხვა მანძილზე.

გაზომვების ჩატარების შემდეგ საჭიროა სენსორიდან მიღებული ძაბვის მნიშვნელობის ველის მნიშვნელობად კონვერტაცია. ამისთვის EMCoS გამოყენებით მოხდა მოცემული ამოცანის მოდელირება. მოდელირებისას გამზომი წერტილები განთავსდა გაზომვების დროს შერჩეული მანძილების შესაბამისად.



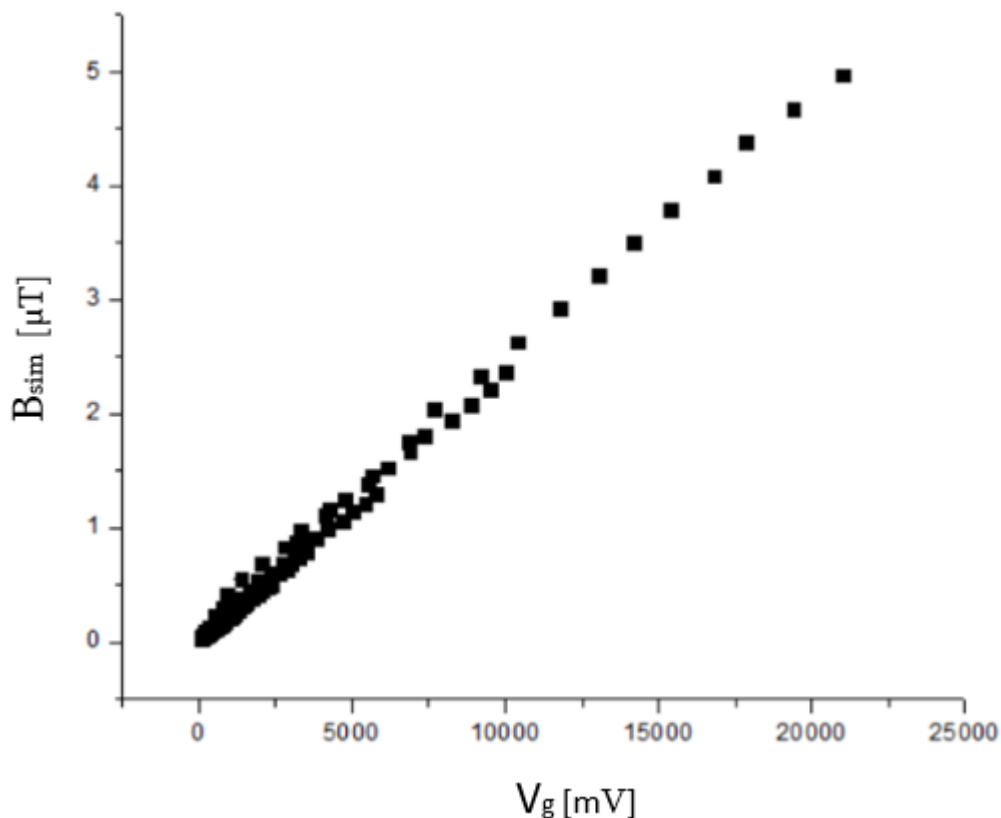
ნახაზი 4. EMCoS Studio-ში მოდელირებული გამომსხივებელი კოჭა რვა გამზომი წერტილით

გამომსხივებელ კოჭაზე მოდებული სიგნალის ყოველი მნიშვნელობისთვის კეთდება სიმულაცია და თითოეული სიმულაციისას ყოველ გამზომ წერტილზე ითვლება მაგნიტური ველის სიდიდე.

თითოეულ ფიქსირებულ სიმაღლეზე, ყოველი სიგნალისას სიმულაციით მიღებული ველის მნიშვნელობა მიესადაგება ამავე პირობებით გაზომვებისას, სენსორიდან მიღებულ ძაბვის მნიშვნელობას.

პროგრამა OriginLab-ის გამოყენებით ვიღებთ ანალიზურ ფორმულას, რომელიც მოიცავს დამოკიდებულებას გაზომილ ძაბვასა და სიმულაციით მიღებულ ველს შორის.

მინაცემთა განაწილებას აქვს შემდეგი სახე:



გრაფიკი 10. პროგრამა OriginLab-ის გამოყენებით ნაჩვენები მონაცემთა განაწილების გრაფიკი

ამის შემდეგ, სენსორის საშუალებით ნებისმიერ შემთხვევით შერჩეულ წერტილში გაზომვისას მიღებული ძაბვა, შესაძლებელია, ზემოაღნიშნული ანალიზური ფორმულის გამოყენებით, კონვერტირდეს მაგნიტური ველის აბსოლუტური მნიშვნელობად.

გაზომვები სხვადასხვა ტიპის ეკრანის შემთხვევაში

კალიბრაციის შედეგად, შესაძლებელი ხდება გაზომვების ჩატარება და მაგნიტური ველის სიდიდის მიღება სხვადასხვა შემთხვევებისათვის.

გაზომვების მიზანი არის სხვადასხვა ტიპის ეკრანის არსებობის შემთხვევაში ველის სიდიდის განსაზღვრა. ამ მიზნით, ამოცანიდან გამომდინარე, წინასწარ იქნა შერჩეული ეკრანის ფორმები.

ეკრანირებისთვის გამოიყენება სპილენძის ფირფიტა.

ბრტყელი მართკუთხა ფორმის ეკრანი

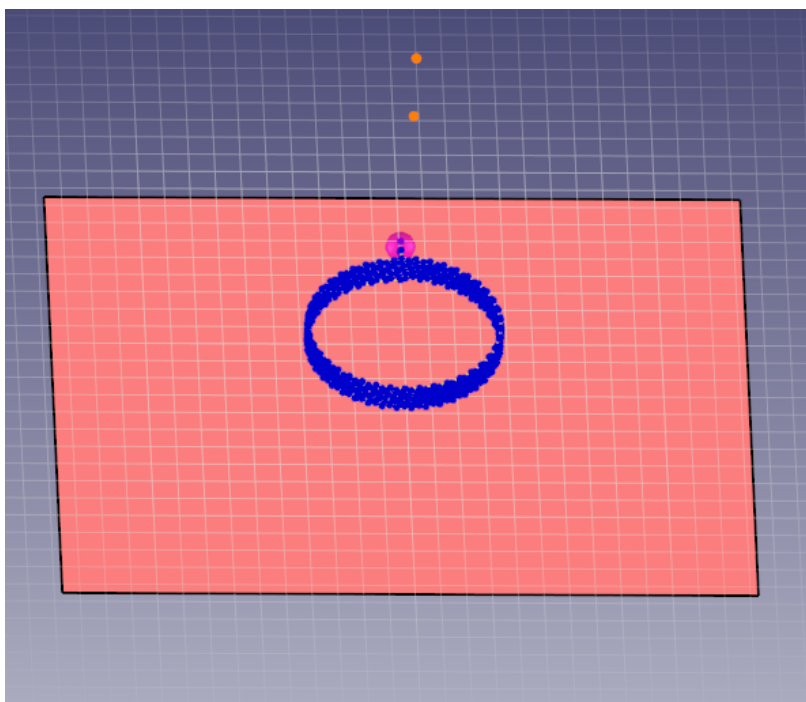
პირველი გაზომვა ჩატარდა ბრტყელი მართკუთხა ფორმის, 0.2 mm სისქის სპილენძის ეკრანზე.



