

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

MINDAUGAS ČEPĖNAS

TRANSPORTO VALDYMO SISTEMŲ
JUTIKLIŲ TYRIMAS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

Kaunas, 2018

Disertacija rengta 2012–2016 metais Kauno technologijos universiteto Elektros ir elektronikos fakulteto Elektronikos inžinerijos katedroje.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Vytautas MARKEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija, 01T).

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas:

<http://ktu.edu>

Redagavo:

Inga Nanartonytė (leidykla „Technologija“)

© M. Čepėnas, 2016

ISBN 978-609-02-1410-7

Leidinio bibliografinė informacija pateikiama Lietuvos nacionalinės Martyno Mažvydo bibliotekos Nacionalinės bibliografijos duomenų banke (NBDB)

TURINYS

IVADAS.....	5
1. TRANSPORTO SRAUTŲ KONTROLĖS SISTEMŲ IR JUTIKLIŲ APŽVALGA. 8	8
1.1. Transporto priemonių aptikimo sistemų problemų analizė	8
1.2. Transporto priemonių aptikimo metodų apžvalga.....	9
1.2.1. Automobilių aptikimas fiksuojant lokalius Žemės magnetinio lauko pokyčius	10
1.2.2. Anizotropinis magnetorezistyvnis (AMR) magnetinis jutiklis.	13
1.2.3. Automobilių aptikimas indukciniu metodu	16
1.2.4. Automobilių aptikimas ultragarsiniu metodu	18
1.2.5. Akustiniai jutikliai	19
1.2.6. Mikrobangų radarai	20
1.2.7. Pjezoelektriniai jutikliai.....	21
1.2.8. Pneumatiniai kelio vamzdeliai.....	22
1.2.9. Vaizdo stebėjimo kameros.....	23
1.2.10. Jutiklių privalumai ir trūkumai	24
1.3. Skyriaus apibendrinimai (išvados)	26
2. TYRIMŲ METODIKOS SUDARYMAS.....	27
2.1. Magnetinio lauko matavimo sistema.....	27
2.1.1. Temperatūrinio stabilumo tyrimai	29
2.3.1. Jutiklių jautrio tyrimas.....	30
2.2. Magnetinio lauko matavimo sistemos sukūrimas ir magnetinio lauko fluktuacijos parkavimo vietoje tyrimai	34
2.3. Automobilio konstrukcijos poveikio lokaliai Žemės magnetiniam laukui duomenų registravimo sistemos sudarymas	35
2.4. Automobilio pastatymo pozicijos tyrimo metodika	36
2.5. Skyriaus apibendrinimai (išvados)	38
3. STABILUMO TYRIMAS	39
3.1. Magnetinio lauko tolydumo tyrimas	39
3.2. Automobilių konstrukcijos poveikio Žemės magnetiniam laukui tyrimas	42
3.3. Pašalinių magnetinių laukų poveikio magnetorezistyviams jutikliams tyrimas .	44
3.3.1. Magnetinių laukų poveikio AMR jutikliams modeliavimas	45
3.3.2. Ritės ir linijų sukuriama magnetinio lauko eksperimentiniai tyrimai.....	50
3.3.3. AMR jutiklio jautrumo tyrimas	57
3.4. Skyriaus apibendrinimai (išvados).....	62
4. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI.....	64
4.1. Aptikimo algoritmų panaudojimas transporto priemonių aptikimui	64
4.1.1. Amplitudinis – slenkstinis aptikimo algoritmas	66

4.2.	Aptikimo būsenos kriterijus	68
4.3.	Magnetinio lauko kritinio taško aptikimo galimybės	69
4.3.1.	Aptikimo kriterijaus modeliavimas.....	71
4.4.	Ilgalaikio sensorių stabilumo tyrimas.....	75
4.5.	Transporto priemonių greičio nustatymas naudojant AMR jutiklius.....	79
4.6.	Eksperimentinių tyrimų apibendrinimas.....	83
	IŠVADOS.....	84
	LITERATŪRA.....	85
	5. MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	90

IVADAS

Daugėjant transporto priemonių, transporto srautų valdymo sistemoms tenka spręsti vis sudėtingesnius uždavinius. Pastaraisiais metais plėtojamos ir elektroninės eismo valdymo sistemos, tačiau lieka neišspręstų problemų, susijusių su eismo valdymu, automobilių grūstimis, automobilių statymu ir daug kitų specifinių atvejų. Tikslus transporto srautų aptikimas ir prognozavimas yra vienas iš svarbiausių eismo valdymo uždavinių siekiant pagerinti eismo sąlygas miesto gatvėse. Transporto srautų prognozavimas yra svarbus eismo infrastruktūrai planuoti, projektuoti, vystyti ir transportui valdyti. Be to, visos masinio susibūrimo vietos siejamos ir su didesne ekstremalių situacijų rizika, o šiose situacijose gali būti naudingos eismo srautų valdymo sistemos. Todėl sklandžiam ir sparčiam eismo srautų judėjimui užtikrinti reikalingos efektyvios, integruotos intelektualiosios transporto valdymo sistemos.

Šiuolaikinių elektronikos technologijų vystymasis ir galimybė tas technologijas pritaikyti miesto eismui valdyti atveria naujų būdų spręsti eismo saugumo, eismo srautų valdymo, kuro sąnaudų mažinimo, aplinkos teršimo ir kitas su eismu susijusias problemas. Pažangių transporto valdymo sistemų įdiegimas reikalauja daug mažiau išteklių nei kitų transporto infrastruktūros dalių atnaujinimas, pavyzdžiui, kelių tiesimas ar platinimas.

Automobilių aptikimo sistema – viena iš pagrindinių eismo valdymo sistemos dalių. Nesant pigesnių ir patikimesnių alternatyvų, automobiliams aptikti ir sekti vis dažniau naudojamos vaizdų analizės technologijos, kurios yra brangios, ne visada patikimos ir reikalauja daug skaičiavimo išteklių. Eismo valdymo sistemose taikant įprastinius automobilių atpažinimo vaizde metodus ir naudojant paprastas vaizdo kameras, ne visada įmanoma užtikrinti tikslų automobilių aptikimą, ypač nakties metu ar esant blogoms oro sąlygoms. Naudojant kameras surinkti ir realiuoju laiku apdoroti transporto srautų duomenis iš kiekvienos vietos beveik neįmanoma, sistemai įdiegti prireiktų labai daug įrangos, didelio pralaidumo ryšio linijų ir lėšų. Todėl labai aktualu kurti alternatyvius transporto priemonių aptikimo metodus panaudojant kitų tipų jutiklius.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas – sukurti ir iširti alternatyvius jau esantiems transporto priemonių aptikimo jutiklius ir pasiūlyti priemonių bei metodų efektyviam jų darbui užtikrinti. Tikslui pasiekti buvo suformuluoti šie uždaviniai:

- Išanalizuoti įvairias technologijas, naudojamas transporto aptikimo jutikliuose, ir išryškinti šiuo metu dažniausiai naudojamų jutiklių technologijų privalumus ir trūkumus.
- Pasiūlyti priimtinių techninių parametrų jutiklius, skirtus transporto priemonėms aptikti.
- Sukurti transporto priemonių aptikimo algoritmus, iširti jų ir aparatinės bei programinės įrangos atsparumą trikdžiams ir klimato veiksniams.
- Įvertinti transporto priemonių aptikimo metodų ir algoritmų patikimumą, optimizuoti pasiūlytus metodus ir algoritmus, pritaikant juos konkrečioms eksploatacijos sąlygoms.

- Aprobuoti aptikimo jutiklius realiose transporto valdymo sistemose.
- Įvertinti ir iširti išorinio poveikio (trikdžių) įtaką.

Darbo praktinis taikymas

Disertacijoje sukurti metodai pritaikyti kuriant ir gaminant transporto valdymo sistemų transporto priemonių aptikimo jutiklius su adaptyviąja klimato poveikio kompensacija ir kompleksiniu aptikimo algoritmu.

Mokslinis naujumas

Pasiūlytas transporto priemonių aptikimo metodas, pagrįstas Žemės magnetinio lauko homogeniškumo pokyčio fiksavimu lauko stiprį matuojant magnetorezistyviniais jutikliais. Sukurtas kompleksinis aptikimo kriterijaus ir jo skaičiavimo algoritmas.

Tyrimų metodika ir priemonės

Vykstantys procesai modeliuoti pasinaudojus sukurtais matematiniais modeliais programavimo aplinkoje „Matlab“. Aptikimo įrenginiai kurti naudojant įterptines mikrovaldiklių sistemas, kurių programinė įranga kurta naudojant C programavimo kalbą ir „IAR“ programavimo aplinką. Eksperimentai atlikti su magnetorezistyviniais magnetinio lauko jutikliais automobilių stovėjimo aikštelėse įvairiomis klimato sąlygomis. Eksperimentų rezultatai apdoroti naudojant programų paketą „Matlab“. Fizikiniai procesai modeliuoti modeliavimo aplinkoje „Comsol Multiphysics“.

Praktinė darbo vertė

Rinkoje taikomų aptikimo metodų trūkumai lėmė tai, kad šiuo metu beveik nėra atvirojo tipo transporto stovėjimo aikštelių, kuriose įdiegti automobilių aptikimo jutikliai. Darbe pasiūlytas magnetinio lauko matavimo naudojant magnetorezistyvinius jutiklius metodas yra universalus ir gali būti taikomas tiek atvirojo, tiek uždarojo tipo automobilių stovėjimo aikštelėse, taip gerokai padidinant reguliuojamų stovėjimo vietų skaičių. Darbas turi praktinę vertę ir dėl to, kad buvo iširti ir pasiūlyti geresnių techninių parametrų jutikliai, palyginti su dabar esančiais rinkoje. Aptikimo sistemoms su šiais jutikliais buvo sukurti funkcionavimo algoritmai ir programos, iširtas jų atsparumas trikdžiams, klimato veiksniams ir pateiktos praktinio sistemų diegimo rekomendacijos. Pateikti praktiniai magnetinio lauko metodo bandymų duomenys leidžia įvertinti aptikimo sistemas, kurios veikimas paremtas šiuo metodu, efektyvumą. Rengiant darbą buvo sukurti nauji „Matlab“ ir „Comsol Multiphysics“ elektromagnetinių trikdžių ir transporto priemonių aptikimo modeliai, kurie gali būti pritaikomi projektuojant ir tobulinant kitas transporto priemonių aptikimo sistemas su magnetiniais jutikliais.

Suprojektuotas ir pagamintas transporto priemonių valdymo sistemos transporto priemonių aptikimo jutiklio prototipas ir sukurti modeliai panaudoti mokymo procese.

Tyrimo rezultatų apibavimas

Disertacijos tyrimo rezultatai pristatyti keturiose tarptautinėse mokslinėse konferencijose. Keturi straipsniai disertacijos tema publikuoti mokslo žurnaluose, referuojamuose Mokslinės informacijos instituto (ISI) pagrindiniame sąrašė.

Ginti pateikiami darbo rezultatai

1. Žemės magnetinio lauko pokyčio matavimu paremtas automobilių aptikimo stovėjimo vietoje metodas ir algoritmai.

2. Aptikimo kriterijai, leidžiantys nustatyti automobilių stovėjimo vietos būseną ir sekti jos užimtumą.

3. Žemės magnetinio lauko pokyčio matavimu paremti automobilių greičio nustatymo metodai.

4. Praktinių tyrimų rezultatai, leidžiantys apibūdinti galimybes aptikti automobilius ir susidarancius kritinius taškus esant nepalankioms sąlygoms.

5. Magnetinių trikdžių ir klimato veiksnių eliminavimo ir jutiklių kalibravimo algoritmai.

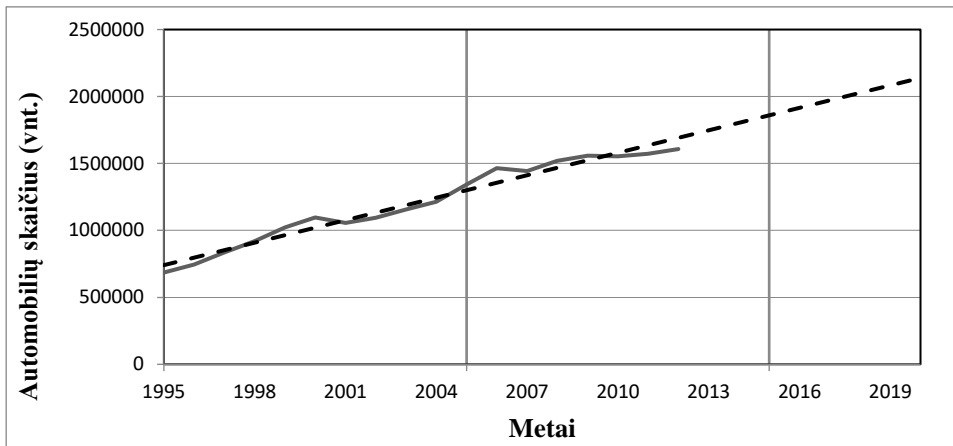
Disertacijos struktūra ir apimtis

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, išvados, literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 90 puslapiai. Disertacijoje pateiktos 8 lentelės, 96 paveikslai. Literatūros sąrašą sudaro 70 šaltinių.

1. TRANSPORTO SRAUTŲ VALDYMO SISTEMŲ IR JUTIKLIŲ APŽVALGA

1.1. Transporto priemonių aptikimo sistemų problemų analizė

Transporto sistemos plėtra Lietuvoje ir ES. Pastaraisiais metais automobilių transporto sektorius ES ir Lietuvoje nuolat augo. Europos Komisija prognozuoja, kad iki 2020 metų krovinių vežimo mastas dar padidės 55 %, o keleivių – 36 % [1, 2, 3]. Didėjantys transporto srautai skatina infrastruktūros plėtrą. Ilgalaikėje (iki 2025 metų) Lietuvos transporto sistemos plėtros strategijoje yra pabrėžiama intelektualųjų transporto sistemų (ITS) svarba didžiuosiuose miestuose [4, 5].



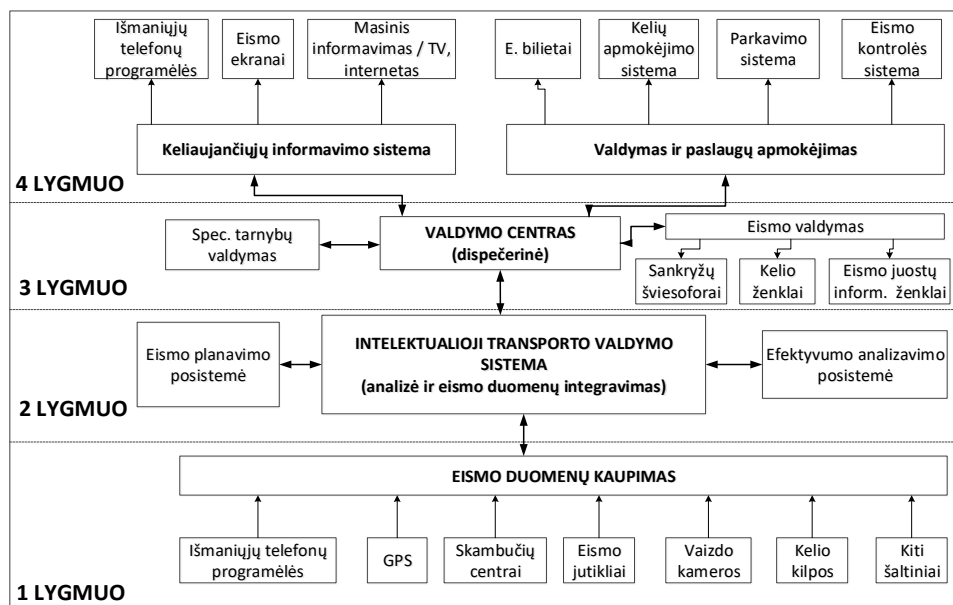
1.1 pav. Individualių lengvųjų automobilių skaičius Lietuvos Respublikoje, 1995–2012 m. duomenys [3]

Atliekant OPTIPARK (Europos Sąjungos finansuojamas projektas, www.optipark.eu) tyrimus buvo nustatyta, kad automobilių stovėjimo aikštelių vietos išnaudojamos neefektyviai – efektyvumas siekia apytiksliai tik 50 %. 75 % iš 200 milijonų Europos vairuotojų norėtų automobilio statymo vietą susirasti paprasčiau ir greičiau. Miesto centre stovėjimo vietos paieška sudaro iki 20–60 % viso važiavimo laiko. Daugiau nei 50 % automobilių statymo miesto centre trukmė neviršija 1 valandos [6].

Remiantis statistiniais Europos parkavimo aikštelių asociacijos AIPARK duomenimis, daugiau nei 20 000 gyventojų turinčiuose ES miestuose bendrasis automobilių stovėjimo vietų skaičius 2009 m. sudarė 40,8 mln., iš jų 8,8 mln. – pastatuose. Didžiausią parkavimo paslaugų rinkos dalį užima Vokietija, Prancūzija, Didžioji Britanija, Italija ir Ispanija [53]. Kartu šios šalys sudaro 78 % visos Europos parkavimo rinkos [1]. 1000 gyventojų tenka 107 reguliuojamos automobilių stovėjimo vietos, kurios sudaro tik 19 % visų stovėjimo vietų. 81 % stovėjimo vietų yra gatvėse (atvirosios automobilių stovėjimo aikštelės), 19 % yra stovėjimo aikštelės ir garažai, o 29 % visų automobilių stovėjimo vietų mieste yra mokamos [3, 19].

Vertinant statistinius tyrimus, aiškiai matyti intelektualųjų parkavimo valdymo sistemų paklausa. Miestų centruose iki 60 % eismo laiko tenka automobilio stovėjimo vietos paieškai. Šį laiką galima sumažinti užtikrinant efektyvų automobilių stovėjimo

aiškinti išnaudojimą diegiant elektronines automobilių aptikimo sistemas stovėjimo vietose [7].



1.2 pav. ITS struktūra [5]

Intelektualioji parkavimo valdymo sistema – sudėtinė transporto infrastruktūros dalis. Transporto infrastruktūros vystymasis tiesiogiai lemia automobilių stovėjimo vietų poreikį. Intelektualiųjų parkavimo valdymo sistemų rinkos vystymasis yra tiesiogiai proporcingas transporto rinkos vystymuisi ir visiškai atspindi jos charakteristikas.

Intelektualiosios parkavimo valdymo sistemos pranašumu galima įsitikinti nagrinėjant kitų autorių atliktus mokslinius tyrimus. Įdiegus elektroninę parkavimosi ir palydos sistemą automobilių statymo laikas sutrumpėja 65 % [8, 9, 10].

1.2. Transporto priemonių aptikimo metodų apžvalga

Intelektualiojoje parkavimo valdymo sistemoje, kitaip vadinamoje elektronine parkavimo ir palydos sistema (EPPS), svarbų vaidmenį atlieka automobilių aptikimo sistema. Nuo jos greitaveikos ir tikslumo priklauso parkavimo valdymo sistemos veikimas [34, 37]. Siekiant užtikrinti greitą ir tikslų automobilių aptikimo sistemos veikimą, reikia parinkti patikimus ir universalius aptikimo metodus, tinkančius visoms – tiek atvirojo, tiek uždarojo tipo – automobilių stovėjimo vietoms.

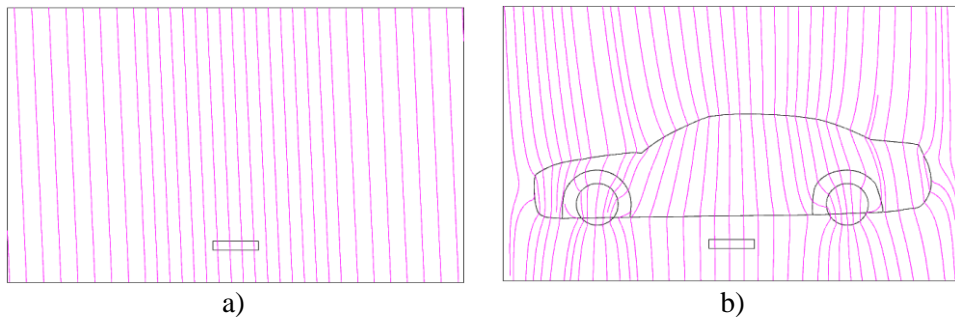
Šiuolaikinė transporto valdymo sistema (TVS) informaciją apie transporto srutus ir jų intensyvumą gauna ir apdoroja realiuoju laiku atsižvelgdama į esamą situaciją.

Nagrinėjant mokslinę literatūrą, galima rasti įvairių šiuo metu taikomų transporto priemonių aptikimo metodų [10, 12, 16]. Dėl transporto priemonių rūšių įvairovės nėra visiškai tikslaus transporto priemonių aptikimo metodo. Patikimam transporto priemonių aptikimui daug problemų sukelia jų judėjimo greitis, kuris yra

labai įvairus: automagistralėse leidžiamas greitis iki 130 km/val., o sankryžose bei stovėjimo aikštelėse reikia aptikti stovinčius automobilius. Transporto aptikimo priemonės, naudojamas judančiam transporto srautui aptikti, ne visada galima naudoti nejudančiam transportui aptikti [16].

1.2.1. Automobilių aptikimas fiksuojant lokalius Žemės magnetinio lauko pokyčius

Žemė turi gana stiprų natūralų magnetinį lauką, kurio stipris gali kisti nuo $3,1 \times 10^{-5}$ iki $6,2 \times 10^{-5}$ T. Tai tarsi didelis magnetas. Nevertinant magnetinių anomalijų, Žemės magnetinis laukas yra lokaliai tolygus (homogeninis). Šiuolaikinių automobilių konstrukcijoje panaudojama daug įvairių metalų, stiklo ir plastikų, tačiau pagrindinis metalas yra geležis ir jos lydiniai (feromagnetikai). Dėl to nedideliu atstumu nuo automobilio Žemės magnetinis laukas yra iškraipomas, pakinta jo stipris ir kryptis. Fiksuojant šį pokytį galima aptikti stovinčias ar keliu judančias transporto priemones [45, 47, 51]. Žemės magnetinio lauko pokytis dėl metalinio objekto pavaizduotas 1.3 pav.



1.3 pav. Automobilio įtaka Žemės magnetiniam laukui: a – laukas laisvoje stovėjimo vietoje; b – laukas užimtoje stovėjimo vietoje

Automobilyje plieninės detalės išsidėsčiusios netolygiai, variklio skyriuje ir ties ašimis metalinių detalių koncentracija yra didesnė, todėl ir Žemės magnetinį lauką jos veikia nevienodai. Ties ašimis ir variklio skyriuje magnetinis laukas sustiprėja, tai galima matyti 1.3 pav. Linijos vaizduoja Žemės magnetinio lauko pokytį dėl automobilio poveikio [32]. Nesant pašalinio poveikio magnetinio lauko linijos vaizduojamos lygiagrečiai. Ten, kur linijos sutankėja išsilenkdamos, magnetinis laukas sustiprėja ir, atvirkščiai – ten, kur jos praretėja, magnetinis laukas susilpnėja. Be to, kiekvienas automobilis kuria savo magnetinį lauką – generatoriaus ir elektros instaliacijos srovė, įsimagnetinę konstrukcijos elementai.

Žemės magnetinį lauką iškreipia ne tik automobiliai, bet ir šalia esantys masyvūs plieniniai objektai. Aptikimo tikslumas būtų didesnis, jei Žemės magnetinio lauko neveiktų nepageidaujami objektai, tačiau tai padaryti kartais gali būti sudėtinga arba visiškai neįmanoma. Dėl šios priežasties automobilių aptikimas naudojant Žemės magnetinį lauką yra sudėtingesnis metodas, palyginti su indukcinėmis kilpomis ir daug kitų metodų [17].

Yra daug būdų matuoti Žemės magnetinį lauką [18]. Dauguma jų pagrįsti ryšiu tarp magnetinio ir elektrinio laukų. Magnetinio lauko aptikimo ir matavimo technika

yra plačiai taikoma. Skirtingų technologijų magnetiniai jutikliai yra palyginti 1.1 lentelėje. Joje lyginamas ir jutiklių jautrio diapazonas. Svarbu pažymėti, kad kiekvienos technologijos jutiklių jautrio diapazonas priklauso nuo tolimesnės signalo apdorojimo įrangos elektroninės dalies.

1.1 lentelė. Magnetinio lauko jutiklių charakteristikos [15]

Jutiklio tipas	Diapazonas (mT)	Skiriamoji geba (nT)	Dažnių juosta (Hz)	Paskirtis ir apribojimai
Induktyvumo ritė	10^{-10} – 10^6	Kintanti	10^{-1} – 10^6	Negali matuoti statinių laukų
Vėbermetras, arba fliuksmetras (angl. <i>fluxgate</i>)	10^{-4} –0,5	0,1	0 – $2 \cdot 10^3$	Bendrojo naudojimo vektorinis magnetometras
SQUID	10^{-9} –0,1	10–4	0–5	Didžiausio jautrio magnetometras
Holo efekto jutiklis	$0,1$ – $3 \cdot 10^4$	100	0 – 10^8	Geriausiai tinka daugiau nei 1 T stiprio laukams matuoti
Magnetorezistyvus jutiklis	10^{-3} –5	10	0 – 10^7	Gerai tinka vidutinio stiprio laukams matuoti
Protonų precesijos daviklis	0,02–0,1	0,05	0–2	Bendrojo naudojimo skaliarinis magnetometras
Optinio kaupinimo magnetometras	0,01–0,1	0,005	0–5	Didžiausios skiriamosios gebos skaliarinis magnetometras

Yra daug kitų veiksnių, kurie lemia jutiklių panaudojimą tam tikrose srityse. Vieni svarbiausių – dažninės savybės, dydis ir greitaveika. Magnetiniai jutikliai yra klasifikuojami pagal matuojamo magnetinio lauko stiprio ribas. Pagal tai jie skirstomi į tris pagrindines grupes: silpno magnetinio lauko, vidutinio ir stipraus magnetinio lauko. Jutikliai, kuriais galima išmatuoti laukus, silpnesnius nei 0,1 nT, yra vadinami silpno magnetinio lauko jutikliais. Tie, kurie gali išmatuoti nuo 0,1 nT iki 1 mT magnetinius laukus, yra vidutinio magnetinio lauko jutikliai, kitaip vadinami Žemės magnetinio lauko jutikliais. Jutikliai, kurie gali išmatuoti didesnę nei 1 mT magnetinį lauką, laikomi stipraus magnetinio lauko jutikliais.

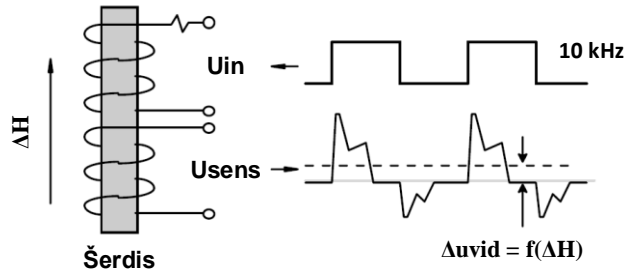
Magnetiniai jutikliai gali būti skirstomi ne tik pagal matuojamo magnetinio lauko stiprio ribas, bet ir pagal veikimo principą. Tie, kurie matuoja suminį magnetinio lauko stiprį neatsižvelgdami į jo kryptį, vadinami skaliariniais jutikliais. Kiti jutikliai matuoja ortogonaliąsias magnetinio lauko dedamąsias X, Y, Z ašyse [17]. Jie vadinami vektoriniais.

Darbo tikslui pasiekti reikalingi jutikliai, kurių matavimo diapazonas aprėpia Žemės magnetinio lauko kitimo diapazoną. Tai superlaidūs kvantinės interferencijos jutikliai (SQUID), fliuksmetrai, magnetoinduktyvieji, anizotropiniai magnetorezistyvūs jutikliai. Visi šie jutikliai gali būti naudojami navigacijoje kaip kompasai, Žemės magnetinio lauko pokyčiams (anomalijoms) stebėti, taip pat transporto priemonėms aptikti.

SQUID (angl. *superconducting quantum interference device*) superlaidūs kvantinės interferencijos jutikliai yra jautriausi magnetinio lauko jutikliai, skirti silpniems magnetiniams laukams matuoti, tačiau jie dirba žemesnėje nei 4,2 K

temperatūroje, todėl sunkiai pritaikomi įprastomis sąlygomis, tinkamesni laboratorijose.

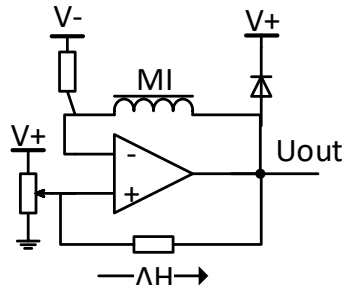
Fliukstmetras (angl. *fluxgate magnetometer*). Šio tipo jutikliai yra plačiai naudojami kaip navigacinių sistemų kompasai, karinėje pramonėje povandeniniams laivams sekti ir oro erdvės magnetiniam laukui stebėti. Magnetinio lauko srauto jutiklis dar vadinamas antrosios harmonikos jutikliu. Jis yra sudarytas iš dviejų ričių, pirminės bei antrinės, kurios suvyniotos ant vienos šerdies, pasižyminčios didele magnetine skvarba. Šerdies magnetinė indukcija keičiasi priklausomai nuo išorinio magnetinio lauko stiprio.



1.4 pav. Fliukstmetro veikimo schema [32]

10 kHz dažnio įėjimo signalas U_{in} yra perduodamas į pirminę ritę, antrinėje ritėje indukuojamas signalas U_{out} , kuris yra paveiktas ir išorinio magnetinio lauko, veikiančio šerdį. Magnetinio lauko stipris nustatomas demoduliuojant išėjimo signalą fazės poslinkiams jautriomis schemomis ir filtruojant žemojo dažnio filtrais. Lengvesnis būdas matuoti išorinį magnetinį lauką yra matuoti ritės varžos pokytį dėl kintančio išorinio magnetinio lauko. Šio tipo magnetometriniai jutikliai gali išmatuoti ne tik magnetinio lauko stiprį, bet ir kryptį [27].

Magnetoindukcinis (MI) magnetinis jutiklis. Jutiklį sudaro ritė su feromagnetine šerdimi. Šerdies magnetinė skvarba ir kartu LR generatoriaus ritės induktyvumas keičiasi priklausomai nuo išorinio Žemės magnetinio lauko pokyčio. Todėl generatoriaus generuojamas dažnis yra proporcingas matuojamam magnetiniam laukui. Nuolatinė maitinimo įtampa dedamoji (V^+ ir V^-) naudojama pastumti įtaiso darbo taškui į tiesinę dalį.



1.5 pav. Magnetoinдукcinio (MI) magnetinio jutiklio schema [32]

LR generatoriaus dažnis gali būti matuojamas mikrovaldikliu. Šio tipo magnetiniai jutikliai yra nebrangūs ir paprastai pagaminami. Dažniausiai naudojami

precizinėse navigacinėse sistemose kaip elektroniniai kompasai. Tačiau šių magnetinių jutiklių trūkumas yra ribota darbinė temperatūra – nuo –20 iki 70 °C [32].

1.2.2. Anizotropinis magnetorezistyvus magnetinis jutiklis

Anizotropinio magnetorezistyvusio jutiklio diapazonas visiškai padengia natūralaus Žemės magnetinio lauko stiprio kitimo ribas.

Minėtųjų jutiklių veikimas grindžiamas magnetinės Lorencio jėgos veikimu. Plonose kai kurių medžiagų (pvz., permalojaus – geležies ir nikelio lydinio) plėvelėse stebima elektrinio laidumo priklausomybė nuo tokią medžiagą veikiančio magnetinio lauko stiprio ir krypties (H vektoriaus kampo ir modulio). Šis reiškinys vadinamas anizotropiniu magnetorezistyvumu (AMR), o šio efekto pagrindu veikiančios mikrograndynai, matuojantys silpnus magnetinius laukus, – AMR jutikliai [64, 65].

Anizotropinių feromagnetikų varža R suskaičiuojama pagal išraišką:

$$R = R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min}) \cos^2 \Theta ; \quad (1.3)$$

čia Θ – kampas tarp elektros srovės ir atstojamojo magnetinio lauko krypties. Gaminant anizotropinės magnetovaržos (AMR) sluoksnį (plėvelėje) sudaroma išskirtinė įmagnetėjimo ašis (paprastoji – angl. *easy*). Varža R elektros srovės kryptimi didžiausia, kai įmagnetėjimo kryptis lygiagreti su srovės kryptimi, ir mažiausia, kai įmagnetėjimas yra statmenas elektros srovės kryptims. Išorinis magnetinis laukas pasuka įmagnetėjimo vektorių ir pakeičia kampą Θ , o kartu ir varžą, priklausomą nuo lauko stiprio. Ryšys tarp magnetinio lauko stiprio ir varžos pokyčio nėra tiesinis. Kai laukas yra statmenas srovei, ši priklausomybė yra kvadratinė:

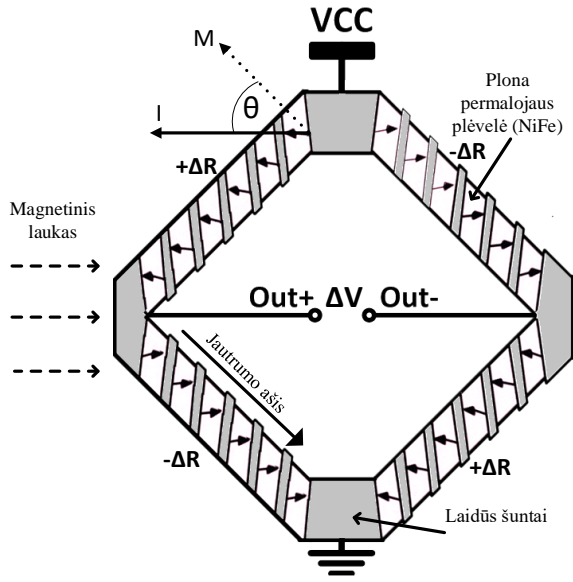
$$R = R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min}) \left[1 - \left(\frac{H}{H_s} \right)^2 \right], \quad (1.4)$$

kur H_s ($\geq H$) – išorinio lauko, reikalingo įmagnetėjimo vektoriui pasukti 90° srovės tekėjimo krypties atžvilgiu (įsisotinimo laukas), stipris. Vis dėlto elemento darbo taško paslinkimas palyginti dideliu nuolatinio lauku padaro atsaką tiesišką. Nuolatinis laukas, įmagnetėjimo vektorių pasukantis 45° srovės tekėjimo krypties atžvilgiu, atsako funkciją pakeičia į:

$$R = R_{\min} + \frac{R_{\max} - R_{\min}}{2} + (R_{\max} - R_{\min}) \frac{H}{H_s} \sqrt{1 - \left(\frac{H}{H_s} \right)^2}; \quad (1.5)$$

kuri apytiksliai tiesinė, kai $H/H_s \ll 1$.

Paprastai AMR jutikliai konstruojami pasitelkiant keturis magnetorezistyvinius elementus, sujungtus į lygių pečių rezistyvinių (Vitstono) tiltelį. Paprastai priešpriešiniai tiltelio elementai parenkami lygių varžos verčių.



1.6 pav. Vitstono AMR tiltelis

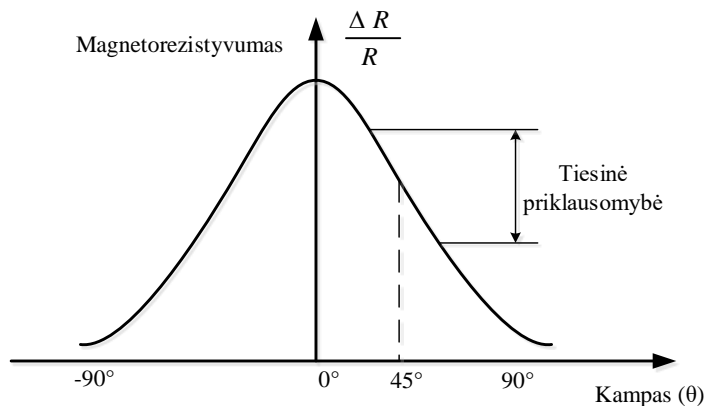
Tiltelį paveikus magnetiniu lauku M , lygiagrečiu su jo jautriąja ašimi, rezistyvinių elementų varža įgauna pokytį, kurio ženklas priklauso nuo kampo θ tarp srovės ir magnetinio lauko vektorių. Šis pokytis išbalansuoja tiltelio pečius, todėl šį pakitimą galima fiksuoti kaip įtampos tarp $Out+$ ir $Out-$ pakitimą. Ši įtampa gali būti išreikšta lygybe:

$$\Delta V = Out+ - Out- = S \cdot V_s \cdot M; \tag{1.6}$$

čia S – jutiklio jautris (paprastai 1 mV/V/G); V_s – tiltelio pečių įtampa; M – magnetinio lauko stipris (gausais).

