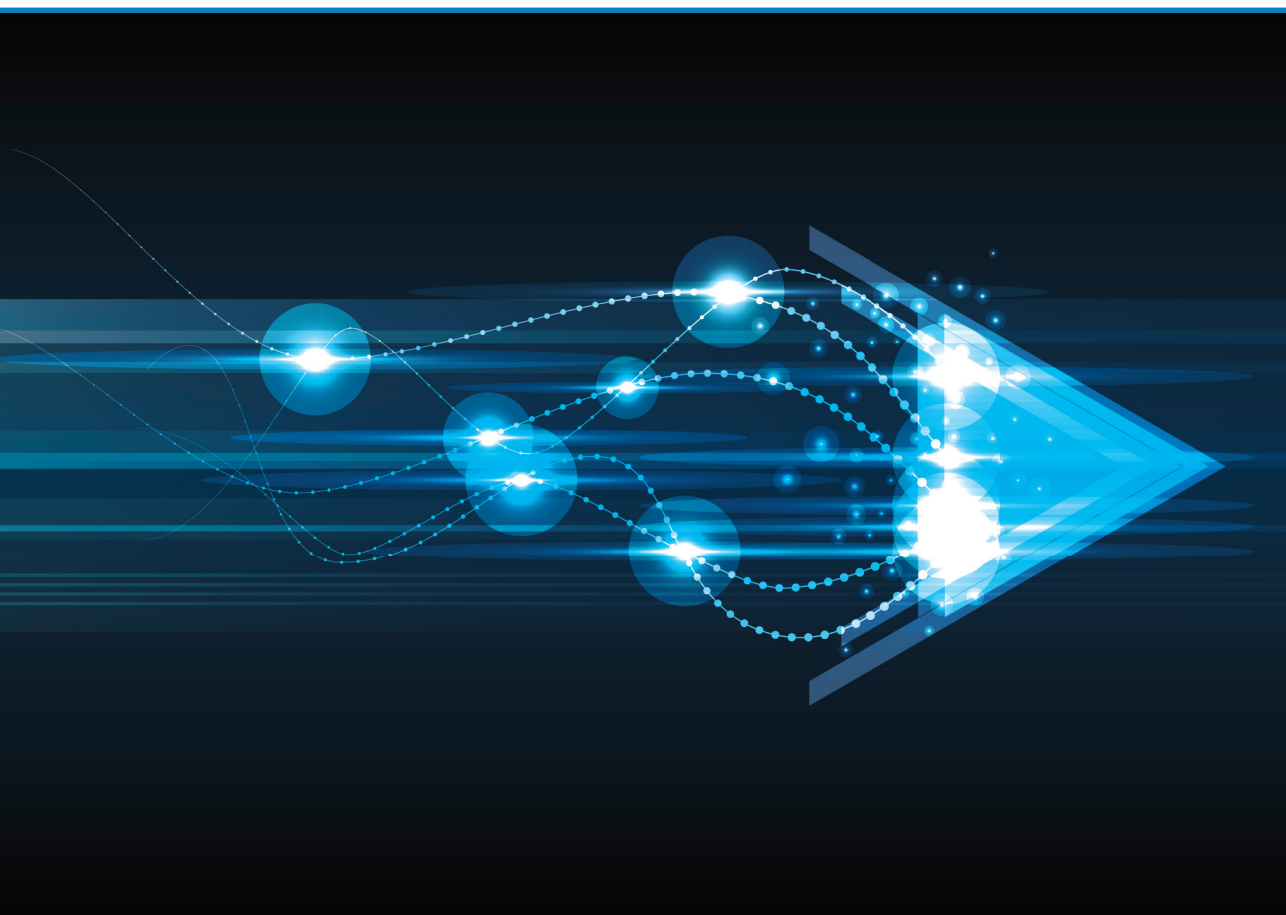


Aleksandr Krotov

OPTISKO SAKARU SISTĒMU IZSTRĀDE AR AUGSTAS IZTURĪBAS OPTISKAJIEM SENSORIEM

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultāte
Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūts

Aleksandr Krotov

Doktora studiju programmas "Telekomunikācijas" doktorants

OPTISKO SAKARU SISTĒMU IZSTRĀDE AR AUGSTAS IZTURĪBAS OPTISKAJIEM SENSORIEM

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

profesors *Dr. sc. ing.* Vjačeslavs Bobrovs

Ph. D. Svitlana Matsenko

RTU Izdevniecība

Rīga 2024

Krotov, A. Optisko sakaru sistēmu izstrāde ar augstas
izturības optiskajiem sensoriem. Promocijas darba
kopsavilkums.
Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. 36 lpp.

Publicēts saskaņā ar RTU promocijas padomes "P-08"
2024. gada 24. maija lēmumu, protokols Nr. 33.

Vāka attēls no *Shutterstock.com*

<https://doi.org/10.7250/9789934370977>

ISBN 978-9934-37-097-7 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 30. augustā, Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātē, Rīgā, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Pētnieks *Ph. D.*, *Semen Chervinskii*,
Tampere Universitāte, Somija

Profesors *Ph. D.*, *Lu Zhang*,
Zhejiang Universitāte, Ķīna

Profesors *Dr. sc. ing.* Aleksandrs Ipatovs,
Rīgas Tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Aleksandr Krotov (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir sagatavots kā tematiski vienota publikāciju kopa. Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā. Tajā iekļauti autora astoņi zinātniskie raksti un publikācijas konferenču krājumos, kas indeksēti *SCOPUS*, *WoS* un *IEEE* datubāzēs. Publikācijas ir rakstītas angļu valodā. Kopējais publikāciju apjoms ir 62 lpp.

PATEICĪBA

Vēlos izteikt vislielāko pateicību manam zinātniskajam vadītājam profesoram Vjačeslavam Bobrovam par nenovērtējamo ieguldījumu, atbalstu un iedrošinājumu visā promocijas darba izstrādes periodā. Viņa pieredze un mērķtiecība ir bijis neatsverams atbalsts promocijas darba izstrādes procesā.

Esmu pateicīgs arī manai zinātniskajai vadītājai Ph.D. Svitlanai Matsenko par viņas vērtīgajām atziņām un atsauksmēm, kas ir ievērojami bagātinājušas šo darbu.

Īpašs paldies par vērtīgo ieguldījumu un atbalstu visā šajā pētījuma procesā prof. Igor Nikulsky, assoc. prof. Toms Salgals, prof. Aleksandr Shalin un prof. Pavel Ginzburg.

Īpašs paldies par vērtīgo ieguldījumu un atbalstu visā šajā pētījuma procesā *Ph. D.* Svitlanai Matsenko, profesoram Aleksandram Šalinam un profesoram Pāvelam Ginzburgam!

Esmu pateicīgs arī visiem saviem skolotājiem par viņu ieguldījumu manās zināšanās, kas ietekmēja manu akadēmisko ceļojumu.

Sirsnīgs paldies maniem vecākiem par viņu stipro atbalstu, uzmundrinājumu un ticību manā akadēmiskajā darbībā!

Visbeidzot, bet ne mazāk svarīga, ir mana pateicība manai sievai par viņas pacietību, sapratni un spēcīgo atbalstu mana promocijas darba izstrādes laikā. Viņas mīlestība un uzmundrinājums ir bijis mans spēka avots.

Paldies visiem, kas ir palīdzējuši šī promocijas darba tapšanā!

Īpašs paldies par šo svarīgo manas dzīves posmu ir visam Rīgas Tehniskās universitātes kolektīvam!

Paldies, Jums, cienījamie kolēģi!

Aleksandr Krotov

DARBĀ LIETOTIE SAĪSINĀJUMI

A

AE – Aviation Equipment – aviācijas aprīkojums
ADC – Analog-to-digital Converter – pārveidotājs no analogā uz digitālo
AirDC – Air data computer – borta dators
APC – Angled Physical Contact – leņķveida fiziskā saskarsme
ARINC – Aircraft Digital Video Interface – gaisakuģa digitālā video saskarne

B

BER – Bit-Error-Rate – bitu kļūdu attiecība
BIC – Bound States in the Continuum – nepārtraukti saistītais stāvoklis
BRAS – Broadband Remote Access Server – platjoslas attālais piekļuves serveris

C

CCD – Charged-Coupled Device – uzlādēta-savienota ierīce
CDRSP – Central Device for Switching and Routing Packets – centrālā iekārta datu pakas pārslēgšanai un maršrutēšanai
CPA – Coherent Perfect Absorption – koharenti perfektā absorbcija
CSMA/CD – Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection – nesēja sensora vairākkārtēja piekļuve ar sadursmes fiksēšanu
CWDM – Coarse Wave Division Multiplexing – rupja spektrālā blīvēšana pēc viļņu garuma

D

DNSSN – LZP Project “Dynamics of non-scattering states in nanophotonic” – LZP projekts “Ne-izkliedes stāvokļa dinamika nanofotonikā”
DSRP – device for switching and routing packets – iekārta datu pakas pārslēgšanai un maršrutēšanai

E

EM – Electronic module – elektroniskais modulis
EMC – Electromagnetic Compatibility – elektromagnētiskā saderība

EMF – Electromagnetic Fields – elektromagnētiskais lauks
ENC – Exceptional Points of Non-Conservation – nesaglabāšanas izņēmuma punkti
ENZ – Epsilon Near-Zero – epsilons tuvu nulei

F

FS – Functional Systems – funkcionālās sistēmas
FEC – Forward Error Correction – turpvērstā kļūdu labošana
FOC – Fiber-optic communication – komunikācija pa optisko šķiedru
FCSITE – Faculty of Computer Science, Information Technology and Energy – Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultāte

G

GMI – Generalized Mutual Information – vispārināta savstarpēja informācija
GPON – Gigabit-Capable Passive Optical Network – pasīvā optiskā tīkla ieviešana ar gigabitu
GPNS – Generalized Positional Numeral Systems – vispārinātas pozicionālās ciparu sistēmas

H

HDR – High Data Rate – augsts datu pārraides ātrums
HIRF – High-Intensity Radiated Field – augstas intensitātes izstarošanas lauks

I

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers – Elektrotehnikas un elektronikas inženieru institūts
IP – Internet Protocol – interneta protokols
IPTD – Average Network Transmission Delay – vidējā tīkla pārraides aizturu
IPDV – Average Network Data Variation – vidējā tīkla datu variācija
IPTV – Internet Protocol Television – televīzija, izmantojot interneta protokolu
IPET – Institute of Photonics, Electronics and Telecommunications – Fotonikas,

elektronikas un elektronisko sakaru institūts

K

KTH – Royal Swedish Technical University – Karaliskā Zviedrijas Tehniskā universitāte

L

LDPC-IRA – Low-Density Parity-Check Irregular Repeat Accumulate – zema blīvuma paritātes pārbaude ar neregulāru atkārtotu uzkrāšanu
LDPC – Low-Density Parity Check – zema blīvuma paritātes pārbaude
LED – Light-Emitting Diode – gaismas diode

M

MUX – Multiplexer – multiplekseris

N

NIR – Near-Infrared – tuvu infrasarkanam

O

OLT – Optical Line Terminal – optiskā līnijas terminālis

P

PAM – Pulse-Amplitude Modulation – impulsa amplitūdas modulācija
PAM-M – Multi-level Pulse Amplitude Modulation – daudzlīmeņu impulsa amplitūdas modulācija
PD – Photodetector – daudzlīmeņu impulsa amplitūdas modulācija
PHOTON – L3P Project “Novel complex approach to the optical manipulation of nanoparticles” – L3P projekts “Jauna kompleksa pieeja nano daļiņu optiskajai manipulācijai”
PON – Passive Optical Network – pasīvais optiskais tīkls
PS – Power Splitter – jaudas sadalītājs

Q

QAM – Quadrature Amplitude Modulation – kvadrātiskās amplitūdas modulācija
QoS – Quality of Service – servisa kvalitāte

R

RAM – Random Access Memory – brīvpiekļuves atmiņa
REE – Radio Electronic Equipment – radio elektronikas aprīkojums
RF – Radio Frequency – radio frekvence
RLS – Radio Location System – radio lokācijas sistēma
RR – Radio Receivers – radio uztvērēji
RTU – Riga Technical University – Rīgas Tehniskā universitāte
Rx – Receiver – uztvērējs

S

SC – Subscriber Connector – abonementa savienotājs
SNR – Signal-Noise Ratio – signāla-trokšņa attiecība

T

TAU – Tel Aviv University – Telavivas universitāte
Tx – Transmitter – raidītājs

U

UAV – Unmanned Aerial Vehicles – bezpilota lidaparāti

V

VoIP – Voice Over Internet Protocol – balss pārraide ar interneta protokolu

W

WDM – Wavelength Division Multiplexing – viļņgarumdales blīvēšana
WDM-PON – Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network – viļņgarumdales blīvēšanas pasīvais optiskais tīkls
WoS – Web of Science – datubāze *Web of Science*

SATURS

| | |
|--|----|
| 1. NODAĻA: PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS..... | 8 |
| 1.1. Ievads..... | 8 |
| 1.2. Tēmas aktualitāte..... | 9 |
| 1.3. Promocijas darba mērķis, darba uzdevumi un aizstāvējamās tēzes..... | 9 |
| 1.4. Promocijas darbā izvirzītie darba uzdevumi..... | 10 |
| 1.5. Pētījuma metodika..... | 10 |
| 1.6. Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti..... | 11 |
| 1.7. Darba struktūra un apjoms..... | 12 |
| 1.8. Darba aprobācija un publikācijas..... | 13 |
| 2. NODAĻA: METODIKA..... | 15 |
| 2.1. Matemātiskā modeļa izstrāde informācijas un telekomunikāciju tīkla simulācijas vidē..... | 15 |
| 2.2. Optiskā spiediena sensora izstrāde informācijas un datu pārraides tīkliem..... | 17 |
| 2.3. Metodikas izstrāde optimālai trokšņnoturīgai kodēšanai gaisa kuģu iekšējiem datortīkliem.. | 18 |
| 2.4. Asimetriskas ne-Ermistisko stāvokļa ENZ saturošās slāņveida struktūras pielietošana attīstītām optiskām ierīcēm un sistēmām..... | 19 |
| 3. NODAĻA: GALVENIE REZULTĀTI..... | 20 |
| 3.1. Augstas izturības tīkls..... | 20 |
| 3.2. Augstas izturības tīkla komponentes..... | 21 |
| 3.3. Optiskie sensori un to pielietojums gaisa kuģos..... | 22 |
| 3.4. Asimetrisko ne-Ermistiskā stāvokļa ENZ saturošās slāņveida struktūras analīze..... | 24 |
| 3.5. Optiskā video sakaru pārraide gaisa kuģos veidota uz turpvērstās kļūdas labošanas kodu..... | 25 |
| 4. NODAĻA: PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI..... | 27 |
| 4.1. Galvenie secinājumi..... | 28 |
| LITERATŪRAS SARAĶSTS..... | 31 |

1. NODAĻA. PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

1.1. Ievads

Radioelektronisko iekārtu (avionikas) izstrāde moderniem mūsdienu gaisakuģiem un to pilnveidošana ir saistīta ar informācijas un telekomunikāciju tehnoloģiju risinājumu ieviešanu gaisakuģu datu tīklā. Rezultātā patstāvīgi pieaug prasības gaisakuģu datu pārraides tīkliem [1]. Tādējādi arī katru gadu gaisakuģa borta tīkla abonentierīču (satiksmes ģeneratoru) uzlabošanai [2], [3] ir nepieciešams uzlabot arī gaisakuģa borta informācijas un telekomunikāciju tīklu veiktspēju: lielāka caurlaidspēja, mērogojamība, nepieciešamā aiztures līmeņa nodrošināšana [4–6]. Savukārt šo prasību izpilde ir jānodrošina ar obligātu atbilstību avionikas masasdimensijas īpašībām un tendenci šo aprīkojumu samazināt.

