

## **АНДАТПА**

"Технологиялық процестерді бақылауға арналған талшықты-оптикалық көпфункционалды датчиктердің функционалдығын зерттеу және модельдеу" тақырыбы бойынша философия докторы (PhD) академиялық дәрежесін алу үшін "8D06201-Телекоммуникация" мамандығы бойынша диссертациялық жұмыс

### **КӨШКІНБАЕВ СӘУЛЕТБЕК ЖОЛДЫҚАРАҰЛЫ**

#### **Шешілетін ғылыми-технологиялық проблеманың (міндеттердің) қазіргі жай-күйін бағалау**

Ондаған жылдар бойы физикалық және механикалық құбылыстарды өлшеудің негізгі әдісі электр датчиктері болды (тензорезистивті, Ішекті, Потенциометриялық және т.б.). Олардың көптеген салаларда қолданылатына қарамастан, электр датчиктерінің бірқатар кемшіліктері бар, мысалы: сигналдың жоғалуы, электромагниттік кедергілерге сезімталдық, ұшқын өткізбейтін электр тізбегін ұйымдастыру қажеттілігі (егер жарылыс қаупі болса). Бұл шектеулер электр датчиктерін жарамсыз етеді немесе бірқатар тапсырмаларды орындау кезінде қолдануды қиындатады. Талшықты-оптикалық сенсорларды пайдалану бұл мәселелердің тамаша шешімі болып табылады. Талшықты-оптикалық датчиктерде сигнал талшықтағы жарық болып табылады, ал дәстүрлі электр датчиктеріндегі мыс сымдағы электр энергиясы болып табылады.

Соңғы жиырма жыл ішінде оптоэлектроника мен талшықты-оптикалық телекоммуникация саласындағы көптеген инновациялар оптикалық құрылғылардың және олардың компоненттерінің бағасының айтарлықтай төмендеуіне және сапасының айтарлықтай жақсаруына әкелді.

Бұл талшықты-оптикалық датчиктерге эксперименттік зертханалық аспаптар санатынан ғимараттар мен құрылыстарды бақылау және т.б. салаларда кеңінен қолданылатын аспаптар санатына өтуге мүмкіндік берді.

Бусурин В. М., Бутусов М. М., Бурков В. Д., Гори А. В., Гуляев Ю. А., Малков Я. В., Мурашкина Т. И., Потапов Б., Окоси Т, Оцу М, Окамато Т және т.б. сияқты ресейлік және шетелдік ғалымдар талшықты-оптикалық датчиктерді (ТОД) жобалаудың теориялық негіздерін, элементтері мен механизмдерін әзірлеуге, дамытуға айтарлықтай үлес қосты.

Қазіргі заманғы талшықты-оптикалық датчиктер келесідей қасиеттерге ие :

- абсолютті жарылыс қауіпсіздігіне байланысты жарылыс қаупі бар ортада қолдануға болады;
- олар жоғары механикалық беріктікке, шағын өлшемге, қарапайым құрылымға және сәйкесінше жоғары сенімділікке ие;
- химиялық инертті;
- диэлектрлік материалдардан жасалады, олар арқылы электр тогының өту жолдарының болмауын қамтамасыз етеді;

- жоғары температураға, механикалық соққыларға, тербелістерге және басқа да қоршаған орта әсерлеріне жоғары төзімділікке ие;
- контактісіз және қашықтықтан өлшеуге мүмкіндік береді.

Кейбір талшықты-оптикалық датчиктерді электронды құрылғыларды мүлдем қолдануға болмайтын жағдайларда қолдануға болады немесе мұндай пайдалану айтарлықтай қиындықтар мен шығындармен бірге жүреді (мысалы, айнымалы ток генераторлары, трансформаторлар сияқты жоғары вольтты электр аппараттарындағы температураны өлшеу; жоғары вольтты электр желілеріндегі ток пен кернеуді өлшеу; қол жетпейтін қиын жерлерде жылу өткізгіштігі төмен және айнымалы шағылысу қабілеті бар шағын беттердің температурасын жылдам өлшеу).

