



ӘОЖ 519.6

ҒТАХА 49.01, 50.05

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_15

А.А. Абдыкадыров^{1,2}, А.В. Бурдин³, Н.Қ.Смайлов^{*1,2}, Г.Б.Төлен²

¹ Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты,
 Алматы қ., Қазақстан

² Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан

³ Профессор М.А. Бонч-Бруевич атындағы Санкт-Петербург мемлекеттік
 телекоммуникация және информатика университеті, Санкт-Петербург қ., Ресей

*E-mail: n.smailov@satbayev.university

ВИБРОАКУСТИКАЛЫҚ МОНИТОРИНГ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ ТАЛШЫҚТЫ- ОПТИКАЛЫҚ МОДАЛЬДЫҚ ҚҰРЫЛЫМДАР МЕН СПЕКТРАЛДЫ- КОРРЕЛЯЦИЯЛЫҚ РАДИОПЕЛЕНГТЕУ ӘДІСІНІҢ ӨЗАРА ЫҚПАЛЫ МЕН ТИІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа. Бұл зерттеу жұмысының мақсаты – таратылған акустикалық сенсор (DAS) жүйесінде әртүрлі модальды талшықтардың виброакустикалық әсерге сезімталдық деңгейін салыстыру арқылы спектралды-корреляциялық өңдеудің тиімділігін анықтау. Зерттеу нысаны ретінде бір модальды (SMF, ITU-T G.652) және арнайы легирленген аз модальды (FMF 21/125, 5-LP-модальды, GeO₂ негізіндегі) оптикалық талшықтар алынды. Экспериментте төмен жиілікті виброакустикалық әсер (10 Гц, 30 Гц, 150 Гц) пьезоэлектрлік түрлендіргіш арқылы енгізілді және DAS "Дунай" жүйесімен тіркелді. SMF және FMF талшықтарында бірдей жағдай жасалды. 150 Гц жиілікте FMF үшін вибрацияға сезімталдық 8,5%, ал 30 Гц-та 7,9% артық болды. Сонымен қатар, FMF жүйесінде сигнал интенсивтілігі айтарлықтай жоғары екені waterfall-графиктер арқылы дәлелденді. Бұл артықшылық FMF талшығындағы квазисатылы сыну көрсеткіші профилі мен кең өзек геометриясына байланысты. Сонымен қатар, LP01 және LP11a модальдарының комбинациясы интермодальды интерференцияны туындатқанымен, уақытша коррекция әдістері арқылы шешілуі мүмкін екені дәлелденді. Зерттеу нәтижелері аз модальды оптикалық талшықтарды DAS жүйелерінде пайдалану арқылы сенсор сезімталдығын едәуір арттыруға болатынын көрсетті. Мұндай шешімдер периметрлік қорғау, сейсмикалық мониторинг, құрылыс нысандарын бақылау және құбыр жүйелерін басқару салаларында қолдануға ыңғайлы. Алайда, SNR төмендеуі байқалды, бұл болашақта цифрлық сигналды өңдеу алгоритмдерін жетілдіру қажеттігін көрсетеді.

Түйін сөздер: таратылған акустикалық датчик, аз модальды оптикалық талшық, виброакустикалық әсер, пьезоэлектрлік түрлендіргіш, сезімталдық.

Кіріспе.

Таратылған акустикалық датчик (DAS) соңғы он жылдықта ең бір қызықтыратын және перспективті талшықты-оптикалық сенсорлы технология болып табылады. Ол бір уақытта үлкен қашықтықтағы көптеген дірілді тауып анықтай алады, ал жоғары дискретизация жиілігі қоршаған орта жайында кең ақпарат береді [1]. Зерттеулер DAS жүйесінің периметрді бақылау, мұнай мен газ құбырларының мониторингі, транспорттық

инфракұрылым, геофизика, қазба байлықтарын алу, құрылыс жағдайының мониторингі және сейсмикалық зерттеулерде эффективтілігі мен универсалдығын көрсетеді [2-6].

Таратылған акустикалық зондтауда көп жағдайда бірмодалы оптикалық талшық (SMF – single-mode fiber) қолданылатыны белгілі. Соңғы жылдары көп зерттеулер көп модалы (MMF – multimode fiber) және аз модалы (FMF – few-mode fiber), оның ішінде жеке түрі ретінде екі модалы оптикалық талшықтардың (TMF – two-mode fiber) қолданылуына арналған. Мысалға, Yuan Mao мен әріптестері (2019) таратылған акустикалық сенсордың өнімділігін аз модалы оптикалық талшықтың әртүрлі кеңістік режимдерін іске қосу арқылы зерттеді. Зерттеу нәтижесінде авторлар LP01 (quasi-single mode) режимінде жұмыс жасайтын FMF LP11a модасын енгізген жағдаймен салыстырғанда орташа сигнал-шу қатынасы (SNR) 2,04 дБ-ге артатынын көрсетеді. Яғни, бір модалы талшықпен салыстырғанда FMF физикалық тұрғыдан өзегі кең болғандықтан сызықты емес эффектілер кешірек пайда болады, бұл аз модалы талшықтың артықшылығы болып табылады. Бұл жұмыста quasi-single mode тиімді режим екені айтылады, себебі LP01 ғана қабылданып, қалған режимдер сүзгі арқылы жойылатындықтан, LP01 FMF ішіндегі интермодалы шу әсеріне аз тап болады. Сонымен қатар, бұл зерттеуде бір модалы талшыққа қарағанда аз модалы талшықта оптикалық импульс қуаты жоғарылаған жағдайда сигнал әлі де жақсы таралады, ал SMF импульс қуаты 1,04 Вт кезінде мүлде жұмыс жасамайды. Бұл жұмыста FMF негізінде таратылған акустикалық сенсор жүйесі зерттеледі, қолданылатын талшық 2 мода тарата алатын аз модалы оптикалық талшықтың жеке түрі TMF екенін атап өту керек [7].