სურათი 6. მართკუთხა ფორმის სპილენძის ფირფიტა. ზომა - 23 x 27 cm

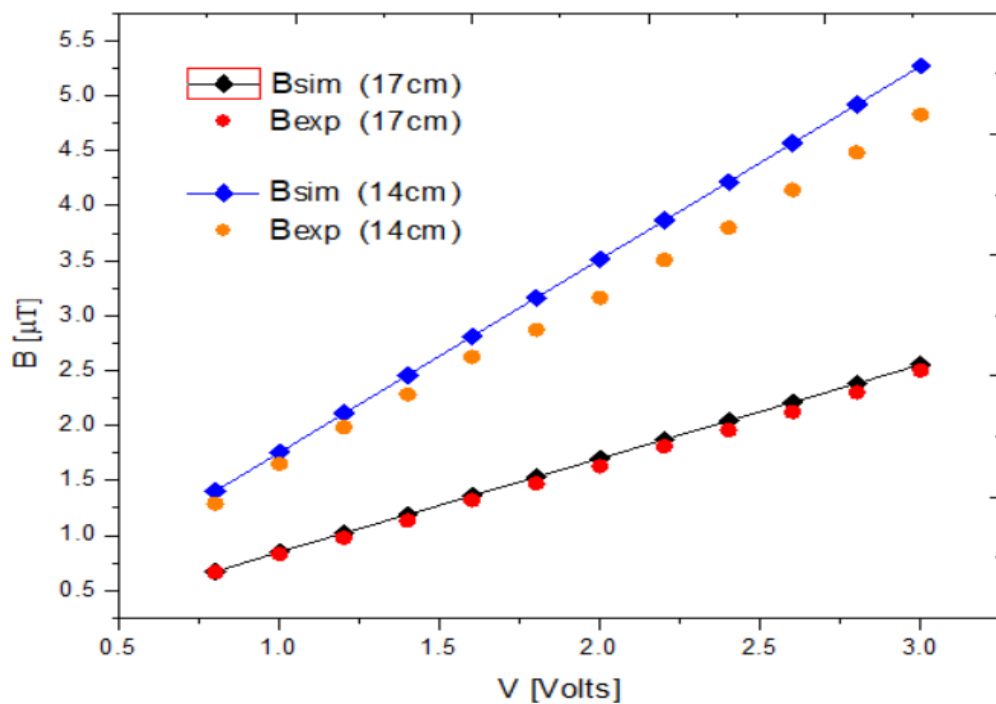
მსგავსად კალიბრაციისა, მოცემულ შემთხვევაში სენსორი თავსდება Z ღერძის გასწვრივ სხვადასხვა მანძილზე და ანათვლები აიღება კოჭაზე მოდებული წყაროს ძაბვის 12 განსხვავებული მნიშვნელობისათვის.

ამის შემდეგ, მიღებული მაგნიტური ველის სიდიდის შედარება ხდება სიმულაციურ შედეგებთან.



ნახაზი 5. გამომსხივებელი კოჭისა და მართკუთხა ბრტყელი სპილენძის ეკრანის სიმულაცია EMCoS Studio-ს გამოყენებით

შედეგების შედეგები მოცემულია გრაფიკზე:



გრაფიკი 11. სიმულაციური და გაზომილი მაგნიტური ველის შედეგების შედეგები ბრტყელი მართკუთხა ეკრანის შემთხვევაში.

X ღერძზე გადაზომილია წყაროს ძაბვის მნიშვნელობები ვოლტებში, ხოლო Y ღერძზე მაგნიტური ველის მნიშვნელობები მიკროტესლებში.

შავი ფერის წერტილები აღწერს გამომსხივებელი კოჭის ცენტრიდან 17cm-ზე, სენსორის განთავსების შემთხვევაში, სიმულაციის შედეგად მიღებულ მაგნიტური ველის სიდიდეებს. წითელი წერტილები - ამავე მანძილზე მაგნიტური ველის გაზომვის შედეგად მიღებულ სიდიდეებს. მსგავსად, ლურჯი და ნარინჯისფერი წერტილები აღწერენ 14 cm-ზე სიმულაციისა და გაზომვების შედეგად მიღებულ მაგნიტური ველის მნიშვნელობებს.

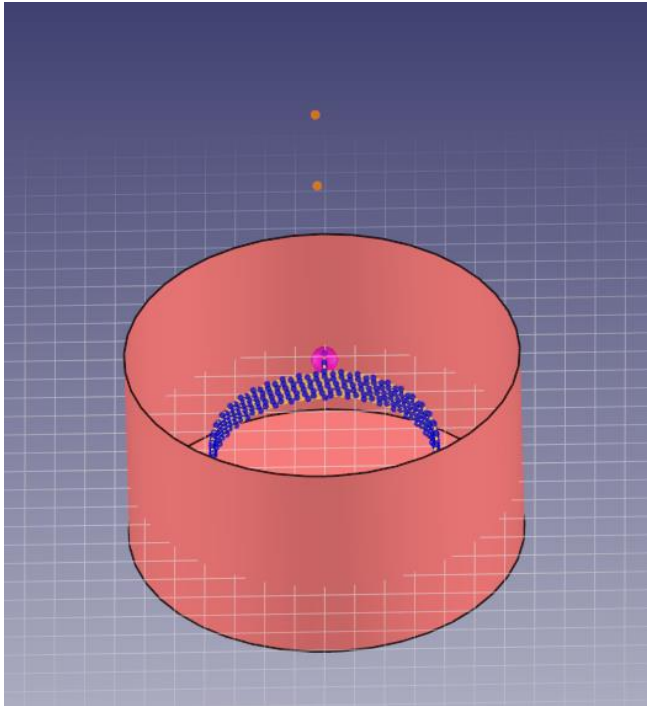
ცილინდრული ფორმის ღია ეკრანი

შემდეგი გაზომვებისთვის გამომსხივებელი კოჭა მოთავსდა ცილინდრული ფორმის ღია ეკრანში. მოცემული ამოცანისთვის შეიქმნა 0.2 mm სისქის სპილენძის ცილინდრი - სიმაღლე - 74 mm, დიამეტრი - 130 mm



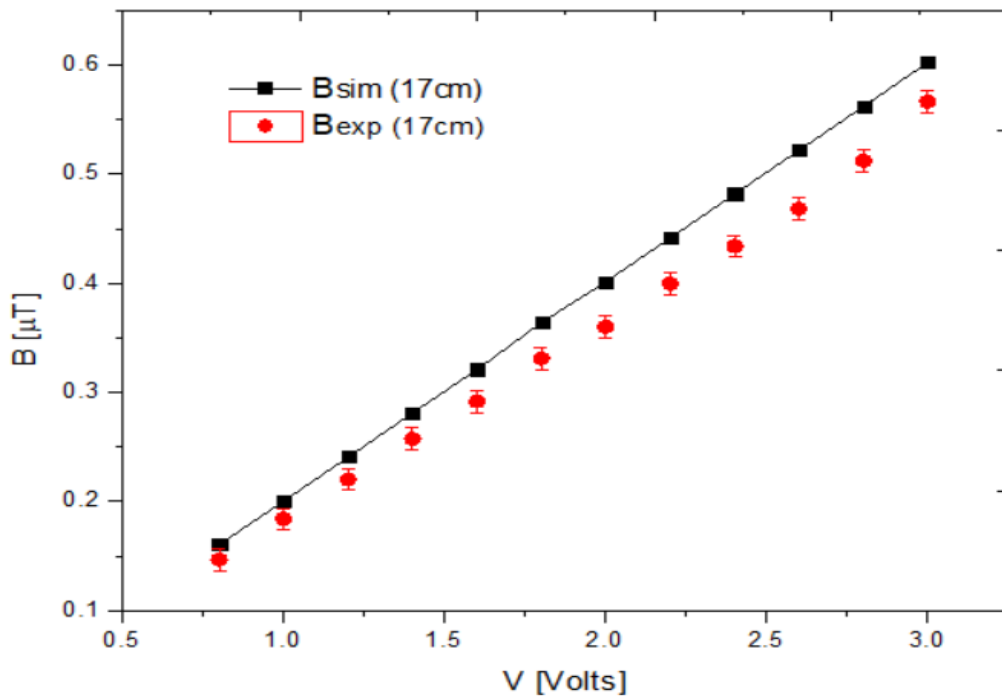
სურათი 7. სპილენძის ცილინდრული ფორმის ღია ეკრანი

სენსორი მოცემულ ამოცანაში თავსდება კოჭის ცენტრიდან იმავე მანძილზე - 14-17 cm . გაზომვის შედეგად მიღებულ ანათვლებთან შედარებისთვის გაკეთდა მოცემული შემთხვევის სიმულაცია EMCoS Studio-ში.