Iš (1.6) formulės akivaizdu, jog tiltelio jautris nepriklauso nuo juo tekančios srovės stiprio, taigi, siekiant minimizuoti energijos nuostolius matavimo metu, magnetorezistyvinės plėvelės varža didinama gaminant ją kuo plonesnę, tačiau, didėjant varžai, didėja tiltelio triukšmas, todėl varžos didinti iki begalybės negalima.

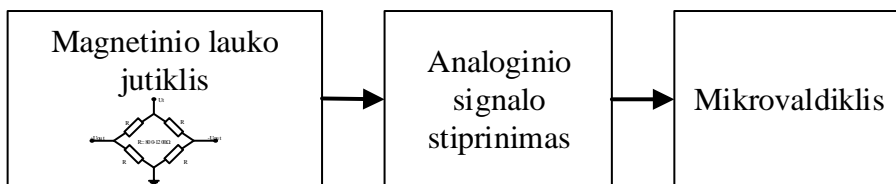
Į matavimo tiltelį magnetiniam laukui jautrūs elementai sujungiami siekiant padidinti jautrį. Toks jutiklis pasižymi dideliu tiesiškumu. Jo išėjimo įtampos priklausomybė yra tiesinė, kai magnetinis lauko vektorius H ir srovės tekėjimo per magnetorezistyvinį elementą kryptis sudaro 45° kampą (1.7 pav.). Jutiklio darbo dažnių juosta siekia iki 5 MHz. Jis reaguoja į magnetinio lauko pokytį. Magnetinis jutiklis matuoja magnetinio lauko kryptį ir stiprį [32].



1.7 pav. Magnetorezistyvino jutiklio $\frac{\Delta R}{R}$ priklausomybė nuo kampo θ

AMR jutikliai gaminami permalojaus takelius užnešant ant silicio pagrindo. Kiekvienas takelis turi meandro (stačiakampių vingių) formą. Jie sujungiami į Vitstono tiltelį. Tiltelis balansuojamas graviruojuojant papildomas varžas lazeriu. Gamybos metu išilgai strypelių sukuriama stiprus magnetinis laukas. Taip sudaroma išskirtinė pageidautina magnetinė tekstūra. Išorinis magnetinis laukas iš dalies pakrypsta išilgai strypelių viena kryptimi. Tačiau stiprus priešingos krypties magnetinis laukas gali pakeisti strypelių įmagnetėjimo kryptį ir jautrio kreivę.

Transporto priemonių aptikimo schema su magnetiniu jutikliu pateikta 1.8 pav. Ji sudaryta iš magnetinio jutiklio, stiprinimo grandinės ir duomenų apdorojimo įtaiso [46].



1.8 pav. Detektoriaus su magnetinio lauko jutikliu struktūrinė schema

Magnetinio lauko signalas iš tiltelio sustiprinamas ir keitikliu *analogas–kodus* (AKK), integruotu mikrovaldiklyje, konvertuojamas į skaitmeninį signalą, kad būtų apdorojamas toliau. Mikrovaldiklyje įdiegtas algoritmas, skirtas transporto priemonėms aptikti. Informacija apie aptiktas transporto priemones transporto valdymo sistemai iš mikrovaldiklio gali būti perduodama tiek duomenų perdavimo linija, tiek bevieliu būdu. Magnetinis jutiklis paprastai montuojamas kelio dangoje. Šiuo atveju jis būna įdėtas į tvirtą, drėgmei nelaidų korpusą. Jutiklis gali būti montuojamas šaligatvio dangoje, o automobilių stovėjimo aikštelėse – ir į stovėjimo vietos padangų atmušimo bortelius. Kelyje su keliomis eismo juostomis jutiklį stengiamasi montuoti ne pačiame eismo juostos viduryje, o patraukiant kuo arčiau krašto, kad gretimose eismo juostose pravažiuojančios transporto priemonės turėtų kuo mažesnę įtaką rezultatams.

1.2.3. Automobilių aptikimas indukciniumi metodu

Automobilio aptikimas indukciniumi metodu pagrįstas įtaiso ritės sukurto magnetinio lauko kuriamomis sūkurinėmis srovėmis metalinėse automobilio konstrukcijose (automobilio korpuse, tiltuose, ratlankiuose ir pan.). Sūkurinės srovės kuria magnetinį lauką, kuris sumuojasi su ritės kuriamu magnetiniu lauku ir jį pakeičia (sumažina). Pakitus ritės laukui, pakinta ir jos induktyvumas, nes ritės kuriamas magnetinis laukas Φ ir ritės induktyvumas L yra tiesiogiai proporcingi:

$$L = A \cdot \Phi. \quad (1.7)$$

Ši induktyvumo pokytį galima fiksuoti arba kaip induktyviosios varžos pokytį, arba kaip LC kontūro, kuriame yra įtaiso ritė, rezonansinio dažnio pokytį:

$$\Delta f = f - f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} - \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C}} \left(\frac{1}{\sqrt{L}} - \frac{1}{\sqrt{L_0}} \right). \quad (1.8)$$

Kadangi $L = L_0 - \Delta L$ ir $\Delta L \ll L_0$, tai

$$\begin{aligned} \Delta f &= \frac{1}{2\pi\sqrt{C}} \left(\frac{1}{\sqrt{L_0 - \Delta L}} - \frac{1}{\sqrt{L_0}} \right) \frac{1}{2\pi\sqrt{C}} = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\Delta L}{L_0}}} - 1 \right) \approx f_0 \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta L}{2L_0}} - 1 \right) \\ &= f_0 \frac{\Delta L}{2L_0}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Santykinis dažnio pokytis:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta L}{2L_0}. \quad (1.10)$$

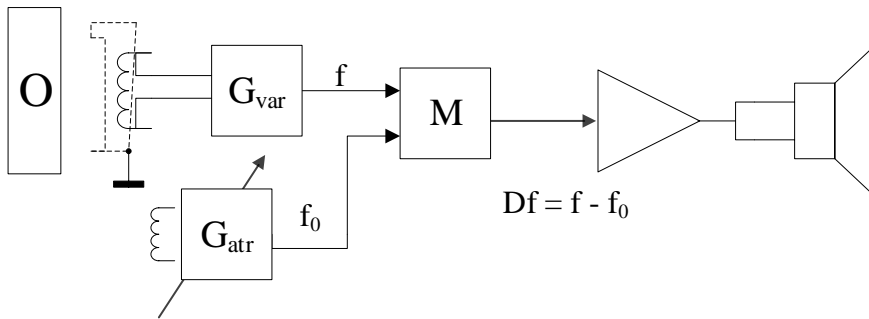
Taigi santykinis dažnio pokytis yra dvigubai mažesnis už santykinį induktyvumo pokytį.

Sukūrus stabilios amplitudės kintamosios srovės šaltinį ir šią srovę paleidus per ritę, santykinis induktyviosios įtampos kritimo pokytis ritėje būtų tokio pat dydžio, kaip ir santykinis induktyvumo pokytis:

$$\frac{\Delta U_L}{U_{L_0}} = \frac{\Delta L}{L_0}. \quad (1.11)$$

Tačiau tiksliai išmatuoti mažus įtampos pokyčius yra gerokai sudėtingiau negu išmatuoti kad ir mažus dažnio pokyčius, todėl įtampos kritimo metodas dėl savo sudėtingumo yra rečiau taikomas nei dažnių metodas.

Automobilio aptikimas indukciniumi metodu yra analogiškas metalų ieškiklių metodams ir priemonėms, tik automobilių aptikimo sistema turi būti galimai mažesnių gabaritų ir nesukelti trikdžių tiek gretimai dirbančioms automobilių aptikimo sistemoms, tiek atitinkamame radijo dažnių diapazone dirbančioms radijo ryšio ir kitokios paskirties sistemoms. Daugeliu atvejų metalų ieškiklių struktūra yra panaši į atvaizduotąją 1.9 pav.



1.9 pav. Tipinė metalų iešiklio struktūra

Metalu iešiklį sudaro du LC generatoriai: G_{var} – informacinis generatorius, kurio generuojamas dažnis kinta priklausomai nuo ritės nuotolio iki metalinio objekto O , ir G_{atr} – fiksuoto, bet paderinamo dažnio atraminis generatorius. Abiejų generatorių signalai perduodami į maišiklį M , kurio išėjime bus skirtuminio dažnio Δf signalas, ir informuoja apie nuotolį iki metalinio objekto. Operatorius visą laiką paderina atraminio generatoriaus dažnį taip, kad, nesant metalinio objekto, skirtuminis dažnis Δf būtų artimas nuliui.

Jautriui padidinti informacinio generatoriaus signalo amplitudė yra apribojama ir išskiriama n -oji harmonika, kuri ir perduodama į maišiklį. Atraminio generatoriaus signalo dažnis taip pat paderinamas iki $f_0' = n \cdot f_0$.

Skirtuminis dažnis:

$$\Delta f' = n \cdot f - n \cdot f_0 = n \cdot \Delta f = n \cdot f_0 \cdot \frac{\Delta L}{L_0}. \quad (1.12)$$

Santykinis skirtuminis dažnis:

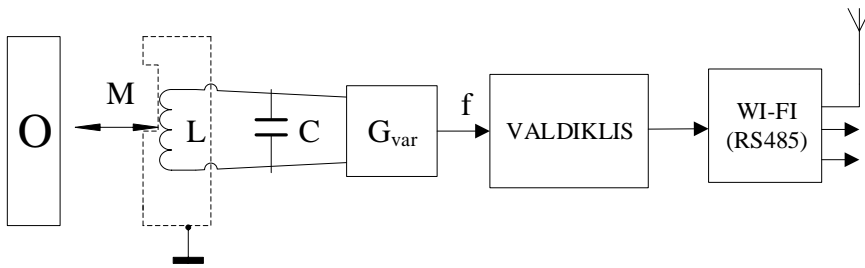
$$\frac{\Delta f'}{f_0} = n \times \frac{\Delta L}{L_0}, \quad (1.13)$$

t. y. gaunamas n kartų didesnis skirtuminis dažnis.

Žinoma, šiuo atveju įvairūs destabilizuojantys veiksniai (temperatūra, drėgmė ir kt.) taip pat turi n kartų didesnę įtaką.

Kadangi darbinis informacinio generatoriaus dažnis neturi būti labai didelis (iki 1 MHz), tai pakankamą tikslumą galima gauti matuojant generatoriaus dažnio pokytį tiesiogiai valdomu procesoriumi. Šiuo tikslu procesoriaus laikmačiu suformuojama laiko pertrauktis, kurios metu suskaičiuojamas informacinio generatoriaus impulsų skaičius. Kuo ji ilgesnė, tuo sistemos tikslumas bus didesnis.

Įvertinus visus pranašumus ir trūkumus, autoriaus rekomenduojama automobilių aptikimo indukcinio metodu struktūra pateikta 1.10 pav.



1.10 pav. Automobilių detekcijos indukcinio metodu struktūra

LC generatorius G_{var} generuoja sinusinį signalą, kurio dažnis priklauso nuo ritės L magnetinio ryšio su objektu (automobiliu) stiprumo. Signalo dažnį ir dažnio pokyčius matuoja mikrovaldiklis, kurio programa priima sprendimą dėl automobilių stovėjimo vietos būsenos (yra automobilis ar jo nėra) ir šį sprendimą radijo kanalu („Wi-Fi“) arba laidiniu kanalu (RS485) perduoda į centrinę visos stovėjimo aikštelės ar aikštelių valdiklį.

1.2.4. Automobilių aptikimas ultragarsiniu metodu

Automobilių stovėjimo aikštelių užimtumui nustatyti jau seniai naudojami ultragarsiniai detektoriai, kurių veikimas yra pagrįstas ultragarso signalo impulso, pasiūsto į tiriamąjį objektą, atspindžio signalo fiksavimu. Taikomi keli ultragarsiniai metodai [66]:

1. Ultragarsinis aido kontrolės metodas. Jis pagrįstas trumpųjų ultragarso impulsų siuntimu ir nuo automobilio atspindėjusio aido signalo registravimu. Teigiamos metodo savybės: vienpusis priėjimas prie objekto, didelis jautrumas, didelis kliūtis koordinacių nustatymo tikslumas; trūkumai – mažas atsparumas paviršiaus atspindžių trikdžiams, aido signalo priklausomybė nuo kliūtis buvimo vietos.

2. Šešėlinis ultragarsinis kontrolės metodas. Ultragarso bangų siūstuvai ir imtuvai, išdėstyti vienas priešais kitą priešingose tiriamojo objekto pusėse, sukuria „akustinį traktą“. Kontroluojamos aikštelės būklė nustatoma pagal priimamo signalo lygį. Jei ultragarso bangos sklaidymo kelyje nepasitaiko kliūčių, bangos atspindėjimų ar sklaidos, tai priimamo signalo lygis maksimalus. Šis lygis gerokai sumažėja ar net nukrinta iki nulio, jei stovėjimo vietoje pasitaiko kliūtis.

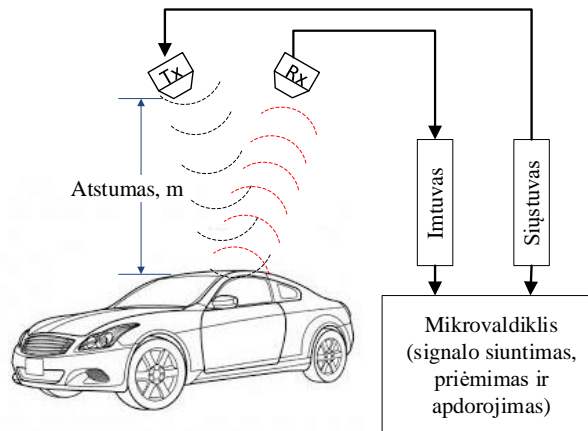
3. Veidrodinis-šešėlinis metodas. Taikant šį metodą, nereikia dvipusio priėjimo prie kliūtis. Šiuo atveju kliūtis aptikimo kriterijus yra nuo priešingo paviršiaus atspindėjusio signalo amplitudės sumažėjimas. Naudojami du pjezoelektriniai keitikliai: siūstuvai ir imtuvai.

Net ir pačiuose moderniausiuose šiuo metu naudojamuose parkavimo sistemų jutikliuose ultragarsinės kontrolės metodai yra tie patys, kaip ir taikyti prieš kelis dešimtmečius: analizuojamos tik atspindėjusio fizinio signalo charakteristikos ir aptiktos kliūtis koordinatės nustatomos pagal amplitudę ar atspindžio laiką.

Ultragarsiniai jutikliai signalą siunčia akustinėmis 25–50 kHz dažnio bangomis. Veikimo principas pagrįstas atstumo iki objekto matavimu. Pavyzdžiui, jutiklis yra sumontuotas virš kelio paviršiaus. Kai nėra transporto priemonės, išsiūsto signalo

dalis atspindi nuo kelio dangos paviršiaus ir grįžta atgal į jutiklį. Palyginus išsiųstą ir priimtą signalą pamatuojamas atstumas iki kelio dangos. Kai į ultragarsinio jutiklio zoną patenka automobilis, dalis išsiųsto signalo atspindi nuo automobilio paviršiaus ir grįžta atgal į jutiklį. Signalo nukeliamas atstumas būna mažesnis nei iki kelio dangos, ir taip fiksuojamas transporto priemonės buvimas [14, 39].

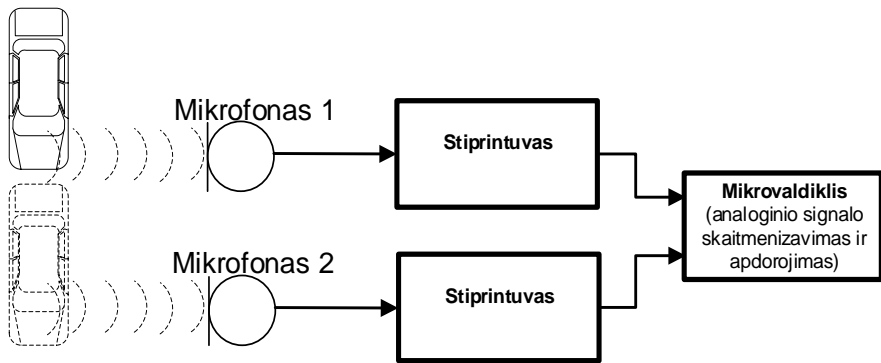
Pagrindiniai ultragarsinių sistemų trūkumai yra temperatūros pokyčių ir oro srautų turbulencijos įtaka aptikimo patikimumui. Dėl ribotos greiteivikos šie jutikliai sunkiai panaudojami greitkeluose arba ten, kur transporto srauto judėjimo greitis yra gana didelis [14].



1.11 pav. Struktūrinė ultragarsinio jutiklio schema

1.2.5. Akustiniai jutikliai

Pasyvieji akustiniai jutikliai analizuoja akustinę emisiją, kurią sukelia pravažiuojančios transporto priemonės. Tokios sistemos pagrindą sudaro keli mikrofona, nukreipti į kelią. Akustinis transporto priemonių aptikimo jutiklis fiksuoja pro jo apimamą zoną pravažiuojančių autotransporto priemonių garsą, jį analizuoja ir lygina su iš anksto įrašytais tam tikroms autotransporto priemonių grupėms būdingais garsais. Tokio detektoriaus schema pavaizduota 1.12 pav. Pagrindiniai pravažiuojančių transporto priemonių keliamo garso šaltiniai yra triukšmas, kylantis dėl padangų sąlyčio su kelio danga, ir veikiančio variklio triukšmas. Šie jutikliai paprastai montuojami ant iki 12 m aukščio stulpų, šalia kelio ir nukreipiami į eismo juostų vėžes [22].

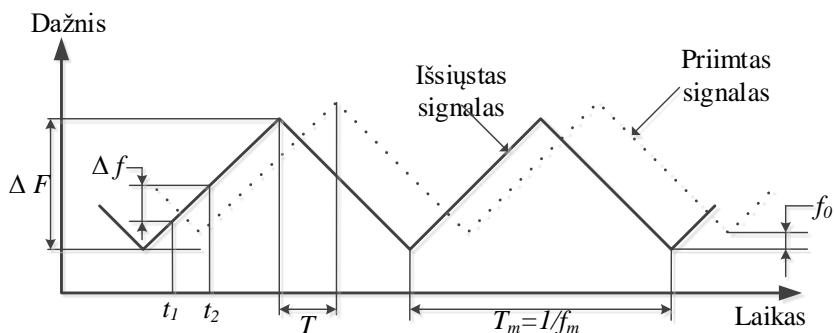


1.12 pav. Struktūrinė detektoriaus su pasyviaisiais akustiniais jutikliais schema

Pagrindinis detektorių su pasyviaisiais akustiniais jutikliais trūkumas yra didelė temperatūros įtaka matavimo rezultatams. Esant žemai temperatūrai gerokai sumažėja matavimo tikslumas. Taip pat nerekomenduojama detektorių su pasyviaisiais akustiniais jutikliais naudoti stovinčioms ar lėtai judančioms ir elektrinėms transporto priemonėms aptikti [14].

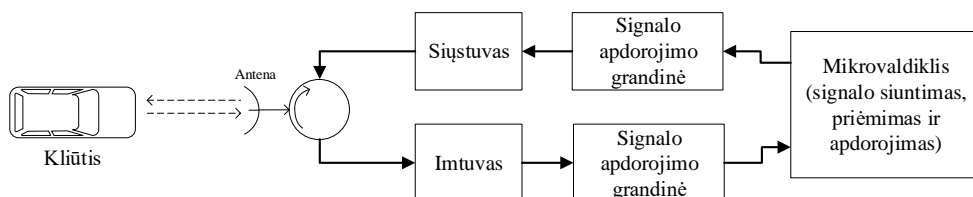
1.2.6. Mikrobangų radarai

Mikrobangų radaro funkcionavimo dažnis gali būti nuo 1 iki 30 GHz. Antena pakeliama aukštyr ir nukreipiama į stebimą kelio atkarpą. Kai į antenos veikimo spindulį patenka automobilis, iš antenos išspinduliuotos energijos dalis atsispindi nuo automobilio paviršiaus ir grįžta atgal į anteną. Palyginus išsiųstą ir gautą signalus, galima nustatyti transporto priemonės judėjimo greitį, jos plotį bei ilgį. Transporto priemonėms aptikti naudojami du mikrobangų radarų tipai: pastoviosios bangos CW Doplerio radaras (*CW* – angl. *continuous wave*) ir dažninės moduliacijos išsistinės bangos (FMCW – angl. *frequency modulated continuous wave*) mikrobangų radaras. CW Doplerio tipo radaras siunčia pastovaus dažnio signalus, o dėl Doplerio efekto nuo judančios transporto priemonės atsispindėjęs signalas į anteną grįžta jau pakitusio dažnio. Tokiu būdu pagal signalo dažnio pokytį galima aptikti judančias transporto priemones ir išmatuoti jų judėjimo greitį. Tačiau šiais radarais negalima aptikti nejudančių transporto priemonių. Dažninės moduliacijos išsistinės bangos radarai (FMCW) tam tikru laiko periodu siunčia moduliuotojo dažnio signalus, kaip pavaizduota 1.13 pav.



1.13 pav. Mikrobangų radaro (FMCW) veikimo principas

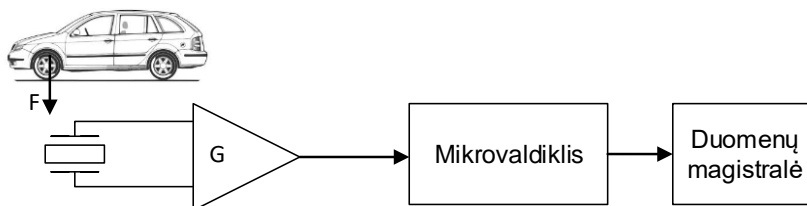
Matuojamas laiko skirtumas tarp išsiųsto ir atsispindėjusio signalo, taip apskaičiuojamas atstumas iki aptiktos transporto priemonės. Šiuo būdu galima aptikti ir nejudančias transporto priemones [22].



1.14 pav. Mikrobangų radaro struktūrinė schema

1.2.7. Pjezoelektriniai jutikliai

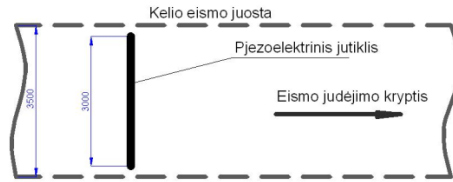
Pjezoelektriniai jutikliai kinetinę energiją paverčia į elektrinius signalus. Veikiamos mechanine jėga pjezoelektrinės medžiagos sukuria elektros krūvį. Elektrinio signalo amplitudė ir dažnis yra tiesiogiai proporcingi pjezoelektrinės medžiagos mechaninei deformacijai ir dažniui. Pjezoelektriniuose detektoriuose kaip jautrioji medžiaga naudojami polimerai, pasižymintys pjezoelektrinėmis savybėmis. Dažniausiai naudojamas polivinildifluoridas (PVDF) [14]. Pjezoelektriniame jutiklyje dėl deformacijos sukuriama krūvis išnyksta per laiką, kuris priklauso nuo jutiklio vidinės varžos, dielektrinės konstantos ir signalo stiprinimo grandinės įėjimo impedanso. Mažiausias dažnis, kurį galima išmatuoti su pjezoelektriniu jutikliu, apytiksliai lygus 0,001 Hz [10].



1.15 pav. Detektoriaus su pjezoelektriniu jutikliu struktūrinė schema

Automobilio priekinei ir galinei ašiai pravažiuojant virš pjezoelektrinio jutiklio du kartus deformuojama pjezoelektrinė medžiaga ir pjezoelektriniame jutiklyje atsiranda du vienas kito atžvilgiu suvėlinti elektriniai signalai. Palyginti su

induktyviosiomis kilpomis, šie jutikliai universalesni: jais galima ne tik aptikti transporto priemones, bet ir pasverti kiekvieną ašį atskirai, klasifikuoti judantį transportą.

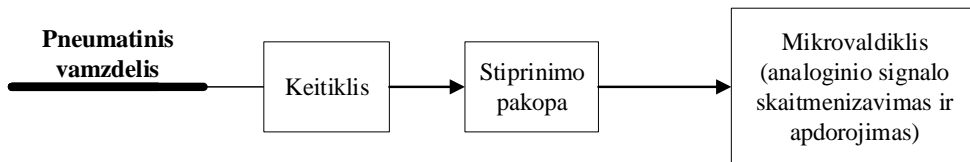


1.16 pav. Pjezoelektrinio jutiklio orientacija kelio eismo juostoje

Kaip ir naudojant induktyviasias kilpas, instaliuojant pjezoelektrinius jutiklius ar šalinant gedimus reikia suardyti kelio dangą. Dėl pjezoelektriniuose jutikliuose neišliekančio krūvio jais galima matuoti tik dinamines apkrovas ir aptikti tik judantį transporto srautą. Dėl šios savybės jų neįmanoma panaudoti automobiliams aptikti, kai šie stovi sankryžose ar stovėjimo aikštelėse.

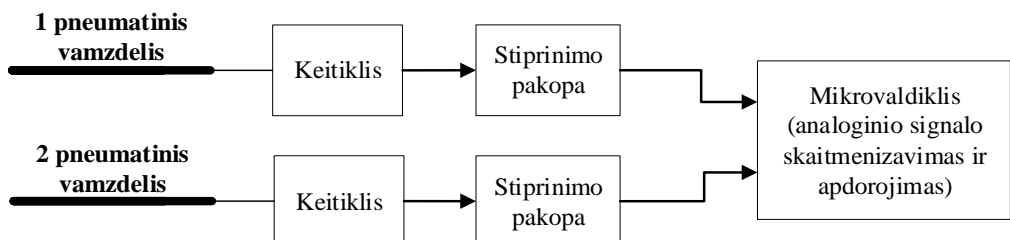
1.2.8. Pneumatiniai kelio vamzdeliai

Pneumatiniai kelio vamzdeliai – tai paprasti, lankstūs tuščiaviduriai vamzdeliai. Jie yra uždarojo tipo, o jų gale įmontuojamas slėgio jutiklis. Pneumatinis kelio vamzdelis yra klojamas skersai važiuojamosios kelio dalies ant kelio paviršiaus. Pravažiuojant automobiliui, tiksliau, vienai iš automobilio ašių pravažiuojant kelio vamzdelį, vamzdelio viduje atsiranda slėgio impulsai. Šie vamzdeliu yra perduodami į slėgio jutiklį. Jutiklis slėgio impulsus paverčia elektriniu signalu. Iš jutiklio elektrinis signalas toliau keliauja į analoginio signalo stiprinimo grandinę. Sustiprintas signalas apdorojamas mikrovaldiklyje, kaip pavaizduota 1.17 pav. [23].



1.17 pav. Detektoriaus su pneumatinio kelio vamzdeliu struktūrinė schema [14]

Transporto aptikimo įranga su pneumatiniais kelio vamzdeliais paprastai montuojama ten, kur reikia atlikti trumpalaikius transporto srauto tyrimus.



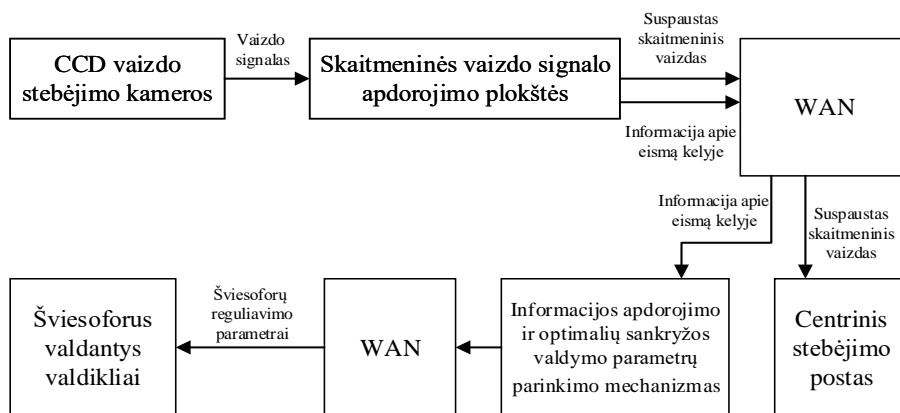
1.18 pav. Detektoriaus su dviem pneumatiniais kelio vamzdeliais struktūrinė schema [14]

Norint nustatyti transporto priemonių greitį naudojami du tam tikru atstumu sumontuoti pneumatiniai vamzdeliai (1.18 pav.). Automobilis šiuo atveju pervažiuoja abu kelio vamzdelius vieną po kito. Jo greitis apskaičiuojamas matuojant laiko intervalą tarp abiejų pneumatinių vamzdelių signalų.

Pagrindinis pneumatinių kelio vamzdelių privalumas tas, kad transporto srautą galima aptikti ne vienoje, o iš karto keliose eismo juostose arba net visame kelyje priešingose eismo juostose. Pneumatiniai kelio vamzdeliai taip pat pasižymi mobilumu juos montuojant. Jie netinkami ilgalaikiam transporto stebėjimui, nes intensyvus automobilių srautas ir sunkiasvoris transportas ilgai juos suardo [24]. Taip pat pneumatiniams kelio vamzdeliams negalima aptikti nejudančių transporto priemonių.

1.2.9. Vaizdo stebėjimo kameros

Vaizdo stebėjimo kamerų veikimo principas pagrįstas vaizdo stebėjimo ir objektų atpažinimo principais. Viena perspektyviausių duomenų surinkimo technologijų yra vaizdo stebėjimo sistema, turinti skaitmeninio vaizdo signalo apdorojimo funkciją [49]. Pagrindinė šios sistemos funkcija yra eismo stebėjimas, transporto srautų tam tikruose keliuose įvertinimas, transporto priemonių paieška. Sistemos pagrindą sudaro vaizdo kamera ir iš jos gauto vaizdo skaitmeninio apdorojimo įrenginys. Vaizdo stebėjimo sistemos su skaitmeninės ir vaizdo informacijos kombinacija yra kur kas pranašesnės už kitas informacijos apie transporto srautus surinkimo sistemas. Centrinėje stebėjimo stotyje iškart gaunamas vaizdo signalas leidžia operatoriui įvertinti, kaip veikia vaizdo apdorojimo sistema ir ar gaunama informacija yra tiksli. Vienas didesnių vaizdo sistemos privalumų yra tai, kad ją galima automatiškai fiksuoti tam tikrus įvykius kelyje, pavyzdžiui, avarijas, sugedusius ar neleistinose vietose stovinčius automobilius. Automobilių srautams stebėti vaizdo filmavimo kameros montuojamos tam tikrame aukštyje, o kameros signalas naudojamas kaip aptikimo priemonė. Vaizdo signalai realiuoju laiku apdorojami specialia aparatine įranga VIP (angl. *video image processor*). Tai yra specialūs vaizdo apdorojimo procesoriai. Vaizdo apdorojimo įrangos paleidimo metu ant vaizdo uždedami tam tikri aktyvūs plotai (pavyzdžiui, kelio eismo juostos) [11].



1.19 pav. Vaizdo apdorojimo sistemos, skirtos automobiliams aptikti, struktūrinė schema [8]

Aktyviuose ploteliuose pasirodžius automobiliui gaunamas vaizdo signalas yra apdorojamas specialia programine įranga, atpažįstama ir fiksuojama automobilio buvimo būseną. Naudojant tam tikrus algoritmus, gaunama įvairi reikiama informacija [50, 26]. Komunikacijų plokštės apdorotus duomenis (skaitmeniniu būdu suspaustą vaizdą, duomenis apie automobilių srautus, kiekį, aliarmus ir t. t.) turimais kanalais siunčia į centrinį stebėjimo postą. Centrinėje stebėjimo stotyje gali būti stebimas ir vaizdas. Naudojantis gauta informacija apie transporto srautus, pagal tam tikrą logiką koreguojami šviesoforų valdiklių darbo parametrai. Pakoreguoti valdymo parametrai komunikacijų kanalais perduodami valdikliams [11, 16].

Pagrindiniai šių vaizdo stebėjimo sistemų trūkumai yra nepakankamas patikimumas vaizdo stebėjimui nepalankiomis oro sąlygomis, šešėliai, mažas automobilių atvaizdų kontrastingumas lyginant su kelio danga. Voratinkliai, vabzdžiai ir dulkės ant vaizdo kameros objektyvo gali gerokai sumažinti sistemos efektyvumą; vaizdo kameras reikia montuoti gana dideliame aukštyje [16].

1.2.10. Jutiklių privalumai ir trūkumai

Atlikus mokslinę analizę nustatyti kiekvieno aptikimo metodo privalumai ir trūkumai. Jie apibendrinti 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Aptikimo metodų palyginimas

Aptikimo metodas	Aptikimo metodo privalumai	Aptikimo metodo trūkumai
Induktyviosios kilpos	Ilgai naudojama ir gerai iširta technologija. Didelė sukauptos tyrimų informacijos bazė. Nejautrus oro sąlygoms (temperatūrai, drėgmei ir t. t.). Didžiausias aptikimo tikslumas, palyginti su kitais jutikliais.	Reikia ardyti kelio dangą (sutrumpinamas dangos gyvavimo laikas). Aptikimo tikslumas gali sumažėti, kai reikia aptikti labai įvairių tipų automobilius. Tarpusavio sąveika esant nedideliame atstumui (vienos stovėjimo vietos arba vienos eismo juostos). Būtinas sertifikavimas dėl elektromagnetinio suderinamumo. Galimi mechaniniai pažeidimai dėl įtempių kelio dangoje, atsirandančių dėl temperatūros pokyčių. Montuojant ir atliekant priežiūros darbus, reikia uždaryti eismo juostą.
Mikrobangų radarai	Nejautrus blogoms meteorologinėms oro sąlygoms esant nedideliame atstumui. Galimas kelių eismo juostų stebėjimas. Tiesioginis greičio matavimas.	Negali detektuoti stovinčių automobilių. Būtinas elektromagnetinis suderinamumas.
Aktyvieji infraraudonųjų spindulių jutikliai	Galimas kelių eismo juostų stebėjimas.	Meteorologinės oro sąlygos, ypač stiprus lietus, sniegas ir rūkas, mažina aptikimo tikslumą. Kai kurie modeliai netinkami stovintiems automobiliams aptikti. Reikia nuolatinės priežiūros (valyti objektyvus).

Ultragarsiniai jutikliai	Plačiai naudojami visame pasaulyje. Galimas kelių eismo juostų stebėjimas.	Jautrūs oro sąlygoms (temperatūros kaitai ir ekstremalioms oro turbulencijoms), būtina temperatūrinė kompensacija. Sudėtingas dideliu greičiu judančių transporto priemonių aptikimas.
Pasyvieji akustiniai jutikliai	Pasyvus aptikimas. Nejautrūs kritulių poveikiui. Galimas kelių vietų stebėjimas vienu metu.	Neigiama temperatūra daro įtaką aptikimo tikslumui. Mažas aptikimo tikslumas.
Vaizdo apdorojimo sistemos	Galimas kelių vietų stebėjimas vienu metu. Lengva praplėsti ar panaikinti norimas aptikti vietas (priklauso nuo programinės įrangos). Didelė sukauptos tyrimų informacijos bazė.	Didelę įtaką daro meteorologinės oro sąlygos, šešėliai, perėjimas iš šviesaus paros meto į tamsų, kameros lęšio užterštumas, kontrastas tarp automobilio ir kelio dangos. Didelis montavimo aukštis – 5–15 metrų.
Magnetiniai jutikliai	Naudojami kaip alternatyva induktyviosioms kilpoms judantiems automobiliams aptikti. Nejautrūs nepalankiam orui (sniegui, lietui ir rūkui). Maži matmenys (palyginti su induktyviosiomis kilpomis). Mažas galios sunaudojimas.	Temperatūros poveikis matavimo rezultatams. Papildomai netaikant aptikimo algoritmų, sunku aptikti nejudančius automobilius. Maža objekto aptikimo zona, reikia daug jutiklių. Jutikliams montuoti reikia pjaustyti ar gręžti dangą.

Induktyviųjų kilpų jutikliai plačiai naudojami ir gerai ištirti, tačiau gretimų kilpų tarpusavio indukcijos trukdžiai sumažina aptikimo patikimumą. Kai gretimų kilpų dažnis labai panašus arba toks pat, jos veikia viena kitą. Dėl to tikėtina, kad bus nustatytas automobilio buvimas, kai jo iš tikrųjų ten nėra. Normaliu darbo režimu atskiros sistemos dirba skirtingu dažniu, tačiau laikui bėgant sistemų parametrai kinta ir dažnis gali sutapti [13].

Ultragarsiniai akustiniai jutikliai gerai tinka stovėjimo aikštelėse su stogu, nes yra montuojami virš stovėjimo vietos. O atvirojo tipo stovėjimo aikštelėse yra beveik nenaudojami, nes paprasčiausiai nėra kur jų įrengti.

Vaizdo stebėjimo sistema gali būti pritaikoma tiek atvirojo, tiek uždarojo tipo stovėjimo aikštelėse. Galima sekti ne vienos vietos būseną, o tiek, kiek aprėpia kameros matomas vaizdas. Tačiau kaip vieną iš neigiamų savybių galima paminėti tai, kad šiai sistemai reikia galingos vaizdo apdorojimo posistemės (aparatinė ir programinė įranga).