Jebkurš tehnisks lēmums, kas pieņemts saistībā ar aviācijas aprīkojumu (*AE*) ir pamatoti saistīts ar *AE* svaru, izmēru un raksturlielumiem, ņemot vērā to, ka *AE* ir stingras prasības attiecībā uz izturību pret ārējiem faktoriem, iekārtas kalpošanas drošību un elektromagnētisko savietojamību [7], [8]. Ņemot vērā atsevišķu produktu testēšanas cikla sarežģītību un produkta darba uzdevumu pieaugošo sarežģītību, sistēmu, kompleksu un *AE* komplektu izstrādes vai modernizācijas laikā bieži rodas problemātiskas situācijas. Risinājums, kas saistīts ar pienācīgu borta informācijas un telekomunikāciju tīklu raksturojumu nodrošināšanu, ir sarežģīts [9], [10], tajā pat laikā neizslēdz prasības, kas noteiktas visas sistēmas komponentiem.

Aviācijā elektromagnētiskās saderības (*EMS*) izpētes objekts ir gaisakuģis un tā borta iekārtas, kas spēj radīt elektromagnētiskos traucējumus [11]. Īpašs izpētes objekts ir ārējie elektromagnētiskie lauki lidojuma trajektorijās. Gaisakuģa borta ierīces ir radioelektroniskas, elektroniskas un elektromehāniskas. Tās tiek iedalītas iespējamajos netīšās iejaukšanās avotos un avotos, kas ietekmē iejaukšanos [12]. Gaisakuģa borta iekārtu *EMC* nosaka trīs galveno objektu raksturlielumi – neparedzētu traucējumu avoti, traucējumu detektori un vide, kurā traucējumi izplatās no avota uz receptoru.

Netīšus traucējumus uzskata par traucējumu avotiem, kas rodas, ekspluatējot gaisakuģa aprīkojumu, un radio pārraidīšanas ierīču radiāciju, kas atrodas ārpus gaisakuģa (sauszemes, jūras un citi gaisakuģi). Gaisakuģa radiatoritāji ir visjaukīgākie netīšu traucējumu avoti gaisakuģī [13]. Tie raida nepārtrauktus un pulsējošus signālus frekvenču diapazonā no 2 MHz līdz 10 GHz. Kapacitāte ir 20... 400 vati – nepārtrauktiem signāliem un impulsam pat līdz vairākiem kW. Spektrs sastāv no galvenā un lokālā starojuma, starojuma pie darbības frekvences harmonikas, trokšņa un tranzīta starojuma [14], [15]. Iespējamie traucējumu avoti gaisakuģī ir impulsa jaudas pārveidotāji, dzinēja aizdedzes sistēmas, impulsa atkausēšanas sistēmas un ciparu elektroniskās sistēmas [16]. Traucējumu avotu galvenie parametri ir šādi: traucējumu jauda radiofrekvences (*RF*) diapazonā (*f*); radīto traucējumu spektra platums $\Delta F_{gen}(f)$.

Atkarībā no pakāpes uz lidojumu drošību gaisakuģu sistēmas iedala četros līmeņos: **A**, **B**, **C** un **D** [17]. **A** līmenis ietver sistēmas, kas veic tā sauktās “kritiskās” funkcijas. To pārkāpums rada katastrofālas sekas [18], piemēram, telekomunikāciju sistēmas, elektrisko vadību, dzinēja vadību u. c.

B līmenis ietver elektriskas un elektroniskas sistēmas, kas veic funkciju, kuras pārkāpšana izraisa avārijas situācijas.

C līmenis ietver elektriskas un elektroniskas sistēmas, kas veic funkcijas, kuru pārkāpšana būtiski sarežģīt lidojuma apstākļus.

D līmenis ietver elektriskas un elektroniskas sistēmas, kas veic funkcijas, kuru pārkāpšana būtiski nesarežģīt lidojuma apstākļus.

B un C līmeņa sistēmu piemēri var būt sakaru sistēmas un gaisakuģu navigācijas atbalsta sistēmas, kas ir displeja sistēmas, kas nodrošina virziena, atrašanās vietas un maršruta datu plūsmu. B vai C līmeņa sistēmas kļūme nav katastrofāla, bet tā var ierosināt citas kļūdas.

Līdz šim lielāko bīstamību rada impulsa starojuma lauku ietekme frekvenču diapazonā no 400 MHz līdz 10 GHz [19, 20], kas ietekmē elektroniskās shēmas.

1.2. Tēmas aktualitāte

Analīze par tendencēm par gaisakuģa borta esošo informācijas un telekomunikāciju tīklu [21–23] un sensoru [24], [25] attīstībā augstas intensitātes elektromagnētisko lauku apstākļos ir ļāvusi konstatēt, ka mūsdienās ir steidzami nepieciešami būtiski uzlabojumi informācijas tīklu aizsardzībā pret augstas intensitātes elektromagnētiskajiem laukiem.

Analizējot izturīgus risinājumus, tika noteikta tīkla organizācija un pret signāla trokšņa noturīgas kodēšanas metodes, kā arī ņemti vērā sensori gaisakuģī. Tika konstatētas sistēmas metodoloģiskās problēmas un pretrunas tīklu izbūvē, kodēšanā un spiediena sensoru izmantošanā.

Analizējot esošos zinātniskos darbus šajā zinātniskajā nozarē, ir konstatēts, ka, lai izveidotu drošu tīklu ar garantētu ziņojumu piegādi ar palielinātu elektromagnētisko ietekmi [26], [27], ir jāmodernizē zinātniskais un metodiskais aparāts. Šajā nolūkā ir pamatotas izredzes izmantot maģistrālo līniju defektu tolerantās kodēšanas metodes un optiskos sensorus jaunā pētniecības jomā. Tas ļauj atrisināt metodoloģiskas problēmas, ko izraisījusi elektromagnētisko lauku ietekme uz gaisakuģa borta esošo informācijas un telekomunikāciju tīklu [28], [29].

Pastāvošo tīklu trūkumi ietver tajā skaitā optisko kanālu kabeļu izmantošanu ar lielu svaru un relatīvi zemu caurlaidspēju, mazu raidzvērtību pretestību elektromagnētiskā lauka ietekmei, kā arī statiska un pilna spiediena elektronisko sensoru augsta jutību pret *EMV* ietekmi [30], [31].

1.3. Promocijas darba mērķis, darba uzdevumi un aizstāvāmās tēzes

Promocijas darba mērķis. Eksperimentāli izstrādāt tādu informācijas sistēmu projektēšanai, kuras pamatā ir optiskie sensori un platjoslas optiskais piekļuves tīkls, kas nodrošina datu plūsmu no borta tīkla abonentiem, izpildot prasības par aiztures līmeņa nodrošināšanu un prasības par borta iekārtu elektromagnētisko savietojamību, nodrošinot iespēju esošajā tīklā iekļaut jaunas ierīces un modernizēt esošās.

Aizstāvāmās tēzes

1. Speciālā koda ieviešana ar neregulāru atkārtosanos un uz priekšu vērstu kļūdu uzkrāšanos vairāk nekā trīskāršo lidmašīnas ātrgaitas digitālās video saskarnes signāla pārraides

efektivitāti, izmantojot 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), un uzlabo sistēmas stabilitāti augstas intensitātes elektromagnētiskajā laukā.

2. Deformējamu CuBe₂Ni(Co) bronzas membrānas ar sinusoidālu profilu ar stingru centru, gaismas diodes, ar lādiņu savienotas ierīces matricas izmantošana membrānas nobīdes mērīšanai ļauj palielināt absolūtā un statistiskā spiediena sensoru mērījumu precizitāti vismaz par 50 %, samazinot enerģijas patēriņu vismaz par 70 %, saīsinot informācijas apstrādes laiku un samazinot gala sensora svaru vismaz par 25 %, salīdzinot ar frekvences absolūtā un statistiskā spiediena sensoriem.
3. Ieviešot asimetriju zaudējumu un ieguvumu sadalē, mainot slāņu biezumu, ir iespējams, pāriet uz koherentas ideālās absorbcijas punktu, kas raksturojas ar nozīmīgu paaugstinājumu ģenerēšanas intensitātē un strauju kvalitātes faktora pieaugumu, pārsniedzot 10⁸.

1.4. Promocijas darba uzdevumi

Lai sasniegtu promocijas darba mērķi un pierādītu aistāvāmās tēzes, ir jāveic vairāki darba uzdevumi.

1. Izstrādāt un ieviest optisko šķiedru pārraides tīklu un gaisakuģu borta tīklu, kas optimizē kanālu resursu piešķiršanu noteiktos viļņu garumos, tādējādi uzlabojot pakalpojumu kvalitātes (*QoS*) rādītājus datu pārraidei tīklā, kas dubulto tīkla jaudu, salīdzinot ar tradicionālajām viļņu multipleksēšanas tehnoloģijām.
2. Izstrādāt jaunu spiediena sensoru, kas nodrošina būtiskus uzlabojumus un veiktspējas rādītājus un uzlabotus efektivitātes ieguvumus, samazinot datu pārraidi un sprieguma jaudas prasības, uzlabo energoefektivitāti un sistēmas veiktspēju.
3. Izpētīt neermitēta stāvokļa potenciālu fotonikā, pamatojoties uz pētījumos iegūtajiem rezultātiem, uzsverot asimetriskās īpašības, ko var izmantot, lai sasniegtu vēlamās optiskās funkcijas, tādējādi paverot ceļu turpmākiem pētījumiem fotonikas tehnoloģijas attīstībā un problēmu risināšanā dažādās jomās.
4. Uzlabot pārraides efektivitāti *ARINC-818* komunikācijas protokolā, integrējot *LDPC-IRA* kodēšanu, vairāk nekā trīs reizes pārsniedzot līdz šim zināmās metodes, atrisinot problēmas, kas saistītas ar augstas intensitātes izstaroto lauku (*HIRF*) traucējumiem, uzlabojot sistēmas stabilitāti, drošību un kodēšanas efektivitāti.

1.5. Pētījuma metodika

Lai veiktu promocijas darbā definētos darba uzdevumus un analizētu problēmas, tika izmantoti matemātiskie aprēķini, skaitliskās simulācijas un eksperimentālie mērījumi. *RSoft OptSim* un *VPI Design Suite* simulācijas programmatūrā tika veiktas skaitliskās simulācijas, kuru pamatā ir Šrēdīngera vienādojums, izmantojot sadalītā soļa metodi, Furjē transformāciju un Montekarlo metodi bitu kļūdas attiecības (*BER*) aprēķināšanai. Matemātiskā datu apstrāde un analīze tika veikta *Matlab*, *COMSOL*, *ANSYS Lumerical*, *GPSS World* un citās matemātiskās modelēšanas programmatūrās.

Promocijas darbā aprakstītie zinātniskie eksperimenti un to rezultāti tika veikti Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūtā (angļu val. – *IPEEC*) un Dinamiskajā nanostrukturās laboratorijā Telavivas Universitātē (*TAVA*) Izraēlā.

1.6. Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

Promocijas darba jaunieguvumi

1. Promocijas darba jaunieguvums ir izstrādātās metodes, kā veidot ļoti drošus tīmekļus, kas veidoti uz optiskās šķiedras bāzes, izmantojot optiskos sensorus.
2. Izstrādāta un pārbaudīta jauna pieeja, kā nodrošināt datu pārraidi no gaisakuģa borta tīkla abonentiem.
3. Ierosināta saskaņotas ideālas absorbcijas lāzera koncepcija, kas saistīta ar kvazisaistītu stāvokli kontinuumā vai asimetrisko neermistisko epsilonu tuvu nullei (*ENZ*) saturošās slāņveida strukturās.
4. Izstrādāts jauns spiediena sensora dizains ar augstu precizitāti deformācijas, liela ātruma un optiskās saskarnes noteikšanai.

Promocijas darba praktiskā vērtība

1. Droši pārraides tīkli. Izstrādāta metode ļoti drošu tīmekļa veidošanai, kuras pamatā ir optiskās šķiedras infrastruktūra, kā arī optisko sensoru izmantošana, nodrošinot stabilu un efektīvu komunikāciju sistēmu infrastruktūru. Tā var uzlabot tīmekļa veiktspēju, palielināt izturību un uzlabot datu drošību.
2. Rīgas Tehniskās universitātes Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūtā (*FEESI*) eksperimentāli izstrādāts un novērtēts optisko telekomunikāciju borta sistēmas matemātiskajā simulācijas programmatūrā ar *ARINC-818* saskarni, kas spēj pārraidīt *HIRF* vidē un spēj mainīt *FEC* kanālā (tiek piedāvāts tālākai eksperimentālai izpētei).
3. Datu pārraide no borta tīmekļa abonentiem. Izstrādāta un pārbaudīta jauna pieeja, kas nodrošina datu pārraidi no gaisakuģa borta tīkla abonentiem, nodrošinot efektīvu datu pārsūtīšanu tīmeklī, īpaši tajos gadījumos, kad ir iesaistīti vairāki borta datu tīmekļa abonenti, optimizējot tīmeklā resursus un uzlabo datu pārsūtīšanas ātrumu.
4. Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātes (*DITEF*) Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūtā (*FEESI*) ir izveidota gigabitu pasīvā optiskā tīkla (*GPON*) balstīta augsta potenciāla iestatīšana ar vairākiem abonentiem garantētas trafika piegādes pārbaudēm ļoti uzticamiem tīkliem (tiek ierosināts turpmākiem eksperimentāliem pētījumiem).
5. Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātes (*DITEF*) Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūtā (*FEESI*) ir izveidota saskanīgas ideālas absorbcijas lāzera koncepcija – ierosinātā saskaņotas ideālas absorbcijas lāzera koncepcija, kas saistīta ar kvazisaistītu stāvokli kontinuumā

vai asimetriskās neermistisko (*ENZ*) saturošās slāņveida struktūrās, ieviešot jaunu pieeju lāzertehnoloģijai. Šī koncepcija var potenciāli uzlabot lāzerierīču efektivitāti un veikspēju, tādējādi uzlabojot lāzertehnoloģiju.