Талшықты-оптикалық датчиктерде қолданылатын элементтер электр энергиясына мүлдем пассивті, бұл оларды ғарыш, тау-кен өнеркәсібі, мұнай өнеркәсібі, құбырларды бақылау және т. б. сияқты әртүрлі салаларда пайдалануға мүмкіндік береді..

Өлшеу тәжірибесі көрсеткендей, ғарыштық техникада, өнеркәсіпте және технологияда өлшенетін параметрлердің басым бөлігі болып деформация (20-30%) және температура (10-20%) саналады. Алайда, температура көбінесе басқа параметрлердің негізгі өлшемдерінде қолданылатын жанама параметр болып табылады.

Осылайша, деформация мен температура жалпы өлшемдердің шамамен 35-45% құрайды, сондықтан экстремалды жұмыс жағдайларында деформация мен температураны (көпфункционалды датчик ретінде) бір мезгілде өлшейтін өлшеу түрлендіргіштерін құру өте өзекті тақырып болып табылады.

Бұл тақырыппен негізінен шетелдік фирмалар және P. J. Lemaire, R. M. Atkins (АҚШ), С.В. Варжель, О. И. Медведков, И. Г. Королев (Ресей) сияқты ғалымдар мен ғылыми топтар айналысады. Өкінішке орай, Қазақстанда датчиктердің өзіндік өндірісі жоқ, сондықтан тек импортталған өнімдер қолданылады.

Қазіргі уақытта талшықты-оптикалық Брэгг торлары (ТБТ) датчиктің ең перспективалы сезімтал элементтерінің бірі ретінде қарастырылады. Талшықты-оптикалық Брэгг торлары байланыс жүйелерінде де, температура датчиктері мен объектілердің деформация датчиктері ретінде де кеңінен қолданылады. Сондықтан көптеген ғылыми жұмыстар талшықты Брэгг торларының қасиеттерін зерттеуге арналған. Талшықты Брэгг торларын жасау технологиясы, олардың негізгі жұмыс принциптері А. Othonos [1], С. E. Campanella [2], С. А. Васильев [3] жұмыстарында көрсетілген, ал қолданылу салалары С.В. Варжель [4], Kun Yao, Qijing Lin, Zhuangde Jiang, Na Zhao, Bian Tian, Peng Shi and Gang-Ding Peng [5] жұмыстарында аталып өтілген. Чирпирленген торлардың қасиеттері және олардың қолданылуы туралы жұмыстарға шолу Daniele Tosi [6] жұмысында жасалынған.

Талшықты Брэгг торларын салаларда, атап айтқанда медицинада қолдану А. Shadab [7], С. Massarani [8], D. L. Presti [9] жұмыстарына шолуларда қарастырылады. Биохимия мен фармацевтикада А. М. Riza [10], С.

Broadway, [11] жұмыстарына, экология саласында D. Nadeem [12] жұмыстарына және басқа салаларда A.G. Leal-Junior [13] жұмыстарына шолуларда қарастырылады.

### **Ғылыми-зерттеу жұмыстарын жүргізу қажеттілігінің негіздемесі.**

Зымыран-ғарыш саласы үшін датчиктерді әзірлеу кезінде құрылғыларды әзірлеуге қойылатын техникалық талаптарды сипаттайтын негізгі факторлардың әсерінен датчиктердің жұмыс істеуін қамтамасыз ету бойынша күрделі міндет туындайды. Ғарыш саласында қолданылатын датчиктер сыртқы факторларға сезімтал болып келеді. Сондай-ақ экстремалды сыртқы температуралық, соққы, діріл және әсіресе электромагниттік әсерлерге байланысты ғарыш саласындағы аппараттардың металл корпусының төзімділігіне, өлшеу тұрақтылығына және зымыран-ғарыш аппаратының бірінші сатыдағы қозғалтқышының жұмысына қойылатын талаптар жоғары. Осы тұрақсыздандырушы факторлардың әсерінен ғарыш аппаратының металл корпусында механикалық ығысулар мен метрологиялық өзгерістер орын алады. Сондықтан жоғарыда аталған әсерлерден объектілердің ығысуы мен деформация жылдамдығын тіркеу үшін осы жұмыста оптикалық әдістер қолданылды. Бұл әдістер объектінің ығысу шамасына байланысты сигнал алу үшін оптикалық жарық өткізгіштерді пайдаланады.