ნახაზი 6. სპილენძის ცილინდრული ფორმის ღია ეკრანის მოდელირება

მიღებულ შედეგების შედარებამ ცხადყო, რომ კალიბრაციის შედეგად მიღებული ემპირიული ფორმულა საკმაოდ ზუსტად მუშაობს სხვადასხვა ტიპის ეკრანებისას. მოცემული შემთხვევისთვის სიმულაციური და ექპერიმენტული შედეგების უერთერთდამოკიდებულებას აქვს შემდეგი სახე:



გრაფიკი 12. ცილინდრული ფორმის ღია ეკრანის შემთხვევაში ექპერიმენტული და სიმულაციური შედეგების შედარება

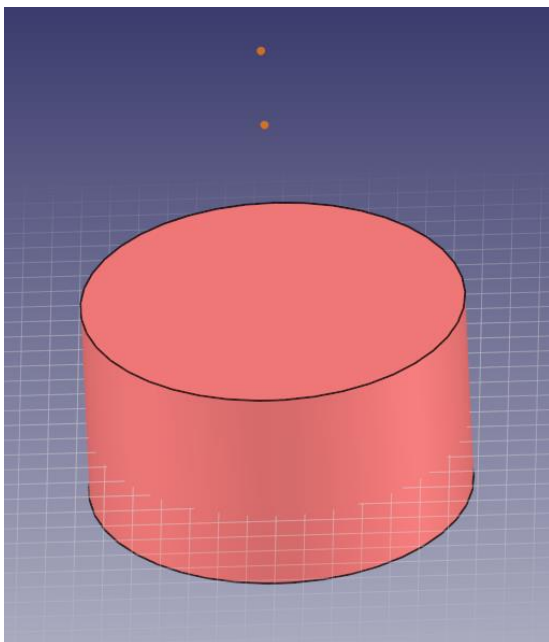
ცილინდრული ფორმის დახურული ეკრანი

მომდევნო ეტაპზე მოხდა სრული ეკრანიების შემთხვევაში მაგნიტურ ველის სიდიდის გაზომვა. ეკრანიების მასალა და გაზომვათა პირობები იდენტურია ზემოთ განხილული შემთხვევებისა.



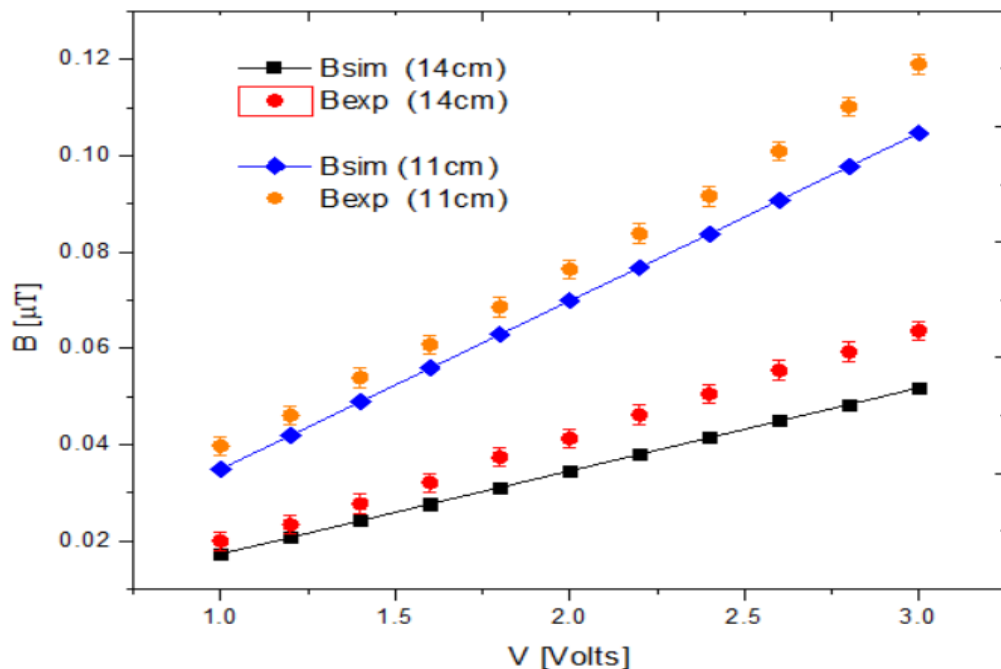
სურათი 8. სპილენძის ცილინდრული ფორმის დახურული ეკრანი

გამომსხივებელი კოჭა მოთავსებულია ცილინდრული ეკრანის შიგნით, რომელსაც სიგნალის გენერატორი უკავშირდება ეკრანიებული კაბელით, კონექტორის გავლით.



ნახაზი 7. სპილენძის ცილინდრული ფორმის ეკრანის მოდელი

ცხადია, რომ სრული ეკრანის შემთხვევაში, ეკრანის გარეთ გაზომილი მაგნიტური ველის სიდიდე მკვეთრად მცირდება წინა შემთხვევებთან შედარებით, რადგან ეკრანიერებისთვის ვიყენებთ სპილენძს, რომელსაც მაღალი გამტარებლობა აქვს.



გრაფიკი 13. სიმულაციისა და გაზომვების შედეგად მიღებულ მაგნიტური ველის სიდიდეებს შორის დამოკიდებულება გამომსხივებელი კოჭიდან 113 და 143 mm მანძილზე სრული ეკრანიერების შემთხვევაში

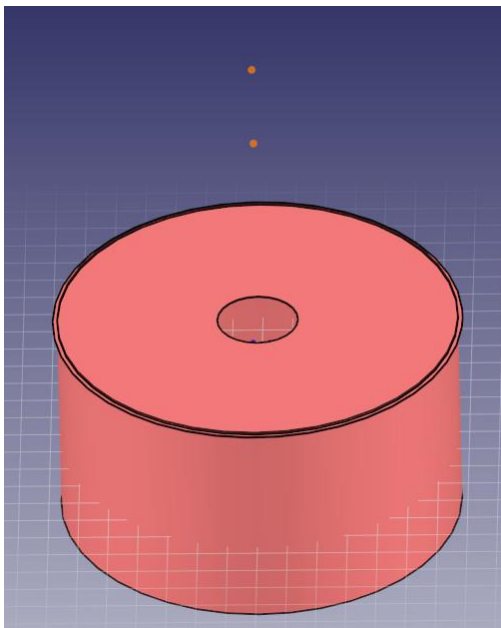
ცილინდრული ფორმის ეკრანი მცირე ზომის ნახვრეტით

ამოცანის მთავარი მიზანი არის მაგნიტური ველის სიდიდის ცვლილების დადგენა სრული ეკრანიერებასა და ამ ეკრანში ხვრელის არსებობის შემთხვევებს შორის. ამისათვის შეიქმნა სპილენძის ცილინდრული ეკრანი 27 mm დიამეტრის ზომის ხვრელით. ხვრელი მდებარეობს Z ღერძის გასწვრივ, ცილინდრის ზედაპირის ცენტრში.