6. Statiskā spiediena sensora konstrukcija. Jauns statiskais spiediena sensora dizains ar augstu precizitāti deformācijas, liela ātruma un optiskās saskarnes noteikšanā nodrošina ievērojamu progresu sensoru tehnoloģijā. Šādu sensoru var lietot vairākos risinājumos, piemēram, rūpnieciskajā monitoringā, medicīnas iekārtās un strukturālajā drošības monitoringā, nodrošinot precīzus mērījumus.
7. Eksperimentāli izstrādāti un praktiski novērtēti tehniskie parametri izstrādātajam statiskā spiediena sensora dizainam, nodrošinot tā funkcionēšanas un metroloģisko īpašību pārbaudi atbilstoši precizitātes un sensora darbības ātruma palielināšanas kritērijiem.
8. Promocijas darba praktiskā vērtība veidojas inovācijā optiskai telekomunikācijas sistēmai kopumā, sensoru tehnoloģijā un lāzera koncepcijā, kas veicina progresu dažādās nozarēs un dažādos risinājuma lietojumos.

Promocijas darbā iegūtie rezultāti tika izmantoti:

- LZP projektā “*Novel complex approach to the optical manipulation of nanoparticles (PHOTON)*” No. lzp-2022/1-0579;
- LZP projektā “*Dynamics of non-scattering states in nanophotonic (DNSSN)*” No. lzp-2021/1-0048;
- LZP projektā “*Novel non-Hermitian singularities in all-dielectric nanostructures (NEO-NATE)*” No. lzp-2022/1-0553.

1.7. Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs sagatavots kā tematiski vienota publikāciju kopa par optisko sakaru sistēmu izstrādi ar ļoti izturīgiem optiskajiem sensoriem optiskajā tīklā.

1. nodaļa. Pārskats. Nodaļā aprakstīta pētījuma darbības joma, formulētas galvenie pētniecības virzieni un pētniecības jaunieguvumu nozīme saistībā ar gaisakuģu borta tīmekļa piekļuves sistēmām, kā arī sniegts aizstāvāmo tēžu struktūras apraksts. Uzskaitīts publikāciju un prezentāciju saraksts starptautiskās konferencēs, kas tika izmantotas promocijas darbā.

2. nodaļa. Metodika. Nodaļā aprakstīti pamatfaktori, kas nepieciešami sekmīgai pakalpojumu kvalitātes uzlabošanai, un pamatpieeja augstas drošības datu tīklu attīstībai, kas iedalīti trīs apakšnodaļās.

2.1. Datu vākšana. Analizēts un simulatīvi izstrādāts matemātisks modelis, ko izmantot informācijas un telekomunikācijas tīklos dažādiem lietojumiem.

2.2. Datu analīze. Analizēti dažādi veidi, kā izveidot drošuss optiskos datu tīklus saskaņā ar iepriekš apkopotajiem datiem.

2.3. Metodoloģijas izstrāde. Aprakstīti algoritmi turpvērstai kļūdu labošanai, koherentas perfektas absorbcijas metodes un optisko sensoru iekļaušanai datu pārraides sistēmā, tajā skaitā pamatprincipi stabili uzlabotai gaismas pastiprināšanas sistēmai.

3. nodaļa. Galvenie rezultāti. Nodaļā apkopoti galvenie rezultāti no promocijas darbā izmantotajām publikācijām par optisko šķiedru sakaru sistēmām, sensoru izpēti un to lietošanu gaisakuģu bortu datu pārraides tīklā. Rezultāti ir publicēti piecos *SCOPUS* indeksētos žurnālos.

4. nodaļa. Kopsavilkums par promocijas darbu. Nodaļā izklāstīti galvenie secinājumi un rezultāti par promocijas darbā apkopotiem risinājumiem, izmantojot augstas drošības spiediena sensorus, un to lietojumu gaisakuģu borta tīkla risinājumos.

1.8. Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba rezultāti atspoguļoti astoņos zinātniskos rakstos un publikācijās konferenču krājumos, kas indeksēti *SCOPUS*, *Web of Science (WoS)* un *IEEE* datubāzēs. Autors promocijas darbā izmantoja visas astoņas publikācijas. Galvenie promocijas darba rezultāti publicēti trīs zinātniskajos žurnālos. Pētījumu rezultāti prezentēti trijās starptautiskajās konferencēs.

Starptautiskās konferencēs, kurās prezentēti promocijas darba izstrādes laikā sasniegtie rezultāti

1. **A. Krotov**, M. Krotov, S. Matsenko, T. Salgals, V. Bobrovs, “*Aircraft Optical Video Transmission Communication based on the Forward Error Correction Codes*,” 2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Prague, Czech Republic, (2023), DOI: 10.1109/PIERS59004.2023.10221478.
2. **A. Krotov**, S. Tarasov, A. Lunev, R. Borisov, D. Kushevarova, “*Data Acquisition and Processing Algorithm for Total and Static Pressure Measurement System*,” Engineering Proceedings, (2022), 27 (1):23, DOI: 10.3390/ecs-a-9-13332.
3. S. Matsenko, S. Spolitis, O. Borysenko, M. Pudzs, **A. Krotov**, V. Bobrovs, “*LDPC Code with Fractal Decoder Device for 100 Gbps PAM-M Optical Interconnect*,” 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Hangzhou, China, (2021), DOI: 10.1109/PIERS53385.2021.9695128.

Promocijas darba rezultāti izklāstīti astoņos zinātnisko rakstu un konferenču tēžu (*SCOPUS*, *WoS*, *IEEE*) datubāzes iekļautos žurnālos vai rakstu krājumos.

1. **A. Krotov**, M. Krotov, S. Matsenko, T. Salgals, V. Bobrovs, “*Aircraft Optical Video Transmission Communication based on the Forward Error Correction Codes*,” 2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Prague, Czech Republic, (2023), DOI: 10.1109/PIERS59004.2023.10221478.
2. D. Novitsky, A.C. Valero, **A. Krotov**, T. Salgals, A.S. Shalin, A. Novitsky “*CPA-Lasing Associated with the Quasibound States in the Continuum in Asymmetric Non-Hermitian Structures*,” ACS Photonics. 9., (2022), DOI: 10.1021/acsp Photonics.2c00790.
3. **A. Krotov**, S. Tarasov, A. Lunev, R. Borisov, D. Kushevarova, “*Data Acquisition and Processing Algorithm for Total and Static Pressure Measurement System*,” Engineering Proceedings, (2022), 27(1):23, DOI: 10.3390/ecs-a-9-13332.
4. R. Borisov, I. Antonec, **A. Krotov**, S. Tarasov, V. Bobrovs, “*Methodology for the Static and Total Pressure Sensor Development Based on Elastic Sensing Elements and Linear*

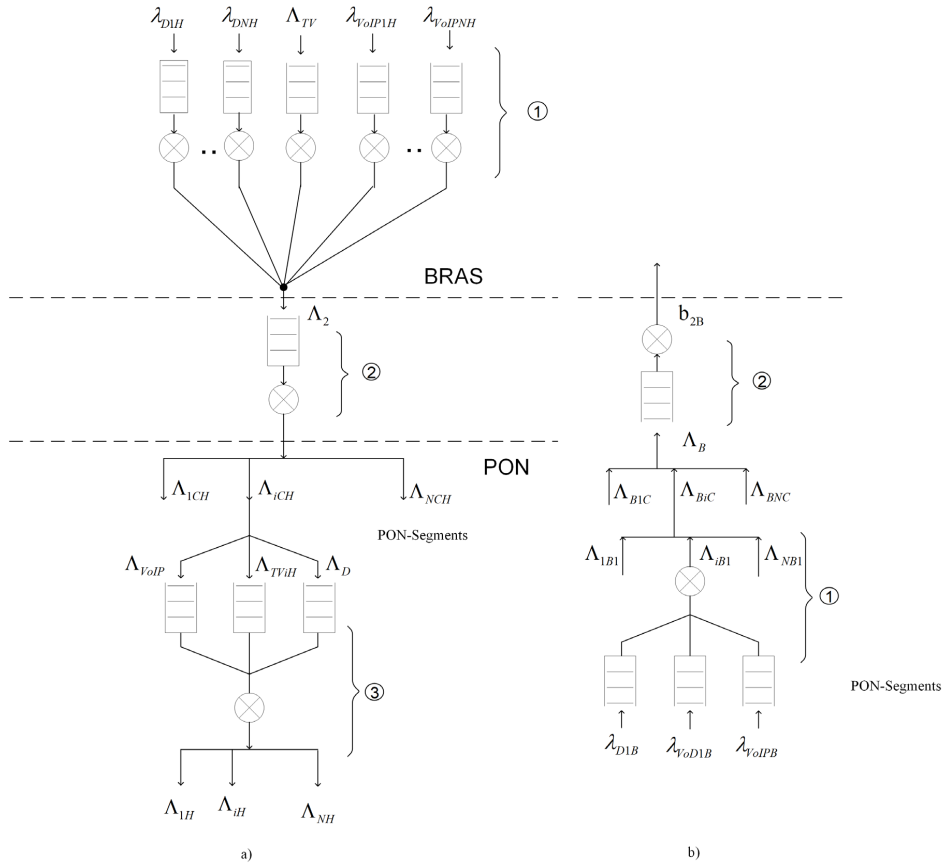
CCD Matrices,” International Review of Mechanical Engineering (IREME), (2022), Vol. 16, No. 1, DOI: 10.15866/ireme.v16i1.21118.

5. S. Matsenko, O. Borysenko, S. Spolitis, A. Udalcovs, L. Gegere, **A. Krotov**, O. Ozolins, V. Bobrovs, “*FPGA-Implemented Fractal Decoder with Forward Error Correction in Short-Reach Optical Interconnects*,” Entropy, (2022), 24 (1):122, DOI: 10.3390/e24010122.
6. S. Matsenko, S. Spolitis, O. Borysenko, M. Pudzs, **A. Krotov**, V. Bobrovs, “*LDPC Code with Fractal Decoder Device for 100 Gbps PAM-M Optical Interconnect*,” 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Hangzhou, China, (2021), DOI: 10.1109/PIERS53385.2021.9695128.
7. **A. Krotov**, S. Artamonov, K. Kuprenyuk, V. Nikitina, N. Romanov, E. Sosnov, “*Possibilities for Increasing the Signal-To-Noise Ratio in Technical Vision Systems of Robotic Complexes Using Laser Structured Lighting*,” International Review of Mechanical Engineering (IREME), (2018) 12. 328., DOI: 10.15866/ireme.v12i4.14583.
8. **A. Krotov**, D. Volkov, N. Romanov, N. Gryaznov, E. Sosnov, D. Goryachkin, “*Method for measuring distortion in wide-angle video channels*,” Journal of Applied Engineering Science, (2018), 16. DOI: 10.5937/jaes16-17344.

2. NODAĻA. METODIKA

2.1. Matemātiskā modeļa izstrāde informācijas un telekomunikāciju tīkla simulācijas vidē

Interneta protokola (*IP*) datu pārraides tīklu pakalpojumu kvalitātes rādītāji ir noteikti rekomendācijā *Y.1541* [32], saskaņā to multivides datplūsmas pakalpojumu kvalitātes galvenie rādītāji ir *IP* datu pakas pārsūtīšanas aizture (*IPTD*) un tās variācijas (*jitter*), kā arī *IP* aiztures variācijas (*IPDV*) vidējā tīkla aizture.



2.1 att. Analītiskā modeļa struktūra.

2.1. attēlā redzams *GPON* piekļuves tīkla segments, ko ietekmē trīs abonentu datu plūsmas klases [33].

- **Pakārtotā nozare.** Datu plūsma (augstākā pakalpojumu prioritāte) ar vidējo intensitāti $\lambda_{IH} \dots \lambda_{NH}$ visiem attiecīgā piekļuves tīkla posma NN abonentiem, datu plūsma (vidējā pakalpojumu prioritāte), ar vidējo intensitāti Λ_{MI} , datu

pārraides pakalpojumu datu plūsma NN abonentiem (zemākā prioritāte) ar vidējo intensitāti $\lambda_{ILI} \dots \lambda_{DNI}$.

- **Pieaugošā nozare.** Augstākās prioritātes datu plūsma ar vidējo intensitāti λ_{EH} , viena abonenta pieprasījumu datu plūsma (vidējā prioritāte) ar vidējo intensitāti λ_{IEM} , datu pārraides pakalpojumu datu plūsma no viena abonenta (zemākā prioritāte) ar vidējo intensitāti λ_{IEM} . Platjoslas datu tīkla segmentā darbojas *NC* segmenti, katrā no tiem ir *N* abonenti. Tika noteikta vidējā *IPTD* datu pakas (kadra) aizture visiem datu plūsmas veidiem un *IPDV* aiztures novirze [34] datu plūsmai pakārtotajos un pieaugošajā nozarē *VoIP* un *IPTV*.

Centrālā *OLT* mezgla tīkla gala iekārta ir rupjā viļņgarumdales blīvēšanas multiplekseris (*CWDM-MUX*). Četru portu laboratorijas prototipam tika izmantots *CWDM-MUX 1 x 4 1550-1610 3,0 LC/APC* 1,5 m. Ierīces, kas nodrošina virzienu sadali, ir savienotas ar katru no multipleksora portiem. Šīs ierīces ir izgatavotas uz 1×2 plaknes sadalītāju bāzes, kas nodrošina būtisku pretēji vērstu izplatīšanās virziena vājinājumu (līdz 30–40 dB) [35]. Testiem tika izmantota 40 km gara optiskās šķiedras līnija laboratorijas vidē (4 gab. Fujikura šķiedras spoles, katra 10 km gara, kas savā starpā savienotas).

Tā kā laboratorijas vidē ierosinātā tīkla atšķirība ir pārraides virzienu atdalīšanas principa piemērošana tā segmentos atbilstoši gaismas plūsmas izplatīšanās virzieniem [36], [37], šādā tīklā pārraides virzienu savstarpējās ietekmes (traucējumu) izpausme ir neizbēgama, kas ir papildu specifisku traucējumu un ierobežojumu avots.

Kā prototips tika izvēlēts nejaušas vairākkārtējas piekļuves vienkanāla bloks, izmantojot nesēja sensora daudzkārtēju piekļuvi ar sadursmes noteikšanas metodi (*CSMA/CD*) [38]. Tika izmantota nejaušas piekļuves metode ar konflikta notikumu fiksēšanu, izmantojot *CSMA/CD* metodi. Ir vairāki piekļuves bloki ar asinhronu nejaušu piekļuvi monokanālam, kas pieļauj tīklā pārraidīto informācijas fiksēto kadru konfliktus (sadursmes, notikumus).