Қазіргі DAS-жүйелеріндегі қиындықтар шу деңгейінің жоғары болуы және сигнал-шу қатынасының төмен болуына байланысты. Ол өз кезегінде әлсіз сигналдарды тіркеуде DAS Релей шашырауының төменгі коэффициентіне байланысты шектеулерге ие болуы себепті. Аз модалы талшық шашыраған Релей жарығын қабылдап алудың жоғарғы қабілетіне және сызықты емес эффектілердің жоғарғы шегіне ие. Авторлар айтылған проблемана шешуде аз модалы оптикалық талшықты қолданатын ультра-төменгі шулы MIMO-DAS жүйесін қолданады. Зерттеу барысында 4x4 MIMO Ф-OTDR жүйесі құрылған және сигналдың модальдық қабылдауын болдырмау үшін «жиілік таңбалау» әдісі қолданылады. Мақалада күрделі архитектура берілгенімен, негізгі ғылыми тұжырымы FMF талшықтарының DAS жүйесінде сенімді және сезімтал жүйе жасауға қабілетті екендігін көрсету [8].

Chen және т.б. 2 модалы талшық негізіндегі таратылған акустикалық датчикке тоқталады. Мақалада авторлар екі түрлі модадан келген нәтижені біріктіру арқылы шу деңгейінің 2,52 дБ жақсарғанын айтады. Бұл жерде LP01 дірілге аз сезімтал референс сигнал ретінде қолданылса, LP01 модасы дірілге аса сезімтал сезгіш мода ретінде қарастырылады. Дегенмен, екі мода арасында топтық жылдамдықтың әртүрлі екені байқалды, нәтижесінде олар қабылдағышқа әртүрлі уақытта жетіп, уақыттық жылжу байқалған. Яғни, бұл интермодальды интерференция дәлдігіне әсер етеді, алайда оны талшықтың ұзындығын шектеу, қысқа импульс қолдану, цифрлық өңдеу арқылы компенсациялауға болады [9].

Costa және т.б. зерттеуінде екі модалы оптикалық талшықтағы уақыттық жылжу кедергі ретінде емес, позицияны анықтайтын құрал ретінде пайдаланылады. LP01 және LP01a модалары арасындағы уақыттық айырмашылыққа байланысты дірілдің немесе әсердің қай жерде орын алғанын анықтайды. Бұл жаңа интерференциялық әдіс болып табылады және датчиктің сезімталдығы артады [10].

Келесі мақалада LP01 модасы байланыс сигналына беріледі және байланыс арнасының жылдамдығы 2,04 Гбит/с жеткен. LP11a модасы датчиктің рөлін атқарды және мұндағы SNR > 2 дБ көрсетті. Бұл тәсіл аз модалы оптикалық талшықтың ерекшеліктерін пайдалану арқылы бір талшықты қолдана отырып көп функциялы жүйе құру мүмкіндігін көрсетеді [11].

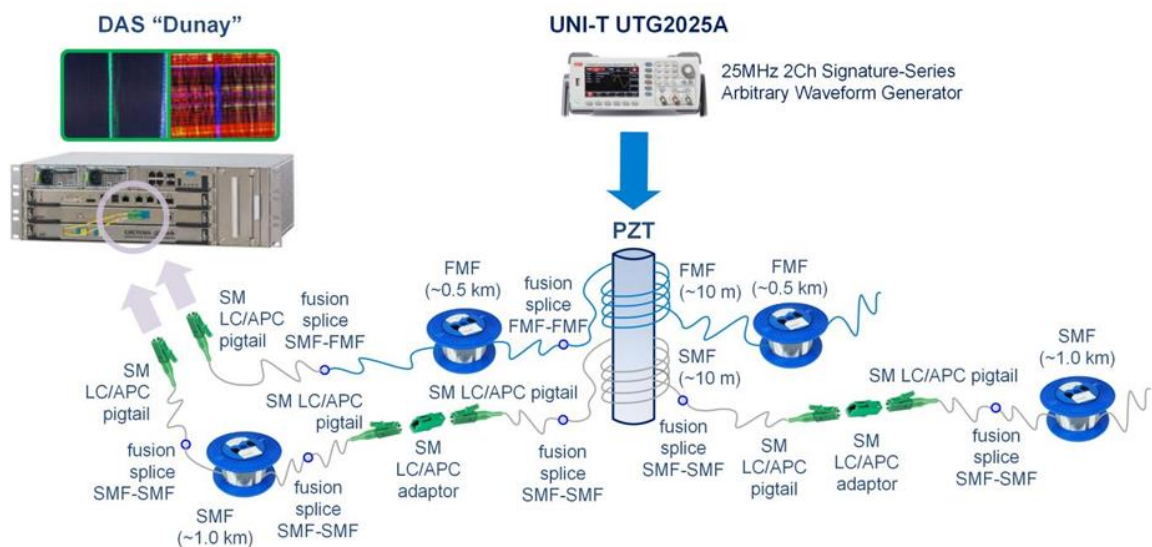
Келесі жұмыстарда көп модалы талшықтардың қолданылуы туралы айтылады, мысалы [12] таратылған акустикалық сенсорлар жүйесінде сигналдың уақытша әлсіреу

мәселесін шешу үшін "кеңістіктік модальдык когерентті орташа мәндеу" (coherent averaging of spatial modes) әдісін ұсынады. Ал, [13] зерттеуінде көп модальды талшық арқылы бір мезгілде таратылған акустикалық және температуралық сезу (DAS+DTS) жүзеге асырылған. Бұл жүйеде Rayleigh және Raman шашырау құбылыстарының комбинациясы қолданылып, бір талшықпен екі түрлі физикалық параметр сенсорлық түрде өлшенген.

Сонымен жоғарыдағы шолудан байқайтынымыз DAS жүйесінде қазіргі уақытта MMF, FMF, оның ішінде екі одалы оптикалық талшыққа (TMF) қызығушылық артқан. Біз өз жұмысымызда SMF (ITU-T Rec. G.652) және FMF-ке пьезоэлектрлік түрлендіргіш арқылы жасалатын жергілікті бір жиілікті виброакустикалық әсер жауабын салыстырдық. Мұнда қолданылатын аз модальды оптикалық талшық GeO₂-мен легирленген, күшті бұрмаланған квазисатылы сыну көрсеткіші профилімен ерекшеленетін 21/125 өлшемді, арнайы жасалған 5-LP-модальды кварцты FMF.