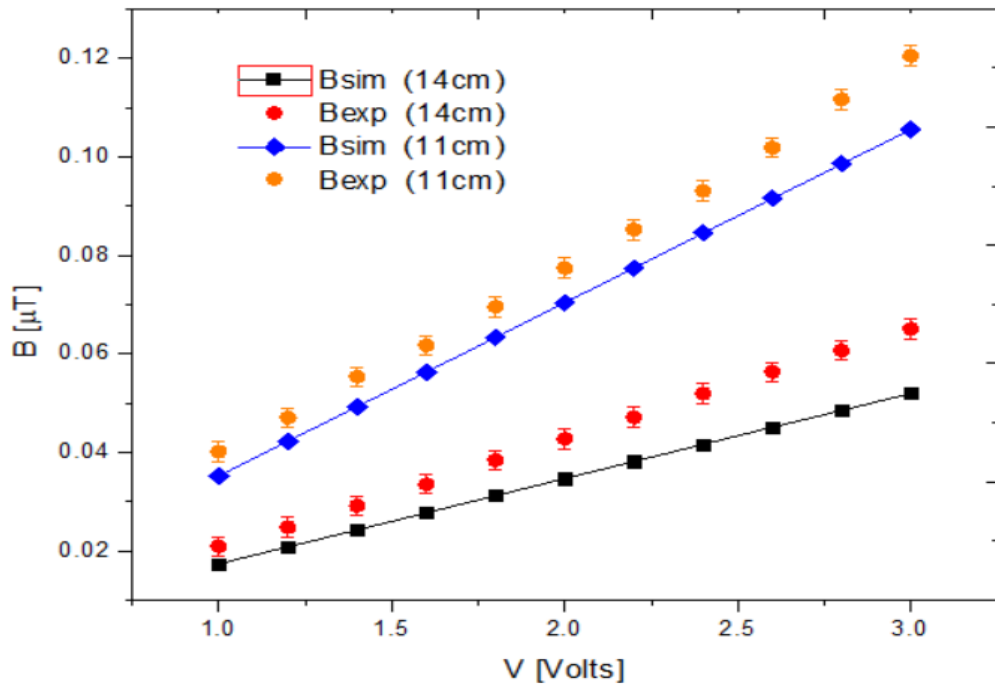
სურათი 9. ცილინდრული ფორმის ეკრანი 27mm დიამეტრის ზომის ხვრელით

ხვრელის ზომა შერჩეულია გამომსხივებელ კოჭაზე მოდებული სიგნალის გენერატორის სიმძლავრის მიხედვით.



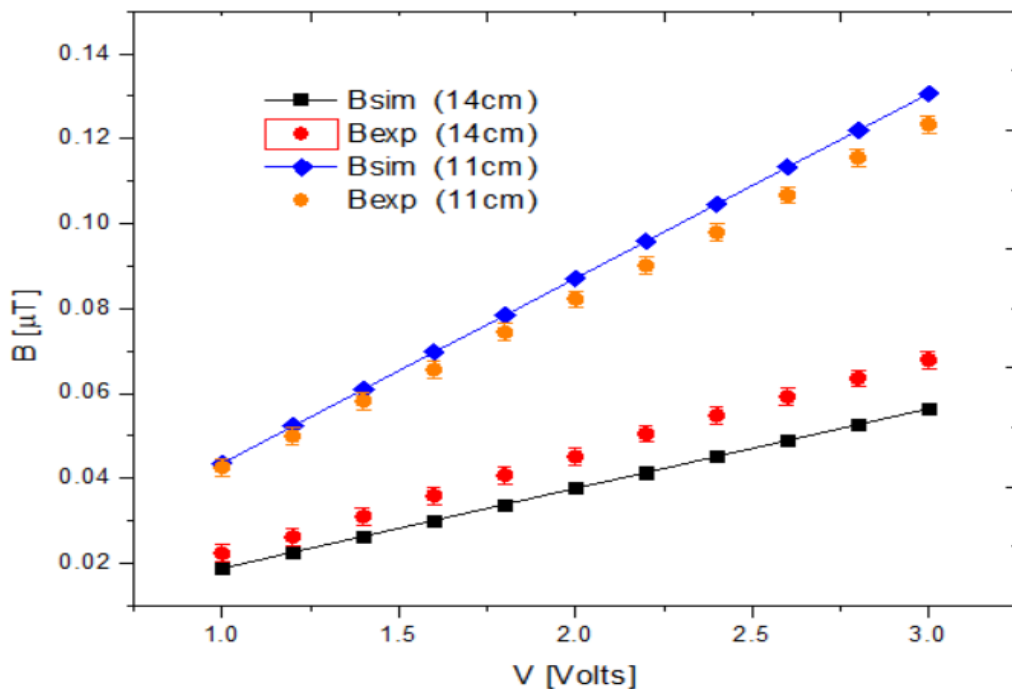
ნახაზი 8. 27 mm დიამეტრის ხვრელის მქონე სპილენძის ეკრანის მოდელირება

გრაფიკ 14-ზე ჩანს ხვრელიან ეკრანში მოთავსებული გამოსხივების წყაროს მიერ შექმნილი მაგნიტური ველის სიდიდის დამოკიდებულება გაზომვებისა და სიმულირებისას მიღებულ შედეგებს შორის, გამომსხივებელი კოჭის ცენტრიდან 113 და 143 mm - ზე.



გრაფიკი 14. 27 mm დიამეტრის ხვრელი მქონე ეკრანის შემთხვევაში სიმულაციური და გაზომილი მაგნიტური ველის სიდიდის შედარება

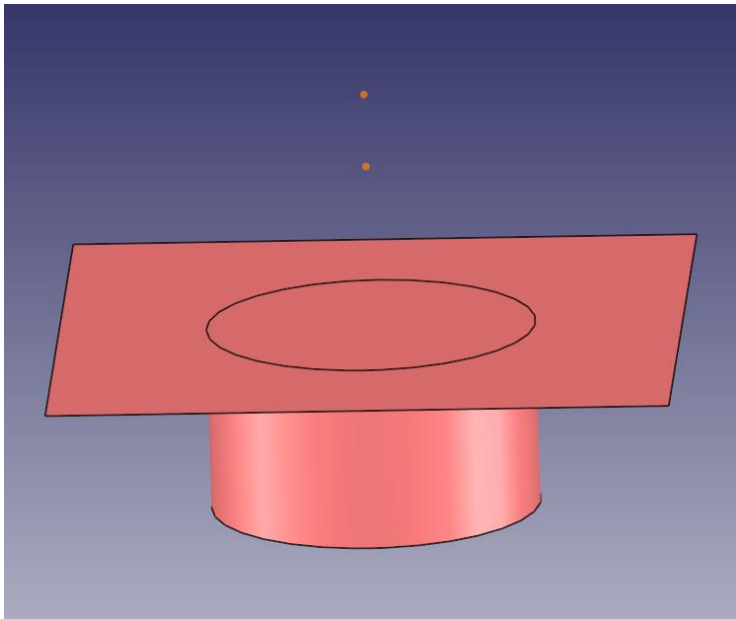
ასევე გაკეთდა 50 mm ხვრელი, რომლისთვისაც შესრულდა ანალოგიური დათვლები. ამ გაზომვებით შესამჩნევია, თუ როგორ იზრდება ველის სიდიდე ხვრელის ზომის გაზრდისას.



გრაფიკი 15. 50 mm დიამეტრის ხვრელი მქონე ეკრანის შემთხვევაში სიმულაციური და გაზომილი მაგნიტური ველის სიდიდის შედარებაგამომსხივებელი კოჭიდან 113 და 143 mm- ზე

ცილინდრული ფორმის ეკრანი კვადრატული ხუფით

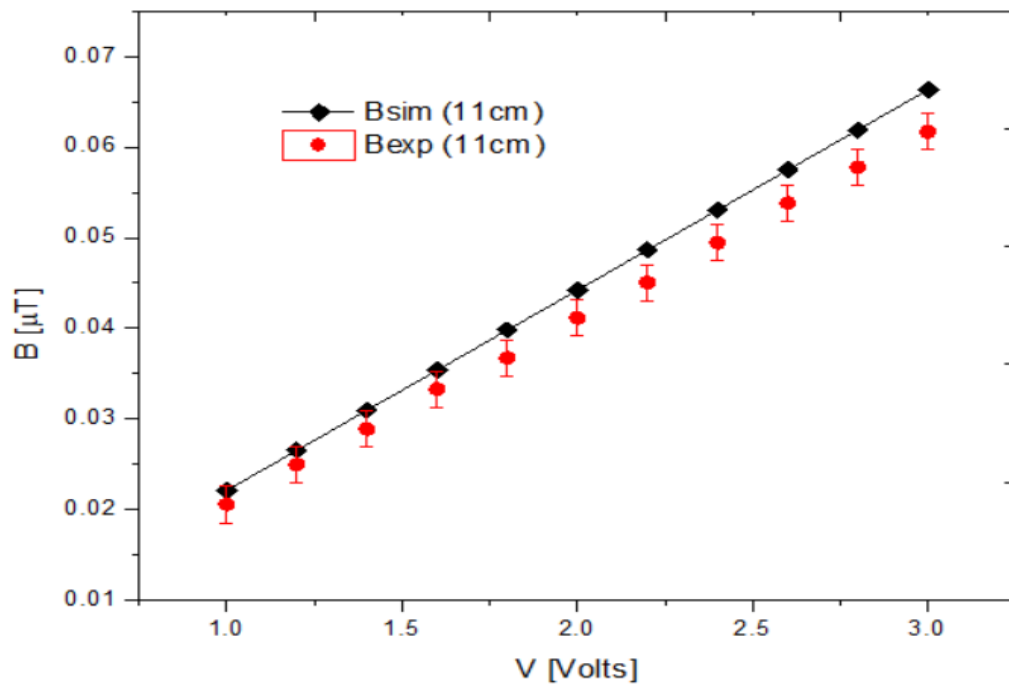
გაზომვებმა აჩვენეს, რომ ზემოთ განხილული ეკრანიერების შემთხვევები, მოცემული მასალით, ზოგიერთი ამოცანისთვის არ არის საკმარისად ეფექტური. ამიტომ, ექპერიმენტი ჩატარდა დიდი ზომის კვადრატული ხუფის მქონე ცილინდრულ ეკრანზე. ხუფისთვის გამოვიყენეთ სპილენძის ფირფიტა, ზომით 25 X 25 cm.



ნახაზი 9. ცილინდრული ეკრანის მოდელირება კვადრატული ხუფით

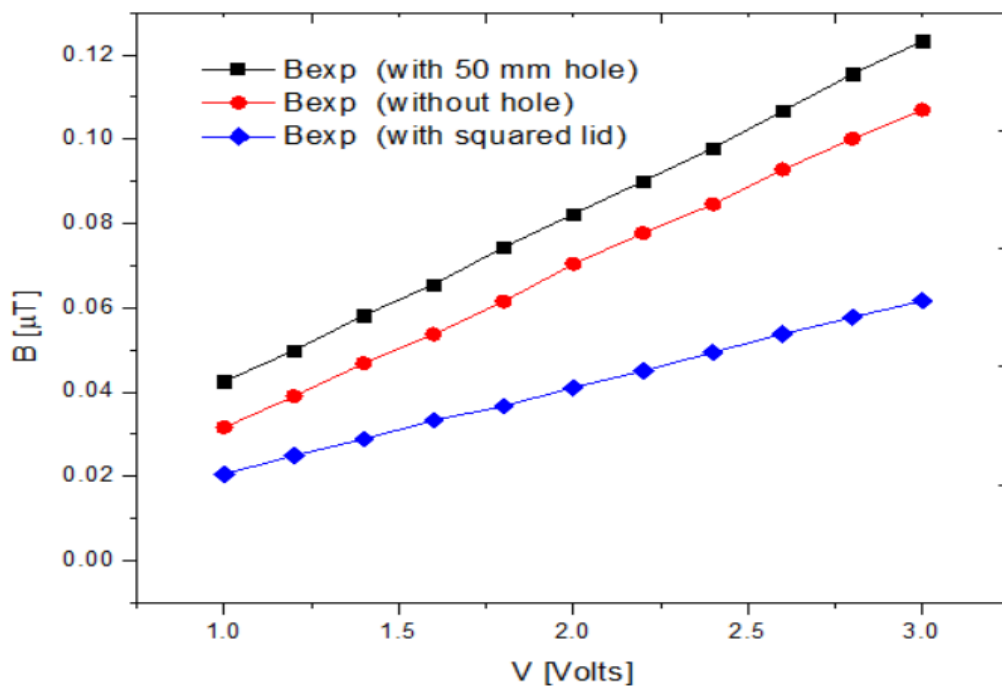


სურათი 10. ცილინდრული ეკრანი კვადრატული ხუფით. მასალა - სპილენძი. სისქე 0.2 mm.

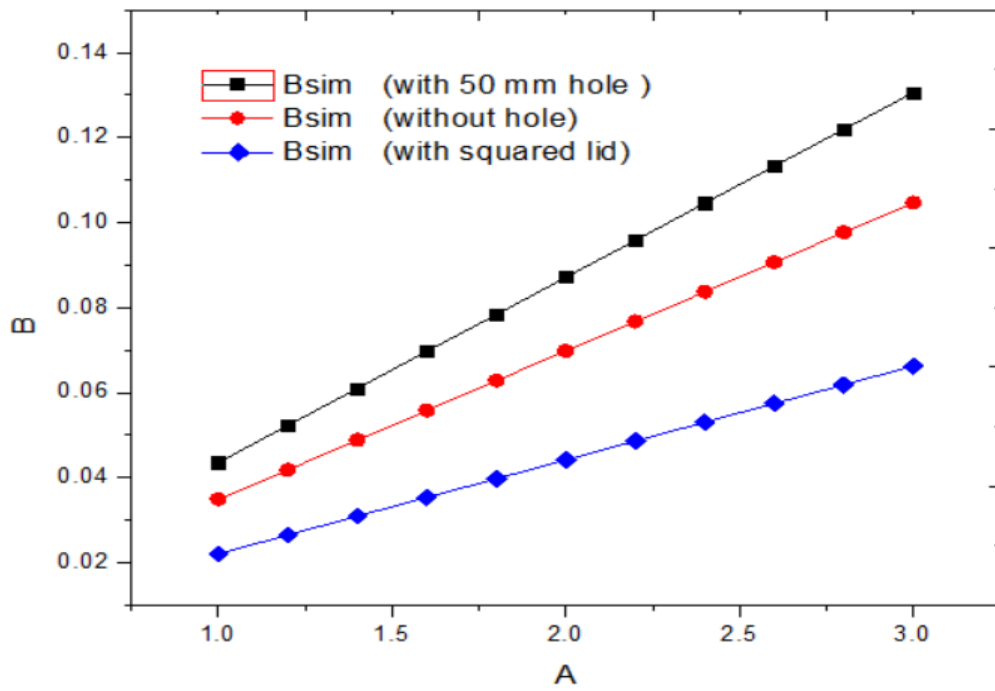


გრაფიკი 16. 25 X 25 ბრტყელი კვადრატული ხუფის მქონე ცილინდრული ეკრანის გაზომილი და სიმულაციის შედეგად მიღებული ველების შედარება. მანძლი სენსორსა და გამომსხივებელ კოჭას შორის 113 mm

ქვემოთ მოცემული გრაფიკები გვიჩვენებენ კვადრატულხუფიანი, ცილინდრული და 25 mm რადიუსის ნახვრეტის მქონე ეკრანირების შემთხვევებში 113 mm მანძილზე გაზომილი და სიმულაციური ველების შედარებას.



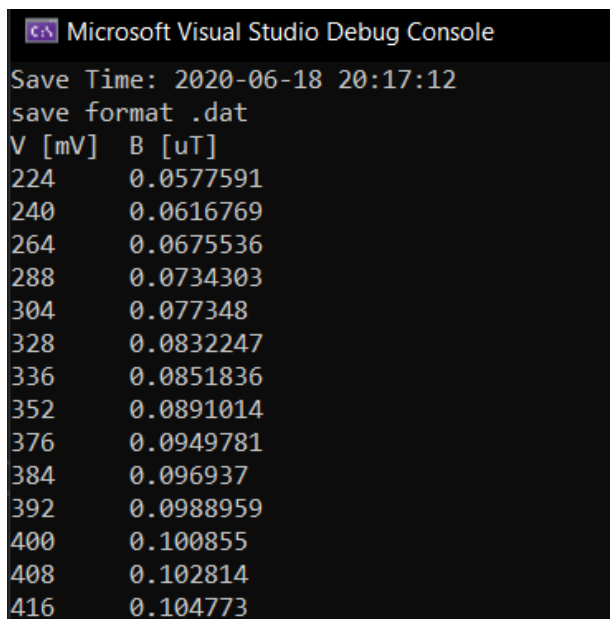
გრაფიკი 17. მაგნიტური ველის ექსპერიმენტალურად გაზომილი სიდიდეების დამოკიდებულება კვადრატულხუფიან, ცილინდრულ და 25 mm ხვრელის მქონე ეკრანებს შორის



გრაფიკი 18. მაგნიტური ველის სიმულაციურად გამოთვლილი სიდიდეების დამოკიდებულება კვადრატულხედიან, ცილინდრულ და 25 mm ხვრელიან ეკრანებს შორის

პროგრამული უზრუნველყოფა

ოსცილოგრაფზე მიღებული ანალოგური სიგნალი არის მაგნიტური სენსორიდან გამომავალი ძაბვა. ოსცილოგრაფი ანალოგურ სიგნალს გარდაქმნის ციფრულად და USB პორტის გამოყენებით აწვდის კომპიუტერს. მოცემული ოსცილოგრაფის სამართავი პროგრამაა - Osciloscop, რომლის საშუალებითაც შესაძლებელია ინფორმაციის პირდაპირ რეჟიმში მიღება და შენახვა. შენახული ინფორმაციის დასამუშავებლად C++ პროგრამული ენის გამოყენებით შევქმენით პროგრამა, რომელიც კითხულობს შენახული ფაილიდან ინფორმაციას და უსაბამებს მას კალიბრაციით მიღებულ შედეგებს. როგორც ზემოთ აღვწერეთ, შესაბამება ხდება გაზომვებისას მიღებული სტატისტიკური ინფორმაციის დამუშავებით პროგრამა OriginLab- ში, რაც გვაძლევს თანაფარდობას ოსცილოგრაფზე მიღებულ ძაბვასა და გენერირებულ მაგნიტური ველის ინდუქციას შორის. შედეგები ინახება txt და dat გაფართოების ფაილებში, რათა შესაძლებელი იყოს შემდგომი დამუშავება და ვიზუალიზაცია.



```
Microsoft Visual Studio Debug Console
Save Time: 2020-06-18 20:17:12
save format .dat
V [mV]  B [uT]
224      0.0577591
240      0.0616769
264      0.0675536
288      0.0734303
304      0.077348
328      0.0832247
336      0.0851836
352      0.0891014
376      0.0949781
384      0.096937
392      0.0988959
400      0.100855
408      0.102814
416      0.104773
```

ცხრილი 3. მიღებული შედეგების შენახვა .dat გაფართოებით

დასკვნა

დღესდღეობით მსოფლიოში დიდი რაოდენობით დაბალი ხარისხის ელექტრული და ელექტრონული მოწყობილობები ვრცელდება, რაც კიდევ უფრო ამწვავებს ელექტრომაგნიტური თავსებადობის პრობლემას.

ერთ-ერთი გავრცელებული პრობლემა არის მანქანათმშენებლობის ინდუსტრიაში ელექტრომაგნიტური თავსებადობის საკითხი, რომელიც უფრო აქტუალურია ელექტრომობილებისა და ავტომობილებში ჰიბრიდული მოწყობილობების გამოყენების მზარდი მოთხოვნილების ფონზე. მოცემულ საბაკალავრო პროექტში, აღწერილი ხელსაწყო საშუალებით შეგვიძლია ჩავატაროთ გაზომვები, რომელიც საშუალებას მოგვცემს საწყის ეტაპზე გავზომოთ დაბალი სიხშირის მაგნიტური ველის გაჟონვა მაკრანირებელ მოწყობილობებში არსებული ხერხელის დროს. რომლის საშუალებითაც მნიშვნელოვან წვლილს შევიტანთ ელექტრული ხელსაწყოებისა და სადენების ეკრანში ხერხელის არსებობის დროს ხმაურის იდენტიფიცირებასა და აღმოფხვრაში.

პროექტის მიზანი იყო გაგვეზომა მაგნიტური ველის აბსოლუტური მნიშვნელობა წყაროს სხვადასხვა ტიპის ეკრანირების და ამ ეკრანში განსხვავებული ზომის ხერხელების არსებობის დროს. შედეგებმა ცხადყო, რომ ეკრანში ხერხელის არსებობისას შესამჩნევად დიდი ველი იქმნება ეკრანის გარეთ, ვიდრე სრული ეკრანის შემთხვევაში. მაგალითად, 25 mm რადიუსის ხერხელის მქონე ეკრანის შემთხვევაში 25%-ით ძლიერი მაგნიტური ველია ეკრანის გარეთ, ვიდრე ცილინდრული ეკრანის შემთხვევაში. ამასთან, იგივე ზომის ხერხელის არსებობისას 50 %-ით იზრდება ველი, დიდი ზომის კვადრატულხუფიან ეკრანთან შედარებით. ასევე აღსანიშნავია ფაქტი, რომ ცილინდრული ეკრანის გარეთ 36 %-ით ძლიერი მაგნიტური ველია, განსხვავებით დიდი ზომის კვადრატულხუფიანი ეკრანის შემთხვევასთან. ამრიგად, ეკრანირებისას გასათვალისწინებელია გამომსხივებლის სიმძლავრე და მანძილი შესაძლო მიმღების შორის. შესაბამისად, უნდა შეირჩეს ეკრანის მასალა და გეომეტრია (სისქე, ფორმა, ზედაპირის ფართობი, განლაგება). განხილული პროექტის გამოყენებით, შესაძლებელია ეკრანირების ოპტიმალური მახასიათებლების განსაზღვრა.