Esošo sistēmu trūkums rada situāciju, ka pārraidītās informācijas datu pakas var tikt pazaudētas, ja tās pārraida tīklā notikuma brīdī. Zudumi rodas, ja fiksētie kadri, kas saņemti ar kļūdas ziņojumu, tiek izmesti piekļuves bloku uztveršanas daļā [39], [40]. Šis trūkums ir aktuāls arī mūsdienu tīklu sistēmās, kas strādā ar līdzīgām piekļuves iekārtām, izmantojot *Ethernet* tehnoloģiju. Šis apstāklis būtiski ierobežo tādu tīklu izmantošanu, kam ir piekļuves iekārtas reālā laika datu pārraides sistēmās un kam ir nepieciešama garantēta ziņojumu pārraide noteiktā ierobežotā laika intervālā [41]. Sistēmās, kas izmanto šādu piekļuves metodi, ar kļūdām saņemto kadru (izmesti piekļuves līmenī) datu apstiprināšanu un automātisku pieprasīšanu veic tīkla hierarhijas augšējo līmeņu programmatūras protokolu izveidošanu, kas prasa laiku atkarībā no skaitļošanas ierīču veiktspējas. Prototipā izmantotais *CSMA/CD* piekļuves protokols nenodrošina garantētu kadru pārraides laiku kļūdu un konfliktu gadījumā (lielas slodzes un traucējumu režīmos). Visi šie trūkumi ierobežo šādu plaši izplatītu sistēmu izmantošanu apstākļos, kad tiek noteiktas augstas prasības ziņojumu pārraides drošībai (zudumu un kļūdu neesamība) un kavēšanās ar fiksēto kadru pārraidīšanu tīklā. Šādas prasības tiek noteiktas, piemēram, pārraidot vadības komandas un citu informāciju izplatītajās reālā laika vadības sistēmās [42].

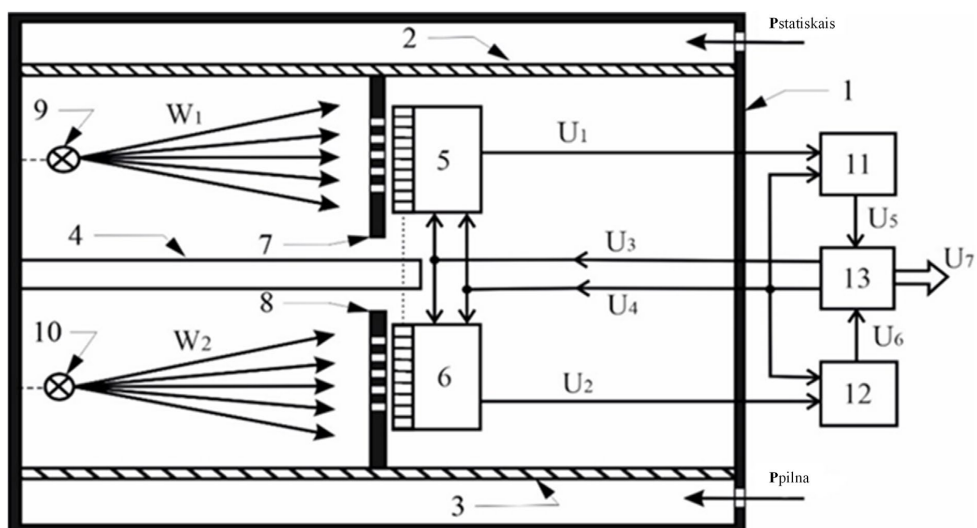
Tīkla darbība augstas intensitātes lauku apstākļos ietver šādas optiskas lokālā tīkla piekļuves vienības izveidi ar garantētu ziņojumu piegādi, kas nodrošinās garantētu tādu informācijas fiksēto kadru piegādi un zemu latentumu, kas pārraidīti lokālajā tīklā piekļuves līmenī visā

noslodzes diapazonā. Tas ļauj īstenot bezkonflikta piekļuves metodi un nodrošinās aizsardzību pret kļūdām, kas rodas, pārraidot kadrus pa kopēju kanālu [43], [44], turklāt tīklam, kas izveidots, pamatojoties uz ierosinātajām piekļuves ierīcēm, ir pasīvi sadales mezgli un ekonomiska vienas šķiedras infrastruktūra. Tas nodrošina energoefektivitāti un resursu saglabāšanu, kā arī zemu jutību pret elektromagnētisko traucējumu un pilnīgas elektroizolācijas ietekmi uz tīklā esošiem termināļiem, kas rada papildu trokšņa imunitāti, jo nepastāv iespēja datu pārraides novirzēm [45], [46].

Lai sasniegtu šo mērķi, tika piedāvāts papildināt prototipu ar optisko raidītāju, optisko uztvērēju, atdalīšanas ierīci, kopējo raidītāju un uztvērēju, atskaites ģeneratoru, adresu iestatītāju, analizatoru, slēdzi un saskarnes bloku.

2.2. Optiskā spiediena sensora izstrāde informācijas un datu pārraides tīkliem

Ierosinātais statiskā un pilnā spiediena sensors (2.2. att.) sastāv no korpusa ar diviem caurumiem, attiecīgi statiskā P_{st} un kopējā P_{tot} , spiediena mērīšanai. Caurumi atrodas virs un zem atstarpes, ko veido 2. un 3. membrāna.



2.2. att. Spiediena sensors.

- 1 – korpus ar diviem caurumiem; 2 un 3 – membrānas; 4 – statīvs; 5 un 6 – fotodetektori;
- 7 un 8 – aizkari ar spraugām; 9 un 10 – starojuma avoti; 11 un 12 – analogais/digitālais pārveidotājs (ADC); 13 – mikroregulators.

Sākotnējā stāvoklī aneroīdu jutīgā elementa membrāna (2) ieņem noteiktu pozīciju. Optiskais starojums W_1 no avota (9) atstarojas uz spraugu (7) un caur [n] šķēlumiem, veidojot [n] gaismas plankumus vairāku līnijas elementu (pikseļu) lielumā uz fotodetektora līnijas (5) virsmas. Fotodetektoru masīva darbības rezultātā tā izejā veidojas periodiskais elektriskais signāls (ar periodu, kas vienāds ar laiku, kāds nepieciešams visu masīva pikseļu secīgai

apstrādei), kurā optiskās jaudas notikuma sadalījums uz tā virsmas atspoguļojas signāla U_1 amplitūdas izmaiņu formā.

Fotodetektora (5) līnijas darbību nodrošina, no mikrokontrolliera piegādājot vadības signālus U_3 un U_4 . Vadības signāls U_3 nosaka sākumu (pirmo pikseli), secīgi aptaujājot visus līnijā fiskētos pikselus. Otrais signāls U_4 fiksē vaicājuma periodu katram atsevišķam līnijā fiskētam pikselim. Elektriskā signāla U_1 amplitūda pie fotodetektora (5) līnijas izejas katrā laika brīdī ir proporcionāla optiskās jaudas notikumam uz konkrētā laikā analizētā pikseļa. Rezultātā tiek ģenerēts periodiskais elektriskais signāls U_1 pie fotodetektora uztvērēju līnijas izejas (5), kurā optiskās jaudas telpiskais sadalījums līnijas (5) gaismas jutīgās virsmas sakrīt ar elektriskā signāla amplitūdas laika sadalījumu signāla U_3 periodā. Tādējādi $[n]$ iekšējais maksikums tiks fiksēts fotodetektoru masīva izejas signālā, kas atbilst signāliem no pikseliem, kas saņem starojumu caur $[n]$ šķēlumiem 7. starpposmā.

Fotodetektora masīva izejas signāla tālāka apstrāde notiek digitālā formātā. Tam tiek izmantots ADC 11, kas pārvērš signāla amplitūdu no katra līnijas pikseļa par ciparu kodu, kas atbilst amplitūdai. Lai sinhronizētu ADC paraugu fiksēšanas momentus [46] ar fotodetektora līnijas darbību, ADC vadības informācijas iestatīšanai tiek piegādāts signāls U_4 . Signāla amplitūdas vērtību masīvs no līnijas pikseliem ADC 11. izejas signāla U_5 veidā tiek piegādāts mikrokontrolliera ievadei (13). Mikrokontrolliera programmatūra apstrādā viena signāla U_3 periodā saņemto datu masīvu.

Lai apstiprinātu mērījumu rezultātu statistisko stabilitāti, tika pārbauts, vai tie atbilst izplatīšanās tehniskajiem parametriem. Tā kā fiksētā vērtība ir $m > 50$, pārbaudei tika izmantots K. Pīrsona χ^2 kritērijs [47], [48]. Analizējot iegūtos rezultātus, visiem četriem eksperimentiem par pamatu tika pieņemta nulles hipotēze.

2.3. Metodikas izstrāde optimālai trokšņnoturīgai kodēšanai gaisakuģu iekšējiem datortīkliem

Tāpat kā jebkuru lineāro bloka kodu [49], zema blīvuma paritātes pārbaudes ($LDPC$) kodu var aprakstīt, izmantojot $k \times n$ ģenerators matricu G , kur $[k]$ ir informācijas secības garums un $[n]$ ir koda bloka garums. Koda vektoru C iegūst, reizinot informācijas secību $[m]$ ar ģenerējošo matricu G .

$$C = m G \quad (1)$$

Sistemātiskam $LDPC$ kodam ģenerators matricu var attēlot kā $G = [I, P]$, kur I – vienības lieluma matrica $k \times k$ [50], [51]. Kods tiek aprakstīts ar pārbaudes matricu $H = [P^T, I]$.

Šādas matricas elementi ir testa vienādojumu koeficienti, no kuriem aprēķina testa simbolus. Lai nodrošinātu efektīvus $LDPC$ kodus, pārbaudes matricai H jābūt mazai [52], [53], un vienību blīvums tajā parasti ir vairāki desmiti vai simti tūkstoši elementu.

Vispārīgākām pozicionālo ciparu sistēmām ($GPNS$) var būt ļoti noderīgas īpašības, piemēram, trokšņa imunitāte un ērta permutāciju izveidošanās [54–56]. Ģenerējot un numurējot kombinatoriskos objektus, katram atsevišķam uzdevumam tiek izmantotas īpašas izstrādes metodes, ko var raksturot kā šīs pieejas būtisku trūkumu [56], [57]. Binomiālo numuru sistēmas un to ģenerētie viendabīgie binomiālie numuri ir jauns rezultāts vispārējo

pozicionālo numuru sistēmu jomā [58], [59]. Pirmais manuskripts, kas radīja binomiālas sistēmas, bija pirms vairāk nekā 30 gadiem referāta formā seminārā.

Binomiālā skaitļu sistēma ir ierobežota un efektīva [60]. Ir numerācijas algoritms, kas pēc noteikta soļu skaita konvertē koda vārdu Ai par tā kvantitatīvo ekvivalentu Q_{Ai} . Binomiālā sistēma ir labi definēta, jo divas dažādas kodēšanas kombinācijas nevar būt vienādas ar vienu un to pašu pašu skaitlisko vērtību.

2.4. Asimetriska neermistiskā stāvokļa *ENZ* saturošās slāņveida struktūras lietošana attīstītām optiskām ierīcēm un sistēmām

Asimetriska neermistiskā stāvokļa pie epsilon tuvu nullei (*ENZ*) saturošās slāņveida struktūrās konstrukcijas ir kompozītmateriālu veids, kam piemīt unikālas optiskās īpašības to specifiskā dizaina un sastāva dēļ. Šīs struktūras raksturo slāņi ar dažādām permitivitātes vērtībām, ar nosacījumu, ja vismaz vienā slānī ir *ENZ* materiāls [61], [62].

Viena no asimetriskā neermistiskā stāvokļa pie *ENZ* saturošās slāņveida struktūrās konstrukcijas galvenajām priekšrocībām ir spēja kontrolēt gaismas izplatīšanos netradicionālā veidā. Piemēram, šīm konstrukcijām var būt vienvirziena gaismas izplatīšanās, kur gaismas viļņi pārvietojas tikai vienā virzienā, vienlaikus pilnībā tiekot bloķētiem pretējā virzienā. Šī īpašība ir īpaši noderīga [63–65], lai projektētu optiskos izolatorus un cirkulācijas nodrošinātos elementus, kas ir būtiski komponenti optiskās komunikācijas sistēmās, lai novērstu signāla traucējumus un nodrošinātu signāla integritāti [66–68].

Šīs struktūras savstarpējais raksturs ļauj realizēt topoloģiski aizsargātos fotoniskos stāvokļus, kuros gaismas viļņi ir imūni pret atstarošanās vai traucējumu izraisītiem zudumiem [69], [70]. Šī funkcija ir ļoti svarīga, lai izstrādātu spēcīgas fotoniskas ierīces, kas ir noturīgas pret ārējiem traucējumiem un nepilnībām.

Asimetriska neermistiskā stāvokļa pie *ENZ* saturošās slāņveida struktūrās ir iespēja uzlabot gaismas avotu mijiedarbību un nodrošināt efektīvu gaismas ierobežošanu un manipulācijas nanomērogā. Šīs struktūras var pielāgot, lai atbalstītu virsmas plazmona polaritonus [71], virsmas viļņus vai citus izņēmuma režīmus, ko var izmantot zondēšanā, zem viļņgarumadales attēlveidošanai un enerģijas ieguvei [72–74].

Šo struktūru optiskās īpašības nodrošina lietojamību pārkonfigurējamu un adaptīvu optisko ierīču izstrādē. Pielāgojot slāņu parametrus vai ierosinot ārējus stimulus, piemēram, elektriskos vai magnētiskos laukus, konstrukcijas optisko reakciju var dinamiski kontrolēt, paverot iespējas pēc pieprasījuma modulēt gaismas pārraidi, atstarošanos un absorbciju [75], [76].

Kopumā asimetriska neermistiskā stāvokļa pie *ENZ* saturošās slāņveida struktūrās ir piesātināta platforma jaunu optisku parādību izpētei un nākamās paaudzes fotonisko ierīču projektēšanai ar uzlabotu funkcionalitāti un veiktspējas raksturlielumiem.

Asimetrija konstrukcijā attiecas uz materiāla neviendabīgo dabu, kas nozīmē, ka tā reakcija uz gaismas izplatīšanos ir atšķirīga atkarībā no notikuma gaismas virziena. Šo asimetriju var panākt, izmantojot dažādus līdzekļus, piemēram, struktūras pieauguma vai zuduma ieviešanu, laika atgriezeniskās simetrijas pārtraukšanu vai nelineāru efektu izmantošanu [77], [78].

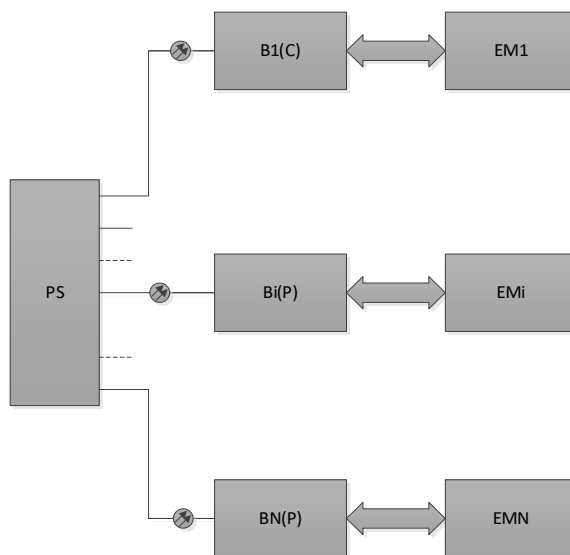
Šīs asimetriskā neermistiskā stāvokļa pie *ENZ* saturošās slāņveida struktūras ir piesaistījušas ievērojamu interesi fotonikas un metamateriālu jomā, jo tās var izmantot, piemēram, viļņvadības sensoriem un nelineāriem optiskiem efektiem.