Ғарыштық инфрақұрылымға арналған талшықты-оптикалық көпфункционалды датчиктің технологиялары мен конструкциялары қарастырылды.

Осы фактілердің барлығын ескере отырып, жоғары метрологиялық және эксплуатациялық сипаттамалары бар талшықты-оптикалық датчиктердің функционалдығын, мүмкіндіктерін зерттеу өзекті болып табылады.

### **Жұмыстың мақсаты**

Жұмыстың мақсаты оптикалық көпфункционалды датчиктің оптикалық Брэгг торларын қолдана отырып, металл беттерінің жоғары жылдамдықты ығысуын, температуралық өзгеруін анықтау. Металл беттерінің өзгерісі әсер етілген деформациялық, температуралық күштерге байланысты. Бұл ғарыш саласында қолданылатын аппараттардың сыртқы тұрақсыздандырушы факторлардың әсерінен қаншалықты деформацияланатынын анықтауға және қажетті материалдарды, олардан қорғану жолдарын табуға мүмкіндік береді.

Осы мақсатты шешу үшін жұмысты орындау барысында осы бағыттың жаңалығына сүйене отырып, оптикалық орталар арқылы когерентті сәулеленудің пайда болуы мен таралуының теориялық мәселелерін зерттеу, деформация мен температураның әсерінен сәулелену параметрлерін өзгертудің тиімді әдістерін анықтау қажет. Сонымен қатар, бір датчик арқылы жүзеге асырылатын физикалық және технологиялық үйлесімді түрлендіру әдістерін табу қажет. Алынған нәтижелерге сүйене отырып,

деформация мен температураны электрлік немесе сандық шамаға түрлендіруге қабілетті талшықты-оптикалық датчикті зерттеу қажет.

### **Жұмыстың міндеттері**

Жұмыстың белгіленген мақсатына жету үшін келесі міндеттерді шешу қажет:

- Талшықты-оптикалық датчиктің сезімтал элементін жасау;
- Таңдалған құрылымдық-технологиялық шешімдердің дұрыстығын тексеру үшін талшықты-оптикалық датчикке жүктеме және температуралық сынақтарын жүргізу;
- Талшықты Брэгг торларын пайдаланып жоғары жылдамдықты деформацияларды өлшеу;

- Оптикалық көпфункционалды датчиктің элементтері мен құрылымдарының математикалық модельдерін жасау;

### **Жұмыстың ғылыми жаңалығы мен маңыздылығы.**

Бұл жұмыста алғаш рет металл беттерінің жоғары жылдамдықты ығысуларын, температуралық өзгерістерін анықтау үшін импульстік магнит өрісінің эксперименттік қондырғысында оптикалық датчиктерді пайдалану ұсынылады. Бұндай әдіс бұрын басқа зерттеулерде қолданылмаған және ол жұмыстың жаңалығы болып табылады.

Жұмыста шешілетін негізгі мәселе оптикалық датчиктің оптикалық Брэгг торлары арқылы металл беттерінің жоғары жылдамдықты деформациясының өзгеруін анықтау болып табылады. Жоғары жылдамдықты деформацияны анықтау кезінде магнит өрісінің импульстік құрылысында оптикалық Брэгг торын қолдану қарастырылады. Қазіргі уақытта деформацияның жоғары жылдамдығына байланысты бұл өзгерістерді тіркейтін әдістер туралы зерттеулер аз. Көптеген әдістер миллисекунд ішінде болатын деформацияларды анықтаумен шектеледі. Бұл жұмыстың жаңалығы импульстік магнит өрісінің құрылысында оптикалық әдістерді сынау және қолдану арқылы микросекунд ішінде болатын жоғары жылдамдықты деформацияларды анықтау болып табылады. Жұмыста қолданылатын импульстік магнит өрісі құрылысының металл үлгілеріне импульстік токтың әсер етуінің ең аз уақыты 2 мкс болады.

Зерттеу нәтижелері Еуразиялық экономикалық одақ елдерінде және шетелдерде сұранысқа ие инновациялық жоғары технологиялық өнімді әзірлеу тұрғысынан Қазақстан Республикасы үшін практикалық қызығушылық тудырады.