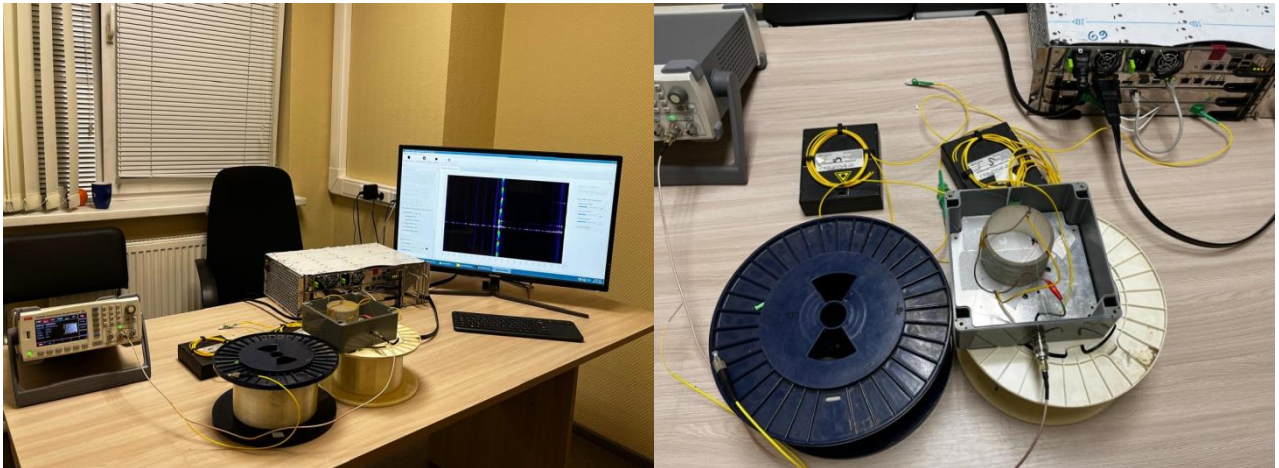
Материалдар мен зерттеу әдістері.

Зерттеу жұмысында әрқайсысы 1 км болатын 2 орам стандартты SMF (ITU-T Rec. G.652) және FMF 21/125 әрқайсысы 0,5 км болатын 2 орамы қолданылды (1 - сурет). Әрбір оптикалық талшықтың 2 орамы жалғанған тұстан 10 м талшық бөлігін алынып, пьезоэлектрлік түрлендіргішке біруақытта параллель түрде орналастырылды. Мұнда орамдарды жалғау үшін LC/APC пигтейлы және оптикалық дәнекерлеу қолданылды. PZT дірілінің жиілігі UNI-T UTG2025A сигнал генераторымен реттеліп отырды. Виброакустикалық әсерден болған SMF/FMF талшықты-оптикалық линияның жауаптары T8 Сенсор компаниясының «Дунай» таратылған акустикалық датчигімен тіркелді. «Дунай» параметрлеріне тоқталсақ: сезгіш элемент ұзындығы 75 км, оқиғаны анықтау дәлдігі 10 м, сканерлеу жиілігі 0,5-20 кГц, сезгіштігі 0,14 нсстрейнге дейін, динамикалық диапазоны 30 дБ және толқын ұзындығы 1550 нм.



Сурет 1 – Талшықты-оптикалық модальдык құрылым негізіндегі виброакустикалық сигналдарды тіркеуге арналған DAS жүйесінің эксперименттік сұлбасы

Бұл жұмыста «Дунай» таратылған акустикалық датчигі арқылы кремнийден арнайы жасалған 5-LP модальды FMF 21/125 сынақ нәтижелері алынды. Эталонды стандартты SMF (ITU-T Rec. G.652) пен көрсетілген FMF жауаптарын жергілікті бір реттік төменгі жиілікті виброакустикалық әсер (10, 30, 150 Гц) кезінде салыстырдық. Қойылған эксперименттің негізгі көріністері 2 - суретте көрсетілген.



Сурет 2 – Қойылған эксперименттің негізгі көріністері

Бұл 2 – суретте келтірілген суретте "DAS Dunay" таратылған акустикалық сенсор жүйесі арқылы FMF және SMF талшықтары қолданылған виброакустикалық сигналдарды тіркеу жүйесі көрсетілген. Сигнал көзі ретінде 25 МГц жиілікті UNI-T UTG2025A генераторы және PZT элементі пайдаланылады. Жүйеде талшықтар арасындағы жалғаулар fusion splice және LC/APC адаптерлер арқылы жүзеге асқан.

Оптикалық сигналдың интерференциялық фазалық ығысуы келесі өрнекпен анықталады:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

мұндағы n — сыну көрсеткіші, L — талшық ұзындығы, λ — толқын ұзындығы, ε — бойлық деформация.

Интермодальды интерференция кезінде LP_{01} және LP_{11a} модалары арасындағы фазалық айырмашылық:

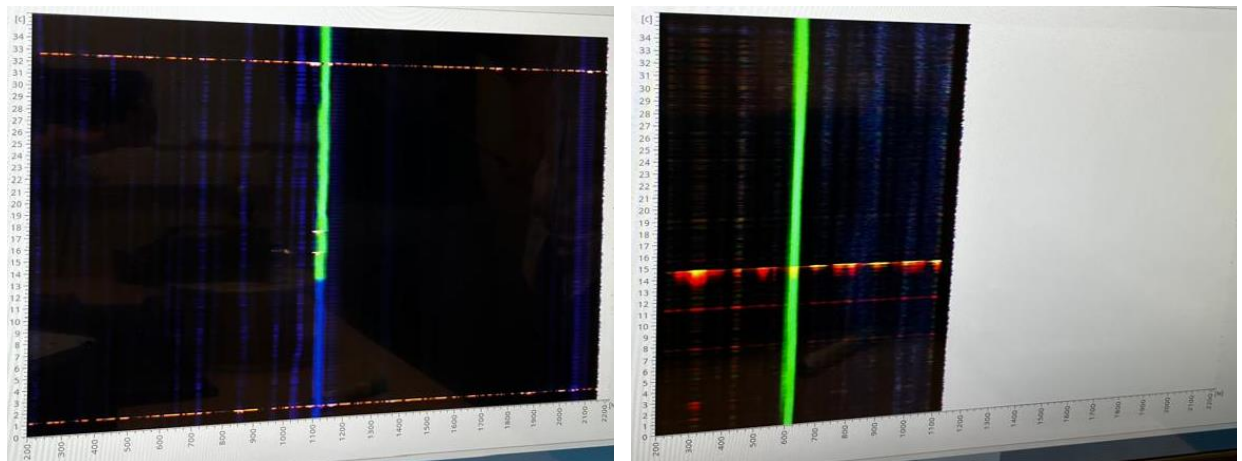
$$\Delta\phi_m = \frac{2\pi L(n_{eff,LP_{01}} - n_{eff,LP_{11a}})}{\lambda}, \quad (2)$$

түрінде жазылады және ол сезімталдыққа тікелей әсер етеді.