Magnetinio lauko jutikliai yra naudojami judančių automobilių greičiui nustatyti, jiems klasifikuoti [36]. Šie jutikliai gali būti naudojami atvirojo ir uždarojo tipo stovėjimo aikštelėse. Jų panaudojimo galimybes riboja didelis jautrumas trukdžiams. Šio tipo jutikliams įtakos turi veiksniai, kurie daro poveikį Žemės magnetinio lauko tolygumui.

Kiti metodai yra sunkiai pritaikomi didelėse, daugiau negu 100 vietų stovėjimo aikštelėse.

1.3. Skyriaus apibendrinimas

1. Automobilių stovėjimo aikštelės yra svarbi ir neatsiejama transporto infrastruktūros dalis. Atlikta analizė rodo, kad iki 60 % kelionės miesto centre laiko sudaro laisvos stovėjimo vietos paieška. Šį laiką galima sutrumpinti iki 35 % diegiant valdymo sistemas, turinčias stovėjimo vietų būsenos stebėjimo įrangą. Esamų aptikimo metodų trūkumai nulėmė tai, kad šiuo metu beveik nėra reguliuojamų atvirojo tipo stovėjimo vietų, kuriose įdiegti automobilių aptikimo jutikliai.

2. Naudojant magnetorezistyvinius jutiklius galima reguliuoti tiek atvirojo, tiek uždarojo tipo automobilių stovėjimo aikšteles. Taip gali būti gerokai padidintas reguliuojamų stovėjimo vietų skaičius. Siekiant iširti šio metodo tinkamumą automobiliams atvirosiose stovėjimo aikštelėse aptikti, judantiems automobiliams aptikti ir jų greičiui nustatyti, automobiliams klasifikuoti, reikia atlikti išsamius tyrimus naudojant šiuos magnetorezistyvinius jutiklius. Svarbu iširti ir įvertinti skirtingų automobilių konstrukcijų poveikio lokaliajam Žemės magnetiniam laukui įtaką ir dydį.

2. MAGNETOREZISTYVINIŲ JUTIKLIŲ TYRIMŲ METODIKOS SUDARYMAS

Magnetinio lauko metodo tinkamumą automobiliams aptikti galima įvertinti ištyrus automobilio įtaką lokaliems Žemės magnetinio lauko iškreipymams. Šiam uždaviniui išspręsti reikia sukurti specializuotą magnetinio lauko matavimo sistemą ir algoritmus, kurie leistų įvertinti magnetinio lauko parametrus automobilių stovėjimo vietose. Automobilių aptikimas turi būti stabilus plačiame temperatūros diapazone (nuo -30 iki 70 °C) ir visu eksploatacijos metu – 5–10 metų.

2.1. Magnetinio lauko matavimo sistema

Automobiliams aptikti taikant lokalių Žemės magnetinio lauko iškreipimų fiksavimo metodą buvo sukurta matavimo sistema (2.1 pav.), leidžianti atlikti Žemės magnetinio lauko ir automobilių metalinių dalių sąveikos tyrimus.

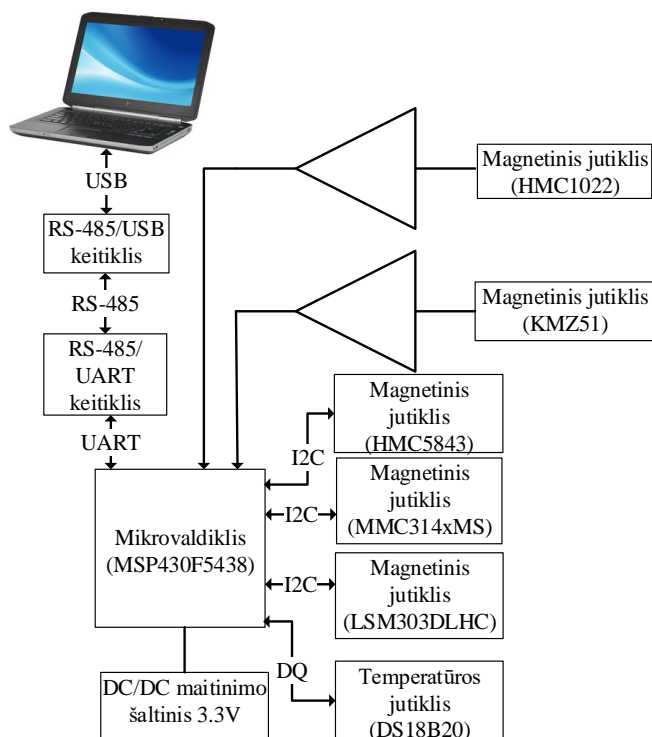
Siekiant atrinkti šiam tikslui tinkamiausius magnetorezistyvinius magnetinio lauko jutiklius, sistemoje buvo panaudoti ir ištirti vienos, dviejų ir trijų jautrumo ašių skirtingų gamintojų jutikliai. Pagrindiniai tirtų jutiklių parametrai pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Magnetorezistyvinių jutiklių charakteristikos

Jutiklio pavadinimas	Gamintojas	Ašių sk.	Sąsajos tipas	Matavimo ribos, μT	Skiriamoji geba, μT
LSM303DLH	„ST Microelectronics“	3	I ² C	Nuo ± 130 iki ± 810	0,8
HMC5843	„Honeywell“	3	I ² C	± 600	0,7
MMC314xMS	„MEMSIC“	3	I ² C	± 800	0,6
HMC1022	„Honeywell“	2	Analoginis išėjimas	± 200	0,0027
KMZ51	„NXP Semiconductors“	1	Analoginis išėjimas	± 250	0,5

Visi trijų ašių jutikliai turi signalų apdorojimo modulį su operaciniais stiprintuvais, pradinio lygio poslinkio ir įsimagnetinimo kompensavimo grandines [30, 31].

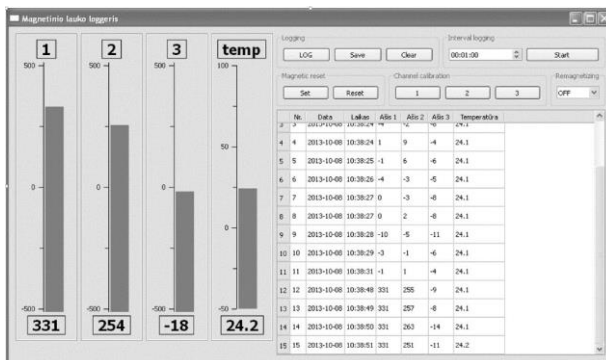
Naudojant matavimo sistemas buvo tiriamas magnetinio lauko jutiklių jautris, stabilumas, temperatūrinės priklausomybės ir kiti parametrai.



2.1 pav. Magnetinio lauko matavimo sistemos struktūra

Tolesniam apdorojimui ir atvaizdavimui sukaupti duomenys saugomi tekstinėje byloje.

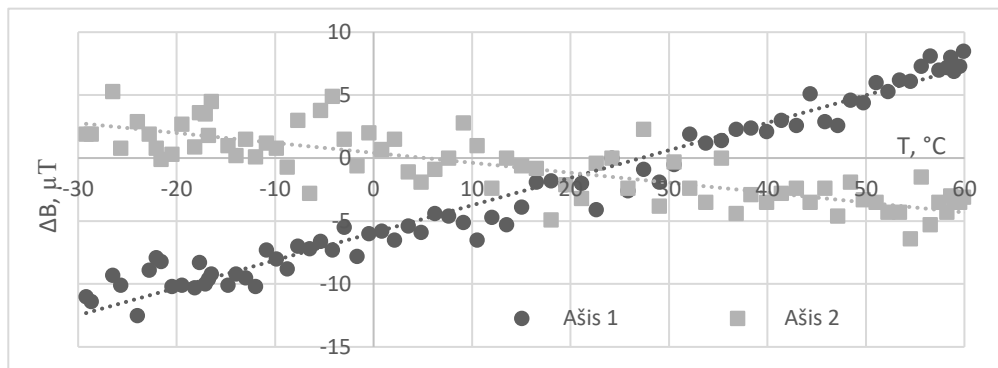
Stovėjimo aikštelės jutiklių prototipe su magnetorezistyviniais jutikliais papildomai buvo įmontuotas skaitmeninis temperatūros jutiklis DS18B20. Prototipas su temperatūros jutikliu buvo prijungtas prie duomenų registravimo įrenginio, kuris USB kabeliu sujungtas su nešiojamuoju kompiuteriu. Naudojant specialiai tam sukurtą programą magnetinio jutiklio duomenys ir aplinkos temperatūra buvo registruojami duomenų byloje. Programa leido fiksuoti jutiklių duomenis laisvai nustatomu tempu nuo vieno karto per sekundę iki vieno karto per parą. Buvo atlikti jutiklio jautrio statant įvairių markių automobilius ir atsparumo temperatūros poveikiui tyrimai. Bendras duomenų registravimo programos kompiuterio ekrane vaizdas pateiktas 2.2 pav.



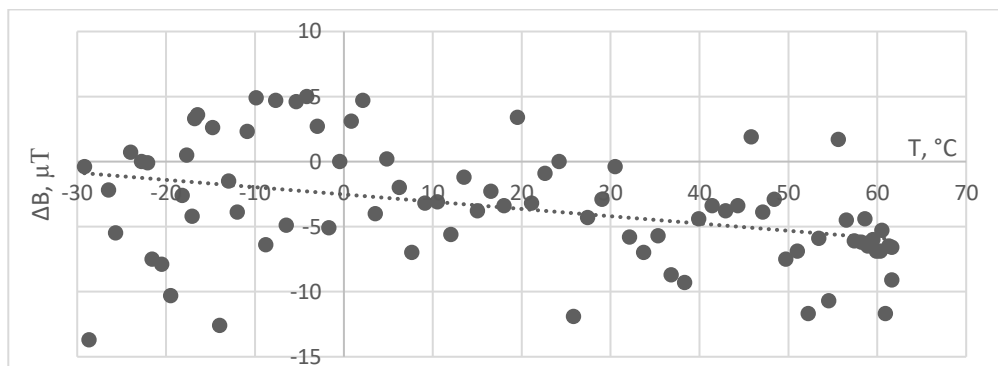
2.2 pav. Duomenų registravimo programos vaizdas

2.1.1. Temperatūrinio stabilumo tyrimai

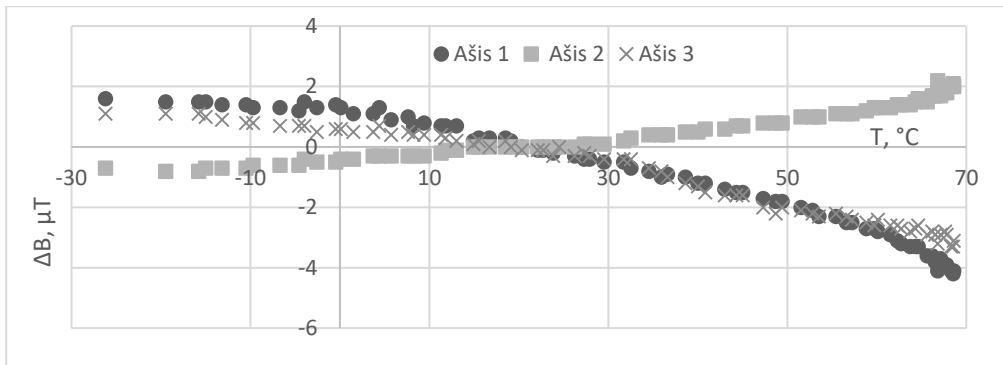
Jutiklių temperatūrinio stabilumo tyrimas buvo atliekamas (2.1 lentelė) temperatūros kameroje, keičiant temperatūrą nuo -30 iki 60 °C. Toliau pateikti šio tyrimo rezultatai, duomenys grafikuose normuoti esant 25 °C temperatūrai.



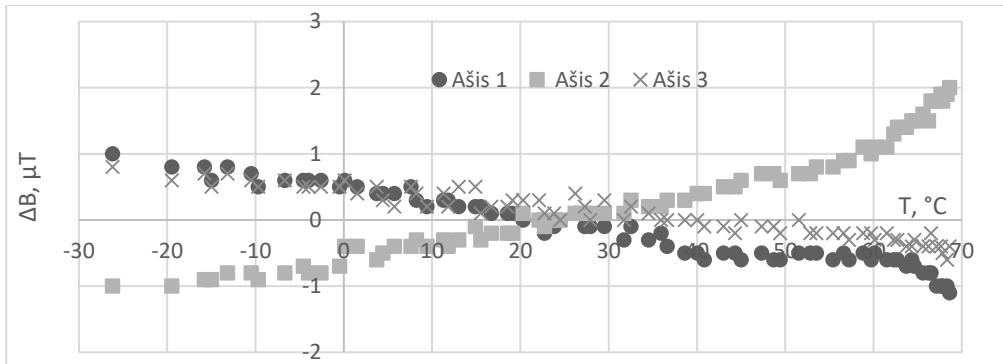
2.3 pav. Jutiklio HMC1022 temperatūros įtakos tyrimo rezultatai



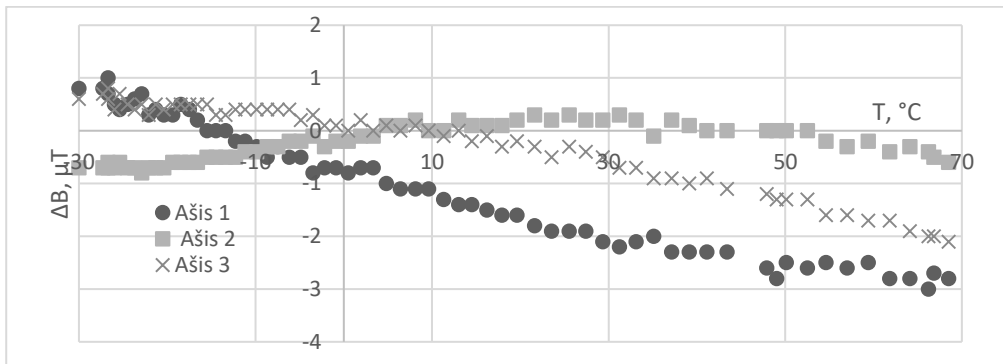
2.4 pav. Jutiklio KMZ51 temperatūros įtakos tyrimo rezultatai



2.5 pav. Jutiklio MMC314xMS temperatūros įtakos tyrimo rezultatai



2.6 pav. Jutiklio HMC5843 temperatūros įtakos tyrimo rezultatai



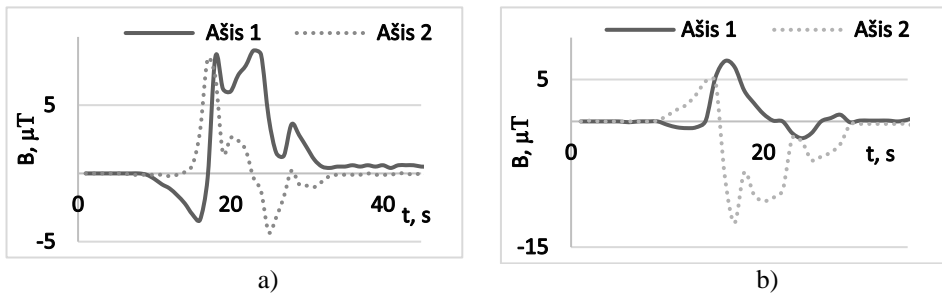
2.7 pav. Jutiklio LSM303DLHC temperatūros įtakos tyrimo rezultatai

Gauti rezultatai rodo didelę jutiklio HMC1022 išėjimo reikšmių priklausomybę nuo temperatūros. Akivaizdu, kad jutiklio KMZ51 priklausomybė nuo temperatūros išlieka panaši į firmos „Honeywell“ jutikliams būdingą išėjimo signalo kitimą [18].

2.1.2. Jutiklių jautrio tyrimas

Naudojant sukurta matavimo sistemą buvo atlikti eksperimentai tiriant jutiklio tinkamumą automobiliams stovėjimo vietoje aptikti. Gautos magnetinės indukcijos

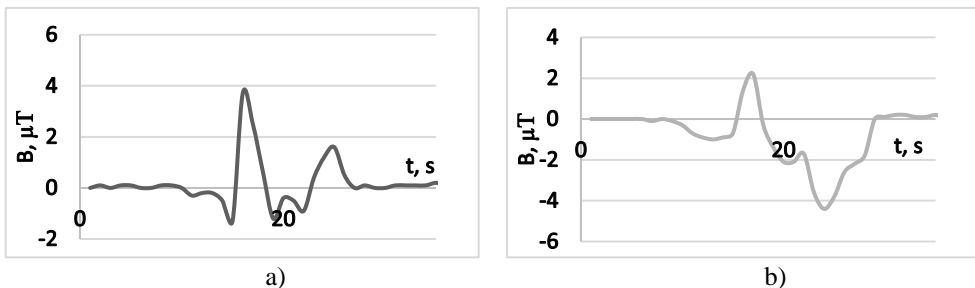
kitimo priklausomybės automobiliui pravažiuojant virš jutklio HMC1022, kai šis buvo padėtas maždaug 20 cm atstumu nuo automobilio (2.8 pav., *a*) ir pravažiuota pro jį (2.8 pav., *b*).



2.8 pav. Jutklio HMC1022 indukcijos pokyčio dedamosios (esant skirtingų konstrukcijų automobiliams): *a* – 20 cm atstumu nuo automobilio; *b* – automobiliui pravažiuojant virš jutklio (*Ašis 1* – jutklio *X* ašies duomenys; *Ašis 2* – jutklio *Y* ašies duomenys)

Iš pateiktų paveikslų matyti, kad jutklių HMC1022 išėjimo signalo pokytis automobiliui užvažiuojant ar nuvažiuojant yra labai aiškus, o automobiliui pravažiuojant šalia jutklio išėjimo signalas primena triukšmą.

Tyrimo, kurio metu automobilis pravažiuoja virš jutklio (KMZ51), rezultatai pateikti 2.9 pav.



2.9 pav. Jutklio KMZ51 indukcijos pokyčio dedamosios (esant skirtingų konstrukcijų automobiliams): *a* – pravažiuojant pirmosios konstrukcijos automobiliui, *b* – pravažiuojant antrosios konstrukcijos automobiliui

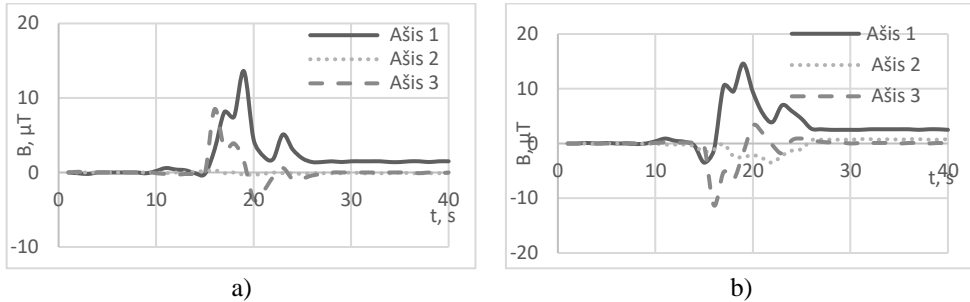
Akivaizdu, kad jutklis KMZ51 turi mažesnę jautrį, rezultatai pasižymi didesne sklaida. Remiantis pateiktais duomenimis, galima daryti išvadą, kad naudojant jutklius HMC1022 įmanoma užtikrintai aptikti automobilį jam užvažiuojant ar nuvažiuojant, o jutkliai KMZ51 šiam tikslui netinka.

Buvo atlikti keli eksperimentai naudojant jutklį MEMSIC MMC314xMS, siekiant nustatyti, kiek automobilis iškraipo magnetinį lauką.

MEMSIC MMC314xMS yra trijų koordinačių magnetinis jutklis, turintis integruotą signalų apdorojimo modulį ir I2C sąsają. Šį jutklį galima tiesiogiai jungti prie mikrovaldiklio. Matavimo diapazonas ± 4 gausai, jautris 512 atskaitų gausui.

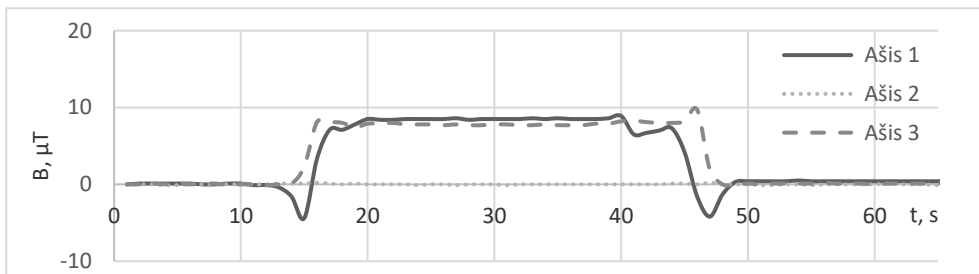
Buvo pagaminti trys automobilio aptikimo jutklio prototipai. Jie prijungti prie duomenų registravimo įrenginio.

1 bandymas. Buvo stebima, kaip jutikliai reaguoja į virš jų lėtai pravažiuojantį automobilį. Jutikliai buvo padėti viduryje po automobiliu, važiuota į priekį. Duomenys nuskaityti automatinio būdu kas sekundę. Rezultatai pateikti 2.10 pav.



2.10 pav. Skirtingų MMC314xMS jutiklių rezultatai, kai automobilis pravažiuo virš jų: *a* – pirmojo jutiklio duomenys; *b* – antrojo jutiklio duomenys

2 bandymas. Automobilis užvažiuo virš jutiklio. Jutiklis buvo 100 cm atstumu nuo automobilio priekinio buferio (taukšo), duomenys buvo nuskaitomi kas sekundę. Tada buvo užgesintas variklis, po to vėl paleistas ir nuvažiuota. Iš gautų rezultatų, pateiktų 2.11 pav., matyti, kad virš jutiklių stovintis automobilis gali būti aptinkamas. Nuo 18 iki 37 sekundės automobilis stovėjo užgesintu varikliu.



2.11 pav. Pirmojo jutiklio rezultatai, kai automobilis stovėjo virš jo

Automobiliui stovint užgesintu varikliu, jutiklių rodmenys yra stabilūs. Kai variklis paleistas, pastebimi pašaliniai magnetiniai laukai, atsirandantys dėl elektros generatoriaus ir kitų elektros prietaisų darbo. Paveiksluose galima pastebėti dėl to atsirandančius triukšmus.

Iš pateiktų duomenų matyti, kad naudojant jutiklius MMC314xMS galima užtikrintai aptikti jutiklio išėjimo signalo pokytį automobiliui užvažiuojant ar nuvažiuojant, tačiau yra išnaudojamas tik labai mažas jutiklio matavimo diapazonas, todėl šiam uždaviniui spręsti geriau pasirinkti jautresnius jutiklius.

Jutiklio padėtis taip pat turi įtakos aptinkant automobilį. Paleidžiamo variklio sukeliama pokyčiai juntami, ir šis faktas gali būti panaudotas kaip pagalbini informacija automobilio aptikimo patikimumui padidinti.

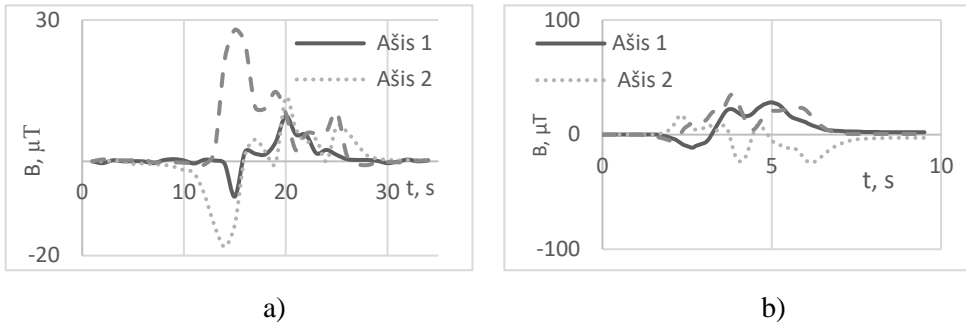
Atlikti eksperimentai naudojant „Honeywell“ jutiklį HMC5843, siekiant nustatyti automobilio sukeltą magnetinio lauko iškraipymą.

HMC5843 yra trijų koordinačių magnetinio lauko jutiklis, turintis integruotą signalų apdorojimo modulį ir I2C sąsają. Šį jutiklį galima tiesiogiai jungti prie mikrovaldiklio. Matavimo diapazonas $\pm 400 \mu\text{T}$; galima keisti jautrį.

Siekiant iširti šio jutiklio tinkamumą automobiliams aptikti, buvo sukonstruotas jutiklio prototipas. Jis per I2C magistralę buvo prijungtas prie duomenų registravimo įrenginio, sukurto naudojant mikrovaldiklį MSP430F5438.

Atlikti keli eksperimentai siekiant nustatyti automobilio sukeliamą magnetinio lauko iškraipymą.

Automobilis užvažiuodavo virš jutiklio, padėto ant žemės paviršiaus, ir po tam tikro laiko nuvažiuodavo. Tyrimų rezultatai pateikti 2.12 pav.



2.12 pav. Automobilis užvažiuoja galu, jutiklis padėtas horizontaliai: *a* – pirmosios konstrukcijos automobiliui užvažiavus virš jutiklio ; *b* – antrosios konstrukcijos automobiliui užvažiavus virš jutiklio (*Ašis 1* – jutiklio *X* ašies duomenys; *Ašis 2* – jutiklio *Y* ašies duomenys)

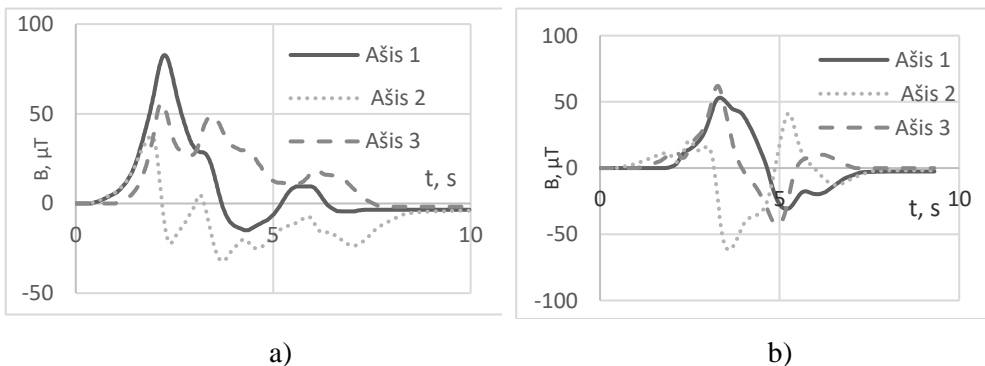
Iš tyrimo rezultatų matyti, kad šio tipo jutiklis gali būti naudojamas aptinkant virš jo esantį automobilį.

Atlikti eksperimentai naudojant jutiklį LSM303DLHC, siekiant nustatyti automobilio sukeliamą magnetinio lauko iškraipymą.

LSM303DLHC yra trijų koordinacių magnetinio lauko jutiklis, turintis integruotą signalų apdorojimo modulį ir I2C sąsają. Šį jutiklį galima tiesiogiai jungti prie mikrovaldiklio. Matavimo diapazonas nuo ± 130 iki $\pm 810 \mu\text{T}$; galima keisti jautrį.

Siekiant iširti šio jutiklio tinkamumą automobiliams aptikti, buvo sukonstruotas jutiklio prototipas. Jis per I2C magistralę buvo prijungtas prie duomenų registravimo įrenginio, sukurto naudojant mikrovaldiklį MSP430F5438.

Atlikti keli eksperimentai, siekiant nustatyti automobilio sukeliamą magnetinio lauko iškraipymą. Automobiliui pravažiavus virš jutiklio, padėto ant žemės paviršiaus, gauti tyrimų rezultatai pateikti 2.13 pav.



2.13 pav. Automobilis užvažiuoja galu, jutiklis padėtas horizontaliai: *a* – pirmosios konstrukcijos automobiliui užvažiuavus virš jutiklio; *b* – antrosios konstrukcijos automobiliui užvažiuavus virš jutiklio (*Ašis 1* – jutiklio *X* ašies duomenys; *Ašis 2* – jutiklio *Y* ašies duomenys; *Ašis 3* – jutiklio *Z* ašies duomenys)

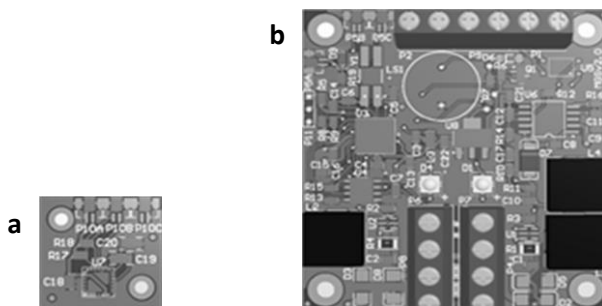
Iš tyrimo rezultatų matyti, kad šio tipo jutiklis gali būti naudojamas virš jo esančiam automobiliui aptikti.

2.2. Magnetinio lauko matavimo sistemos sukūrimas ir magnetinio lauko fliktuacijos stovėjimo vietoje tyrimai

Atlikus įvairių jutiklių tyrimus buvo pasirinktas jutiklis LSM303DLHC. Automobilių aptikimo tyrimams atlikti buvo suprojektuotas ir pagamintas automobilio aptikimo sistemos prototipas. Jame panaudotas tik jutiklis LSM303DLHC, per I²C sąsają sujungtas su mikrovaldikliu MSP430F5438A. Iš mikrovaldiklio duomenys RS485 ryšiu buvo perduodami į kompiuterį.

Pagrindiniai magnetinio jutiklio matavimo sistemos parametrai:

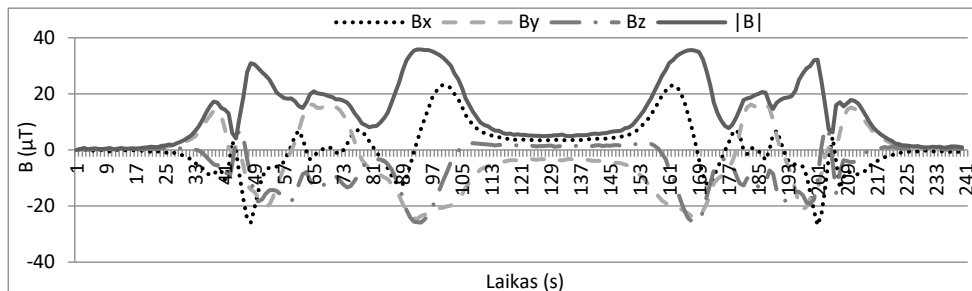
- magnetinio lauko matavimas atliekamas trimis kryptimis, fiksuojant *X*, *Y*, *Z* magnetinio lauko komponentes;
- mažas jutiklio energijos suvartojimas: 360 μ A normaliu režimu ir 2 μ A energijos taupymo režimu, esant 3,3 V maitinimo įtampai;
- magnetinio lauko matavimo diapazonas – nuo ± 130 iki ± 810 μ T;
- magnetinio jutiklio skiriamoji geba – 0,5 μ T;
- duomenų perdavimo sąsaja su kompiuteriu – RS-485;
- maži jutiklio matmenys – $5 \times 5 \times 1$ mm (LGA-28 mikroschemos korpusas);
- darbo temperatūros diapazonas – nuo -40 iki 85 $^{\circ}$ C.



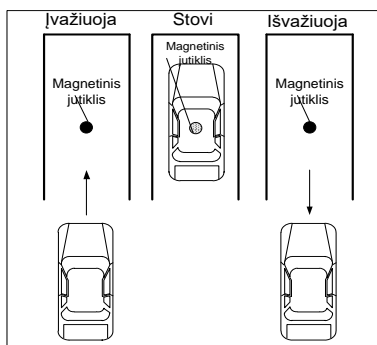
2.14 pav. Suprojektuotos jutiklio plokštės 3D vaizdas: *a* – magnetinio jutiklio, *b* – mikrovaldiklio

Magnetinio lauko tyrimai buvo atliekami stovėjimo aikštelėje. Automobiliui įvažiuojant į stovėjimo vietą buvo fiksuojamos visos trys magnetinio lauko komponentės. Tipinė magnetinio signalo laikinė priklausomybė pateikta 2.15 pav. Automobilio įvažiavimo ir jutiklio pozicija pateikta 2.16 pav. schemoje. Galima išskirti tris pagrindinius automobilio statymo etapus: pirmas – automobilis įvažiuoja į stovėjimo vietą, antras – automobilis stovi stovėjimo vietoje, trečias – automobilis išvažiuoja iš stovėjimo vietos. Magnetinio lauko priklausomybėje šiuos tris etapus irgi galima pastebėti: automobiliui įvažiuojant į stovėjimo vietą magnetinis laukas stipriai

fliktuoja; automobiliui stovint vietoje laukas būna pakitęs ir toliau nefliktuoja; automobiliui paliekant stovėjimo vietą laukas vėl stipriai fliktuoja. Šios fliktuacijos dažniausiai yra simetriškos įvažiavimo fliktuacijoms, nors stovėjimo metu pakitęs keleivių skaičius arba krovinio masė šią simetriją gali panaikinti.



2.15 pav. Magnetinio lauko X, Y, Z komponentių ir modulio $|B|$ pokytis automobiliui įvažiuojant į stovėjimo vietą ir išvažiuojant iš jos



2.16 pav. Automobilio pozicija jutiklio atžvilgiu ir stovėjimo vietos parkavimosi metu

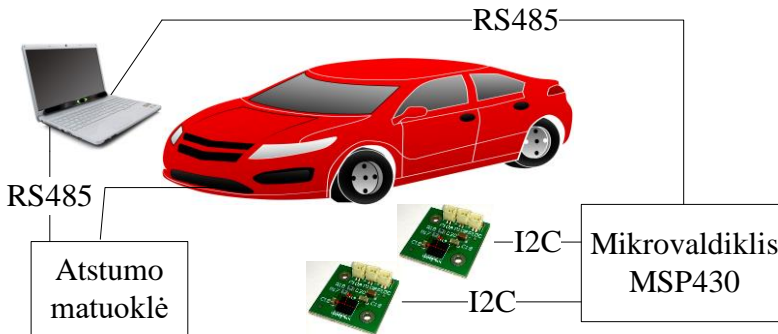
Magnetinio lauko jutiklio signalo charakteristika yra laikinė, tačiau neįmanoma numatyti ir tiksliai apibrėžti, kokia bus signalo trukmė, nes tai priklauso nuo automobilio tipo ir vairuotojo patirties bei temperamento. Automobiliui įvažiuojant ir išvažiuojant signalai bus apytiksliai vienodos trukmės arba bent labai panašūs, o jam stovint signalo trukmė priklausys nuo stovėjimo laiko parkavimo vietoje. Ji gali būti labai ilga – iki 24 val. ar daugiau – arba kelių sekundžių. Dėl to išmatuoti ir įrašyti visą parkavimosi proceso signalą sudėtinga, nes signalą apdoroja ir stovėjimo vietą nustato mažos galios mikrovaldikliai, kurių atmintis ir energija yra ribota. Todėl net ir tyrimo stadijoje tenka naudoti aptikimo algoritmus, reikalaujančius kuo mažiau išteklių.

2.3. Automobilio konstrukcijos poveikio lokaliajam Žemės magnetiniam laukui duomenų registravimo sistemos sudarymas

Siekiant įvertinti jutiklio LSM303DLHC AMR panaudojimo transporto srautu valdymo srityje galimybes, buvo sukurta duomenų registravimo sistema (2.17 pav.), leidžianti ištirti, kaip Žemės magnetinis laukas kinta po automobiliais, stovinčiais stovėjimo aikštelėje. Buvo matuojama dviem AMR jutikliais, esančiais vienas nuo kito 30 cm atstumu X kryptimi. Skenavimo metu automobilio padėtis buvo fiksuojama

kas 1 cm, matuojant magnetinio lauko parametrus. Skenavimas Y kryptimi buvo atliekamas ašies Y kryptimi perstumiant abu AMR jutiklius.

Duomenims surinkti buvo naudojama skaitmeninė atstumo matuoklė, matavimo duomenis siunčianti į kompiuterį per RS485 magistralę. Duomenys apdoroti kompiuteryje specialiai tam sukurta programine įranga. Jie iš jutiklių per RS485 magistralę buvo nuskaitomi kas 1 cm. Duomenims perduoti ir AMR jutiklių duomenims per I2C sąsają nuskaityti buvo naudojamas mažos galios mikrovaldiklis MSP430.