3. NODAĻA. GALVENIE REZULTĀTI

3.1. Augstas izturības tīkls

Tīklam var būt trīs režīmi:

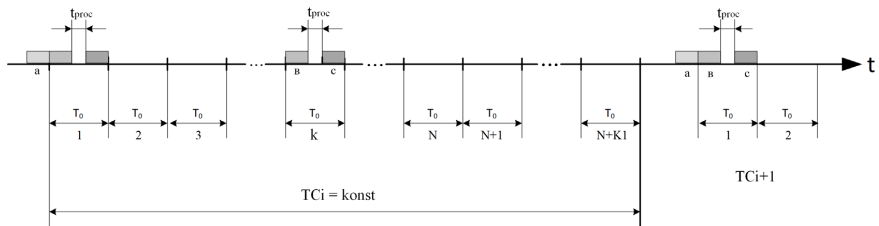
- fāzes režīms (pulksteņa sinhronizācija);
- režīms, kad vienība “C” režīmā “P” režīmā veic datu bāzu aptauju un piešķir piekļuves intervālus;
- datu pārsūtīšanas režīms.



3.1. att. Iekšējā tīkla modelis. PS – pasīvais sadalītājs; B, Bi, BN – piekļuves ierīces; EM – elektroniskais modulis.

3.1. attēlā redzams lokālā tīkla organizācijas variants, pamatojoties uz šajā attēlā piedāvāto protokolu, piekļuves ierīce B1 ir “C” režīmā, savukārt piekļuves ierīces Bi ÷ BN – “P” režīmā. Visi BS ar optiskām līnijām tika savienoti ar pasīvo optisko sadalītāju (PS) caur saskarni. Katrai no tām ir savs elektroniskais modulis (EM). Tādējādi optiskais signāls ir sazarots starp visiem BS, un tiek izveidots pasīvs kopas optiskais monokanāls (kur visas piekļuves vienības “dzird” visus). Tīklam var būt trīs režīmi.

1. Fāzes režīms (pulksteņa sinhronizācija).
2. Balsošanas režīms. T bāzes stacijas “P” režīmā B aptaujā “C” režīmā un piešķir piekļuves intervālus.
3. Datu pārsūtīšanas režīms.

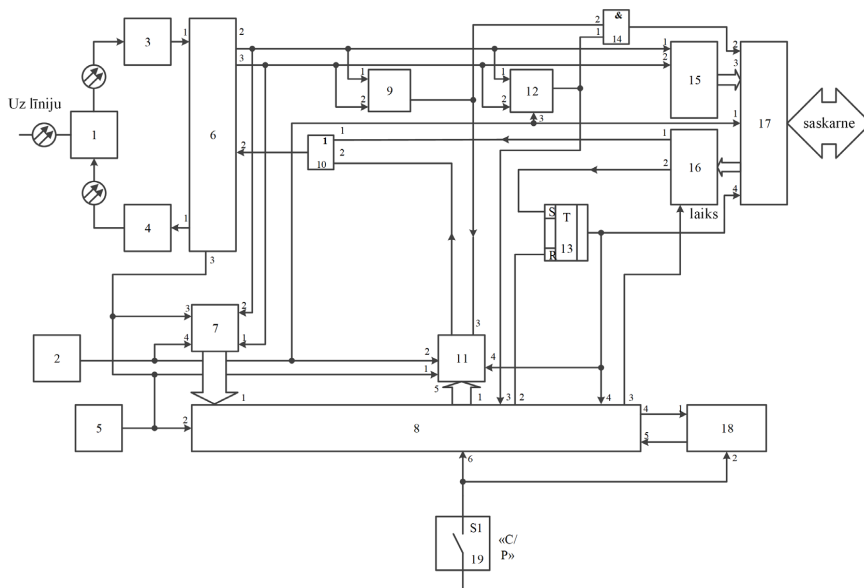


3.2. att. Protokola laika diagramma. A – fāzes intervāls; B – pieprasījuma cikls; c – loga piešķiršanas intervāls; t_{proc} – analizatora vaicājuma apstrādes intervāls; T_0 – loga pārraides intervāls; TC_i – i -tais pārraides intervāls; TC_{i+1} – $i+1$ pārraides intervāls (sākums).

Apvienojot optisko šķiedru piekļuves punktus ar optiskajiem sensoriem, operatori var izveidot viedo tīklu, kas nodrošina ātrdarbīgu savietojamību un nepārtrauktu darbību, izturību pret traucējumiem un uzlabotu vispārējo sistēmas veiktspēju. Šī integrētā pieeja paver ceļu progresīvu risinājumu izstrādei dažādās jomās, tostarp telekomunikāciju, viedo pilsētu, rūpnieciskās automatizācijas un vides uzraudzības jomā.

Šīs jaunās pieejas veiksmīga integrācija ne tikai risina problēmas, kas saistītas ar datu plūsmas pārraidīšanu no abonentiem, bet arī paver jaunas iespējas tīkla darbības optimizēšanai, lietotāju pieredzes uzlabošanai un pakalpojumu sniegšanas nodrošināšanai [79, 80]. Veicot kontrolētu testēšanu un apstiprināšanu, ir apstiprināta šīs pieejas efektivitāte un stabilitāte, kas paver ceļu tās pieņemšanai reālos vidēs.

3.2. Augstas izturības tīkla komponentes



3.3. att. Iekšējā tīkla piekļuves bloks ar garantētu ziņu piegādi.

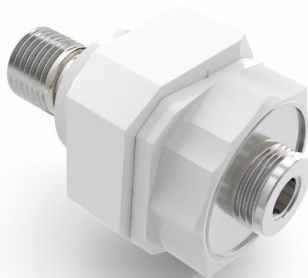
3.3. attēlā redzama iespējamā iekšējā tīkla piekļuves bloka ieviešana ar garantētu ziņojumu piegādi, kur: 1 – atdalīšanas ierīce; 2 – adrešu noteicējs; 3 – optiskais uztvērējs; 4 – optiskais raidītājs; 5 – references ģenerators; 6 – lineārais kodētājs/dekodētājs; 7 – komanduztvērējs; 8 – sinhronizācijas un vadības bloks; 9 – kļūdu detektors; 10 – “VAI” ķēde; 11 – komandraidītājs; 12 – rāmja selektors; 13 – gatavs trigeris; 14 – “UN” ķēde; 15 – saņemt RAM; 16 – pārraidīt RAM; 17 – saskarnes bloks; 18 – analizators; 19 – slēdzis S1 “C/P”.

Iekšējā tīkla piekļuves bloka izstrāde un īstenošana ar garantētu ziņojumu piegādi gaisakuģiem ir būtisks progress aviācijas sakaru tehnoloģijā. Ieviešot stabilu un uzticamu risinājumu, lai pārvaldītu piekļuvi tīklam un nodrošinātu ziņojumu pārraidi, šī pieeja uzlabo sakaru sistēmu drošību, efektivitāti un veiktspēju gaisakuģī.

Veicot kontrolētu testēšanu un rezultātu validāciju, ir pierādīta šā risinājuma efektivitāte un drošība, nodrošinot to, ka kritiskos ziņojumus var ātri un droši nogādāt gaisakuģa iekšējā tīklā. Šī spēja ir būtiska, lai uzturētu netraucētu saziņu starp apkalpes locekļiem, pasažieriem un vadību uz zemes, tādējādi uzlabojot situācijas kontrolēšanu un darbības efektivitāti lidojuma laikā [81].

Kopumā iekšējā tīkla piekļuves bloka izstrāde un izmantošana ar garantētu ziņojumu piegādi gaisakuģiem ir nozīmīgs pagrieziena punkts aviācijas sakaru tehnoloģijas attīstībā, liekot pamatus uzlabotām sakaru pārraides iespējām un uzlabotiem darbības rādītājiem lidojuma laikā.

3.3. Optiskie sensori un to lietojums gaisakuģos



3.4. att. Izstrādātā spiediena sensora 3D modelis.

Izveidotajam spiediena sensora projektam ir augsta precizitāte, nosakot elastīgā sensora elementa un liela ātruma deformāciju (kuras vērtība tiek samazināta līdz minimumam). Augstā mērīšanas sistēmas veiktspēja ļāva izmantot algoritmus, kas ņem vērā un kompensē dažāda veida destabilizējošos faktorus (traucējumus, vibrācijas, trieciena efektus u. c.), kas rodas gaisakuģa ekspluatācijas laikā.

Piedāvātā dizaina zemais enerģijas patēriņš, izmēri un svars ļauj izmantot sensoru kā daļu no gaisakuģu rezerves ierīču integrētajām sistēmām.

Ņemot vērā vispārējo tendenci bezpilota lidaparātu (*UAV*) attīstībā ar elektriskās uzlādes stacijām, spiediena sensoru izmantošana, balstoties fotoelektronisko elementu līnijās, tika noteikti augstuma un ātruma parametri, palielināta enerģijas ilgtspēju un samazināta *UAV* kopējie izmēri un svari.

Spiediena sensora veiksmīga izstrāde, kura pamatā ir deformējama sinusoidāla profila CuBe₂Ni (Co) bronzas membrāna ar cietu centru, *LED* ar viļņu garumu 625 nm, uzlādēta sakabinātas ierīces (*CCD*) matrica ar fotoreakcijas neviendabīgumu 5 % un pikselu izmēru 14 μm, ir nozīmīgs sensoru tehnoloģijas sasniegums. Šis novatoriskais sensoru dizains piedāvā virkni priekšrocību, kas ievērojami uzlabo spiediena mērīšanas sistēmu precizitāti, efektivitāti un veiktspēju.

Viena no galvenajām šī spiediena sensora priekšrocībām ir tā spēja palielināt mērījumu precizitāti vismaz par 50 % gan absolūtā, gan statistiskā spiediena sensoriem. Šīs precizitātes uzlabojums ir būtisks risinājumiem, kur precīziem spiediena mērījumiem ir būtiska nozīme drošības, veiktspējas un normatīvās atbilstības nodrošināšanai.

Lietojot un attīstot šo sensoru, būtiski samazinās arī enerģijas patēriņš – vismaz par 70 %. Šis enerģijas patēriņa samazinājums samazina izmaksas un veicina ilgtspēju, līdz minimumam samazinot sensoru darbību ietekmi uz apkārtējo vidi.

Turklāt šī spiediena sensora novatoriskais dizains ļauj samazināt laiku, kas nepieciešams, lai uzturētu kārtību, un galasensora svaru ne mazāk kā par 25 %, salīdzinot ar tradicionālajiem frekvences pilnā un statistiskā spiediena sensoriem. Sensoru uzturēšanas un svara samazināšanas racionalizēšana pozitīvi ietekmē vispārējo sistēmas efektivitāti un veiktspēju.

Izmantojot šī novatoriskā sensora dizaina unikālās iezīmes un iespējas, nozares un lietojumprogrammas, kam nepieciešami precīzi spiediena mērījumi, var pilnveidot, pamatojoties uz uzlaboto veiktspēju, uzticamību un rentabilitāti.

3.1. tabula

Izstrādātā spiediena sensora galvenie raksturojošie parametri

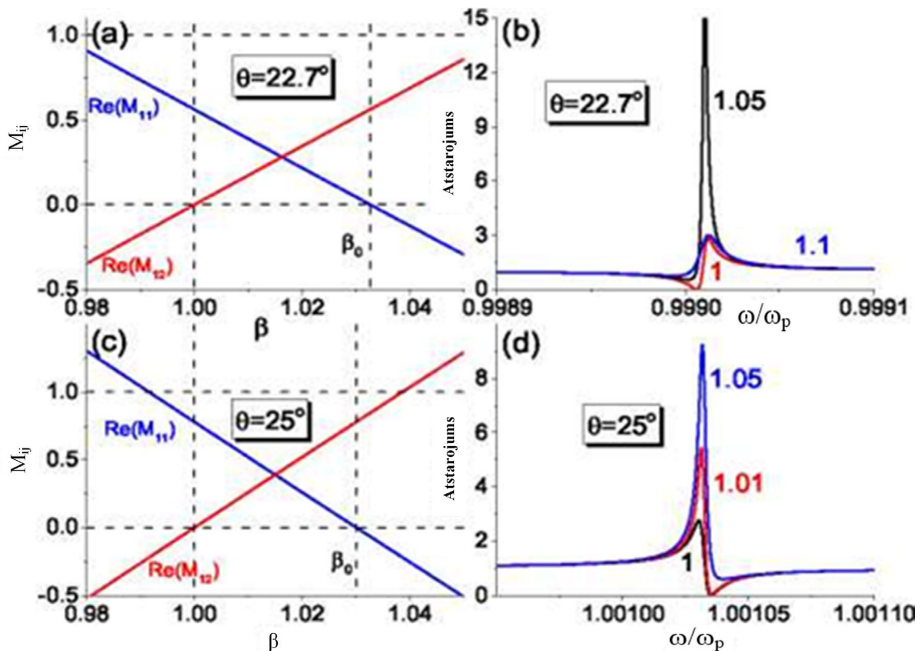
| Paramerts | Prototips (lietots <i>Honeywell AirDC</i>) | Perspektīvais spiediena sensors | Pieauguma efektivitāte, % |
|-------------------------------------|---|--|----------------------------------|
| Datu pārraides intervāls, s | 0,31 | 0,25 | 19 |
| Barošanas sprieguma samazinājums, V | 15 | 3,3 | 78 |
| Enerģijas patēriņa samazinājums, mW | 1000 | 280,708 | 72 |
| Mērījumu kļūda, Pa | 32 | 13,14 | 59 |
| Fiksēšanas laiks, s | 30 | 1 | 96 |
| Svara zudums, g | 400 | 213 | 46,75 |

3.4. Asimetriska neermistiskā stāvokļa *ENZ* saturošās slāņveida struktūras analīze

3.5. attēlā redzams piemērs neermistiskā stāvokļa asimetrijai dažādos leņķos. Pieņemot, ka ir divi leņķi: pirmais leņķis $\theta = 22,7^\circ$ zem 0 “nepārtraukti saistītā stāvoklī” (*BIC*) un otrais leņķis $\theta = 25,0^\circ$ virs tā. Rezonanses frekvences stāvoklis mainās attiecīgi uz $\omega = 0,999 \omega_0$ un $\omega = 1,001 \omega_0$ vērtībām. Pola stāvokli *ReM11* 0 sasniedz pie $\beta_0 = 1,03263$ (3.5. (a) att.) un $\beta_0 = 1,03$ (3.5. (c) att.), savukārt nulles stāvokli (*ReM12* $\ll 1$) pie šiem β_0 .

Koherentas perfektas absorbcijas fenomēns (*CPA*) ir fascinējoša pētījumu joma optikā un fotonikā, kur notikumu gaismas viļņu pilnīga absorbcija tiek panākta ar traucējošu efektu palīdzību. Analizējot šo teoriju, jāuzsver, ka nav pilnībā izpildīti *CPA* ražošanas nosacījumi, kas liecina par nepilnīgu *CPA* stāvokli. Neskatoties uz daļēji izpildītiem nosacījumiem, parādās ievērojams novērojums – pie kritiskā parametra β_0 novērojams būtisks atstarošanās uzlabojums.

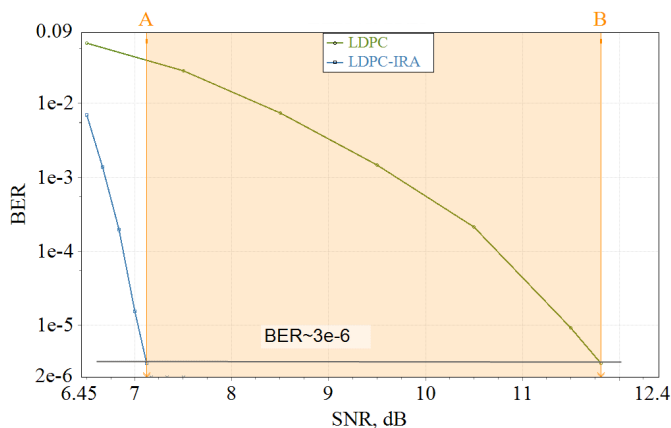
Šis atstarošanas uzlabojums, kā redzams 3.5. (b) un (d) attēlā, parāda *CPA* ģenerēšanas nepilnīgā stāvokļa būtisko ietekmi uz gaismas viļņu uzvedību, kas mijiedarbojas ar sistēmu. Spēcīgais atstarojums, kas novērots netālu no β_0 , izceļ sarežģīto mijiedarbību starp krītošiem gaismas viļņiem, materiāla īpašībām un īpašajiem risinājuma apstākļiem.



3.5. att. a), c) Pārneses matricas elementu atkarība no asimetrijas parametra β sastopamības leņķī $\theta = 22,7^\circ$ (sastopamības frekvencē $\omega = 0,999 \omega_0$) un $\theta = 25,0^\circ$ (sastopamības frekvencē $\omega = 1,001 \omega_0$); b), d) atbilstošie atstarošanas spektri dažādiem neermistiskā stāvokļa asimetrijas parametriem β , kas atzīmēti ar skaitļiem blakus līknēm. Zaudējumu summa $\gamma_+ = 0,001$.

Tomēr plazmas frekvences gadījumu [81] var nošķirt divu iemeslu dēļ, kā arī plazmas frekvence [82] izceļas divu atšķirīgu iemeslu dēļ. Pirmkārt, 3.5. attēlā redzamajos Fano spektru profilos ir novērojama ievērojama asimetrija, nošķirot tos no 3.5. attēlā redzajiem simetriskajiem profiliem. Šī asimetrija norāda novirzi no paredzamās viendabības vai līdzsvara spektrālajos datos, kas liecina par pamatkompleksiem vai unikālām iezīmēm pētāmajā sistēmā. Izteiktā asimetrija plazmas frekvences gadījumā signalizē par atkāpšanos no ierastajiem modeļiem, mudinot sīkāk izpētīt faktoros, kas veicina šo atšķirīgo uzvedību. Šī spektrālo profilu novirze dod mājienu par potenciāli jaunām atziņām vai parādībām spēlē, kas pamato rūpīgāku izpēti, lai atšķetinātu šī intriģējošā novērojuma pamatā esošos mehānismus un sekas. Otrkārt, vēl viena spilgta šīs lietas iezīme ir novērojums, ka $\beta_0 > 1$ gan zem, gan virs θBIC . Šis konstatējums ir pretrunā nosacītajai gaidai $\beta_0 < 1$ sastopamības leņķī $\theta = \theta BIC$. Tas, ka β_0 šajos gadījumos pārsniedz 1, pretēji paredzamajai rīcībai pie θBIC , izceļ pretintuitīvo aspektu plazmas frekvences gadījumā. Šī negaidītā neatbilstība rada jautājumus par mehānismiem, kas ir šīs neparastās rīcības pamatā, un uzsver vajadzību veikt papildu izpēti, lai noskaidrotu šīs pretrunas ietekmi un nozīmīgumu. Šādi pretintuitīvi rezultāti liek apšaubīt esošos pieņēmumus un aicina dziļāk izprast sarežģīto dinamiku šajā scenārijā. Šie fakti apstiprina atbildes reakcijas specifiskumu un nelietderību tuvu BIC plazmas frekvencē.

3.5. Optiskā videosakaru pārraide gaisakuģos, kas veidota uz turpvērstās kļūdas labošanas kodu



3.6. att. Bitu kļūdas koeficients (BER) pret signāla un trokšņa koeficientu (SNR) $LDPC$ un $LDPC-IRA$.

$LDPC-IRA$ ievērojamā veiktspēja saistīta ar tās spēju efektīvi mazināt kļūdas pārraides procesā, īpaši – trokšņu un traucējumu klātbūtnē. Apvienojot $LDPC$ kodus ar iteratīvām dekodēšanas metodēm, $LDPC-IRA$ var sasniegt ievērojamas kļūdu labošanas iespējas, vienlaikus saglabājot zemu latentumu un augstu caurlaidspēju.

Simulācijas rezultāti skaidri parāda, ka $LDPC-IRA$ pārspēj tradicionālo $LDPC$ kodēšanu BER ziņā dažādos SNR līmeņos. Šis ievērojamais kļūdu labošanas efektivitātes uzlabojums

nozīmē uzlabotu datu pārraides uzticamību un robustumu, padarot *LDPC-IRA* par vērtīgu risinājumu kritiskām lietojumprogrammām, piemēram, *ARINC-818* sakaru sistēmām.

Kopumā *LDPC-IRA* kodēšanas pieņemšana *ARINC-818* sistēmās ievieš revolucionāru datu pārraidīšanas un saņemšanas veidu, piedāvājot noturīgāku un efektīvāku sakaru sistēmu, kas spēj izturēt izaicinājumus ekspluatācijas apstākļos un nodrošināt netraucētu savienojamību aviācijas vidē.

Saskaņā ar simulācijas rezultātiem tika iegūta būtiska *LDPC-IRA* priekšrocība pār *LDPC*. Modelēšana 16-*QAM* modulācijā parāda, ka *LDPC-IRA* nodrošina *SNR* 7,2 dB *BER* 2×10^{-6} . *LDF-IRA* koda pievienošana *ARINC-818* uzlabo pārraides efektivitāti vairāk nekā trīs reizes. Problēmu risināšanā tas ļauj palielināt sistēmas stabilitāti *HIRF* ietekmē.

Praktiski *LDPC-IRA* ieviešana sistēmā var samazināt informācijas izkliedi vairāk nekā 1,3 reizes, salīdzinot ar tradicionālajām kodēšanas metodēm. Tas nozīmē, ka, pat strādājot ar sarežģītiem sākotnējiem datu apstākļiem, piemēram, augstu trokšņa vai traucējumu līmeni, *LDPC-IRA* var efektīvi mazināt kļūdas un nodrošināt precīzu un savlaicīgu informācijas sniegšanu.

4. NODAĻA. PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

Analizējot tendences borta informācijas un telekomunikāciju tīklu un sensoru attīstībā augstas intensitātes elektromagnētisko lauku apstākļos, ir nepieciešami būtiski uzlabojumi borta tīklu pretestības nodrošināšanā augstas intensitātes elektromagnētiskajiem laukiem.

Pētījumu rezultātā, palielinot pretestību, tika noteiktas tīklu vadības organizēšanas metodes, pret troksni noturīga kodēšana un spiediena sensori gaisakuģī. Tika konstatētas sistēmiskas metodoloģiskas problēmas un dažādās pretrunas iekšējos tīklos, kodēšanas organizēšanā un spiediena sensoru izmantošanā.

Šajā pētniecības jomā esošo zinātnisko darbu analīze parādīja, ka, lai izveidotu drošu tīklu ar garantētu ziņojumu piegādi paaugstinātas elektromagnētiskās slodzes apstākļos, ir nepieciešama izmantoto zinātnisko un metodisko aparātu modernizācija. Šajā nolūkā ir pamatotas izredzes izmantot maģistrālās līnijas pret troksni drošas kodēšanas metodes un optiskos sensorus jaunā pētniecības jomā. Tas ļauj atrisināt metodoloģiskās problēmas, ko rada elektromagnētisko lauku ietekme uz borta informācijas un telekomunikāciju tīklu.

Esošo tīklu trūkumi ietver optisko kanālu kabeļu izmantošanu, kam ir liels svars un salīdzinoši zema caurlaidspēja, maza raidzvēvēju pretestība lauku ietekmei, kā arī liela elektronisko statisko un kopējā spiediena sensoru jutība pret EMV iedarbību.

Tiek formulēta pētījuma hipotēze, saskaņā ar kuru optisko šķiedru izmantošana kā galvenā līnija datu pārraidei ar hibrīdtroksni izturīgu kodēšanu, kā arī optisko sensoru izmantošana statiskā un pilnā spiediena sensora mērīšanai būtiski palielinās sistēmas pretestību elektromagnētiskajam starojumam, samazinās raidīšanas un uztveršanas ierīču svaru un nodrošinās lidojumu drošību.

Šajā pētījumā ir iekļauti trīs savstarpēji saistīti modeļi, kas izstrādāti, lai atvieglotu pētniecības procesu un novērtētu hipotēzes pamatotību. Šie savstarpēji saistītie modeļi kalpo kā visaptverošs pamats rūpīga un sistemātiska pētījuma veikšanai saskaņā ar noteikto zinātnisko mērķi.

Izstrādātā metodika nodrošina uzticamu pakalpojumu tīkla uzvedības atspoguļojumu, kā piemēru izmantojot pasīvajos optiskajos tīklos balstītu optiskās piekļuves tīklu.

Optimālas pret troksni noturīgas kodēšanas metode gaisakuģu borta datortīklos, pamatojoties uz troksni izturīgiem tiešas korekcijas *LDPC* kodiem, palielina līnijas pretestību pret traucējumiem.

Metodoloģija optiskā spiediena sensoru izstrādei gaisakuģu informācijas un telekomunikāciju tīklam ļauj projektēt izturīgāku elektromagnētisko traucējumu sensoru ar statisko un kopējo spiedienu parametriem. Šī tehniskā un materiālā īpatnība ir optisko metožu izmantošana informācijas vākšanai.

Promocijas darba izstrādes laikā izstrādātais risinājums ļauj turpināt attīstīt un piemērot jaunas pētniecības jomas optisko šķiedru platjoslas tīklu izmantošanai gaisakuģos.

4.1. Galvenie secinājumi

1. Ierosināta optiskās šķiedras piekļuves tīkla izveides organizēšana. Katrs piedāvātā tīkla gala mezgls monopolizē visu kanāla joslas platuma resursu, kas piešķirts pie tā viļņa garuma, kas būtiski uzlabo pakalpojumu kvalitātes *QoS* rādītājus datu pārraidei piedāvātajā tīklā. **Piedāvātais tīkla risinājums nodrošina jaudas divkāršošanu (pievienoto mezglu skaitu), salīdzinot ar tradicionālo viļņu multipleksēšanas tehnoloģiju izmantošanu.** Izpētītais un piedāvātais pasīvais tīkls nodrošina pilnīgu loģisko pārredzamību specializētajos kanālos, un tam nav nepieciešams pievienot papildu galvenes informācijas datu pakām (kadriem), piemēram, *GPON*. Turklāt no caurlaidspējas mezgla līmenī nav atkarīga tīkla segmentā iekļauto mezglu skaits vai kopējā tīkla garumu izmaiņas. Tiek piedāvāts optiskā tīkla piekļuves bloks. Ierosinātā piekļuves bloka izmantošana ļauj organizēt garantētu informācijas kadru pārraidi piekļuves tīkla līmenī, jo tiek ieviesta sinhrona bezkonfliktu piekļuves metode ar kadru apstiprinājumu piekļuves līmenī. Piekļuves protokola izmantošana ar vaicājuma aptauju un piekļuves intervālu piešķiršanu piedāvātajos piekļuves blokos nodrošinās ne tikai garantētu ziņojumu piegādi, bet arī nelielu to pārraidīšanas aizturi, kas proporcionāli pieaugs, palielinoties tīkla noslodzei. Tomēr pat maksimālas noslodzes gadījumā aizture piekļuves līmenī nepārsniegs intervāla laiku, kas vienāds ar pilnu aptaujas un pārraides ciklu. Piekļuves protokola izmantošana ar garantētu ziņojumu piegādi ļauj piedāvāto piekļuves bloku izmantot reālā laika tīklos, kas ir īpaši svarīgi, veidojot kontroles sistēmas un izplatītās reālā laika skaitļošanas sistēmas. Optiskās šķiedras izmantošana tīklā ļauj nodrošināt augstu trokšņa imunitāti jaudīgu elektromagnētisko lauku iedarbības apstākļos, kā arī būtiski sarežģī informācijas pārtveršanu, nodrošina augstu trokšņa imunitāti un informācijas aizsardzību vietējā tīklā, kas būvēts, pamatojoties uz piedāvātajām piekļuves vienībām, un izveidoto termināļu pilnīga elektriskā izolācija radīs papildu trokšņa imunitāti, jo nebūs “nejauši nokļūdušas” strāvas.

Šīs priekšrocības ir īpaši svarīgas, būvējot sistēmas, kas piesātinātas ar radioelektroniskām iekārtām (*REE*), piemēram, radiostacijas, radiolokācijas stacijas (*RLS*) un citas, kur papildus nepieciešama pārraidītās informācijas aizsardzība, kā arī tīkla iekārtu neuzņēmība pret zibens izlādēm.

2. Simulācijas rezultāti parādīja ievērojamu priekšrocību, ko sniedz *LDPC-IRA* (zema blīvuma paritātes pārbaude ar neregulāru atkārtotu uzkrāšanu) kodēšana, salīdzinot ar tradicionālajām *LDPC* kodēšanas shēmām. Modelēšanā izmantojot 16 *QAM* modulāciju, tika novērots, ka *LDPC-IRA* piedāvā augstāku bitu kļūdas ātruma *BER* veiktspēju, sasniedzot *BER* 2×10^{-6} pie signāla un trokšņa attiecības *SNR* 7,2 dB. Tas nozīmē būtisku kļūdu labošanas iespēju uzlabošanu, salīdzinot ar standarta *LDPC* kodēšanas metodēm.

Turklāt *LDPC-IRA* koda iekļaušana *ARINC-818* komunikācijas protokolā liecina par būtisku pārvades efektivitātes uzlabošanu, vairāk nekā trīs reizes pārspējot tradicionālās metodes. Šim uzlabojumam kodēšanas efektivitātē ir izšķiroša nozīme, risinot problēmas, kas saistītas ar augstas intensitātes izstaroto lauku *HIRF* traucējumiem, tādējādi stiprinot sistēmas vispārējo stabilitāti un uzticamību.

Izmantojot *LDPC-IRA* kodēšanas priekšrocības *ARINC-818* sakaru sistēmu kontekstā, risinājums ne tikai uzlabo datu pārraides veiktspēju, bet arī stiprina sistēmas noturību pret ārējiem elektromagnētiskajiem traucējumiem. Šāds atklājums uzsver *LDF-IRA* kā

galvenā ierosinātāja potenciālu, lai uzlabotu sakaru sistēmu noturību un efektivitāti ārējās darbības ietekmes vidē.

Simulācijas rezultāti parādīja, ka ***LDPC-IRA* kodēšana nodrošina efektīvāku joslas platuma izmantošanu nekā tradicionālie *LDPC* kodi**. Šai paaugstinātajai spektrālajai efektivitātei ir izšķiroša nozīme risinājumu lietošanā aviācijā, kur joslas platums bieži ir ierobežots un dārgs. Zemāks *BER* koeficients pie konkrētā *SNR*, *LDPC-IRA* kodēšana nodrošina uzticamāku datu pārraidi ar mazākām kļūdām, kas uzlabo sistēmas veiktspēju un samazina retranslācijas ātrumu.

Turklāt ***LDF-IRA* koda spēcīgās kļūdu labošanas iespējas padara to labi piemērotu ātrdarbīgām datu sakaru sistēmām, piemēram, tām, ko izmanto aviācijas un kosmiskās aviācijas lietotnēs**. *LDPC-IRA* spēja efektīvi labot kļūdas trokšņainā un uz traucējumiem tendētā vidē uzlabo datu pārraides vispārējo drošību un integritāti, nodrošinot to, ka kritiskā informācija tiek precīzi nodota bez zudumiem vai bojājumiem.

Kopumā ***LDPC-IRA* kodējuma integrēšana *ARINC-818* sakaru sistēmās ir būtisks uzlabojums kosmiskās aviācijas sakaru tehnoloģijā**. Izmantojot ***LDF-IRA* augstāko kļūdu labošanas veiktspēju un spektrālo efektivitāti, kosmiskās aviācijas un aviācijas sistēmas var sasniegt augstāku datu pārraides uzticamību, uzlabotu signāla kvalitāti un uzlabotu noturību pret ārējiem traucējumiem, uzlabojot gaisa sakaru sistēmu drošību, efektivitāti un veiktspēju**.

3. Šis pētījums ievieš jaunu koncepciju par koherentu perfektu absorbciju (*CPA*) ražošanu, kas saistīta ar kvazisaistītu stāvokli kontinuumā (*BIC*), kas atklāts asimetriskās saturošās slāņveida struktūrās, kas nav neermistiskas un kurās ir ārkārtas nesaglabājami punkti (*ENC*). Asimetrijai šajās struktūrās ir izšķiroša nozīme kvazisaistītu stāvokļa kontinuumā. Rezultāti tika ietverti risinājumos, kas saistīti ar dažādiem zudumu un ieguvumu slāņu biežumiem (ģeometriskā asimetrija), kā arī ar nevienādiem zudumu un ieguvumu līmeņiem (neermistiska stāvokļa asimetrija), veicot asimetrijas ietekmes detalizētu analīzi, pārbaudot izkliedes matricas.

Īpaši jāatzīmē, ka tiek identificēts punkts, kurā *CPA* paaudzes pols un nulle saplūst, izraisot ievērojamu izejošās intensitātes pieaugumu un strauju kvalitātes faktora pieaugumu, kas saistīts ar blakus esošo kvazistāvokļa-*BIC*. Pētījumā iegūti divi galvenie rezultāti. Pirmkārt, ir novērota neparasta apgriezta lineāra sakarība starp kvalitātes faktoru un asimetrijas parametru. Otrkārt, sistēmās, kurās ir neermistiska asimetrija, plazmas frekvencē ir konstatēts pretintuitīvs pastiprinājums zudumu dēļ.

Tiek uzskatīts, ka šajā promocijas darbā izklāstītajām tēzēm ir plaša nozīme neermistiska stāvokļa fotonikas jomā un tās var paplašināt līdz 2D un 3D sistēmām. Paredzamais pieprasījums pēc *CPA* ģenerēšanas efekta, kas saistīts ar kvazistāvokļa-*BIC* lāzera un nelineāros optiskos lietojumus, uzsver šā pētījuma praktisko ietekmi. Turpmāka izpēte par mijiedarbību starp asimetriju, kvazistāvokļa-*BIC* rezonansi un *CPA* ģenerēšanu neermistiska stāvokļa struktūrās varētu veicināt modernu fotonisku ierīču izstrādi ar uzlabotiem veiktspējas raksturlielumiem. **Izpētiet dažādas konfigurācijas un regulēšanas parametrus, pētnieki var atklāt jaunus veidus, kā kontrolēt gaismas mijiedarbību, manipulēt ar viļņu izplatīšanos un projektēt efektīvas optiskās komponentes.**

Turklāt pretintuitīvais pastiprināšanas efekta atklāšana, ko izraisa zudumi plazmas frekvencē sistēmās ar neermistiska stāvokļa asimetriju, **paver jaunas iespējas netradicionālu optisku**

parādību izpētei un to izmantošanai praksē. Izpratne par šādu unikālu uzvedību un tās izmantošana varētu veicināt inovatīvu ierīču izstrādi uztveršanai, komunikācijai un signālu apstrādei.

Kopumā šajā pētījumā gūtās atziņas var noteikt turpmākos pētījumus neermistiska stāvokļa fotonikā izpētei, piedāvājot jaunas perspektīvas par to, kā asimetriju var izmantot, lai sasniegtu vēlamās optiskās funkcijas. **Nostiprinot pašreizējo zināšanu robežas un izpētot neermistiska stāvokļa sistēmu iespēju, pētnieki var pavērt jaunas iespējas fotonikas tehnoloģiju attīstībai un izaicinājumu risināšanai dažādās jomās.**

4. **Jauna spiediena sensora izstrāde**, kas paredzēts izmantošanai *Honeywell AirDC* sistēmās, ir ievērojami uzlabojusi dažādus galvenos parametrus, salīdzinot ar patlaban izmantoto prototipa sensoru. Potenciālais **spiediena sensors demonstrē uzlabotus veiktspējas un efektivitātes uzlabojumus vairākos kritiskos aspektos, kā izklāstīts turpmāk.**

4.1. **Datu pārraides intervāls.** Jaunais sensors ievērojams ar samazinātu datu pārraides intervālu 0,25 sekundes, kas liecina par ievērojamu efektivitātes pieaugumu par 19 %, salīdzinot ar esošo prototipu.

4.2. **Samazināta nepieciešamā barošanas jauda.** Būtiski uzlabojas barošanas sprieguma prasība, potenciālajam sensoram darbojoties tikai ar 3,3 V, salīdzinot ar prototipam nepieciešamo 15 V. Šis barošanas sprieguma samazinājums par 78 % veicina energoefektivitāti un vispārējo sistēmas veiktspēju.

4.3. **Samazināts enerģijas patēriņš.** Jaunais sensors nodrošina ievērojamu enerģijas patēriņa samazinājumu, patērējot tikai 280,708 MW pretstatā prototipa plānotajam 1000 MW. Šis enerģijas patēriņa samazinājums par 72 % uzsver sensora uzlaboto efektivitāti un ilgtspēju.

4.4. **Mērījumu kļūda.** Jaunais sensors uzrāda mazāku mērījumu kļūdu 13,14 Pa, kas ir par 59 % labāk, salīdzinot ar 32 Pa kļūdu, kas paredzēts sākotnējam prototipam. Šī uzlabotā precizitāte nodrošina uzticamākus un precīzākus spiediena rādījumus.

4.5. **Saņemšanas laiks.** Jaunā sensora uztveršanas laiks ievērojami uzlabots, un reakcijas laiks ir tikai 1 sekunde, salīdzinot ar prototipa 30 sekunžu uztveršanas laiku. Šis ievērojamais saņemšanas laika samazinājums par 96 % uzlabo reāllaika datu apstrādes iespējas un sistēmas atsaucību.

4.6. **Svara samazinājums.** Topošais sensors uzrāda arī svara samazināšanos, sverot tikai 213 g pretstatā prototipa svaram 400 g. Šis svara zudums 46,75 % apmērā uzlabo un atvieglo tā uzstādīšanu.

Kopumā **perspektīvā spiediena sensora izstrāde ir ievērojams spiediena noteikšanas tehnoloģijas progress, piedāvājot lielāku efektivitāti, precizitāti, enerģijas ietaupījumus un samazinātu izmēru un svaru.** Šie uzlabojumi paver ceļu uzlabotai veiktspējai un funkcionalitātei gaisa spiediena uzraudzības lietojumos *Honeywell AirDC* sistēmās.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Rey Charlo, R. E. (2024). On-board radio communication and its development in a historical perspective. *International Journal of Maritime History*, 36 (1), 140–152. <https://doi.org/10.1177/08438714231202163>.
2. Ramanatt, P. R., Natarajan, K. and Shobha, K. R. (2018), “Challenges in implementing a wireless avionics network”, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 92 No. 3, pp. 482–494. <https://doi.org/10.1108/AEAT-07-2019-0144>.
3. M. Cenk Ertürk, N. Hosseini, H. Jamal, A. Şahin, D. Matolak and J. Haque, “Requirements And Technologies Towards Uam: Communication, Navigation, And Surveillance,” 2020 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS), Herndon, VA, USA, 2020, pp. 2C2-1–2C2-15, doi: 10.1109/ICNS50378.2020.9223003.
4. D. Liu, J. Cui, J. Zhang, C. Yang and L. Hanzo, “Deep Reinforcement Learning Aided Packet-Routing for Aeronautical Ad-Hoc Networks Formed by Passenger Planes,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 5, pp. 5166–5171, May 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.
5. Dashkiiev, V.; Povstenko, Y. Advanced Architecture of On-Board Multiplex Information Exchange System to Increase Flight Safety. *Entropy* 2022, 24, 1582. <https://doi.org/10.3390/e24111582>.
6. Sekera, Jakub, Novak, Andrej. (2021). The future of data communication in Aviation 4.0 environment. *INCAS BULLETIN*. 13. 165–178. 10.13111/2066-8201.2021.13.3.14.3074015.
7. Ian Moir, Allan Seabridge and Malcolm Jukes, *Civil Avionics Systems*, Second Edition, ISBN (print): 978-1-62410-228 Publication Date: September 25, 2013.
8. Bieber, Pierre & Boniol, Frédéric & Boyer, Marc & Noulard, Eric & Pagetti, Claire. (2012). *New Challenges for Future Avionic Architectures*. *Aeropsacelab Journal*. 04.
9. D. He, S. Chan and M. Guizani, “Communication Security of Unmanned Aerial Vehicles,” in *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 4, pp. 134–139, Aug. 2017, doi: 10.1109/MWC.2016.1600073WC.
10. L. Jianwei, L. Weiran, W. Qianhong, L. Dawei and C. Shigang, “Survey on Key Security Technologies for Space Information Networks,” in *Journal of Communications and Information Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 72–85, June 2016, doi: 10.11959/j.issn.2096-1081.2016.006.
11. Maxim Solkin, Electromagnetic interference hazards in flight and the 5G mobile phone: Review of critical issues in aviation security, *Transportation Research Procedia*, Volume 59, 2021, Pages 310-318, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.11.123>.
12. Zatuchny, D. A., Negreskul, G. G., Sauta, O. I., Shatrakov, A. Y., Shatrakov, Y. G. (2022). Methods for Evaluating the Electromagnetic Compatibility of Integrated Ground Systems and On-Board Systems. In: *Aerospace Radionavigation Systems*. Springer Aerospace Technology. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6341-4_1.
13. A. Maouloud, M. Klingler and P. Besnier, “A Test Setup to Assess the Impact of EMI Produced by On-Board Electronics on the Quality of Radio Reception in Vehicles,” in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 6, pp. 1844–1855, Dec. 2021, doi: 10.1109/TEM.2021.3072558.

14. Jr, E.R. & Daughtry, Craig & Walthall, Charlie & III, J. E. & Dulaney, Wayne. (2003). Agricultural Remote Sensing using Radio-Controlled Model Aircraft. 197-205. 10.2134/asaspecpub66.c15.
15. Kerczewski, Bob. (2013). Spectrum for UAS control and Non-Payload Communications. 1–21. 10.1109/ICNSurv.2013.6548666.
16. Nicola, M.; Falco, G.; Morales Ferre, R.; Lohan, E.-S.; de la Fuente, A.; Falletti, E. Collaborative Solutions for Interference Management in GNSS-Based Aircraft Navigation. *Sensors* 2020, 20, 4085. <https://doi.org/10.3390/s20154085>.
17. Borgstrom, E., “An Overview of the EMC Requirements in RTCA/DO-160G,” *SAE Int. J. Aerosp.* 5(2):300-310, 2012, <https://doi.org/10.4271/2012-01-2147>.
18. Serrano-Mira, L.; Pérez Maroto, M.; Ayra, E. S.; Pérez-Castán, J. A.; Liang-Cheng, S. Z. Y.; Gordo Arias, V.; Pérez-Sanz, L. Identification and Quantification of Contributing Factors to the Criticality of Aircraft Loss of Separation. *Aerospace* 2022, 9, 513. <https://doi.org/10.3390/aerospace9090513>.
19. Osunwusi, A. O. (2020). Occupational Radiation Exposures in Aviation: Air Traffic Safety Systems Considerations. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 7 (2). DOI: <https://doi.org/10.15394/ijaaa.2020.1476>.
20. Michałowska, J.; Pytko, J.; Tofil, A.; Krupski, P.; Puzio, Ł. Assessment of Training Aircraft Crew Exposure to Electromagnetic Fields Caused by Radio Navigation Devices. *Energies* 2021, 14, 254. <https://doi.org/10.3390/en14010254>.
21. I. W. Damaj, J. K. Yousafzai and H. T. Mouftah, “Future Trends in Connected and Autonomous Vehicles: Enabling Communications and Processing Technologies,” in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 42334–42345, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3168320.
22. A. Baltaci, E. Dinc, M. Ozger, A. Alabbasi, C. Cavdar and D. Schupke, “A Survey of Wireless Networks for Future Aerial Communications (FACOM),” in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 4, pp. 2833–2884, Fourthquarter 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3103044.
23. Hamza Saadaoui, Alexandre Bacou, Yoann Rebiere, Bruno Fracasso, and Michel Morvan, “Broadband optical network design for the future aircraft cabin,” *Opt. Continuum* 1, 719-737 (2022)
24. Alireza Behbahani, Mehrdad Pakmehr, William A. Stange, *Optical Communications and Sensing for Avionics*, Springer Handbook of Optical Networks, 2020, ISBN: 978-3-030-16249-8.
25. Marques, C.; Leal-Júnior, A.; Kumar, S. Multifunctional Integration of Optical Fibers and Nanomaterials for Aircraft Systems. *Materials* 2023, 16, 1433. <https://doi.org/10.3390/ma16041433>.
26. M. Z. Hasan, H. Al-Rizzo and F. Al-Turjman, “A Survey on Multipath Routing Protocols for QoS Assurances in Real-Time Wireless Multimedia Sensor Networks,” in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1424–1456, third quarter 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2661201.
27. X. Wang and P. Yi, “Security Framework for Wireless Communications in Smart Distribution Grid,” in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 4, pp. 809–818, Dec. 2011, doi: 10.1109/TSG.2011.2167354.
28. Iasechko, Maksym & Gnusov, Yurii. (2019). Determination of Requirements for the Protection of Radio-Electronic Equipment from the Terroristic Influence by