Осы айырмашылықтың азаюы жүйенің жиілік сезімталдығын арттырады.

Нәтижелер және оларды талқылау.

Төмендегі 3 - суретте DAS жүйесінің жұмыс терезесіндегі екі жағдайдағы сарқырама (waterfall) көрсетілген. Бұл жерде жасыл түс 30 Гц-ке сәйкес келсе, көк түс 150 Гц-ке сәйкес келеді. 3 - сурет (б) жағдайда арақашықтық (а) жағдайға қарағанда екі есе кіші екені көрініп тұр. Екі оптикалық талшықты сарқырама арқылы қарайтын болсақ, аз модальды FMF-те интенсивтілік күштірек екені жай көзге де байқалады.



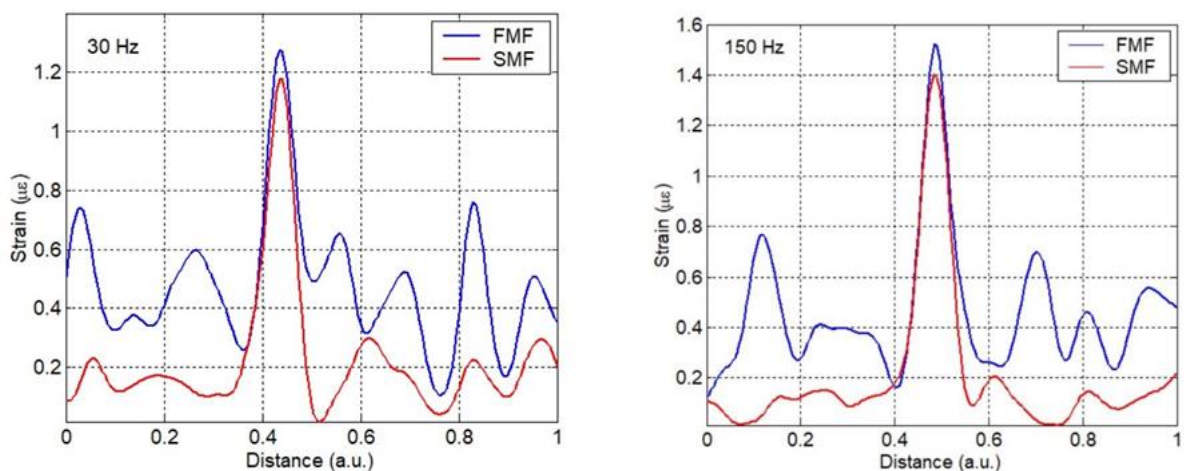
(a)

(б)

Сурет 3 – Вибро-акустикалық әсерге байланысты байланыс жауаптарының фрагменттік үлгілері: (a) SMF; (b) FMF

Бұл 3 - суретте виброакустикалық әсерге жауап ретінде алынған SMF (a) және FMF (b) талшықтарының сигнал фрагменттері көрсетілген. FMF сигналының амплитудасы мен өзгеріс айқындылығы SMF-қа қарағанда әлдеқайда жоғары, бұл FMF-тың акустикалық әсерге жоғары сезімталдығын дәлелдейді.

Алынған нәтижелерді басқа еңбектермен салыстыру FMF қолданудың ерекшеліктерін нақтылауға мүмкіндік береді. Біздің тәжірибеде байқалған SNR төмендеуі Xiaoxia Che және әріптестерінің [14] жұмысына сәйкес келеді, онда FMF-тің Brillouin жиілік ығысуы (BFS) SMF-ке қарағанда төмен, ал спектрлік сызықтың ені кең екендігі көрсетілген. Мұндай спектралдық кеңею өлшеулердің дәлдігін төмендетіп, біздің эксперименттік деректердегі шудың артуын түсіндіреді. Сонымен қатар, Lv және т.б. [15] зерттеулерінде SMF–FMF–SMF құрылымының интермодальды интерференцияны азайтып, тұрақты импульстар алуға мүмкіндік беретінін көрсетсе, біздің нәтижелерде FMF-тегі фазалық флуктуациялар жүйенің тұрақтылығына әсер ететіні байқалды. Ал Ashry және әріптестері [16] FMF негізіндегі сенсорлардың артықшылықтарына тоқталып, олардың көппараметрлі өлшеу мүмкіндіктері мен SNR деңгейін арттыру әлеуетін көрсетті. Демек, біздің нәтижелер FMF-тің дәстүрлі SMF-ке қарағанда жаңа мүмкіндіктер ұсынатынын, алайда интермодальды байланыс пен спектралдық кеңеюді басқару қажеттігін дәлелдейді.



(a)

(б)

Сурет 4 – Вибро-акустикалық әсерге байланысты DAS жүйесінің фазалық детекторының 2D графиктері: (a) 30 Гц; (b) 150 Гц

4а - суретте келтірілген (30 Гц) графикте FMF (көк сызық) және SMF (қызыл сызық) оптикалық талшықтарының 30 Гц жиіліктегі деформация (strain) мәндері салыстырылған. Ең үлкен деформация FMF үшін шамамен 1.25 мк, ал SMF үшін 0.55 мк маңында байқалады. FMF талшығының бүкіл ұзындығы бойымен сезімталдықтың айқын жоғары екені көрінеді, әсіресе 0.4 а.у. аралығында шұғыл шың бар. Бұл FMF құрылымының виброакустикалық сигналға жоғарырақ жауап беретінін көрсетеді. Ал 4б - суретте келтірілген (150 Гц) графикте 150 Гц жиілікте FMF (көк сызық) максималды деформацияны шамамен 1.5 мк деңгейінде, ал SMF – шамамен 0.45 мк деңгейінде көрсетті. 0.45 а.у. аймағында екі талшық та бірдей пик көрсеткенімен, FMF бойында одан кейінгі аймақтарда да жоғары толқындар байқалады. SMF талшығының реакциясы әлсіз әрі бірқалыпты, бұл оның сигналды қабылдау сезімталдығының төмендігін білдіреді. Жалпы, FMF талшықтары жоғары жиілікте де сенімді әрі жоғары сезімталдықпен жұмыс істейтінін дәлелдейді.