**Зерттеу нысаны** ғарыштық инфрақұрылымға арналған көп функциялы датчиктер болып табылады.

**Зерттеу пәні** - ғарыштық инфрақұрылымға арналған көпфункционалды датчик элементтерін құру мен жұмыс істеуін теориялық талдау және эксперименттік зерттеу.

### **Зерттеу әдістері және этикалық мәселелер**

Жұмыста жалпылау әдісі, тікелей өлшеу әдісі, бақылау әдісі және сараптамалық бағалау әдісі қолданылады. Жалпылау әдісін пайдалана отырып, олардың негізінде біріктірілген датчиктер мен ғарыш жүйелерінің жай-күйі мен даму үрдістеріне талдау жүргізілетін болады. Тікелей өлшеу әдісін қолдана отырып, стендтердегі торларды сынау көрсеткіштері алынды, ал сараптамалық бағалау әдісі бойынша жұмыста пайдаланылған элементтердің құрылымдық және технологиялық шешімдеріне бағалау жүргізілді. Бақылау әдісі талшықты-оптикалық датчиктің элементтері мен құрылымдарын модельдеуді қамтиды.

Талшықты-оптикалық датчикті құру кезінде ғылыми-техникалық зерттеулер мен жұмыстың негізгі бағыттары:

- белгілі бір пәндік саланы негізге ала отырып, сипаттамалар, қолданылатын материалдар мен компоненттер бойынша жалпыланған техникалық талаптарды әзірлеу;
- ғарыштық аспап жасауда қолдануға арналған талшықты оптикалық датчиктің қолданыстағы конструкциялары мен жұмыс принциптерін талдау және негізгілерін анықтау;
- талшықты-оптикалық датчикті әзірлеу кезінде жаңаша конструктивті-технологиялық шешімдерді жасау.

Таңдалған тәсілдің негіздемесі, әсіресе ғарыш саласы үшін аспап жасау өнімдерін әзірлеудің дәстүрлі рәсімі болып табылады, ол әзірленген әдістемелер бойынша және аттестатталған сынақ жабдықтарында міндетті модельдеуді, құрастыруды және сынақтар жүргізуді қамтиды.

*Сыни жағдайлар, жұмысты жүзеге асырудың балама жолдары:*

Заманауи технологиялық деңгейді, қолда бар элементтік базаны және жұмыс тақырыбы бойынша орындаушылардың авторлық ғылыми негіздерін ескере отырып, бұл жұмысты сәтті жүзеге асыруға сенімділік бар. Осы жұмысты іске асыру процесінде алынған нәтижелердің жоғары бәсекеге қабілеттілігі мен сұранысы туралы сенімді түрде айтуға болады. Жұмыстың маңызды кезеңдері-кең жолақты спектроанализатор сатып алу және сынақ стендін жасау болып табылады. Тәуекелді азайту үшін бұл кезеңдер спектроанализаторды жалға алу және кооперацияны пайдалану арқылы жүргізілген болатын.

Талшықты-оптикалық датчиктің эксперименттік макеттерін сынау нәтижелерінің сенімділігіне қол жеткізу үшін сертификатталған сынақ орталығында стандартты әдістер бойынша сынақтар жүргізілді.

Жұмыста пайдаланылатын интеллектуалды меншік объектілерінің иелері осы жұмысқа қатысы бар зерттеушілер болып табылады, бұл жұмысты орындау кезеңінде ғылыми этиканың бұзылуын болдырмайды. Осы жұмысты орындау барысында жасалған барлық ғылыми нәтижелер мен интеллектуалды меншік объектілері автордың қатысуымен ресімделген.

Осы жұмыс шеңберінде құрылған интеллектуалды меншік объектілері Қазақстан Республикасының инновациялық патенттерімен және Еуразиялық патенттермен, сондай-ақ нөлдік емес импакт-факторы бар басылымдардағы және ҚР БҒМ ұсынған журналдардағы мақалалармен қорғалатын болады.