2.17 pav. Automatinė automobilių skenavimo sistema

Žemės magnetinio lauko iškraipymų skenavimas buvo atliekamas siekiant išsiaiškinti tinkamiausią jutiklio montavimo vietą stovėjimo aikštelėje ar kelyje, nustatyti, kokius lauko iškraipymus sukuria skirtingose vietose esantys skirtingi automobiliai. Buvo nustatyta, kad magnetinio lauko iškraipymų pobūdis priklauso nuo automobilio markės, jutiklių padėties automobilio atžvilgiu ir automobilio judėjimo krypties. Dėl šios priežasties, transporto priemonei užvažiuavus virš jutiklio skirtingoje vietoje (Y ašies atžvilgiu), nuskaitomi labai skirtingi magnetinio lauko dedamųjų profiliai. Todėl transporto priemonėms aptikti ir jų greičiui nustatyti netinka metodai, kurie pagrįsti absoliučiuųjų reikšmių matavimu ir sulyginimu.

Automobiliui užvažiuavus virš jutiklio, reikia išmatuoti visas tris magnetinio lauko dedamąsias. Tik ši informacija gali būti panaudota būsenai nustatyti ir aptikimo kriterijui formuluoti.

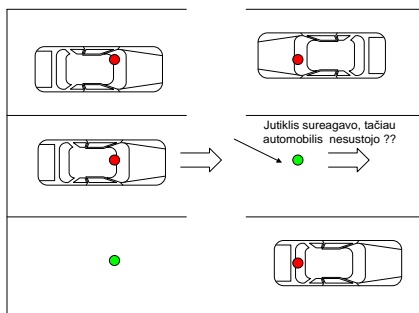
2.4. Automobilio pastatymo pozicijos tyrimo metodika

Prieš atliekant tolesnę analizę būtina išnagrinėti visus galimus scenarijus, nuo kurių priklausys aptikimo sistemos veikimas. Priklausomai nuo to, kaip automobiliai statomi ir kokios jų pozicijos jutiklių atžvilgiu, gali būti fiksuojamas skirtingas magnetinio lauko pokytis.

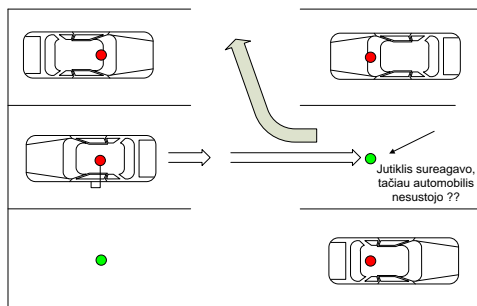
Anizotropiniai magnetorezistyvieniai jutikliai reaguoja į lokalųjį Žemės ir automobilių magnetinį lauką, o magnetinio lauko pokyčiai leidžia aptikti stovėjimo vietoje esančius automobiliai. Formuluojant aptikimo kriterijų priimamos šios prielaidos:

- Jutiklius galima orientuoti pagal kompasą.
- Stovėjimo aikštelėje automobiliai gali būti statomi bet kuria kryptimi.

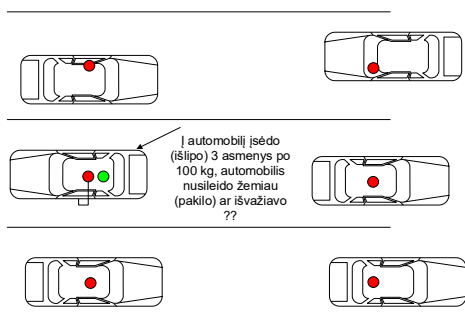
- Automobilio pastatymo (išvažiavimo iš stovėjimo vietos) laikas labai skirtingas (nuo 2 iki 100 ir daugiau sekundžių).
- Magnetinio lauko kitimas automobiliui judant virš jutiklio beveik neprognozuojamas.
- Automobiliai, esantys gretimose stovėjimo vietose, daro poveikį konkrečios stovėjimo vietos magnetiniam laukui.
- Magnetinio lauko pokytis pastačius automobilį gali būti labai mažas ir nenuspėjamo ženklo.
- Magnetorezistyvieniai magnetinio lauko jutikliai turi didelį parametru išsibarstymą: jautris – apie 50 %, pradinis poslinkis (angl. *offset*) – iki 20 %, temperatūrinis jautrio koeficientas – nuo $-5 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ iki $2 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ [61].
- Automobilis gali sustoti bet kurioje pozicijoje stovėjimo vietoje.
- Magnetinio lauko kitimas prieš sustojant automobiliui neturi įtakos lauko komponentų dydžiui sustojus transporto priemonei. Keletas dviprasmiškų situacijų, kuriose neįmanomas „dinaminis“ automobilių aptikimas, pavaizduotos 2.18–2.20 pav. Automobiliumi pravažiuojant virš jutiklio arba apsisukant jutiklio reakcija nė kiek nesiskiria nuo reakcijos sustojimo metu. Dviprasmiškos situacijos susidaro pakraunant ar iškraunant prekes, įsėdant ar išlipant keleiviams. Nors tuo metu automobilis stovi stovėjimo vietoje, tačiau jutiklio reakcija gali būti panaši į reakciją automobiliui judant.



2.18 pav. Automobilio pravažiuojimas virš jutiklio



2.19 pav. Automobilio apsisukimas virš jutiklio



2.20 pav. Pasikeitę automobilio keleivių skaičius, automobilis stovi virš jutiklio

Būtina ieškoti optimalaus jutiklio suveikimo slenkščio. Slenkstis turi būti pakankamai mažas, kad būtų galima aptikti nedidelius arba nedaug feromagnetinių medžiagų turinčius automobilius, kurie labai nežymiai iškraipo lokalųjį Žemės magnetinį lauką. Kita vertus, slenkstis turi būti pakankamai aukštas, kad dėl atsiktinių triukšmų nebūtų gautas klaidingas rezultatas.

2.5. Skyriaus apibendrinimas

1. Skaliariniai magnetometrai netinkami transporto priemonių aptikimo sistemose, nes matuoja tik suminį magnetinio lauko dydį. Suminis dydis priklauso nuo transporto priemonės konstrukcijos, todėl gali pasitaikyti situacijų, kai suminis laukas gali nepakisti. O vektoriniai magnetinio lauko jutikliai gali tiksliai išmatuoti kiekvienos lauko dedamosios pokytį ir patikimai aptikti transporto priemones.

2. Tiriant magnetorezistyvinius jutiklius išaiškėjo jų trūkumai – parametru priklausomybė nuo temperatūros, liekamasis įmagnetėjimas ir jutiklių parametru išsibarstymas.

3. Naudojant magnetorezistyvinius magnetinio lauko jutiklius suprojektuotas ir pagamintas automobilio aptikimo sistemos prototipas. Sukurta matavimo sistema, kurią pasitelkus galima atlikti trumpalaikius ir ilgalaikius lokalojo Žemės magnetinio lauko tyrimus.

3. STABILUMO TYRIMAS

Magnetinio lauko pokyčiai fiksuojami ne vien dėl automobilio įtakos – aplinkos objektai, įvairūs procesai, vykstantys artimoje aplinkoje, daro didelę įtaką magnetinių jutiklių parametrų. Veiksnių, kurie daro įtaką jutiklių rodmenų tikslumui, yra daug, todėl tampa sunku automobilio sukeltus magnetinio lauko iškreipimus (naudingas signalas) atskirti nuo aplinkos veiksnių sukeltų magnetinio lauko iškreipimų (triukšmo signalas).

Svarbu nustatyti trukdančiųjų veiksnių prigimtį. Galimi šie trukdžių šaltiniai:

- 1) galimas magnetinio lauko netolygumas dėl geografinės padėties. Todėl būtina ištirti magnetinio lauko tolygumą visoje automobilių stovėjimo aikštelėje;
- 2) kitų metalinių objektų, esančių šalia aptinkamo objekto, įtaka;
- 3) elektromagnetinių trikdžių įtaka;
- 4) automobiliai yra nevienodi, skiriasi juose panaudotų metalinių detalių kiekis, jų išdėstymas, o tai irgi daro įtaką;
- 5) magnetinio jutiklio savaiminio įmagnetėjimo įtaka;
- 6) aplinkos temperatūros įtaka jutiklių rodmenims. Lėtas ir greitas temperatūros pokytis;
- 7) geomagnetinių audrų poveikis.

Tolesnis uždavinys – ištirti minėtus galimus trukdžius, nustatyti jų įtaką automobilio aptikimo tikslumui taikant magnetinį aptikimo metodą.

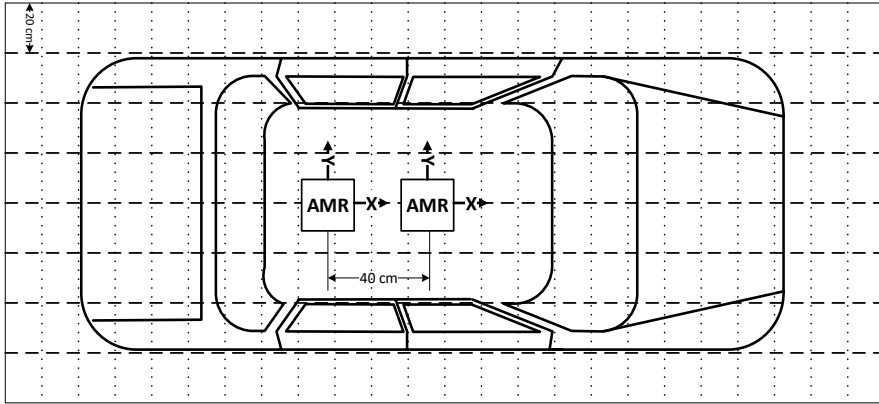
3.1. Magnetinio lauko tolygumo tyrimas

Automobilio konstrukcinis modelis tik panašus į anksčiau aprašytą uždara stačiakampio gretasienio modelį. Automobilio apačia po variklio dažnai būna magnetiškai atvira, tarp variklio skyriaus ir salono yra metalinė-magnetinė pertvara, panaši pertvara yra ir tarp salono ir bagažo skyriaus. Šios pertvaros sukelia daug keblumų, nes, priklausomai nuo jų atstumo iki magnetinio jutiklio, jos gali veikti kaip šone stovintis arba kaip viršuje esantis automobilis, t. y. suminis magnetinis laukas ir atskiros jo dedamosios, netoli magnetinio jutiklio esant pertvarai, gali sustiprėti arba susilpnėti. Todėl po automobiliu Žemės magnetinio lauko indukcijos dedamoji B_z ne visada sustiprėja. Tai labai komplikuoja aikštelės būsenos nustatymą.

Siekiant įvertinti AMR jutiklių panaudojimo transporto srautų valdymo srityje galimybes, jų privalumus ir trūkumus, atliktas Žemės magnetinio lauko stiprio kitimo automobilių stovėjimo aikštelėje tyrimas. Eksperimentas atliktas su skirtingų gamintojų ir modelių automobiliais. Tyrimams panaudota ankstesniame skyriuje aprašyta automatinė automobilių skenavimo sistema (2.17 pav.), kuri leidžia išmatuoti automobilio sukurtus Žemės magnetinio lauko iškreipimus. Automobilių skenavimas atliktas naudojant du jutiklius. Tarp jutiklių parinktas 30 cm atstumas. Matavimai buvo atliekami kas 1 cm, X kryptimi fiksuojant automobilio padėtį ir magnetinio lauko parametrus. Skenavimas X kryptimi buvo kartojamas kas 40 cm, Y kryptimi perstumiant abu AMR jutiklius (3.1 pav.).

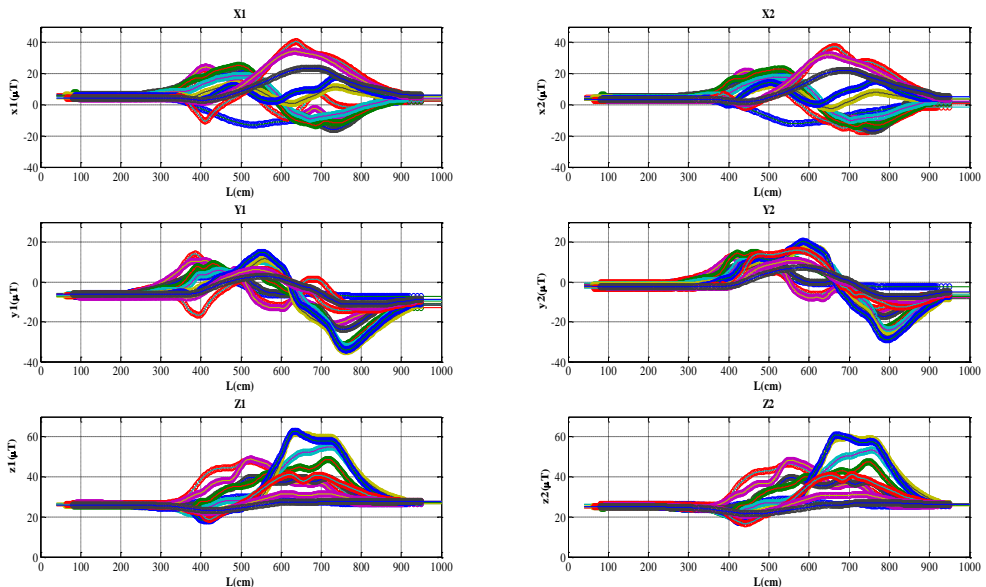
Duomenys surinkti skaitmenine atstumo matuokle. Ji matavimo duomenis per RS485 magistralę siuntė į kompiuterį. Šie buvo apdorojami kompiuteryje specialiai

tam sukurta programine įranga. Duomenys iš jutiklių per RS485 magistralę buvo nuskaityti kas 1 cm. Duomenims perduoti ir AMR jutiklių duomenims nuskaityti per I2C sąsają panaudotas mažos galios mikrovaldiklis MSP430.



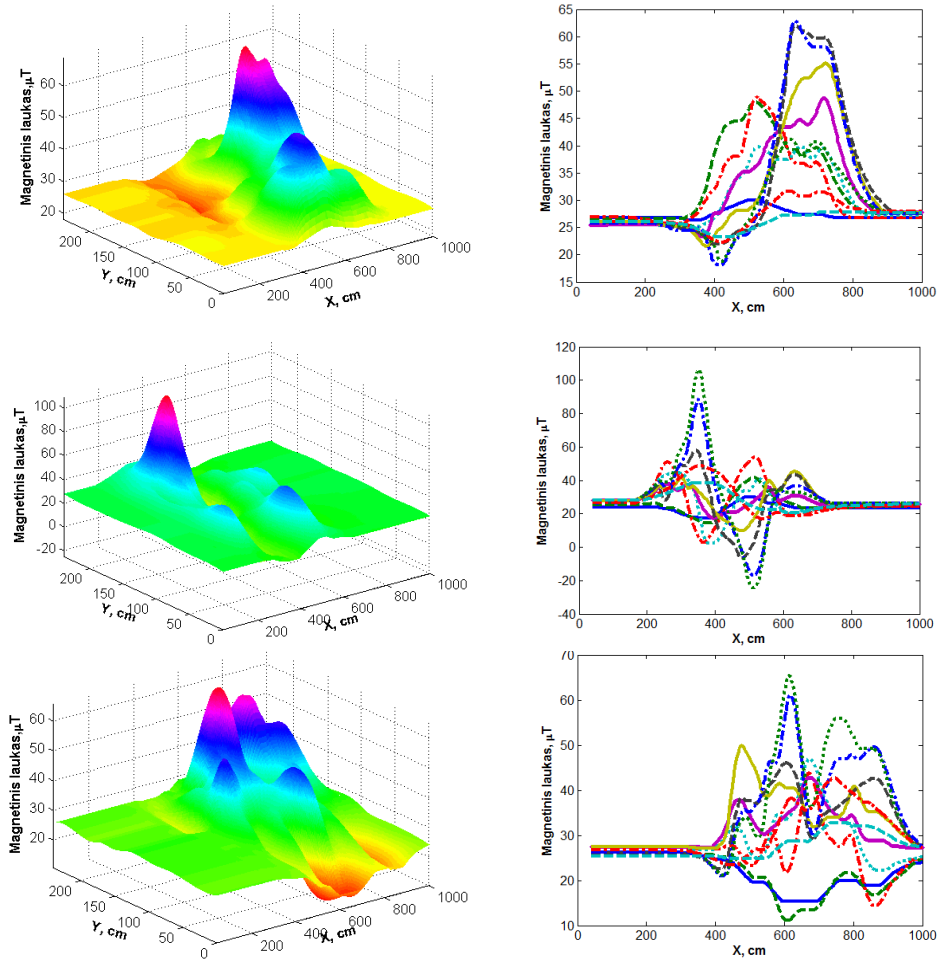
3.1 pav. Magnetinio lauko matavimo stovėjimo aikštelėje schema

Žemės magnetinio lauko iškraipymų skenavimas atliktas esant skirtingiems automobiliams. Keleto iš jų sukuriamų magnetinio lauko iškraipymų duomenys pateikti 3.2 pav. Iš jų matyti, kad ML modulio ir atskirų dedamųjų pokytis, automobiliui užvažiuojant virš AMR jutiklio, kinta skirtingai ir priklauso nuo automobilio konstrukcijos ir jutiklių padėties automobilio atžvilgiu. Dėl šios priežasties, transporto priemonėi užvažiavus virš jutiklio skirtingomis vietomis (Y ašies atžvilgiu), gaunami labai skirtingi magnetinio lauko dedamųjų profiliai. Todėl transporto priemonėms aptikti netinka metodai, kurie pagrįsti absoliučiuųjų reikšmių matavimu ir sulyginimu.



3.2 pav. Skirtingų jutiklių Žemės magnetinio lauko pasiskirstymas skirtingose ašyse

Atlikus gautų duomenų interpoliaciją buvo gautas visas automobilio iškraipomo magnetinio lauko vaizdas (3.3 pav.). Iš pateiktų duomenų galima pastebėti, kad po automobiliu yra tokių zonų, kuriose magnetinis laukas nėra iškraipomas (tarsi nebūtų automobilio). Tokios situacijos yra kritinės naudojant AMR jutiklius statiniam automobilio buvimo fakto nustatymui.



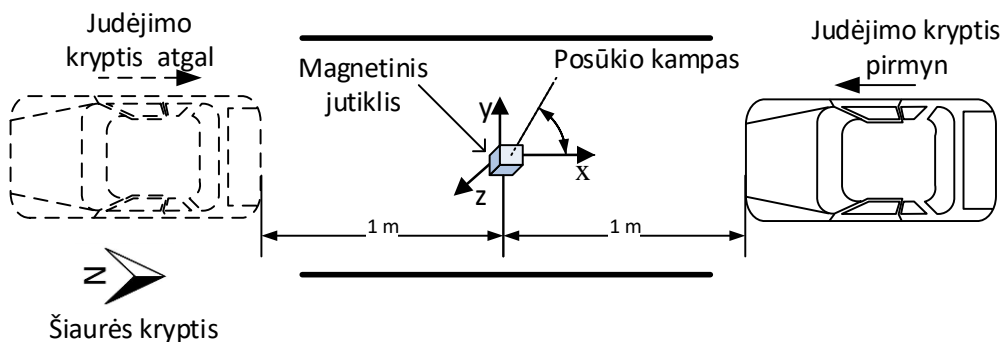
3.3 pav. Skirtingų automobilių sukurto Žemės magnetinio lauko iškraipymo pasiskirstymas

Atliekant magnetinio lauko tyrimus konkrečioje stovėjimo vietoje, stovėjimo aikštelėje pasirinkta stovėjimo vieta be magnetinių anomalijų ir arti esančių metalinių objektų. Šio tyrimo rezultatai rodo, kad laisvoje stovėjimo vietoje Žemės magnetinio lauko anomalijų nėra, o esant automobiliui didžiausi lauko iškreipimai pastebėti ties priekine bei galine automobilio ašimi. Taip yra todėl, kad šiose automobilio vietose yra daugiausia feromagnetinių dalių. Priekyje yra variklis, variklio skyriaus pertvara, kapotas, pavarų dėžė bei priekinė ratų ašis. Ties automobilio galine dalimi magnetinis laukas iškraipomas labiau nei ties viduriu dėl galinės ratų ašies ir bagažinės skyriaus

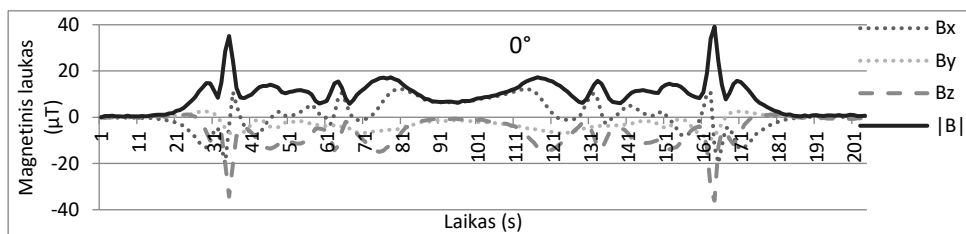
pertvaros. Žemės magnetinį lauką iškreipia ne vien automobiliai, bet ir šalia esantys masyvūs metaliniai objektai [54]. Aptikimo tikslumas būtų didesnis, jei magnetinio lauko neiškraipytų nepageidaujami objektai, tačiau tai padaryti kartais gali būti sunku arba visai neįmanoma. Dėl šios priežasties automobilius aptikti naudojant Žemės magnetinį lauką yra sudėtingiau nei naudojant indukcinės kelio kilpas. Pasirinkus taikyti magnetinio lauko metodą, šiuos pašalinius veiksnius būtina pašalinti.

3.2. Automobilių konstrukcijos poveikio Žemės magnetiniam laukui tyrimas

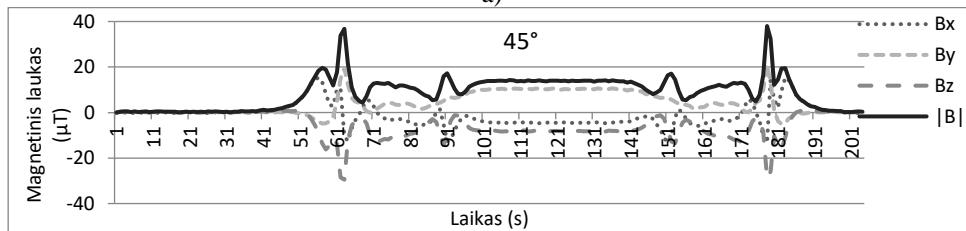
Atlikti Žemės magnetinio lauko matavimai su skirtingų konstrukcijų lengvaisiais automobiliais, esant keturioms magnetinio jutiklio padėties šiaurės krypties atžvilgiu: 0° , 45° , 90° ir 135° , sukant nuo šiaurės į rytus (3.4 pav.). Automobiliai buvo stumiami virš magnetinio jutiklio išjungtais varikliais pirmyn ir atgal, kol magnetinis jutiklis „išlįsdavo“ iš automobilio priekio ar galo apie 1 metrą. Grafikuose horizontalioje ašyje atidėtas santykinis laikas, vertikaliajoje – magnetinio lauko indukcijos pokyčio (užstumiant automobilį) modulis $|B|$, B_x , B_y , B_z – indukcijos pokyčio dedamosios.



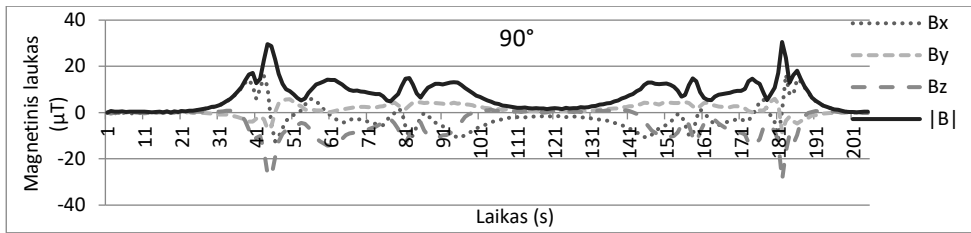
3.4 pav. Magnetinio lauko matavimų atlikimo schema ir jutiklio orientavimas



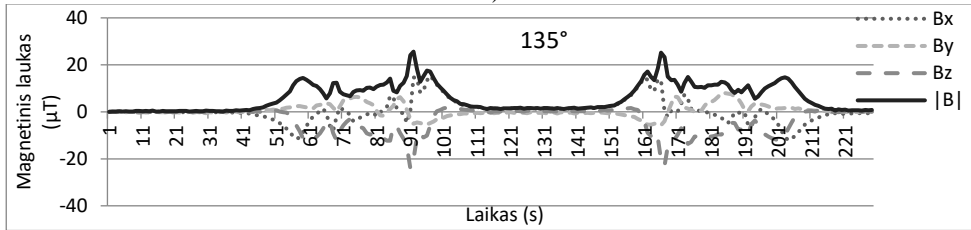
a)



b)



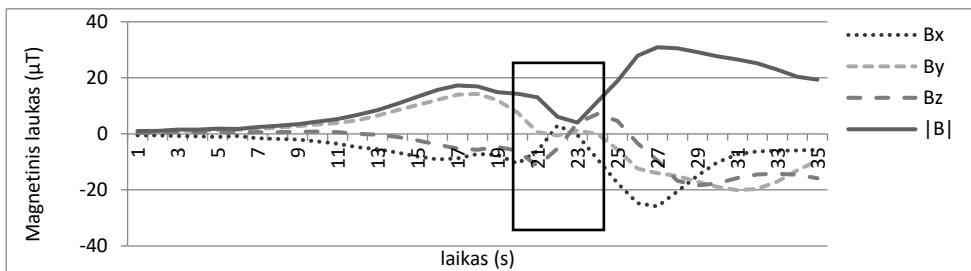
c)



d)

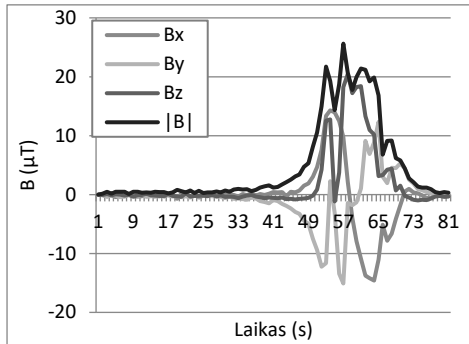
3.5 pav. Magnetinio lauko dedamųjų ir modulio kitimas (kai naudojamas pirmosios konstrukcijos automobilis) esant magnetinio jutiklio kampui: $a - 0^\circ$, $b - 45^\circ$, $c - 90^\circ$, $d - 135^\circ$

Matavimo duomenys leidžia patvirtinti, kad magnetinio lauko indukcijos modulio $|B|$ ir atskirų dedamųjų pokytis automobiliui užvažiuojant virš magnetinio jutiklio kinta nevienodai ir priklauso nuo automobilio markės; bet svarbiausia yra tai, kad kai kurių konstrukcijų automobiliuose yra ypač ryški vertikaliųjų metalinių pertvarų įtaka. Jų įtaka matyti ir kitų markių automobiliuose. Kai kurių automobilių atveju santykinio laiko aplinkoje dedamosios pokytis keičia ženklą, o indukcijos modulio pokytis artimas nuliui, kitų indukcijos dedamųjų pokyčiai taip pat nežymūs. Taigi, jei tokios konstrukcijos automobilis sustos šiame taške, aptikti jį bus sudėtinga. Tokia sritis, kai automobilis stovėjimo vietoje atsiduria tam tikroje pozicijoje magnetinio jutiklio atžvilgiu, kurioje magnetinio lauko suminis pokytis beveik lygus nuliui, toliau vadinama kritiniu tašku. Išsamiau kritinio taško susidarymas pavaizduotas 3.6 pav. Jame kritinio taško sritis apibrūkta stačiakampiu. Čia horizontalioje ašyje atidėtas automobilio padėties numeris – atstumas (tarpas tarp dviejų gretimų padėčių – 20 cm). Matoma, kad kritinio taško srities plotis nėra didelis (apie 20 cm). Tai pagerina esamą situaciją, nes mažėja tikimybė, kad automobilis sustos šiame kritiniame taške.

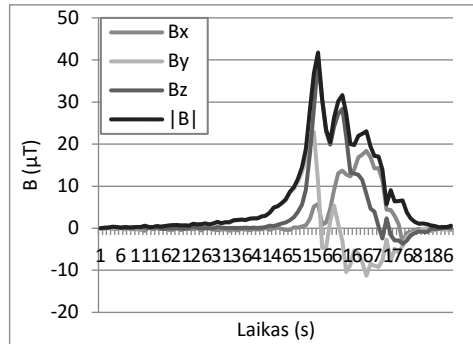


3.6 pav. Išsamesnė automobilio kritinio taško analizė

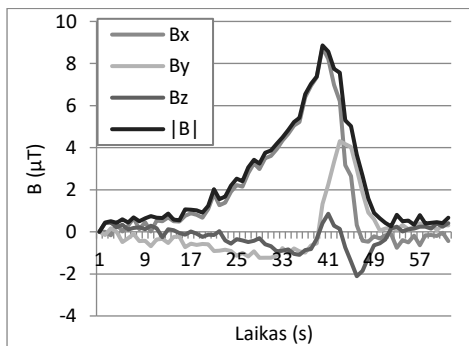
Toliau buvo iširta automobilių įtaka magnetinio lauko moduliui $|B|$ ir dedamosioms, kai automobilis įvažiuoja į stovėjimo vietą pasislinkęs arčiau vieno krašto, taip pat kai įvažiuoja į gretimą stovėjimo vietą nutoldamas nuo magnetinio jutiklio per 1 m ir per 1,7 m. Vieno iš automobilių matavimų rezultatai pateikti 3.7 pav. Remiantis šiais rezultatais, galima patvirtinti teorines prielaidas apie magnetinio lauko Z dedamosios kitimo priklausomybes, įvairius magnetinio lauko X ir Y dedamųjų kitimo dėsnius, kritinių taškų atsiradimo galimybes. Be to, šie rezultatai suteikia informacijos apie magnetinio lauko indukcijos modulio ir magnetinio lauko indukcijos dedamųjų pokyčio variacijas ir ženklus (kryptis).



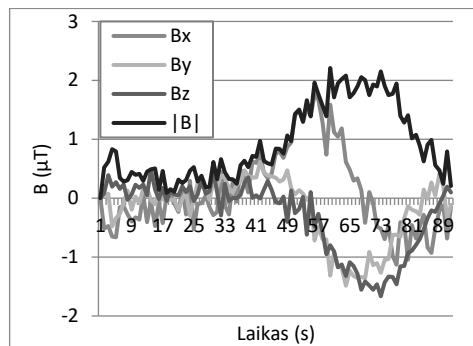
a)



b)



c)



d)

3.7 pav. Magnetinės indukcijos modulio $|B|$ ir dedamųjų X, Y, Z kitimas automobiliui pravažiuojant įvairiomis trajektorijomis: *a* – per aikštelės vidurį, *b* – arčiau vieno aikštelės krašto, *c* – šonine aikštele 1 m atstumu nuo magnetinio jutiklio, *d* – šonine aikštele 1,7 m atstumu nuo magnetinio jutiklio

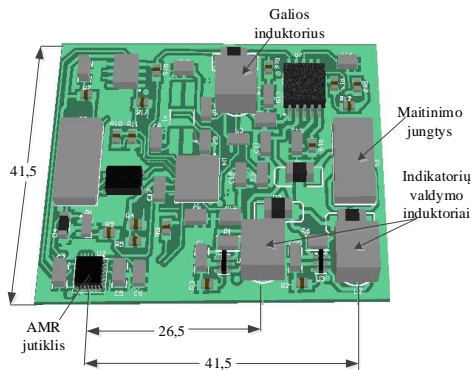
3.3. Pašalinių magnetinių laukų poveikio magnetorezistyviniams jutikliams tyrimas

AMR jutikliai plačiai naudojami atliekant įvairius tyrimus ir matavimus, kai reikia aptikti silpnus Žemės ir tiriamų objektų magnetinio lauko pokyčius. Anizotropiniai magnetorezistyviniai (AMR) jutikliai gali būti naudojami DC ir AC srovei nekontaktiniu būdu matuoti, taip pat atstumui matuoti. Tačiau AMR jutikliai

labai jautrūs temperatūros pokyčiams [67, 68] ir parazitiniams magnetiniams laukams. Todėl išskyla natūralus klausimas – kokią įtaką jutikliui daro papildomi elektronikos komponentai, kurie reikalingi jutiklių stabiliam darbui, duomenims apdoroti ir perduoti. Visi sistemos komponentai, kurie kuria magnetinius laukus ir gali įsimagnetinti, daro įtaką jutikliui – pradedant mikrovaldikliais, DC/DC keitiklių droselių magnetiniais laukais ir baigiant maitinimo ir ryšio su magistralėmis laidais. Nors dauguma šiuolaikinių mikrovaldiklių ir patys AMR jutikliai naudoja nedaug galios, bet, sujungus į tinklą 100 ir daugiau įtaisų, suminė srovė gali viršyti 3–10 A. Tuo tikslu buvo atliktas modeliavimas ir eksperimentiniai tyrimai siekiant nustatyti pagrindinius trukdžių šaltinius ir jų įtaką. Tyrimams buvo parinktas magnetinio lauko jutiklis, dirbantis tinkle. Jis turi šviesos diodų indikaciją *laisva / užimta*, garsinį signalą generuojantį garsiakalbį, kelis diskretinius išėjimus per kietojo kūno relę (angl. *solid state relay* – SSR) ir duomenų perdavimo sąsają per RS-485 diferencialinę magistralę.

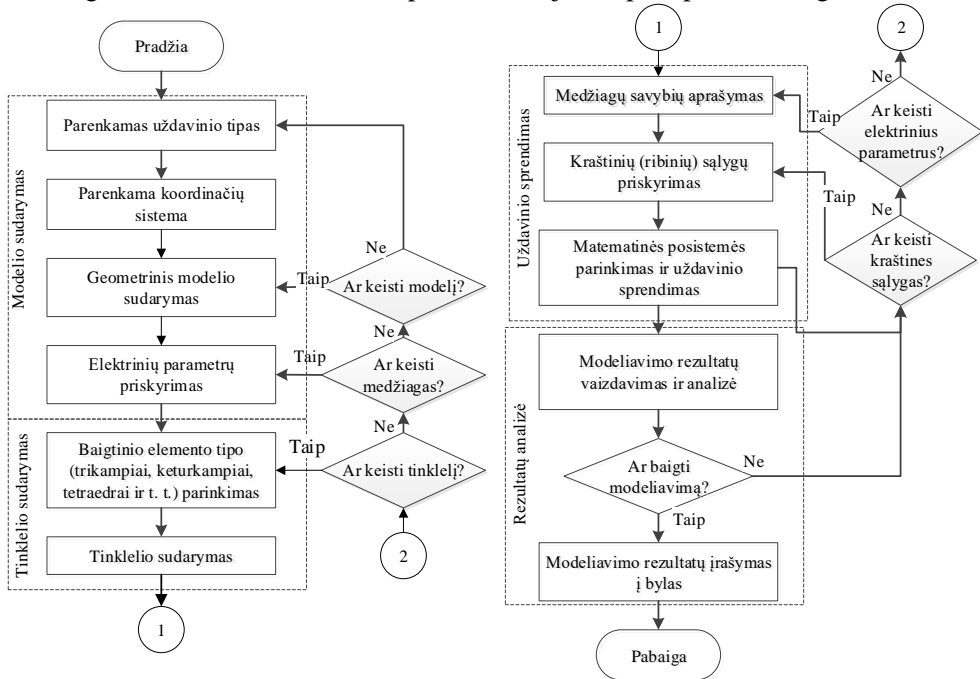
Magnetinių laukų poveikio AMR jutikliams modeliavimas

Elektroninė jutiklio plokštė yra sudėtingos formos fizikinė struktūra (3.8 pav.), sudaryta iš skirtingų elektrinių parametrų medžiagų. Plokštės elektromagnetiniai laukai aprašomi Maksvelo lygčių sistema [68]. Nustatant projektuojamų elektromagnetinių įtaisų charakteristikas (šiuo atveju – magnetinio lauko pasiskirstymą), ši lygčių sistema sprendžiama taikant baigtinių elementų metodą (BEM).



3.8 pav. PCB plokštė su AMR jutikliu

Pagrindinius modeliavimo etapus iliustruoja 3.9 pav. pateiktas algoritmas.



3.9 pav. Bendras magnetinių laukų modeliavimo baigtinių elementų metodu algoritmas

Magnetiniams ir elektriniams laukams modeliuoti labai plačiai naudojama baigtinių elementų metodo modeliavimo programa „Comsol Multiphysics“, tačiau sudėtingų geometrinių struktūrų modeliavimas reikalauja daug kompiuterinių išteklių ir laiko. Norint supaprastinti uždavinį buvo modeliuojami atskiri elementai, kuriantys didžiausią magnetinį lauką.

Baigtinių elementų metodas šiame darbe taikytas LED valdiklių (kurie dažniausiai yra naudojami kaip indikatoriai), DC/DC maitinimo keitiklių droselių galiai apskaičiuoti ir RS485 linijos magnetinio lauko srautui modeliuoti. Buvo atliktas erdvinis (3D) ričių ir linijų magnetinio lauko modeliavimas naudojant AC/DC statinių ir magnetinių laukų posistemę „Comsol“ pakete.