Алынған эксперименттік тәуелділіктер талшықтағы фазалық ығысу мен деформация арасындағы сызықты байланысты растады. Теориялық түрде сезімталдық коэффициенті:

$$S = \frac{\partial \Delta \phi}{\partial \varepsilon} = \frac{4\pi n L}{\lambda}, \quad (3)$$

түрінде өрнектеледі. FMF үшін n_{eff} және өзек диаметрінің артуы бұл коэффициентті шамамен 1,4–1,6 есе арттырады, бұл тәжірибеде анықталған сезімталдық айырмашылығымен (~8%) жақсы үйлеседі.

Бұл зерттеу жұмысы таратылған акустикалық сенсор (DAS) жүйесінде бір модальды (SMF) және аз модальды (FMF) оптикалық талшықтардың виброакустикалық әсерге жауап беру ерекшеліктерін салыстыруға бағытталды. Алынған нәтижелер FMF талшығының сезімталдығы жоғары екенін және оның DAS жүйелеріндегі қолдануға қолайлы екенін көрсетті. Мұндай қорытындыға келуге бірнеше нақты бақылаулар мен графиктер негіз болды. Атап айтқанда, 4 - суретте келтірілген фазалық детектор графиктерінде FMF талшығының деформацияға реакциясы SMF-ке қарағанда айтарлықтай жоғары екені анық байқалды. 30 Гц жиілікте FMF максималды деформация мәні шамамен 1.25 мк болса, SMF үшін бұл көрсеткіш 0.55 мк болды. 150 Гц жиілікте де осы арақатынас сақталды: FMF – 1.5 мк, SMF – 0.45 мк. Бұл айырмашылық FMF талшығының кең өзек диаметріне (21/125 мкм), GeO₂ легирленуіне және квазисатылы сыну көрсеткіші профиліне байланысты. Сонымен қатар, LP01 және LP11a модальдарының интермодальды интерференциясы FMF сезімталдығына қосымша әсер етеді. Бұл ерекшеліктер сигналдың кеңістіктік таралуын күшейтіп, акустикалық әсерлерді тиімді тіркеуге мүмкіндік береді. 3 - суреттегі waterfall-графиктерде де FMF сигналының визуалды түрде айқын және интенсивті екені байқалды. Бұл FMF талшығы арқылы таралған сигналдың әлдеқайда күшті және анық тіркелетінін растайды. Бұл нәтижелер алдыңғы ғылыми жұмыстармен де сәйкес келеді. Мәселен, [7] зерттеуінде FMF LP01 режимінде SMF-пен салыстырғанда SNR көрсеткіші 2.04 дБ-ге артқаны айтылған. Сонымен қатар, [9] еңбегінде FMF негізіндегі екі модальды сенсордың интермодальды интерференцияға қарамастан шу деңгейін 2.52 дБ төмендеткені дәлелденген. Ал біздің жұмысымызда мұндай ерекшеліктер нақты тәжірибелік өлшемдермен бекітілді.

Алайда зерттеудің белгілі бір шектеулері бар. Біріншіден, тәжірибелер тек 10–150 Гц аралығындағы жиіліктермен шектелген. Бұл жоғары жиіліктегі (>1 кГц) сигналдарға FMF реакциясын бағалауға мүмкіндік бермейді. Екіншіден, зерттеу тек зертханалық жағдайда жүргізілді, сондықтан сыртқы температура, ылғалдылық немесе механикалық әсерлер ескерілмеді. Үшіншіден, қолданылған FMF — нақты геометриясы мен легирленуі бар нақты бір түрі болғандықтан, бұл нәтижелерді басқа аз модальды талшықтарға тікелей көшіру мүмкіндігі шектеулі. Сонымен қатар, интермодальды интерференция нәтижесінде сигналда уақытша жылжу байқалды, бұл тіркеу дәлдігіне әсер етуі мүмкін. Мұндай әсерлерді жою

үшін импульс ұзындығын қысқарту, оптикалық фильтрлеу және цифрлық компенсация әдістерін енгізу қажет.

Зерттеудің кемшілігі ретінде FMF орамдарының қорғаныссыз ашық күйде орналастырылуы салдарынан SNR көрсеткішінің төмен болуы атап өтіледі. Бұл мәселені болашақта талшықты қорғаныс корпусына орналастыру және дірілден оқшаулағыш материалдар қолдану арқылы шешуге болады. Сондай-ақ, цифрлық өңдеу алгоритмдерінің жетілдірілмеуі де кемшілік ретінде танылады. Бұл кемшілікті шешу үшін машиналық оқыту немесе нейрондық желілер негізінде деректерді интеллектуалды өңдеу тәсілдерін қолдануға болады. Эксперименттер статистикалық тұрғыдан да шектеулі болды: әрбір жиілік үшін өлшем саны аз, бұл нәтижелердің сенімділік деңгейін төмендетеді. Болашақта үлкен деректер негізінде көп мәртелік өлшемдер жүргізу қажет.

Зерттеудің болашақтағы дамуы бірнеше бағытта жалғастырылуы мүмкін. Біріншіден, жоғары жиілікті сигналдарға (1–10 кГц) FMF реакциясын зерттеу қажет. Екіншіден, интермодальды интерференцияны математикалық модельдеу арқылы фазалық айырмашылықтарды теориялық тұрғыдан бағалау керек. Үшіншіден, DAS жүйесін нақты қолдану салаларында (құбыр жүйелері, құрылыс, сейсмикалық бақылау) сынақтан өткізу арқылы тәжірибелік база кеңейтілуі тиіс. Төртіншіден, FMF негізінде DAS пен DTS (температуралық сенсор) жүйелерін біріктіріп, бір талшықта көп параметрлі өлшеу жүргізуге болады. Мұндай жүйе [13] зерттеуінде қарастырылған және практикалық қолданысқа ыңғайлы.

Дегенмен, бұл бағыттағы дамуға да өзіне тән қиындықтар. Мысалы, математикалық тұрғыдан – интерференция құбылыстарын дәл сипаттау қиын; техникалық жағынан – оптикалық компоненттерді дәл теңшеу және тұрақты тіркеу жүйесін құру қажет. Сонымен қатар, жоғары жиілікті сигналдарды сенімді тіркеу үшін жылдам әрі жоғары рұқсаттағы құрылғылар мен есептеу қуаты керек болады.

Қорытындылай келе, бұл зерттеу FMF оптикалық талшықтарының DAS жүйесіндегі қолданылуын тереңінен түсінуге және оны нақты тәжірибелік негізде бағалауға үлкен үлес қосты. Нәтижелер қазіргі заманғы сенсорлық технологияларды жетілдіруге бағытталған жаңа тәсілдер мен шешімдер ұсынуға мүмкіндік береді.