- Electromagnetic Radiation, *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 7. 772–777. 10.30534/ijeter/2019/077122019.
29. Michałowska, J.; Tofil, A.; Józwick, J.; Pytka, J.; Legutko, S.; Siemiątkowski, Z.; Łukaszewicz, A. Monitoring the Risk of the Electric Component Imposed on a Pilot During Light Aircraft Operations in a High-Frequency Electromagnetic Field. *Sensors* 2019, 19, 5537. <https://doi.org/10.3390/s19245537>.
 30. E. L. Portnov, K. Vyacheslav, I. Sergey and A. B. Semenov, “Copper and fiber-optic cables in moving objects,” 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications, Moscow, Russia, 2018, pp. 1–4, doi: 10.1109/SOSG.2018.8350626.
 31. Khatimi, Husnul & Wijaya, Eka & Baskara, Andreyan & Sari, Yuslena. (2019). Performance Comparison Between Copper Cables and Fiber Optic in Data Transfer on Banjarmasin Weather Temperature Conditions. *MATEC Web of Conferences*. 280. 05022. 10.1051/mateconf/201928005022.
 32. ITU-T Recommendation Y.1541 (12/11) Internet protocol aspects – Quality of service and network performance; Network performance objectives for IP-based services.
 33. X. Wang and P. Yi, “Security Framework for Wireless Communications in Smart Distribution Grid,” in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 4, pp. 809–818, Dec. 2011, doi: 10.1109/TSG.2011.2167354.
 34. Zouhaira, Abdellaoui & Dieudonne, Yiyi & Aleya, Anoir. (2021). Design, implementation and evaluation of a Fiber To The Home (FTTH) access network based on a Giga Passive Optical Network GPON. *Array*. 10. 100058. 10.1016/j.array.2021.100058.
 35. Marcon, L. & Scarcella, C. & Detraz, S. & Lalovic, Milana & Olantera, L. & Prousalidi, Thenia & Sandven, U. & Sigaud, C. & Soós, C. & Troska, J.. (2023). High speed radiation tolerant optical links based on coarse wavelength division multiplexing. *Journal of Instrumentation*. 18. C02055. 10.1088/1748-0221/18/02/C02055.
 36. Dorrah, A. H., Rubin, N. A., Tamagnone, M. et al. Structuring total angular momentum of light along the propagation direction with polarization-controlled meta-optics. *Nat Commun* 12, 6249 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26253-4>.
 37. Van Der Schaar, M., Krishnamachari, S., Choi, S., & Xu, X. (2003). Adaptive cross-layer protection strategies for robust scalable video transmission over 802.11 WLANs. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 21 (10), 1752–1763.
 38. A. Tobagi and V.B. Hunt, “Performance Analysis of Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection”, *Computer Networks*, Vol. 4, pp. 245–259, 1980.
 39. Wu, Chien-Jang & Rau, Yu-Nian & Han, Wei-Hsieh. (2010). Enhancement of Photonic Band Gap in a Disordered Quarter-Wave Dielectric Photonic Crystal. *Progress In Electromagnetics Research*. 100. 10.2528/PIER09111610.
 40. Yu, N., Capasso, F. Flat optics with designer metasurfaces. *Nature Mater* 13, 139–150 (2014). <https://doi.org/10.1038/nmat3839>.
 41. S. Norden, G. Manimaran and C. S. R. Murthy, “New protocols for hard real-time communication in the switched LAN environment,” *Proceedings 23rd Annual Conference on Local Computer Networks*. LCN'98 (Cat. No.98TB100260), Lowell, MA, USA, 1998, pp. 364-373, doi: 10.1109/LCN.1998.727677.
 42. Kisner, Roger & Manges, Wayne & Macintyre, Lawrence & Nutaro, James & Munro, Jr, John & Ewing, Paul & Howlader, Mostofa & Kuruganti, Teja & Wallace, Richard &

- Olama, Mohammed. (2010). Cybersecurity through Real-Time Distributed Control Systems. 10.2172/978289.
43. I. B. Djordjevic, "Channel coding for optical transmission systems," 2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), Singapore, 2017, pp. 1–2, doi: 10.1109/OECC.2017.8114842.
 44. Djordjevic, Ivan & Ryan, William & Vasic, Bane. (2010). Coding for Optical Channels. 10.1007/978-1-4419-5569-2.
 45. Mariscotti, A. Stray Current Protection and Monitoring Systems: Characteristic Quantities, Assessment of Performance and Verification. *Sensors* 2020, 20, 6610. <https://doi.org/10.3390/s20226610>.
 46. H. Zhang, Q. Wu and J. Ji, "Synchronization of Discretely Coupled Harmonic Oscillators Using Sampled Position States Only," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 63, no. 11, pp. 3994-3999, Nov. 2018, doi: 10.1109/TAC.2018.2814678.
 47. Bolboacă, S. D.; Jäntschi, L.; Sestraş, A. F.; Sestraş, R. E.; Pamfil, D. C. Pearson-Fisher Chi-Square Statistic Revisited. *Information* 2011, 2, 528–545. <https://doi.org/10.3390/info2030528>.
 48. Llopis, Eva & Micheli, Mario. (2014). Implementation of the Centroid Method for the Correction of Turbulence. *Image Processing On Line*. 4. 187–195. 10.5201/ipol.2014.105.
 49. J. Wolf, "Efficient maximum likelihood decoding of linear block codes using a trellis," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 24, no. 1, pp. 76–80, January 1978, doi: 10.1109/TIT.1978.10558.
 50. Panteleev, Pavel & Kalachev, Gleb. (2021). Degenerate Quantum LDPC Codes With Good Finite Length Performance. *Quantum*. 5. 585. 10.22331/q-2021-11-22-585.
 51. S. Cai, W. Lin, X. Yao, B. Wei and X. Ma, "Systematic Convolutional Low Density Generator Matrix Code," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 67, no. 6, pp. 3752–3764, June 2021, doi: 10.1109/TIT.2021.3064922.
 52. Borysenko, Oleksiy & Kulyk, Igor & Matsenko, Svitlana & Berezhna, Olga & Matsenko, Oleksandr. (2016). Optimal synthesis of digital counters in the Fibonacci codes with the minimal form of representation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 4. 4. 10.15587/1729-4061.2016.75596.
 53. Cai, Zhaohui & Hao, Jianzhong & Tan, P. H. & Sun, Sumei & Chin, P. S. (2006). Efficient encoding of IEEE 802.11n LDPC codes. *Electronics Letters*. 42. 1471–1472. 10.1049/el:20063126.
 54. Borysenko, Oleksiy & Matsenko, Svitlana & Novhorodtsev, Anatolii & Kobiakov, Oleksandr & Spolitis, Sandis & Bobrovs, Vjaceslavs. (2020). Estimating the Indivisible Error Detecting Codes Based on an Average Probability Method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 6/9. 25–33. 10.15587/1729-4061.2020.218076.
 55. Matsenko, Svitlana & Borysenko, O. & Spolitis, Sandis & Bobrovs, Vjaceslavs. (2019). Noise Immunity of the Fibonacci Counter with the Fractal Decoder Device for Telecommunication Systems. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 56. 12–21. 10.2478/lpts-2019-0027.
 56. Ruskey, F. (2003). Combinatorial generation. Preliminary working draft. University of Victoria, Victoria, BC, Canada, 11, 20.
 57. Herzog, J., Hibi, T., & Ohsugi, H. (2018). *Binomial ideals* (Vol. 279). Cham: Springer

58. Vilcane, K. & Matsenko, Svitlana & Parfjonovs, M. & Murnieks, Rihards & Aleksejeva, M. & Spolitis, Sandis. (2020). Implementation of Multi-Wavelength Source for DWDM-PON Fiber Optical Transmission Systems. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 57. 24–33. 10.2478/lpts-2020-0019.
59. Borysenko, O.; Matsenko, S.; Bobrovs, V. Binomial Number System. *Appl. Sci.* 2021, 11, 11110. <https://doi.org/10.3390/app112311110>.
60. V. Skachek and K. A. S. Immink, “Constant Weight Codes: An Approach Based on Knuth's Balancing Method,” in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 5, pp. 909–918, May 2014, doi: 10.1109/JSAC.2014.140511.
61. Thio, Tineke & Pellerin, K & Linke, Richard & Lezec, Henri & Ebbesen, T. (2002). Enhanced light transmission through a single subwavelength aperture. *Optics letters*. 26. 1972-4. 10.1364/OL.26.001972.
62. Denis V. Novitsky, Alina Karabchevsky, Andrei V. Lavrinenko, Alexander S. Shalin, Andrey Novitsky, PT symmetry breaking in multilayers with resonant loss and gain locks light propagation direction // *Physical Review B*, 98, 125102, 2018.
63. Hadi K. Shamkhi, Andrey Sayanskiy, Adria Canos Valero, Anton S. Kupriianov, Polina Kapitanova, Yuri S. Kivshar, Alexander S. Shalin, and Vladimir R. Tuz, Transparency and perfect absorption of all-dielectric resonant metasurfaces governed by the transverse Kerker effect // *Phys. Rev. Materials*, 3, 085201, (2019). DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.3.085201.
64. Pavel D. Terekhov, Kseniia V. Baryshnikova, Yakov Galutin, Yuan Hsing Fu, Andrey B. Evlyukhin, Alexander S. Shalin, and Alina Karabchevsky, Enhanced absorption in all-dielectric metasurfaces due to magnetic dipole excitation // *Scientific Reports*, V. 9:3438 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40226-0>.
65. Adrià Canós Valero, Denis Kislov, Egor A. Gurvitz, Hadi K. Shamkhi, Alexander. A. Pavlov, Dmitrii Redka, Sergey Yankin, Pavel Zemánek and Alexander S. Shalin, Nanovortex-driven all-dielectric optical diffusion boosting and sorting concept for lab-on-a-chip platforms // *Advanced Science*, 2020, 1903049. <https://doi.org/10.1002/advs.201903049>.
66. Hani Barhom, Andrey Machnev, Roman E. Noskov, Alexander A Goncharenko, Egor Gurvitz, Alexander S. Timin, Vitaliy A. Shkoldin, Sergei V. Koniakhin, Olga Yu. Koval, Mikhail Zyuzin, Alexander Sergeevich Shalin, Ivan Shishkin, and Pavel Ginzburg, Biological Kerker effect boosts light collection efficiency in plants // *Nano Lett.* 2019, 19, 10, 7062–7071, DOI: 10.1021/acs.nanolett.9b02540.
67. Pavel D. Terekhov, Andrey B. Evlyukhin, Dmitrii Redka, Valentin S. Volkov, Alexander S. Shalin, Alina Karabchevsky, Magnetic Octupole Response of Dielectric Oligomers // *Laser and Photonics Reviews*, 2020, 1900331.
68. Seunghwi Kim, Jacob M. Taylor, and Gaurav Bahl, “Dynamic suppression of Rayleigh backscattering in dielectric resonators,” *Optica* 6, 1016-1022 (2019).
69. Liu, C, Gao, W, Yang, B & Zhang, S 2017, 'Disorder-Induced Topological State Transition in Photonic Metamaterials', *Physical Review Letters*, vol. 119, no. 18, 183901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.183901>.
70. Pitarke, J. M. & Silkin, V. & Chulkov, E. V. & Echenique, P. M. (2006). Theory of surface plasmons and surface-plasmon polaritons. *Reports on Progress in Physics*. 70. 10.1088/0034-4885/70/1/R01.

71. Zhang, J., Zhang, L., & Xu, W. (2012). Surface plasmon polaritons: physics and applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(11), 113001.
72. Worthing, P. & Barnes, W. (2001). Efficient coupling of surface plasmon polaritons to radiation using a bi-grating. *Applied Physics Letters*. 79. 3035–3037. 10.1063/1.1414294.
73. Zhang, Junxi & Zhang, Lide & Xu, Wei. (2012). Surface plasmon polaritons: Physics and applications. *Journal of Physics D-applied Physics – J PHYS-D-APPL PHYS*. 45. 10.1088/0022-3727/45/11/113001.
74. Han, Song & Rybin, Mikhail & Pitchappa, Prakash & Srivastava, Yogesh & Kivshar, Yuri & Singh, Ranjan. (2019). Guided-Mode Resonances in All-Dielectric Terahertz Metasurfaces. *Advanced Optical Materials*. 8. 10.1002/adom.201900959.
75. Niu, Xinxiang & Hu, Xiaoyong & Chu, Saisai & Gong, Qihuang. (2018). Epsilon-Near-Zero Photonics: A New Platform for Integrated Devices. *Advanced Optical Materials*. 6. 1701292. 10.1002/adom.201701292.
76. Li, Ying & Argyropoulos, Christos. (2018). Exceptional points and spectral singularities in active epsilon-near-zero plasmonic waveguides.
77. Solís, Diego & Engheta, Nader. (2022). Nonreciprocal Epsilon-Near-Zero-Dielectric Bilayers: Enhancement of Nonreciprocity from a Nonlinear Transparent Conducting Oxide Thin Film at Epsilon-Near-Zero Frequency. *Physical Review Applied*. 17. 10.1103/PhysRevApplied.17.034053.
78. L. Schares et al., “A Throughput-Optimized Optical Network for Data-Intensive Computing,” in *IEEE Micro*, vol. 34, no. 5, pp. 52–63, Sept.–Oct. 2014, doi: 10.1109/MM.2014.77.
79. P. Papanikolaou, K. Christodouloupoulos, and E. Varvarigos, “Optimization Techniques for Incremental Planning of Multilayer Elastic Optical Networks,” *J. Opt. Commun. Netw.* 10, 183-194 (2018).
80. Yongli Zhao, Boyuan Yan, Dongmei Liu, Yongqi He, Dajiang Wang, and Jie Zhang, “SOON: self-optimizing optical networks with machine learning,” *Opt. Express* 26, 28713-28726 (2018).
81. Endsley, Mica. (2016). Situation awareness in aviation systems.
82. K. S. O'Brien & D. O'Hare (2007) Situational awareness ability and cognitive skills training in a complex real-world task, *Ergonomics*, 50:7, 1064–1091, DOI: 10.1080/00140130701276640.
83. Kim, Jung-Hyung & Seong, Dae-Jin & Lim, Jong & Chung, Kwang-Hwa. (2004). Plasma frequency measurements for absolute plasma density by means of wave cutoff method. *Applied Physics Letters*. 83. 4725–4727. 10.1063/1.1632026.
84. Taylor & Francis Group, “Optical Fiber Sensors – Advances Techniques and Applications”, CRC Press, 2015.
85. Dandy G. C., Daniell, T. M., Foley, B. A. and Warner R. F., *Planning and Design of Engineering Systems*. Third Edition, 2017.
86. Avraham Shtub, Yuval Cohen, *Introduction to Industrial Engineering* 2nd Edition, 2017.



Aleksandr Krotov dzimis 1989. gadā Ļeņingradā. Sanktpēterburgas Valsts elektrotehniskajā universitātē ieguvis profesionālā inženiera kvalifikāciju (2012). Patlaban ir Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātes Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūta pētnieks.