Magnetiniams laukams modeliuoti panaudotos šios Maksvelo lygtys [68]:

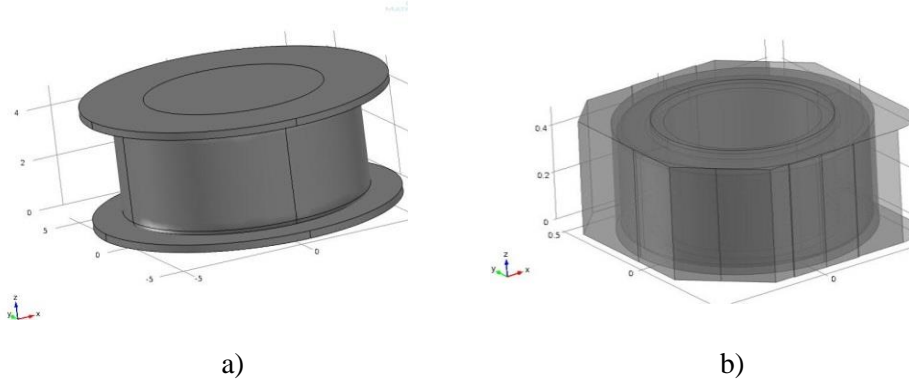
$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\mu_r^{-1} \mu_0^{-1} \nabla \cdot A) + \sigma \nabla V &= 0, \\ -\nabla \cdot (\sigma \nabla V) &= 0; \end{aligned} \quad (3.21)$$

čia σ yra elektrinis laidumas, V – įtampa visame modelyje, A – magnetinis vektoriaus potencialas, kuris apibrėžia magnetinio srauto tankį (indukciją) B . Ši lygčių sistema parodo, kad nėra jokio dinaminio judėjimo ir visa elektros srovė teka sistemos viduje.

Ritės sukuriama magnetinio lauko modeliavimas

Buvo modeliuojami dviejų tipų droseliai – su atvirąja ir uždara šerdimi (3.10 pav.). Ritės sukuriamas magnetinis laukas buvo modeliuojamas 3D koordinatinių sistemose. Ritės išilginė ašis lygiagreti su Z ašimi. Ritė apribojama nutolusiu sferiniu paviršiumi, kuriame taikoma ribinė sąlyga. Ašyje taikyta ribinė sąlyga. Srovės tankis

$J = 0$ visoje nagrinėjamoje srityje, išskyrus ritę, kurioje $J > 1$. Toliau buvo skaičiuojamas magnetinio potencialo vektoriaus pasiskirstymas aplink ritę. Pradiniai modeliuojamų ričių parametrai pateikti 3.1 lentelėje.

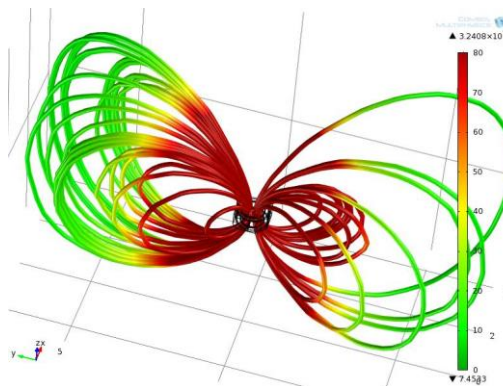


3.10 pav. „Comsol“ modeliuojamos ritės: *a* – atviroji šerdis, *b* – uždaroji šerdis

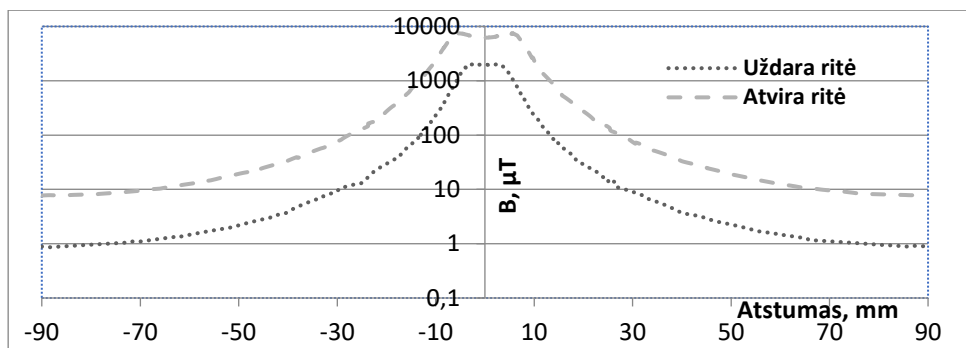
3.1 lentelė. Pradiniai modelio parametrai

	Uždaroji šerdis	Atviroji šerdis
Vijų skaičius	26	83
Srovė, A	1	1
Vijų storis, mm	1.3	1.3
Šerdies aukštis, mm	4.2	4.2
Šerdies skersmuo, mm	7	7
Induktyvumas, μH	332	335

Atlikus modeliavimą (3.11 ir 3.12 pav.) nustatyta, kad naudojant atvirojo tipo droselius magnetinio lauko stipris 90 mm atstumu yra apie $9 \mu\text{T}$. Tai sudaro apie 10 % Žemės magnetinio lauko magnitudės. Naudojant uždarojo tipo droselius magnetinio lauko magnitudė tolimesnėje zonoje yra apie 10 kartų mažesnė už atvirojo tipo droselio kuriamo lauko magnitudę.



3.11 pav. Uždarojo tipo ritės magnetinis laukas



3.12 pav. LED valdiklių ričių kuriamo magnetinio lauko priklausomybės

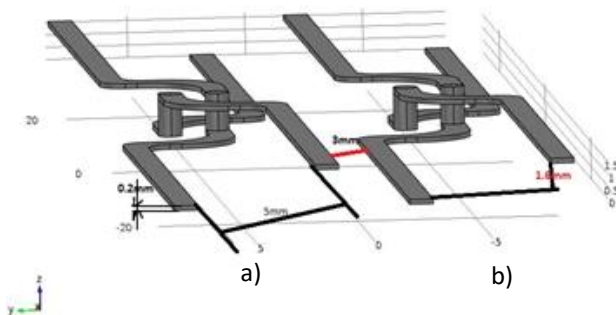
Maitinimo ir RS485 linijų modeliavimas

Anksčiau minėtais metodais ir naudojantis 3.9 pav. pateiktu algoritmu buvo modeliuojamos maitinimo ir RS485 linijos.

Atstumas tarp maitinimo ir RS485 linijų – 5 mm, o pagrindiniai parametrai pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Pradiniai linijų parametrai

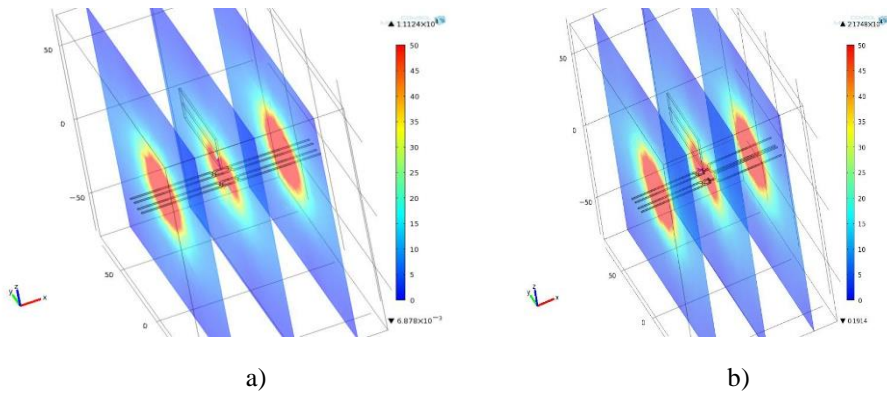
	Maitinimo linija	RS485
Srovė	3 A	0,5 A
Takelių storis	0,05 mm	0,05 mm
Takelių plotis	1 mm	1 mm
PCB storis	1,6 mm	1,6 mm
Linijos plotis	5 mm	5 mm



3.13 pav. Maitinimo ir informacijos perdavimo linijų išdėstymas „Comsol“ modelyje: a – RS485 linijos, b – maitinimo linijos

5 mm atstumas tarp linijos laidininkų nėra optimalus kuriamo magnetinio lauko požiūriu, tačiau konstrukcijoje panaudotos jungtys (MULTICOMP-PA001-2-TERMINAL BLOCK, PCB, 2WAY, VERTICAL) turi 5 mm žingsnį ir kitoks atstumas šiame realizacijos variante tiesiog neįmanomas.

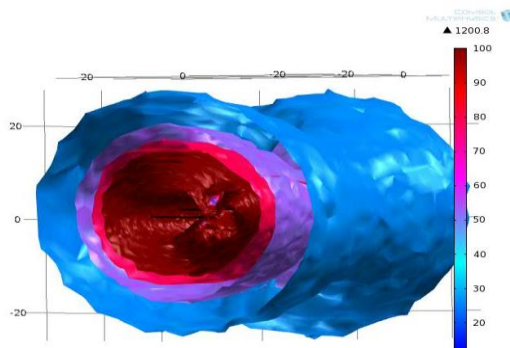
Buvo iširtos kelios konfigūracijos (kai linijos lygiagrečios ir kai jos susuktos, 3.13 pav.). 3.14–3.17 pav. pateikti linijų modeliavimo rezultatai (magnetinio lauko pasiskirstymas erdvėje).



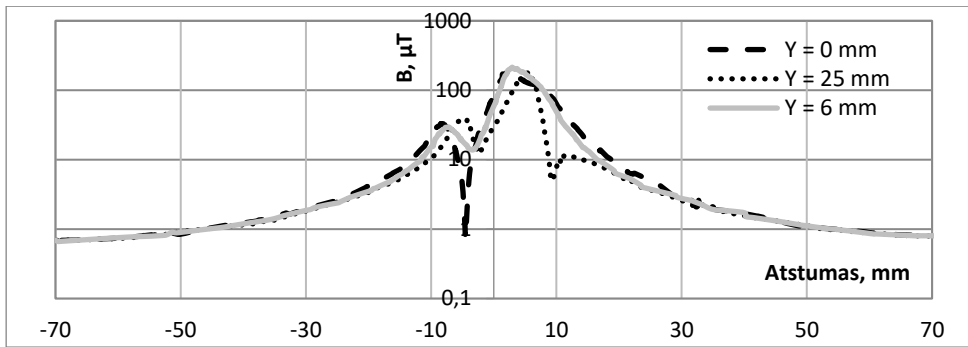
3.14 pav. Maitinimo ir informacijos perdavimo linijų išdėstymas „Comsol“ modelyje: *a* – RS485 linijos, *b* – maitinimo linijos

Iš pateiktų rezultatų galima pastebėti, kad, susukus maitinimo laidus, tekančios srovės įtaką galima sumažinti iki 1000 kartų, linijos centre – ir iki 10 kartų, nuo laidininko nutolus 40–50 mm.

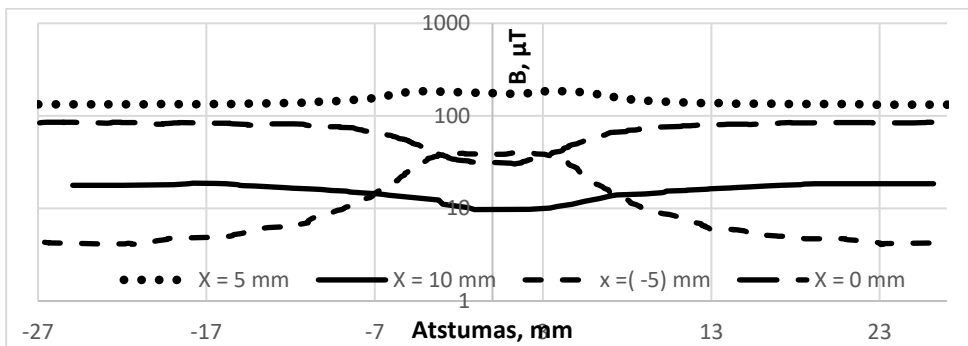
Maitinimo ir duomenų perdavimo linijos kuria stiprų magnetinį lauką. Tai matoma 3.17, 3.18 pav. Magnetinio lauko skaliarinio potencialo kitimas pateiktas 3.16 pav. Iš jo matoma, kad magnetinio skaliarinio potencialo dydis aplink konstrukciją kinta parboliškai.



3.15 pav. RS485 ir maitinimo linijų magnetinio lauko skaliarinis potencialas



3.16 pav. RS485 ir maitinimo linijų kuriamo magnetinio lauko stipris $Y-Z$ plokštumoje, kai $Z = 1,5$ mm



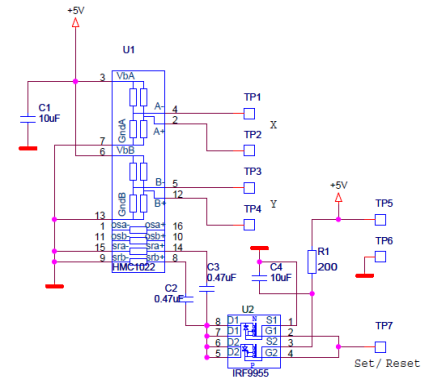
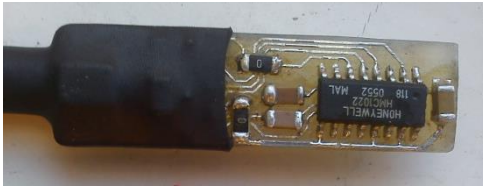
3.17 pav. RS485 ir maitinimo linijų kuriamo magnetinio lauko stipris $X-Z$ plokštumoje, kai $Z = 1,5$ mm

Iš 3.17 pav. galima pastebėti, kad nuo linijos nutolus 50 ir daugiau milimetrų susukimo įtaka minimali, o didžiausią įtaką lauko stipriui daro ties jungtini išsiskyre laidai.

Ritės ir linijų sukuriama magnetinio lauko eksperimentiniai tyrimai

Magnetinio lauko indukcija yra tiesiogiai proporcinga laidininku tekančios elektros srovės stipriui. Magnetinis laukas taip pat egzistuoja erdveje aplink magnetines medžiagas. Jutiklio plokštėje šie magnetiniai laukai veikia kaip pašalinio trukdžio šaltiniai. Impulsinio keitiklio maitinimo grandinė ir jo induktyvumo ritė taip pat yra trukdžių šaltinis. Kitų plokštėje esančių komponentų, mikroschemų, rezistorių, kondensatorių ar kitų elementų išvadai gali būti gaminami iš magnetinių medžiagų. Esant pakankamai stipriam išorinio magnetinio lauko poveikiui, jie gali įsimagnetinti. Norint išvengti šių pašalinių trukdžių magnetinis jutiklis buvo projektuojamas atskirai nuo mikrovaldiklio plokštės.

Eksperimentiniams magnetinio lauko tyrimams buvo suprojektuotas ir pagamintas analoginis dviejų ašių BX, BY zondas (3.18 pav.), naudojantis HMC1022 lustą. Principinė analoginio jutiklio schema pateikta 3.18 pav. b dalyje. Duomenų surinkimo bei registravimo įrenginys sukurtas naudojant firmos „Atmel“ mikrovaldiklį AT90USB1287.

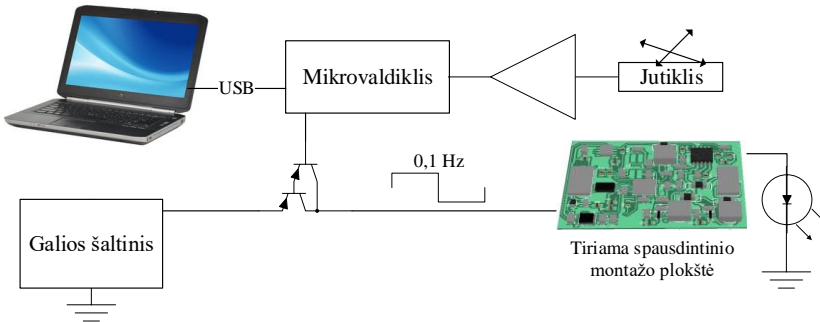


a)

b)

3.18 pav. HMC1022 zondas

Duomenų registravimo įrenginys USB kabeliu buvo sujungtas su nešiojamoju kompiuteriu ir specialiai šiems matavimams sukurta programa magnetinio jutiklio duomenys buvo nuskaityti į duomenų failą. Sukurta specializuota programinė įranga leido fiksuoti jutiklių duomenis laisvai parenkamu tempu nuo dešimt kartų per sekundę iki karto per parą. Zondas buvo fiksuojamas virš stimuliuojamų PCB elementų (induktorių, perdavimo ir maitinimo linijų).



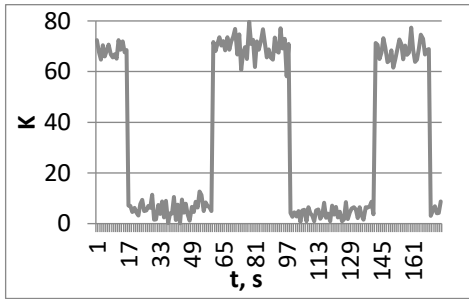
3.19 pav. Matavimų struktūrinė schema

Tyrimų metu nustatyta, kad LED valdiklio droselis kuria gana stiprų pastovų magnetinį lauką, kuris tiesiogiai proporcingas per šviesos diodą tekančiai srovei, ir silpną, beveik nepastebimą kintamąjį magnetinį lauką. Tiriant kitų gamintojų konstrukcijas buvo pastebėta ir kintamoji magnetinio lauko komponentė, bet ir tuo atveju kintamojo magnetinio lauko intensyvumas neviršijo 2 % nuo nuolatinio lauko reikšmės. Šis faktas leido supaprastinti eksperimentus ir naudoti 0,1 Hz stimuliavimo tempą. Komponentių kuriamo magnetinio lauko įtaka buvo įvertinama koeficientu K :

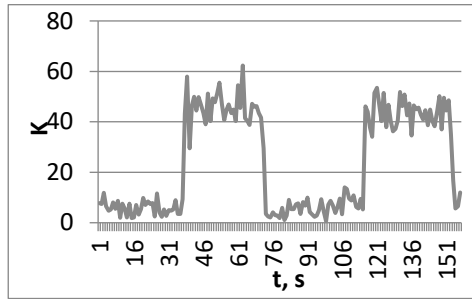
$$K = \sqrt{(B_x - B_{x0})^2 + (B_y - B_{y0})^2 + (B_z - B_{z0})^2} ; \quad (3.22)$$

čia B_x, B_y, B_z – išmatuotos magnetinės indukcijos vertės esamuoju momentu, B_{x0}, B_{y0}, B_{z0} – magnetinės indukcijos vertės išjungus PCB maitinimo įtampą.

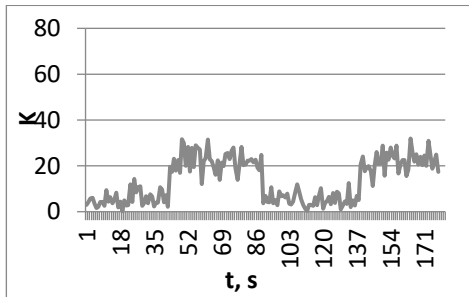
Eksperimentų metu LED valdiklio srovė buvo 150 mA, RS485 linijos srovė – apie 0,3 A, maitinimo linijos srovė – apie 0,5 A.



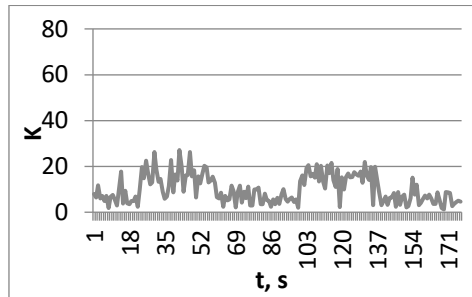
a)



b)



c)



d)

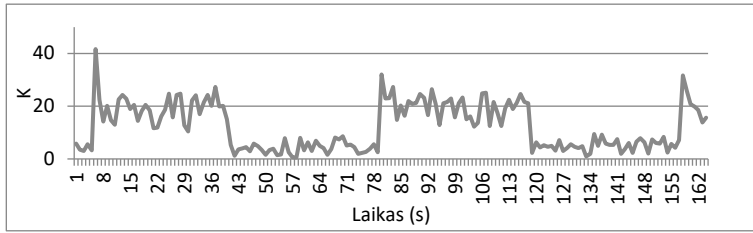
3.20 pav. Koeficiento K vertės panaudojus atvirojo tipo LED valdiklio drošelį: *a* – 30 mm nuo jutiklio, *b* – 40 mm nuo jutiklio, *c* – 50 mm nuo jutiklio, *d* – 60 mm nuo jutiklio

Iš 3.20 pav. matyti, kad mažiausias atstumas tarp atvirojo tipo LED valdiklio drošelio ir jutiklio turi būti ne mažesnis kaip 60–70 mm.

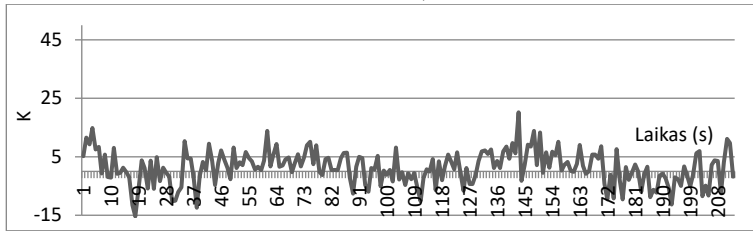
Impulsinio maitinimo šaltinio induktyvumo ritės įtaka

Stovėjimo aikštelės jutiklyje panaudotas firmos „Texas Instruments“ impulsinis keitiklis TPS5041 30/5 V DC/DC. Jo prototipo konstrukcijoje panaudota ekranuota uždarojo tipo 47 uH 1,1 A SMD induktyvumo ritė. Atliekant eksperimentus maitinimo keitiklis buvo apkrautas 0,5 A srove. Tyrimai su analoginiu jutikliu HMC1022 parodė, kad maitinimo šaltinio induktyvumo ritė skleidžia gana stiprų pastovų magnetinį lauką bei labai nežymų kintamąjį magnetinį lauką. Ši aplinkybė leido supaprastinti eksperimentus ir tyrimams taip pat panaudoti skaitmeninį jutiklį LSM33DLH, o pašalinių laukų įtaką įvertinti atpažinimo kriterijaus vienetais. Eksperimentų metu DC/DC keitiklis buvo maitinamas impulsais ir buvo nuskaitoma kriterijaus reikšmė veikiant ir neveikiant keitikliui.

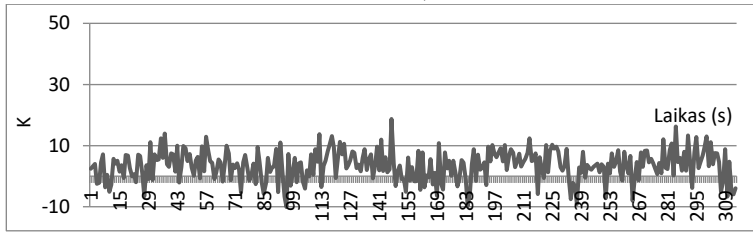
Eksperimentų rezultatai pateikti 3.21 pav. Iš jų matyti, kad DC/DC keitiklio induktyvumo ritė turi mažesnę įtaką, o mažiausias atstumas tarp jutiklio ir induktyvumo ritės turi būti ne mažesnis kaip 40–50 mm. Silpnesnę DC/DC keitiklio induktyvumo ritės įtaką lemia ir faktas, kad ši ritė yra uždarojo tipo.



a)



b)



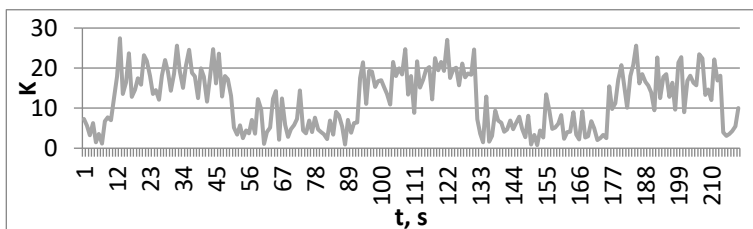
c)

3.21 pav. Koeficiento K vertės panaudojus TPS5041 DC/DC keitiklio uždarojo tipo induktyvumo ritę: a – 30 mm, b – 43 mm, c – 55 mm atstumu nuo jutiklio

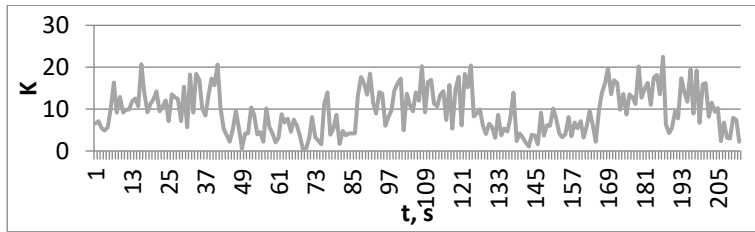
Srovės, tekančios maitinimo laidais, įtaka

Eksperimentų metu atlikti maitinimo linijų matavimai realiomis sąlygomis. Buvo tiriama maitinimo linijomis tekančios įvairaus stiprio srovės įtaka magnetinio lauko jutikliams.

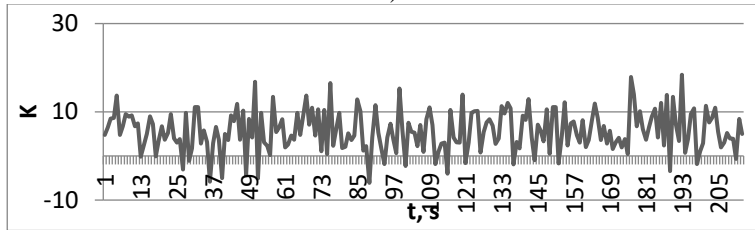
Tyrimai buvo atliekami su skaitmeniniu jutikliu LSM303DLH, magnetinio lauko indukcijos reikšmės buvo nuskaitomos tekant skirtingai srovei. Iš 3.22 pav. pateiktų eksperimentų rezultatų galima pastebėti, kad maitinimo laidais tekanti srovė taip pat turi nemenką įtaką, o mažiausias atstumas tarp jutiklio ir laidų turi būti ne mažesnis kaip 30–40 mm. Reikia atkreipti dėmesį, kad srovė tebuvo 0,5–2 A, o realiame jutiklių tinkle srovė gali siekti 2–4 A ar daugiau ir atitinkamai bus daug kartų stipresnis kuriamas magnetinis laukas.



a)



b)

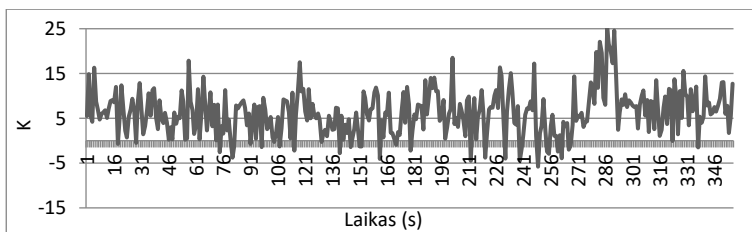


c)

3.22 pav. Koeficiento K vertės panaudojus dviejų gyslų indikatorių maitinimo kabelį: a – 10 mm, b – 30 mm, c – 40 mm atstumu nuo jutiklio

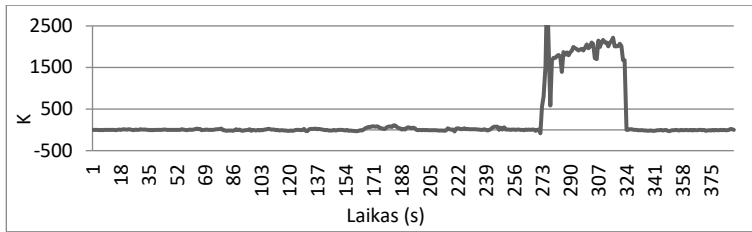
Srovės, tekančios 220 V, 50 Hz tinklu, įtaka

Stovėjimo aikštelės jutikliai gali būti sumontuoti šalia jėgos kabelių, kuriais teka didelė (iki kelių šimtų A) srovė, o personalas, instaliuojantis jutiklius, gali būti netgi neinformuotas apie netoliese esančius jėgos kabelius. Tyrimai buvo atliekami elektroninės įrangos gamybos patalpose, o kaip kintamojo magnetinio lauko šaltinis pasirinktas litavimo karštu oru stotelės maitinimo kabelis. Magnetinio lauko įtaka buvo fiksuojama skaitmeniniu LSM303DLH jutikliu, kriterijaus reikšmės buvo nuskaitomos tekant ir netekant srovei (naudojama 22 kW galia). Tyrimo metu nustatyta, kad pagal standartus įrengta instaliacija beveik neturi įtakos magnetiniam jutikliui: nutolus 100 mm nuo kabelio, matoma nedidelė koeficiento K reikšmių fliuktuacija (3.23 pav.).



3.23 pav. Koeficiento K vertės jėgos kabeliui esant 100 mm atstumu nuo magnetinio jutiklio

Kai jutiklis buvo padėtas tiesiai ant jėgos kabelio (atstumas neviršijo 10 mm), pastebėtas labai didelis koeficiento K šuolis (3.24 pav.), tačiau jei jutikliai ir elektros instaliacija bus įrengti laikantis taisyklių, tai tokia situacija bus neįmanoma.



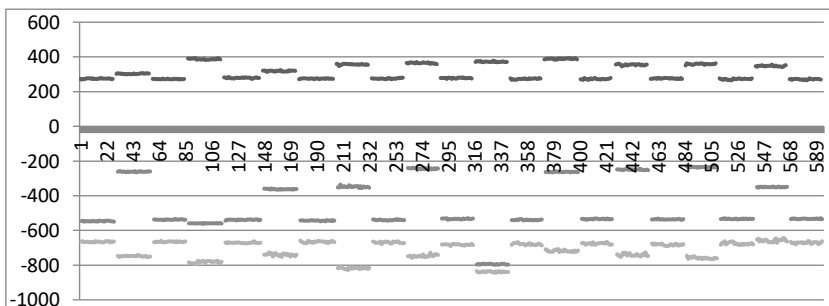
3.24 pav. Koefficiento K vertės jėgos kabeliui esant 10 mm atstumu nuo magnetinio jutiklio

Atlikus šį tyrimą galima teigti, kad:

- 1) mažiausias atstumas tarp atvirojo tipo LED valdiklio induktyvumo ritės ir jutiklio LSM303DLH turi būti ne mažesnis kaip 60–70 mm;
- 2) DC/DC keitiklio induktyvumo ritė turi mažesnę įtaką, o mažiausias atstumas tarp jutiklio ir induktyvumo ritės turi būti ne mažesnis kaip 40–50 mm;
- 3) mažiausias atstumas tarp jutiklio ir maitinimo laidų turi būti ne mažesnis kaip 30–40 mm, tekant 0,3 A srovei;
- 4) stovėjimo aikštelės aptikimo jutiklio konstrukcijoje rekomenduotina naudoti uždarojo tipo induktyvumo rites, kurios sumažintų magnetinio lauko įtaką;
- 5) jutiklio maitinimo linijos ir RS485 laidai turi būti atskirai susukti;
- 6) projektuojant montажinę jutiklio plokštę maitinimo laidai taip pat turi būti susukti ir išdėstyti kuo toliau nuo jutiklio;
- 7) parenkant jutiklio pastatymo vietą reikia stengtis, kad jis būtų kuo toliau nuo ryšio ir maitinimo linijų bei induktyvumo ričių.

Magnetinio lauko poveikio magnetorezistyvinio jutiklio rodmenų poslinkiui ir jautriui tyrimas

Tiriant įvairios konfigūracijos magnetinius laukus buvo pastebėta, jog AMR magnetinio lauko jutiklio LSM303DLH tilteliai po trumpalaikio veikimo magnetiniu lauku (stipresniu nei 3 mT) įgauna rodmenų poslinkį, kuris neišnyksta ir pašalinus išorinį magnetinį lauką. Šio tyrimo tikslas – nustatyti lauko, sukeliančio liekamąjį tiltelių poslinkį, stiprį, įsisotinimo stiprį ir stipraus magnetinio lauko poveikį jautriui.



3.25 pav. Jutiklio duomenų pokytis

Siekiant minimizuoti matavimo paklaidas, sukeltas netikslios jutiklio padėties erdvėje, reikia ribotoje (bet didesnių matmenų už tiriamą jutiklį) erdvėje sukurti vienalytį, kalibruotą, netiesioginiais metodais išmatuojamo stiprio magnetinį lauką.

ANSI/IEEE standartas apibrėžia du magnetinių jutiklių kalibravimo metodus:

vieno sluoksnio kvadratinės kilpos ir apskritos Helmholco ritės [70, 71].

Kalibravimui buvo pasitelkta gana didelio spindulio (55,2 mm) apskritų Helmholco ričių pora. Jų kuriamo magnetinio lauko stipris buvo skaičiuojamas pagal jomis tekančios srovės stiprį.

Tiriant jutiklį reikia turėti įtaisą, kuriantį tolygų ir prognozuojamą magnetinį lauką. Tokiam laukui sukurti gerai tinka dviejų ričių sistema, vadinama Helmholco ritėmis. Šiame įtaise ritės yra lygiagrečios, atstumas tarp jų centrų l turi būti lygus jų spinduliui R , ir abi ritės turi turėti vienodus parametrus: formą ir matmenis, vijų skaičių, vyniojimo tankį ir kryptį, srovės amplitudę bei kryptį. Dalyje tarp Helmholco ričių esančios erdvės sukuriamas vienalytis magnetinis laukas.

Lauko, sukurto Helmholco ričių poros centre, stipris apskaičiuojamas pagal šią formulę [69,71]:

$$B = 8,99 \cdot \frac{N \cdot I}{R} \quad (3.23)$$

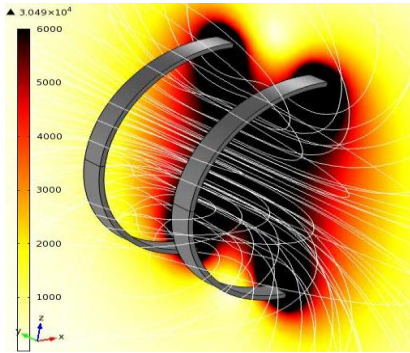
čia B – sukurto magnetinio lauko stipris (gausais); N – vijų skaičius vienoje ritėje; I – ritės srovės stipris (amperais); R – atstumas tarp ričių (centimetrais).

3.3 lentelė. Helmholco ričių parametrai

Ritės vijų skaičius	39
Atstumas tarp ričių, ritės spindulys, mm	55,2
Ričių jungimo tipas	Nuoseklus
Ričių sistemos bendrasis induktyvumas, μH	700

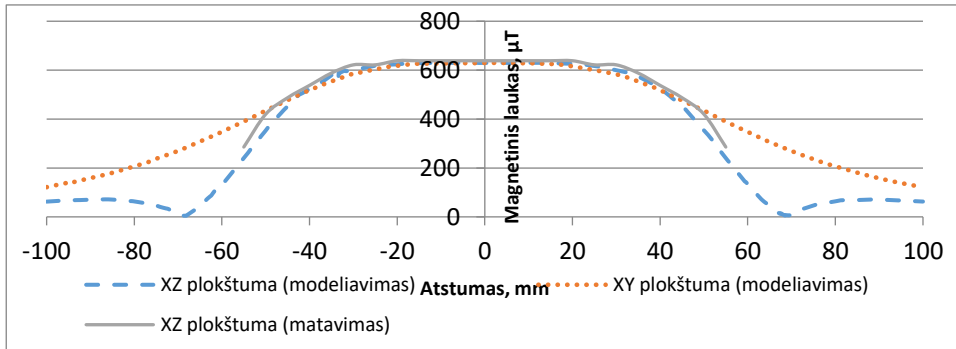
Siekiant išlaikyti kuo didesnę indukuotojo magnetinio lauko vientisumą, privalu užtikrinti vienodą srovės stiprį abiejose ritėse. Jungiant rites lygiagrečiai gali atsirasti sunkiai įvertinamų parazitinių varžų (pvz., neidealūs kontaktai, skirtingo ilgio ir skerspjūvio laidai), kurios išbalansuoja lygiagretaus kontūro pečius, todėl rites jungti buvo pasirinkta nuosekliai.

Siekiant išsiaiškinti, kokio dydžio yra pastoviojo magnetinio lauko zona, buvo atliktas modeliavimas baigtinių elementų metodu paremta programa „Comsol“ ir matavimai su teslametru „Leybold Didactic“. 3.26 ir 3.27 pav. pateikiamas bendras modeliuoto magnetinio lauko pasiskirstymo vaizdas ir lauko pasiskirstymas XZ ir XY plokštumose.



3.26 pav. Helmholtco ričių kuriamo magnetinio lauko pasiskirstymas erdvėje

3.26 pav. galima pastebėti, jog lygiagrečios, didžiausio tankio magnetinio lauko linijos veria ritės vidų, o 3.27 pav. matomas magnetinio lauko pasiskirstymas ritės vertikaliame ir horizontaliame skerspjūviuose rodo, kad laukas gana pastovus plačioje zonoje (apie 80 mm XZ plokštumoje).