სხვადასხვა ტიპის ინდუსტრიაში ხშირად ეკრანში ხერხელის არსებობით გამოწვეული პრობლემები იგნორირებულია. თუმცა, როგორც ზემოაღნიშნულიდან ჩანს, გარემოზე მავნე ზემოქმედების შემცირებისთვის, მნიშვნელოვანია ეკრანირება და ხერხელის არსებობის დროს სპეციალური კონექტორების გამოყენება.

მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ ეს პროექტი დაგვეხმარა უკეთ გაგვეო ელექტრომაგნიტური თავსებადობის ამოცანა. მიგველო ანტენებთან და

შემათანხმებელ ფილტრებთან მუშაობისა და მათგან მიღებული ინფორმაციის მოდელირების, გაზომვებისა და დამუშავების თანამედროვე პროცესების შესწავლის გამოცდილება. ასევე, საშუალება მოგვეცა, უკეთ შეგვესწავლა ხმაურისა და არასასურველი გამოსხივებების პრობლემის გადაჭრის ოპტიმალური გზების ძიება. კომპანია EMCOS-ს ამ მიმართულებით აქვს დიდი გამოცდილება და უზრუნველყოფილია კვალიფიციური კადრებით. აღნიშნული პროექტის შესრულებისას მათთან ურთიერთობამ უდიდესი გამოცდილება შეგვძინა.

პროექტზე მუშაობისას შევისწავლეთ ისეთი პროგრამული პაკეტები, როგორიცაა - EMCoS Studio, OriginLab, Octave, LTSpice.

ბიუჯეტი

ცხრილი 4. პროექტის ბიუჯეტი

№	ხელსაწყოს დასახელება	ღრებულება (\$)	წყარო/მომწოდებელი
1	N30 ტიპის მაგნიტური ტოროიდალური გულარი	20	ebay.com
2	ოპერაციული გამაძლიერებელი	20	ebay.com
3	ოსცილოგრაფი/ADC	--	TSU LAB
4	სიგნალის გენერატორი	--	TSU LAB
5	Narda probe	--	EMCOS
6	მოდელირების პროგრამები	--	EMCOS
7	კომპიუტერი	--	TSU LAB
8	ეკრანი	20	ადგილობრივი მარკეტი
9	ხის კონსტრუქცია	20	ადგილობრივი მარკეტი
10	სახარჯი მასალა	50	ადგილობრივი მარკეტი

ჯამური თანხა - 130 \$

ბიბლიოგრაფია

1. www.emcos.com
2. Roman G. Jobava, , Anna L. Gheonjian,, Johannes Hippeli, Giorgi Chiqovani, David D. Karkashadze, Faik G. Bogdanov, Badri Khvitia, and Anna G. Bzhalava “Simulation of Low-Frequency Magnetic Fields in Automotive EMC Problems” IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 56, NO. 6, DECEMBER 2014
3. R. Jobava, A. Gheonjian, D. Karkashadze and J. Hippeli, “Interaction of low frequency magnetic fields with thin 3D sheets of combined resistive and magnetic properties,” in Proc. 2010 European Microwave Conf. (EuMC), Paris, 2010, pp. 1309–1312.
4. <https://www.icnirp.org/>
5. EMC Studio, Users Manual, EMCoS Ltd. Available at: www.emcos.com
6. <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdl.pdf>
7. <https://www.tdkelectronics.tdk.com/download/187204/11a3ca92549b8d3b7cce210eace3dc3c/pdf-n30.pdf>
8. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Г. С. Найвельт, К. Б. Мазель, Ч. И. Хусаинов и др.; под редакцией Г. С. Найвельта. – М.: Радио и связь, 1986. – 576 с., ил.
9. Источники электропитания на полупроводниковых приборах. Проектирование и расчёт. Под редакцией Додика С. Д. и Гальперина Е. И. – М.: Советское радио, 1969, с. 448, ил.
10. Эраносян С. А. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское объединение, 1991, с. 176, ил.
11. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/curloo.html?fbclid=IwAR3ut1YNrSJloPyIDBoc-mH4wlISDy-nwdpLK6BMBpQmc6lJmzpYzoNRgTw>
12. <https://coil32.net/single-loop-of-wire.html>
13. Ramo, S.; Whinnery, J. R.; Van Duzer, T., *Fields and waves in communications electronics*, John Wiley and Sons, 1994.
14. Tsaliovich, A., *Electromagnetic shielding handbook for wired and wireless EMC applications*, Springer, 1999.
15. Mendez, H. *Shielding Theory of Enclosures with Apertures. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, EMC-20(2)*, 296–305. doi:10.1109/temc.1978.303722 (1978)

16. Ieee electromagnetic compatibility magazine (volume 3, number 1, 1st quarter 2014)
17. Engineering Electromagnetic Compatibility - V. Prasad Kodali
18. [https://web.archive.org/web/20120326191839/http://www.learnemc.com/tutorials/Introduction to EMC/Introduction.html](https://web.archive.org/web/20120326191839/http://www.learnemc.com/tutorials/Introduction_to EMC/Introduction.html)
19. <https://web.archive.org/web/20120317121132/http://www.cvel.clemson.edu/emc/tutorials/emc-regulations.html>
20. <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/jun/understanding-electromagnetic-compatibility-standards-for-switch-mode-power-supplies>
21. <https://web.archive.org/web/20111022105336/http://www.learnemc.com/EMC-Tutorials.html>
22. https://www.rfiamericas.com/ferrite-rod-antenna-ferrite-bar-aerial/?fbclid=IwAR14CkhfPZWJYTQyRqEDb7VlbAHPhOrvTPgX_dhHRsSGn7tcCUDVvk5r13o
23. http://www.lz1aq.signacor.com/docs/fa-eng/Weak_signals-mag_loop_engl.htm?fbclid=IwAR1yj6vAC65C4SaBatf80W0g49PbqXut32yQJ-2mjM3mz5NqRry9EyWXsP0
24. https://www.iec.ch/emc/explained/?fbclid=IwAR2HssUZY_Z1-OvXDhCDZW1mau_iNPMFztyaRSMMvunI_TN5DnRSXnx5auU
25. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100047/PID4290077.pdf?fbclid=IwAR0QsIJ_EVcgjp10EjGDwe_9DON3QqZ-OPVSrC6jSsrBe80czHGkPMKiA4g
26. http://www.cost-ic1407.eu/sites/www.cost-ic1407.eu/files/cost-ic1407/IC1407_Doc/MaltaApr2018/2018_COST_Training_School_Malta_MA_Azpurua_UPC_presentation.pdf?fbclid=IwAR3XoTdMIsh92PMsDZ1D5t9UaCW7pqxwTuNNmEooTT1Ti8yQE2xbMgxeaMI
27. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100047/PID4290077.pdf?fbclid=IwAR1A7i_adRSDsPm3fk7nXyVIENJCN9zwrX4pndy4mSqkKedfkgqJcYB7_N4
28. https://picclick.com/NEW-1K-1GHZ-40dB-gain-20dB-Low-Noise-LNA-122826747141.html?fbclid=IwAR1-e4x5R-itkWGi-UATUVtfAPxq2VcTasuysxBXI3s7iR_I-gqmu8qI4-I
29. <https://www.picotech.com/oscilloscope/4824/8-channel-oscilloscope>
30. <https://www.icnirp.org/en/home/home-read-more.html>
31. <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdl.pdf>