### **Тақырыптың өзектілігі.**

Тәжірибе көрсеткендей, температура мен күштік өлшеулер ғылымда, техникада, өндірісте кең таралған, сондықтан біріктірілген, шуылға төзімді және энергияны үнемдейтін көп функциялы датчиктерге жататын Брэгг торы бар талшықты-оптикалық датчиктерді жасау **өте маңызды міндет** болып табылады. Зерттелетін талшықты-оптикалық датчиктер ғарыш инфрақұрылымында, полигондық инфрақұрылымда, сондай-ақ ҚР басқа да стратегиялық салаларында жаңадан әзірленетін және жаңғыртылатын датчиктер үшін сұранысқа ие болады.

Зымыран ғарыш техникасы (ЗҒТ) машина жасау саласы болып табылмайды және онда кеңінен қолданылатын өлшеу құралдары мен технологиялары жоқ, өйткені ЗҒТ бұйымдары мен жүйелерінің барлық іске қосылуы мен жұмыс істеуі, әдетте, әмбебап болып табылады. Сонымен қатар, өлшеу құралдары, атап айтқанда, физикалық шама датчиктері көбінесе аналогтық сезімтал элементке ие. Физикалық шама датчиктері сыртқы факторларға сезімтал және бұл факторлар зымыранда да, ғарыш кеңістігінде де кездеседі. Олар - зымыран корпусының механикалық деформациясы және температураның күрт көтерілуі, күшті электромагниттік кедергілер және т.б секілді факторлар. Осыған байланысты талшықты-оптикалық көпфункционалды датчиктерді қолдану перспективті болып табылады. Сонымен қатар, бір датчиктегі екі өлшеу параметрін біріктіру массалық сипаттамаларды төмендетуге мүмкіндік береді [10].

Қазіргі уақытта металл конструкциялары ең көп таралған материалдардың бірі болып табылады. Соңғы жылдары қарқынды жасанды және табиғи соққылар мен жарылғыш әсерлермен бірге жүретін төтенше жағдайлар жиілеп кетті. Мұндай құбылыстар тек материалдық емес, сонымен бірге адам шығынымен бірге жүреді. Сондықтан, жауапты құрылымдық конструкцияларды жобалау кезеңінде параметрлердің үздіксіз өзгеруімен, жоғары қарқындылығымен және қысқа ұзақтығымен сипатталатын осы динамикалық әсерлерді ескеру қажет. Ол үшін деформацияның жоғары жылдамдығында қолданылатын материалдардың механикалық қасиеттерін білу ғана емес, сонымен қатар оларды динамикалық жүктеменің нақты процесіндегі деформацияны бақылау қажет. Сонымен қатар, металдардың жоғары жылдамдықты деформациясы техника мен өндірісте кеңінен қолданылады. Бұл қолданыстағы жобаланған машиналар мен механизмдердің бөлшектерін өңдеу процесінде металдың жүктеме жылдамдығы өте жоғары болуымен түсіндіріледі. Қазіргі уақытта деформация жылдамдығының кең диапозонында металдардың деформацияға төзімділігі, икемділігі және қаттылығы туралы жеткілікті ақпарат жоқтың қасы.

Осыған байланысты жоғары жылдамдықтағы деформация кезіндегі ғарыш саласындағы, заманауи құрылымдық материалдарының мінез-құлқын зерттеу өте маңызды және өзекті мәселе болып табылады.

Бұл жұмыс талшықты Брэгг датчиктерінің қасиеттерін зерттеуге және оларды импульстік механикалық әсерді зерттеу үшін қолдануға арналған. Импульстік механикалық әсер импульстік магнит өрісі арқылы жасалады.

*Әлеуметтік сұраныс және жұмысты жүзеге асыруға экономикалық қызығушылық.*

Өнеркәсіп пен ғылымның көптеген салалары үшін жоғары технологиялық өнімдер өндірісін импортты алмастыру, әзірлеу және игеру маңызды мемлекеттік міндеттер болып табылады. Шағын және орта кәсіпорындар жағдайында жаңа білікті жұмыс орындарын құру, бұл ретте үлкен күрделі салымдар мен күрделі қымбат жабдықтар талап етілмейді.

*Алынған нәтижелердің ғылым мен технологияның дамуына әсері.*

Осы жұмысты орындау барысында түрлі салаларда, мысалы, бақылау – өлшеу техникасында, автоматикада және машина жасауда қолданылатын ғылыми нәтижелер алынды. Жұмыс нәтижелерін ҚР бірнеше патенттерімен, Еуразиялық патенттермен және оқу құралдары мен монографиялар шығарумен қорғау жоспарлануда.