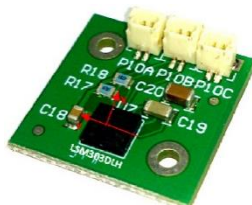


3.27 pav. Helmholtco ričių kuriamo magnetinio lauko pasiskirstymas plokštumoje, gautas matuojant teslametru ir modeliuojant programa „Comsol“

3.27 pav. taip pat matoma, jog matavimo rezultatai gerai sutampa su modeliavimo rezultatais. Magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas ritės viduje yra homogeniškas tam tikroje cilindro formos erdvėje ($\varnothing = 80 \text{ mm}$, $l = 40 \text{ mm}$), kurios centras sutampa su ričių poros geometrininiu centru.

AMR jutiklio jautrio tyrimas

Šiame tyrime jautriku laikoma montažinės plokštės su AMR jutikliu LSM303DLH bei mažiausiu kiekiu išorinių R, C komponentų, reikalingų jam funkcionuoti, visuma.



3.28 pav. Jutiklio spausdinto montažo plokštė

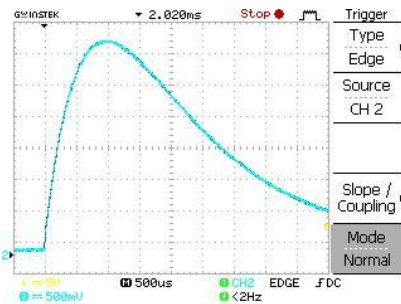
Pradiniame tyrimo etape panaudoto mažo triukšmo nuolatinės srovės laboratorinio šaltinio išėjime buvo galima gauti didžiausią 3 A srovę. Ji sukurdavo apie 2 mT magnetinį lauką, kurio nepakako negrižtamam jutiklio tiltelių poslinkiui sukurti. Siekiant AMR jutiklį paveikti stipresniu lauku, kaip energijos šaltinis buvo panaudota iki fiksuotos įtampos įkraunama, didelės talpos elektrolitinių kondensatorių baterija (1420 μF, 400 V).

Naudojant tokį įtampos šaltinį, srovės stiprį ritėje reikia skaičiuoti įvertinant pereinamąjį procesą, nes srovė negali tekėti visą laiką. Tokios grandinės pereinamojo proceso analizinė išraiška operacinėje srityje yra:

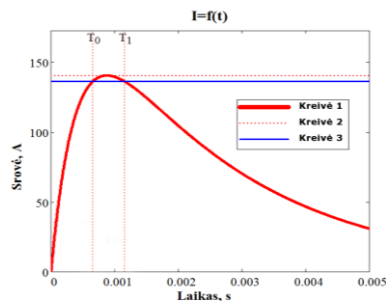
$$I_L = \frac{U_C}{p^2 \cdot L + p \cdot R_S + \frac{1}{C}}; \quad (3.24)$$

čia I_L – srovė, tekanti rite, A; U_C – pradinė kondensatoriaus įtampa, V; C – kondensatoriaus talpa, F; L – ritės induktyvumas, H; R_S – suminė grandinės nuosekloji varža, Ω.

Srovė per ritę iš kondensatorių baterijos buvo matuojama netiesiogiai – nuosekliai ritei prijungus matavimo rezistorių ir osciloskopu matuojant įtampos kritimą ant to rezistoriaus. Pagal praktinius rezultatus buvo pakoreguotas teorinis modelis, leidžiantis įvertinti realią kontaktų bei laidų varžą. Tolesniuose eksperimentuose srovės ir magnetinio lauko stipris buvo skaičiuojamas teoriniame modelyje pagal kondensatorių baterijos įtampą.



a)



b)

3.29 pav. Matuojant ir modeliuojant gautos priklausomybės: *a* – įtampos kritimo ant matavimo rezistoriaus priklausomybė nuo laiko, matoma osciloskopo ekrane; *b* – teoriniame modelyje gauta ritės srovės stiprio priklausomybė nuo laiko, esant 345 V pradinei kondensatoriaus įtampai. Pateiktos kreivės: 1) srovės–laiko funkcija; 2) didžiausia srovės vertė; 3) srovės vertė, kai $T_1 - T_0 = 0,5$ ms

3.29 pav. parodytas srovės, tekančios rite, stipris, užfiksuotas osciloskopo ekrane ir gautas modeliuojant matematinu paketu „MathCad“.

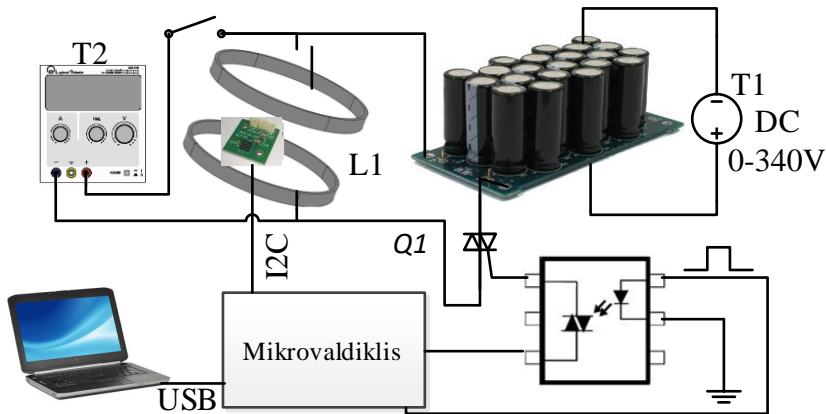
Įvertinant faktą, jog medžiagai įsismagnetinti reikalingas tam tikras, nors ir trumpas, laiko tarpas dt , ir pasinaudojus teoriniu modeliu buvo suskaičiuota vidutinė srovė laiko intervale Δt t_0 atžvilgiu:

$$\Delta I = \frac{I(t_0)}{\frac{1}{\Delta t} \cdot \int_{t_0-\Delta t/2}^{t_0+\Delta t/2} I(t_0) dt}; \quad (3.25)$$

čia ΔI – santykis tarp didžiausios srovės ir srovės per laiko tarpą Δt ; $I(t)$ – srovės per ritę stipris; t_0 – laiko momentas, kai srovės stipris didžiausias.

Atlikus skaičiavimus, pastebėta, kad kai $\Delta t < 1$ ms, srovės skaičiavimo paklaida ΔI nesiekia 1 %, todėl, skaičiuojant didžiausią magnetinį lauką, srovės stiprio vertę galima imti didžiausią.

Eksperto metu jutiklis trumpą laiką (≤ 20 ms) buvo veikiamas stipriu magnetiniu lauku, viršijančiu jo matavimo diapazoną, ir buvo fiksuojami jutiklio rodmenys. Toliau pateikiama eksperimonto schema.



3.30 pav. Struktūrinė (principinė) eksperimonto schema

3.30 pav.: $L1$ – Helmholtco ričių pora, kurianti magnetinį lauką; $T1$ – laboratorinis autotransformatorius, skirtas kondensatorių įkrovimui valdyti; $V1$ – voltmetras kondensatorių įkrovimo lygiui matuoti; $S3$ – jungiklis kondensatorių baterijai iškrauti; $Q1$ – dvigubas tiristorius kondensatoriui prie ritės prijungti.

$T2$ buvo naudojamas kuriant silpnus laukus (< 6 mT), siekiant eksperimonto tikslumo. Taip pat $T2$ buvo naudojamas kuriant nuolatinį įvairių kryptių magnetinį lauką, skirtą jutiklio jautriui ir kalibravimui matuoti.

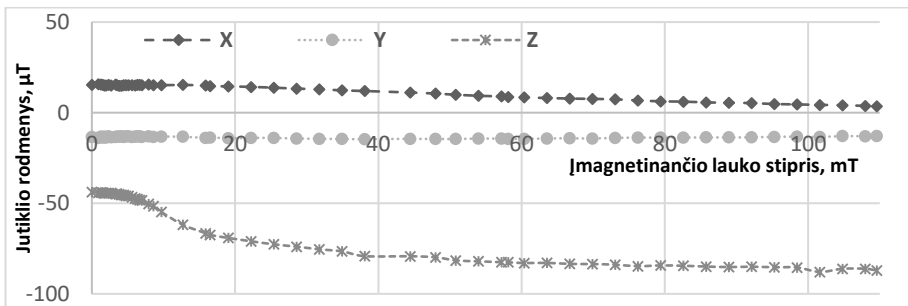
Duomenų surinkimo bei registravimo įrenginys sukurtas naudojant mikrovaldiklį AT90USB1287. Duomenų registravimo įrenginys USB kabeliu buvo sujungtas su kompiuteriu ir specialiai tam sukurta programa magnetinio jutiklio duomenys buvo nuskaitomi į duomenų failą.

Atliekant jutiklio rodmenų poslinkio tyrimą, jutiklis buvo veikiamas trumpais magnetinio lauko impulsais, kurių stipris kas kartą buvo didinamas. Tarp atskirų impulsų buvo fiksuojamos jutiklio pateikiamos atskirų magnetinio lauko dedamųjų reikšmės.

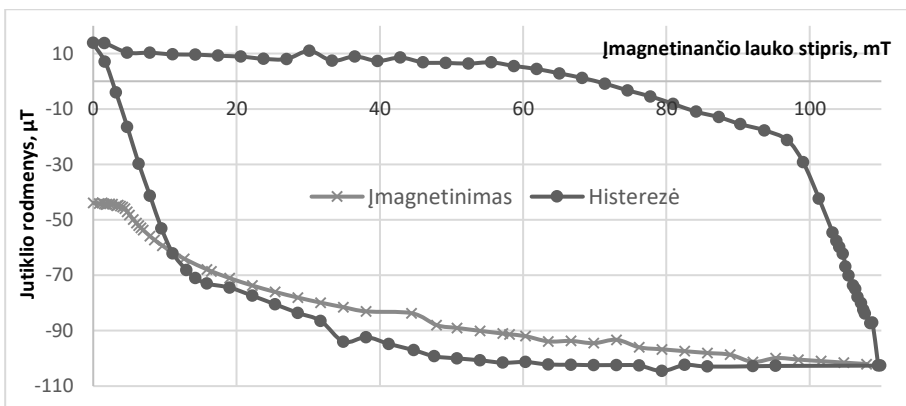
Tiriant jutiklio jautrį, jutiklis iš pradžių buvo išmagnetinamas slopstančios amplitudės (50 Hz) kintamuoju magnetiniu lauku, buvo fiksuojami jutiklio rodmenys veikiant jį tik Žemės magnetiniu lauku ir veikiant į jutiklio matavimo diapazoną

telpančiu silpnu magnetiniu lauku. Po to jutiklis buvo įmagnetinamas stipriu (100 mT) magnetiniu lauku ir analogiškai buvo fiksuojamos lauko dedamųjų reikšmės. Analogiški matavimai buvo atliekami jutiklį įmagnetinus priešingos krypties magnetiniu lauku.

Pirmajame tyrimo etape buvo matuojama AMR jutiklio rodmenų priklausomybė nuo jį veikusio magnetinio lauko stiprio (3.31 pav.). Kaip matyti iš paveikslėlio, didžiausias duomenų poslinkis pastebimas Z ašyje, kuri sutapo su magnetinio lauko jėgų linijų kryptimi.



3.31 pav. Jutiklio rodmenų priklausomybė nuo jį veikusio magnetinio lauko stiprio



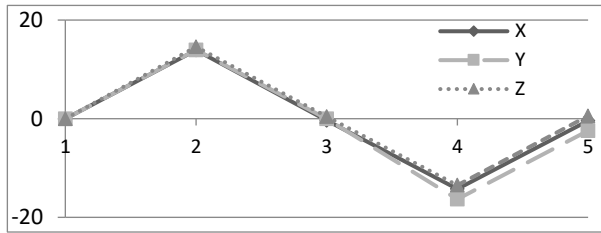
3.32 pav. Jutiklio rodmenų priklausomybė nuo jį veikusio magnetinio lauko stiprio lauko linijų kryptimi

3.32 pav. matoma tipinė jutiklio rodmenų poslinkio nuo išorinio ML įmagnetinimo histerezės kreivė. Tyrimo rezultatai rodo, jog pastebimam ($\geq 5\%$) jutiklio rodmenų poslinkiui sukurti reikalingo magnetinio lauko stipris priklauso nuo pradinio jutiklio įmagnetinimo. Kai jutiklis yra išmagnetintas, tada reikia ~ 5 mT stiprio magnetinio lauko. Kai jutiklio elementai yra įmagnetinti ir matomas rodmenų poslinkis, tada pastebimą poslinkį sukuria ir ~ 2 mT stiprio magnetinis laukas.

Antrajame tyrimo etape buvo matuojama jutiklio jautrio priklausomybė nuo jutiklio elementų įsimagnetinimo.

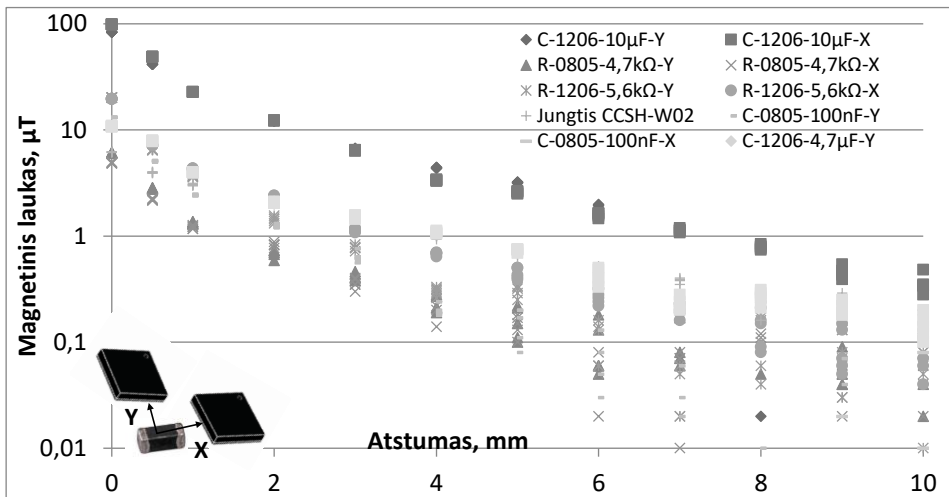
3.33 pav. matomi jautrio matavimo rezultatai, kai jutiklį veikusio magnetinio lauko stipris buvo didžiausias, o jautrio nuokrypis – mažiausias. Matavimų rezultatai buvo sunormuoti absoliučiai (pirmojo matavimo rezultatu laikant nulį ir iš tolesnių

matavimų atimant pirmojo matavimo originaliąją reikšmę). Matavimų rezultatai rodo, jog jutklio jautris dėl jo įmagnetinimo nekinta arba yra mažesnis už eksperimento įrangos triukšmus.

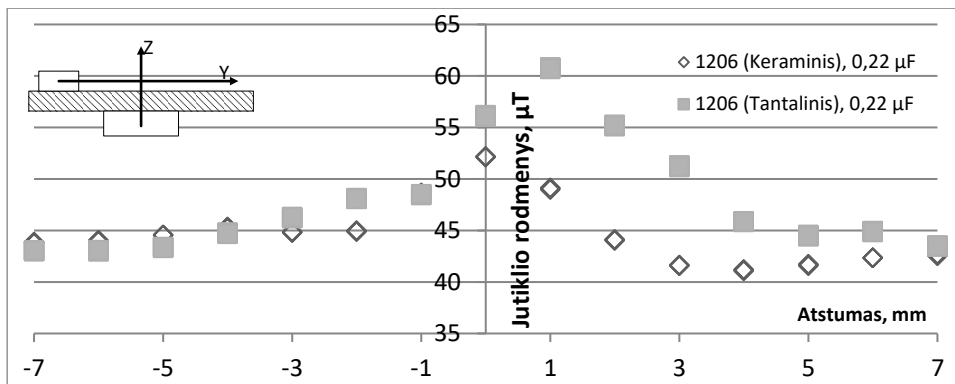


3.33 pav. Normuota jutklio jautrio priklausomybė nuo įsimagnetinimo: x ašis – matavimo numeris; y ašis – normuoti jutklio rodmenys

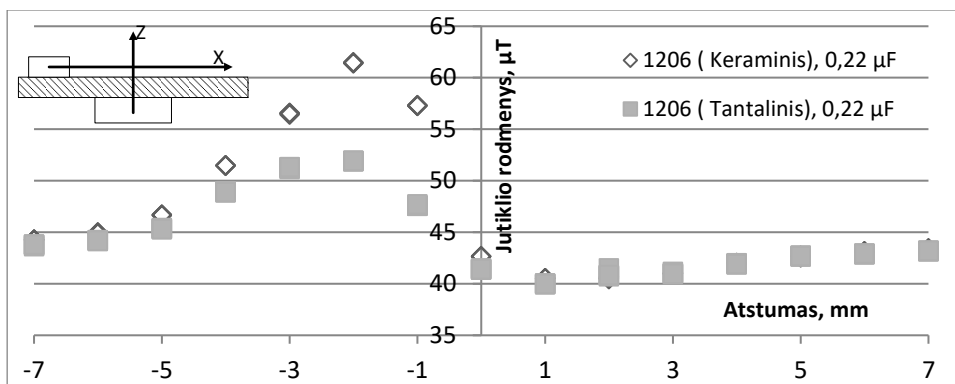
Vėliau buvo matuojama įvairių elementų, paveiktų stipriu magnetiniu lauku, įtaka jutklio jautriui, priklausomai nuo jų atstumo iki jutklio. Matavimų rezultatai pateikiami ortogonalinių ašių rodmenų modulio sunormuotomis absoliučiosiomis reikšmėmis (3.34 pav.). Iš pateikto grafiko galima pastebėti, kad mažiausias atstumas tarp SMD pasyviųjų elementų turi būti ne mažesnis nei 10 mm.



3.34 pav. Pasyviųjų elementų įtaka AMR jutkliui



3.35 pav. Įtamgtintų kondensatorių įtaka AMR jutikliui (Y ašimi)



3.36 pav. Įtamgtintų kondensatorių įtaka AMR jutikliui (X ašimi)

Siekiant nustatyti elementų padėties X ir Y ašių kryptimi įtaką AMR jutikliui buvo atlikti matavimai keičiant elemento padėtį priešingoje (PCB) plokštės pusėje. Iš 3.35 ir 3.36 pav. pateiktų tyrimo rezultatų matyti, jog AMR magnetinio lauko jutiklio LSM303DLH tilteliai yra išdėstyti ne lusto centre. Tyrimais nustatyta, kad įtamgtinti pasyvieji elementai kuria gana stiprų pastovųjį magnetinį lauką, turintį įtaką matavimams.

3.4. Skyriaus apibendrinimas

1. Žemės magnetinio lauko iškraipymai priklauso nuo automobilio konstrukcijos. Netgi panašios konstrukcijos arba to paties modelio automobiliai skirtingai veikia magnetinio lauko dedamąsias, kai automobilis įvažiuoja į parkavimo vietą ir iš jos išvažiuoja. Magnetinio lauko komponentių pokyčiai labai priklauso ir nuo to, kaip jutiklis ir automobilis orientuoti pasaulio ašių atžvilgiu. Tyrimais nustatyta, kad aiškiai pastebimas magnetinio lauko iškraipymas fiksuojamas, kai automobilis yra ne didesniu kaip 1 m atstumu nuo jutiklio. Automobiliui esant virš jutiklio kai kuriais atvejais fiksuojami kritiniai taškai, kuriuose visos trys magnetinio lauko komponentės nesiskiria nuo magnetinio lauko komponentių verčių laisvoje stovėjimo vietoje.

2. Atlikus elektromagnetinio poveikio magnetinio lauko jutikliams tyrimą pastebėta, kad LED valdiklių ir DC/DC keitiklių induktyvumo ritės turi didelę įtaką jutiklio nuskaitymams duomenims. Siekiant iki minimumo sumažinti induktyvumo ričių daromą įtaką, reikia, kad jos būtų ne mažesniu kaip 50–70 mm atstumu iki AMR jutiklio. Naudojant ekranuotas rites, atstumą galima sumažinti iki 30–40 mm.

3. Tyrimais ir modeliuojant nustatyta, kad dvilaidės maitinimo ir RS485 sąsajos linijos silpniau nei induktyvumo ritės veikia Žemės magnetinį lauką prie jutiklių. Tačiau, siekiant sumažinti linijų įtaką, jų laidai turi būti susukti, reikia ne mažesnio nei 50–70 mm atstumo iki AMR jutiklio ir optimizuoto spausdintinės plokštės (PCB) trasavimo.

4. Ilgalaikių pusės metų trukmės tyrimų metu magnetinių jutiklių parametrų kitimas nebuvo užfiksuotas. Tačiau vykdant tyrimą realiomis sąlygomis fiksuotas staigus kelių jutiklių įsimagnetinimas (dėl stipraus išorinio magnetinio lauko). Juos paveikus slopstančiu kintamuoju magnetiniu lauku, parametrai sugrįžo į pradinę būseną.

5. Tyrimu nustatyta, kad magnetinio lauko jutiklio ir pagalbinių elementų (R, C) įsimagnetinimas tampa pastebimas, kai magnetinio lauko indukcija viršija 2 mT. Išoriniam magnetiniam laukui viršijus 10 mT, pastebimas įmagnetėjimo įsisotinimas.

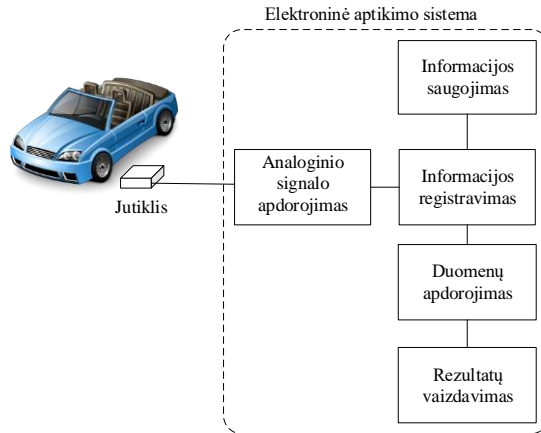
6. Nustatyta, kad AMR jutiklio jautris nepriklauso nuo šalia esančių elementų įsimagnetinimo, todėl atlikus papildomą jutiklio kalibravimą galima atlikti statinį lauko matavimą arba dinaminį lauko matavimą be papildomo jutiklio kalibravimo.

7. Jei eksploatacijos metu jutiklio aplinkoje yra stiprių ML (daugiau nei 2 mT), prieš matuojant statinį ML būtina jutiklį kalibruoti arba išmagnetinti slopstančiu kintamuoju magnetiniu lauku.

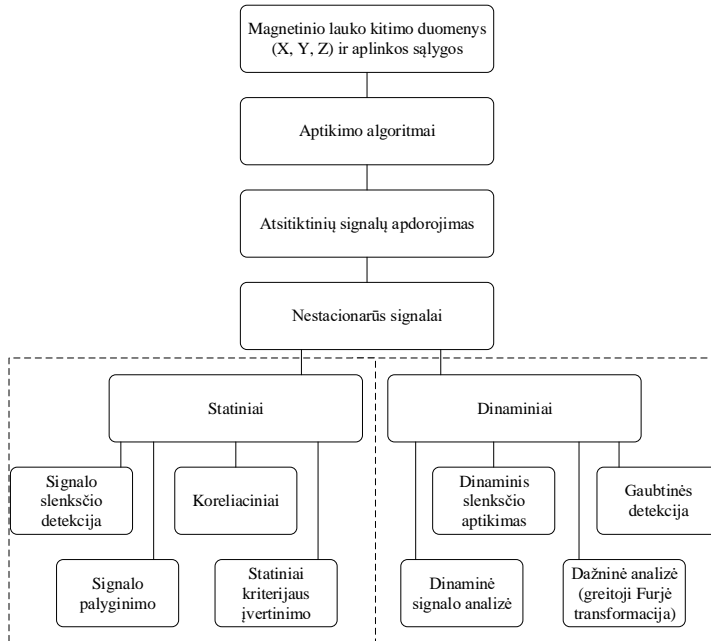
4. EKSPERIMENTINIAI TRANSPORTO PRIEMONIŲ APTIKIMO TYRIMAI

4.1. Transporto priemonių aptikimo algoritmų tyrimas

Automobilių aptikimo sistemoje gaunami magnetinio lauko pokyčio signalai, analizuojamas jų kitimas ir pagal tai nustatomas automobilio buvimo faktas. Sprendžiant šį uždavinį galima taikyti įvairius signalo apdorojimo metodus ir aptikimo algoritmus. Automobilių aptikimo sistemos, kurioje bus taikomi ir realizuojami algoritmai, struktūrinė schema pateikta 4.1 pav. Pagrindiniu objektu yra laikomas automobilis, kurį reikia aptikti (neaptikti).



4.1 pav. Automobilių aptikimo sistemos komplekso struktūrinė schema

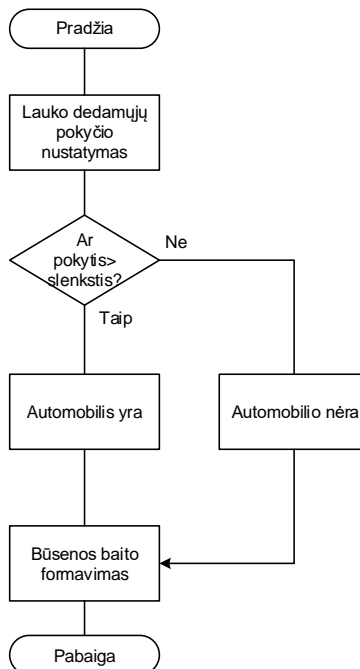


4.2 pav. Galimi magnetinio signalo apdorojimo algoritmai ir sintezė

Esama daug įvairių algoritmų, skirtų skaitmeniniams signalams apdoroti [29]. Algoritmo esmė yra kuo paprasčiau, greičiau ir išnaudojant kuo mažiau išteklių išspręsti uždavinį. Konkretus algoritmų panaudojimas priklauso nuo signalų rūšies ir panaudojimo srities. Algoritmų panaudojimo magnetinio lauko signalui analizuoti ir automobiliui aptikti galimybės pateiktos 4.2 pav. Šiuo atveju magnetinio lauko signalas yra nestacionarus ir atsitiktinis, o tai apsunkina uždavinio sprendimą, nes negalima panaudoti algoritmų, skirtų pasikartojantiems ar harmoniniams signalams.



4.3 pav. Magnetinio lauko matavimų atlikimo seka

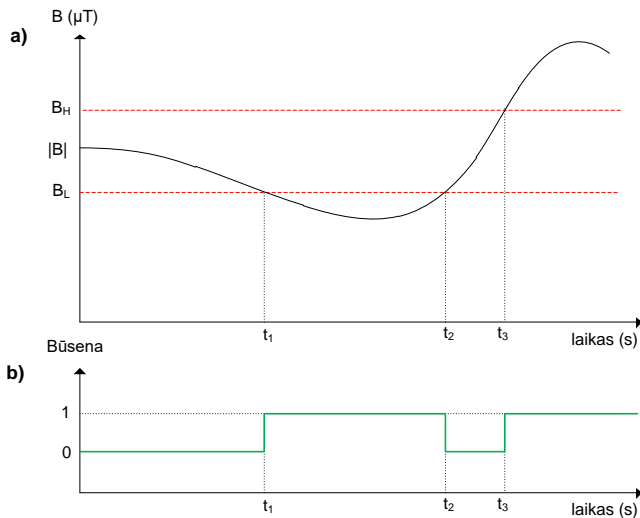


4.4 pav. Būsenos nustatymo modulio veikimo algoritmas

4.2. Amplitudinis slenkstinis aptikimo algoritmas

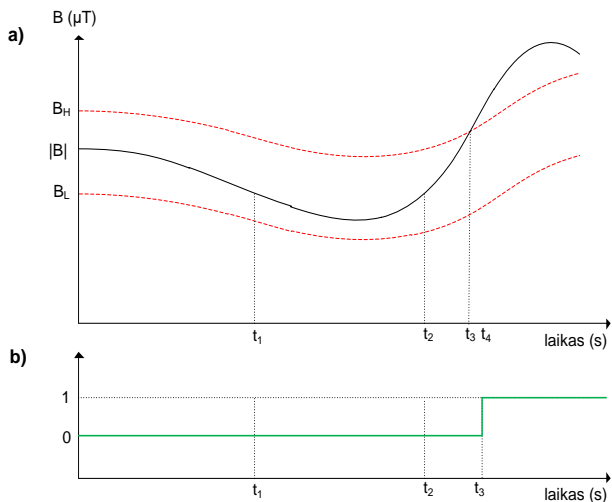
Pats paprasčiausias automobilio aptikimo algoritmas yra išmatuoti visas tris magnetinio lauko dedamąsias ir apskaičiuoti magnetinio lauko modulį. Pagal modulio pokyčio dydį yra nustatomas automobilio buvimo faktas. Automobilio aptikimas vyksta sekant signalo amplitudę. Nustatoma viršutinė ir apatinė magnetinio lauko pokyčio slenkstinės ribos. Žemės magnetinis laukas gali varijuoti. Automobilis aptinkamas, kai yra tenkinama ši sąlyga – magnetinio lauko modulio pokytis turi būti didesnis už viršutinę ar mažesnis už apatinę ribą. Automobilio magnetinio lauko būsenos nustatymo signalai pateikti 4.5 pav.

Įprastinis slenkstinis aptikimo algoritmas turi daug trūkumų. Esant ilgalaikiams signalo pokyčiams dėl temperatūros svyravimų, fiksuotos magnetinio lauko pokyčių slenkstinės reikšmės nesikeičia. Dėl šių priežasčių tikėtinas klaidingas automobilio aptikimas. 4.5 pav. *a* dalyje laiko momentu t_1 magnetinio lauko pokytis viršija slenkstinę ribą, nors tuo metu automobilio nėra. Magnetinio lauko pokytis šiuo atveju nulemtas temperatūros svyravimų. Taigi laiko momentu t_1 įvyksta klaidingas aptikimas. Norint išvengti tokio klaidingo suveikimo turi būti įvertintas lėtas signalo kitimas dėl pašalinių veiksnių.



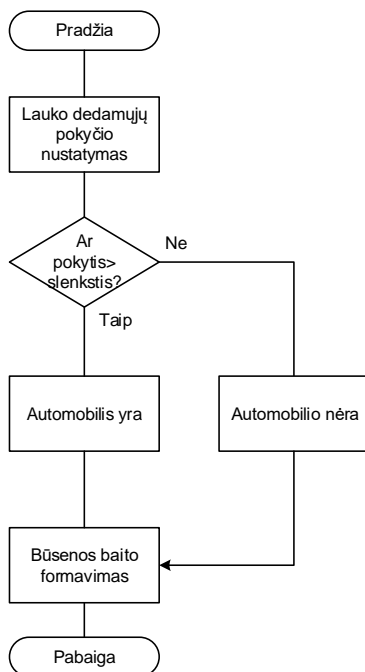
4.5 pav. Slenkstinis aptikimo algoritmas su fiksuota slenkstine riba: *a* – magnetinio lauko signalas, *b* – būsenos signalas

Slenkstinis aptikimo algoritmas papildomas kintamomis slenkstinėmis ribomis. Slenkstis keičiasi adaptyviai atkartodamas lėtą magnetinio lauko signalo dreifą. Kaip matyti 4.6 pav., laiko momentu t_1 signalas nebevirsšija nustatyto slenksčio, aptikimas įvyksta laiko momentu t_3 , kada pasirodo automobilis.



4.6 pav. Slenkstinis aptikimo algoritmas su adaptyvia slenkstine riba: *a* – magnetinio lauko signalas, *b* – būsenos signalas

Šis aptikimo algoritmas eliminuoja lėtą signalo pokytį dėl išorinio poveikio, bet trumpalaikiai trukdžiai lieka nepašalinti. Taikyti šį aptikimo algoritmą galima, jeigu sistemoje nėra trumpalaikių trukdžių. Jo privalumas yra tas, kad pats algoritmas nereikalauja sudėtingų skaičiavimų.



4.7 pav. Būsenos nustatymo modulio veikimo algoritmas

Slenksčio vertė gali būti keičiama iš stovėjimo aikštelės valdiklio siunčiant atitinkamą komandą. Slenksčio vertė gali būti nustatoma atsižvelgiant į konstrukcinius sprendimus, klimato sąlygas ir pan.

4.3. Aptikimo būsenos kriterijus

Pagal magnetinio lauko pokytį stovėjimo vietoje reikia spręsti apie stovėjimo vietos užimtumą. Tuo tikslu reikia suformuluoti būsenos kriterijų, pagal kurio reikšmę būtų priimamas sprendimas, ar stovėjimo vieta aikštelėje „laisva“, ar „užimta“. Aptikimo kriterijui suformuluoti panaudotos anksčiau (2.5 poskyryje) minėtos prielaidos ir apribojimai.

Galimos kelios dviprasmiškos situacijos, kuriose neįmanomas „dinaminis“ automobilių aptikimas. Automobiliui pravažiuojant virš jutiklio arba apsisukant, jutiklio reakcija nėra nesiskiria nuo reakcijos sustojimo metu. Dviprasmiškos situacijos susidaro pakraunant ar iškraunant prekes, įsėdant ar išlipant keleiviams. Nors tuo metu automobilis stovi vietoje, tačiau jutiklio reakcija gali būti panaši į reakciją automobiliui judant.

Automobiliui užvažiuavus virš jutiklio, galima išmatuoti visas tris magnetinio lauko dedamąsias, ir tik ši informacija gali būti panaudota statiniam kriterijui formuluoti.

Kvadratinis kriterijus. Labai paprastas kriterijus, kuriam suskaičiuoti reikia labai nedaug valdiklio išteklių:

$$K = \sqrt{(B_x - B_{x0})^2 + (B_y - B_{y0})^2 + (B_z - B_{z0})^2}; \quad (4.1)$$

čia B_x, B_y, B_z – išmatuotos magnetinės indukcijos vertės esamuju momentu; B_{x0}, B_{y0}, B_{z0} – magnetinės indukcijos vertės laisvoje stovėjimo aikštelėje esamojo momento temperatūroje. Šį kriterijų labai paprasta realizuoti valdiklyje, tačiau yra trūkumų: labai didelis jautris temperatūros poveikiui (reikia fiksuoti visų 3 tiltų temperatūros koeficientus ir skaičiuoti B_{x0}, B_{y0}, B_{z0} vertes), mažas atsparumas gretimose stovėjimo vietose esantiems automobiliams.

Vektorinis kriterijus:

$$K = |\cos \alpha - \cos \alpha_0| + |\cos \beta - \cos \beta_0| + |\cos \gamma - \cos \gamma_0|; \quad (4.2)$$

čia $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$ – magnetinio lauko vektoriaus kampų kosinusai užvažiuavus automobiliui; $\cos \alpha_0, \cos \beta_0, \cos \gamma_0$ – magnetinio lauko vektoriaus kampų kosinusai laisvoje stovėjimo aikštelėje esamojo momento temperatūroje.

$$\cos \alpha = B_x / M,$$

$$\cos \beta = B_y / M,$$

$$\cos \gamma = B_z / M;$$

$M = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$ – magnetinio lauko modulis bet kurioje automobilio padėtyje aikštelėje.

Šio kriterijaus privalumas – labai didelis jautris ir gerokai didesnis už kvadratinio kriterijaus atsparumas temperatūros poveikiui todėl, kad kriterijui formuluoti naudojami magnetinio lauko indukcijos komponentų santykiai. Atliekant

šio kriterijaus temperatūros kompensaciją pakanka kompensuoti tik vieną dydį – kriterijų (vietoje trijų kvadratinio kriterijaus atveju). Su šiuo kriterijumi galima aptikti automobilį, esantį už 2 m, tačiau ir gretimoje stovėjimo vietoje esantis automobilis (ypač didesnis) gali lemti klaidingą sprendimą.

Kombinuotasis vektorinis kriterijus. Šis kriterijus sukompiliuotas iš kvadratinio ir vektorinio kriterijų. Pasinaudojus faktu, kad Z komponentė užvažiavus automobiliui padidėja, o šalia automobilio sumažėja, galima padidinti jutiklio jautrių užvažiavus automobiliui ir kartu slopinti šalia esančių automobilių įtaką.

$$K = |\cos \alpha - \cos \alpha_0| + |\cos \beta - \cos \beta_0| + (B_z/B_{z0} - 1). \quad (4.3)$$

Iš pirmo žvilgsnio šis kriterijus atrodo nelogiškas, nes sumuojami skirtingi dydžiai – kosinusai ir santykis, tačiau ir kosinusai, ir santykis yra nedimensiniai dydžiai. Šio kriterijaus privalumai – tai, kad jautris ir temperatūrinis stabilumas palyginamas su vektorinio kriterijaus parametrais, ir atsparumas šalia stovėjimo vietos esantiems automobiliams.