Қорытынды.

Ғылыми зерттеу жұмысын келесідей тұжырымдауға болады:

1. Зерттеу барысында таратылған акустикалық сенсор (DAS) жүйесінде бір модальды (SMF) және аз модальды (FMF) оптикалық талшықтардың виброакустикалық әсерге сезімталдығы салыстырылды. Эксперимент нәтижесінде FMF талшығының сезімталдығы 30 Гц жиілікте 7,9%, ал 150 Гц жиілікте 8,5% жоғарылағаны анықталды. Бұл FMF құрылымының сыну көрсеткіші профилінің квазисатылы түрде күшті өзгеріске ұшырауымен түсіндіріледі;

2. Қосымша байқау нәтижесі ретінде FMF жүйесінде интенсивтілік графиктерінде сигналдың күші SMF-ке қарағанда айтарлықтай жоғары болғаны анықталды. Бұл аз модальды талшықтың кең өзек геометриясы мен интермодальды интерференцияны тиімді өңдеуге мүмкіндік беретін модальды құрылымының артықшылығын дәлелдейді;

3. Алайда, барлық артықшылықтарға қарамастан, SNR (сигнал-шу қатынасы) FMF жүйесінде төменірек деңгейде тіркелді. Бұл нәтижені FMF орамдарының ашық күйде орналасуы және қорғаныс изоляциясының болмауы арқылы түсіндіруге болады. Болашақта SNR көрсеткішін жақсарту үшін цифрлық сигналдарды өңдеу әдістерін жетілдіру және қосымша эксперименттік сериялар жүргізу қажет.

Зерттеу нәтижелері FMF оптикалық талшықтарын DAS жүйесінде пайдалану сезімталдықты арттыруда тиімді құрал бола алатынын көрсетті. Бұл FMF-тың құрылымдық ерекшеліктері мен кеңістіктік модальды тиімді қолдануға негізделген. Нәтижелер қазіргі кездегі виброакустикалық мониторинг жүйелерінің сапасын жаңа деңгейге көтеруге мүмкіндік береді. Жүргізілген математикалық интерпретация фазалық ығысу мен

модальдық параметрлердің өзара байланысын анық көрсетіп, FMF құрылымының сезімталдық артықшылығын теориялық тұрғыдан растады.

Алғыс білдіру

Авторлар BR20280990 «Сұйықтық пен газ механикасының, жаңа деформацияланатын денелердің, және машиналардың, механизмдердің, робототехниканың сенімділігін, энергия тиімділігінің іргелі мәселелерін шешу әдістерін әзірлеу, дамыту» жобасының басшылығына осы зерттеуді жүргізуге, сондай-ақ осы мақаланы жазуға көмектескені үшін алғыс білдіреді.

Әдебиеттер тізімі

1. Хи, Зуян және Лью, Ксинквен. (2021). Оптикалық талшықты таратылған акустикалық сенсорлар: Шолу. *Journal of Lightwave Technology*. Б. 1–1. DOI: 10.1109/JLT.2021.3059771.
2. Эшри және басқалар. Мұнай-газ саласындағы таратылған талшықты-оптикалық сенсорлар шолуы. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, Т. 40, № 5, б. 1407–1431. DOI: 10.1109/JLT.2021.3135653.
3. Дж. Ричардс және басқалар. Бұлттық негіздегі тұрақты талшықты-оптикалық DAS арқылы ағынды бақылау шешімі. *SPE Digital Energy Conference and Exhibition*, 2015, С. D031S018R001. DOI: 10.2118/173440-MS.
4. Абдықадыров, Н. Смайлов, А. Сәбиболда, Г. Төлен, Ж. Досбаев, Ж. Уалиев, Р. Қадырова, “Оптикалық талшық технологияларына негізделген таратылған акустикалық сенсорларды оңтайландыру,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Т. 5, № 5(131), б. 50–59. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.313455.
5. А. Құттыбаева, А. Абдықадыров, Г. Төлен, А. Бурдин, В. Малюгин және Д. Кизеветтер, “Инфрақұрылымды бақылауға арналған талшықты-оптикалық технологиялар негізіндегі таратылған акустикалық сенсорларды қолдану,” *2024 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, Санкт-Петербург, Ресей, 2024, б. 23–26. DOI: 10.1109/EExPolytech62224.2024.10755937.
6. А. Құттыбаева, А. Абдықадыров, Г. Төлен, А. Бурдин, В. Малюгин және Д. Кизеветтер, “Сейсмикалық мониторингке арналған таратылған акустикалық сенсорларды әзірлеу және оңтайландыру,” *2024 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, Санкт-Петербург, Ресей, 2024, б. 64–67. DOI: 10.1109/EExPolytech62224.2024.10755702.
7. Мао Ю., Эшри И., Алиас М. Ш., Нг Т. К., Хвединг Ф., Арсалан М., “Таратылған акустикалық сезгіштік үшін аз режимді талшықтың өнімділігін зерттеу,” *IEEE Photonics Journal* 11(5), 6802910-1 – 6802910-10 (2019).
8. Лю Б., Ванг Ж. У., Йе Л., Лью Ю., Яанг Ж., Ву Б., Йе К., Кью Р., Цай Х., “Аз режимді оптикалық талшықтарды қолданатын өте төмен шуылы көпкірісті таратылған акустикалық сенсор,” *IEEE Journal of Lightwave Technology* 40(9), 3062–3071 (2022).
9. Чень М., Масоуди А., Пармиджани Ф., Брамбилья Г., “Екі режимді талшыққа негізделген таратылған акустикалық сенсор,” *Optics Express* 26, 25399–25407 (2018).
10. Коста Л., Жан Ж., Маранди А., “Позиция бойынша талшықты-оптикалық сезгіштікке арналған режимдік интерференция әдісі,” *IEEE Journal of Lightwave Technology* 41(2), 752–760 (2023).
11. Марин Дж. М., Бринцев Д., Канг С. Х., Алхазраджи О., Нг Т. К., Эшри И., Тричили А., Уи Б. С., “Екі режимді талшықта таратылған акустикалық сезгіштік пен Крамерс-Крöниг байланыс жүйесінің гибриді,” *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2023*, W4C.6-1 – W4C.6-3 (2023).
12. Орсуди Д., Маркон Г., Туролла А., Сантагистина М., Гальтаросса А., Дзамбатто М., Палмиери Л., “Кеңістіктік режимдердің когерентті орташа мәні арқылы әлсіреуді азайту арқылы көпрежимді талшықтарда DAS,” *IEEE Photonics Technology Letters* 35(16), 866–869 (2023).
13. Мао Ю., Эшри И., Хвединг Ф., Бухамсин А. Ю., Хонг Ю., Нг Т.К., “Көпрежимді талшықты пайдаланып таратылған акустикалық және температуралық сезгіштікті бір уақытта жүргізу,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 26(4), 1–7 (2020).
14. Че, Х., Чжао, Л., Сю, З. және Ян, З. (2020, қазан). Бір модты талшықтың, аз модты талшықтың және көп модты талшықтың Брилуин сипаттамаларын зерттеу және салыстыру. «Физика» журналында: Конференциялар сериясы (Т. 1650, № 2, 022022-бет). DOI 10.1088/1742-6596/1650/2/022022

15.15. Чао Лв, Бин Инь, Сяору Дин, Янчжи Лв, Йиминг Ван, Цзэнгуан Сун, Шийин Сяо, Мугуан Ван, Ли Пей, Сонхуа Ву, ауыспалы қос толқын ұзындығы ашық/қараңғы импульстар цилиндрлік векторлық сәулелер талшықты лазер негізіндегі SMF-SFer-GS-сіңіретін технологиясы, *Lasmf-G asb.* 184-том, 2025, 112513, ISSN 0030-3992, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.112513>.

16.16. I. Ashry және т.б., *IEEE Access*, том. 8, 179592-179605 бет, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3027965.

References

1. He, Z., & Liu, Q. (2021). Optical fiber distributed acoustic sensors: A review. *Journal of Lightwave Technology*, 39(12), 3671-3686, doi: 10.1109/JLT.2021.3059771.

2. Ashry, I., Mao, Y., Wang, B., Hveding, F., Bukhamsin, A. Y., Ng, T. K., & Ooi, B. S. (2022). A review of distributed fiber-optic sensing in the oil and gas industry. *Journal of Lightwave Technology*, 40(5), 1407-1431. DOI: 10.1109/JLT.2021.3135653

3. Richards, J., Bartlett, R., Onen, D., Crowther, G., Molenaar, M. M., Reynolds, A., ... & Berlang, W. (2015, March). Cloud-Based Solution for Permanent Fiber-Optic DAS Flow Monitoring. In *SPE Digital Energy Conference and Exhibition* (p. D031S018R001). SPE. <https://doi.org/10.2118/173440-MS>

4. Abdykadyrov, A., Smailov, N., Sabibolda, A., Tolen, G., Dosbayev, Z., Ualiyev, Z., & Kadyrova, R. (2024). OPTIMIZATION OF DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSORS BASED ON FIBER OPTIC TECHNOLOGIES. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 131(5). DOI: 10.15587/1729-4061.2024.313455

5. Kuttybayeva, A., Abdykadyrov, A., Tolen, G., Burdin, A., Malyugin, V., & Kiesewetter, D. (2024, October). Application of Distributed Acoustic Sensors Based on Optical Fiber Technologies for Infrastructure Monitoring. In *2024 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)* (pp. 23-26). IEEE, DOI: 10.1109/EExPolytech62224.2024.10755937.

6. Kuttybayeva, A., Abdykadyrov, A., Tolen, G., Burdin, A., Malyugin, V., & Kiesewetter, D. (2024, October). Development and Optimization of Distributed Acoustic Sensors for Seismic Monitoring. In *2024 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)* (pp. 64-67). IEEE, DOI: 10.1109/EExPolytech62224.2024.10755702.

7. Mao, Y., Ashry, I., Alias, M. S., Ng, T. K., Hveding, F., Arsalan, M., & Ooi, B. S. (2019). Investigating the performance of a few-mode fiber for distributed acoustic sensing. *IEEE Photonics Journal*, 11(5), 1-10, doi: 10.1109/JPHOT.2019.2940951..

8. Lu, B., Gu, J., Wang, Z., Ye, L., Liu, Y., Yang, J., ... & Cai, H. (2022). Ultra-low-noise MIMO distributed acoustic sensor using few-mode optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 40(9), 3062-3071, doi: 10.1109/JLT.2022.3144191.

9. Chen, M., Masoudi, A., Parmigiani, F., & Brambilla, G. (2018). Distributed acoustic sensor based on a two-mode fiber. *Optics Express*, 26(19), 25399-25407, <https://doi.org/10.1364/OE.26.025399>

10. Costa, L., Zhan, Z., & Marandi, A. (2022). Mode-walk-off interferometry for position-resolved optical fiber sensing. *Journal of Lightwave Technology*, 41(2), 752-760, doi: 10.1109/JLT.2022.3216533.

11. Marin, J. M., Briantcev, D., Kang, C. H., Alkhazragi, O., Ng, T. K., Ashry, I., & Ooi, B. S. (2023, March). Hybrid distributed acoustic sensing and Kramers-Kronig communication system over a two-mode fiber. In *2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)* (pp. 1-3), doi: 10.1364/OFC.2023.W4C.6.

12. Orsuti, D., Marcon, G., Turolla, A., Santagiustina, M., Galtarossa, A., Zampato, M., & Palmieri, L. (2023). DAS over multimode fibers with reduced fading by coherent averaging of spatial modes. *IEEE Photonics Technology Letters*, 35(16), 866-869, doi: 10.1109/LPT.2023.3285625.

13. Mao, Y., Ashry, I., Hveding, F., Bukhamsin, A. Y., Hong, Y., Ng, T. K., & Ooi, B. S. (2020). Simultaneous distributed acoustic and temperature sensing using a multimode fiber. *IEEE*

Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 26(4), 1-7, doi: 10.1109/JSTQE.2020.2964398.

14. Che, X., Zhao, L., Xu, Z., & Yang, Z. (2020, October). Research and comparison of Brillouin characteristics of single-mode fiber, few-mode fiber and multi-mode fiber. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1650, No. 2, p. 022022). DOI 10.1088/1742-6596/1650/2/022022

15. Chao Lv, Bin Yin, Xiaoru Ding, Yanzhi Lv, Yiming Wang, Zengguang Sun, Shiyong Xiao, Muguang Wang, Li Pei, Songhua Wu, Switchable dual-wavelength bright/dark pulses cylindrical vector beams fiber laser based on SMF-GIFMF-SMF as saturable absorber, Optics & Laser Technology, Volume 184, 2025, 112513, ISSN 0030-3992, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.112513>.

16. I. Ashry et al., "A Review of Using Few-Mode Fibers for Optical Sensing," in IEEE Access, vol. 8, pp. 179592-179605, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3027965.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ МОДАЛЬНЫХ СТРУКТУР И СПЕКТРАЛЬНО-КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА РАДИОПЕЛЕНГАЦИИ В СИСТЕМАХ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Аннотация. Целью данной исследовательской работы является определение эффективности спектрально-корреляционной обработки путем сравнения чувствительности разномодовых волокон к виброакустическим воздействиям в системе распределенного акустического датчика (DAS). В качестве объекта исследования были взяты одномодовые (SMF, ITU-T G.652) и специально легированные маломодовые (FMF 21/125, 5-LP-модовые, на основе GeO_2) оптические волокна. В эксперименте низкочастотные виброакустические воздействия (10 Гц, 30 Гц, 150 Гц) вводились с помощью пьезоэлектрического преобразователя и регистрировались с помощью системы DAS «Дунай». Для волокон SMF и FMF создавались одинаковые условия. На частоте 150 Гц чувствительность к вибрации для FMF оказалась на 8,5% выше, а на 30 Гц — на 7,9%. Кроме того, существенно более высокая интенсивность сигнала в системе FMF была подтверждена каскадными графиками. Это преимущество обусловлено квазисферическим профилем показателя преломления и широкой геометрией сердцевинки волокна FMF. Кроме того, было показано, что комбинация мод LP01 и LP11a, хотя и вызывает интермодовые помехи, может быть решена методами временной коррекции. Результаты исследования показали, что чувствительность датчика может быть значительно повышена за счет использования низкомодовых оптических волокон в системах DAS. Такие решения подходят для использования в областях защиты периметра, сейсмического мониторинга, контроля зданий и управления трубопроводами. Однако было отмечено снижение SNR, что указывает на необходимость совершенствования алгоритмов цифровой обработки сигналов в будущем.

Ключевые слова: распределенный акустический датчик, маломодовое оптоволокно, виброакустический эффект, пьезоэлектрический преобразователь, чувствительность.

STUDY OF THE INTERACTION AND EFFICIENCY OF FIBER-OPTICAL MODAL STRUCTURES AND SPECTRAL-CORRELATION RADIO DIRECTION FINDING METHOD IN VIBROACOUSTIC MONITORING SYSTEMS

Abstract. The aim of this research work is to determine the effectiveness of spectral-correlation processing by comparing the sensitivity of different modal fibers to vibroacoustic effects in a distributed acoustic sensor (DAS) system. Single-mode (SMF, ITU-T G.652) and specially doped low-mode (FMF 21/125, 5-LP-modal, GeO_2 -based) optical fibers were taken as

the object of research. In the experiment, low-frequency vibroacoustic effects (10 Hz, 30 Hz, 150 Hz) were introduced using a piezoelectric transducer and recorded using the DAS "Dunay" system. The same conditions were created for SMF and FMF fibers. At a frequency of 150 Hz, the sensitivity to vibration for FMF was 8.5% higher, and at 30 Hz - 7.9%. In addition, the significantly higher signal intensity in the FMF system was confirmed by waterfall graphs. This advantage is due to the quasi-spherical refractive index profile and wide core geometry of the FMF fiber. In addition, it was shown that the combination of LP01 and LP11a modes, although it causes intermodal interference, can be solved by temporal correction methods. The results of the study showed that the sensor sensitivity can be significantly increased by using low-mode optical fibers in DAS systems. Such solutions are suitable for use in the fields of perimeter protection, seismic monitoring, building control and pipeline management. However, a decrease in SNR was observed, which indicates the need to improve digital signal processing algorithms in the future.

Keywords: distributed acoustic sensor, low-mode optical fiber, vibroacoustic effect, piezoelectric transducer, sensitivity.

Авторлар туралы мәлімет

Абдыкадыров Аскар Айтмырзаевич	Техникалық ғылымдар кандидаты, Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты ғылыми қызметкері, Satbayev University қауымдастырылған профессоры, Алматы қ., Қазақстан E-mail: a.abdikadyrov@satbayev.university
Бурдин Антон Владимирович	Техникалық ғылымдар докторы, «Профессор М.А. Бонч-Бруевич атындағы Санкт-Петербург мемлекеттік телекоммуникация және информатика университетінің» профессоры, Санкт-Петербург қ., Ресей, E-mail: bourdine@yandex.ru
Смайлов Нуржигит Куралбаевич	PhD, Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты ғылыми қызметкері, Satbayev University профессоры, Алматы қ., Қазақстан, E-mail: n.smailov@satbayev.university
Төлен Гүлжайна Бақытжанқызы	Техника ғылымдарының магистрі, Satbayev University аға оқытушы, Алматы, Қазақстан, Email: g.tolen@satbayev.university

Сведение об авторах

Абдыкадыров Аскар Айтмырзаевич	Кандидат технических наук, научный сотрудник Института механики и машиноведения имени академика У.А. Джолдасбекова, Ассоциированный профессор Satbayev University, г. Алматы, Казахстан E-mail: a.abdikadyrov@satbayev.university
Бурдин Антон Владимирович	Доктор технических наук, профессор кафедры фотоники и линий связи ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций и информатики им. профессора М.А. Бонч-Бруевича», г. Санкт-Петербург, Россия E-mail: bourdine@yandex.ru
Смайлов Нуржигит Куралбаевич	PhD, научный сотрудник Института механики и машиноведения имени академика У.А. Джолдасбекова, профессор Satbayev University, г. Алматы, Казахстан E-mail: n.smailov@satbayev.university
Төлен Гүлжайна Бақытжанқызы	Магистр технических наук, старший преподаватель Satbayev University, г. Алматы, Казахстан, Email: g.tolen@satbayev.university

Information about the authors

Abdykadyrov Askar	Candidate of technical sciences, Researcher at the Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after Academician U.A. Dzholdasbekov, Associate Professor at Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: a.abdikadyrov@satbayev.university
Bourdine Anton	Doctor of Technical Sciences, Professor of The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, St Petersburg, Russia, E-mail: bourdine@yandex.ru
Smailov Nurzhigit	PhD, researcher at the Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after Academician U.A. Dzholdasbekov, professor at Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: n.smailov@satbayev.university
Tolen Gulzhaina	Master of Technical Sciences, Senior Lecturer at Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, Email: g.tolen@satbayev.university