*Күтілетін әлеуметтік және экономикалық әсер:*

- импортты алмастыру, импорттық өнімді сатып алуға мемлекеттік қаражатты үнемдеу;
- қауіпті объектілерде пайдалану және жұмыс істеу қауіпсіздігін арттыру;
- жаңа инновациялық өнім өндірісін игеру
- зерттелетін талшықты-оптикалық датчик негізінде оқу орындары мен өнеркәсіпке арналған зертханалық стендтер құру.

**Бұл жұмыстың басқа ғылыми-зерттеу жұмыстарымен байланысы.**

Жұмыс Қазақстан Республикасының БҒМ қаржыландыратын "ғарыш инфрақұрылымы үшін шағын көлемді талшықты-оптикалық біріктірілген қысым мен температура датчиктерін жасау конструкциялары мен технологияларын әзірлеу" тақырыбы бойынша АР08052850 ЖТН ғылыми-зерттеу жұмысының бөлігі ретінде орындалды.

**Диссертацияның материалдық қамтамасы туралы мәліметтер.**

Жұмыста фазалық маска әдісімен жазылған Брэгг торлары бар екі оптикалық жарыққа сезімтал талшық қолданылды және MS9740B оптикалық спектр анализаторы (Жапония) Брэгг торынан шағылысу спектрін алу үшін қолданылды. Және импульстік магнит өрісінің эксперименттік қондырғысы қолданылды. Брэгг торы бар оптикалық талшыққа температуралық әсер ету үшін SNOL 38/350 әмбебап кептіру шкафы қолданылды.

Оптика, аналитикалық геометрияның негізгі заңдары оптикалық датчиктің сезімтал элементінің математикалық және физикалық моделін құруда басшылыққа алынды.

### **Қорғауға шығарылатын ережелер**

Ұсынылатын гипотеза:

- оптикалық көпфункционалды датчиктің оптикалық Брэгг торларын қолдана отырып, ғарыш аппаратының (ЗФТ) металл беттерінің жоғары жылдамдықты ығысуын, температуралық өзгеруін анықтау.

Айтылған гипотеза негізінде қорғауға келесідей ережелер ұсынылады:

- объектінің ығысу шамасына байланысты сигнал алу үшін оптикалық жарық өткізгіштерді қолданатын әдістер;

- талшықты-оптикалық көпфункционалды датчиктің технологиялары мен конструкциялары;

- оптикалық көпфункционалды датчиктің элементтері мен құрылымдарының математикалық модельдері;

**Жарияланымдар.** Диссертация тақырыбы бойынша 8 ғылыми мақала, оның ішінде нөлдік емес импакт-факторы бар 1 мақала, ҚР БҒМ Білім және ғылым саласындағы бақылау комитеті ұсынған ғылыми басылымдарда 4 мақала және скопус базасына енетін конференцияларда 2 мақала, халықаралық конференцияларда 2 мақала жарияланды.

**Жұмысты апробациялау.** Диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері Қ. И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ (Қазақстан, Алматы) "Радиотехника, электроника және ғарыштық технологиялар" кафедрасының семинарларында баяндалды және талқыланды; "Сәтбаев оқулары-2021" халықаралық конференциясы, Satbayev University, (ҚР, Алматы, 2021); 2<sup>nd</sup> international Joldasbekov symposium, Kazakhstan, «Development of a Mathematical Model of Combined Optical Pressure and Temperature Sensors for the Space Industry», (ҚР, Алматы, 2021) ; 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (Russia, St. Petersburg, 2022) ; EExPolytech-2022: 2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics, (Russia, St. Petersburg, 2022) ; бірінші кварталдағы "Sensor MDPI" (Базел, Швейцария) журналы.

**Диссертацияның құрылымы мен көлемі.** Диссертациялық жұмыс кіріспеден, 4 бөлімнен, қорытындыдан, пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады. Жұмыстың негізгі мәтіні 125 беттен тұрады, 53 сурет, 5 кесте бар, пайдаланылған әдебиеттер тізімі 115 атаудан тұрады.