Kai kuriais atvejais galima pastebėti, kad magnetinio lauko Z komponentė užvažiavus automobiliui sumažėja 20 %...50 %... ir daugiau procentų (labai platus kritinis taškas). Tokiose situacijose kvadratinis ir vektorinis kriterijai tiksliai aptiktų automobilį, o kombinuotasis kriterijus neaptiktų. Šią situaciją galima gana paprastai išspręsti naudojant papildomą loginę sąlygą L :

$$K = |\cos \alpha - \cos \alpha_0| + |\cos \beta - \cos \beta_0| + L(B_z/B_{z0} - 1); \quad (4.4)$$

čia $L = 1$, kai $(B_z/B_{z0} - 1) > -Kd$, $L = -1$, kai $(B_z/B_{z0} - 1) < -Kd$, Kd – kritinio taško slenkstis.

Vienas iš šio kriterijaus trūkumų – reikia kompensuoti temperatūros įtaką kosinusių sumai ir Z komponentei, arba kriterijų į „kairę“ ir „dešinę“ nuo kalibravimo taško temperatūros.

Automobilio konstrukcinis modelis sudėtingesnis nei paprastos geometrinės figūros. Atlikti eksperimentiniai matavimai parodė, kad įvairių konstrukcijų automobiliai skirtingai veikia lokalųjį Žemės magnetinį lauką.

Išanalizavus matematinės magnetinio lauko išraiškas, buvo prieita prie išvados, kad automobilis, esantis virš magnetinio jutiklio, ne visada padidina magnetinio lauko Z dedamąją, o automobilis, stovintis gretimoje stovėjimo vietoje, ne visada sumažina magnetinio lauko Z dedamąją.

Magnetinio lauko kitimas automobiliui judant virš jutiklio yra beveik neprognozuojamas. Automobiliui atsidūrus kritiniame taške jį aptikti galima tik pasitelkus kompleksinį aptikimo kriterijų. Visiems trims nagrinėtiems aptikimo kriterijams yra būtina temperatūros poveikio kompensacija. Šiuo metu nėra aiškaus atsakymo, kurį iš trijų aptikimo kriterijų taikyti. Norint tai išsiaiškinti reikia atlikti tyrimus su šiais kriterijais ir įvertinti automobilių aptikimo efektyvumą.

4.4. Magnetinio lauko kritinio taško aptikimo galimybės

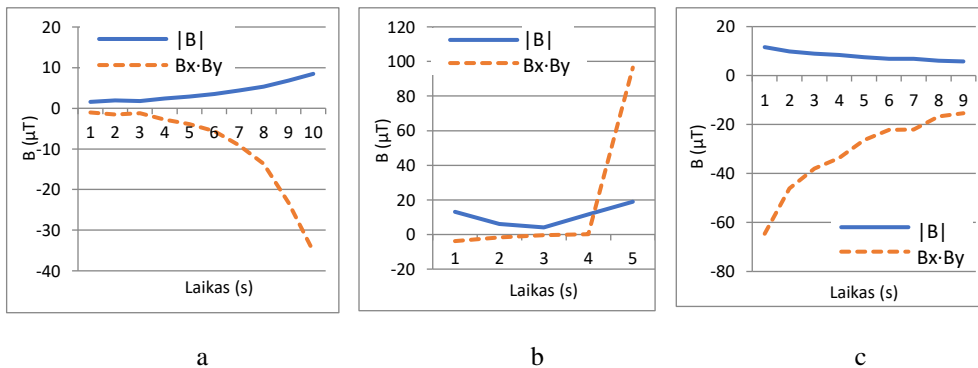
Išanalizavus magnetinio lauko kitimo priklausomybes, kai į stovėjimo vietą ar į gretimą stovėjimo vietą įvažiuoja automobilis, pastebima, kad yra nemažai atvejų, kai

į aikštelę įvažiuavus automobiliui magnetinio lauko pokytis yra nežymus, t. y. darosi rizikinga spręsti stovėjimo vietos užimtumo klausimą – yra automobilis ar jo nėra.

Buvo bandoma surasti įvairios papildomos informacijos, padedančios minėtą uždavinį išspręsti teisingai. Pirmiausia pastebėta, kad kritinio taško zonos plotis yra nedidelis. Antra – tai, kad santykinis magnetinio lauko dedamųjų kitimas automobiliui įvažiuojant į kritinį tašką (išvažiuojant iš jo) ir įvažiuojant į aikštelę (išvažiuojant iš jos) yra skirtingas [55]. Taigi kritiniame taške aptikimo metodai gali būti tokie:

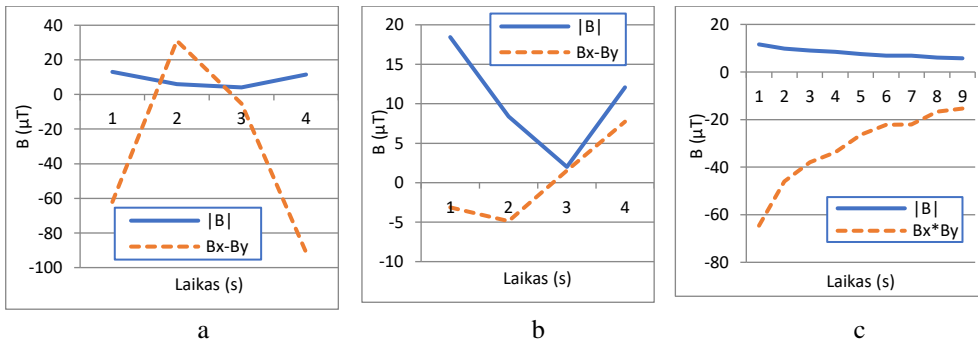
1. Vietoje vieno trijų komponentių magnetinio jutiklio galima naudoti du vienos komponentės (Z dedamosios) jutiklius, išdėstytus vienas nuo kito apie 0,5 m atstumu išilgai aikštelės. Tada, jei vienas iš magnetinių jutiklių bus kritiniame taške, kitas magnetinis jutiklis tiksliai nustatys automobilio buvimą aikštelėje. Tai alternatyvus sprendimo būdas. Tačiau neigiama jo pusė yra didesnė aptikimo sistemos kaina ir sudėtingesnė bei didesnė bendroji sistemos konstrukcija.

2. Kaip papildomą informaciją panaudoti skirtingą magnetinio lauko X ir Y dedamųjų kitimą prie kritinio taško zonos ir automobilio priekio ar galo (įvažiuojant į aikštelę ir iš jos išvažiuojant). Pavyzdžiui, pastebima, kad įvažiuojant ar išvažiuojant X ir Y dedamųjų pokyčiai yra priešingų ženklų, o prie kritinio taško šie pakitimai yra ir tų pačių ženklų, ir priešingų, todėl, sudauginus minėtų dedamųjų pokyčius ir atlikus šios sandaugos integravimą (sumavimą) nustatytame magnetinio lauko modulio ar kito pagrindinio aikštelės būsenos aptikimo kriterijaus kitimo diapazone, pagal gauto rezultato ženklą arba dydį galima nustatyti, yra automobilis (kritiniame taške) ar jo išvis nėra aikštelėje. 4.8 pav. pavaizduotose priklausomybėse matomas magnetinio lauko X ir Y dedamųjų sandaugų ir magnetinio lauko modulių kitimas automobiliui įvažiuojant į aikštelę (4.8 pav., *a*), kritiniame taške (4.8 pav., *b*) ir išvažiuojant iš aikštelės (4.8 pav., *c*). Po analizės galima daryti išvadą, kad ši papildoma informacija gali padėti tiksliai nustatyti aikštelės užimtumą (aptikti kritinį tašką).



4.8 pav. Magnetinio lauko X ir Y dedamųjų sandaugų $Bx \cdot By$ ir magnetinio lauko modulių $|B|$ kitimas

3. Panašius rezultatus galima gauti kaip papildomą informaciją priimant ne magnetinio lauko X ir Y dedamųjų sandaugą, o skirtumą $Bx - By$. Tam pačiam automobiliui įvažiuojant į aikštelę, esant kritiniame taške ir išvažiuojant iš aikštelės, analogiškos priklausomybės kaip ir 2 punkte pavaizduotos 4.9 pav.



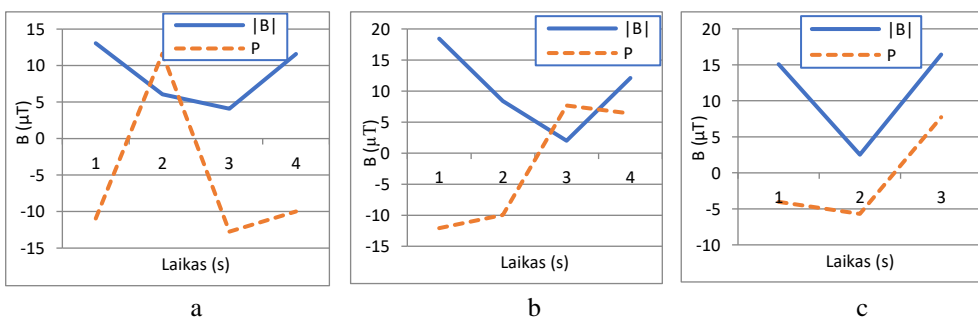
4.9 pav. Magnetinio lauko X ir Y dedamųjų skirtumo $B_x - B_y$ ir magnetinio lauko modulių $|B|$ kitimas

Šiuo atveju, kai papildoma kritinio taško informacija gaunama iš magnetinio lauko X ir Y dedamųjų skirtumo, skirtumo integravimo ženklas jau nėra kritinio taško požymis; požymiu gali būti integralo reikšmės dydis (prie kritinio taško jis yra mažesnis).

Gana įdomi papildoma kritinio taško aptikimo informacija yra magnetinio lauko X ir Y dedamųjų skirtumo ir šių dedamųjų modulio santykis, t. y.

$$P = \frac{B_x - B_y}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}} \quad (4.5)$$

4.10 pav. pavaizduotos šio santykio (parametro) P priklausomybės (automobiliui įvažiuojant į aikštelę, esant prie kritinio taško ir išvažiuojant iš aikštelės). Matomas įdomus reiškinys: automobiliui įvažiuojant į aikštelę ir iš jo išvažiuojant, parametras P beveik nekinta ir jo absoliučioji reikšmė yra didelė. O automobiliui esant prie kritinio taško parametras žymiai kinta ir yra gerokai mažesnės reikšmės. Dar arčiau kritinio taško bus daug mažesnė parametro P integralo reikšmė.



4.10 pav. Magnetinio lauko parametru P ir magnetinio lauko modulių $|B|$ kitimas

4.4.1. Aptikimo kriterijaus analizė

Taikant šiek tiek modifikuotą (4.3) išraišką papildomos informacijos kriterijų P , modeliavimo paketu „Matlab“ buvo sumodeliuotas automobilio aptikimas. Vietoje magnetinio lauko X ir Y dedamųjų pokyčių sandaugos buvo panaudotas nuo temperatūros nepriklausomas parametras – krypties kosinusų pokyčių sandauga CP :

$$CP = \left(\frac{B_x}{|B|} - \frac{B_{x0}}{|B_0|} \right) \cdot \left(\frac{B_y}{|B|} - \frac{B_{y0}}{|B_0|} \right); \quad (4.6)$$

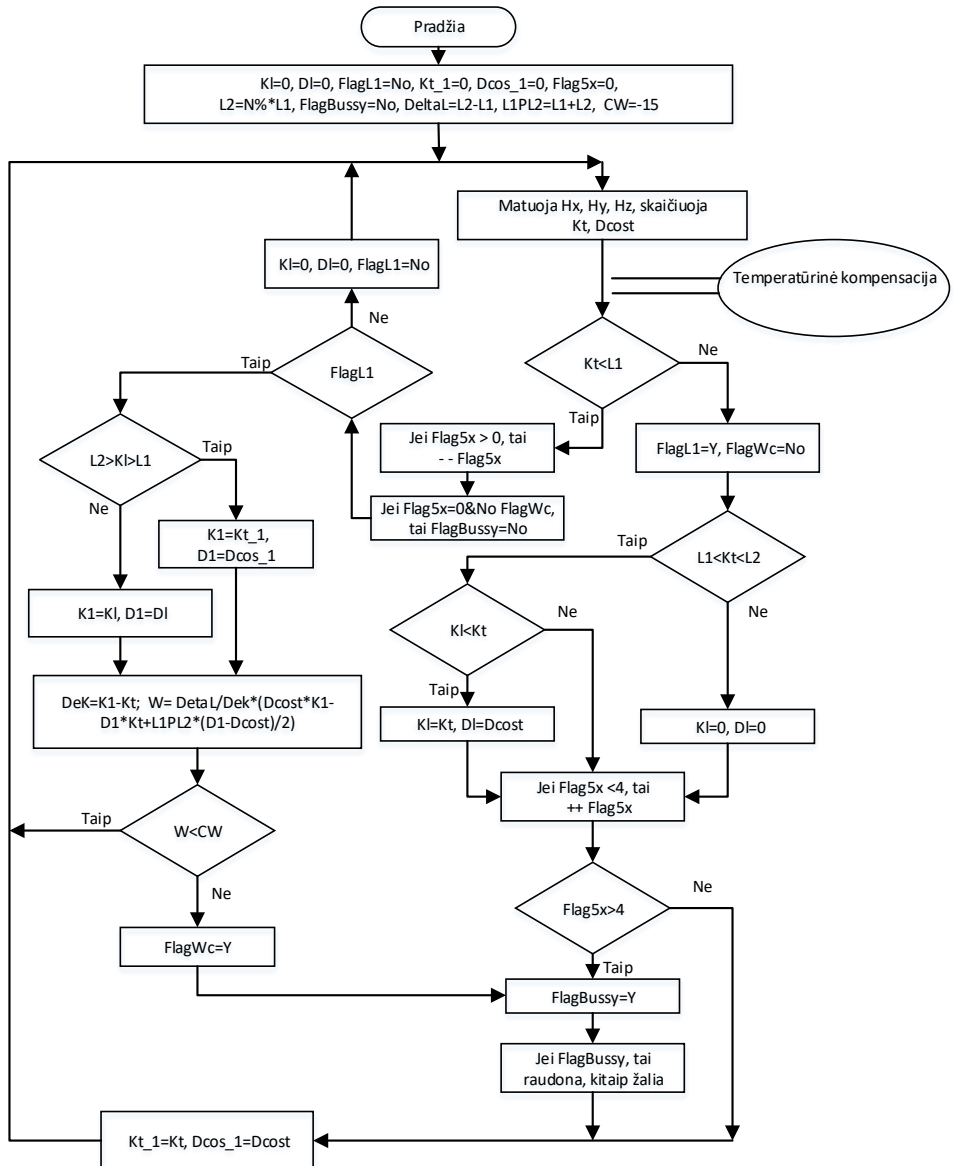
čia $|B| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$ – magnetinio lauko modulis bet kurioje automobilio padėtyje stovėjimo vietoje; $|B_0| = \sqrt{B_{0x}^2 + B_{0y}^2 + B_{0z}^2}$ – magnetinio lauko modulis pradinėje automobilio padėtyje stovėjimo vietoje (stovėjimo vieta tuščia).

Modeliuojant buvo pasirinktas kriterijus K . Kriterijaus forma atkartoja magnetinio lauko modulio pokytį įvažiuojant automobiliui. Modeliavimo algoritmo schema pateikta 4.11 pav.

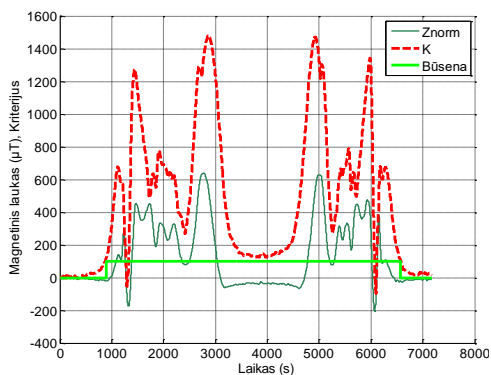
$$K = 1000 \cdot \left(\left| \frac{B_x}{|B|} - \frac{B_{x0}}{|B_0|} \right| + \left| \frac{B_y}{|B|} - \frac{B_{y0}}{|B_0|} \right| + \left(\frac{B_z}{B_{z0}} - 1 \right) \right). \quad (4.7)$$

Pasiūlytas kriterijus K sumažina šoninių stovėjimo vietų būsenos įtaką ir padaro statesnius kriterijaus šlaitus. Kadangi pirmieji du nariai nuo temperatūros mažai priklausomi (santykių $\frac{B_x}{|B|}$ ir $\frac{B_y}{|B|}$ skaitiklis ir vardiklis nuo temperatūros kinta labai panašiu dėsniu), tai ir visas kriterijus nuo temperatūros priklausys mažiau nei magnetinio lauko modulis.

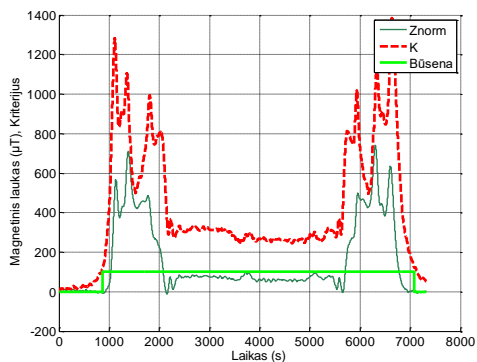
L1 – Statinis kriterijus, L2 – Antro lygio statinis kriterijus,
 Kt – Kriterijus laiko momentu t, Dcost – Cos skirtumų sandauga laiko momentu t,
 Kl – Kriterijus tarp L1 ir L2, Dl – Cos skirtumų sandauga tarp L1 ir L2,
 Kt_1 – kriterijus 1 matavimu atgal, Dcos_1 – Cos skirtumų sandauga 1 matavimu atgal,
 FlagL1 – iškeliami, kai kriterijus viršija L1, Flag5x – iškeliami, kai kriterijus 5x viršija L1,
 FlagBussy – vėliava, kai užimta, FlagWc – vėliava „Well criteria“ – „užimta duobėje“
 CW – duobės kriterijus



4.11 pav. Būsenos nustatymo algoritmo struktūra

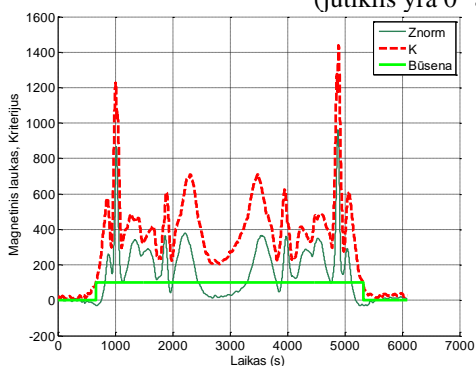


a)

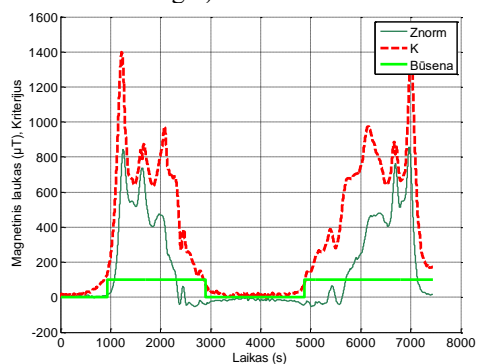


b)

4.12 pav. Aptikimo modeliavimo su skirtingų konstrukcijų automobiliais rezultatai (jutiklis yra 0° automobilio atžvilgiu)

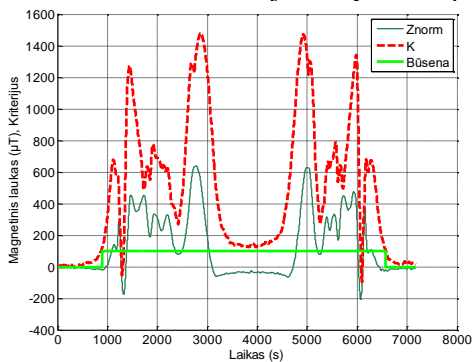


a)

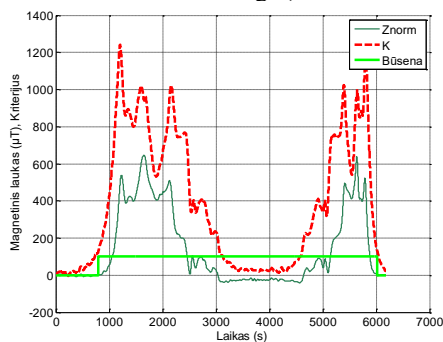


b)

4.13 pav. Aptikimo modeliavimo su skirtingų konstrukcijų automobiliais rezultatai (jutiklis yra 135° pasuktas automobilio atžvilgiu)



a)



b)

4.14 pav. Aptikimo modeliavimo su skirtingų konstrukcijų automobiliais rezultatai (jutiklis yra 90° pasuktas automobilio atžvilgiu)

4.12–4.14 pav. pateikti modeliavimo rezultatai. Modeliavimo metu buvo pasirinktos šios sąlygos: kritinio taško arba įvažiavimo į automobilių stovėjimo vietą

ir išvažiavimo iš jos aptikimo procedūrą reikia pradėti, kai pasirinktas kriterijus K yra tarp ribinės reikšmės K_r (ribinė kriterijaus reikšmė – tai toks kriterijaus dydis, kuriam esant laikoma, kad aikštelėje yra automobilis) ir dvigubos ribinės reikšmės $-2 \cdot K_r$. Aikštelės būsenos nustatymo procedūra, kurios metu pagal pasirinktą papildomą informaciją (šiuo atveju – CP) priimamas sprendimas, pradedama, kai tik kriterijaus reikšmė tampa mažesnė už ribinę. Iš 4.13 pav. *b* dalyje pateiktų modeliavimo rezultatų matoma, kad, deja, kai jutiklis vienos konstrukcijos automobilio atžvilgiu buvo pasuktas 135° kampu, algoritmas suveikė klaidingai: nebuvo nustatytas automobilio išvažiavimas iš aikštelės. Kitais atvejais algoritmas veikė gerai (tiksliai): buvo fiksuojami automobilių išvažiavimai bei įvažiavimai ir, svarbiausia, buvo atpažintas kritinis taškas.

Jei atskiri automobilio pastatymo nustatymo metodai nebūtų pakankamai tikslūs ir efektyvūs, galima taikyti kombinuotą metodą. Jis pasižymi kelių prieš tai išnagrinėtų metodų taikymu vienu metu. Galutinį sprendimą algoritmas gali priimti labai įvairiai: arba pagal patikimumo hierarchiją, arba „daugumos balsų“ principu, arba pagal identifikavimo svarbą ir panašiai.

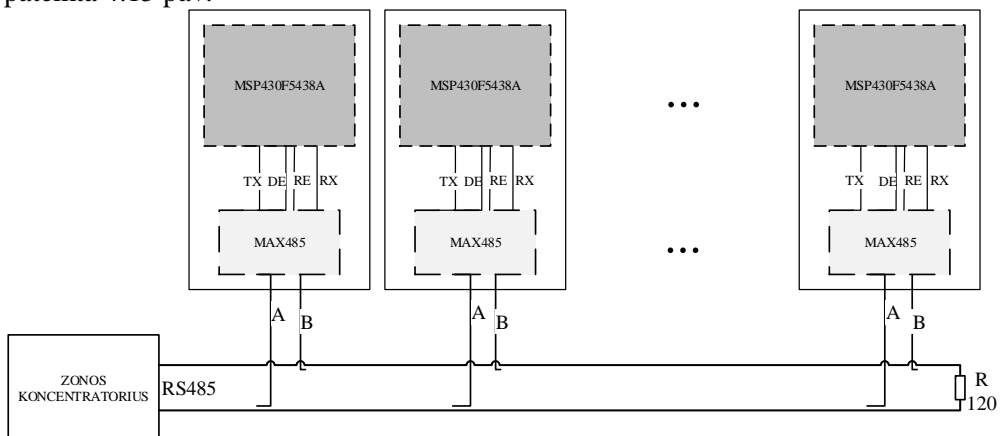
4.5. Ilgalaikio jutiklių stabilumo tyrimas

AMR jutiklio jautrio ir pradinio tiltelio išbalansavimo (angl. *offset*) kitimas bėgant laikui gali lemti klaidingą stovėjimo vietos būsenos nustatymą. Skirtingai nuo temperatūros (kuria galima išmatuoti ir kurios poveikį galima kompensuoti), senėjimo procesas yra neprognozuojamas. AMR jutiklio techninėje dokumentacijoje žinių apie parametrų kitimą laikui bėgant nėra.

Automobilių stovėjimo aikštelėje buvo sumontuoti 6 automobilių aptikimo jutikliai, sujungti į vietinį RS485 protokolu paremtą tinklą. Komunikacijai tarp zonos koncentratoriaus ir jutiklių panaudota RS485 sąsaja. Naudojant šią sąsają duomenis galima perduoti iki 1200 m atstumu (100 kbit/s sparta).

Jutiklio valdiklis (MSP430F5438A) perduoda duomenis per USART. USART signalas konvertuojamas į diferencinį EIA485 standarto signalą.

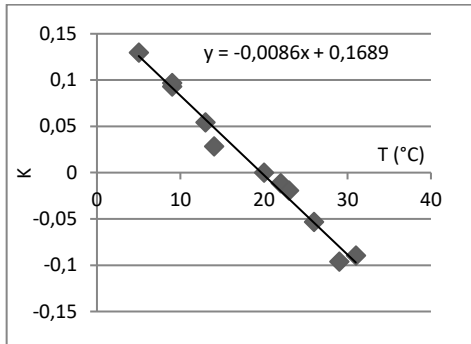
Kiekvienas jutiklis turi savo adresą. Apibendrinta ryšio linijų struktūra pateikta 4.15 pav.



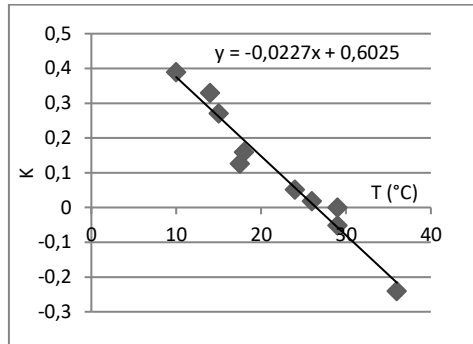
4.15 pav. Komunikacijos tarp zonos koncentratoriaus ir jutiklių struktūra

Visų jutiklių Y ašis buvo orientuota automobilių statymo kryptimi, X ašis – skersai automobilių, o Z ašis orientuota vertikaliai. Jutiklių būseną, temperatūra ir visų magnetinio lauko komponentių reikšmės buvo perduodamos į stovėjimo aikštelės zonos koncentratorių, įjungtą į vietinį kompiuterių tinklą. Neužimtos aikštelės jutiklių magnetinio lauko komponentių reikšmės ir temperatūra buvo fiksuojamos 6 mėnesius 1–2 kartus per parą.

Rezultatų patikimumui padidinti buvo fiksuojama nuo 8 iki 10 magnetinio lauko ir temperatūros taškų ir atliekamas rezultatų vidurkinimas. Stebėjimo rezultatų vidurkiai pateikti 4.16–4.18 pav., o suskaičiuotos galutinės aptikimo kriterijaus reikšmės pavaizduotos 4.19 pav.

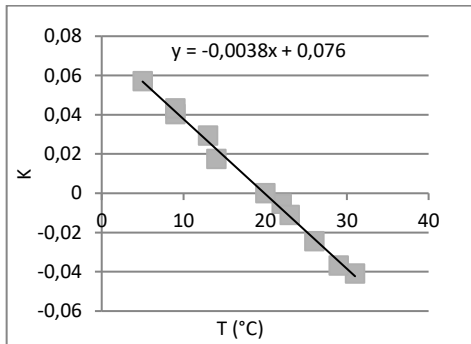


a)

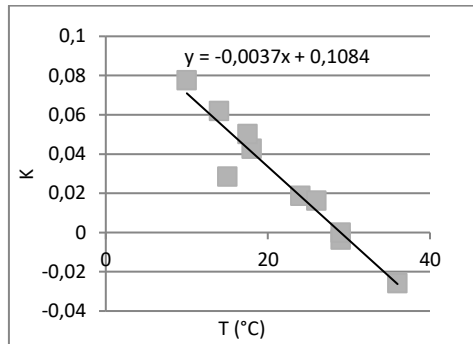


b)

4.16 pav. Neužimtos stovėjimo aikštelės jutiklių X komponentės koeficientai

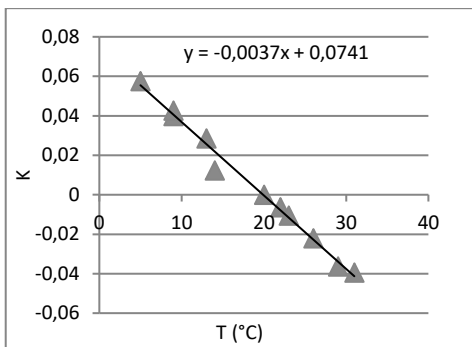


a)

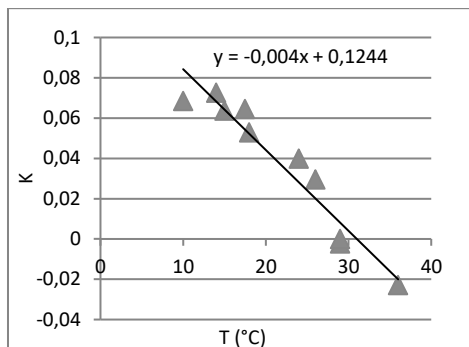


b)

4.17 pav. Neužimtos stovėjimo aikštelės jutiklių Y komponentės koeficientai

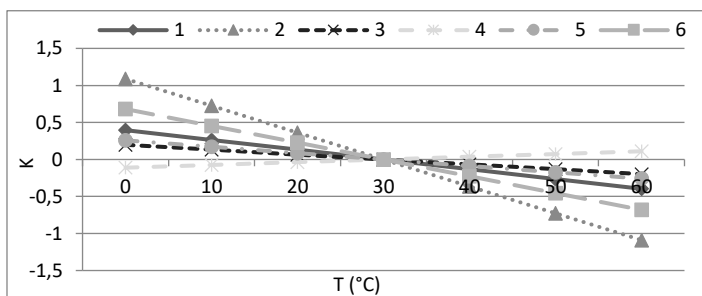


a)

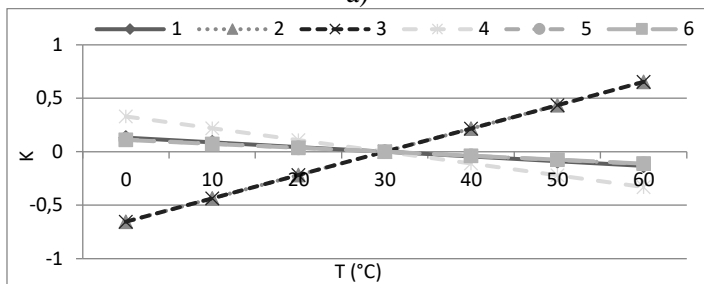


b)

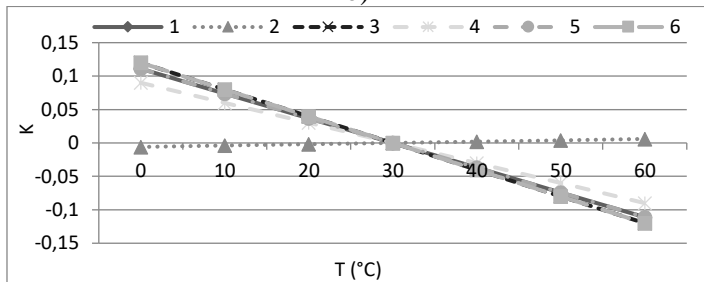
4.18 pav. Neužimtos stovėjimo aikštelės jutiklių Z komponentės koeficientai



a)

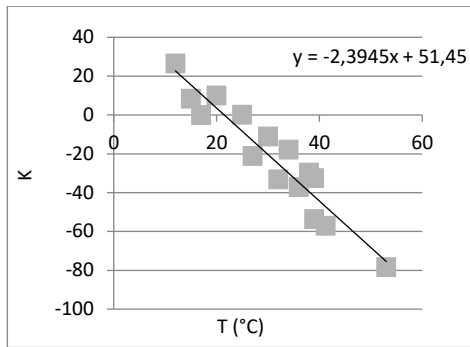


b)

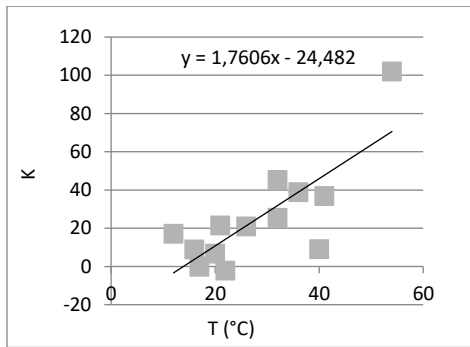


c)

4.19 pav. Neužimtos stovėjimo aikštelės jutiklių ($a - X$, $b - Y$, $c - Z$) komponentių priklausomybė nuo temperatūros (sunormuota esant 30 °C)



a)



b)

4.20 pav. Pirmojo ir antrojo jutiklių kriterijaus pokyčiai, priklausomi nuo temperatūros

Galima konstatuoti, kad šie tirti magnetiniai jutikliai yra labai skirtingi. Antrasis jutiklis pasižymi mažiausiu jautriu, atsiktine ir skirtinga nuo kitų jutiklių priklausomybe nuo temperatūros. Šeštojo jutiklio jautris magnetiniam laukui niekuo neišsiskiria iš kitų, tačiau jis pasižymi didžiausiu naudingo signalo (kriterijaus) triukšmu – ± 50 kriterijaus vienetų. Penktasis visais atžvilgiais „geriausias“ jutiklis pasižymi mažiausiu kriterijaus triukšmu ir pakankamu jautriu. Trečiasis jutiklis pasižymi didžiausiu X komponentės pradinio lygio poslinkiu ir didžiausia temperatūra jutiklio aplinkoje (korpuso kameroje). Pirmasis jutiklis yra vidutiniškai stabilus, vidutiniškai jautrus, tačiau tam tikru metu buvo pastebėtas staigus visų magnetinio lauko komponentių pokytis neužimtoje aikštelėje. Galiausiai jutiklis pradėjo klaidingai nustatinėti stovėjimo vietos būseną. Galimos dvi šio pasikeitimo priežastys:

a) pasikeitė jutiklio padėtis Žemės magnetinio lauko atžvilgiu (užvažiavus didelio svorio automobiliui) arba dėl vibracijos pasikeitė plokštės padėtis kameroje;

b) jutiklio elementai buvo paveikti stipriu magnetinio lauko impulsu ir valdiklio išvadai įgavo liekamąją įmagnetėjimą (paleidžiant variklį, priartinant stipriai įmagnetintą objektą).

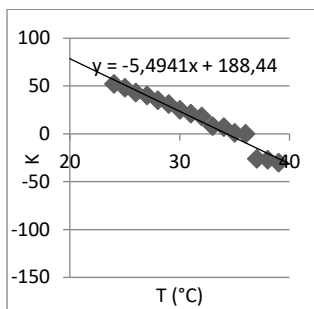
Po apžiūros ir bandymų pirmoji priežastis (a) atrodo mažiau tikėtina. Pirmasis jutiklis buvo išmagnetintas slopstančiu kintamuoju magnetiniu lauku. Po šios operacijos X , Y , Z komponentių vertės sugrįžo į tarpinę padėtį tarp fiksuotų. Po kalibravimo jutiklis funkcionavo normaliai, todėl tikėtinau, kad buvo išmagnetinę valdiklio MSP430 išvadai. Vėliau, naudojant stiprų magnetą, buvo nustatyta, kad valdiklio išvadai gali išmagnetinti ir sukurti magnetinį lauką, sulyginamą su lauko pokyčiais, kuriuos sukelia automobilių užvažiavimas virš jutiklio.

Pažymėtina, kad nė vieno jutiklio kriterijaus dispersija neturi aiškios priklausomybės nuo temperatūros, nors buvo galima tikėtis dispersijos didėjimo didėjant jutiklio temperatūrai.

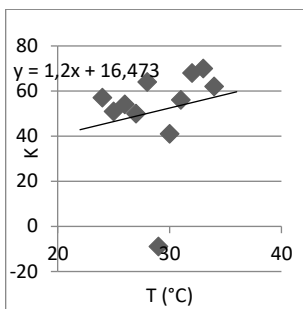
Reikia pabrėžti, kad nors visi jutikliai turi skirtingą jautrį, duomenų poslinkį ir temperatūrinius atskirų komponentių koeficientus, visose stovėjimo vietose aikštelės būseną buvo nustatoma tiksliai. Tai lėmė adaptyvioji temperatūros poveikio kompensacija ir kompleksinis-vektorinis būsenos nustatymo kriterijus.