აპენდიქსი

C++ პროგრამულ ენაზე შექმნილი პროგრამული უზრუნველყოფის სკრიპტი.

```
#include <iostream>

#include <fstream>

#include <string>

using namespace std;

int main()
{
    ifstream wakitxva;
    wakitxva.open("neu.txt");
    ofstream shenaxva;
    shenaxva.open("cawera.dat", std::ios_base::app | std::ios_base::out);    //
    ofstream exelad_Senaxva;
    exelad_Senaxva.open("cawera.xls", std::ios_base::app | std::ios_base::out);
    if (wakitxva.fail())
    {
        cerr << "ver vnaxe";
        exit(1);
    }
    string item;
    int tvla = 0;
    double ricxvi = 0.0;
    cout << "Save Time: 2020-06-18 20:17:12" << endl;
```

```

cout << "save format .dat"<< endl;
cout << "V [mV] \t";
cout << "B [uT]" << endl;
while (!wakitxva.eof())
{
    tvla++;
    wakitxva >> item;
    //cout << item << endl;
    //cout << item << endl;
    ricxvi = stod(item);
    cout << ricxvi << "\t";
    //ricxvi = ricxvi / 2;
    ricxvi = 0.000244862 * ricxvi + 0.00291;
    cout << ricxvi << endl;
    shenaxva << ricxvi << endl;
    exelad_Senaxva << ricxvi << endl;

}
wakitxva.close();
shenaxva.close();
return 0;
}

```

ტრანსფორმატორის ოპტიმალური ხვიათა რაოდენობის გამოსათვლელი სკრიპტი (Octave)

```
clc;

clear all;

close all;

% TDA1562Q Data

Pmax = 50; %W max power of TDA

RL = 4; % Ohm TDA Optimal load resistance

ILmax = sqrt(Pmax/RL)

UoutmaxTDA = sqrt(Pmax*RL)

%%%%%%%%%% End TDA

%%%%%%%%%% Load Coil Characteristics

f = 25000; %Hz

omg = 2*pi*f;

L = 15e-6;

Zcoil = 0.430+j*omg*L;

U1_max = UoutmaxTDA;

U2_max = sqrt(Pmax*Zcoil);

U2abs_max = abs(U2_max)

I2_max = U2_max/Zcoil

I2abs_max = abs(I2_max)

n = U1_max/U2abs_max % Minimum of turns ratio

Zth = Zcoil*n^2 % Load seen by TDA

Zinp = abs(Zth) % Optimal Load equivalent, should be close to 4 Ohm
```

%%%%%%%%%% Ferrite Core characteristics

$D = 3.04$; % cm Outer diameter of toroidal core

$d = 1.929$; % cm Inner diameter of toroidal core

$h = 2 \cdot 1.3$; %cm Hight of toroidal core

$B_{max} = 0.2$; % Mmaximum flux density

$S_o = \pi \cdot d^2/4$; % cm^2

$S_c = (D-d) \cdot h/2$; % cm^2

$P_{maxcore} = S_c \cdot S_o \cdot f \cdot B_{max}/150$ % Watt Maximum Power available by ferrite core

$n_1 = 2500 \cdot U_{1_max}/(f \cdot B_{max} \cdot S_c)$ % Minimal numbers of turns

$n_2 = n_1/n$ % Minimal numbers of turns

%%%%%%%%%%

%%%%%%%% if $P_{maxcore} > P_{max}$ then calculate number of turns such:

$B_{max_tda} = P_{max} \cdot 150 / (S_c \cdot S_o \cdot f)$ %max Flux density available from TDA

$n_{1_tda} = 2500 \cdot U_{1_max}/(f \cdot B_{max_tda} \cdot S_c)$ % Minimal Number of turne due to Power of TDA

$n_{2_tda} = n_{1_tda} / n$ % Minimal Number of turne due to Power of TDA

%%% These numbers must be rounded, example: $n_1 = 13.77$ means $n_1 = 14$

%%%%%%%% Check flux density, dB should dB ≥ 0 :

$dB = B_{max} - B_{max_tda}$ %xom ar jerdeba magnituri veli feritshi?

%%%%%%%%%% Real number of turns. N1 must round with excess, and N2 with shortage

$N_1 = 22$;

$N_2 = 11$;

$U_{2_N2} = U_{1_max}/(N_1/N_2)$;

$B_{maxN1} = (2500/(f \cdot S_c)) \cdot U_{1_max}/N_1$

$B_{maxN2} = (2500/(f \cdot S_c)) \cdot U_{2_N2}/N_2$

$dB_N = B_{max} - B_{maxN1}$ %should be ≥ 0

```

I2_max_comp = U2_N2/Zcoil;
I2_max_real = abs(I2_max_comp) % Check whether I2_max_real>I2_max (Should be less or
equal)
d_N2 = 0.6*sqrt(I2_max_real) % Minimal diameter of wire in N2

ZthN1 = Zcoil*(N1/N2)^2;
ZthN1abs = abs(ZthN1) % What load is seen by TDA: ZthN1abs >=4 Ohm
I1_max_comp = U1_max/ZthN1;
I1_max = abs(I1_max_comp);
d_N1 = 0.6*sqrt(I1_max) % Minimal diameter of wire in N1

```

ანალიზური შემოწმებისთვის შექმნილი სკრიპტი (Octave)

```

clc;
clear all;
close all;
format short e;

% Initial parameters
mu0 = 4*pi*1e-7; % T*m/A
f = 25000;
omg = 2*pi*f;
U = 1;

% Analitical Inductance
D = 75; %mm
d = 0.5; %mm
L_calc = 2e-10*pi*D*(log(8*D/d)-1.75); %H

```

% Analytical Resistance of copper wire

$\text{Sig} = 58108000;$

$\text{Ro} = 1/\text{Sig};$

$r = 37.5 \cdot 10^{-3};$

$d = 0.5 \cdot 10^{-3};$

$l = 2 \cdot \pi \cdot r;$

$A = \pi \cdot (d/2)^2;$

$R = \text{Ro} \cdot l / A;$

% Analytical current

$\text{XL} = j \cdot \omega \cdot L_{\text{calc}};$

$Z_{\text{calc}} = R + \text{XL};$ %for perfect conductor real part is 0, for copper insert R

$I_{\text{calc}} = U/Z_{\text{calc}};$

$I_{\text{calcabs}} = \text{abs}(I_{\text{calc}});$

%Analytical Field

$Z = 1;$ %distance from center of loop (m)

$B_z = \mu_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot I_{\text{calcabs}} / (4 \cdot \pi \cdot (Z^2 + r^2)^{3/2});$ % Tesla

$B_{\text{zuT}} = B_z \cdot 10^6$

%Simulations:

$I_{\text{sim}} = (10.28413304654 - 20.06884984965 \cdot j) \text{ \%A}$

$I_{\text{simabs}} = \text{abs}(I_{\text{sim}})$

$Z_{\text{sim}} = U/I_{\text{sim}}$

$L_{\text{sim}} = \text{imag}(Z_{\text{sim}})/(\omega)$

$R_{\text{sim}} = \text{real}(Z_{\text{sim}});$

$$dR = 100 \cdot (R - R_{\text{sim}}) / R$$

$$dL = 100 \cdot (L_{\text{calc}} - L_{\text{sim}}) / L_{\text{calc}}$$

$$dI = 100 \cdot (I_{\text{calcabs}} - I_{\text{simabs}}) / I_{\text{calcabs}}$$

$$Bz_{\text{sim}} = 0.0198 \text{e-}6; \% \text{field for Z distance}$$

%Difference

$$dBz = 100 \cdot (\text{abs}(Bz) - Bz_{\text{sim}}) / \text{abs}(Bz)$$