Stebimos jutiklių temperatūros yra 10–20 °C aukštesnės už aplinkos ir skiriasi tarpusavyje, esant vienodoms aplinkos sąlygoms. Yra kelios galimos priežastys:

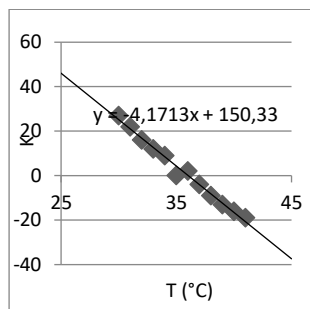
- a) tamsus grindinys saulės atokaitoje įkaista labiau;
- b) kai kurie jutikliai pakliūva į šešėlį;
- c) jutiklio komponentai – valdiklis ir įtampos reguliatorius – generuoja skirtingą šilumos kiekį;
- d) šiluma iš jutiklio korpuso kameros pasišalina per oro sluoksnį, pats magnetinio lauko jutiklis kameroje gali būti skirtingose pozicijose.



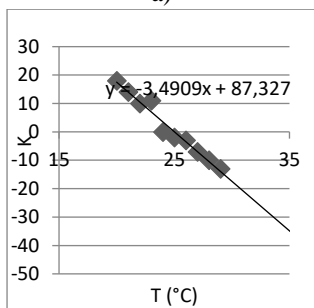
a)



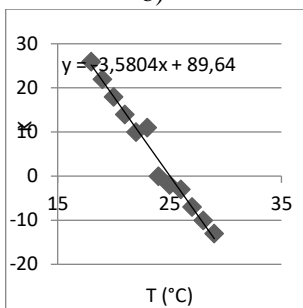
b)



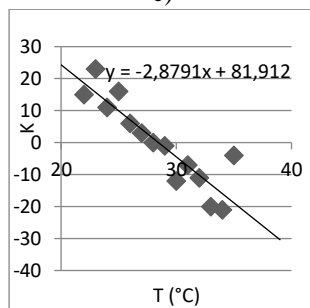
c)



d)



e)



f)

4.21 pav. Jutiklių aptikimo kriterijaus temperatūrinė priklausomybė: a – 1, b – 2, c – 3, d – 4, e – 5, f – 6 (jutikliai)

Iš 4.21 pav. matyti, kad pirmojo, trečiojo, ketvirtojo ir penktojo jutiklių aptikimo kriterijus nuo temperatūros kinta tiesiškai. Antrojo jutiklio temperatūrinė priklausomybė chaotinio pobūdžio, kaip ir prieš tai atliktuose matavimuose, todėl jo rezultatai nebus vertinami. Šeštasis jutiklis turi gerokai didesnę išsibarstymą nei kiti jutikliai. Patobulinto algoritmo taikymas leido gerokai sumažinti bazinių taškų išsibarstymą ir kartu tiksliau nustatyti lygties koeficientus.

4.6. Transporto priemonių greičio nustatymas naudojant AMR jutiklius

Pagrindinis uždavinys, kurį reikia išspręsti kuriant greičio ir automobilio tipo nustatymo sistemą, yra kuo tikslesnis trukmės tarp signalų iš atskirų jutiklių nustatymas. Turint stabilų signalų diskretizavimo dažnį ir atlikus abiejų signalų sutapdinimą, galima apskaičiuoti vėlinimą tarp signalų ir nustatyti transporto priemonės greitį.

Siekiant įvertinti transporto priemonių greičio nustatymo naudojant AMR jutiklius tikslumą, buvo naudojami anksčiau atliktų eksperimentų duomenys.

Naudojant du jutiklius, tarp kurių atstumas yra žinomas, galima apskaičiuoti transporto priemonės greitį. Atstumas tarp jutiklių turėtų būti kuo didesnis, kad būtų įmanoma kuo tiksliau išmatuoti greitį, tačiau, kaip matyti iš anksčiau atliktų tyrimų rezultatų, automobilio iškraipomas Žemės magnetinis laukas nėra tolygus, labai priklauso nuo automobilio konstrukcijos. Didinant atstumą tarp jutiklių atsiranda rizika, kad transporto priemonė gali pravažiuoti skirtingomis vietomis ir taip galima gauti skirtingus signalus iš jutiklių, dėl to greitis gali būti nustatytas klaidingai.

Esant mažam atstumui tarp jutiklių, reikia aukšto duomenų diskretizavimo dažnio, kad būtų gaunami kuo tikslesni signalai ir būtų galima apskaičiuoti greitį. Taip pat labai svarbu susinchronizuoti laiką tarp jutiklių, norint turėti tiksliai laiko žymes.

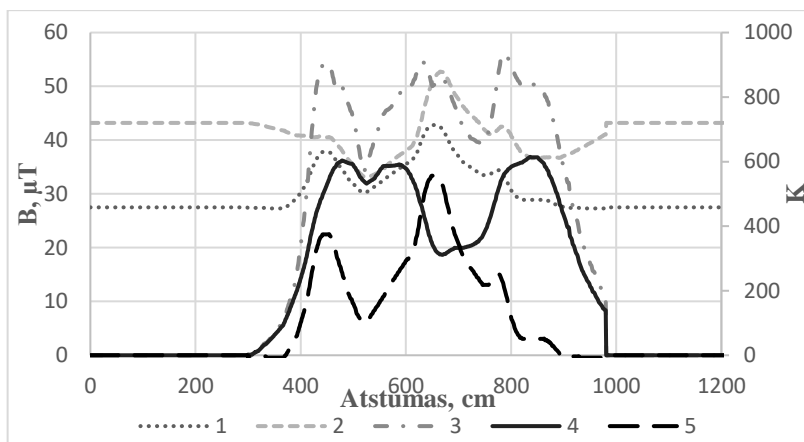
Siekiant įvertinti transporto priemonių greičio nustatymo naudojant AMR jutiklius tikslumą, buvo palyginta 12 pasirinktų metodų. Taikytų metodų sąrašas pateiktas 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Automobilių aptikimo metodų sąrašas

Nr.	Metodas
1	Z dedamosios pikų detektavimas
2	Z dedamosios tarpusavio koreliacija
3	Modulio pikų detektavimas
4	Modulio tarpusavio koreliacija
5	Vektorinio kriterijaus pikų detektavimas
6	Vektorinio kriterijaus tarpusavio koreliacija
7	Kombinuotojo vektorinio kriterijaus pikų detektavimas
8	Kombinuotojo vektorinio kriterijaus tarpusavio koreliacija
9	Kriterijaus K_z pikų detektavimas
10	Kriterijaus K_z tarpusavio koreliacija
11	Z dedamosios pikų (± 50 atskaitų) tarpusavio koreliacija
12	Modulio pikų (± 50 atskaitų) tarpusavio koreliacija

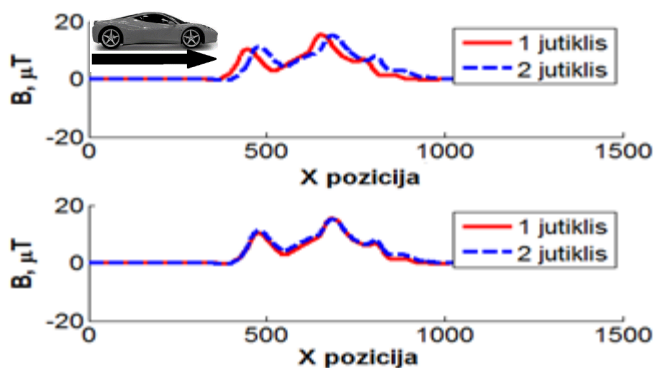
Pasirinkti metodai pagrįsti didžiausių signalo verčių radimu ir jų sutapdinimu laike apskaičiuojant vėlinimą arba šių signalų tarpusavio koreliacijos skaičiavimu ir vėlinimo nustatymu.

Kaip atrodo duomenys, gauti taikant skirtingus metodus, kurie yra interpretuojami ieškant signalų sutapdinimo vietas, pavaizduota 4.22 pav.



4.22 pav. Skirtingų metodų duomenys (1 – Z dedamoji, 2 – modulis, 3 – vektorinis kriterijus, 4 – kombinuotasis vektorinis kriterijus, 5 – K_z kriterijus)

4.23 pav. pavaizduotas signalų iš dviejų jutiklių sutapdinimo taikant Z dedamosios tarpusavio koreliacijos metodą pavyzdys.

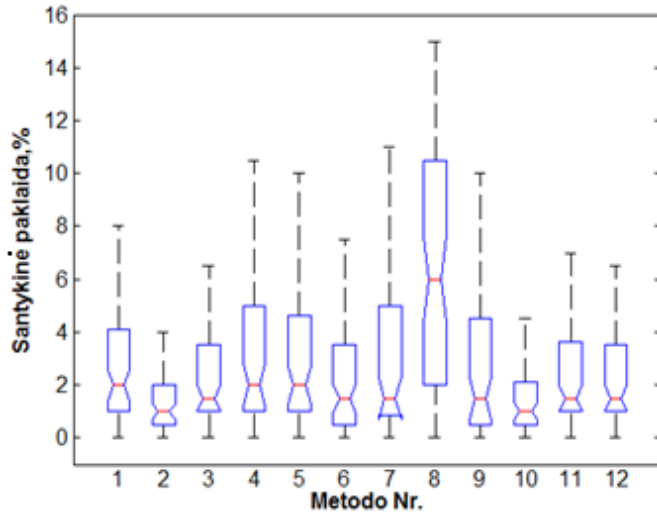


4.23 pav. Jutiklių Z dedamosios sutapdinimas taikant tarpusavio koreliacijos metodą

Atlikus eksperimentinių duomenų analizę ir apdorojimą pasirinktais signalų sutapdinimo metodais buvo nustatyta kiekvieno metodo didžiausia ir santykinė paklaida, kai atstumas tarp jutiklių 2 metrai. Rezultatai pateikti 4.2 lentelėje.

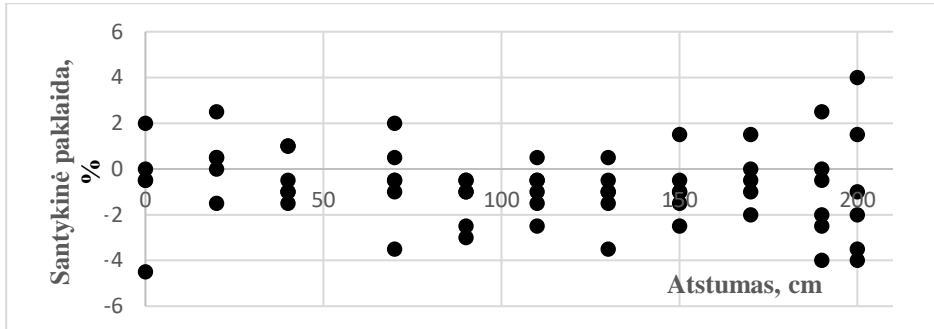
4.2 lentelė. Sutapdinimo metodų paklaidos

Metodo Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Vidutinė santykinė paklaida, %	3,6	1,5	2,8	3,3	3,7	6,7	3,3	2,6	3,9	1,5	3,1	2,5
Didžiausia santykinė paklaida, %	28,5	6,0	14,5	15,0	15,0	23,5	12,5	12,5	31,0	6,5	15,5	11,0

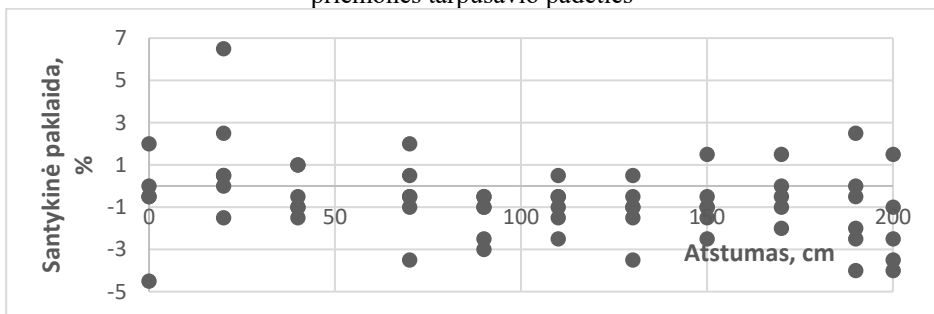


4.24 pav. Greičio nustatymo paklaidų skirstinys, %. Nurodyta vidurkis (horizontalus brūkšny) ir kvartilinio pločio skaitinės reikšmės

Gautų rezultatų analizė parodė, kad mažiausias vidutines santykinės paklaidas užtikrina antrasis ir dešimtas metodai (paklaidos neviršija 6,5 %). Šių metodų paklaidų išsibarstymai pateikti atitinkamai 4.25 ir 4.26 pav.



4.25 pav. Antrojo metodo paklaidos priklausomybė nuo jutiklių ir transporto priemonės tarpusavio padėties



4.26 pav. Dešimtojo metodo paklaidos priklausomybė nuo jutiklių ir transporto priemonės tarpusavio padėties

Gautų rezultatų analizė rodo, kad AMR parinkus tinkamą signalų sutapdinimo metodą galima su priimtina paklaida nustatyti transporto priemonės greitį ir tipą.

Tokios sistemos privalumai:

1. Automobilio vietos nustatymas, greičio matavimas ir transporto priemonių klasifikavimas pagal tipą galimybė.
2. Mažesnės infrastruktūros sąnaudos.
3. Nedidelis perduodamų duomenų kiekis, nes signalus apdoroti galima pačiame jutiklyje.

Taip pat reikia patyrinėti AMR jutiklių panaudojimo esant kitokiam Z dedamosios kampui (skirtingose Žemės vietose) galimybes. Lieka neištirtos transporto priemonių aptikimo naudojant transporto priemonės „magnetinį parašą“ galimybės.

4.7. Eksperimentinių tyrimų apibendrinimas

1. Remiantis modeliavimo ir praktinio tyrimo rezultatais sudarytas automobilio aptikimo algoritmas, naudojantis kompleksinį aptikimo kriterijų. Šis kriterijus leidžia tiksliausiai įvertinti stovėjimo vietos būseną.

2. Sukurtas automobilio aptikimo kritiniame taške mechanizmas leidžia aptikti automobilį jam esant bet kokioje stovėjimo vietos pozicijoje.

3. Ilgalaikiai stabilumo tyrimai rodo didelį „gamyklinį“ jutiklių parametrų išsibarstymą, skiriasi temperatūriniai koeficientai ir jautris, tačiau, pritaikius kompleksinį kriterijų, aikštelės būsenos buvo nuskaitomos tiksliai.

4. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad AMR jutiklius galima naudoti greičiui kontroliuoti ir automobiliams klasifikuoti.

5. Ištyrus skirtingų automobilių įtaką lokaliajam Žemės magnetiniam laukui, galima daryti išvadą, kad skirtingi automobiliai turi skirtingus „magnetinius parašus“, kurie gali būti panaudoti identifikuojant automobilio tipą.

6. Automobilio greičiui nustatyti geriausiai tinka Z dedamosios tarpusavio koreliacijos (*cross-correlation*) ir kriterijaus K_z tarpusavio koreliacijos metodai. Taikant šiuos metodus, vidutinė greičio nustatymo paklaida neviršija 1,5 %, kai atstumas tarp jutiklių ne mažesnis kaip 2 metrai.

7. Taikant antrąjį ir dešimtąjį metodus buvo nagrinėjama tik lauko Z dedamoji ir gautos mažiausios greičio nustatymo paklaidos. Tačiau nebuvo atsižvelgta į tai, kad realiose situacijose automobiliai gali judėti keliomis eismo juostomis. Tai gali įnešti papildomas paklaidas, kurias būtų įmanoma eliminuoti pasitelkus ir kitas magnetinio lauko dedamąsias.

8. AMR jutiklių privalumai nustatant aikštelių užimtumą ir automobilių greitį: reakcijos greitis, didelis jautris, įrangos montavimas po kelio danga, mažesnės įrengimo sąnaudos.

IŠVADOS

1. Išanalizuotos technologijos, skirtos transporto priemonėms aptikti, išryškinti jų privalumai ir trūkumai. Nustatyta, kad intelektualiosios transporto valdymo sistemos diegiamos siekiant optimaliai išnaudoti esamą infrastruktūrą ir sureguliuoti transporto srautus. Miestų centruose didžiąją kelionės automobiliu laiko dalį sudaro stovėjimo vietos paieška, kurią galima sutrumpinti stebint stovėjimo vietų būseną ir informuojant vairuotojus apie laisvas vietas. Esami stovėjimo vietų būsenos nustatymo metodai turi siaurą pritaikomumą ir dažniausiai skirti tik uždarojo tipo stovėjimo aikštelėms.
2. Pasiūlyti priimtinių techninių ir ekonominių parametrų (mažų matmenų ir kainos) vektoriniai magnetinio lauko jutikliai, kurie gali tiksliai išmatuoti kiekvienos magnetinio lauko dedamosios pokytį ir gali būti naudojami atvirojo tipo stovėjimo aikštelėms. Pasiūlytas magnetinio lauko iškraipymų matavimo metodas, kuris gali būti pritaikytas automobiliams aptikti ir stovėjimo vietos būsenai nustatyti bene visų tipų stovėjimo aikštelėse. Šis metodas pritaikytas suprojektuotoje ir pagamintoje trijų ašių magnetinio lauko matavimo sistemoje, skirtoje automobiliams aptikti. Ją naudojant buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai.
3. Remiantis modeliavimo ir praktinio tyrimo rezultatais sukurti algoritmai, suformuluoti aptikimo kriterijai, kurie leidžia įvertinti ir nustatyti stovėjimo vietos būseną. Tyrimai parodė, kad tiksliausiai stovėjimo vietos būseną galima nustatyti taikant pasiūlytą kompleksinį aptikimo kriterijų.
4. Naudojant sukurtas priemones automobilių stovėjimo vietose surinkti duomenys ir nustatyta, kaip magnetinio lauko iškraipymai priklauso nuo automobilių tipo ir jų konstrukcinių ypatybių. Jutiklių aplinkos temperatūros analizė leido įvertinti ir kompensuoti temperatūros įtaką. Sistemoje įdiegta kalibravimo procedūra leido eliminuoti lokaliojo magnetinio lauko netolygumą ir aplinkos poveikį.
5. Ilgalaikiai algoritmų efektyvumo tyrimai parodė, kad magnetinio lauko iškraipymų matavimo metodas yra tinkamas automobiliams aptikti, jį galima taikyti visų tipų stovėjimo aikštelėse ir dėl savo universalumo jis gali pakeisti šiuo metu plačiai paplitusius ultragarsinius jutiklius ir induktyvius kilpas.
6. Atliktas modeliavimas ir eksperimentiniai tyrimai, leidžiantys įvertinti stiprių išorinių magnetinių laukų poveikį AMR jutikliams. Nustatyta, kad AMR jutiklio jautris nepriklauso nuo šalia esančių elementų įsimagnetinimo, todėl statinį arba dinaminį lauko matavimą galima atlikti be papildomo jutiklio kalibravimo. Jei eksploatacijos metu jutiklio aplinkoje yra stiprių magnetinių laukų (stipresnių nei 2 mT), prieš matuojant statinį magnetinį lauką jutiklį būtina kalibruoti arba išmagnetinti slopstančiu kintamuoju magnetiniu lauku.

LITERATŪRA

1. PAULASKAS, Rokas; BERNHARD, Oehry; GLEMŽA, Aldas. *Intelektualių (pažangių) transporto sistemų įgyvendinimo Lietuvoje galimybių studija*. Vilnius, 2011, 3–4 [interaktyvus] [žiūrėta 2013-03-16]. Prieiga per internetą: <http://www.sumin.lt/files/uploads/20110215%20ITS%20Studija%20final%20v6.pdf>
2. AIPARK. Data Collection – The Scope of Parking in Europe. Prieiga per internetą: http://www.aipark.org/cms/Media/Data_Collection_screen%20OK.pdf. 2009, Viena.
3. Lietuvos statistikos departamentas. Individualių lengvųjų automobilių skaičius Lietuvoje. [interaktyvus] [žiūrėta 2013-04-12]. Prieiga per internetą: <http://db1.stat.gov.lt/statbank/SelectVarVal/saveselecti-ons.asp>
4. *Ilgalaikė (iki 2025 metų) Lietuvos transporto sistemos plėtros strategija* [interaktyvus] [žiūrėta 2014-02-06]. Prieiga per internetą: http://www3.lrs.lt/pls/inter3/dokpaieska.showdoc_l?p_id=463278
5. ROUSSEL, Stephane, et al. Enhanced vehicle identification utilizing sensor fusion and statistical algorithms. In: *ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers, 2009, 709–716.
6. Ertico ITS Europe *Intelligent Transport Systems and Services for Europe* [interaktyvus] [žiūrėta 2013-10-21]. Prieiga per internetą: <http://www.ertico.com>
7. LAFFOON, C. M.; MOURAD, M. *Build intelligent transportation systems with the Traffic Management Data Dictionary standard* [interaktyvus] [žiūrėta 2014-11-21]. Prieiga per internetą: <http://www.ibm.com/developerworks/industry/ /library/ /ind-tmdd/#icommments>
8. NEWMAN-ASKINS, Raechelle; FERREIRA, Luis; BUNKER, Jonathan M. *Intelligent transport systems evaluation: From theory to practice*. 2003.
9. MARMA, Arunas; ZILYS, Mindaugas; VALINEVICIUS, Algimantas. *Electronic traffic jam detection in parking facilities*. In: *Information Technology Interfaces*, 2008. ITI 2008. 30th International Conference on IEEE, 2008, 739–744.
10. MARMA, Arūnas. *Electronic traffic flow control systems – elektroninės srautų valdymo sistemos masinio susibūrimo vietose*. Kaunas, 2009, 20–50.
11. BALSYS, K.; VALINEVICIUS, A.; EIDUKAS, D. *Urban Traffic Control using IR video detection technology*. Electron Electr Eng – Kaunas: Technologija, 2009, 8.96, 43–46.
12. KLEIN, Lawrence A.; MILLS, Milton K.; GIBSON, David RP. *Traffic Detector Handbook: Volume II*. 2006.
13. WAN, Hong. *Magnetic field sensing device having integral coils for producing magnetic fields*. U.S. Patent No. 5, 952, 825, 1999.
14. BALAŠIS, Pranciškus; EIDUKAS, Danielius; VALINEVIČIUS, Algimantas; ŽILYS, Mindaugas. Elektroninio parkavimo sistemų (EPS) sandara. *Integruotų informacinių elektroninių sistemų efektyvumas*, 2008, 490–500, Kaunas.
15. CHODASH, I. Relative efficiencies of various parking angles. *ITE journal*, 1986, 56.3, 34–37. [žiūrėta 2013-07-02]. Prieiga per internetą: <http://www.ite.org/membersonly/itejournal/pdf/jca86a34.pdf>
16. MIMBELA, Luz Elena Y.; KLEIN, Lawrence A. *Summary of vehicle detection and surveillance technologies used in intelligent transportation systems*. 2009. [žiūrėta 2012-11-21]. Prieiga per internetą: <http://www.fhwa.dot.gov/ohim/tvtw/vdstits.pdf>

17. MACINTYRE, S. A. *Magnetic Field Measurement the Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. CRC Press. [žiūrėta 2014-08-24]. Prieiga per internetą: <http://dsp-book.narod.ru/MISH/CH48.pdf>
18. MAUS, S.; MCLEAN, S.; NAIR, M.; ROLLINS, C.; MACMILLAN, S. *The US/UK World Magnetic Model for 2010-2015* [žiūrėta 2013-11-16]. Prieiga per internetą: ftp.ngdc.noaa.gov/ionosonde/request/robr/WMM2010_TR_preliminary.pdf
19. JANILIONIS, V.; MORKEVIČIUS, V.; RAULECKAS, R. *Statistinė kiekybinių duomenų analizė su SPSS ir STATA*, 2008. [žiūrėta 2013-05-15]. Prieiga per internetą: http://www.lidata.eu/index.php?file=files/mokymai/stat/_/stat.html&course_file=stat_II_3.2.html
20. MARKEVICIUS, V.; NAVIKAS, D. Adaptive Thermo-Compensation of Magneto-Resistive Sensor. *Electronics and Electrical Engineering*, 2011, 114.8, 43–46.
21. IRMSCHER, I. *Methods and tools for parking space planning and parking space management*. Study within the framework of the EU project, “City Parking in Europe”, INTERREG IIIC [interaktyvus] [žiūrėta 2013-04-16]. Prieiga per internetą: http://www.city-parking-in-europe.eu/Bilder/pdf/_documents/studies/Methods_and_Tools_for_Parking_Space_Planning.pdf
22. Eismo įvykių valdymas naudojant intelektualias transporto sistemas (ITS), mokslo darbo ataskaita, Lietuvos Respublikos susisiekimo ministerijos užsakymu [interaktyvus] [žiūrėta 2013-07-14]. Prieiga per internetą: <http://www.transp.lt/Default.aspx?TopicID=314&DL=&UL=true>
23. SKSZEK, Sherry L. *"State-of-the-Art" Report on Non-Traditional Traffic Counting Methods*. Arizona Department of Transportation, 2001. [interaktyvus] [žiūrėta 2014-05-12]. Prieiga per internetą: http://ntl.bts.gov/DOCS/arizona_report.html
24. REED, A. Sensor for vehicular traffic data accumulating systems. JAV patentų biuras, patento nr. 3949355. 1976, p. 7
25. MORRIS, D. J.; DEAN, K. G.; HULSCHER, F. R. Development of an optimum detector loop configuration. *Australian Road Research*, 1984, 12.5.
26. CLARK, Michael A. G. *Induction loop vehicle detector*, JAV patentų biuras, patento nr. 4568937. 1986, p.13.
27. FABIAN, Tomas. An algorithm for parking lot occupation detection. In: *Computer Information Systems and Industrial Management Applications*, 2008. CISIM'08. 7th. IEEE, 2008. p. 165–170.
28. LENZ, James; EDELSTEIN, Alan S. Magnetic sensors and their applications. *Sensors Journal*, IEEE, 2006, 6.3, 631–649.
29. BRAUER, John R. *Magnetic actuators and sensors*. John Wiley & Sons, 2006, 148–181.
30. MMC314xMS datasheet Rev. B, 2010, 1–10 [interaktyvus] [žiūrėta 2012-10-25]. Prieiga per internetą: <http://en.honestar.com/product/datasheet/Memsic/MMC314xMS%20Datasheet.pdf>
31. LIS3MDL datasheet - production data, Rev. 2, 2013, 1–32 [interaktyvus] [žiūrėta 2013-06-09]. Prieiga per internetą: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00075867.pdf>
32. CARUSO, Michael J., et al. A new perspective on magnetic field sensing. *Sensors*, Peterborough, 1998, 15, 34–47.

33. VOPALENSKY, Michal; PLATIL, Antonin. Temperature Drift of Offset and Sensitivity in Full-Bridge Magnetoresistive Sensors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49.1, 136–139.
34. MIRCHANDANI, Pitu; HEAD, Larry. A real-time traffic signal control system: architecture, algorithms, and analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2001, 9.6, 415–432.
35. YANG, Won Y., et al. *Applied numerical methods using MATLAB*. John Wiley & Sons, 2005.
36. LAN, Jinhui, et al. Vehicle detection and classification by measuring and processing magnetic signal. *Measurement*, 2011, 44.1, 174–180.
37. CAICEDO, Felix. The use of space availability information in “PARC” systems to reduce search times in parking facilities. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2009, 17.1, 56–68.
38. DOBBERT, Michael. A Guard-Band Strategy for Managing False-Accept Risk. In: *2008 NCSL International Workshop & Symposium [interaktyvus] [žiūrėta 2013-10-12]*. Priega per internetą: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5991-1267EN.pdf>. 2012.
39. EVANS, Naoko. *Automated Vehicle Detection and Classification Using Acoustic and Seismic Signals*. 2010.
40. MARKEVICIUS, V.; NAVIKAS, D.; DAUBARAS, A.; CEPENAS, M.; ZILYS, M.; ANDRIUKAITIS, D. Vehicle Influence on the Earth’s Magnetic Field Changes. *Elektronika ir elektrotechnika*, 2014, 20.4, 43–48.
41. ROESS, Roger P.; PRASSAS, Elena S.; MCSHANE, William R. *Traffic engineering*. Prentice Hall, 2004.
42. RIPKA, Pavel; JANOSEK, Michal; BUTTA, Mattia. Crossfield sensitivity in AMR sensors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45.10, 4514–4517.
43. JARAŠUNIENE, Aldona. Analysis of possibilities and proposals of Intelligent Transport System (ITS) implementation in Lithuania. *Transport*, 2006, 21.4, 245–251.
44. HUANG, Yueh-Min Ray. *Sensors: advancements in modeling, design issues, fabrication and practical applications*. Springer, 2008.
45. CARUSO, Michael J.; WITHANAWASAM, Lucky S. Vehicle detection and compass applications using AMR magnetic sensors. In: *Sensors Expo Proceedings*. 1999.
46. PHAN, T.; KWAN, B. W.; TUNG, L. J. Magnetoresistors for vehicle detection and identification. In: *1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1997. Computational Cybernetics and Simulation*, 1997, 3839–3843.
47. ISAKSSON, Martin. *Vehicle detection using anisotropic magnetoresistors*. 2008. [interaktyvus] [žiūrėta 2013-10-17]. Priega per internetą: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/70865.pdf>
48. MINGE, Erik; KOTZENMACHER, Jerry; PETERSON, Scott. *Evaluation of non-intrusive technologies for traffic detection*. Minnesota Department of Transportation, Research Services Section, 2010.
49. FUNCK, Stefan; MOHLER, Nikolaus; OERTEL, Wolfgang. Determining car-park occupancy from single images. In: *Intelligent Vehicles Symposium, 2004 IEEE*. IEEE, 2004, 325–328.
50. JERMSURAWONG, Jermsak, et al. Car parking vacancy detection and its application in 24-hour statistical analysis. *Entropy*, 2012, 6, 20.7.

51. LEE, Bong-gu; KIM, Jung-han. Algorithm for finding the moving direction of a vehicle using magnetic sensor. In: *2011 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation (CICA)*. IEEE, 2011, 74–79.
52. ROTHWELL, Edward J.; CLOUD, Michael, J. *Electromagnetics*. CRC press, 2001, 59. Prieiga per internetą: <http://www.google.com/books?hl=lt&lr=&id=jCqv1UyqjA4C&oi=fnd&pg=PA1&dq=electromagnetics+rothwell&ots=x2GHXK6CxY&sig=v56KnNvM4vrpVYSsL-tLHmeqXw>
53. TOPP, Hartmut H. Parking policies in large cities in Germany. *Transportation*, 1991, 18.1, 3–21. [interaktyvus] [žiūrėta 2013-11-23]. Prieiga per internetą: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF00150556>
54. DAUBARAS, A.; ZILYS, M. Vehicle detection based on magneto-resistive magnetic field sensor. *Electronics and Electrical Engineering*, 2012, 118.2, 27–32.
55. DAUBARAS, A.; MARKEVICIUS, V.; NAVIKAS, D.; ZILYS, M. Analysis of Magnetic Field Disturbance Curve for Vehicle Presence Detection. *Elektronika ir elektrotechnika*, 2014, 20.5, 80–83.
56. LEUZINGER, Andrew; TAYLOR, Andrew. *Magneto-Inductive Technology Overview*. PNI Sensor Corporation, 2010. [interaktyvus] [žiūrėta 2013-04-23]. Prieiga per internetą: <http://home.novatronic.de/app/download/5781492141/White+Paper+-+PNI+Magneto+Inductive+Technology+Overview+r3.pdf>
57. LANG, Kenneth R. *The Cambridge guide to the solar system*. Cambridge University Press, 2011, 92.
58. Comsol multiphysics whitepaper. *Reducing the Magnetic Signature of a Submarine*. [interaktyvus] [žiūrėta 2014-05-21]. Prieiga per internetą: <http://www.comsol.com/model/magnetic-signature-of-a-submarine-291>
59. National Geophysical Data Center. *Magnetic Field Calculator*. [interaktyvus] [žiūrėta 2014-08-19]. Prieiga per internetą: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm>
60. Application note Honeywell. *AN212 Handling Sensor Bridge Offset*. [interaktyvus] [žiūrėta 2013-06-21]. Prieiga per internetą: http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/Magnetic_Literature_Application_notes-documents/AN212_Handling_of_Sensor_Bridge_Offset.pdf
61. ST Microelectronics LSM303DLH datasheet. Doc ID 16941 Rev. 1. [interaktyvus] [žiūrėta 2013-04-21]. Prieiga per internetą: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00260288.pdf>
62. MARKEVICIUS, V.; CEPENAS, M.; NAVIKAS, D.; VALINEVICIUS, A.; ANDRIUKAITIS, D. Research of Magnetic Field Influence on the Offset and Sensitivity of Magneto-resistive Sensor Readings. *Elektronika ir elektrotechnika*, 2013, 19, 2, 37–40.
63. MARKEVICIUS, V.; NAVIKAS, D.; CEPENAS, M. Magnetic Field Simulation in Embedded System with Magneto-Resistive Sensor. *Elektronika ir elektrotechnika (Electronics and Electrical Engineering)*, 2011, 9, 105–108.
64. Honeywell. *AN211 Applications of magnetic position sensors*. [interaktyvus] [žiūrėta 2013-04-18]. Prieiga per internetą: <http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/Applications-of-Magnetic-Position-Sensors.pdf>
65. BUINEVIČIUS, V. A.; GARGASAS, V. Geležinkelio bėgių diagnostika naudojant geometrinį klasifikatorių. *Elektronika ir elektrotechnika*, 2004, 53, 86–89.

66. TAGHVAEEYAN, S.; RAJAMANI, R. The Development of AMR Sensors for Vehicle Position Estimation // American Control Conference on O'Farrell Street. – San Francisco, CA, USA, 2011.
67. PETERSEN, T. F.; PRYDS, N.; SMITH, A. Using a Linux Cluster for Parallel Simulations of an Active Magnetic Regenerator Refrigerator // Excerpt from the Proceedings of the 2006 Nordic COMSOL Conference, 2006, 1–6.
68. RAUTELA, R. S.; BHATT, V.; SHARMA, P.; KHUSHU, S.; WALIA, P. Mathematical Approach for Designing & Development of Helmholtz Coil for Hyperpolarized Xenon Gas Used in MRI. In: *Proc. of the India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, 2010, 1–5.
69. FOSTER, C. C.; ELKAIM, G. H. Extension of a Two-Step Calibration Methodology to Include Nonorthogonal Sensor Axes. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, vol. 44, no. 3, 1070–1078. [interaktyvus] [žiūrėta 2014-05-28]. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1109/TAES.2008.4655364>
70. MIRZAEVA, G.; SUMMERS, T. J.; BETZ, R. E. Calibration A laboratory system to produce a highly accurate and uniform magnetic field for sensor calibration. In: *Proc. of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2012, 1020–1025.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Moksliniai straipsniai

Tarptautinėse duomenų bazėse esančiuose mokslo leidiniuose paskelbti straipsniai

Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą, paskelbti straipsniai

1. Markevičius, Vytautas; Navikas, Dangirutis; Žilys, Mindaugas; Andriukaitis, Darius; Valinevičius, Algimantas; **Čepėnas, Mindaugas**. Dynamic Vehicle Detection via the use of Magnetic Field Sensors // Sensors. Basel: MDPI AG. ISSN 1424-8220. 2016, vol. 16, iss. 1, Article 78, p. [1–9].
2. Markevičius, Vytautas; Navikas, Dangirutis; Daubaras, Andrius; **Čepėnas, Mindaugas**; Žilys, Mindaugas; Andriukaitis, Darius. Vehicle influence on the earth's magnetic field changes // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering. Kaunas : KTU. ISSN 1392-1215. 2014, vol. 20, no. 4, p. 43–48.
3. Markevičius, Vytautas; **Čepėnas, Mindaugas**; Navikas, Dangirutis; Valinevičius, Algimantas; Andriukaitis, Darius. Research of magnetic field influence on the offset and sensitivity of magnetoresistive sensor readings // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering. Kaunas : KTU. ISSN 1392-1215. 2013, vol. 19, no. 2, p. 37–40.
4. Markevičius, Vytautas; Navikas, Dangirutis; **Čepėnas, Mindaugas**. Magnetic field simulation in embedded system with magneto-resistive sensor // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering. Kaunas : KTU. ISSN 1392-1215. 2011, no. 9 (115), p. 105–108.

Pranešimai tarptautinėse konferencijose

1. Elektronika 2013: 15-oji tarptautinė konferencija. Blood Glucose Level Estimation Using Interdigital Electrodes.
2. Elektronika 2014: 18-oji tarptautinė konferencija. Analysis of Magnetic Field Disturbance Curve for Vehicle Presence Detection.
3. Elektronika 2015: 19-oji tarptautinė konferencija. Research of Magnetic Field Detection Disturbances.
4. Elektronika 2016: 20-oji tarptautinė konferencija. Feasibility Research of Non-Invasive Methods for Interstitial Fluid Level Measurement.

SL344. 2017-11-16, 11,25 leidyb. apsk. I. Tiražas 12 egz. Užsakymas 367.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas