

Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті

ӘОК 681.7.063 (043.3)

Қолжазба құқығында

**КАДИРБАЕВА ГУЛИМ КУМАРБЕКҚЫЗЫ**

**Механикалық кернеулерді анықтауға арналған оптикалық талшықты датчикті қолданылуын зерттеу**

8D06201– Радиотехника, электроника және телекоммуникация

Философия докторы (PhD)  
дәрежесін алуға арналған диссертация

Ғылыми жетекшілер:  
техника ғылымдарының кандидаты,  
профессор К.С. Чежимбаева  
техника ғылымдарының докторы,  
профессор В.Вуйчик

Қазақстан Республикасы  
Алматы, 2024

## МАЗМҰНЫ

<b>НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР .....</b>	<b>4</b>
<b>АНЫҚТАМАЛАР .....</b>	<b>5</b>
<b>БЕЛГІЛЕУЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР .....</b>	<b>6</b>
<b>КІРІСПЕ .....</b>	<b>7</b>
<b>1 ТАЛШЫҚТЫ ОПТИКА ЖӘНЕ БРЭГГ ТОРЛАРЫНЫҢ ТЕОРИЯЛЫҚ НЕГІЗДЕРІ .....</b>	<b>14</b>
1.1 Оптикалық талшық түрлері мен қасиеттерін сипаттау және жіктеу	14
1.2 Оптоталшықты Брэгг торларының негізгі сипаттамалары.....	19
1.3 Оптоталшықты Брэгг торларының түрлері.....	26
1.4 Талшықты Брэгг торларын жазудың арнайы әдістері.....	27
1.5 Оптоталшықты Брэгг торларын пайдалану аясы мен мүмкіндіктері 1- бөлім бойынша қорытынды .....	33 43
<b>2 ТАЛШЫҚТЫ ОПТИКАЛЫҚ БРЭГГ ДАТЧИКТЕРІ НЕГІЗІНДЕ МЕХАНИКАЛЫҚ КЕРНЕУДІ ӨЛШЕУ ЖҮЙЕЛЕРІН ҚҰРУ ҚАҒИДАЛАРЫ ЖӘНЕ ТЕХНИКАЛЫҚ ЖОЛДАРЫ .....</b>	<b>45</b>
2.1 Механикалық кернеуді өлшеудің қолданыстағы әдістерін талдау	45
2.2 Механикалық кернеуді өлшеуге арналған талшықты-оптикалық датчиктердің жіктелуі және салыстырмалы талдауы .....	52
2.3 Оптоталшықты Брэгг торлары негізінде деформацияны өлшеуге арналған талшықты-оптикалық жүйелерді құрудың қолданыстағы әдістерін талдау .....	57
2.4 Талшықты оптикалық датчиктердің мониторинг саласында қолданудың әдістері .....	64
2- бөлім бойынша қорытынды	66
<b>3 ТАЛШЫҚТЫ БРЭГГ ТОРЫ ДАТЧИГІН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, МЕХАНИКАЛЫҚ КЕРНЕУЛЕРДІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ .....</b>	<b>67</b>
3.1 Қатты құрылымды материалдар күйін ТБТ арқылы бақылау технологиялары .....	67
3.2 Қатты материалдар күйінің деформацияға тәуелділігін есептеу....	71
3.3 Талшықты Брэгг торы датчигін қолдана отырып, бетон арқалықтардағы механикалық кернеулердің деформациясын өлшеу.....	75
3.4 Механикалық кернеулердің әсерін сенсорлық жүйеде бағалау моделі.....	82
3- бөлім бойынша қорытынды .....	86
<b>4 ТАЛШЫҚТЫ БРЭГГ ТОРЫ ДАТЧИКТЕРІНІҢ МЕХАНИКАЛЫҚ КЕРНЕУЛЕРДІ ӨЛШЕУГЕ АРНАЛҒАН МАТЕМАЛЫҚ МОДЕЛІН ҚҰРУ .....</b>	<b>87</b>
4.1 Тәжірибелік жұмыстарға негізделіп алынған ТБТ датчиктерінің нәтижелерін MATLAB бағдарламасында модельдеу .....	87

4.2 Талшықты Брэгг торын қолдана отырып бетон арқалықтарға механикалық әсер ету кезіндегі деформация параметрлерін моделдеу .....	91
4- бөлім бойынша қорытынды .....	100
<b>ҚОРЫТЫНДЫ .....</b>	<b>102</b>
<b>ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ .....</b>	<b>104</b>
<b>ҚОСЫМША А – Қатты материалдарға түсірілген сыртқы жүктемелер әсерінен туандаған деформация спектрінің модельдеу кодтары.....</b>	<b>111</b>
<b>ҚОСЫМША Б – Диссертациялық жұмыстың ғылыми нәтижелерін енгізген туралы акт.....</b>	<b>112</b>

## НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР

Бұл диссертациялық жұмыста келесі стандарттарға сілтемелер берілген:

ҚР МЖМБС 5.04.034 – 2011 «Қазақстан Республикасының Мемлекеттік жалпыға міндетті білім беру стандарты. Жоғары оқу орынан кейінгі білім. Докторантура». Негізгі ережелер /ҚР білім және ғылым министрімен бекітілген. «17» маусым 2011ж. № 261. Астана, 2011.

«Диссертацияларды және авторефераттарды рәсімдеу бойынша нұсқаулық», ҚР БҒМ, Жоғары аттестаттау комитеті. Алматы, 2004.

МЕСТ 7.32–2001.– Ғылыми зерттеу жұмыстары туралы есеп. Рәсімдеудің ережесі мен құрылымы. Астана, 2001.

МЕСТ 7.1–2003. Библиографиялық жазба. Библиографиялық сипаттама. Құрастырудың жалпы талаптары мен заңдылығы.

ҚР СТ 34.007-2002. Ақпараттық технология. Телекоммуникациялық желілер. Негізгі терминдер мен анықтаулар.

## АНЫҚТАМАЛАР

**Оптикалық талшық** – бұл толық ішкі шағылысу арқылы жарық беру үшін қолданылатын оптикалық мөлдір материалдан (шыны, пластик) жасалған жіп.

**Оптикалық талшықтың өткізу жолағы** – оптикалық талшықтың амплитудалық-жиіліктік модуляциялық сипаттамасының мәні, оның максималды мәнінің жартысынан асатын немесе тең болатын жиілік аралығы.

**Деформация (ағылш. deformation)** – сыртқы күштер, температура, фазалық түрленуі және ылғалдылықтың т.б. әсерінен пішіні мен өлшемдерінің өзгеруі барысында дене бөлшектерінің орнын ауыстыруына алып келетін үдеріс.

**Юнг модулі немесе серпімділік модулі** – Материалдағы механикалық кернеудің зат тегіне және сыртқы шарттарға тәуелділігін сипаттайтын шама.

**Талшықты Брэгг торы** – (ағылш. Fiber Bragg Grating-FBG) бұл ультраұлгін (УК) сәулеленуімен талшықтың өзегіне тікелей енетін тіркелген голографиялық тор.

## БЕЛГІЛЕУЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР

ИК – инфрақызыл;  
ТБТ – Талшықты Брэгг торы;  
КМОТ – көп модалы оптикалық талшық;  
МҚТ – микроқұрылымды талшық;  
ОК – оптикалық кабель;  
ОТ – оптикалық талшық;  
ОТБА – оптикалық талшықты байланыс арналары;  
ОТБЖ – оптикалық талшықты байланыс желісі;  
ОТБТ – оптикалық талшықты Брэгг торлары;  
ОТД – оптикалық талшықты датчик;  
СК – сыну көрсеткіші;  
ТБТ – талшықты Брэгг торы;  
УК – ультракүлгін;  
ФМ – фазалық маска;  
ЭМ – электромагнитті өріс;  
ЭЕМ – электронды есептеуіш машина;  
 $\Lambda$  – тор периоды;  
 $\lambda$  – вакуумдағы жарық толқынының ұзындығы;  
 $\lambda_{BG}$  – Брэгг толқынының ұзындығы;  
 $\Delta\lambda$  – спектр ені;  
 $n_{eff}$  – талшықтағы жарық сынуының тиімді көрсеткіші;  
 $n_1$  – қабықшаның сыну көрсеткіші;  
 $n_2$  – өзектің сыну көрсеткіші;  
 $\lambda_{uv}$  – УК сәулелену толқынының ұзындығы;  
 $L$  – талшықты Брэгг торының ұзындығы;  
 $\Delta L$  – талшықты Брэгг торының ұзындығының өзгеруі;  
 $R$  – тордың бейнелеу коэффициенті;  
 $\Delta T$  – температураның өзгеруі;  
 $e_{\pm jr}(x, y)$  – электр өрісінің амплитудасы;  
 $\beta_j$  – тұрақты таратушы;  
 $E(x, y, z, t)$  – өзек бойындағы электрлік өрістің таратылуы;  
 $\varepsilon$  – деформация;  
 $k_i$  – құламалы толқын векторы;  
 $k_f$  – бейнеленетін вектор толқыны;  
 $K$  – тордың толқын векторы;  
 $p_{ij}$  – оптикалық талшықтың фототығыздық коэффициенті;  
 $\alpha_\Lambda$  – кеңейтудің жылу коэффициенті;  
 $\alpha_n$  – термооптика коэффициенті;  
 $k$  – байланыс коэффициенті;  
 $P_G$  – негізгі шыңның қуаты;  
 $P_W$  – ең үлкен жанама жапырақшаның шыңдағы қуаты.

## КІРІСПЕ

Бүгінгі таңда әртүрлі салалардағы заманауи дамудың іргелі зерттеулері жаңа технологияларды дамытуда практикалық қолдануды табады. Бұл технологиялар өз кезегінде әртүрлі заманауи және кешенді өлшемдерде сұранысқа ие. Университет зертханаларында, ғылыми институттарда және олардың сипаттамалары мен жабдықтарын ұсынатын бөлімдерде инновацияларға, жаңа технологияларға және ғылыми зерттеулерді қолдауға баса назар аударылады. Механикалық және температуралық өлшеулерді өлшеудің үнемді балама әдістеріне айнала отырып, сезімталдықты, кедергіден қорғауды және агрессивті ортаға төзімділікті қамтамасыз ететін Брэгг торы – негізінде талшықты-оптикалық датчиктерді қоса алғанда, талшықты-оптикалық дамудың ерекше өнертабысы.

Соңғы онжылдықта өндірістік және әлеуметтік белсенділіктің дамуы байқалды. Нәтижесінде көпірлер, туннельдер, құбырлар мен ғимараттар сияқты түрлі нысандарды бақылау қажеттілігіне ерекше назар аударылды. Мұндағы ерекше параметрлер – механикалық деформация және температура. Осы параметрлерді жедел анықтау және бақылау ықтимал төтенше жағдайлардың алдын алуға мүмкіндік береді.

Жүктеме ұяшықтары, пьезо датчиктері және терморезисторлар сияқты дәстүрлі өлшеу әдістері қазір түрлендіріледі немесе талшықты-оптикалық датчиктермен ауыстырылады. Бұл бірқатар артықшылық береді. Атап айтқанда, Брэгг торына негізделген талшықты-оптикалық датчиктер тек жоғары сезімтал өлшемдерге ғана емес, сонымен қатар спектрлік және уақытша мультиплекстеудің арқасында әртүрлі нүктелердегі объектінің күйін бір уақытта бақылауға мүмкіндік береді.

Осылайша, өлшеу жүйелеріндегі жаңа технологиялардың дамуы ықтимал тәуекелдің алдын алуға және тұрақты талқылауға ықпал ете отырып, инфрақұрылымдық объектілерді бақылаудың тиімділігі мен сенімділігін арттыруға назар аударады. Бұл технологиялық инновациялар объектілердің сенімділігі мен қауіпсіздігін ғана емес, сонымен қатар экономикалық тиімділік пен тұрақты әсерге төзімділікті қамтамасыз ететін заманауи инженерия мен құрылыста шешуші рөл атқарады. Брэгг торларына негізделген талшықты-оптикалық датчиктер объектілердің әртүрлі параметрлерін бақылауды едәуір жақсартуға мүмкіндік береді. Бұл әсіресе көпірлер мен туннельдер сияқты ірі инфрақұрылымдық жүйелер үшін өте маңызды.

Талшықты-оптикалық датчиктердің спектрлік және уақытша мультиплекстелуі объектінің көптеген нүктелеріндегі параметрлерді бір уақытта өлшеуге мүмкіндік береді. Бұл бақылау процесін едәуір жылдамдатады және арзандатады. Аталған датчиктер жоғары сезімталдыққа ие. Бұл объектілердің механикалық қасиеттеріндегі шамалы өзгерістерді немесе бұрын байқалмаған температураны анықтауға мүмкіндік береді.

Датчиктердің талшықты оптика саласындағы одан әрі дамуы технологияларды жетілдіруді және оларды құрылыста ғана емес, сонымен қатар

объектілердің параметрлерін бақылаудың сенімділігі мен дәлдігі талап етілетін басқа салаларда қолдануды кеңейтуді қамтиды. Бұған экономиканың әртүрлі секторларындағы қауіпсіздік пен экономикалық тиімділіктің жалпы деңгейіне ықпал ететін қалалардағы, өнеркәсіптік нысандардағы және басқа мекемелердегі жұмыспен қамтуды бағалау жүйесі кіреді.

Қазақстан Республикасы Өнеркәсіп және құрылыс министрлігі мен «ҚазЖолҒЗИ» АҚ автомобиль жолдары және көпір құрылыстары департаментінің ұсынысына сәйкес, Қазақстанда алдағы жылдан бастап көпірлер мен жол айрықтар және өтпелер цифрландырылатын болады. Жол ғылыми-зерттеу институты еуропалық тәжірибе негізінде көпірлерді пайдалануды басқару жүйесін әзірлеуге кірісті. Қазақстандағы автомобиль және теміржол жолдары арқылы өтетін көпірлер, жол айрықтары мен өткелдер туралы деректер әлі күнге дейін мұрағаттарда қағаз құжаттарда сақталатынын айта кеткен жөн. Ақпаратқа жылдам қол жеткізе алмаудың салдарынан стратегиялық жол объектілерін зерттеу, жөндеу, жаңғырту, реконструкциялау және құрылысын жоспарлау және жүргізу жөніндегі жұмысты қиындатады әрі тиісінше көлік қозғалысының қауіпсіздігіне, адамдардың өмірі мен денсаулығына қауіп төндіреді. Мәселенің оң шешімін табу мәселесімен «ҚазЖолҒЗИ» АҚ сарапшылары айналысады. Мамандар ғылыми зерттеулер мен тәжірибелерге сүйене отырып, Дания, Финляндия, Германия, Норвегия, Оңтүстік Африка, Швеция, Швейцария және Ұлыбританияның технологияларын қарастырады. Зерттеу жұмыстарын жүргізе отырып, институт көпірлерді пайдалануды басқарудың қазақстандық жүйесін әзірлеуге кіріседі деп жоспарлануда. Деректер мемлекеттік, жобалау және құрылыс ұйымдарының қызметкерлеріне жасанды құрылыстардың бірыңғай базасының сайтында қолжетімді болады.

Бұл мәселе бойынша көпірлерді пайдалануды басқару жүйесін құру пайдаланушыларға белгілі бір объект туралы қажетті деректерді тез табуға, сондай-ақ көпірлер, өткелдер мен жол айрықтарын күтіп ұстау бойынша есептер мен бюджетті жоспарлауды автоматтандыруға мүмкіндік береді.

Әлемдік тәжірибе көрсеткендей, уақытылы және тұрақты диагностика, бақылау және талдау ерте ме, кеш пе тозуға немесе апатқа әкелетін ақауларды анықтауға және жоюға мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде көпірлер мен басқа да объектілерді күтіп ұстау шығындарының айтарлықтай төмендеуіне ықпал етеді.

2023 жылғы Президент Қ.К.Тоқаевтың Жолдауында да жол-көлік құрылыс саласының дамуы мен қауіпсіздігі туралы баяндамалар айтылды. Осыған сәйкес, жол көлік құрылыс саласы Қазақстанның құрылыс және даму жүйесінде ерекше орын алады. Жол-құрылыс кешеннің дамуымен, күрделі жағдайларда автомобиль жолдары және көпір құрылыстарының деформацияға ұшырауы аз зерттелген мәселе болып табылады, бұл көбінесе көпірлердің апаттық жағдайына әкеледі. Жоғарыда айтылғандар алдын алу шараларын жедел қолдану мақсатында жол-көпір кернеулі күйіне мониторинг жүргізу қажеттілігін айқындайды. Пайдалану кезіндегі төтенше жағдайлар үшін ең толық және перспективалы техникалық шешім талшықты-оптикалық датчиктерге негізделген оптикалық өлшеу принциптерін пайдалану болып табылады.



Президент Қ.К.Тоқаев 2029 жылға қарай 4 мың шақырымнан астам жолды күрделі жөндеу қажеттігін атап өтіп, қолданыстағы жолдардың қанағаттанарлық сапасын атап өтті. Алайда оларды уақтылы және сапалы қызмет көрсетуде проблемалар бар. Ол сыбайлас жемқорлықтың таралуын және осы салада бәсекелестіктің жоқтығын шұғыл шараларды қажет ететін елеулі кемшіліктер ретінде атап өтті. Мемлекет басшысы өз құқықтарын адал орындайтын компаниялар үшін бақылауды, жаңа нормативтік құжаттарды қабылдауды және заң алдындағы жауапкершілікті күшейтеді. Ол сондай-ақ Қазақстанның Еуразия құрлығындағы басты транзиттік хаб ретінде стратегиялық маңыздылығын айқындап, көлік-логистикалық қызметтер саласында жетекші көшбасшы болуға ұмтылуы керек.

Бүгінгі таңда халықтың көп бөлігі «оптикалық интернет» терминінің мағынасын түсінеді. Ақпаратты беру ортасы ретінде пайдаланылатын оптикалық талшық тұтынушыларға қызмет көрсету үшін қолданылады. Технологияның дамуымен бірге мұндай оптикалық талшықтарды қолдану саны да артып келеді және мұндай шешімдерге талшықты-оптикалық датчиктер кіреді.

Оптикалық талшықтарды сенсорлық конструкцияларда қолдану туралы 1970 жылы хабарланған. Бұл 1960 жылы лазерді ойлап табудың және 1966 жылы төмен әлсірейтін оптикалық талшықтардың дамуының арқасында мүмкін болды [12]. 1990 жылдардың басында температураны, деформацияны, қысымды және басқа параметрлерді өлшей алатын оптикалық датчиктер қолданыла бастады. Өз кезегінде ХХІ ғасырдың басы талшықтың бүкіл ұзындығы бойынша температураны өлшейтін оптикалық датчиктерді кеңінен қолданумен сипатталды. Бұл мұнай-газ компанияларына өз желілерін бақылауға және зақымдануды уақтылы жоюға мүмкіндік берді.

Бүгінгі күні талшықты-оптикалық датчиктер айтарлықтай прогреске қол жеткізді. Нәтижесінде деформация, қысым, температура, қозғалыс, діріл, үдеу, айналу, ылғалдылық деңгейі, ылғалдылық, ток күші және химиялық қасиеттер сияқты әртүрлі параметрлер өлшеу жүйелері пайда болды. Оптикалық талшықтар датчиктердің басқа түріне қарағанда бірқатар артықшылықтар береді. Соның ішінде сезімталдық, электромагниттік әсерге төзімділік, дәлдік өлшемдер, химиялық төзімділік, мультиплекстеу және бекіту мүмкіндігі. Бұл датчиктер қашықтықтан бақылау мен өзгерістерді басқаруда кеңінен қолданылады. Өйткені алыс қашықтықтағы сигналдың аз жоғалуы және әртүрлі химиялық және физикалық параметрлерді анықтау мүмкіндігі байқалады.

Құрылыс секторында талшықты-оптикалық датчиктер ғимараттардың маңызды учаскелерін бақылау және уақтылы жөндеу жұмыстарын жоспарлау үшін пайдаланылды. Сонымен қатар, процестің тиімділігі өсіп келе жатқан маңыздылық мәселесі ретінде қарастырылады және талшықты-оптикалық датчиктер өсіп келе жатқан рөлге ие бола бастайды. Құрылыс технологиясының жетістіктерінің арқасында бұл құрылымдарды бетон мен толтырғыш көлемінің ұлғаюымен көбірек салуға болады. Алайда, бұл даму проблемалардың өсуіне әкелді, өйткені ұзақ уақыт бойы құрылымның күйі туралы ақпаратты іштен алу мүмкін болмады. Деформацияны талшықты-оптикалық өлшеудегі соңғы

әзірлемелердің және оның толық ауқымды далалық қолданбаларға өтуінің арқасында бұл жұмыс деформацияны өлшеу үшін бірнеше шақырымдық оптикалық кабель үшін үлкен бетон конструкцияларының ішіндегі, тіпті кішкентай жарықтарды локализациялауға болатынын көрсетеді. Таратылған деформацияны өлшеу потенциалы бетон құрылымдарымен шектелмейді. Сонымен қатар бөгеттер сияқты жер құрылымдарында, сондай-ақ көшкіндерде де қолданыла алады.

Талшықты-оптикалық датчиктерді пайдалана отырып, деформацияны өлшеу әдістерін әзірлеу және олардың негізінде өлшеу жүйелерін құру бойынша зерттеулер Қазақстанда да, сондай-ақ шетелде де көптеген ғылыми мекемелер мен компанияларда белсенді жүргізілуде. А. Серсейдің АҚШ-тағы және Б. Кул шоудың Ұлыбританиядағы, М. Дигонның Стэнфорд университетінде, Польшадағы В.Войчик пен П.Кисала жұмыстарын атап өткен жөн. Қазақстанда бұл тақырыпты кеңінен зерттеп үлес қосқан ғалымдар Г.Б.Қашағанова, А.О.Касимов, Н.Смайлов, С.К.Оразалиеваны атауға болады.

Брэгг датчиктеріне арналған сериялық өлшеу жүйелерінде толқын ұзындығымен реттелетін элементтерді қолдана отырып, датчиктердің күйі туралы деректерді алудың қазіргі әдістеріне байланысты өнімділіктің төмендігі сияқты елеулі кемшіліктер бар. Бұл кемшіліктер мұндай жүйелерді ағып кетуді жедел бақылау үшін пайдалануға мүмкіндік бермейді. Инфрақұрылым параметрлерін үздіксіз бақылаудың маңыздылығын ескере отырып, 5 кГц-ке дейінгі жиіліктермен өзгертін процестерді бақылау міндеті өзекті бола түсуде. Бұл ең алдымен, ұзақ мерзімді жоғары жүктемелер мен климаттық әсерлерге ұшырайтын көпірлердің апаттық элементтерін бақылау қажет болатын жол құрылысына қатысты.

Талшықты-оптикалық датчиктер кеңінен қолданылады, ал коррозияға төзімділігі, беріктігі және салмағы аз композициялық материалдар жол саласына белсенді түрде енгізілуде. Алайда, мұндай материалдар көптеген зақымдарға ұшырайды: жарықтар, құрылымның бұзылуы, стратификация және т.б., бұл төтенше жағдайлар мен апаттарға әкелуі мүмкін. Бұл зақымдарды уақтылы анықтау қосымша қиындық тудырады.

Осыған байланысты, объектілер мен құрылыстардың деформациясы мен температурасын өлшеудің жылдам әрекет ететін жүйесін құруға мүмкіндік беретін қайта құрылатын элементтерді пайдаланбай, Брэггтың датчиктері мен температурасынан деректерді жоғары жылдамдықпен алу әдісін әзірлеу өзекті және перспективалы ғылыми-техникалық міндет болып табылады.

**Жұмыстың мақсаты** – автомагистральды көпір нысандарындағы жүктеменің көптігіне байланысты туындайтын механикалық деформация параметрлерін өлшеу үшін оптикалық датчик моделін құруды зерттеу.

#### **Зерттеу мәселелері.**

1. Талшықты оптика және Брэгг торының теориялық негіздерінің әдістерін зерттеу.

2. Талшықты оптикалық Брэгг датчиктері негізінде механикалық кернеулерді өлшеу жүйелерін құру қағидаттарын және техникалық жолдарын талдау.

3. Талшықты оптикалық датчиктерді қолдана отырып, механикалық кернеулердің әсерін зерттеу.

4. Талшықты оптикалық Брэгг торын датчиктерін қолдана отырып автомагистральді көпір құрылыстарына түскен механикалық кернеудің математикалық моделін құру.

**Зерттеу нысаны.** Талшықты Брэгг торы

**Зерттеу әдістері.** Қойылған мәселелерді шешу үшін математикалық, компьютерлік және эксперименталды модельдеу әдістері қолданылған.

**Диссертациялық жұмыстың ғылыми жаңалығы:**

1. Ең алғаш механикалық кернеулерді өлшеуге арналған талшықты-оптикалық датчик моделіне негізделген талшықты Брэгг торының 1562-1566 нм толқын ұзындығы диапазонында спектрлік сипаттамасы алғаш рет эксперименталды түрде зерттелді.

2. Қатты материалдарға түскен жүктеме әсерін есептеу үшін Гук заңымен сипатталған деформация параметрлерін Юнг модулі арқылы арнайы математикалық өрнек арқылы бейімдеу ұсынылды.

3. Механикалық әсер ету кезінде деформация параметрлерін өлшеу үшін талшықты Брэгг сенсорының әмбебап моделі жасалды және салыстырылды.

**Қорғауға шығарылған негізгі ережелер:**

– Автомагистральды көпір құрылыстарындағы механикалық кернеулерді анықтау үшін талшықты Брэгг торларының (1662-1666 нм толқын ұзындығы) қолданылуы қарастырылды.

– Брэгг торларына негізделген оптикалық датчиктердің көмегімен деформация параметрлерін нақты уақыт режимінде жоғары дәлдікпен анықтау әдістемесі жасалды.

– ТБТ негізіндегі датчиктердің жұмысы Autodesk және Matlab Simulink бағдарламаларында модельденді. Бұл модельдер нақты инженерлік есептерді шешуге бағытталған.

– ТБТ технологиясын көпір құрылыстарынан басқа инфрақұрылымның басқа нысандарына бейімдеу және жетілдіру бойынша қосымша зерттеулер жүргізудің маңыздылығы көрсетілді.

**Ғылыми нәтижелерді алуда автордың жеке үлесі.** Диссертацияда көрсетілген барлық түпнұсқа нәтижелерді автор зертханалық тәжірибелерге қатысуымен алынды.

**Жұмыстың апробациясы.** Диссертацияның зерттеу әдістері мен нәтижелері төменде көрсетілген ғылыми конференцияларда баяндалды:

1. Талшықты Брэгг торлары және оларды жазу әдістері. Кадирбаева Г.К., Чежимбаева К.С., студенттер мен жас ғалымдардың «ФАРАБИ ӘЛЕМІ» Халықаралық ғылыми конференциясы, Алматы, Қазақстан, 6-8 сәуір 2021 жыл.

2. Талшықты Брэгг торларының пайда болу механизмдерін зерттеу. Кадирбаева Г.К., Чежимбаева К.С., VIII Халықаралық ғылыми-практикалық конференция

«Қазіргі әлемдегі ғылым және білім: ХХІ ғасырдың сын-қатерлері» техникалық ғылымдар. Астана, Қазақстан, 16-22 сәуір 2021 жыл.

3. Сигналды Брэгг талшықтары негізінде жасалған фазалық интерферометриялық датчикдан бөліп алудың математикалық әдісін зерттеу. Кадирбаева Г.К., Чежимбаева К.С., Қазақстан Республикасы Тәуелсіздігінің 30 жылдығына арналған «Ғылым, Білім және өндіріс интеграциясы - Ұлт жоспарын іске асырудың негізі» халықаралық ғылыми - практикалық online конференциясы (№13 Сағынов оқулары). Қарағанды, Қазақстан, 16-22 сәуір 2021 жыл.

4. Талшықты Брэгг торларының пайда болу қағидалары және оны жазудың арнайы әдістері. Кадирбаева Г.К., Чежимбаева К.С., Халықаралық ғылыми-техникалық конференция, Алматы, 20-21 қазан, 2022 ж.

**Жұмыстың тәжірибелік маңыздылығы.** Диссертациялық жұмыстың ғылыми нәтижелері Люблин технологиялық университетінің (Люблин қ, Польша) «Оптоэлектроника» зертханасында, Брэгг торларының жазылу әдістері, спектрлік сипаттамалары, арнайы созылу және иілу кезіндегі деформацияны өлшеу датчиктерінің сипаттамаларының әсерін зерттеу үшін «Телеинформатика и электроника» кафедрасында оқу материалдары ретінде енгізілді.

**Мақалалар.** Орындалған зерттеулер мен әзірлемелердің негізгі нәтижелері бойынша бірнеше ғылыми жұмыстар дайындалды және жарияланды. Оның ішінде 2 жұмыс Scopus халықаралық базасына кіретін басылымдарда, 4 жұмыс ҚР БҒМ Ғылым және жоғарғы білім саласындағы бақылау комитеті ұсынған басылымдарда жарияланды.

**Диссертацияның құрылымы мен көлемі.** Диссертациялық жұмыс кіріспеден, негізгі мазмұнның төрт тарауынан, қорытынды мен қосымшалардан, 4 атаудағы тізімнен тұрады және 112 беттен, 58 сурет пен 16 кестеден тұрады.

Кіріспе бөлімінде диссертациялық жұмыстың жалпы сипаттамалары: жұмыстың өзектілігі, мақсаты, зерттеу мәселелері, зерттеу нысаны, ғылыми жағалығы, тәжірибелік маңыздылығы, зерттеу әдістері, жұмыстың апробациясы мен мақалалар туралы мәліметтер келтірілген. Диссертациялық жұмыстың қысқаша мазмұны мен құрылымы сипатталған.

Бірінші тарауда жалпы оптикалық талшық туралы ақпараттық шолулар берілген. Оптикалық талшық түрлері мен жіктелуі кеңінен қарастырылды, сонымен қатар артықшылықтары мен кемшіліктері талданды. Оптикалық талшықтың негізгі жұмыс қағидалары көрсетіліп, оптикалық талшықтарды анықтайтын негізгі стандарттар анықталды. Тарауда әртүрлі құрылғыларда оптикалық талшықтың көптеген салалардағы маңызды іс-әрекеттері қарастырылды. Сонымен бірге талшықты оптикалық Брэгг торларының негізгі теориялық мәліметтері көрсетілді. Талшықты Брэгг торларының типтері мен торды жазудың арнайы әдістері туралы, сонымен қатар Брэгг торларының деформациясы және температуралық сезімталдығы туралы мәліметтер көрсетілді.

Екінші тарауда деформация өлшеудің қолданыстағы әдістеріне шолу және жіктеу жүргізіледі және салыстырмалы талдау жасалады. Пьезоэлектрлік эффект

пен талшықты-оптикалық датчиктерге негізделген дәстүрлі датчиктер қарастырылды. Шағылысқан сәулеленудің толқын ұзындығының деформацияға және температураға тәуелділігін анықтайтын Брэгг датчиктерінің берілу сипаттамасына зерттеу жүргізілген. Брэгг толқындық функциялары әдісі негізінде шағылысқан сәулелену спектрінің механикалық деформацияға немесе температураға тәуелділігі зерттеледі. Брэгг торларын жасау әдістері қарастырылуда. Брэгг деформациясы мен температура датчиктерінен ақпарат алу әдістеріне салыстырмалы талдау жасалды.

Үшінші тарауда талшықты Брэгг торын қолдана отырып, механикалық кернеудің әсері қарастырылды. Бірінші қатты материалдар құрылымының күйі қарастырылды. Оның ішінде бетон арқалықтардың сипаттамалары көрсетілді. Сонымен қатар арнайы шектеулерді еңсеру үшін нақты уақыт режимінде салыстырмалы түрде жоғары дәлдіктегі, ұзақ мерзімді және үздіксіз анықтауды қамтамасыз ете алатын және бір уақытта туындаған өзгерістерді тудырмайтын құрылымдардың күйін бақылау технологиясы (ҚКБТ) әдісі құрылды. Материалдар күйінің деформацияға тәуелділігін есептеу жүргізілді. Сонымен қатар есептеу нәтижелеріне сәйкес арнайы графиктер тұрғызылып есептелді.

Төртінші тарауда Талшықты Брэгг торлы датчиктер екі нүктелі және орталық нүкте бойынша түсірілген механикалық кернеудің тәжірибелік әдісіне сүйене отырып, механикалық әсер ету кезінде деформация параметрлерін өлшей алатын әмбебап датчик моделі ұсынылды. Бұл графикті математикалық модельдер Authodesk және Matlab Simulink бағдарламаларында құрастырылды. Қатты материалға арналған Юнг Модулінің формуласы және бетон арқалыққа арналған Юнг Модулінің өлшемі зерттелді. Тәжірибелік нәтижелер толқын ұзындығынан ТБТ-ның шағылысуы түсірілген механикалық жүктемеге жақсы сызықтық тәуелділікке ие екенін көрсетті. Optisystem бағдарламасында кез келген оптикалық компоненттермен әрекеттесу алдында жиілік немесе толқын ұзындығының таралуын көрсететін Гаусс импульстерінің бастапқы спектрлері зерттелді.

Диссертацияның қорытындысында ұсынылған және талқыланған еңбектер мен зерттеулердің нәтижелері бойынша жұмыстың негізгі тұжырымдары қарастырылған.

Диссертацияның қосымшасында зерттеулер бойынша алынған қатты материалдарға түсірілген сыртқы жүктемелер әсерінен туандаған деформация спектрінің модельдеу кодтары көрсетілген.

# 1 ТАЛШЫҚТЫ ОПТИКА ЖӘНЕ БРЭГГ ТОРЛАРЫНЫҢ ТЕОРИЯЛЫҚ НЕГІЗДЕРІ

## 1.1 Оптикалық талшық түрлері мен қасиеттерін сипаттау және жіктеу

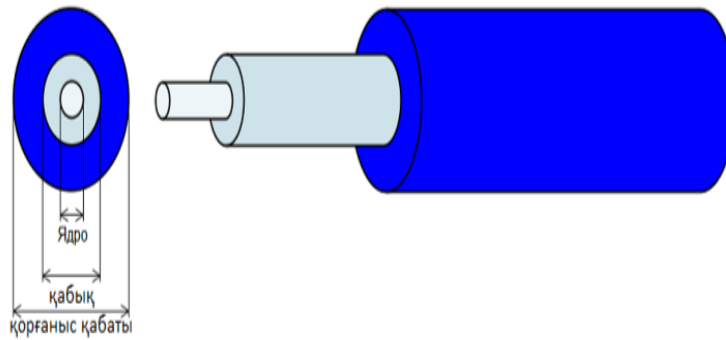
Оптикалық талшық – бұл оптикалық диапазонның электромагниттік сәулеленуі (әдетте ИҚ-ға жақын және көрінетін жарық) берілетін дөңгелек көлденең қимасы бар толқын өткізгіш. Оптикалық талшық екі негізгі бөліктен тұрады: өзек және оптикалық қабық. Бұл құрылымның диаметрі адам шашының қалыңдығымен салыстырылады. Қорғаныс акрил жабыны талшықтың үстіне қолданылады. Әрі қарай қорғау үшін әртүрлі қатайтатын және қорғайтын элементтер қолданылады. Бір немесе бірнеше оптикалық талшықтардан және жалпы қабықпен қапталған әртүрлі қорғаныс элементтерінен тұратын дизайн талшықты-оптикалық кабель деп аталады.

Оптикалық талшықтың тарихы 1952 жылы Ұлыбританиядан келген ғалым Джон Макартур жарықтың шыны жіп арқылы берілуін алғаш рет көрсеткен кезде басталған. Алайда оның жұмысы ғылыми қоғамдастықтың назарын аудармады және оптикалық талшықтар кеңінен қолданылмады.

Оптикалық талшықтардың тарихи жалғасуы одан әрі 1960 жылдардан бастау алды. 1969 жылы Nippon Sheet Glass Co. және Nippon Electric Co. телекоммуникациялық қосымшалар үшін градиент индексі бар алғашқы талшықтар жасалды. Бірақ бұл талшықтар негізінен әйнектің химиялық қоспаларынан туындаған 100 дБ/км демпферге ие болды. Кейінгі жылдары айтарлықтай прогреске қолжеткізілді және 1976 жылы Жапонияда, АҚШ-та және Ұлыбританияда  $<1$  дБ/км өткізу қабілеті бар жетілдірілген талшықтар қолжетімді болды. Содан кейін көрінетін жарықтың орнына инфрақызыл сәуле қолданылды. Бүгінгі таңда ыдырау  $<0,2$  дБ / км құрайды. талшық жасау үшін ең қолайлы әйнек-балқытылған кремний диоксиді ( $\text{SiO}_2$ ) [1].

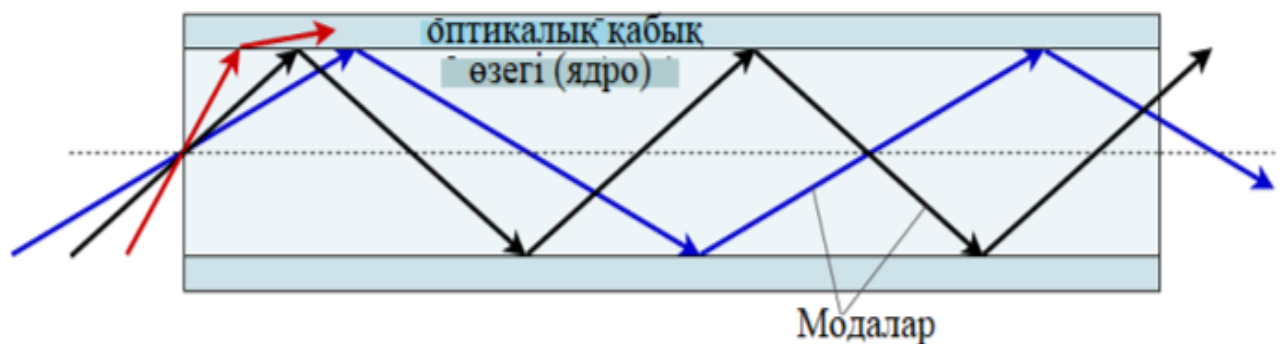
1970 жылы Bell Laboratories (Қазіргі Alcatel-Lucent корпорациясы) ғалымдары Макартур қолданған шыныдан әлдеқайда мөлдір кварц әйнегін пайдаланып алғашқы практикалық оптикалық талшықты жасады. 1976 жылы бұл талшықтар деректерді 10 км-ден астам қашықтыққа беру үшін сәтті қолданылды.

1978 жылы Кен О. Хилл германиймен легирленген талшықтарға фотосезімталдық әсерін тапты. Ультракүлгін сәулелің әсері сыну көрсеткішінің тұрақты өзгеруіне әкеледі. Келесі қадам бұл әсерді қолдану және Брэгг торларын талшықтарға салу, содан кейін олар толқын ұзындығының өте кішкентай шыңдарын көрсете алады. Ол шыңдардың толқын ұзындығы температураға байланысты немесе мұндай талшықтар созылған кезде өзгереді. Брэгг торы бар алғашқы коммерциялық талшықты датчиктер 1995 жылы 3М және Photonetics сатылымында пайда болды. 2000 жылдан астап 20-дан астам компания талшықты Брэгг торларын ұсынады [2].



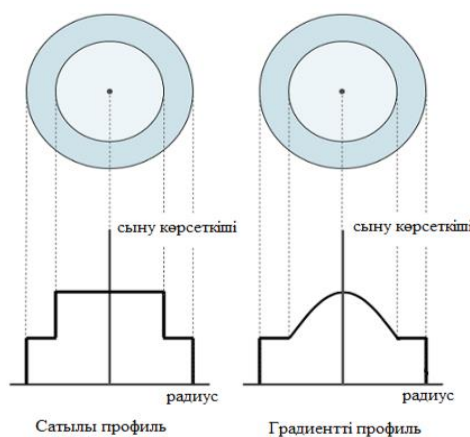
Сурет 1.1– Оптикалық талшықтың ішкі құрылымы [3]

Ақпараттық сигнал оптикалық талшық арқылы модуляцияланған жарық сәулеленуі түрінде беріледі. Толық ішкі шағылысу құбылысының арқасында талшыққа түскен жарық ол арқылы үлкен қашықтыққа таралады. Талшықтың өзегі мен оптикалық қабығы сыну көрсеткіштері сәл өзгеше материалдардан жасалады (өзектің сыну көрсеткіші үлкен). Сондықтан кейбір критикалық мәннен кіші бұрыштарда өзекке түскен жарық толқындары қабықтан бірнеше рет шағылысады. Егер толқын өткізгіште таралу шарттары орындалса (Жарық тек бөлшектер ағыны ғана емес, сонымен қатар электромагниттік толқын), онда режимдер деп аталатын мұндай жарық толқындары айтарлықтай қашықтыққа таралады.



Сурет 1.2 – Сыну көрсеткіштері [3]

Өзек пен қабықтың сыну көрсеткіштері арасындағы айырмашылықтан басқа өзектің сыну көрсеткішінің профилі, яғни сыну көрсеткішінің шамасының талшықтың көлденең қимасының радиусына тәуелділігі маңызды рөл атқарады. Егер сыну көрсеткіші өзектің барлық көлденең қималарында бірдей болып қалса, мұндай профиль сатылы деп аталады. Ал егер орталық осьтен қабыққа дейін біртіндеп азаятын болса, градиентті болады. Неғұрлым күрделі профильдер бар. Сыну көрсеткішінің профилі ақпарат беру ортасы ретінде оптикалық талшықтың сипаттамаларына үлкен әсер етеді [3].



Сурет 1.3 – Сыну көрсеткіштерінің профильдері [3]

Оптикалық талшықтың жұмыс қағидалары:

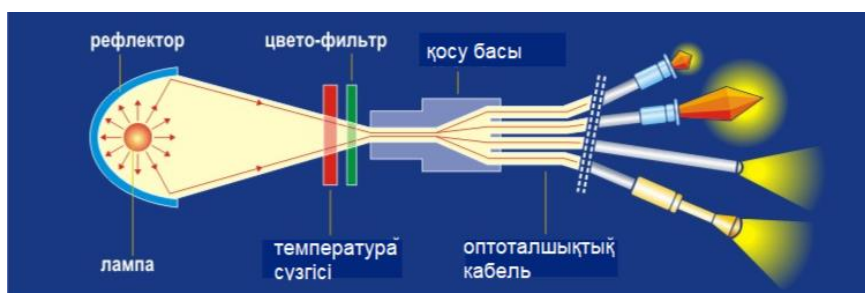
1. Жарық көзі. Көзден (мысалы, жарықдиодты, лазерлік диодты немесе басқа көзден) Жарық оптикалық талшыққа «оптикалық қосқыш»деп аталатын құрылғы арқылы енгізіледі.

2. Жарық беру. Жарық талшықтың ішкі қабырғаларынан бірнеше рет шағылысып, түзу сызық бойымен талшықтың ішіне таралады. Талшықтың арнайы дизайны бар. Ол жарықтың бірнеше рет шағылысуына мүмкіндік береді. Бұл алыс қашықтыққа берілуді қамтамасыз етеді.

3. Талшық. Оптикалық талшық екі негізгі компоненттен тұрады: өзек және қабық. Өзек қабыққа қарағанда сыну көрсеткіші төмен. Бұл өзек пен қабық арасындағы шекара арқылы өтетін жарық сынатынын (иілетінін) және өзек бойымен өз жолын жалғастыратынын білдіреді.

4. Жарық қабылдағыш. Талшықтың екінші жағында жарық оптикалық қосқышқа түседі. Ол жарықты фотодетектор сияқты қабылдағышқа апарды. Фотодетектор жарықты электрлік сигналға айналдырады, содан кейін оны өңдеуге және пайдалануға болады.

5. Сигналды күшейту. Тарату кезінде шашырау мен жұтылу нәтижесінде пайда болатын жарық қуатының жоғалуын өтеу үшін оптикалық сигналдарды оптикалық күшейткіштерді қолдану арқылы күшейтуге болады. Бұл күшейткіштерді талшықтың өзіне біріктіруге немесе оның жанында орналастыруға болады.



Сурет 1.4 – Оптикалық талшықтың жұмыс қағидаларының сипатталуы [4]



Әлсіреу. Бұл – талшықты-оптикалық беріліс кезінде оптикалық сигнал қуатының жоғалуы. Әлсіреу километрге (дБ/км) децибелмен өлшенеді.

Өзек диаметрі. Оның өткізу қабілеттілігіне әсер етеді. Диаметрі неғұрлым үлкен болса, соғұрлым көп жарық берілуі мүмкін.

Толқын ұзындығы. Талшық жарықты әртүрлі толқын ұзындығында жібере алады. Қысқа толқын ұзындығы (мысалы, 1310 нм және 1550 нм) әдетте деректерді беру үшін, ал ұзын толқын ұзындығы (мысалы, 1490 нм және 1625 нм) телекоммуникация үшін қолданылады.

Сандық апертура – (NA). NA-оның жарық беру қабілетін анықтайтын оптикалық талшықтың сипаттамасы. NA неғұрлым жоғары болса, талшық арқылы соғұрлым көп жарық өтуі мүмкін.

Дисперсия. Бұл – жарықтың әртүрлі толқын ұзындығы үшін әртүрлі таралу жылдамдығына байланысты талшықты тарату кезінде оптикалық сигналдың таралуы. Дисперсияның бірнеше түрі бар: хроматикалық дисперсия, толқындық дисперсия және модальды дисперсия.

Қосылымдағы шығындар. Олар талшықтар арасындағы идеалды емес байланысқа байланысты пайда болады. Оларды жоғары сапалы қосқыштарды пайдалану және дұрыс қосылу процедурасы арқылы азайтуға болады.

Механикалық беріктік. Орнату және пайдалану үшін маңызды қасиет.

Талшық созылу, иілу және діріл сияқты механикалық жүктемелерге төтеп бере алатындай берік болуы керек.

Температура диапазоны. Талшық әртүрлі жағдайларда қолданылуы үшін кең температура диапазонында жұмыс істеуі керек.

Радиацияға төзімділік. Ядролық және ғарыш өнеркәсібінде радиацияға ұшырауы мүмкін маңызды.

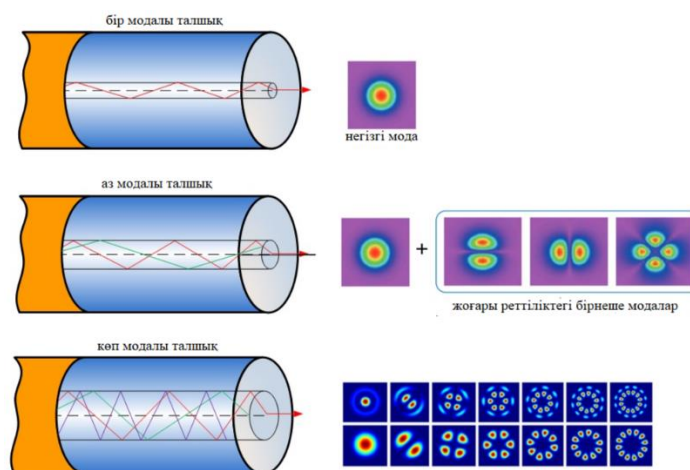
Оптикалық талшықтың түрлеріне келетін болсақ, олардың бірнеше түрлері бар.

Оптикалық талшықтардың қасиеттері мен қолданылуымен анықталатын бірнеше түрі бар:

Бір модальды талшықтар (SMF). Бұл оптикалық талшықтардың ең жұқа түрі және жарық толқынының тек бір режимін (түрін) беруге мүмкіндік береді. Сондай-ақ жоғары өткізу қабілеттілігін және сигналдың минималды сөнуін қамтамасыз етеді. Олар алыс магистральдық желілер үшін қолданылады.

Сатылы профильді мультимодты талшықтар (MMF-ST). Жарық толқынының бірнеше режимін өткізіңіз және SMF-ге қарағанда үлкен диаметрлі өзегі бар. Олар өткізу қабілеттілігін төмендетеді, бірақ жасау және орнату оңай, сонымен қатар пайдалану арзанырақ. Кампус желілері немесе корпоративтік желілер сияқты жергілікті желілерде қолданылады.

Градиенттік профилі бар мультимодты талшықтар (MMF-GR). Жарық режимдерін тиімдірек басқаруға мүмкіндік беретін сыну көрсеткішінің градиент профилі бар. Олар MMF-ST-ге қарағанда жоғары өткізу қабілеттілігіне ие және орта және алыс желілерде қолданылады.



Сурет 1.5 – Оптикалық талшықтың түрлері

Нөлдік емес дисперсиялық талшықтар (NZ-DSF). Бұл талшықтар жарықтың дисперсиясын (сигналдың бұлыңғырлығы) азайту үшін арнайы материалдар мен конструкцияларды пайдаланады. Сонымен қатар сигналдың жоғалуын азайту арқылы өткізу қабілеттілігін арттыруға мүмкіндік береді. Алыс магистральдарда қолданылады.

Нөлдік емес дисперсиясы бар талшықтар (Z-DSF). Талшықтың бұл түрі айнымалы диаметрлі өзекке ие, бұл дисперсияны азайтуға көмектеседі. Олар жоғары өткізу қабілеттілігі қажет желілерде қолданылады.

Иілуге төзімді талшықтар (Bend-insensitive Fiber, BIF). Автокөлік немесе медициналық құрылғылар сияқты көптеген иілуді қажет ететін қосымшалар үшін арнайы жасалған. Олар сигналдың жоғары сенімділігі мен тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

Арналарды спектрлік тығыздауға арналған талшықтар (Wavelength Division Multiplexing, WDM). Бұл талшықтар әр түрлі толқын ұзындығы бар бірнеше сигналдарды бір талшыққа жіберуге мүмкіндік береді. Олар желілерде өткізу қабілеттілігін арттыру үшін қолданылады.

Қос қапталған талшық (DCF). Сыртқы әсерлерден қосымша қорғауды қамтамасыз ететін және механикалық беріктігін жақсартатын қабықтың екі қабатымен жабылған. Қиын жағдайларда орнату үшін қолданылады.

Пластикалық оптикалық талшық (POF). Бұл талшық пластиктен жасалған, оны жеңіл, икемді және арзан етеді. Дегенмен, POF өткізу қабілеттілігі дәстүрлі талшықтарға қарағанда төмен және оларда сигналдың жоғалуы жоғары. Олар икемді және жеңіл кабельдер қажет болған жағдайда қолданылады. Мысалы, медицинада немесе Аэронавтикада.

Атмосфералық байланыс желілеріне арналған талшық (Aerial Fiber). Бұл – көпірлер немесе электр желілері сияқты әуе байланыс желілерінде қолдануға арналған талшықтың ерекше түрі. Олар ауа райына және басқа сыртқы әсерлерге төзімділікті арттырады.

Төмендегі кестеде талшықтардың бірнеше түрлерінің қысқаша сипаттамасы және олардың қолданылуы келтірілген. Оларға кіріспес бұрын бірнеше түсініктеме берген жөн. Бір режимді талшықта жоқ режимаралық дисперсия оптикалық импульстің кеңеюіне әсер ететін жалғыз фактор емес. Бір режимді талшықта хроматикалық дисперсия сияқты басқа механизмдер алдыңғы қатарға шығады, өйткені ешқандай сәулелену көзі (лазерді қосқанда) қатаң монохроматикалық жарық шығармайды. Хроматикалық дисперсия коэффициенті нөлге тең болатын толқын ұзындығы бар. Бұл толқын ұзындығында жұмыс істеген жөн, бірақ бұл әрдайым мүмкін емес [3].

Кесте 1.1- Оптикалық талшықтардың жіктелу түрлері

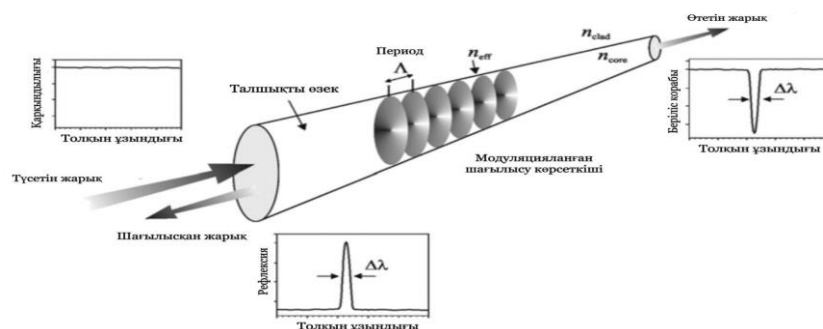
Талшық түрі	Сипаттамасы	Қолданылуы
G.652. Дисперсиясы бейтарап бір модалы талшық	Толқын ұзындығы 1300 нм нөлдік дисперсия нүктесі бар бір модалы талшықтың ең көп таралған түрі. 4 кіші класс бар (A, B, C және D).	Стандартты қолдану салалары.
G.653. Нөлдік ығыстыру дисперсиясы бар бір модалы талшық	Нөлдік дисперсия нүктесі 1550 нм толқын ұзындығына ауысады.	1550 нм толқын ұзындығында беріледі.
G.654. Кесілген толқын ұзындығымен ығыстырылған бір модалы талшық	Кесу ұзындығы (талшық бір модалы тарататын минималды толқын ұзындығы) шамамен 1550 нм толқын ұзындығына ауысады.	Өте үлкен қашықтыққа 1550 нм толқын ұзындығын беру. Магистральдық суасты кабельдері.
G.655. Нөлдік емес дисперсиямен ығысқан бір модалы талшық	Бұл талшықтың 1530-1565 нм диапазонындағы шағын, бірақ нөлдік емес дисперсия мәні бар	Арнаның спектрлік тығыздағышы бар тарату желілері (DWDM).
G.656. Кең жолақты тарату үшін нөлдік емес ығыстыру дисперсиясы бар бір модалы талшық	1460-1625 нм толқын ұзындығы диапазонында нөлдік емес дисперсия.	Арнаның спектрлік тығыздағышы бар тарату желілері (CWDM/DWDM).
G.657. Макробүгудің жоғалуына сезімтал емес бір модалы талшық	Минималды иілу радиусы қысқартылған талшық	Шектеулі кеңістіктерге төсеу үшін.

## 1.2 Оптоталшықты Брэгг торларының негізгі сипаттамалары

Талшықты оптиканың ашылуы телекоммуникация саласында төңкеріс жасап, айтарлықтай қашықтыққа жоғары сапалы, сыйымдылығы жоғары телефон желілерін құруға мүмкіндік берді. Соңғы 30 жыл ішінде оптикалық

талшықтың жетістіктері оптикалық талшықтар мен онымен байланысты компоненттерді телекоммуникацияның синониміне айналдыру арқылы талшықты-оптикалық технологияны айтарлықтай жақсартты және өзгертті. Телекоммуникацияда қолданудан басқа, оптикалық талшықтар талшықты датчиктердің қарқынды дамып келе жатқан аймағында қолданылады. Оптикалық талшық өндірісіндегі жетістіктерге және жалпы саладағы прогреске қарамастан, айналар, толқын ұзындығы сүзгілері және жартылай рефлекторлар сияқты негізгі оптикалық компоненттерді талшықты оптикамен біріктіру әлі де қиын міндет болып табылады. Алайда соңғы уақытта мұның бәрі ультракүлгін сәулені оптикалық жұту арқылы бір режимді оптикалық талшықтың өзегінің сыну көрсеткішін өзгерту мүмкіндігіне байланысты өзгерді. Оптикалық талшықтардың фотосезімталдығы талшықтың өзегінде тікелей талшықты Брэгг торлары (ТБТ) деп аталатын фазалық құрылымдарды құруға мүмкіндік береді. Фотосезімталдық деп талшық өзегінің сыну көрсеткішінің өзек материалына байланысты тән толқын ұзындығы мен қарқындылығының сәулесі әсер еткендегі тұрақты өзгеруін айтады. Талшықты Брэгг торы жоғары тиімділікпен және аз шығынмен шағылыстыру және сүзу сияқты көптеген негізгі функцияларды орындай алады. Бұл әмбебаптық бірқатар маңызды жаңалықтарды ынталандырды [6-7].

Стандартты Брэгг талшықты торы үшін сыну көрсеткішінің модуляция жиілігі толқын өткізгіште таралатын жарықтың толқын ұзындығының жартысына сәйкес келеді, бұл тор жазықтықтары мен түскен жарық арасындағы фазалық сәйкестіктің арқасында когерентті кері шағылысуға мүмкіндік береді. 0,1 нм-ден ондаған нанометрге дейін реттелетін тордың шағылысу қабілеті шамамен 100%-ға жетуі мүмкін. Бұл қасиеттер Брэгг торларын телекоммуникацияда қолдануға өте ыңғайлы етеді, онда олар жарықты шағылыстыруға, сүзуге немесе таратуға қызмет етеді [5].



Сурет 1.6 – Оптикалық талшықтың өзегінде жазылған Брэгг торының схемалық бейнесі

Сыну көрсеткішінің өзгеру жиілігі  $\Lambda$  деп белгіленеді. Талшықтың өзегіне кең жолақты жарық енгізіледі. Брэгг шарты орындалған кезде жарықтың бір бөлігі шағылысады, ал қалған бөлігі одан әрі өтеді. Шағылысқан және өтетін жарықтың

өткізу қабілеті Брэгг торының сипаттамаларына, оның ұзындығы мен модуляция тереңдігіне байланысты.

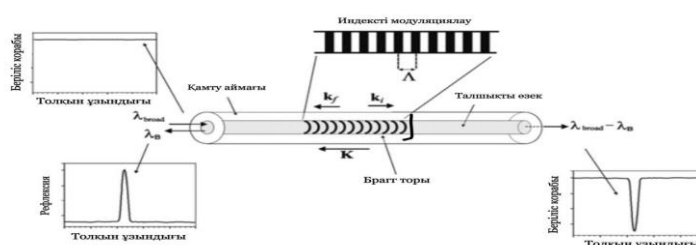
Сонымен қатар, торлардың импульстерді тұрақты емес аралықтармен қысу немесе кеңейту мүмкіндігі жоғары жылдамдықтағы алыс байланыс жүйелері үшін өте маңызды. Реттелетін торға негізделген дисперсиялық компенсаторларды оптикалық қуаттағы өзгерістер нәтижесінде туындайтын сигналдың сызықты емес бұрмалануын азайту үшін пайдалануға болады. Торға негізделген беріліс бойынша көптеген тәжірибелер туралы [8] жазылған, оның ішінде 400 км дисперсиялық ығысқан талшыққа 10 Гбит/с жылтыр талшықты Брэгг торлары арқылы бекітілген дисперсия компенсациясымен [9] қолдана отырып қарастырылған. Қуаттың төмендеуі әдетте 1 дБ-ден аз [10, 11]. 40 Гбит/с және одан жоғары бит жылдамдықтары бар оптикалық жүйелерде жүйе өнімділігін сақтау үшін реттелетін дисперсиялық компенсация қажет болады. Реттелетін чирпирленген құрылғылар Брэггтың сызықты емес чирпирленген торларын біркелкі реттеу [12], біркелкі емес температура градиентін жасау [13] немесе тордың ұзындығы бойынша Деформация градиенттерін өзгерту [14-16] сияқты әртүрлі әдістерді қолдану арқылы сәтті көрсетілді. Брэгг торларын қолданатын оптикалық жүйелер 40 Гбит/с жылдамдықпен 100 км-ден астам қашықтыққа деректерді беру мүмкіндігін көрсетті [8, б.18]. Болашақта деректер жылдамдығының 160 Гбит/с дейін жоғарылауымен дәл дисперсиялық карталарды пайдалану маңызды болады. Өйткені бұл жағдайда дисперсияны өтеудің электронды әдістері мүмкін болмайды және толық оптикалық шешім қажет. Қазіргі уақытта реттелетін чирпирленген торларды қолдана отырып, 100 км-ге дейінгі деректерді беру демонстрациялары бар [17]. Брэгг торлары сонымен қатар толқын ұзындығының тығыз бөлінуімен мультиплекстеу талаптарын қанағаттандырады. Бұл әртүрлі деректер арналары арасында жоғары оқшаулау коэффициенті бар тар жолақты және таңдамалы толқын ұзындығы компоненттерін қолдануды талап етеді. Аталға арзан талшықты-оптикалық сүзгілердің кең ауқымы бар, соның ішінде күшейткіш жүйелердегі ASE шуды басу, талшықты күшейткіштердегі сорғыларды қайта пайдалану және солитон импульстарын басқару. Тор жазықтықтары бастапқы шынының материалы сияқты температура мен деформацияның бұзылуына ұшырайды, фазалық сәйкестік жағдайын өзгертеді және толқын ұзындығына тәуелді шағылыстыруға әкеледі. Әдетте, толқын ұзындығы 1,5 мкм-де толқын ұзындығы бойынша деформацияға сезімталдық  $\sim 1$  пм/мкм құрайды, температура өзгерген кезде толқын ұзындығы шамамен 10-15 пм/°C ауысады (деформация ұзындық арқылы анықталады). Сондықтан Брэгг шағылысу пайда болатын толқын ұзындығын қадағалау арқылы сыртқы кедергінің шамасын алуға болады. Бұл функция талшықты-оптикалық датчиктердің идеалды мақсатына жақын келеді: абсолютті оқу механизмін қамтамасыз ететін ішкі кірістірілген талшықты ядро құрылымына ие болу. Балама тәсіл-торды оптикалық талшықтың ұзындығын анықтайтын шағылыстырғыш маркер ретінде пайдалану. Уақыт аймағындағы оптикалық өлшеулер ұзындықты немесе деформацияны дәл бақылауға мүмкіндік береді.

Тор негізгі материалдың механикалық беріктігін айтарлықтай жоғалтпай, талшықты өндіру процесінде талшықтың өзегіне басып шығарылуы мүмкін. Бұл салыстырмалы қарапайымдылықпен және төмен бағамен құрылымдық бақылау үшін квази-үлестірілген сенсорлық желіні жүзеге асыру үшін оптикалық талшықта алдын ала белгіленген орындарда көптеген Брэгг торларын орналастыруға мүмкіндік береді. Кәдімгі талшықты-оптикалық датчиктерге қолданылатын негізгі аппаратурада датчиктердің екі түрін біріктіруге мүмкіндік беретін торлы датчиктер де болуы мүмкін екенін ескеру маңызды. Брэгг торлары аэроғарыштық қолданбаларда  $n$  рұқсаты бар динамикалық кернеуді өлшейтін датчиктер үшін және медициналық қолданбаларға арналған температура датчиктері үшін өте қолайлы. Олар сондай-ақ жоғары қысымды, ұңғымаларды бұрғылау сияқты қатал ортада жақсы жұмыс істейді, негізінен түпнұсқа шынының қасиеттеріне байланысты.

Талшықты-оптикалық фотосезімталдық шынымен де талшықты-оптикалық құрылғылар саласында жаңа дәуір ашты [18], телекоммуникация мен сенсорлық қосымшаларда өз орнын тапқан Брэгг торларының жаңа инновациялық құрылымдары бар. Жолақты сүзгілерге арналған Фабри-Перо Брэгг талшықты торлары, дисперсияны өтеуге және ультра қысқа импульстарда импульстарды қалыптастыруға арналған чирпиленген торлар, сондай-ақ мод түрлендіргіш торлары сияқты құрылғылар кең таралған қолданбаларға айналууда. Талшықты-оптикалық датчиктер-бұл Брэгг торлары ашылған алғашқы күндерден бастап қолданылған аймақ, ал бүгінде талшықты-оптикалық датчиктер жүйелерінің көпшілігі Брэгг торларының технологиясын қолданады.

Алғашқы дамудың бірнеше жылында талшықты Брэгг торлары зертханалық қызығушылық пен қызығушылықтан оптикалық байланыс пен сенсорлық жүйелердегі қолданбаларға көшті. Бірнеше жылдан кейін Брэгг талшықты торлары жоқ талшықты-оптикалық жүйелер туралы ойлау, сондай-ақ таныс зертханалық айнасы жоқ көлемді оптика туралы ойлау қиын болады.

Талшықты Брэгг торы бір режимді оптикалық талшықтың өзегіндегі сыну көрсеткішінің мерзімді модуляциясынан тұрады. Фазалық фронттары талшықтың бойлық осіне перпендикуляр және тор жазықтықтары тұрақты периоды бар біркелкі талшықты торлардың бұл түрлері (1.7-сурет).



Сурет 1.7 – Тұрақты модуляция амплитудасы мен периоды бар біртекті Брэгг торының суреті

Брэгг торлы құрылымдарының көпшілігі үшін негізгі құрылыс блоктары болып саналады. Сондай-ақ, импульсті сақтау үшін сәйкес келуі керек түсетін, дифракцияланған және торлы толқындық векторлар көрсетілген.

Оптикалық талшықтың өзегі арқылы басқарылатын жарық әрбір тор жазықтығымен шашыраңқы болады. Егер Брэгг шарты орындалмаса, келесі жазықтықтардың әрқайсысынан шағылысқан жарық біртіндеп фазада болмайды және ақырында бейтараптандырылады. Сонымен қатар, Брэгг толқын ұзындығының резонансына, келмейтін жарық сыну көрсеткішінің сәйкес келмеуіне байланысты торлы жазықтықтардың әрқайсысында өте аз шағылыстырады; бұл шағылысу тордың ұзындығы бойынша жиналады. Мысалы,  $\Delta n \cdot 10^{-3}$ -ке тең күші мен 1,5 м қашықтықта диаметрі 1 мм тор Брэгг толқын ұзындығынан жеткілікті алыс толқын ұзындығында  $\sim 0,05\%$  резонанстық емес түсетін жарықты көрсетеді. Брэгг шарты орындалғанда, әрбір тор жазықтығынан шағылысқан жарық үлестері кері бағытта конструктивті түрде қосылып, тор параметрлерімен анықталған ортаңғы толқын ұзындығы бар кері шағылысқан шыңды құрайды.

Брэгг торының шарты жай ғана энергия мен импульстің сақталу заңын қанағаттандыратын талап болып табылады. Энергияның сақталуы ( $\hbar\omega_f = \hbar\omega_i$ ) түскен және шағылған сәулелену жиілігінің бірдей болуын талап етеді. Импульстің сақталуы үшін түсетін толқын векторы  $k_i$  және торлы толқын векторы  $K$ , шашыраған сәулелену толқыны векторына  $k_f$  тең болуы керек, ол мына түрде өрнектеледі:

$$k_i + K = k_f \quad (1.1)$$

мұндағы тор толқынының векторы  $K$  тор жазықтықтарына нормаль бағытқа ие, мәні  $2\pi/\Lambda$  ( $\Lambda$  – 5.2-суретте көрсетілген тор қадамы). Дифракцияланған толқын векторы шамасы бойынша тең, бірақ бағыты бойынша түскен толқын векторына қарама-қарсы. Осы жерден импульсті сақтау шарты келесідей болады:

$$2\left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B}\right) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1.2)$$

ол бірінші ретгі Брэгг шартына дейін жеңілдетеді.

Мұндағы  $\lambda_B$  - Брэгг торының толқын ұзындығы, бос кеңістіктің ортасында кіретін жарықтың толқын ұзындығы, ол Брэгг торынан кері шағылысады, ал  $n_{eff}$  - бос кеңістіктің ортасында толқын ұзындығындағы талшық өзегінің сынуының тиімді көрсеткіші.

Орташа сыну көрсеткіші  $n_0$  болатын оптикалық талшықтың өзегінде пайда болған біртекті Брэгг торын қарастырайық. Сыну профилінің көрсеткішін былай көрсетуге болады:

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad (1.3)$$

мұндағы  $\Delta n$  – индукцияланған сыну көрсеткішінің бұзылуының амплитудасы (әдетте  $10^5-10^{-3}$ ) және  $z$  – талшықтың бойлық осі бойындағы қашықтық. Біріктірілген режимдер теориясын [18, б.20] пайдалана отырып, тұрақты амплитудасы және модуляция периоды бар тордың шағылыстыру қабілеті келесі өрнекпен анықталады:

$$R(l, \lambda) = \frac{k^2 \sinh^2(sl)}{\Delta\beta^2 \sinh^2(sl) + s^2 \cosh^2(sl)} \quad (1.4)$$

мұндағы  $R(l, \lambda)$  – тордың ұзындығына байланысты шағылысу коэффициенті,  $l$  – ұзындық және  $\lambda$  – толқын ұзындығы.  $k$  – байланыс коэффициенті,  $\Delta\beta = \beta - \pi/\Lambda$  – анықтаушы толқын векторы,  $\beta = 2\pi n_0/\lambda$  – таралу тұрақтысы және соңында,  $s^2 = k^2 - \Delta\beta^2$ . Индекстің бұзылуының синусоидалы вариациялары үшін байланыс коэффициенті мына өрнекпен анықталады:

$$K = \frac{\pi\Delta n}{\lambda} M_{power} \quad (1.5)$$

мұндағы  $M_{power}$  – талшық өзегіндегі талшық режимі қуатының үлесі. Тор өзек бойымен біркелкі жазылған жағдайда,  $M_{power} = 1 - V^{-2}$  ретінде жуықтауға болады, мұндағы  $V$  – талшықтың нормаланған жиілігі:

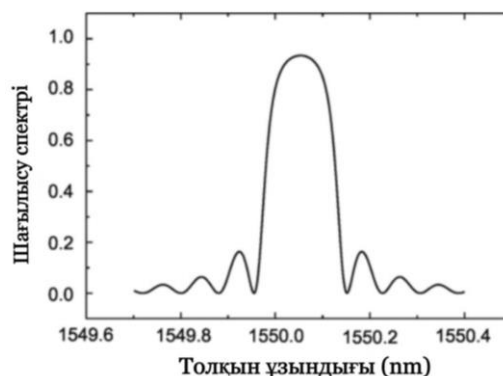
$$V = (2\pi/\lambda)a\sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (1.6)$$

мұндағы  $a$  – өзек радиусы,  $n_{co}$  және  $n_{cl}$  – сәйкесінше өзек және қаптама индекстері. Брэгг торының орталық толқын ұзындығында толқын векторының теңдеуі  $\Delta\beta = 0$ , сондықтан шағылысу коэффициентінің өрнегі мынадай болады:

$$R(l, \lambda) = \tanh^2(kl) \quad (1.7)$$

Индукцияланған сыну көрсеткіші өзгерген сайын шағылысу жоғарылайды. Сол сияқты тордың ұзындығы ұлғайған сайын, нәтижесінде пайда болатын шағылыстыру қабілеті де артады. 1.8 суретте біртекті Брэгг торының толқын ұзындығының функциясы ретінде есептелген шағылысу спектрін көрсетеді. Резонанстың бүйірлік жапырақшалары тор аймағының қарама-қарсы ұштарынан бірнеше рет шағылысудан туындайды. Sinc спектрі соңғы ұзындығы бар гармоникалық сигналдың Фурье түрлендіруі арқылы математикалық түрде туындайды, ал шексіз ұзын тор толқын ұзындығы облысындағы идеалды дельта функциясының жауабына айналады.





Сурет 1.8– Әдеттегі толқын ұзындығына тәуелді, орталық толқын ұзындығы шамамен 1550 нм болатын Брэгг торының шағылысу спектрі [18, б.20]

Шекті шамаға ие гармоникалық сигналдың Фурье түрлендіруі, ал шексіз ұзын тор толқын ұзындығы облысындағы идеалды дельта функциясының жауабына түрленеді.

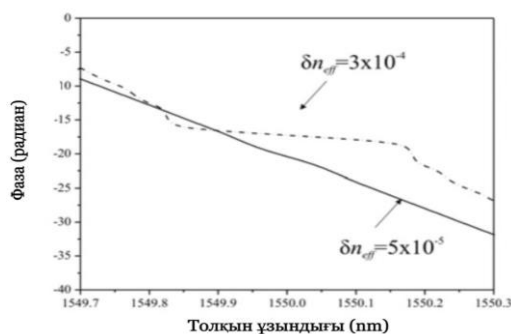
Массивтің шамамен жалпы жарты-максималды өткізу қабілеттілігінің жалпы өрнегі [19] арқылы берілген.

$$\Delta\lambda = \lambda_b S \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2} \quad (1.8)$$

мұндағы  $N$  – тор жазықтықтарының саны. Күшті торлар үшін (100% шағылысумен)  $S \approx 1$ , ал әлсіз торлар үшін  $S \approx 0.5$ .

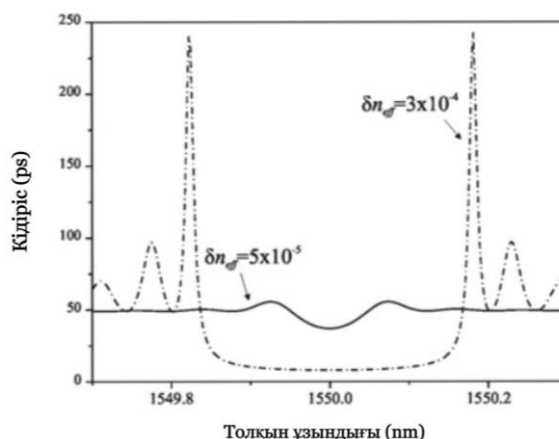
1.8-суретте толқын ұзындығына байланысты біркелкі периоды бар ( $V$  шамамен 1550 нм) екі Брэгг торының фазалық сипаттамасы көрсетілген. Екі тордың ұзындығы бірдей (1 см), бірақ сыну көрсеткіші әртүрлі, атап айтқанда «күшті» торда  $\delta n_{eff} = 3 \times 10^{-4}$  және «әлсіз» торда  $\delta n_{eff} = 5 \times 10^{-5}$ . Брэгг толқын ұзындығының айналасындағы фазалық өзгеріс сыну көрсеткішінің жоғарылауымен төмендейтіні белгілі болды.

Сол екі тордың топтық кідірісі 1.9-суретте көрсетілген. Күшті дисперсия (толқын ұзындығының өзгеруі) аялдама жолағының шетінде айқын көрінеді және шағын өткізу қабілеттілігімен шектелсе де, бұзылу индексінің өзгеруімен жоғарылайды. Топтық кідіріс жолақтың ортасында ең аз болады.



Сурет 1.9 – Толқын ұзындығына байланысты біркелкі периоды бар Брэгг торынан шағылысқан кездегі типтік фазалық сипаттамасы

Күшті тор ( $\delta n_{eff} = 3 \times 10^{-4}$ ) әлсіз тордың ( $\delta n_{eff} = 5 \times 10^{-5}$ ) сипаттамаларына қарағанда фазаның тұрақты тиімді өзгеруіне ие [19].



Сурет 1.10– Толқын ұзындығының функциясы ретінде біркелкі периодты Брэгг торынан типтік топтық кешігу реакциясы

Күшті тор үшін жолақтың ортасындағы топтық кідіріс тұрақты, ал өткізу қабілеттілігінің шегі артқан сайын жолақтың шеттерінде тез артады [19, б.41-46].

### 1.3 Оптоталшықты Брэгг торларының түрлері

Брэгг торлары оптикалық талшық түріне және жазуға дейінгі фотосезімталдық жағдайларына қосымша жазудың нақты жағдайларына және қолданылатын лазерге байланысты әртүрлі өседі. Торлар I тип, IA тип, II тип және II тип деп аталатын төрт түрлі динамикалық режиммен сипатталады. Негізгі айырмашылықтар төменде көрсетілген. Бұл түрлерге жауапты механизмдер әртүрлі болады. Торлардың бұл түрлерінің физикалық қасиеттері олардың өсу динамикасынан және термиялық индукцияланған ыдырауды өлшеу арқылы бағаланады. Жалпы айтқанда, IA типті торлар ең аз тұрақты, ал II типті торлар температура көтерілген сайын ең тұрақты болып табылады. IA типі шынайы бояу орталығы бар тор екенін және тек жергілікті электронды ақаулармен байланысты екенін ескерсек, I типте бояу орталығы да, тығыздау элементі де бар, II типі тығыздаумен байланысты, ал II тип шыны матрицаның балқуымен байланысты.

#### 1.3.1 I типті талшықты Брэгг торлары

I типті Брэгг торлары қалыпты қарқындылықта қалыпты фотосезімтал талшықтарда түзілетін торларға жатады. I типті тордың өсу динамикасы  $\Delta n \propto t^\alpha$  түрінің уақытымен дәрежелік заңымен сипатталады [20-23]. Бір қызығы, бағыттаушы режимнің шағылысу спектрлері жіберу сигналына қосымша болып табылады. Бұл қаптамада сіңіру немесе шағылысу салдарынан аз жоғалтуды білдіреді. I типті Брэгг торының негізгі сипаттамасы. Сондай-ақ, Брэгг торының фотосезімталдық түріне байланысты тордың өзі термиялық өшіруге қатысты мінез-құлыққа ие. I типті торларды салыстырмалы түрде төмен температурада, шамамен 200°C жууға болады. Дегенмен, I типті торлар ең көп қолданылатын

Брэгг торлары болып табылады және 40-тан +80 °C-қа дейінгі температура диапазонында тиімді жұмыс істейді, бұл көптеген телекоммуникациялар мен кейбір сенсорлық қолданбаларды қанағаттанарлық түрде қамтиды.

### 1.3.2 IA типті талшықты Брэгг торлары

IA типті талшықты Брэгг торлары торлардың ең жақында табылған түрі болып табылады және оларды I типті торлардың кіші түрі ретінде қарастыруға болады. (Өткізу және шағылысу спектрлері бірін-бірі толықтырады. Сондықтан тордың бұл түрі статикалық жағдайда I типтен ерекшеленбейді.) Әдетте олар стандартты гидрогенизацияланған германосиликатты талшықты тордың ұзақ уақыт ультракүлгін сәулеленуінен кейін түзіледі [24, 25]. Алайда олардың тұндыруындағы соңғы жақсартулар оларды қолайлы дайындалған оптикалық талшықтарға оңай қолдануға болатынын көрсетті [26]. IA типті торлардың спектрлік сипаттамалары бірегей; олардың торлардың басқа түрлерінен айырмашылығы, олар орташа негізгі индекстің айтарлықтай жоғарылауын көрсетеді, оны жазу кезінде тордың Брэгг толқын ұзындығында  $\lambda_B$  байқалатын үлкен қызыл ығысу ретінде анықтауға болады. Толқынның орташа ұзындығының өзгеруі үш түрлі режиммен сипатталады, бұл ретте I типті тордың өсуі квазисызықты аймақпен, содан кейін қанықтырумен ауыстырылады. Бұл қаныққан қызыл ауысу талшықтың түріне және гидрлеу жағдайларына байланысты, бірақ жоғары қоспалы талшық үшін (немесе жоғары Ge қоспасы бар талшық немесе B/GE бірлескен легирленген талшық) әдетте SMF-28 талшығы үшін шамамен 15-20 нм және 5-8 нм құрайды. Толқын ұзындығының максималды ығысуы орташа мәннің  $2 \times 10^{-2}$  дейін ұлғаюына әкеледі. Ең бастысы, IA торлары бүгінгі күнге дейін белгілі кез келген тор түрінің ең төменгі температуралық коэффициентін көрсетеді, бұл оларды жақында Калли мен әріптестері көрсеткендей, қос торлы термиялық компенсациялау датчигінде пайдалану үшін өте қолайлы етеді [27, 28]. Калли және басқалардың соңғы зерттеулері, сондай-ақ олардың төмен температурада (80°C) жұмыс істеу қажеттілігіне байланысты негізгі шектеулері, егер олар кернеуге (200°C дейін тұрақтылық) ұшыраса, айтарлықтай жеңілдетілетінін көрсетті [29].

### 1.3.3 PA типті талшықты Брэгг торлары

PA типті талшықты Брэгг торлары I типті торлармен бірдей спектрлік сипаттамаларға ие. Тасымалдау және шағылысу спектрлері қайтадан бірін-бірі толықтырады, бұл сонымен қатар бұл тор түрін статикалық жағдайда I типтен ажырата алмайды. Дегенмен, бұл торлардың әртүрлі жасау механизміне байланысты, динамикалық жағдайларда немесе бастапқы дайындау кезінде немесе торларды термиялық өшіру кезінде байқалатын кейбір ерекше белгілер бар. PA типті торлы жазулар I типті торлы жазулардан кейін ұзақ үрдіспен жасалады [30]. Шамамен 30 минут әсер еткеннен кейін (талшық түріне және радиация ағынының тығыздығына байланысты) PA типті тор толығымен әзірленеді. PA типті торларды өндіру өте практикалық емес екені анық. Сыну көрсеткішінің өзгеру механизмі шыны матрицаның тығыздалуына байланысты

пайда болатын I типтен ерекшеленсе де, сыртқы кедергілерге байланысты торлардың әрекеті екі типтегі тор үшін де бірдей. Микроскопиялық масштабта көрсеткіштің өзгеруінің нәзіктігіне қарамастан, бұзылулар макроскопиялық әсер етеді, демек толқын ұзындығының реакциясы өзгеріссіз қалады. Дегенмен, торға қоршаған ортаның жоғары температурасы әсер еткенде, тек 500<sup>0</sup>С-қа дейінгі температурада айтарлықтай өшіру байқалады. ПА типті торлардың I типті торларға қарағанда айқын артықшылығы тордың айтарлықтай жақсартылған температуралық тұрақтылығы болып табылады, ол жүйеге қоршаған ортаның жоғары температурасының әсеріне ұшырау қажет болған жағдайда өте пайдалы болуы мүмкін (датчиктерді қолданғандағы жағдай).

#### 1.3.4 ПА типті талшықты Брэгг торлары

Энергия тығыздығы  $>0,5$  Дж/см<sup>2</sup> бір эксимер жарық импульсі ядро мен қабықша интерфейсындағы шағын локализацияланған аймақтарда сыну көрсеткішінің үлкен өзгерістерін фотоиндукциялай алады, бұл II типті тордың түзілуіне әкеледі [31]. Бұл өзгеріс талшық өзегімен шектелген локализацияланған синтездің физикалық зақымдануының нәтижесі болып табылады және  $10^{-2}$  жуық деп бағаланған өте үлкен сыну индексінің модуляцияларына әкеледі. Шағылыстыру спектрі кең және кейбір ерекшеліктер эксимер сәулесінің профилінің біркелкі болмауына байланысты бүкіл спектрлік профилде пайда болады, олар шыны ядроның жоғары сызықты емес жауап беру механизмімен айтарлықтай жақсарады. II типті торлар Брэгг толқын ұзындығынан үлкен толқын ұзындықтарын өткізеді, ал қысқа толқын ұзындығы жабынға қатты байланыстырылған, өрнектелген немесе бедерлі талшықты торлармен көрінеді, бұл оларды толқын ұзындығы бойынша тиімді таңдамалы шүмектер ретінде пайдалануға мүмкіндік береді. Тұрақтылық сынақтарының нәтижелері II типті торлардың жоғары температурада өте тұрақты екенін көрсетті [31], бірнеше сағат бойы 800<sup>0</sup>С жоғары температураға төтеп береді; бұл тамаша температура тұрақтылығын қатал ортадағы сенсорлық қолданбалар үшін пайдалануға болады.

#### 1.4 Талшықты Брэгг торларын жазудың арнайы әдістері

Әдебиеттерде Брэгг талшықты торларын жазу процесін қолданылатын лазер түріне, сәулеленің толқын ұзындығына, жазу әдісіне, сәулелендірілген материалға және тордың түріне қарай жіктеуге болады [32].

ТБТ-ды жазу үшін қолданылатын лазерлер үздіксіз де, импульсті де, сәулеленің толқын ұзындығы инфрақызылдан (ИК) ультракүлгін (ультракүлгін) спектрге дейін болуы мүмкін. Бұл айырмашылықтар жазу үшін қолданылатын оптикалық сәулелену көздерінің кеңістіктік және уақытша үйлесімділігін анықтайды, бұл өз кезегінде ТБТ-ды жазудың тиісті әдісін таңдауды анықтайды. ТБТ-ды жазудың негізгі әдістерінің ішінде қадамдық әдіс, фазалық Маска әдісі (ФМ) және интерферометриялық әдіс ерекшеленеді. Торларды жазудың жоғарыда аталған әдістері қазіргі әдебиеттерде кеңінен ұсынылады. Алайда, ОТ өзегінде уақыт бойынша тұрақты тордың пайда болуы алғаш рет 1978 жылы

Канаданың байланыс зерттеу орталығында (Communications Research Centre, Canada) көрсетілді [32 б.20]. Осы тәжірибеде қолданылған талшықтар аздаған германий  $\text{GeO}_2$  диоксиді қосылған  $\text{SiO}_2$  кремний диоксидінің негізінде жасалды. СК-нің модуляциясы қарама-қарсы бағытта таралатын аргон лазерінен шыққан (488 нм) екі сәуленің интерференциясы нәтижесінде пайда болған талшықтың өзегіндегі толқыннан туындады: екі ортаны бөлетін шекарада талшықтың ұшынан шағылған жарық толқыны мен тік бағытта таралатын жарық толқыны.

Осылайша алынған талшықтың жарық өткізгіш бөлігіндегі СК-нің кеңістіктік модуляциясы Брэгг шартына сәйкес жазу кезінде қолданылған толқын ұзындығының резонанстық шағылыстырғыш ретінде жұмыс істейді [32, б.20].

Тек 1989 жылы [33] жұмыс авторлары талшықты ультракүлгін сәуленің екі қиылысатын сәулелерімен жасалған интерференциялық суретпен бүйір беті арқылы сәулелендіру арқылы торлардың пайда болу мүмкіндігін көрсетті.

Осы сәттен бастап Брэггтың талшықты торларын белсенді зерттеу басталды, және бүгінгі таңда ТБТ-ды жазудың кеңінен қолданылатын әдістері 0,1–99,9% тиімділікпен және 0,01–10 нм шағылысу жолағының енімен Брэгг торларын жасауға мүмкіндік береді.

Әдетте, таратылған өлшеу жүйелері үшін берілген параметрлері бар ТБТ массивтерін бір талшықта жазу қажет. Бұл мұндай жағдайларда Брэгг торларын жазудың тұрақтылығы өте маңызды екенін білдіреді. Параметрлер ТБТ жарық беру аймағындағы сыну көрсеткішінің модуляция шамасына байланысты, бұл ондағы сәулелену энергиясының тығыздығына байланысты. Энергия тығыздығы өз кезегінде индикатордың сіңуіне және профиліне байланысты сәулелену өтетін ортаның сынуы болып табылады.

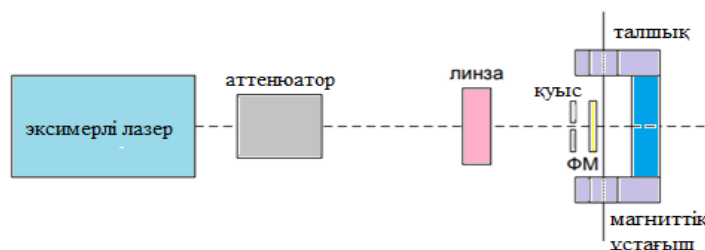
Брэгг торларының аподизациясы бүйірлік максимумдарды едәуір басып тастауы мүмкін, бұл олардың арасындағы айқасқан бөгеулердің азаюымен байланысты DWDM жүйелерінде оптикалық арналардың жақын спектрлік орналасуына мүмкіндік береді [32, б.20-24]. Торлардың аподизациясы деп торда оның ұзындығы бойынша келтірілген СК-і модуляциясы амплитудасының бірқалыпты өзгеруін айтады [33 б.626]. Осылайша, келтірілген СК-нің Гаусстық майысқан профилін қолдану арқылы ТБТ-ы негізгі резонанстың ұзын толқын ұзындықтары жағындағы бүйірлік максимумдарды жоюға мүмкіндік береді. Қысқа толқын ұзындықтары жағында бүйірлік максимумдардың болуы тордағы орташа индукцияланған СК-нің өзгеруіне байланысты болып табылады; тордың барлық ұзындығы бойынша олардың шамасын тұрақты ұстау мүмкін болса, онда оларды да жоюға болады [34].

Қазіргі заманғы талшықты-оптикалық байланыс желілеріндегі жарық импульстарының уақытша дисперсиясын өтеу үшін резонанстық толқын ұзындығы желілердің барлық ұзындығы бойымен үздіксіз немесе сатылы түрде өзгертін торлар үлкен қызығушылық тудырады [35]. Мұндай чирпирленген торлар шағылудың/өткізудің кең спектріне (100 нм жоғары) немесе үлкен дисперсияға (1000 пс/нм астам) ие. Осы типтегі торларды жазу тордың ұзындығы

бойынша негізгі моданың келтірілген СК-нің немесе эффективті СК-нің модуляция периодын өзгерту арқылы жүзеге асырылады [36].

Ұзақ экспозиция кезінде ТБТ-ын жазудың заманауи әдістері кез-келген параметрлерге ие дифракциялық құрылымдар жасауға мүмкіндік берсе, көп импульсті торларды жасау әдісі бір импульсті жазу арқылы ОТ-ты созу процесі кезінде ТБТ массивтерін құруға мүмкіндік бермейді.

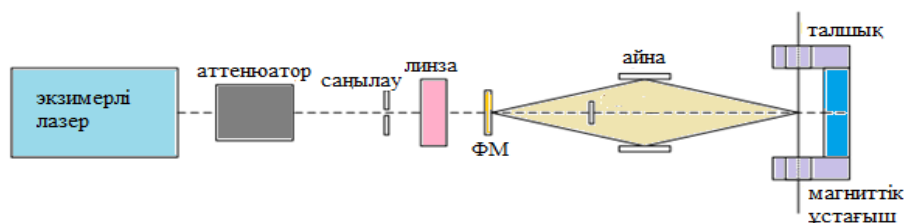
Фазалық маска және интерферометриялық әдіспен торларды бір импульсті және көп импульсті жазу әдістері схемаларының мысалдарын 1.15-1.17 суреттерден көруге болады [38].



Сурет 1.12 – Фазалық маска әдісімен ТБТ жазудың сұлбасы

«Coherent Compex 102» экцимер лазері (KrF газ қоспасы), сурет 1.12, 20 Гц жиіліктегі 248 нм толқын ұзындығында 1 нс импульстер шығарады. Орнатылған ысырмасы бар аттенюатор лазер тұрақты жұмыс режиміне шығарылған кезде импульстардың ішінен бір импульсті бөліп алуға мүмкіндік береді. Цилиндрлік линза қажетті энергия тығыздығына жету үшін лазер сәулесін осьтердің біріне бағыттайды. Саңылау талшықтың сәуле түсетін бөлігінің өлшемін өзгертуге мүмкіндік береді, осылайша ТБТ ұзындығын, демек оның спектрлік сипаттамаларын өзгертуге мүмкіндік бар.

1.12 суреттегі сұлбада «Тальбот» интерферометрі және «Coherent Compex 150 T» экцимерлі лазері қолданылады (бұл лазерлік жүйе Compex 102 экцимер лазерімен салыстырғанда жақсы сәулелік сипаттамаларға ие, импульстен импульске дейінгі энергия тұрақтылығы, сонымен қатар кеңістіктік және уақыттық когеренттіліктің ұзындығы арттырылған [39,40].

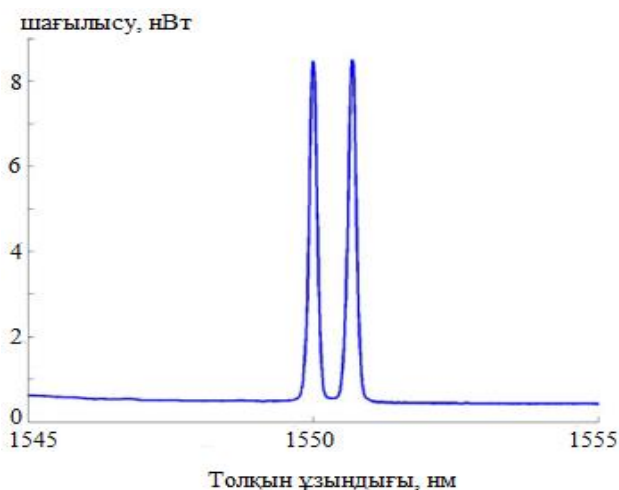


Сурет 1.13 – Интерферометриялық әдісімен ТБТ жазудың сұлбасы

Фазалық маска әдісімен (сурет 1.13) KrF экцимер лазерінің жалғыз импульсімен жазылған I типті ТБТ-дың шағылу спектрі 1.14 суретте көрсетілген. Тор құрамында GeO<sub>2</sub> 18 мол % болатын эллиптикалық кергіш қабығы бар екі

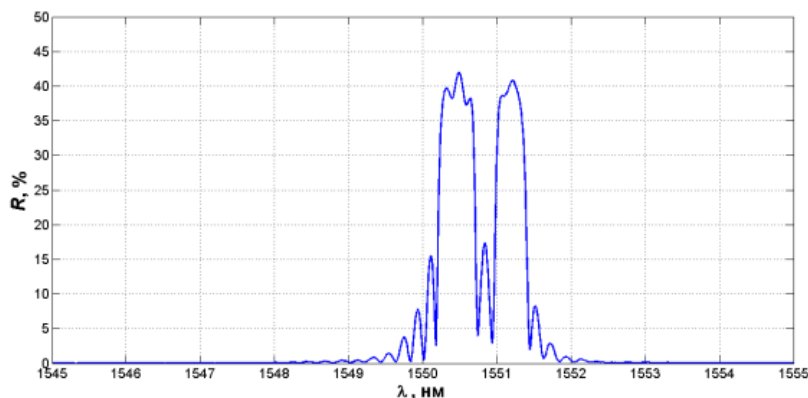
сыну көрсеткіші бар ОТ-та жазылған. Шағылу коэффициенті  $\sim 2\%$  және жартылай биіктіктегі шағылу шегінің шамасы шамамен  $0,1$  нм құрайды. Ұсынылған ТБТ оптикалық талшықта энергия тығыздығы  $\sim 400$  мДж/см<sup>2</sup> эксимер лазерінің  $20$  нс импульстерімен жазылады.

1.14 суретте шағылудың екі шегінің болуы тордың екі сәулелі сыну көрсеткіші бар ОТ-та индукциялануына байланысты болады. Анизотропты талшықтың таңдалған осьтерінің әрқайсысы үшін тиімді СК-і әртүрлі болғандықтан, Брэгг резонансының толқын ұзындығы шағылдырушы сетовод осі бойымен тез және баяу таралатын сәуле үшін әртүрлі болады.



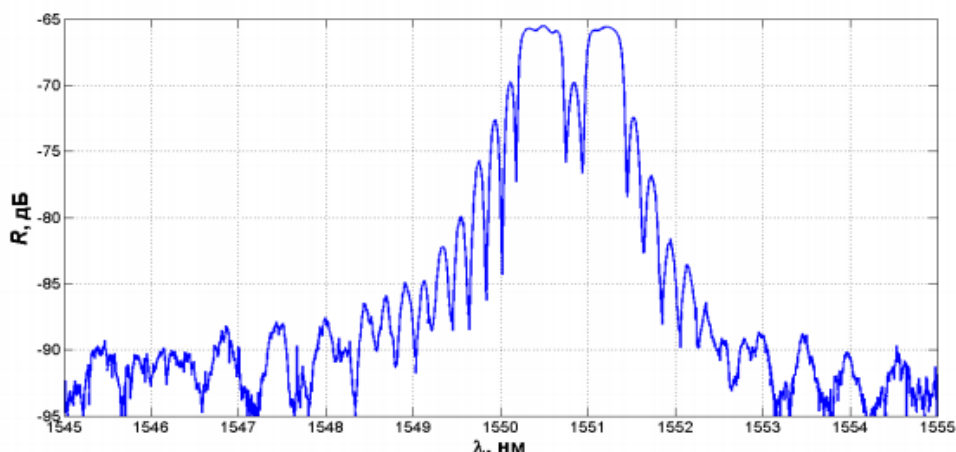
Сурет 1.14 – Бір импульспен жазылған I типті ТБТ-дың шағылу спектрі

Интерферометриялық әдіспен K<sub>r</sub>F эксимерлі лазермен ұзақ экспозиция кезінде жазылған I типті ТБТ-дың шағылу спектрі 1.15 суретте көрсетілген. Тор құрамында GeO<sub>2</sub> 12 моль% [41] болатын эллиптикалық кергіш қабықшасы бар екі сыну көрсеткіші бар ОТ-та жазылған. Экспозиция уақыты -1 сағатты құрайды. Шағылу коэффициенті  $\sim 42\%$ , жартылай биіктіктегі шағылу шектерінің мәні шамамен  $0,5$  нм құрайды [42].



Сурет 1.15– Ұзақ экспозиция кезінде жазылған I типті ТБТ-дың шағылу спектрі (сызықтық шкала)

1.16 суретте дәл сол ТБТ-дың шағылу спектрі логарифмдік шкалада берілген.



Сурет 1.16 – Ұзақ экспозиция кезінде жазылған I типті ТБТ-дың шағылу спектрі (логарифмдік шкала)

ФМ периодының белгіленген мәніне байланысты ТБТ-дың шағылдырушы толқын ұзындығын өзгертуге мүмкіндік бермейді. Сондай-ақ, бұл әдіс талшықты созу процесінде Брэгг торларын жазуға мүмкіндік бермейді, өйткені соңғысы қозғалатын световодтың жанында оптикалық элементтердің болмауын талап етеді [43].

### **1.5 Оптоталшықты Брэгг торларын пайдалану аясы мен мүмкіндіктері**

Заманауи әдістер деформацияны, қысымды, температураны, қашықтықты, кеңістіктегі позицияны, сызықтық жылдамдық пен айналу жылдамдығын, үдеуді, діріл мен дыбыс толқындарының параметрлерін, сұйықтық деңгейін, сыну көрсеткішін, электр және магнит өрісін, сәулелену дозасын және басқа да бірқатар физикалық шамаларды өлшеуге мүмкіндік береді.

Жылу сезімталдығының тиімділігі ТБТ (талшықты Брэгг торы) үшін де табиғи. Бір нүктелі датчиктерді қамтитын жүктеме ұяшықтары Bragg талшықты торында жұмыс істейді және минималды өлшемдердің, беріктіктің, максималды дәлдіктің және эласто-оптикалық (оптикалық деформацияның) сипаттамаларын сақтайды. Ал Брэгг талшықты торында жұмыс істейтін температура датчигінде сыну қабілетінің өзгеруіне байланысты Брэгг толқын ұзындығы ығысады. индексі термооптикалық және термиялық кеңею коэффициенті болып табылады.

Талшықты-оптикалық датчиктер өте кең өткізу қабілеттілігіне, электромагниттік кедергіге төзімділікке және күрделі температура, уыттылық және қысым жағдайында жоғары жұмыс қабілеттілігіне ие [44]. Талшықты Брэгг торы арнайы жұмыс принципіне ие және датчик ретінде қолданылады. Мысалы, талшық тығыздалған кезде талшықты Брэгг торы деформацияны есептейді.



Себебі оптикалық талшықтың деформациясы уақыт өте келе микроқұрылымның өзгеруіне әкеледі.

Соңғы екі жылда көптеген Брэгг талшықты тор (fiber Bragg lattice) зерттеушілері модельдеуді қолдана отырып, деформация мен температура датчигі ретінде көптеген Брэгг талшықты тор зерттеушілері жүргізді. Сыну көрсеткіші мен тор кезеңі Брэгг талшықты торының маңызды әсерлері болып табылады.

1970 жылдары оптикалық талшық пен оптикалық байланыс технологиясының қарқынды дамуымен оптикалық талшықты анықтау технологиясы жарық толқыны өлшеу құралы ретінде қолданылатын анықтау технологиясының жаңа түріне айналды [45]. Талшықты Брэгг торлары шағын өлшемдеріне, жоғары дәлдігіне, желіге ыңғайлы қосылуына, датчиктер интеграциясына және деректерді беруге және т. б. байланысты инженерлік құрылыстарды бақылау мен анықтаудың ең жылдам дамып келе жатқан заманауи технологияларының біріне айналды. [46]. 1979 жылы талшықты-оптикалық датчиктер алғаш рет NASA сынағы үшін композиттік материалдарға алдын ала енгізілген [47]. 1989 жылы Мендес және басқалар. алғаш рет бетон конструкциясының жай-күйін анықтау үшін Геотехника саласында талшықты-оптикалық датчиктерді енгізу ұсынылды [48]. 1992 жылы Прохаска және басқалар. алғаш рет брэггтың талшықты торлары деформацияны өлшеу үшін бетон құрылымына енгізілді және бастапқыда аэроғарыш өнеркәсібінде, азаматтық құрылыста қолданылған талшықты торларды өлшеу технологиясын енгізді [49]. В.Войчик мақаласында талшықты Брэгг торының көмегімен деформацияның таралуын қалпына келтіру үшін кері тапсырманы қолдану сипатталған. Тор спектрі бойынша Деформация профилін қалпына келтіру есептері кері есеп деп аталады [50].

Сондай-ақ, С. К. Оразалиеваның мақалаларында және т. б. жарық сезімталдығын арттыру үшін сутегімен алдын ала қаныққан стандартты телекоммуникациялық талшықтарға негізделген Брэгг талшықты торларының спектрлік сипаттамаларын зерттеу нәтижелері сипатталған [51].

Юнг модулі – қатты материалдардың серпімді қасиеттері мен деформация кедергісін сипаттайтын маңызды физикалық шама. Ол материалдың деформациясы мен ішкі кернеу арасындағы байланысты көрсетеді. Бұл – күш әсерінен кейін материалдың деформациясын өлшеуге арналған параметрлердің бірі. Сонымен қатар инженерлік технологиялар, қауіпсіздік және әскери, биомедицина және денсаулық сақтау салаларында механикалық компоненттерді таңдау үшін маңызды негіз болып табылады [52]. Кеңінен қолданылатын қатты материалдардың Юнг модулін өлшеу (мысалы, металдар, керамика, резеңке, полимерлер және т. б.) ауқымды азаматтық құрылыс үшін өте маңызды.

Статикалық созылу әдісі [53], аркалық иілу, динамикалық резонанс [54] және тағы басқа көптеген әдіс бар. Юнг модулін өлшеудің алғашқы екі әдісі ең жиі қолданылатын өлшеу әдістері болып табылады. Бұл екі әдісті өлшеудің кілті ретінде микродеформация мен микро орын ауыстыруды дәл өлшеу болып

табылады. Осы себепті Электрлік байланыс кескінін қалыптастыру құрылғысы (ССD) ұсынылды.

1978 жылы Брэгг матрицасының талшықты датчиктері пайда болғаннан бері олар қарапайым дизайнына, шағын өлшеміне, төмен құнына, жоғары шуылға төзімділігіне, коррозияға төзімділігіне, жоғары өлшеу дәлдігіне және оңай адгезиясына байланысты интеллектуалды сенсорлық технологияларды зерттеуде үлкен назар аударды [55]. Азаматтық құрылыстарды бақылау кезінде оны бетонның, Болаттың, ағаштың және басқа құрылымдық материалдардың ішіне немесе бетіне салуға және орнатуға болады [56].

Қазіргі уақытта FBG датчиктері өлшемдерде кеңінен қолданылады:

- Құрылымдардың деформациясы;
- Температура;
- Жиіліктер;
- Бүйірлік қысым;
- Сыну көрсеткіші;
- Жеделдету ;
- Қисықтық [57-61].

Басқа параметрлерді дәл статикалық немесе динамикалық өлшеу тұрғысынан оның ең үлкен ерекшелігі-оның микро қозғалыстарды өлшеу үшін жоғары сезімталдығы мен өлшеу дәлдігі бар.

Талшықты Брэгг торларын қолдануды шектейтін факторлар бар, олар тор спектріндегі бүйірлік максимумдар және тор құрылымында модалардың қозуынан туындаған оптикалық шығындар. ТБТ-ның бүйірлік резонанстарын басу үшін тордағы СК-і модуляциясының амплитудасын оның ұзындығы бойынша өзгерту ұсынылды. Ең жақсы спектрлік сипаттамаларға белгілі бір заңға сәйкес СК-і модуляциясының біртекті профилі бар торлар ие.

Қазіргі байланыс желілеріндегі ақпарат беру жылдамдығын шектейтін тағы бір фактор ол – талшықты световодтардың хроматикалық дисперсиясы. Дисперсті ортада таралған ақпаратты тасымалдайтын лазерлік импульстар ұлғайып, бір-бірімен қабаттаса бастайды. Осыған орай, ақпаратты таратуға болатын ең жақын арақашықтық тек лазерлік импульстердің сөнуімен ғана емес, сонымен бірге дисперсиямен де шектелетіндігі шығады. Бұл қашықтықты арттыру үшін талшықты световодтардың дисперсиясын өтеу қажет [62].

Ғимараттар мен құрылыстар конструкцияларының нормативтік техникалық жай-күйі көбінесе олардың геометриялық параметрлерінің (кеңістіктік жағдайы, иілу, орын ауыстыру) өзгермейтіндігімен және тұрақтылығымен анықталады. Деформацияны бақылау дәстүрлі түрде геометриялық нивелирлеу арқылы объектінің контуры бойынша негізінен тік шөгінділердің дамуын анықтау арқылы жүзеге асырылады. Сонымен қатар, тек негіз деңгейіндегі тік шөгінділерді есепке алу бүкіл объектінің кеңістіктік деформациясының нақты көрінісін және оның конструкцияларының кернеулі-деформацияланған күйінің өзгеруін, соның ішінде өрт кезінде және одан кейін физика-механикалық және геометриялық сипаттамалардың өзгеруін көрсетпейтіні анық. Бұл сипаттамаларды өлшеудегі дәлсіздіктер, әсіресе,

геометриялық нивелирлеу үшін қажетті нүктелер санына қажетті көлемде қол жеткізу мүмкін болмаған кезде, құрылымдардың едәуір өлшемдері мен үлкен қабаттарында үлкен болуы мүмкін.

Объектінің күрделі кеңістіктік контурымен бүкіл ғимараттың кеңістіктік деформацияларын тудыратын тірек құрылымдарының біркелкі емес деформациялары оның тірек құрылымдарының элементтерінің бүкіл көлемде зақымдалуымен бірге жүреді. Мұндай жағдайларда құрылымдардың деформациясының сипатын толығымен анықтау мүмкін емес, сонымен қатар оның кешендегі тірек құрылымдарының кернеулі деформацияланған күйіне әсерін сандық бағалау мүмкін емес.

Сонымен қатар, өрт қауіпсіздігін қамтамасыз ету мақсатында құрылыс конструкцияларын жобалау отқа төзімділік шегі өлшемдеріне негізделеді. Алайда бұл әрдайым жеткіліксіз, өйткені отқа төзімділік шегі жеке бірлік өрт кезінде шекті күйлердің басталу белгілерімен сипатталады, ал оларға ғимараттың ұзақ уақыт жұмыс істеуі кезінде құрылымдардың әртүрлі бөліктеріне бірнеше рет жоғары температуралық әсер ету арқылы қол жеткізуге болады.

Арнайы құрылыс талаптарымен бірыңғай автоматтандырылған басқару жүйесін құра отырып, ғимараттың басқа жүйелерімен бірлесіп жұмыс істеуі тиіс барлық жобаланған биік ғимараттардың тірек конструкцияларының жай-күйін мониторингтеу жүйелерімен жарақтандыру регламенттелген [64]. Бұл жүйе жол немесе құрылыс салалары бойынша, адамдарды уақтылы хабардар ету және эвакуациялауды басқару мақсатында тұрақсыздандырушы факторларды бағалау, алдын алу және жою үшін нақты уақыт режимінде кезекші-диспетчерлік қызметтерге ақпарат беруге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, биік конструкцияларда (автомагистральді айналма жолдар, көпірлер, көп қабатты ғимараттар) жүк көтергіш құрылымдардың кернеулі-деформацияланған күйіне жел жүктемелері айтарлықтай әсер етеді, бұл осы құрылымдарда деформациялық зақымданулардың жинақталу орындарының айтарлықтай шашырауын тудырады.

Осылайша құрылыстар конструкцияларының кернеулі-деформацияланған жай-күйін мониторингілеу авариялық жағдайларды болжау мен алдын алудың ең тиімді тәсілі болып табылады [65].

Қазіргі кезде дамыған мемлекеттерде кернеулі-деформацияланған жай-күйді мониторингілеу жүйелерін қолданудың ықтимал саласы едәуір кең, өйткені ескірген және физикалық тозған жабдықтарды, ең алдымен көтергіш құрылыстарды, қысымды ыдыстарды, магистральдық құбырларды, аттракциондарды пайдалануға байланысты қауіпті өндірістік және ықтимал қауіпті объектілердегі құрылыстар мен техникалық құрылыстардың қауіпсіздігін қамтамасыз ету қажеттілігі бар.

ТМД мемлекеттерінде өнеркәсіпте қауіпсіз жұмыс жүргізуді қадағалау орындарының ресми деректеріне сәйкес Қазақстан Республикасының өндірістік объектілеріндегі ең тән апаттар көтергіш құрылыстардағы оқиғалар апаттардың жалпы санының 43% болып табылады

Жол құрылыстардың және автомагистральді көпірлердің қауіпсіздігін қамтамасыз етуге мониторинг жүйелерін қолдану арқылы қол жеткізуге болады. Арнайы инженерлік жүйелерді бақылау және басқару жүйелері мыналарды қамтамасыз етуі керек:

- объектілердің жұмыс істеуін қамтамасыз ету процестерінің параметрлерін бақылау және олардың ағымдағы мәндерінің нормативтік мәндерден ауытқуын анықтау арқылы апаттық жағдайларды болжау және алдын алу;

- объектілердің жұмыс істеуін қамтамасыз ету процестері параметрлерінің мәндері туралы ақпаратты жинау, беру және өңдеудің үздіксіздігі;

- технологиялық жүйелердің жай-күйі және объектілердің инженерлік-техникалық конструкцияларының жай-күйінің өзгеруі туралы рәсімделген жедел ақпаратты қалыптастыру және объектінің кезекші-диспетчерлік қызметіне беру.

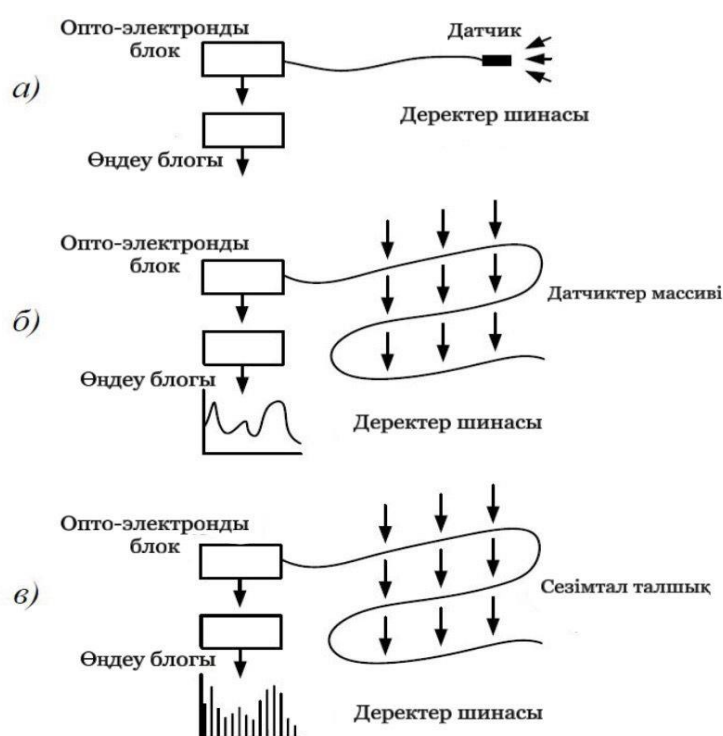
Соңғы уақытта электронды құрылғыларға қарағанда бірқатар артықшылықтары бар талшықты-оптикалық датчиктер кернеу, жүктеме, діріл, температураның өзгеруі және т.б. сияқты параметрлерді бақылау құралы ретінде белсенді түрде қолданылуда. Оптикалық талшықтарды сезімтал элементтер ретінде пайдаланудың арқасында электромагниттік өрістерді, жанама электромагниттік сәулеленуді, арналардың айқаспалы кедергілерін өлшеу нәтижесіне әсер етпейді, жерге тұйықталу тізбектерімен және гетерогенді өткізгіштердің түйіскен жерлеріндегі напряжысу кернеулерімен байланысты проблемалар жоқ, электр қауіпсіздігі айтарлықтай артады, доға түзілу және ұшқын проблемалары жоқ. Мұндай датчиктер қоршаған ортаның зиянды әсеріне жоғары төзімділікке ие; шағын өлшемдер мен салмақ; жоғары механикалық беріктік; жоғары температураға, дірілге және т. б. төзімділік; деректерді берудің жоғары жылдамдығы. Сонымен қатар, талшықты-оптикалық датчиктер абсолютті жарылыс қауіпсіздігіне байланысты жарылғыш ортада қолданыла алады. Олар химиялық инертті, қарапайым дизайны және жоғары сенімділігі бар. Оптикалық талшықтар полимерлерден немесе балқытылған кварцтан жасалған. Мұндай материалдар пайдаланудың кең ауқымында агрессивті ортаның әсеріне төзімді. Кәдімгі телекоммуникациялық оптикалық талшықтардың температуралық диапазоны  $-60^{\circ}\dots 85^{\circ}\text{C}$ . Жоғары температура ( $700^{\circ}\text{C}$ -қа дейін) әсер ету жағдайында объектілерді бақылау үшін сезімтал элемент арнайы металдандырылған талшықтардан жасалуы мүмкін.

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; шағын беттердің температурасын жылдам өлшеу, төмен жылу өткізгіштігі және айнымалы шағылысу қабілеті бар, жету қиын жерлерде).

Құрылымдардың құрылымына талшықты-оптикалық датчиктерді енгізу арқылы орталық бақылау пунктінде көптеген үздіксіз өлшемдерді жинау арқылы олардың күйінің уақыт бойынша өзгеруін бақылауға болады.

Қазіргі заманғы талшықты-оптикалық датчиктер көптеген физикалық параметрлерді өлшеуге мүмкіндік береді, мысалы: қысым, температура, қашықтық, кеңістіктегі орналасу, айналу жылдамдығы, сызықтық қозғалыс жылдамдығы, үдеу, тербеліс, масса, дыбыс толқындары, сұйықтық деңгейі, деформация, сыну коэффициенті, электр және магнит өрісінің кернеулігі, электр тогы, газ концентрациясы, доза радиациялық сәулелену және т. б. Қауіпсіздік тұрғысынан үздіксіз бақылауды қажет ететін ең маңыздылары-деформация (созылу, қысу, сдысу, иілу), кернеу, орын ауыстыру, жарықтар, құрылымдық элементтердің біркелкілігі сияқты объектілердің параметрлері. Сонымен қатар, иілу мөлшерінен басқа, олардың бағытын да өлшеу қажет. Векторлық датчиктер бұл мәселені шешуге мүмкіндік береді.

Талшықты-оптикалық датчиктерді шартты түрде үш түрге бөлуге я нүктелік, үлестірілген және квази-үлестірілген.



а) нүктелік, б) үлестірілген, в) квази-үлестірілген.

Сурет 1.17 – Талшықты-оптикалық датчиктердің классификациясы

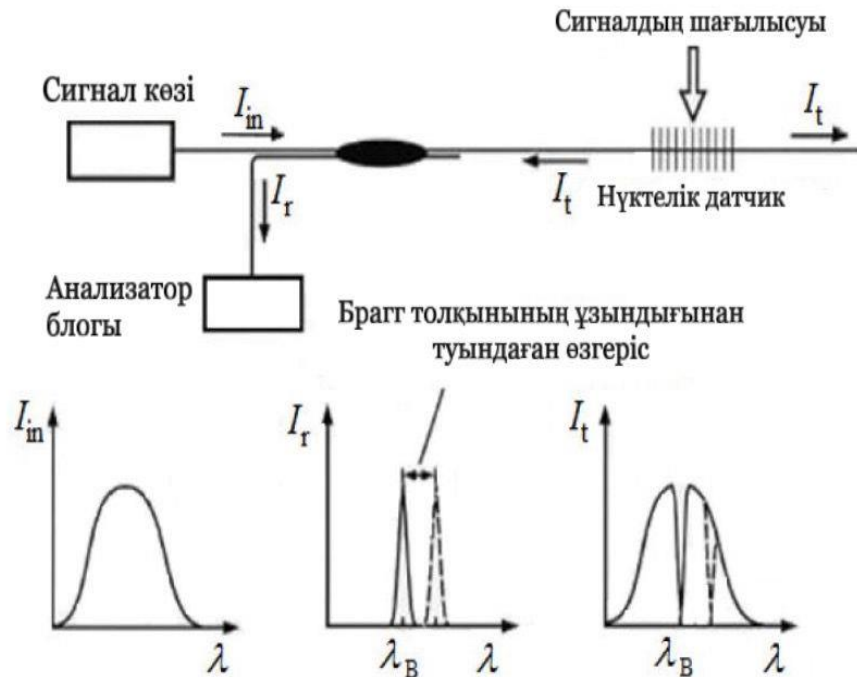
Нүктелік талшықты-оптикалық датчиктер (1.17 а-сурет) көптеген талшықты емес датчиктер сияқты объектінің белгілі бір нүктесінде параметрлерді өлшеуге және бақылауға мүмкіндік береді. Әдетте, мұндай датчиктердің өлшемдері шағын және өлшеу дәлдігі жоғары. Оларды жергілікті термометрлер, тензометрлер, қысым датчиктері, акселерометрлер және т.б. Датчик элементінің түріне байланысты датчиктердің локализациясы  $0,1 \text{ см}^2$ -ға жетуі мүмкін.

Квази-үлестірілген датчиктерге негізделген өлшеу жүйелері (сурет. 1в) алғашқы екі схеманың артықшылықтарын біріктіреді. Квази-үлестірілген датчик-бұл нүктелік сенсорлық элементтер массиві, мысалы, бір жалпы толқын өткізгішпен біріктірілген талшықты торларға негізделген. Әр элементтің өзіндік ерекше сипаттамалары бар. Бұл оның күйін басқа сенсорлық элементтерден тәуелсіз талдауға мүмкіндік береді.

Мұндай жүйелердің дәлдігі жеке датчиктердің дәлдігімен анықталады, ал массив 100-ден астам элементті біріктіре алады. Сенсорлық массивтер күрделі объектілерге, инженерлік құрылыстарға, көпірлерге, туннельдерге, кемелер мен ұшу аппараттарының корпустарына, мұнай ұңғымаларына және т.б. мониторинг жүргізуге, температураның, жүктемелердің, қысымның таралу градиентін талдауға, нүктелік объектілердің көп санын бақылауға мүмкіндік береді. Ол үшін тек бір оптикалық талшық пен анализатор қолданылады. Электрлік аналогтармен салыстырғанда квази-үлестірілген жүйелер салмағы мен мөлшері аз, бұл әсіресе оларды қолданудың кейбір салаларында қажет. Алайда квази-үлестірілген датчиктер объектінің ерікті нүктесінде өлшеуге мүмкіндік бермейді. Сонымен қатар, бір талшықты датчиктер жиынтығынан деректерді беру үшін сигналдарды мультиплекстеу жүйелері мен фотодетекторлар жиынтығын пайдалану қажет. Бұл жағдайда сенсорлық элементтердің саны толқын ұзындығы бойынша арналар санымен шектеледі.

Талшықты датчиктердің негізгі түрлерінің бірі – талшықты Брэгг торларына негізделген датчиктер. Мұндай тор-бұл Брэгг айнасы, атап айтқанда, ұзындығы 1 см болатын оптикалық талшықтың өзегінде тікелей жасалған сыну көрсеткішінің периодты құрылымы, мұндай құрылым жарықты тар спектрлік диапазонда көрсетеді. Торларды жазу фоторефрактивті әсер деп аталатын арнайы фотосезімтал оптикалық талшықтарда жүзеге асырылады.

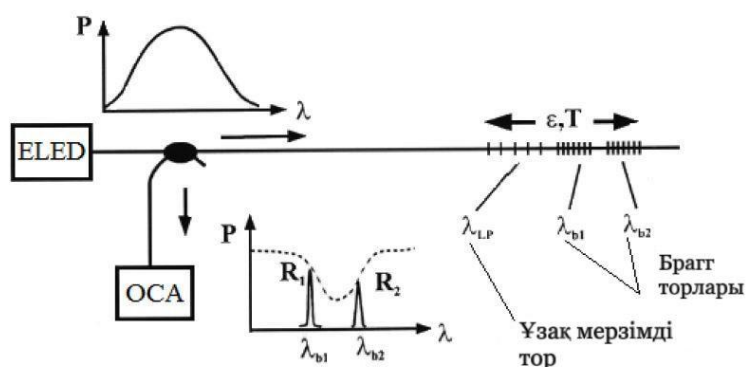
Брэгг торларына негізделген сенсорлық жүйелерді құрудың көптеген жолдары бар. Қарапайым жағдайда (сурет 1.18) сенсорлық жүйе – оптикалық сплиттер арқылы жарық сигналының көзіне және анализатор блогына қосылған нүктелік датчик. Көзден шыққан сигнал сенсорлық элемент арқылы көрінеді. Шағылысу толқынының ұзындығы анализатор блогымен бекітіледі. Әдетте, анализатор тар жолақты спектрометр болып табылады. Өртүрлі типтегі спектрометрлер бар: дисперсиялық элемент ретінде дифракциялық тор қолданылатын стандартты дифракциялық элементтерден бастап, фабри-қалам интерферометріне негізделген анализаторларға дейін. Интерферометрдің Шири сканерлеу арқылы датчиктың шағылысуының оптикалық спектрін талдауға болады.



Сурет 1.18 – Брегг торлары негізінде сенсорлық жүйелерін құру сұлбасы

Талшықты Брэгг торларындағы датчиктер кернеулерді белгілі бір нүктеде өлшейді. Дегенмен, бір талшықта жүздеген талшықты Брэгг торларын жазуға болады және бір анализатор барлық шағылыстарды өлшейді. Бұл бір уақытта көптеген әртүрлі дизайн нүктелерін басқаратын өте қарапайым, бірақ тиімді құрылғыларды жасауға мүмкіндік береді. Талшықты Брэгг торының шағылысу толқын ұзындығына температура да, деформация да әсер ететіндіктен, датчиктер көбінесе жұпта орналасады, олардың біреуі құрылымдардың қозғалысынан оқшауланған. Бұл деформацияны да, температураны да тәуелсіз өлшеуге мүмкіндік береді.

Бір торды пайдаланып температура мен деформацияны (ішкі кернеуді) бір уақытта анықтауға мүмкіндік беретін датчиктер бар. Бұл жағдайда талшықты-оптикалық тор анизотропты талшыққа жазылады. Анизотропияға байланысты ортогональды поляризацияланған режимдердің тиімді сыну көрсеткіштері бір-бірінен ерекшеленеді. Тордың Брэгг толқын ұзындығы  $n_{эф}$  -ке тәуелді болғандықтан, анизотропты талшықта ортогональды поляризацияланған режимдердің Брэгг толқын ұзындығы белгілі бір шамада ерекшеленеді. Сонымен қатар, бұл айырмашылық температураға байланысты, бірақ кернеудің өзгеруіне байланысты емес. Осылайша, жеке Брэгг толқын ұзындығыныңмещысуы кернеудің өзгеруін өлшейді, ал ортогональды поляризацияланған режимдердің Брэгг толқын ұзындығының айырмашылығының өзгеруі температураны өлшейді.



Сурет 1.19 – Температураның өзгеруі мен механикалық деформацияларды бөлек талдауға арналған Брэгг және ұзақ мерзімді торлардың тіркесіміне негізделген сенсорлық жүйе

Датчиктер ретінде ұзақ мерзімді талшықты торларды да қолдануға болады. Ұзақ мерзімді талшықты торлар, брэггтықтардан айырмашылығы, сигналды көрсетпейді, сонымен қатар тор кезеңіне және оптикалық талшық құрылымына тәуелді спектрлік селективті шашырау арқылы өзіндік ерекше өткізу спектріне ие. Ұзақ мерзімді торда соққылар арасындағы қашықтық көп толқын ұзындығынан үлкен және оның спектрі негізгі режим мен қабық режимінің интерференциясымен анықталады. Брэгг торларымен салыстырғанда ұзақ мерзімді тордың өткізу спектрінің температураға тәуелділігі түбегейлі өзгеше. Сонымен қатар, талшықтың құрылымына байланысты температураның жоғарылауымен спектрдің өзгеруі оң немесе теріс болуы мүмкін. Осы құбылыстың негізінде деформациялық компонент пен температураның үлестерін бөлуге мүмкіндік беретін салыстырмалы түрде қарапайым сенсорлық жүйе жасалды (сурет 1.19). Мұндай жүйенің шағылысу спектрі сол суретте көрсетілген. Нүктелі конверт – бұл ұзақ мерзімді тордың өткізу спектрі. Жүйеге механикалық әсер ету кезінде Брэгг шырларының шағылысу толқын ұзындығы ғана өзгереді, олардың қарқындылығы аз өзгереді, өйткені Брэгг және ұзақ мерзімді торлардың спектрлері синхронды түрде ауысады. Алайда, температураның өзгеруімен Брэгг торларының шағылысу шырларының салыстырмалы қарқындылығында температураның кезеңдегі әртүрлі құрылымдардың спектрлеріне әсер етуіндегі айырмашылыққа байланысты айтарлықтай өзгерістер байқалады. Брэгг шағылысының шырлары конверт бойымен "жүзеді". Осылайша, алдын-ала калибрленген жүйемен температура мен механикалық әсердің үлестерін датчиктерге бөлуге болады, бұл тек Брэгг талшықты торларын қолдану қиынға соғады.

Талшықты оптиканың ашылуы телекоммуникация саласында төңкеріс жасады, бұл ұзақ қашықтыққа жоғары сапалы үлкен өткізу қабілеттілігі бар телефон желілеріне мүмкіндік берді. Соңғы үш онжылдықта оптикалық талшықтың жетістіктері оптикалық талшықтар мен онымен байланысты компоненттер "телекоммуникация" терминімен синоним болатындай етіп талшықты-оптикалық технологияны жетілдіріп, өзгертті. Телекоммуникацияда қолданудан басқа, оптикалық талшықтар талшықты датчиктердің тез өсіп келе



жатқан аймағында да қолданылады. Оптикалық талшық өндірісінің жетілдірілуіне және жалпы осы саладағы жетістіктерге қарамастан, айналар, толқын ұзындығының сүзгілері және жартылай рефлекторлар сияқты негізгі оптикалық компоненттерді талшықты оптикамен біріктіру қиын болып қала береді. Алайда, жақында мұның бәрі ультракүлгін сәулені оптикалық сіңіру арқылы бір режимді оптикалық талшықтағы негізгі сыну көрсеткішін өзгерту мүмкіндігінің арқасында өзгерді. Оптикалық талшықтардың фотосезімталдығы талшықтың өзегінде тікелей талшықты Брэгг торлары (FBG) деп аталатын фазалық құрылымдарды құруға мүмкіндік береді, сурет. 5.1. Фотосезімталдық ядро материалына тәуелді тән толқын ұзындығы мен қарқындылығы бар жарыққа ұшыраған кезде талшық өзегінің сыну көрсеткішінің тұрақты өзгеруін білдіреді. Талшықты Брэгг торы көптеген негізгі функцияларды орындай алады, мысалы, шағылысу және сүзу, жоғары тиімділікпен және төмен шығындармен. Бұл әмбебаптық бірқатар маңызды инновацияларды ынталандырды [63-65].

Кәдімгі талшықты Брэгг торы үшін индексті модуляция жиілігі толқын өткізгіште таралатын жарықтың толқын ұзындығының жартысына тең физикалық интервалға ие (тор жазықтықтары арасындағы фазалық Сәйкестік және түскен жарық когерентті кері шағылысуға әкеледі). Тордың өткізу қабілеттілігінің ені, әдетте, 0,1 нм-ден ондаған нанометрге дейін өзгерген кезде 100% - ға жақындайтын шағылысу мүмкіндігі бар. Бұл сипаттамалар Брэгг торларын жарықты шағылыстыру, сүзу немесе тарату үшін қолданылатын телекоммуникация үшін қолайлы етеді [63, б.129]. Телекоммуникациялық терезелерде Жарық шығаруға қабілетті талшықты лазерлер жоғары шағылыстыратын соңғы айна қалыптастыру үшін де, шығыс сигналын лазер резонаторына қосу үшін де Брэгг торларын пайдаланады, нәтижесінде тиімді және тұрақты көз пайда болады. Сонымен қатар, жиілігі біркелкі емес торлардың импульстарды қысу немесе кеңейту қабілеті жоғары қашықтықтағы деректер жылдамдығы бар байланыс жүйелері үшін өте маңызды. Оптикалық қуаттың өзгеруінен туындайтын сызықтық емес сигнал бұрмалануын азайту үшін реттелетін торлы дисперсия компенсаторы бар құрылғыларды пайдалануға болады. Көптеген торларға негізделген деректерді беру эксперименттері [66] туралы хабарланды, оның ішінде 10 Гбит/с жылдамдықпен 400 км талшық бойынша дисперсиялықмешщысусыз, бекітілген дисперсиялық өтемақысы бар, Брэгг талшықты торларын қолдана отырып [67]. Қуат шығыны әдетте 1 дБ-ден аз [68, 69]. Деректер жылдамдығы 40 Гбит/с және одан жоғары оптикалық жүйелерде жүйенің өнімділігін сақтау үшін дисперсияның реттелетін өтемақысы қажет болады. Сызықтық емес чирпирленген Брэгг торларын [70] немесе біркелкі емес температура градиентін [71] немесе тордың ұзындығы бойынша деформация градиенттерін [72,73] біркелкі реттеу арқылы қайта реттелетін чирп құрылғылары көрсетілді. Брэгг торларын қолданатын жүйелер көрсетілді 100 км – ден асу-40 Гбит/с беру жылдамдығы [66, б.29]. Болашақ жүйелер 160 Гбит/с жылдамдықпен жұмыс істейтінін ескере отырып, талшықты-оптикалық желі дәл дисперсиялық карталарды қажет етеді, сонымен қатар мұндай деректер жылдамдығында электронды баламалар жоқ және дисперсиялық өтемақы

толығымен оптикалық және табиғи түрде реттелуі керек. Мұндай қайталау жиілігінде 100 км-ге дейін демонстрациялар бар, олар қайта реттелетін Твиттер торларын қолданады [74]. Сонымен қатар, Брэгг торы тар жолақты толқын ұзындығын қажет ететін толқын ұзындығын бөлетін тығыз мультиплекстеу талаптарын қанағаттандырады. Өртүрлі ақпараттық арналар арасында өте жоғары әлсіреуді қамтамасыз ететін селективті компоненттер болады. Мұндай төмен шығынды талшықты-оптикалық сүзгілер үшін көптеген қолданбалар бар, олардың мысалдары күшейткіш жүйелердегі ASE шуын басу, талшықты күшейткіштердегі сорғыны қайта өңдеу және солитон импульсін басқару болып табылады.

Тор жазықтықтары температуралық және деформациялық бұзылуларға ұшырайды, сонымен қатар негізгі шыны материалы фазалық сәйкестік шарттарын өзгертеді және жетек, толқын ұзындығына тәуелді шағылысу қабілеті. Брэгг шағылысы пайда болатын толқын ұзындығын бақылау арқылы сыртқы бұзылыстың шамасын алуға болады. Бұл функционалдылық талшықты-оптикалық датчиктардың идеалды мақсатына жақындайды: абсолютті оқу механизмін қамтамасыз ететін кіріктірілген талшықты-оптикалық құрылымға ие болу. Сенсорлық сигналдарды сенімді анықтау өте маңызды және спектрлік кодталған ақпарат қарапайым декодтауды қамтамасыз ететін ең қарапайым тәсіл болып табылады, оған басқа тор да ықпал етуі мүмкін. Балама тәсіл-торды оптикалық талшықтың ұзындығын көрсететін шағылыстырғыш маркер ретінде пайдалану. Уақыт аймағындағы оптикалық өлшеулер ұзындықты немесе деформацияны дәл бақылауға мүмкіндік береді.

Негізгі материалдың механикалық беріктігін айтарлықтай жоғалтпай, талшықты өндіру процесінде торды талшықтың өзегіне фотографиялық басып шығаруға болады. Бұл құрылымдық бақылау үшін квази-үлестірілген сенсорлық желіні іске асыру үшін оптикалық талшықта алдын-ала анықталған жерлерде Брэгг торларының көп мөлшерін орналастыруға мүмкіндік береді. қарапайымдылық және төмен құны. Кәдімгі талшықты-оптикалық сенсорлық торларға қолданылатын негізгі аппаратура датчиктердің екі түрін біріктіруге мүмкіндік беретін торлы датчиктерді да қамтуы мүмкін екенін ескеру маңызды. Брэгг торлары аэроғарыш өнеркәсібінде және медицинада температура датчиктері ретінде пением ажыратымдылығымен динамикалық деформацияны өлшейтін датчиктер үшін өте қолайлы.

Олар сондай-ақ негізгі шыны материалының қасиеттеріне байланысты ұнғымаларды бұрғылау кезінде жоғары қысым сияқты агрессивті ортада жақсы жұмыс істейді.

Талшықты-оптикалық фотосезімталдық талшықты-оптикалық құрылғылар саласында жаңа дәуірді ашты [75], өйткені Брэгг торларының жаңа инновациялық құрылымдары телекоммуникация мен сенсорлық қосымшаларда қолданылады. Жолақты сүзгілерге арналған талшықты Брэгг торлары, дисперсияны өтеуге және ультра қысқа жұмыс кезінде импульстарды қалыптастыруға арналған чирпирленген торлар, сондай-ақ режим түрлендіргіштеріне арналған жарқыраған торлар сияқты құрылғылар кең

таралған қолданбаға айналуға. Талшықты-оптикалық зондтау – бұл Брэгг торлары ашылған алғашқы күндерден бастап қолданылатын аймақ, ал талшықты-оптикалық сенсорлық жүйелердің көпшілігі бүгінде Брэгг тор технологиясын қолданады.

### **1-бөлім бойынша қорытынды**

Диссертацияның бірінші бөлімінде талшықты жалпы оптикалық талшық туралы ақпараттық шолулар берілген. Оптикалық талшық түрлері мен жіктелуі кеңінен қарастырылды, сонымен қатар артықшылықтары мен кемшіліктері талданды. Оптикалық талшықтың негізгі жұмыс қағидалары көрсетіліп, Оптикалық талшықтарды анықтайтын негізгі стандарттар анықталды.

Берілген тарауда талшықты Брэгг торы датчиктеріне негізделген арнайы ғылыми жұмыстарға шолулар жасалды, Сонымен бірге, жалпы талшықты оптикадан бастау алатын тарихи деректер мен қазіргі заманауи мақалалар қарастырылды. Талшықты Брэгг торы көптеген зерттеулерде өзін тек қана прогрессивті жағынан көрсетілетіні байқалды.

Тарауда әртүрлі құрылғыларда оптикалық талшықтың көптеген салалардағы маңызды іс-әрекеттері қарастырылды. Сонымен бірге талшықты оптикалық Брэгг торларының негізгі теориялық мәліметтері көрсетілді. Талшықты Брэгг торларының типтері мен торды жазудың арнайы әдістері туралы, сонымен қатар Брэгг торларының деформациясы және температуралық сезімталдығы туралы мәліметтер көрсетілді.

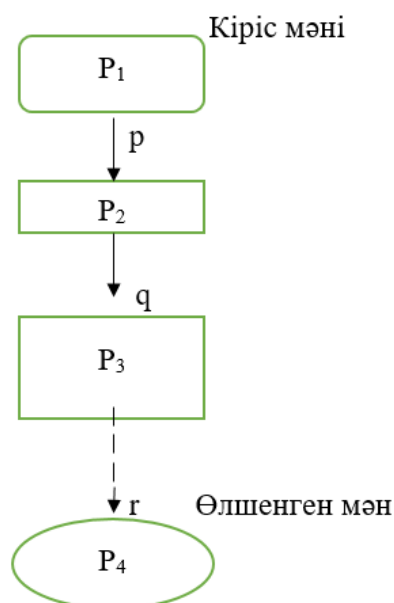
Сонымен, талшықты Брэгг торларының жалпы көптеген салаларда пайдалану мүмкіндігінің зор екендігі, сонымен қатар фотосезімталдық талшықты-оптикалық құрылғылар саласында жаңа дәуір технологиясы ретінде саналатындығы айқындалды. Оған себеп, Брэгг торларының жаңа инновациялық құрылымдары телекоммуникация мен сенсорлық қосымшаларда қолданылатындығы.

Бөлім бойынша негізгі зерттеу нәтижелері келесі ғылыми жариялымдарда келтірілген [32, б.24].

## 2 ТАЛШЫҚТЫ ОПТИКАЛЫҚ БРЭГГ ДАТЧИКТЕРІ НЕГІЗІНДЕ МЕХАНИКАЛЫҚ КЕРНЕУДІ ӨЛШЕУ ЖҮЙЕЛЕРІН ҚҰРУ ҚАҒИДАЛАРЫ ЖӘНЕ ТЕХНИКАЛЫҚ ЖОЛДАРЫ

### 2.1 Механикалық кернеуді өлшеудің қолданыстағы әдістерін талдау

Өндірістік және әлеуметтік инфрақұрылымның қарқынды дамуы, әсіресе соңғы онжылдықта басқару және автоматтандыру жүйелерін, өлшеу технологияларын үнемі жетілдіруді, датчиктерге арналған жаңа материалдарды, сондай-ақ өлшеу жүйелерінің жаңа түрлерін әзірлеуді талап етеді. Өлшеу жүйесін 2.1-суретте көрсетілгендей түрлендіруші буындар жиынтығы ретінде көрсетуге болады [64].



Сурет 2.1 – Өлшеу жүйесінің негізгі буындары

**Датчик:** датчиктің физикалық қасиеттерін өзгерте алатын өлшенетін шамамен тікелей байланыста болады.

**Сигналды қалыптастыру:** датчиктің шығысы жарамсыз пішінді өзгерте алады.

**Сигналды өңдеу:** аналогтық сигнал сүзуді, сызықтандыруды, цифрлық түрге түрлендіруді, телеметрия арнасы арқылы жіберуге дайындықты қажет етуі мүмкін.

**Телеметриялық деректерді беру арнасы:** сымды, пневматикалық, микротолқынды немесе талшықты.

**Ақпаратты көрсету:** аналогтық және сандық.

Өлшеу жүйесінің өлшенген мәні-бұл жүйенің әртүрлі буындарымен түрлендірілген кіріс сигналы. Өлшеу жүйесінің жұмысын қарастырған кезде жеке буындарды математикалық модельдеу пайдалы. Финкелиптейн және Уоттс [65] ұсынған бұл тәсіл әрбір блокты сипаттау үшін  $G_j$  тасымалдау функциясын

енгізуді қамтиды. Бұл жағдайда бүкіл жүйенің берілу функциясы мына өрнекпен анықталады:

$$P = P_1 P_2 P_3 P_4 , \quad (2.1)$$

және өлшенген Q мәні G кіріс сигналымен байланысты:

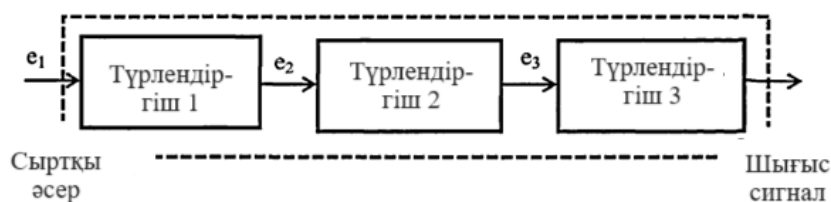
$$Q = G * P_1 P_2 P_3 P_4 \quad (2.2)$$

Жалпы тасымалдау функциясы жүйенің сезімталдығы болып табылады. 2.1-суреттегі жеке блоктарда кері байланыс тізбектері болуы мүмкін, бірақ олар P<sub>j</sub> блогының тиісті беріліс функциясында қарастырылады.

Өлшеу жүйесіндегі орталық орынды датчик алады, ол өлшенетін шамамен тікелей байланыста болатын, сыртқы әсерлерді қабылдайтын және оларға шығыс сигналының өзгеруімен жауап беретін құрылғы. Іс жүзінде датчик бастапқы сигналды түрлендіруді орындайды, содан кейін сигнал қажетті пішінде сигналды алу үшін өлшеу жүйесінің қалған бөлігімен өңделеді. Датчик сыртқы әсердің энергиясын ақпараттық шығыс сигналына тікелей түрлендіруге мүмкіндік беретін физикалық құбылыстарға құрылуы мүмкін. Бұл жағдайда біз тікелей әрекет датчиктерімен айналысамыз. Басқа жағдайларда датчик бірнеше түрлендіргіштерден тұруы мүмкін [66], содан кейін біз 2.2-суретте көрсетілгендей композиттік датчикпен айналысамыз.

Жоғарыда аталған классификация жалғыз өзі жұмыс жасауы мүмкін емес. Ғылыми әдебиеттерде датчиктерді жіктеудің әртүрлі жүйелері сипатталған.

Олардың кейбіреулерін осы диссертацияда зерттелген мәселеге байланысты келтірейік.



Сурет 2.2 – Кұрама датчик

Барлық датчиктерді белсенді және пассивті деп бөлуге болады. Пассивті датчик қосымша қуат көзін қажет етпейді, сыртқы әсердің өзгеруіне жауап ретінде оның шығысында әрқашан ақпараттық шығыс пайда болады. Ал белсенді датчик, керісінше, қозу сигналы деп аталатын сыртқы энергияның болуын талап етеді. Ақпараттық шығыс сигналын қалыптастыру кезінде мұндай датчик қозу сигналын түрлендіреді.

Анықтамалық нүктені таңдауға байланысты датчиктерді абсолютті және салыстырмалы деп бөлуге болады [64, б.384]. Абсолютті датчик сыртқы сигналды абсолютті бірліктерде шығарады, ал салыстырмалы датчиктың

көрсеткіштері өлшеу шарттарына байланысты. Р.Вайт белгілі бір тапсырма үшін маңыздылық дәрежесіне байланысты датчиктерді олардың сипаттамаларына қарай жіктеудің икемді сұлбасын ұсынды [67]. Жіктеу сұлбасы тиісті сипаттамаға сәйкес жіктеулерді қамтитын кестелер жиынтығынан тұрады.

Кесте 2.1– Өлшенетін шамалардың жіктелуі

Топ индексі	Өлшенетін шамалар тобы	Шама индексі	Өлшенетін шама
A1	Акустикалық	A1.1	Толқын амплитудасы, фаза, поляризация, спектр
		A1.2	Толқын жылдамдығы
A2	Биологиялық	A2.1	Биомасса (түрі, концентрациясы, жағдайы)
		A2.2	Басқалары
A3	Химиялық	A3.1	Компоненттер (түрі, концентрациясы, жағдайы)
		A3.2	Басқалары
A4	Электрлік	A4.1	Заряд, тоқ
		A4.2	Потенциал, потенциалдар айырмасы
		A4.3	Электр өрісі (амплитуда, фаза, поляризация, спектр)
		A4.4	Электр өткізгіштік
		A4.5	Диэлектрлік өткізгіштік
A5	Магниттік	A5.1	Магнит өрісі (амплитуда, фаза, поляризация, спектр)
		A5.2	Магнит ағыны
		A5.3	Магниттік өткізгіштік
A6	Механикалық	A6.1	Позиция (сызықтық және бұрыштық)
		A6.2	Жылдамдық
		A6.3	Жеделдету
		A6.4	Күш
		A6.5	Кернеу, қысым
		A6.6	Деформация
		A6.7	Масса, тығыздығы
		A6.8	Қозғалыс, сәт
		A6.9	Ағын жылдамдығы, масса шығыны
		A6.10	Пішіні, кедір-бұдыр, бағдар
		A6.11	Қаттылық, икемділік
		A6.12	Тұтқырлық
		A6.13	Құрылымның реттілігі, интеграциясы
A7	Оптикалық	A7.1	Толқын амплитудасы, фаза, поляризация, спектр
		A7.2	Толқын жылдамдығы
A8	Радиациялық	A8.1	Түрі
		A8.2	Энергия
		A8.3	Қарқындылығы
A9	Термиялық	A9.1	Температура
		A9.2	Ағын
		A9.3	Жылу өткізгіштік

Кесте 2.2– Датчиктерді сипаттама түрі бойынша жіктеу

Б1	Сезімталдық
Б2	Өлшенетін шамалар диапазоны
Б3	Тұрақтылық (қысқа мерзімді және ұзақ мерзімді)
Б4	Ажыратымдылық
Б5	Тапқырлық
Б6	Өнімділік
Б7	Сыртқы жағдайлар
Б8	Шамадан тыс жүктеме кезіндегі сипаттамалар
Б9	Пайдалану ресурсы
Б10	Кіріс мәндерінің пішімі
Б11	Құны, өлшемдері, салмағы

Кесте 2.3 – Датчиктерде қолданылатын анықтау әдістері бойынша датчиктерді жіктеу

В1	Биологиялық
В2	Химиялық
В3	Электрлік, магниттік немесе электромагниттік толқын
В4	Қыздыру, температура
В5	Механикалық ығысу немесе механикалық толқын
В6	Радиоактивтілік, сәулелену

Кесте 2.4 – Датчиктегі түрлендіру механизмдері бойынша датчиктерді жіктеу

Топ индексі	Өлшенетін шамалар тобы	Шама индексі	Өлшенетін шама
Г1	Биологиялық	Г1.1	Биологиялық өзгерістер
		Г1.2	Физикалық өзгерістер
		Г1.3	Тест-микроорганизмге әсері
		Г1.4	Спектроскопия
Г2	Химиялық	Г2.1	Химиялық өзгерістер
		Г2.2	Физикалық өзгерістер
		Г2.3	Электрохимиялық процесстер
		Г2.4	Спектроскопия
Г4	Физикалық	Г3.1	Термоэлектрлік
		Г3.2	Фотоэлектрлік
		Г3.3	Фотомагниттік
		Г3.4	Магнитоэлектрлік
		Г3.5	Серпімді-магниттік
		Г3.6	Термосерпімді
		Г3.7	Серпімді-электрлік
		Г3.8	Термомагниттік
		Г3.9	Термооптикалық
		Г3.10	Фотосерпімді

Кесте 2.5 – Материал түрі бойынша датчиктердің классификация

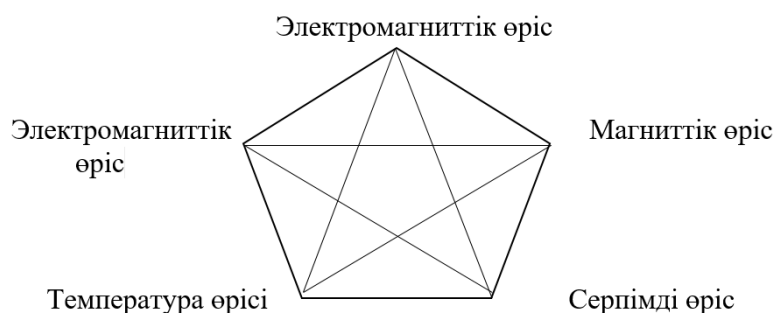
Д1	Бейорганикалық
Д2	Органикалық
Д3	Өткізкіштер
Д4	Изолятор
Д5	Жартылай өткізкіштер
Д6	Сұйықтық, газ және плазма
Д7	Биологиялық ұлпалар

Кесте 2.6 – Датчиктерді қолдану аймағы бойынша жіктеу

Е1	Ауыл шаруашылығы
Е2	Автокөлік өнеркәсібі
Е3	Құрылыс инжинирингі
Е4	Коммерция, қаржы
Е5	Энергетика
Е6	Тұрмыстық техника
Е7	Метеорология, қоршаған ортаны қорғау
Е8	Денсаулық сақтау, медицина
Е9	Ақпараттық телекоммуникациялық жүйелер
Е10	Өнеркәсіптік өндіріс
Е11	Қарулы күштер, армия, флот
Е12	Ғылыми зерттеулер
Е13	Ғарыштық жүйелер
Е14	Транспорт

2.1 кестеде датчиктерді өлшеу үшін қолданылатын шамалар топтарының тізімін қамтиды: акустикалық, биологиялық, химиялық, электрлік, магниттік, механикалық, оптикалық, радиоактивті, термиялық. Белгілі бір өлшенетін шаманы орнатқаннан кейін датчиктың сезімталдық, селективтілік, өнімділік сияқты сипаттамаларын анықтау қажет. Бұл сипаттамалар 2.2 кестеде келтірілген. 2.3 кестеде датчиктерді қолданылуын анықтау әдістері бойынша жіктеуді қамтиды. 2.4 кестеде датчиктердің бастапқы сигналды түрлендіру механизміне негізделген жіктелуі сипатталған. Механизмдердің әртүрлі топтарын сипаттау үшін графикалық сипаттаманы қолдануға болады. Мысалы, физикалық механизмдер тобы үшін әр механизм физикалық өрістер болып табылатын графиктің шыңдарын байланыстыратын сызықпен сипатталатын біртұтас, бағдарланбаған график құруға болады.





Сурет 2.3 – Түрлендірудің физикалық механизмдерінің графикалық сипаттамасы

Қарастырылған графикалық көрініс физикалық айнымалылар арасындағы екілік қатынастарды сипаттау үшін [68, 69] ұсынылған әдістің жеңілдетілген модификациясы болып табылады. Датчиктердің көпшілігінде әртүрлі материалдар бар. Осы белгі бойынша жіктеу 5-кестеде келтірілген. 4 және 5 кестелер, әдетте, датчик жасаушыларға арналған. 6-кестеде датчиктердің қолдану салалары бойынша жіктеу бар.

Болашақта біз осы жұмыс зерттеуге арналған талшықты-оптикалық датчиктерді жіктейміз және төменде температура мен деформацияны өлшеуге арналған қолданыстағы датчиктердің негізгі түрлерін атап өтеміз.

Ұсынылған классификацияға сәйкес деформация датчигі А6.6 индексіне сәйкес келеді. Ұсынылған сұлбаға сәйкес деформация датчиктерінің жіктелуі 1.4-суретте көрсетілген.

Деформация датчигі бастапқы түрлендіргіштен тұрады, оның құрамында сезімтал элемент, сигналды қайталама өңдеу сұлбасы, корпусың әр түрлі бөлшектері, оның ішінде датчикты объектімен герметикалық байланыстыру, сыртқы әсерлерден қорғау және ақпараттық сигналды шығару құрылғысы бар.



Сурет 2.4 – Деформация датчиктерінің жіктелуі

Кейбір датчиктердің басқалардан негізгі айырмашылықтары шектеулер болып табылады. Өлшеу, динамикалық және жиілік диапазоны, тіркеу дәлдігі-құрылымдар, рұқсат етілген пайдалану шарттары, массалық габариттік сипаттамалар – деформацияны электр энергиясына айналдыру принципіне тәуелді таяқшалар-сигнал. Оған мыналар жатады: тензометриялық, пьезорезистивті, сыйымдылық, индуктивті-резонанстық, иондаушы, пьезоэлектрлік және басқалар. Тензометриялық әдісте датчиктердің сезімтал элементтері негіз болып табылады-тензорездің деформациясы кезінде кедергінің өзгеру принципіне сүйенеді-серпимді Деформацияланатын элементке желімделген Тараптар. Тензорезистор арақатынаста сипатталған пьезорезистивті әсерге негізделген [70]:

$$\frac{DR}{R} = S_e e \quad (2.3)$$

мұндағы  $S_e$  - материалдың жүктеме сезімталдығының коэффициенті;  $e$  шамасы - деформациялар.

Кесте 2.7 – Жүктеме жасушаларына арналған материалдардың сипаттамалары

Материал	Жүктеме сезгіштік коэффициенті	Ескерту
Мыс-никель қорытпасы	2	Механикалық кернеудің кең диапазонында сезімталдық тұрақты 260 с дейінгі температурада пайдаланылады
Платина қорытпасы	4-6	Жоғары температура өлшемдерде қолданылады
Кремний	-100-ден 150-ге дейін	Жоғары сезімталдылық, үлкен кернеулерді өлшеуге жарамды

Соңғы уақытта пленка көлеңкелері кең таралды-зодатчиктер. Датчик жұқа пленка сезімталдығы-сыртқы әсерге (қысымға) жауап беретін элемент. Барбұл датчиктерді құрудың бірнеше нұсқалары, олардың аймақтарын анықтайды қолдану. Сонымен, екі фольга парағынан тұратын байланыс датчигі және тығыздағыштар қосу / өшіру функциясын қамтамасыз етеді, датчик негізде пьезорезистивті пленка жылы қозғалыстарды өлшеу үшін қолданылады миллиметрлік диапазонда, кремний пленкасының датчиктері қолданылады микро қосқыштардың сапасы.

Айта кету керек, бұл түрдегі датчиктер электрмен жабдықтауды қажет етеді-тропитания, сыртқы әсерлерге сезімтал, сондықтан өлшеу үшін АЖ-ны өнеркәсіптік қолданудың көпшілігінде агрессивті орта жағдайында- деформация түрлендіргіштері герметикалық металда қолданылады-тот баспайтын болаттан жасалған диафрагмасы бар шыны корпус, өлшенетін ортаның деформациясын (қысымын) беру. Жартылай өткізгіш – жүктеме жасушалары температураның

өзгеруіне сезімтал, сондықтан оларда температураны өтеу тізбектерін қамтамасыз ету қажет.

Пьезоэлектрлік әдіс тікелей пьезоэлектрлік әдіске негізделген пьезоэлементтің электр сигналын тудыратын әсері, про- оған әсер ететін күшке немесе қысымға қатысты. Меншікті Спектр-пьезогенератордың жиіліктері өрнегімен анықталады [71]:

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{c}{\rho}} \quad (2.4)$$

мұндағы n-гармоника нөмірі, l-пьезокристалл геометриясының параметрі, c-коэффициенті-серпимді деформация коэффициенті, ρ-кристалдың тығыздығы.

Сыртқы әрекеттің әсерінен күш жиілігі шамасына өзгеріс туындайды, оны көрсететін болсақ [72]:

$$\Delta f = F \frac{nKf_0^2 n}{l} \quad (2.5)$$

мұндағы, F-қолданылатын күш, K - тұрақты.

Пьезоэлектрлік датчиктер жылдам өзгертін импульстік деформацияларды өлшеу үшін қолданылады. Олар кең динамикалық және жиілік диапазоңдарында жүреді, сонымен қатар массасы жеңіл және өлшемдері жоғары сенімділікті болып келеді. 2.8 кестеде негізгі метрологиялық сипаттамалар келтірілген өнеркәсіптік деформация датчиктері көрсетілген [73].

Кесте 2.8 – Деформация датчиктерінің параметрлері

Датчик түрі	Деформация датчиктерінің параметрлері Деформация өлшеу диапазоңы(қысым)	Қате
Жүктеме ұяшығы	±0,6мм	1%
Сыйымдылық датчигі	0-ден 100 Мпа –ға дейін	±0,075%
Резонанстық датчик	0,01-ден 100 Мпа-ға дейін	±0,15%
Индуктивті күн ±0,075%	2кПа-дан 2Мпа-ға дейін	±0,5%
Пьезоэлектрлік датчик	30-дан 110 кПаға дейін	±0,2%

Жалпы, деформация мен температураны өлшеуге арналған датчиктердің қарастырылған түрлері бірқатар жалпы кемшіліктерге ие екенін атап өткен жөн. Ең алдымен, бұл температураның тұрақсыздығы, сыртқы ортаға тұрақсыздық және соның салдарынан төмен қызмет ету мерзімі. Мұндай датчиктер, әдетте, қосымша қуат желісін қажет етеді.

Объектілердің жай-күйін бақылау саласындағы перспективалы бағыттардың бірі дәстүрлі датчиктермен салыстырғанда олардың бірқатар артықшылықтарының арқасында талшықты-оптикалық датчиктерді пайдалану болып табылады, бұл олардың негізінде жоғары метрологиялық және

техникалық сипаттамалары бар жылдам әрекет ететін мониторинг жүйелерін құруға мүмкіндік береді.

## 2.2 Механикалық кернеуді өлшеуге арналған талшықты-оптикалық датчиктердің жіктелуі және салыстырмалы талдауы

Деформация мен температураны өлшеуге арналған талшықты-оптикалық датчиктердің жіктелуі және салыстырмалы талдауы алдыңғы параграфте деформация мен температураны өлшеудің қолданыстағы әдістері қарастырылған және дәстүрлі (талшықты емес) датчиктер механикалық физикалық және химиялық параметрлердің кең класын өлшеуге қабілетті екендігі көрсетілген [74] (2.9 кестені қараңыз). Инфрақұрылымның әртүрлі объектілерін бақылау мақсатында құрылымның белгілі бір учаскелерінде механикалық деформация мен температураны нақты уақыт режимінде өлшеу өте маңызды. Мұндай мониторинг объектілердің жай-күйін уақтылы бақылауға, сондай-ақ авариялық немесе аварияға дейінгі жағдайлар туындаған кезде шаралар кешенін қабылдауға мүмкіндік береді.

Кесте 2.9 – Өлшенетін параметрлердің негізгі топтары

Параметрлер тобы	Параметрлер тізімі
Механикалық	Кернеу, деформация, орын ауыстыру, жарықтың пайда болуы, қысым, жүктеме
Физикалық	Температура, ылғалдылық, кеуекті қысым
Химиялық	Хлоридтердің, сульфаттардың өткізгіштігі, карбонизация дәрежесі, қышқыштық деңгейі, арматура мен болаттың тотығу дәрежесі, ағаштың ыдырау дәрежесі

Ұсынылған параметрлердің мониторингі екі деңгейде мүмкін: материалдың күйін бақылау және құрылымның күйін бақылау. Материалдың күйін бақылау жағдайында датчиктер сынақ үлгісінің ішіне орнатылады. Мұндай бақылау, ең алдымен, композициялық материалдарға тән. Құрылымды бақылау жағдайында датчиктер белгілі бір элементтерге орнатылады және олардың параметрлеріндегі өзгерістерді жазады.

Талшықты-оптикалық датчиктердің артықшылықтарын атап өту керек, олар көбінесе оптикалық талшықтың сәйкес қасиеттеріне байланысты [73, б.520]:

- аз шығындар (кемінде 0,154 дБ/км);
- шағын (шамамен 125 мкм) диаметрі;
- жеңіл (шамамен 30 г/км) масса;
- серпімділік (ең аз иілу радиусы 2 мм);
- механикалық беріктік (шамамен 7 кг созылу жүктемесіне төтеп береді);
- өзара интерференцияның болмауы (тоғысуы);

– индуктивті емес (электромагниттік индукцияның әсері іс жүзінде жоқ, демек, найзағай разрядтарымен, электр желілеріне жақындығымен, электр желісіндегі ток импульстарымен байланысты теріс құбылыстар);

– жарылыс қауіпсіздігі;

– жоғары электр оқшаулағыш беріктігі;

– коррозияға төзімділігі жоғары, әсіресе химиялық еріткіштерге, майларға, суға.

Талшықты-оптикалық датчиктерді пайдалану тәжірибесінде соңғы төрт қасиет үлкен маңызға ие. Серпімділік, кіші диаметр және масса сияқты қасиеттер де пайдалы. Төменде көрсетілгендей, талшықты-оптикалық датчиктерде оптикалық талшықты жай ғана тарату желісі ретінде пайдалануға болады немесе ол датчиктің ең сезімтал элементі рөлін атқара алады. Соңғы жағдайда талшықтың электр өрісіне (Керр эффектісі), магнит өрісіне (Фарадей эффектісі), дірілге, температураға, қысымға, деформацияларға (мысалы, иілу) сезімталдығы қолданылады. Оптикалық байланыс жүйелеріндегі осы әсерлердің көпшілігі кемшіліктер ретінде бағаланады, ал датчиктерде олардың сыртқы түрін дамыту қажет артықшылық ретінде қарастырылады. Қазіргі заманғы талшықты-оптикалық датчиктер әртүрлі параметрлерді өлшеуге мүмкіндік береді: қысым, температура, қашықтық, кеңістіктегі жағдай, айналу жылдамдығы, сызықтық жылдамдық, үдеу, тербеліс, масса, дыбыс толқындары, сұйықтық деңгейі, деформация, сыну көрсеткіші, электр өрісі, электр тогы, магнит өрісі, газ концентрациясы, сәулелену дозасы және т.б.

Талшықты-оптикалық датчиктердің жіктелуі әдетте таралу дәрежесіне қарай, яғни датчиктің сезімтал аймағының ауқымына қарай жүзеге асырылады. Бір нүктеде өлшеулер жүргізетін нүктелік датчиктер, сезімтал аймақ соңғы кеңейтілген аймақты білдіретін ұзартылған базалық датчиктер және сезімтал элементі оптикалық талшықтың өзі болатын таратылған датчиктер бар. Әрі қарай, әр топта датчиктер физикалық принципке байланысты ажыратылады.



Сурет 2.5– Деформацияны өлшеуге арналған талшықты-оптикалық датчиктердің жіктелуі [74]

Интерферометриялық датчик – микрометрлік диапазондағы ажыратымдылық шегі, ұзақ мерзімді тұрақтылығы және температураға сезімталдығы бар ұзартылған талшықты-оптикалық датчик.

Датчиктің жұмыс істеу принципі 2.6 -суретте көрсетілген [69, б.354].

Датчик құрылымға орнатылған бір режимді оптикалық талшықтардан тұрады, олардың күйін бақылау керек. Өлшеу деп аталатын талшықтардың бірі құрылыммен тікелей байланыста болады (талшықтың ұштары алдын-ала бекітілген), екіншісі тірек деп аталады, сол түтікке еркін орналастырылған. Барлық құрылымдық деформациялар осы екі талшық арасындағы оптикалық қозғалыс айырмашылығының өзгеруіне әкеледі. Өлшеу үшін қос интерферометр қолданылады.

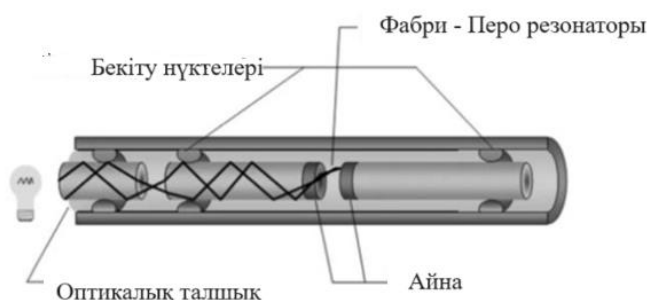
Майкельсон сканерлеу айнасымен. Бірінші интерферометр екі талшықтан тұрады, ал екіншісі өлшеу модулінде орналасқан және сканерлеу айнасының көмегімен екі қолдың арасындағы белгілі айырмашылықты орнатуға болады.

Көздің когеренттілігінің төмендеуіне байланысты (1,3 мкм толқын ұзындығында жарық шығаратын диод қолданылады), интерференция үлгісі екінші интерферометр өлшенетін және тірек талшығы арасындағы қозғалыс айырмашылығын дәл өтеген кезде ғана анықталады.

Сипатталған жүйенің негізгі кемшілігі – датчиктің базальқ ұзындығының төмендеуімен өлшеу дәлдігінің төмендеуі, бұл датчикті жергілікті жерлерде деформацияны өлшеу тапсырмалары үшін пайдалануға жол бермейді.

Фабри-Перо интерферометріне негізделген датчик жұқа кварц түтігі болып табылады, оған 10 мкм ауа аралығымен орнатылған талшықтың екі сынған бөлігі салынған. Талшық арқылы өтетін сәуле шекарадан шағылысады шыны-ауа және ауа шыны, бұл кері шағылысқан кедергі сигналының пайда болуына әкеледі. Бұл сигналдың өлшемдері талшықтар арасындағы ауа саңылауының енін есептеуге

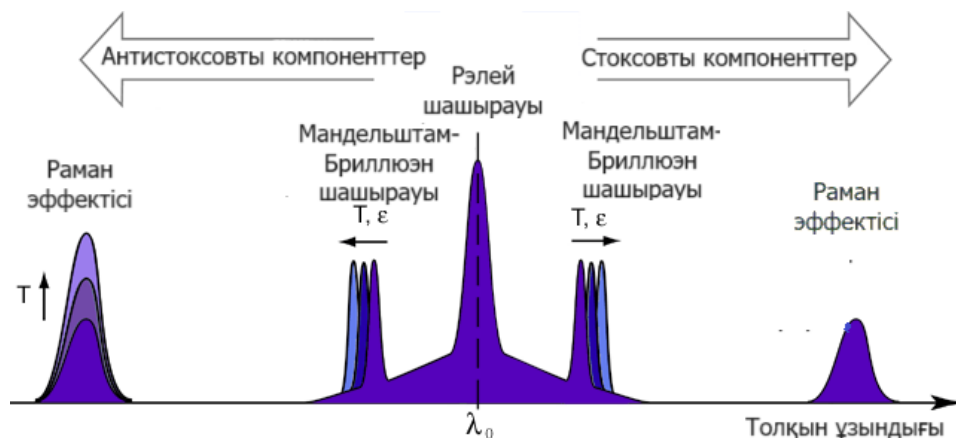
мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде құрылымдық деформация мөлшерімен байланысты. Датчиктің құрылымы сұлбалық түрде 1.8-суретте көрсетілген [73, б.520].



Сурет 2.6– Фабри-Перо интерферометріне негізделген датчиктің жұмыс істеу принципі

Брэгг датчиктері оптикалық талшықтың өзегінде индукцияланған арнайы мерзімді құрылым арқылы оптикалық сәулеленудің тар спектрлік диапазонында шағылысуға негізделген деформация датчиктерінің ең перспективалы түрлерінің бірі болып табылады. Датчиктің негізгі артықшылығы ақпаратты тасымалдаушы оптикалық сәулелену жиілігі (толқын ұзындығы) болып табылады. Ол ешқандай сыртқы әсерлер әсер етпейтін, сызықты емес әсерлерді қоспағанда, қолдану салдарынан әлсіз көрінеді және өлшеу жүйелеріндегі төмен қуатты оптикалық сәулелену болып табылады.

Шашырау әсерлеріне негізделген датчиктер. Шашырау әсерлеріне негізделген датчиктерді құрудың алғашқы идеялары оптикалық рефлекторлардың пайда болуымен пайда болды. Талшықты байланыс желілеріндегі ақауларды анықтау үшін қолданылатын Рэлей шашырау эффектісіне негізделген құрылғылар. Бриллюэн және Раман шашырау эффектілері салыстырмалы түрде жақында таратылған өлшеу технологиясында қолданылды [69, б.354].



Сурет 2.7– Оптикалық талшықтағы жарықтың шашырау спектрі

Раман шашырауы молекулалардың температуралық ауытқуларынан туындайды. Сәйкесінше, кері шашырау сигналы шашырау орын алған жердегі жергілікті температура туралы ақпаратты қамтиды. Бұл жағдайда антистокстың шашырау компонентінің амплитудасы температураға қатаң тәуелді болады, ал Стокс компоненті үшін мұндай тәуелділік байқалмайды. Стокс пен антистокс компоненттерінің қарқындылық қатынасы [74, б. 272] өрнекпен анықталады:

$$R_r = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_\alpha}\right)^4 \exp\left\{-\frac{hcv}{kT}\right\} \quad (2.6)$$

мұндағы  $\lambda_s$  - Стокс компонентінің толқын ұзындығы;

$\lambda_\alpha$  - антистокс компонентінің толқын ұзындығы.

Осылайша, Раманның шашырауын өлшеу әдісі сәйкес спектрлік компоненттерді сүзу және анықтаудан тұрады. Раман шашырауының амплитудасы айтарлықтай төмен болғандықтан, шашыраңқы сәулеленудің қарқындылығын арттыру үшін өлшеу мақсатында мультимодалы талшық қолданылады.

Бриллюен шашырауы оптикалық талшықта гигагерц диапазонындағы температуралық тербелістерден туындаған акустикалық толқындардың болуына байланысты пайда болады.

Шашырауды акустикалық толқындар тудыратын динамикалық тордағы жарықтың дифракциясы ретінде елестетуге болады. Дифракцияланған сәулелену Доплер әсерін де сезінеді, өйткені акустикалық толқын талшық бойымен соңғы жылдамдықпен таралады, бұл жылдамдық ортаның тығыздығына байланысты, бұл өз кезегінде оның температурасы мен ішкі кернеуімен анықталады. Осылайша, Бриллюеннің шашырау сигналын анықтау оптикалық талшық бойымен температура мен деформацияның таралуы туралы ақпарат береді.

Бұл жүйелердің кемшіліктері шашырау эффектілерінің негізінде қажетті сигнал-шу қатынасын қамтамасыз ету үшін жеткілікті ұзақ өлшеу уақыты (шамамен 3 минут) қажет. Бұл жылдам процестерді өлшеуге мүмкіндік бермейді.

Бұған қарсы Брэгг торларындағы жүйелер жоғары жылдамдыққа ие (өлшеу уақыты 1 мс дейін).

Сонымен қатар, Брэгг торлары негізіндегі өлшеу жүйелерінің құны шашырау әсерлеріне негізделген жүйелердің құнынан он есе аз.

Жоғарыда айтылғандарға сүйене отырып, жүйелердің әрқайсысының өзіндік қолданылу саласы бар: шашырау эффектілеріне негізделген жүйелер үшін бұл өте созылған объектілердің күйін бақылау (ұзындығы 1 км — ден асады), ал Брэгг торларындағы жүйелер температура мен деформация параметрлерін бақылау қажет кеңістік нүктелері белгілі болған жағдайда ғана қолданыла алады.

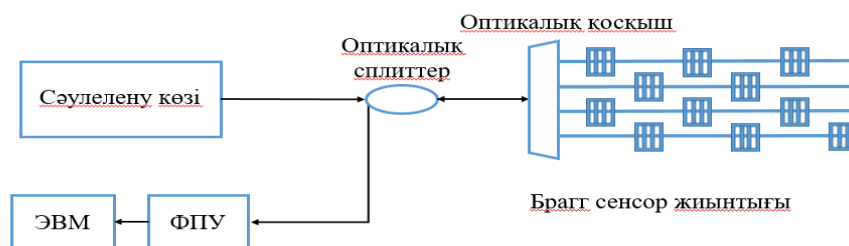
Көптеген объектілерде критикалық деформациялар орын алу ықтималдығы жоғары болатын жерлер алдын ала белгілі болғандықтан, сондай-ақ Брэгг датчиктеріне негізделген өлшеу жүйелерінің ықтимал жоғары



жылдамдығына байланысты жүйенің бұл түрі келесі зерттеу үшін таңдалды: деформация мен температураны өлшеу әдісін әзірлеу, сондай-ақ ұсынылған әдісті жүзеге асыратын жоғары жылдамдықты деформация мен температураны өлшеу жүйесінің тәжірибелік үлгісін жасау.

### 2.3 Оптоталшықты Брегг торлары негізінде деформацияны өлшеуге арналған талшықты-оптикалық жүйелерді құрудың қолданыстағы әдістерін талдау

Деформация датчиктерін талдау өлшенетін параметрлер туралы ақпаратты қамтитын датчиктерден алынған оптикалық сигналдарды қабылдауға және өңдеуге арналған өлшеу жүйесін енгізу мәселесін қарастыруға көшуге мүмкіндік береді. Өлшенетін параметрлер туралы ақпаратты қамтитын оптикалық сигналдардың негізгі параметрі датчиктерден шағылысқан сәулеленудің толқын ұзындығы болып табылады. Толқын ұзындығын өлшеу үшін жалпылама құрылымдық сұлбасы 2.8-суретте берілген өлшеу жүйесін құрылымы көрсетілген.



Сурет 2.8 – Өлшеу жүйесінің жалпыланған құрылымдық сұлбасы

Мұндай өлшеу жүйесінің негізгі құрамдас бөліктері сәулелену көзі, оптикалық бөлгіш, оптикалық ауыстырып-қосқыштар жүйесі, Брегг датчиктерінің жинағы, фотодетектор және компьютер болып табылады. Оптикалық бөлгіштің кірісіне көзден сәуле түседі, ол оптикалық қосқыш арқылы өтіп, сәйкес өлшеу арнасына түседі және әр түрлі орталық резонанстық толқын ұзындығы бар Брегг торларының жиынтығы арқылы дәйекті түрде өтеді. Шағылысқан радиацияталшықты-оптикалық торлар жиынтығы фотодетектормен жазылады және орталық резонанстық толқын ұзындықтарының ығысуы негізінде Брегг торларының температурасы мен деформациясы туралы қорытынды жасалады. Сондай-ақ торлар жиынтығы арқылы өтетін сәулеленуді тіркеуге болады. Өлшеу жүйесінің техникалық сипаттамаларын анықтайтын ең маңызды процедура – Bragg датчиктерінен сұрау. Оны әртүрлі әдістер арқылы жүзеге асыруға болады. Датчиктерді сұрау үшін қолданылатын негізгі әдістер, сондай-ақ олардың сипаттамалары 14-кестеде жинақталған [73].

Кесте 2.9 – Талшықты оптикалық Брэгг датчиктерін сұрау әдістері

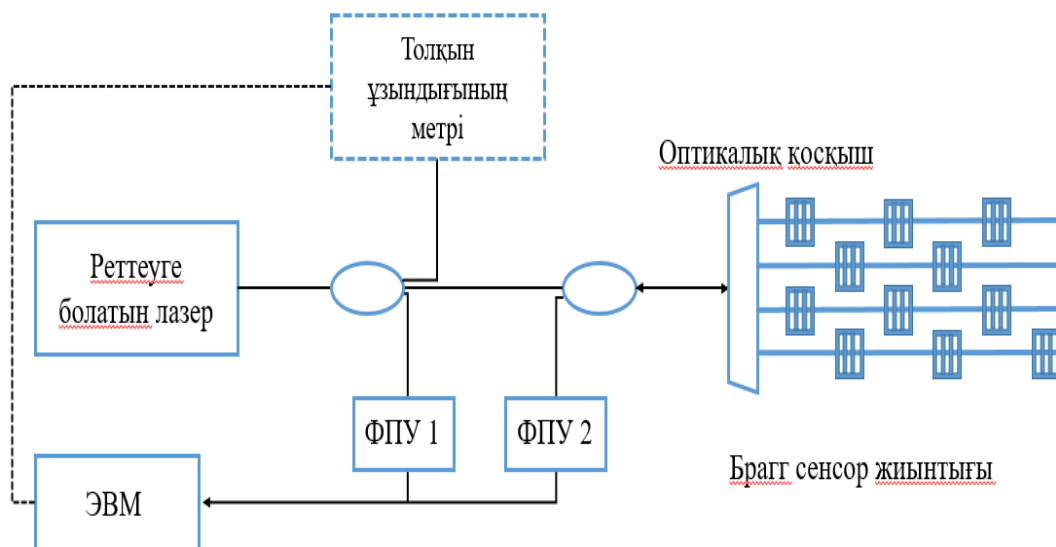
Әдіс	слот сүзгісін қолдануға негізделген әдіс	реттелетін сүзгіге негізделген сұрау әдісі	интерферометриялық әдіс	реттелетін лазерлік сұрау әдісі	спектр анализаторы на негізделген зерттеу әдісі
Ажыратымдылық диапазоны	$10^2 - 10^3$	$10^3 - 10^4$	$10^3 - 10^4$	$10^3 - 10^4$	$10^3 - 10^4$
Өлшеу жылдамдығы, Гц	200	500	500	50	$5 \cdot 10^4$
Ұзақ мерзімді тұрақылқ	Сүзгіні тұрақтандыру қажет	Сүзгіні тұрақтандыру қажет	Температураның ауысуын өтеу үшін тірек торы қажет	жақсы	жақсы
Толқын ұзындығын бөлу үйлесімді	төмен	жоғары	жоғары	жоғары	жоғары
Ықтимал құны	төмен	Орташа	төмен	жоғары	орташа

Ұсынылған жалпылама сұлбаға және Брэгг датчиктерін сұрау әдістерінің ұсынылған классификациясына сүйене отырып, деформация мен температураны өлшеуге арналған талшықты-оптикалық жүйелерді құрудың қолданыстағы әдістері үш топқа бөлуге болады:

- 1) тар жолақты сәулелену көзімен (лазермен) спектрді сканерлеу және оны кең жолақты қабылдағышпен қабылдау;
- 2) кең жолақты көзді пайдалану, бұл ретте спектр бойынша сканерлеу тар жолақты қабылдағыш (немесе сүзгі) арқылы жүзеге асырылады;
- 3) реттелетін және сүзгілеуші элементтерді пайдаланбай кең жолақты сәулелену көзі мен қабылдағышты пайдалану. Ұсынылған әдістер топтарының әрқайсысында өлшеу жүйесін құру сұлбаларын талдау, оның негізгі техникалық және метрологиялық сипаттамаларын, оның ішінде өнімділік параметрін бағалау қажет.

2.3.1. Толқын ұзындығы бойынша реттелетін сәулелену көздерін пайдалана отырып, деформация мен температураны өлшеу жүйесін құру әдісі

Брэгг датчиктерін сұрауға арналған сәулелену көзі ретінде компьютерден сигнал арқылы реттелетін лазер көзін пайдалануға болады. Содан кейін уақыттың әр сәтінде сәулеленудің толқын ұзындығы белгілі болады, тек толқын ұзындығының әрбір мәні бойынша әрбір арнадағы шағылысқан сәулеленудің қарқындылығын бекіту керек [75]. Осы мақсаттар үшін сіз бір сайтты фотодетектор құрылғысын (ФҚ) пайдалана аласыз. 1.19-суретте осы әдісті суреттейтін диаграмма көрсетілген. ФҚ1 сәулелену көзінің қарқындылығының тұрақсыздығынан туындайтын қатені жою үшін қажет. ФҚ2 датчиктерден көрінетін сигналдардың қарқындылық мәнін тіркейді.



Сурет 2.9 – Реттелетін лазердің көмегімен сигналды жазу әдісін анықтайтын блок-сұлба

Реттелетін лазер ретінде бір жиілікті реттелетін эрбийум талшықты лазерді қолдануға болады [76]. Мұндай лазердегі толқын ұзындығын реттеу компьютермен басқарылатын пьезожетегі арқылы резонатордың ұзындығын өзгерту арқылы жүзеге асырылады. Бұл сұлбаның артықшылығы кез - келген фильтрлеуші компоненттердің болмауына байланысты сигнал-шуылдың жоғары қатынасы. Дегенмен, сұлбаның лазердің шектеулі баптау диапазонымен, сондай-ақ сипатталған эксперимент үшін 2,3 nm немесе 0,18 °C болатын пьезожетектің қателігімен байланысты бірқатар кемшіліктері бар.

Бөлінген кері байланысы бар реттелетін лазерді пайдалану 1536 ± 1544 nm диапазонында баптауға мүмкіндік береді. 2000 мс диапазонындағы деформацияны өлшеу ± 0,76 мс рұқсат шегімен шамамен 10 мс оқу ұзақтығымен орындалды.

Сонымен қатар, қазіргі заманғы жартылай өткізгіш лазерлерді Bragg датчиктеріне сұрау салу көздері ретінде де пайдалануға болады. Олардың жақсы өнімділік сипаттамалары бар: жоғары тұрақтылық, төмен қуат тұтыну, ұзақ қызмет ету мерзімі, кең баптау диапазоны: 300-ден 300-ге дейінгі спектрлік диапазонда 110 nm-ге дейін. 3000 nm, салыстырмалы түрде жоғары толқын ұзындығын реттеу жылдамдығы (2000 nm/c дейін).

Қарастырылып отырған әдістің өнімділігін бағалау кезінде мынаны атап өткен жөн Bragg датчиктерінің сынама алу жиілігі баптау уақытымен анықталады - жұмыс спектрінің диапазонында лазерлік:

$$f_k = \frac{u\lambda}{\Delta\lambda} \quad (2.7)$$

мұндағы,  $f_k$  – бір өлшеу арнасындағы датчиктердің іріктеу жиілігі;  
 $\Delta\lambda$  – лазерлік баптау жылдамдығы;  
 $\Delta\lambda$  – жұмыс спектрінің диапазоны.

Типтік мәндер = 2000 нм/с және = 40 нм үшін біз сынама алу жиілігін = 50 Гц аламыз, бұл деформация мәні 3-6 кГц жиілікте өзгерген кезде жоғары жиілікті жүктемелерді бақылау үшін жеткіліксіз.

2.3.2. Кең жолақты сәулелену көздерін пайдалану арқылы деформацияны өлшеу жүйесін құру әдістері

Кең жолақты сәулелену көзін пайдаланған кезде, негізінен, бір арнадағы барлық датчиктердің сигналын бір уақытта өлшеуге болады, сондықтан сұрау әдістерінің бұл тобы жоғары өнімділікті жүзеге асырады. Дегенмен, бұл әдістер динамикалық диапазонға шектеу қояды, өйткені кең жолақты сәулелену көздері реттелетін қарағанда бірнеше рет төмен спектрлік энергия ығыздығына ие. Оптикалық спектр анализаторы ретінде радиациялық қабылдағышпен бірге жұмыс істейтін әртүрлі спектрлік сүзгілерді қолдануға болады: кең жолақты (саңылау) сүзгі, монохроматор, сканерлеуші Fabry-Perot интерферометрі. Енді ең ұтымды өлшеу сұлбаларын қарастырайық. 15-кестеде кең жолақты көздерді және әртүрлі реттелетін элементтерді пайдалану негізінде салынған өлшеу жүйелерінің негізгі параметрлері көрсетілген.

Кесте 2.9 – Кең жолақты сәулелену көзінің көмегімен өлшеу жүйелерін құрудың негізгі әдістерінің параметрлері

Параметрі	Өлшеу жүйесін құру әдісі		
	Кең жолақты сыңылау сүзгі	Монохроматор	Фабри-Перот интерферометрі
Өнімділік, мс	1	2.5	0,8
Дауыс беру жылдамдығы, Гц	10	200	200

Бұл бір учаскелік фотодетекторы бар монохроматорды қолдану арқылы Брэгг датчиктерін сұрау әдісі жағдайында спектр дифракциялық тордың айналуына байланысты фотодетектордағы сигнал қуатын өлшеу арқылы жазылады.

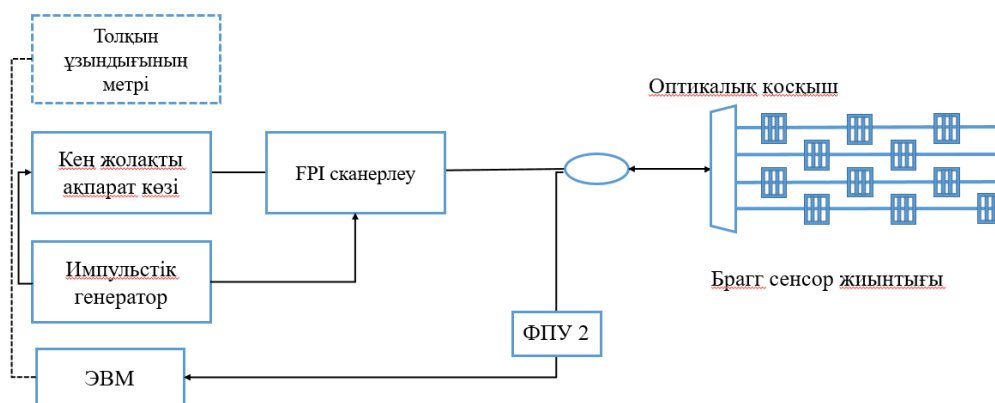
Бұл өлшеу әдісінің ерекшеліктері мыналарды атап өтуге болады:

- резонанстық толқын ұзындығын өлшеудегі салыстырмалы үлкен қателік, ол 22...20 пм;
- кең жұмыс спектрлік диапазоны 40...80 нм;
- датчиктердің 70...100 Гц дейінгі орташа сұрау жиіліктерін жүзеге асыру;
- төмен динамикалық диапазон 10...15 дБ.

Осы ерекшелікке сүйене отырып, біз осы әдіспен салынған өлшеу жүйелерін орташа салыстырмалы түрде төмен дәлдікпен деформацияны өлшеу жағдайында ұтымды пайдалануға болады деген қорытынды жасауға болады.

Фабри - Перо интерферометрін сканерлеу арқылы Брэгг датчиктерын сұрау әдісі

Бұл әдісті суреттейтін диаграмма 2.10 суретте көрсетілген. Бұл сұлбада СКҚ сәулеленуі радиацияның қайта SLD-ге шағылуын және шашырауын болдырмайтын оптикалық оқшаулағыш құрылғыға түседі. Оптикалық бөлгіш арқылы өткеннен кейін датчиктерден шағылысқан сәулелену 1...N сканерлеуші Фабри-Перо интерферометрінің кірісіне түседі [77].



Сурет 2.10 – Деформация мен температураны өлшеуге арналған жүйенің құрылымдық сұлбасы

Оның пьезокерамикалық жетегіне қолданылатын кернеуге байланысты интерферометрдің берілу спектрі өзгереді, яғни интерферометр реттелетін сүзгі ретінде жұмыс істейді және жіберілген сәулелену бір учаскелік FPU арқылы жазылады. Сканерлеу жиілігі  $f$  сканерлеуші интерферометрді, қуат спектрлік тығыздығы  $S$  сәулелену көзін), шағылу коэффициенті  $R$  және спектр ені датчиктерін пайдаланған жағдайда датчиктерден шағылған сәулелену энергиясын анықтауға болады:

$$E_R = \frac{RS\lambda\Delta\lambda_{FBG}}{f} \quad (2.8)$$

Сканерлеу сүзгісі алынған  $E_R$  энергиясын одан әрі шектейді, оны формула бойынша анықтауға болады:

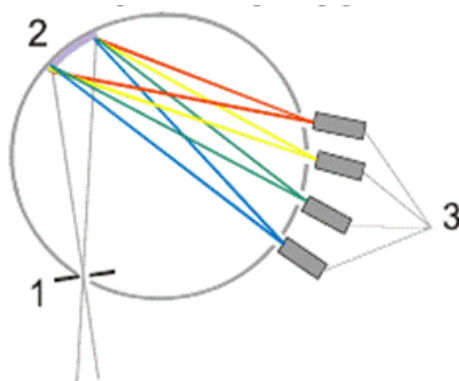
$$E_D = \frac{E_R\Delta\lambda_f}{\lambda_s} \quad (2.9)$$

мұндағы  $\Delta\lambda_f$  - сканерлеу ауқымы;  
 $\lambda_s$  - сүзгі өткізу жолағы.

Осылайша, егер сүзгі өткізу қабілеттілігі сканерлеу диапазонының 1%-ын құраса, онда анықталған сәулелену энергиясы 100%-ға жақын шағылысу қабілеті бар Брегг торында көрсетілген энергияның шамамен 1%-ын құрайды. Жүйенің жылдамдығы коммерциялық өндірілген құрылғылар үшін шамамен 300 Гц құрайтын Фабри - Перо интерферометрінің сканерлеу жиілігімен анықталады; кейбір жағдайларда жиілік 1 кГц-ке дейін жетуі мүмкін.

2.3.3. Кең жолақты сәулелену көзі мен қабылдағыш негізінде деформация мен температураны өлшеу жүйесін құру әдісі

Өлшеу жүйелерін олардың өнімділігі тұрғысынан құрудың ең перспективалы сұлбалары Брегг датчиктерінен шағылысқан сәулеленудің толық спектрін бір мезгілде тіркейтін сұлбалар болып табылады. Шешімдердің бірі – полихроматорды қолданатын сұлба, оның типтік құрылғысы 2.10 суретте көрсетілген.



1 - кіріс саңылауы, 2 - дифракциялық тор, шығу саңылаулары мен детекторлар.

Сурет 2.10 – Полихроматордың блок-сұлбасы (ПЗС матрицасының әрбір пикселі белгілі бір спектрлік диапазонды тіркейді)

Бұл құрылғыларда әртүрлі толқын ұзындығы бар сәулелер әртүрлі бұрыштардағы дифракциялық тордан шағылысады. Содан кейін сәулелену ПЗС матрицасына бағытталады. Нәтижесінде CCD матрицасының әрбір пикселі спектрдің өз аймағын тіркейді. Бұл жазу әдісінің ерекшелігі спектрдің псевдодискретті түрде жазылуында [74, 54 б.83]. Бұл көп элементті PD әрбір элементі реттелетін лазердің көмегімен шағылысу спектрін ұқсас зерттеумен салыстырғанда айтарлықтай кеңірек спектрлік диапазонда шағылыстырудың спектрлік тәуелділігінің мәнін біріктіретінін білдіреді. Бұл қазіргі реттелетін лазерлердің лазерлік сызығының ені 0,03...0,1 пм, ал дифракциялық спектрометрлердің ең жақсы үлгілерінің рұқсат ету шегі 20...100 пм болатындығына байланысты. Сағат 13.00 реттілігінің қателігі және 0.1 пм рұқсат шегі қабылдағыш қабылдайтын сигналдарды өндеудің арнайы алгоритмдері арқылы қол жеткізіледі, мысалы, Брегг толқын ұзындығының максимумдарын іздеудің бес нүктелік алгоритмі жиі қолданылады [76, б.282].

Осы әдісті қолдану арқылы құрастырылған жүйелердің өнімділігін талдау кезінде әдіс көп элементті фотодетекторлық құрылғының шуымен шектелген потенциалды жоғары өнімділікке ие деп қорытынды жасауға болады. Bragg датчиктерінің іріктеуінің шекті жиілігін бағалауға болады өрнегін пайдаланып жетекші [78]:

$$f_k = \left( \frac{P_{\text{куат}} \cdot k}{N_{\text{пикс}} \cdot P_{\text{шум}}} \right)^2 \quad (2.10)$$

мұндағы,  $P_{\text{ист}}$  – қуат көзі,

$k$  – жүйедегі қуат жоғалтуларын сипаттайтын коэффициент;

$N_{\text{пикс}}$  – көп элементті қабылдағыштың пикселдер саны;

$R_{\text{шум}}$  – жиілік диапазонына нормаланған шуға баламалы қуат.

Әдеттегі сәулелену көзі үшін  $P_{\text{ист}} = 4$  мВт, жоғалту коэффициенті  $k = 0,02$ ; пикселдер саны  $N_{\text{пикс}} = 512$ ; шуға эквивалентті қуат  $R_{\text{шум}} = 1$  нВт// Гц жиілік жолағына дейін төмендетілді, біз өнімділіктің бағасын аламыз  $f_k = 24$  кГц.

Потенциалды өнімділіктің нәтижелік бағасы бірқатар факторларды, соның ішінде күшейткіш шуымен, көп элементті қабылдағыштан сигналды оқу әдісімен және көп арналы жүйеде оптикалық қосқыштың болуымен байланысты факторларды ескермейді. Көрсетілген факторларды ескере отырып, Брэгг датчиктерінің максималды іріктеу жиілігінің төмендеуіне әкеледі, бірақ алынған бағалау ықтимал өнімділік туралы түсінік береді.

Айта кету керек, InGaAs құрылымдарынан жасалған көп элементті FPU қазіргі уақытта 900-ден 2000 нм-ге дейінгі спектрлік диапазон үшін шығарылады. Өлшеу жүйесін жобалау кезінде кең спектрлік диапазонда Bragg датчиктерінен шағылған сәулелену спектрін оқу үшін фотодиодтар сызығын қолдану жүйеде орналастырылған датчиктердің санын көбейтуге мүмкіндік береді.

Жалпы алғанда, өлшеу жүйелерін құрудың қарастырылған әдісі үшін келесі артықшылықтарды атап өтуге болады:

- 1) өлшеудің жоғары жиілігі (4-6 кГц дейін);
- 2) қолданылатын аса люминесцентті диод көздерінің түрі мен санымен анықталатын кең жұмыс спектрлік диапазоны (0 - 80 нм).

Осылайша, бұл әдісті өлшеудің жоғары жиілігімен деформациялардың өзгеруін бақылау қажет тапсырмалар үшін ұтымды пайдалануға болады.

## **2.4 Талшықты оптикалық датчиктердің мониторинг саласында қолданудың әдістері**

Қазақстан Республикасының құрылыс нормалары ҚР ҚН 3.03-12-2013 Қазақстан Республикасы Ұлттық экономика министрлігі Құрылыс, тұрғын үй-коммуналдық шаруашылық істері және жер ресурстары басқармасы комитетінің 2014 жылғы 29 желтоқсандағы № 156-НҚ бұйрығымен бекітілген. Ғимараттар мен құрылыстардың инженерлік жүйелерін бақылау мен басқарудың құрылымдық жүйесі. Жалпы талаптар. және әртүрлі санаттарға таралады

ғимараттар мен құрылыстардың инженерлік жүйелерін мониторингілеу мен басқарудың құрылымдық жүйелерімен жарақтандыруға жататын ықтимал қауіпті объектілердің, ғимараттар мен құрылыстар.

Ғимараттар мен құрылыстарға қатысты бақылау жүйесі бұл жүйе техникалық жай-күйді визуалды және аспаптық бақылау қолданыстағы ғимараттар мен құрылыстардың конструкциялары ықтимал теріс әсерлерді жедел анықтау және оларға жою.

Мониторингті жүзеге асыратын және мыналарды қамтитын бағдарламалық-техникалық құралдар базасында жобалау ұсынылады келесі компоненттер: өлшеу құралдары, құралдар кешені Автоматтандыру және атқарушы механизмдер; сымды немесе сымсыз ақпарат беру желілері; тиісті есептеу бағдарламалары ғимараттар құрылымдарының кернеулі-деформацияланған жай-күйі және құрылыстар.

Ғимараттардың техникалық жағдайын бақылаудың келесі түрлері бар:

1. Ғимараттар мен құрылыстардың техникалық жай-күйінің жалпы мониторингі – белгілі бір бағдарлама бойынша жүргізілетін бақылау және бақылау жүйесі, елеулі өзгерістер болған объектілерді анықтау үшін тірек конструкцияларының кернеулі деформацияланған күйі және олардың жағдайын тексеру қажет.

2. Ғимараттар мен құрылыстардың техникалық жай-күйіне Мониторинг жүргізу, жұмыс істеу қабілеті шектеулі немесе авариялық жағдайда. Кезінде олардың жай-күйі анықталған ғимараттардың мониторингі төтенше немесе шектеулі жұмысқа сәйкес келеді, құрылымдарда және топырақта өтетін процестерді бақылау оларды қалпына келтіру немесе күшейту уақыты.

3. Ғимараттар мен құрылыстардың техникалық жай-күйіне Мониторинг жүргізу, әсер ету аймағына кіретін ірі құрылыстар немесе табиғи-техногендік әсер ету-құрылымдар мен топырақта жүретін процестерді бақылау жағымсыз жағдайлардың дамуын уақтылы анықтау және болжау үшін, сондай-ақ оларды жою үшін шаралар қабылдау.

4. Ерекше ғимараттар мен құрылыстардың техникалық жай-күйіне Мониторинг жүргізу олардың қауіпсіз жұмыс істеуін қамтамасыз ету мақсатында жүзеге асырылады және осы объектілерде пайдалану жұмыстарын жүргізудің негізі болып табылады.

Арнайы ғимараттар мен құрылыстар биіктігі 75 м ден асатын ғимараттар болып саналады, олар үшін тұрақты мониторинг қажеттілігі белгіленген тірек конструкцияларының техникалық жай-күйі.

Бақылау жүйелерін құру кезінде келесі негізгі міндеттер шешіледі:

– бақылау объектілерін тандау (құрылым түрі, бақыланатын Сан бір типті құрылымдар);

– ғимараттардың ең жауапты құрылымдық элементтерін тандау немесе құрылыстарды анықтау, олардағы қауіпті қималарды анықтау және бақылау бөлімдерін тағайындау аспаптар мен өлшемдерді орнатуға арналған нүктелер;



– бақыланатын параметрлерді анықтау әдістерін әзірлеу, таңдау сериялық немесе жеке техникалық бақылау құралдарын әзірлеу, оларды объектіге дайындау және орнату;

– аспаптық және көрнекі бақылаулар жүргізу, анықтау нақты қозғалыстар, кернеулер, бақыланатын күштер құрылымдық элементтер;

– салыстыру деректері бойынша конструкциялардың техникалық жай-күйін бағалау аналитикалық немесе аналитикалық нәтижелермен аспаптық өлшеулерді талдау критериалды параметрлері бар сандық есептеулер.

Соңғы уақытта үздіксіз диагностикалық бақылау – мониторинг, яғни объектідегі өзгерістерді уақтылы анықтау, бағалау, сондай-ақ оның элементтерінің беріктігі мен сенімділігін болжау, ескерту және жою үшін объектінің жай-күйін бақылау жүйесі жиі қолданылуда теріс процестердің салдары. Мониторинг кез келген уақытта элементтердің техникалық жағдайы туралы ақпарат алуға мүмкіндік береді.

Бұзбайтын бақылау әдістерін қолдануға негізделген және мәліметтер базасында сақталатын компьютерге сымсыз берілетін датчиктердің әртүрлі түрлерін қамтиды. Сандық есептеу әдістерін, есептеу машиналарын және тікелей нәтижелерді қолдану деформацияларды өлшеу құрылымның нақты күйін анықтай отырып, оның ағымдағы күйіне талдау жасалады. Беріктік ресурсы таусылған немесе шамадан тыс деформация болған жағдайда құрылымның ықтимал бұзылуы туралы дабыл хабарламасы беріледі. Құрылыс конструкцияларының мониторингі жүйесі (МСК) мыналарды көздейді физикалық әсерді анықтау үшін ғимараттар мен құрылыстардың құрылымдық элементтеріне әртүрлі датчиктерді орнату (ылғалдылық, температура, қоршаған ортаның қышқылдығы) және олардың беріктігі мен деформациялануына күш (статикалық және динамикалық жүктемелер) әсер етеді. Алғашқы жүйелер жер сілкінісі кезінде құрылымдарды бақылау үшін құрылды. Бұл дәстүрлі қолдану жер сілкіністерінің табиғатын, олардың құрылымдарға әсерін тереңірек түсінуге ықпал етті, нәтижесінде құрылымдардың неғұрлым сенімді жобалары жасалды, сейсмикалық белсенділігі жоғары аймақтарда. Алғашқы бақылау жүйелері госпитальдар сияқты ауқымды құрылымдарға орнатылды,

Әлемдік тәжірибеден белгілі жағдайлардың көпшілігінде бақылау жүйелері мінез-құлықты бақылау үшін кеңінен қолданылады ұзын көпірлер. Калифорнияда 61 көпірге 900 датчик орнатылған. Калифорния көлік департаменті өлшеу нәтижелерін дизайн шешімдерін сынау үшін ғана емес, сонымен қатар жою кезінде де пайдаланады үлкен жер сілкіністерінен кейін бірден зақымдану.

## **2-бөлім бойынша қорытынды**

Бұл бөлімде жалпы механикалық кернеулерді өлшеу әдістері қарастырылды. Сонымен қатар өлшеу үшін қолданылатын өлшеу жүйесінің буындары мен арнайы қолданылатын математикалық өрнектерге зер салынды.

Жалпы өлшеуіш құрылғы болып есептелетін датчиктер туралы шолу жасалды. Осыған орай датчиктердің жіктелуі мен түрлері көрсетілді. Сонымен

қатар, түрлендірудің физикалық механизмдерінің графикалық сипаттамасы қарастырылды. Қарастырылған графикалық көрініс физикалық айнымалылар арасындағы екілік қатынастарды сипаттау үшін ұсынылған әдістің жеңілдетілген модификациясы болып табылады, себебі датчиктердің көпшілігінде әртүрлі материалдар бар болып саналады. Деформациялық датчиктердің өлшеу әдістері қарастрылды, оның ішінде тензометриялық және пьезоэлектрлік әдіс кеңінен сипатталды.

Бұл бөлімде механикалық кернеулерді өлшеуге арналған талшықты-оптикалық датчиктердің жіктелуі қарастырылды, оның ішінде Фабри-Пэро даиыктері, Брэгг торлары, Рамандық датчиктер және де т.б. датчиктер қарастырылды. Солардың ішінен біздің диссертация бойынша алынған оптоалшықты Брэгг торлары негізінде деформацияны өлшеуге арналған талшықты-оптикалық жүйелерді құрудың қолданыстағы әдістері талданды.

Қорытындылай алғанда өлшеу жүйелерін құрудың қарастырылған әдісі үшін мына артықшылықтар, яғни өлшеудің жоғары жиілігі мен қолданылатын аса люминесцентті диод көздерінің түрі мен санымен анықталатын кең жұмысы анықталды. Осылайша, оптоалшықты Брэгг торлары негізінде деформацияны өлшеудің жоғары жиілігімен деформациялардың өзгеруін бақылау қажет тапсырмалар үшін ұтымды пайдалануға болатынын көрсетті.

### **3 ТАЛШЫҚТЫ БРЭГГ ТОРЫ ДАТЧИГІН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, МЕХАНИКАЛЫҚ КЕРНЕУЛЕРДІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ**

#### **3.1 Қатты құрылымды материалдар күйін ТБТ арқылы бақылау технологиялары**

Талшықты Брэгг торы (ТБТ) датчиктері қатты болып келетін құрылымдардың динамикалық деформациясын анықтау үшін көбірек қолданылуда. Датчик бетіне бекітілген кезде, орнатуды жеңілдету үшін жабысқақ материал қолданылады, нәтижесінде сезімтал талшық пен бақыланатын құрылымның жанама байланысы пайда болады. Динамикалық ығысудан кешігу әсерінен туындаған деформацияны беру қатесін түзету және динамикалық жауап беру кезінде ТБТ датчиктерын өлшеу дәлдігін арттыру үшін бұл жұмыста сезімтал талшықтан, қатты қабаттан және негізгі материалдан тұратын үш қабатты сынақ моделінің деформацияны беру механизмі зерттелді. Алынған деформацияны беру формуласының орындылығын зерттеу үшін шаршау жүктемесімен ТБТ датчигімен бекітілген бетон арқалықты математикалық модель арқылы сынау жоспарланған және MATLAB көмегімен сандық модельдеу анықтамалық динамикалық деформацияны алу үшін көмекші құрал ретінде пайдаланылды. Жүргізілген талдау негізінде ТБТ датчиктерін жобалау кезінде нұсқау беру үшін деформацияның берілу коэффициентіне әсер ететін сезімтал параметрлер қарастырылды. Нәтижелер динамикалық жауап берудегі деформацияның берілу коэффициенті статикалық күйге қарағанда айтарлықтай төмен екенін және қатенің өзгеруі әсіресе айтарлықтай екенін көрсетеді; динамикалық сынақ моделінде желімделген материалдың ұзындығы, ығысу модулі және беткі қабатының қалыңдығы сезімтал, олар деформацияны тиімді өлшеуді қамтамасыз ету үшін практикалық жобалауда дәл таңдалуы керек екендігі ескерілді.

Пайдаланылған әуе кемелері, көпірлер мен теңіз платформалары көбінесе шаршау жүктемелеріне ұшырайды, бұл жергілікті компоненттерге кенеттен (немесе жинақталған) зақым келтіруі мүмкін және сайып келгенде жаһандық құрылымдардың істен шығуына әкелуі мүмкін [79].

Шаршау реакциясын жақсырақ түсіну жалпы механикалық мінез-құлықты, құрылыс қауіпсіздігін және өмірлік циклді бағалауда маңызды рөл атқарады [80, 81]. Зертханалық іріктеу сынақтары, ең кең таралған әдіс ретінде, әдетте материалдар мен құрылымдардың шаршау өнімділігін тексеру үшін қолданылады. Дегенмен, дәстүрлі деструктивті әдіс ретінде оның төмен тиімділік пен жоғары еңбек шығындары сияқты кемшіліктері бар және қарама-қайшы нәтижелер береді. Осы шектеулерді еңсеру үшін нақты уақыт режимінде салыстырмалы түрде жоғары дәлдіктегі, ұзақ мерзімді және үздіксіз анықтауды қамтамасыз ете алатын және бір уақытта дизайндағы өзгерістерді тудырмайтын құрылымдардың күйін бақылау технологиясы (ҚКБТ) барған сайын мақұлданып, интеллектуалды әдіс ретінде қарастырылады [82,83]. Әсіресе әуе кемелерінде, көпірлерде, теңіз платформаларында және ультра биік ғимараттарда және т.б., ҚКБТ кенеттен істен шығу қаупін азайтатын, тиімді

техникалық қызмет көрсету кестесін құрудың сенімді негізін қамтамасыз ететін және пайдалану шығындарының айтарлықтай төмендеуіне әкелетін маңызды шараға айналады [84, 85]. МСК жүйесінде динамикалық деформация құрылымдардың жергілікті мінез-құлқына сезімталдығының арқасында діріл шаршауының қасиеттерін сипаттайтын ең маңызды параметр болып табылады, ал деформация режимінің кеңейтілген формасы мен деформацияның жиілік реакциясының функциясы діріл мен режимді жанарту негізінде құрылымдық зақымдануды анықтаудың перспективалы әдістеріне айналады. Шағын өлшемнің, жеңіл салмақтың, коррозиядан қорғаудың, жақсы тұрақтылық пен беріктіктің және абсолютті анықтаудың маңызды артықшылықтарынан басқа, динамикалық сигналды демодуляциялаудың озық технологиясын әзірлеу динамикалық деформацияны бақылау үшін Брэгг торлы талшықты датчиктерді кеңінен қолдануға ықпал етеді [86-88].

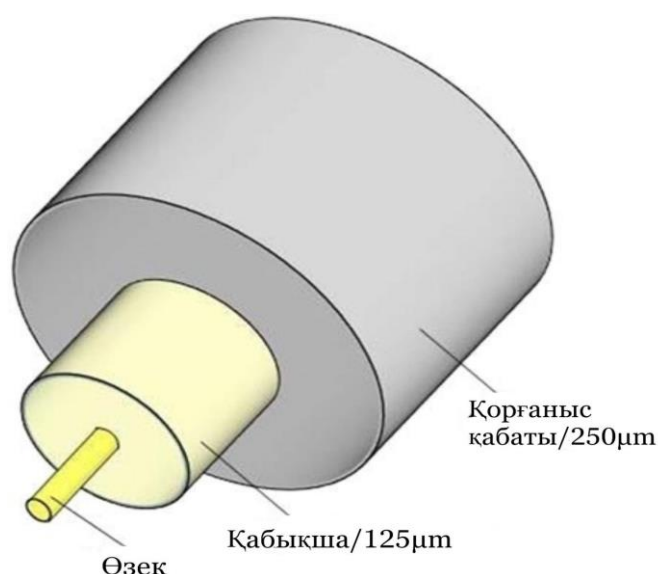
Кіріктірілген датчиктер шаршау жүктемесі кезінде құрылымдардың ұзақ мерзімді өнімділігін нашарлатуы мүмкін құрастырмалы құрылымдардың ақауларына ұқсас. ТБТ датчиктерін бақыланатын құрылымдардың беттеріне орнатқан жөн және датчикты бекіту үшін адгезиялық желім енгізіледі. ТБТ датчиктерін орнында енгізу қосымша мәселелерді шешед. Өйткені бетіне бекітілген датчиктер, әсіресе циклдік жүктеме кезінде, стратификацияға бейім болып келеді [89, 90].

Фазааралық стратификацияның пайда болуын азайту үшін жоғары адгезиялық қасиеттері бар желімді таңдаудан басқа, датчик мен оның айналасындағы материал арасындағы күрделі өзара әрекеттесулерді түсіну бұл құбылысты болдырмаудың тиімді әдісі болуы мүмкін. Айта кету керек, негізгі материалдың кернеуі жабысқақ қабат арқылы өтіп, содан кейін сезімтал талшыққа берілуі керек. Бұл датчиктан тікелей оқылатын кернеу негізгі материалдың нақты кернеуін толық көрсете алмайтынын түсіндіреді және жиналған деректерді дәл түсіндіру қосымша талқылауды қажет етеді. Материалдың әртүрлі қасиеттері мен жабысқақ қабаттың қалыңдығы датчиктың шығысы мен негізгі материалдың деформациясы арасындағы қатынасқа әсер етеді [91-94]. Деформацияны беру қатесін жою және ТБТ датчиктерін өлшеу дәлдігін арттыру үшін негізгі материал мен оптикалық талшық арасындағы деформациялардың сандық қатынасын анықтау үшін деформацияны беру талдауы жасалды [95].

Оптикалық талшыққа негізделген тестілеу модельдерінде деформацияның берілу тәуелділігін зерттеуге айтарлықтай әрекеттер жасалды [96-102]. Алайда, бұл жарияланған зерттеулер модельді статикалық жүктеме кезінде сынаумен шектеледі. Осы уақытқа дейін бекітілген қабаттың шаршау жүктемелеріндегі ТБТ датчиктерінің штаммға сезімтал қасиеттеріне әсері тек эксперименталды түрде зерттелді [103] және бекітілген қабаттағы жинақталған шаршау жарақаттары деформацияның берілу коэффициентін төмендетеді деген қорытындыға келді. Шаршау жүктемесіне ұшыраған сынақ моделінің деформациясының берілуін теориялық зерттеу ешқашан зерттелмеген.

Жоғарыда келтірілген талдауды ескере отырып, шаршау жүктемесіне ұшыраған бетонды құрылымның бетіне бекітілген ТБТ датчигінің деформациясының берілу тәуелділігінің теориялық талдауы зерттеледі. Статикалық реакциядағы нәтижелермен салыстыру келтірілген, ал ұсынылған деформацияны тасымалдау формуласының тиімділігі зертханалық эксперименттермен және сандық модельдеумен тексеріледі. Динамикалық тестілеу моделінің деформациясын беру тиімділігіне әсер ететін сезімтал параметрлер талқыланады және ТБТ датчиктерін қолдану дизайны бойынша ұсыныстар ұсынылады.

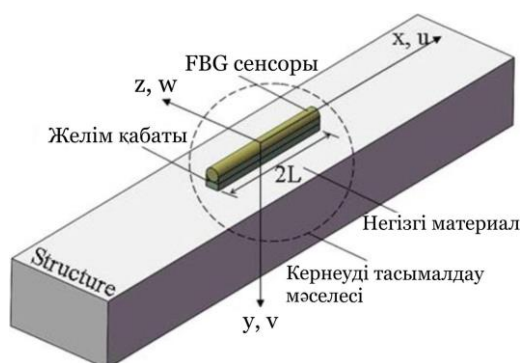
Сезімтал аймақта қолданылатын оптикалық талшық, әдетте, 3.1- суретте көрсетілгендей, сыртқы әсерден туындаған деформацияға қарсы тұратын талшық өзегінен, қабықтан және жабыннан тұрады.



Сурет 3.1 - Сезімтал талшықтың құрылымы

Тәжірибелік сынақтарда талшықты өзек, қабық және жабын арасындағы интерфейстің стратификациясы қажет емес. Әйтпесе, талшық жыртылуы мүмкін. Талшықтың өзегі мен қабығының материалдары тиімді сезімтал талшықты құрайтын кремний диоксиді болып табылады. Сезімтал талшықты қорғауға арналған жабын органикалық полимерден жасалған, ол кернеудің аз бөлігін сіңіріп, тестілеу кезінде өлшеу қателігін тудыруы мүмкін. Алайда, жабынның қалыңдығы өте аз болғандықтан (62,5 мкм), практикалық инженерлік масштабпен салыстырғанда, индукцияланған өлшеу қателігін елемеуге болады. Осылайша, оптикалық талшық радиусы 125 мкм болатын бір қабат ретінде қарастырылады.

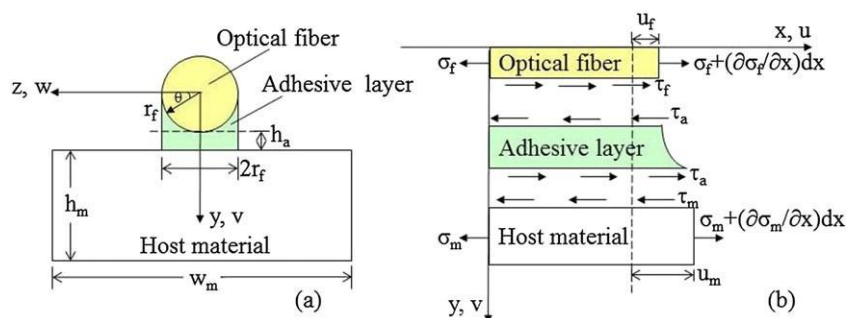
Деформацияны бір уақытта бақылау және бақыланатын құрылымның механикалық қасиеттеріне әсер етпеу үшін ТБТ датчиктері 3.2 суретте көрсетілгендей негізгі материалдың бетіне жиі орнатылады.



Сурет 3.2 – Бақыланатын құрылымның бетіне бекітілген талшықты Брэгг торы датчигі

$L$  қосылыстың ұзындығының жартысын білдіреді. Құрылым сыртқы шаршау жүктемелеріне ұшыраған кезде, құрылымның динамикалық деформациясы фазааралық сдысу күштері арқылы сезімтал талшыққа беріледі. ТБТ датчиктерінің жұмыс принципіне және конструкцияның механикалық сипаттамаларына сәйкес теориялық талдау алдында үш негізгі болжам мәлімделеді: (1) тек осьтік діріл ескеріледі. Бұл ретте тік және көлденең дірілдің осьтік дірілге ықтимал жұптық әсері еленбейді; (2) бөлім беттері жақсы жанасады, бірге қабыршақтану, сырғу немесе микро Бос орындар жоқ; (3) сезімтал талшық, жабысқақ қабат және бақыланатын құрылым сызықты серпімді материалдардан жасалған.

Оптикалық талшықтан, жабысқақ қабаттан және негізгі материалдан тұратын үш қабатты сынақ моделі 3(A) суретте көрсетілген.



Сурет 3.3 - Үш деңгейлі зондтау моделінің құрылымы

$h_a$  әрпі желім қабатының қалыңдығын білдіреді.  $r_f$  - сезімтал талшықтың радиусы.  $h_m$  және  $w_m$  - негізгі материалдың биіктігі мен ені. Датчикке берілетін сыртқы күш оптикалық талшықтың осьтік бағытта ұзаруына әкеледі. ТБТ негізінен осьтік созылу немесе қысу деформациясына сезімтал болғандықтан, модель тек осьтік кернеулерді ескереді. Сынақ моделінің микросекцияларының кернеу күйі 3(b) суретте көрсетілген. Негізгі материалдың деформациясы фазааралық ығысу кернеулері арқылы сезімтал талшыққа берілетін бетке

бекітілген датчиктер үшін жабысқақ қабат таза ығысу әсеріне ұшырайды. Жақсы жалғанған интерфейстер байланыс аймақтарында үздіксіз ығысуларды тудырады, содан кейін сыналған модельдің ықтимал деформация профилі ұсынылады.  $\sigma_f$ ,  $\tau_f$ ,  $\sigma_m$  и  $\tau_m$  - сәйкесінше оптикалық талшық пен негізгі материалдың қалыпты кернеулері мен ығысу кернеулері.  $\tau_a$  - желім қабатының ығысу кернеуі.  $u_f$  және  $u_m$  оптикалық талшық пен негізгі материалдың ығысуын бөлек білдіреді.

### 3.2 Қатты материалдар күйінің деформацияға тәуелділігін есептеу

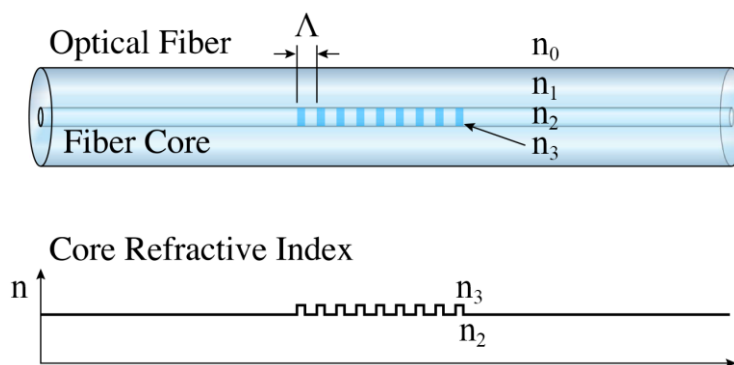
ТБТ негізіндегі датчиктер деформацияға және температураға сезімтал. Бұл температураны бақылау үшін ТБТ-де қолдануға мүмкіндік береді, бірақ сонымен бірге температураның штамм датчигіна әсерін өтеу үшін температура датчигін штамм датчигімен біріктіру жақсы тәжірибе екенін білдіреді. Деформация мен температурадан басқа, түрлендіргіштерде көлбеу, үдеу, қысым және басқа да ұқсас параметрлер сияқты әртүрлі басқа параметрлерді бақылау үшін ТБТ негізіндегі датчиктерді пайдалануға болады.

Талшықты Брэгг торындағы температура мен деформация параметрлерін ажырату үшін ол өзек-қабық режимінің муфтасын пайдалану арқылы жүзеге асады.

Талшықты-оптикалық Брэгг датчигіның созылуы тор кезеңінің өзгеруіне әкеледі, бұл шағылысқан ультракүлгін сәуленің толқын ұзындығының өзгеруіне әкеледі.

Брэгг торлары өткізу қабілеттілігі өте аз толқын ұзындығын көрсетеді (спектрдегі шыңдар деп аталады).

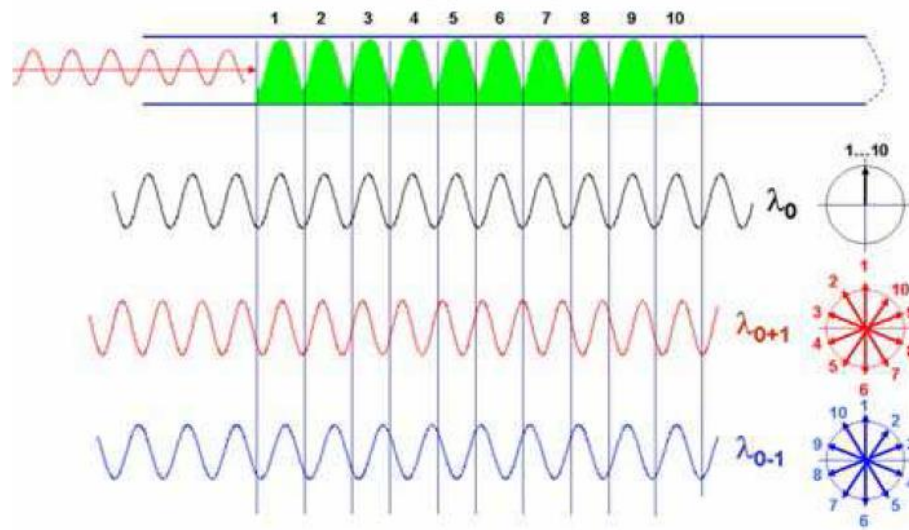
Тор 3.4-суретте көрсетілгендей бірнеше жолақтардан ғана емес, сонымен қатар бірнеше мың жолақтардан тұрады.



Сурет 3.4 - Талшықты Брэгг торы

Әрбір жеке жолақ толқын ұзындығының өте аз бөлігін көрсетеді. Бір жолақтың шағылысу коэффициенті Брэгг торын жазу үшін қанша энергия

жұмсалғанына және талшық өзегіндегі германийдің пайызына байланысты тек 0,001%...0,1% диапазонында болады.



Сурет 3.5 - Талшықты Брэгг торларының жұмыс принципі

Әрбір жеке жолақ әртүрлі фазалық ығысулармен жарықты көрсететіндіктен, кедергі пайда болады және жарықтың көп бөлігі жойылады. Бірақ тең фазалық ығысу шағылыстары одан да күшті шағылысу шыңына дейін жиналады. Барлық тордың шағылысуы осы мыңдаған өте кішкентай бір ғана шағылыстардың қосындысы болып табылады. 3.5 сурет бұл процессті толығырақ түсіндіреді. 3.5 суреттің жоғарғы жағында 10 жолақты Брэгг торы бар талшық көрсетілген. Жарық сол жаққа енеді. Төменде әртүрлі толқын ұзындығы бар үш жарық сәулесі берілген. Жоғарғы жағы тор кезеңіне дәл сәйкес келетін толқын ұзындығына ие және жиектер бойындағы барлық жалғыз шағылыстар фазада шағылысады, сондықтан жиынтықта тордың жалғыз шағылысуынан 10 есе жоғары энергия деңгейін береді. Төмендегі келесі жарық сәулесінің жиілігі 10% жоғары, сондықтан 11 жарық кезеңінің ұзындығы 10 тор кезеңіне тең. Осылайша, барлық жалғыз шағылыстардың әр түрлі фазалары болады, олар бір-біріне кедергі келтіреді және нөлге дейін өтейді, нәтижесінде шағылысу функциясының полюсі пайда болады. Дәл осындай жағдай ең төменгі жарық сәулесінде болады, оның жиілігі 10%-ға төмен, сондықтан 9 жарық кезеңінің ұзындығы 10 тор кезеңіне тең. [104]

3.3 (б) суретте көрсетілген оптикалық талшық пен негізгі материалдың микросекцияларының динамикалық тепе-теңдігіне сәйкес келесі теңдеулерді орнатуға болады.

$$\frac{\partial \sigma_f}{\partial x} dx * \pi r_f^2 + \int_0^\pi \tau_f * r_f d\theta dx = \frac{d^2 u_f}{dt^2} * p_f \pi r_f^2 dx \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \sigma_m}{\partial x} dx * w_m h_m - \tau_m * 2r_f dx = \frac{d^2 u_m}{dt^2} * p_m w_m h_m dx \quad (3.2)$$

Мұндағы,  $\rho_f$  және  $\rho_m$  сәйкесінше оптикалық талшықтың және негізгі материалдың тығыздығы болып табылады.



Негізгі материалдың деформациясы сезімтал талшыққа жанасатын интерфейс арқылы берілетіндіктен, ығысу деформациясын осьтік ығысулар мен оптикалық талшық пен негізгі материал арасындағы қашықтық арқылы анықтауға болады [103].

$$\gamma_a = \frac{u_m - u_f}{h_a + r_f - r_f \sin \theta} \Rightarrow \tau_a = G_a \frac{u_m - u_f}{h_a + r_f - r_f \sin \theta} \quad (3.3)$$

Мұндағы  $\gamma_a$  - ығысу кезінде деформация, ал  $G_a$  - ығысу кезінде жабысқақ қабаттың серпімділік модулі.

Желім қабатының тепе-теңдігін ескере отырып және 3 теңдеуді қолдана отырып, ол

$$\int_0^\pi \tau_f * r_f d\theta dx = \int_0^\pi \tau_a * r_f d\theta dx = \tau_m * 2r_f dx \quad (3.4)$$

3.1 теңдеудегі ығысу кернеулерін және 3.2 теңдеуді 3.3 және 3.4 теңдеулермен ауыстыру арқылы басқару теңдеулерін келесідей қайта жазуға болады

$$\frac{\partial \sigma_f}{\partial x} + \frac{G_a}{\pi r_f} \int_0^\pi \frac{u_m - u_f}{h_a + r_f - r_f \sin \theta} d\theta = p_f * \frac{\partial^2 u_f}{\partial t^2} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \sigma_m}{\partial x} + \frac{G_a r_f}{w_m h_v} * \int_0^\pi \frac{u_m - u_f}{h_a + r_f - r_f \sin \theta} d\theta = p_m * \frac{\partial^2 u_m}{\partial t^2}$$

Бүтін бөліктерді ауыстыру үшін  $\lambda_1$  тұрақтысын енгізу және геометриялық және физикалық теңдеулерді қолдану арқылы 3.5 теңдеуді келесідей жеңілдетуге болады:

$$E_f \frac{\partial^2 u_f}{\partial x^2} + \frac{G_a \lambda_1}{\pi r_f} * (u_m - u_f) - p_f * \frac{\partial^2}{\partial t^2} = 0 \quad (3.6)$$

$$E_m \frac{\partial^2 u_m}{\partial x^2} + \frac{G_a r_f \lambda_1}{w_m h_m} * (u_m - u_f) - p_m * \frac{\partial^2 u_m}{\partial t^2} = 0$$

$$\text{мұндағы, } \lambda_1 \approx \frac{2}{\sqrt{(h_a + r_f)^2 - r_f^2}} \left[ \frac{\pi}{2} + \arctan \frac{r_f}{\sqrt{(h_a + r_f)^2 - r_f^2}} \right]$$

Тұрақты жауап пен қарапайым гармоникалық стационарлық дірілді ескере отырып, оптикалық талшық пен негізгі материалдың ығысуы келесідей көрсетілуі мүмкін

$$u_f = \widehat{u}_f(x)e^{i\omega t}, u_m = \widehat{u}_m(x)e^{i\omega t} \quad (3.7)$$

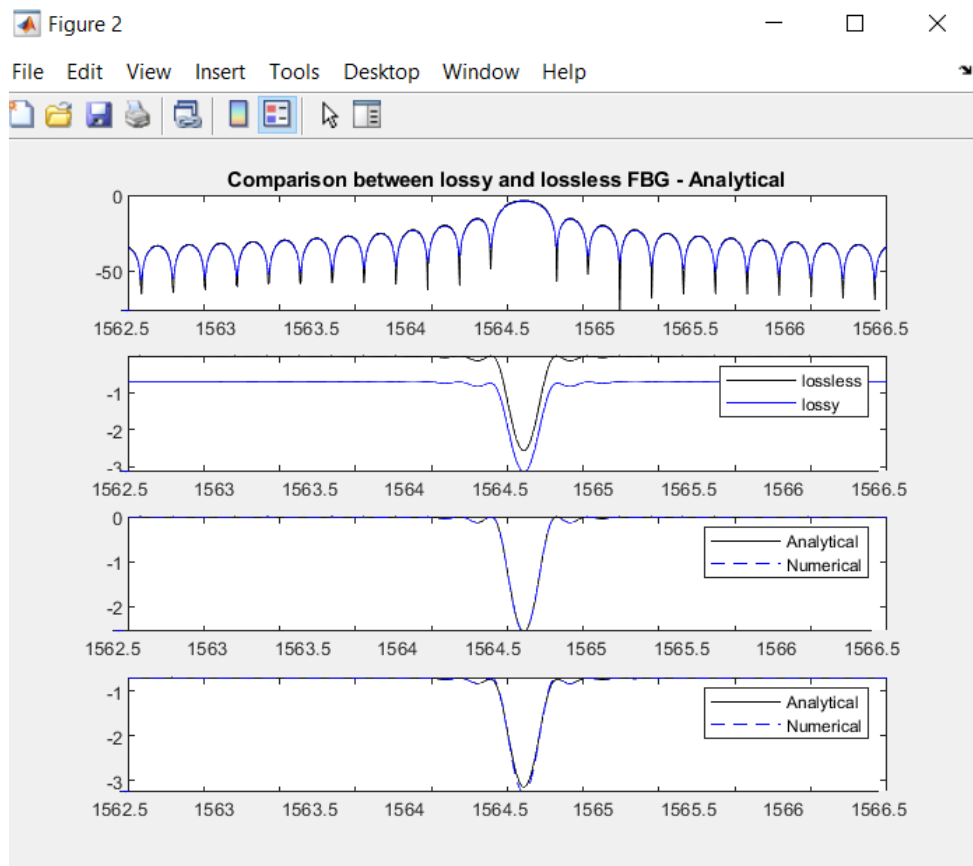
мұндағы  $\omega$ -діріл жиілігі, ал  $t$ -уақыт.

3.9 теңдеуді 3.7 теңдеуге және 3.8 теңдеуге ауыстыру арқылы меншікті теңдеулерді алуға болады

$$E_f \frac{\partial^2 \widehat{u}_f}{\partial x^2} + \frac{G_a \lambda_1}{\pi r_f} * (\widehat{u}_m - \widehat{u}_f) - w^2 p_f * \widehat{u}_f = 0 \quad (3.8)$$

$$E_f \frac{\partial^2 \widehat{u}_m}{\partial x^2} + \frac{G_a r_f \lambda_1}{w_m h_m} * (\widehat{u}_m - \widehat{u}_f) - w^2 p_m * \widehat{u}_m = 0 \quad (3.9)$$

Осы есептеулерді пайдалана отырып біз автомагистральді көпірдің қатты материалдар күйінің деформация бойынша діріл және созылу күйлерін есептейміз.



Сурет 3.6 - Әр түрлі созылу мәндері бойынша пайда болған деформацияның толқын ұзындығына тәуелділік сипаттамалары

3.6 суретте көрсетілгендей арнайы алынған толқын ұзындықтары бойынша талшықты Брэгг торының созылу деформациясына тәуелділік графиктерін аламыз.

### **3.3 Талшықты Брэгг торы датчигін қолдана отырып, бетон арқалықтардағы механикалық кернеулердің деформациясын өлшеу**

Материалдардың тұрақты серпімділігін білу құрылымдарды жобалау және сапаны бақылау үшін қажет. Осылайша, оның анықтамасы барлық инженерлік қосымшалар үшін өте маңызды. Юнг модулі немесе серпімділік модулі  $E$ -жүктеме кезінде материалдың немесе құрылымның деформациялық әрекетін сипаттайтын қасиет. Жүктемелер қолданылған кезде материалдар әртүрлі деформацияланады, ал кернеу мен деформация арасындағы байланыс әдетте Юнг модулімен анықталады. Кез келген материалдың жүктемеге қарсы тұру немесе беру қабілеті маңызды және бұл қасиет көбінесе белгілі бір материалдың белгілі бір мақсатқа сәйкес келетіндігін анықтау үшін қолданылады.

Серпімді тұрақтылардың шамасын әртүрлі әдістермен эксперименталды түрде анықтауға болады. Анықтау әдістері «тікелей» және "жанама" болып бөлінеді. Тікелей әдістерде бұл тұрақтылар бойлық және көлденең деформациялармен, сондай-ақ оларға тікелей тәуелді әсерлермен анықталады; ал жанама әдістерде олар сығу немесе көлемді қысу модульдері сияқты басқа серпімді тұрақтыларды өлшеу арқылы анықталады. Статикалық әдістерде бұл константалар динамикалық әдістерден айырмашылығы, уақытқа тәуелді немесе баяу өзгертін күштердің әсерінен болатын деформациялармен анықталады, оған жиі діріл зерттеулері кіреді [105]. Жалпы инженерлік қолданбалар үшін статикалық әдістерді инженерлер мен ғалымдар кеңінен қолданады.

Негізінен, Юнг  $E$  модулі бір осьті созылу сынақтары кезінде кернеу-деформация қисығының сызықтық бөлігінің көлбеуінен алынады. Нақты мәндерді алу үшін  $E$  деформация деректері жеткілікті дәл болуы керек, оны әдетте фольга тензорезисторлары немесе қысқыш экстензометрлер алады. Дегенмен, жүктеме ұяшықтары мен экстензометрлерді пайдалану кейде байланысты шығындарға, сондай-ақ сынақ үлгісінің өлшемі мен пішініне байланысты шектеледі. Осы дәстүрлі әдіспен қатар, әдебиетте Юнг ( $E$ ) материалдарының модулін дәл анықтаудың бірнеше басқа әдістері сипатталған. Олардың бірі-ультрадыбыстық эхо-импульстік әдіс [106-108]. Бұл әдісте ультрадыбыстық сәуле өлшенетін материалдарға бекітілген датчик арқылы жасалады. Ортадағы дыбыс жылдамдығын өлшеу арқылы серпімді қасиеттерді анықтауға болады. Екіншісі – резонанстық әдіс [109, 110]. Резонанстық жиілікті өлшеу арқылы серпімді қасиеттерді есептеуге болады, өйткені резонанстық жиілік құрылымның геометриясымен, сондай-ақ серпімді қасиеттермен байланысты. Қысу әдістері (микро және нано) Юнг модулін анықтау үшін де кеңінен қолданылады, мұнда  $E$  мәні бір тиеу және түсіру циклі кезінде алынған шегініс жүктемесі мен орын ауыстыру деректерінен тікелей анықталады [111-114]. Бұл әдіс өте танымал, өйткені салыстырмалы түрде аз сынақ материалдары

қажет және үлгі пішініне қатаң талаптар жоқ. Кейбір авторлар қатты денелердің Юнг модулін бағалау үшін бұзбайтын құйынды ток әдісін (біріктірілген айнымалы/тұрақты және тұрақты магнит өрістері) сәтті қолданды [115, 116].

Бір осьті созылуды сынау үшін Юнг ( $E$ ) модулі серпімді аймақтағы кернеу мен деформация арасындағы қатынас ретінде анықталады. Металл үлгілері үшін ол келесідей анықталады:

$$E = \frac{P}{A \times \varepsilon} \quad (3.10)$$

мұндағы,  $P$  – тензометрмен серпімді аймақ кезінде өлшенген жүктеме;

$A$  – үлгінің көлденең қимасының ауданы;

$\varepsilon$  – серпімді деформация.

Композиттік ламинаттар үшін  $E$  мәні хорда модулі деп аталады (1-сурет) және келесідей есептеледі:

$$E = \frac{P_u - P_l}{A \times (\varepsilon_u - \varepsilon_l)} \quad (3.11)$$

мұндағы,  $E$  – 1-суретте анықталған хорданың модулі;

$P_u$  – деформацияның жоғарғы шегіндегі созылу жүктемесі;

$P_l$  – төменгі деформация шегіндегі созылу жүктемесі;

$\varepsilon_u$  – деформацияның жоғарғы шегі;

$\varepsilon_l$  – деформацияның төменгі шегі.

Талшықты тартқыштардың көлденең қимасының ауданы  $A$  мына теңдеу бойынша есептеледі:

$$A = \frac{MUL}{\rho_f} \quad (3.12)$$

мұндағы,  $MUL$  – ұзындық бірлігіне келетін талшықтың массасы;

$\rho_f$  – талшықтың көлемдік тығыздығы.

(1) және (2) тармақтарында пайда болатын  $\varepsilon$  деформациясы қолайлы деформацияны өлшейтін құрылғымен тәжірибелік түрде өлшенуі тиіс қызығушылық мөлшері болып табылады. Бұл жұмыста деформацияны өлшеу сандық камерадан және MatLab жүйесінде жасалған сандық кескін корреляциясының сандық алгоритмінен тұратын қарапайым тәжірибелік қондырғымен алынған орын ауыстыру деректерінен беттік деформация мәндерін алу арқылы орындалды. Салыстыру үшін Юнг модулі сонымен қатар электр кедергісі тензометрлермен және экстенсометрлермен деформацияны өлшеу арқылы анықталды.

Юнг модулі қатты материалдардың серпімді қасиеттері мен деформация кедергісін сипаттайтын маңызды физикалық шама болып табылады. Ол материалдың деформациясы мен ішкі кернеу арасындағы байланысты көрсетеді.

Бұл күш әсерінен кейін материалдың деформациясын өлшеуге арналған параметрлердің бірі, сонымен қатар Машина жасау технологиясында механикалық компоненттерді таңдау үшін маңызды негіз болып табылады. Юнг модулін өлшеу әдетте қолданылатын қатты материалдар (мысалы, металдар, керамика, резеңке, Полимерлер және т.б.) ауқымды азаматтық құрылыс үшін Юнг модулін өлшеу өте маңызды болып табылады.

Басқа параметрлерді дәл статикалық немесе динамикалық өлшеу тұрғысынан оның ең үлкен ерекшелігі – оның микро қозғалыстарды өлшеу үшін жоғары сезімталдығы мен өлшеу дәлдігі.

Арқалықтардың микро қозғалысын өлшеу үшін талшықты-оптикалық датчиктерді қолданудың қолданыстағы әдісін ескере отырып [117] бұл жұмыста ТБТ датчиктеріне негізделген металл арқалықтардың Юнг модулін өлшеудің жаңа әдісі ұсынылған. Бұл әдіс сыналатын бетон арқалыққа жабыстырылған ТБТ пайдаланады және сыналатын бетон арқалыққа күш қолдану үшін үш нүктелі иілу әдісі қолданылады. Кез-келген қатты материалды Юнг модулі арқылы өлшей алатын әмбебап формула алынды, ал Юнг модулі бетон арқалық пен серпімділік модулін өлшеу эксперименталды түрде зерттелді. Зерттеу көрсеткендей, ТБТ шағылысуының орталық толқын ұзындығы жүктемеге жақсы сызықтық тәуелділікке ие, ал өлшенген бетон арқалық Юнг модулі мен номиналды мәні сәйкесінше шамамен 0,6% құрайды. Эксперимент сонымен қатар бетон арқалық Юнг модулін қарастырды. Зерттеуде көрсетілгендей, ТБТ шағылысуының орталық толқын ұзындығы жүктемеге жақсы сызықтық тәуелділікке ие, ал өлшенген бетон арқалық модулі мен номиналды арасындағы кателік сәйкесінше 0,6% құрайды.

ТБТ – бұл талшықтың өзегінің сыну көрсеткіші талшықтың осьтік бағыты бойынша циклдік түрде өзгереді. ТБТ датчик ретінде пайдаланылған кезде оның жұмыс принципін Брэгг центрінің шағылысу шыңының  $\lambda_b$  толқын ұзындығы мен талшық өзегінің  $n_{eff}$  тиімді сыну көрсеткіші мен талшық торының  $\Lambda$  кезеңі арасындағы корреляциямен түсіндіруге болады. Олардың арасындағы байланыс болып табылады

$$\lambda_b = 2n_{eff} \Lambda \quad (3.13)$$

Қоршаған орта параметрлері өзгерген кезде талшық өзегінің тиімді сыну көрсеткіші сәйкесінше өзгеріп, Брэгг толқын ұзындығының қызыл немесе көк сысуын тудырады. Қоршаған орта параметрлерінің өзгеру шамасын сигналды демодуляциялау арқылы қабылдауға болады. Деформация және температура – бұл  $\lambda_b$  дрейфін тудыратын қоршаған ортаның ең көп таралған параметрлері. ТБТ орналасқан ортаның температурасы мен кернеуі өзгерген кезде, Брэгг толқын ұзындығының ауытқу шамасы  $\lambda_b$  түрінде көрсетілуі мүмкін

$$\Delta\lambda_b = \lambda_b [(1 - p_e)\varepsilon + \lambda_b(\alpha_a + \xi_a)\Delta T] \quad (3.14)$$

мұндағы,  $\alpha_a$  - жылу кеңею коэффициенті және оптикалық талшықтың жылу сәулелену коэффициенті,  $\varepsilon$ -осьтік деформация,  $\Delta T$ -температураның өзгеру шамасы, ал  $p_e$  - тиімді серпімді сәулелену коэффициенті.

ТБТ үшін қоршаған ортаның температурасы өзгермеген немесе өте аз өзгерген кезде, деформацияның ТБТ-ге әсері ғана ескеріледі. Бұл кезде Брэгг толқын ұзындығының дрейф шамасы  $\lambda_B$  мен деформация арасындағы байланыс:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\varepsilon = k\lambda_B\varepsilon \quad (3.15)$$

мұндағы,  $k$ -тордың кернеуге сезімталдық коэффициенті. Талшықты тор тұрақты температуралы ортаға орналастырылған кезде, деформацияның сәйкес өзгеруін шағылысқан толқын ұзындығының дрейф шамасымен өлшеуге болады [117, б.34].

Талшықты Брэгг торы өзегінде сыну көрсеткіші бойлық бағытта мезгіл-мезгіл өзгеріп отыратын оптикалық талшықтың учаскесін білдіреді. Брэгг торының ерекшелігі-торды қысу және созу кезінде пайда болатын толқын ұзындығының өзгеруі. Мұны жоғары дәлдікпен және сезімталдықпен фотодетектор арқылы бақылауға болады. Толқын ұзындығының өзгеруін (1) формула бойынша анықтауға болады:

$$\Delta\lambda = 2n \wedge \left\{ 1 - \frac{n_{eff}}{2} * [P_{12} - \nu * (P_{11} + P_{12})] \right\} * \varepsilon + \left( \alpha + \frac{1}{n_{eff}} * \frac{dn}{dT} \right) * \Delta T, \quad (3.16)$$

мұндағы,  $\lambda_B$  - Брэгг резонансының толқын ұзындығы;

$\Delta T$ -температураның өзгеруі;

$\varepsilon$ -қолданылатын механикалық кернеу;

Серпімді-оптикалық тензордың Pius – Pockels коэффициенттері;

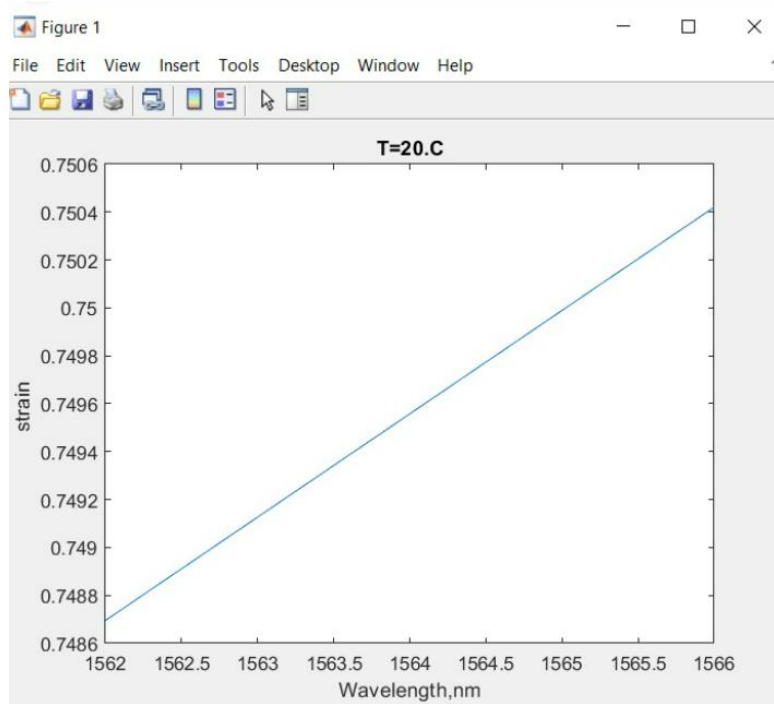
$\nu$ -Пуассон коэффициенті;

$\alpha$  – кварц әйнегінің термиялық кеңею коэффициенті;

$n_{eff}$ -негізгі режимнің сынуының тиімді көрсеткіші;

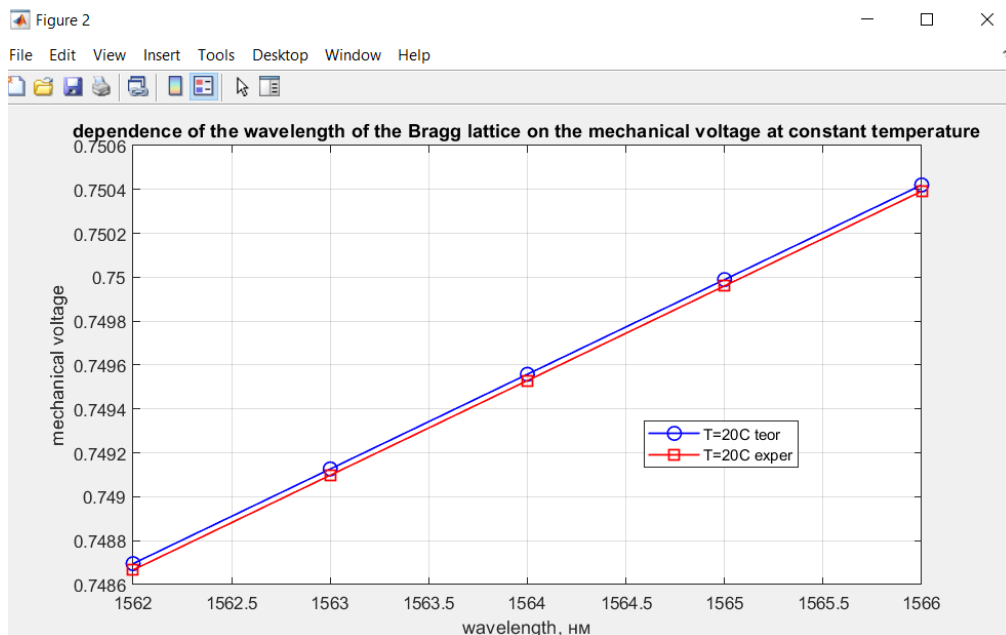
$\Delta$ -талшықты Брэгг торының кезеңі.

$$\left\{ 1 - \frac{n_{eff}}{2} * [P_{12} - \nu * (P_{11} + P_{12})] \right\} \varepsilon \leq \left( \alpha + \frac{1}{n_{eff}} * \frac{dn}{dT} \right) * \Delta T \quad (3.17)$$



Сурет 3.7 –  $\Delta T$ -температураның тұрақты кезіндегі Брэгг торының толқын ұзындығының механикалық кернеуге тәуелділік графигі

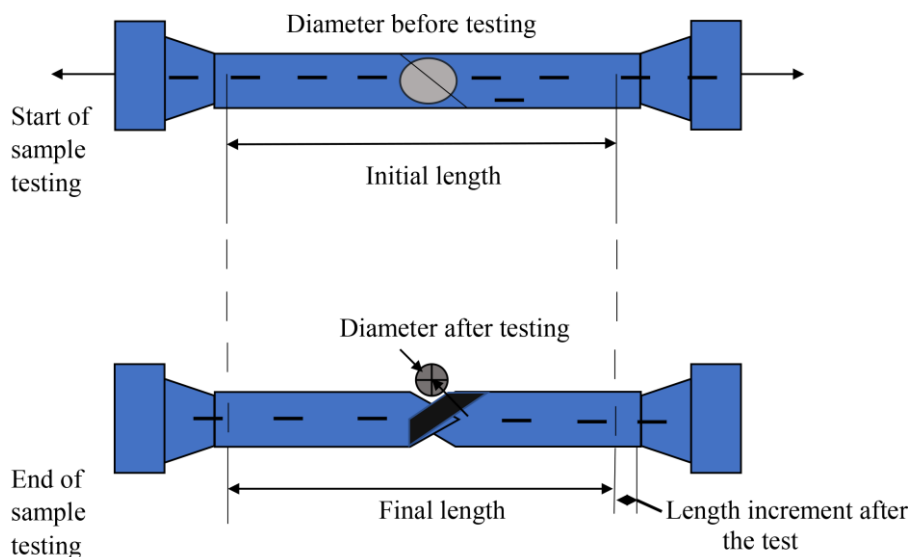
3.7 суретте көрсетілгендей температура тұрақты болған жағдайда автомагистралді көпірге түскен созылмалы деформация тұрақты түрде өседі. Яғни деформация тұрақты температурада толқын ұзындығына тәкелей тәуелді екендігін көрсетті.



Сурет 3.8 – теориялық және тәжірибелік мәндері бойынша алынған  $\Delta T$ -температураның тұрақты кезіндегі Брэгг торының толқын ұзындығының механикалық кернеуге тәуелділік графигі

3.8 суретте көрсетілгендей температура тұрақты болған жағдайда теориялық және тәжірибелік мәндері бойынша алынған  $T=20^{\circ}\text{C}$ , автомагистралді көпірге түскен созылмалы деформация тұрақты түрде өседі. Яғни екі жағдайда да деформация тұрақты температурада толқын ұзындығына тәкелей тәуелді екендігін көрсетті.

Ендігі кезекте толқын ұзындығының өзгеру жиілігі деформациядан әлдеқайда жоғары екенін байқай аламыз, сондықтан графиктегі деформация көрсеткіші тұрақты болып көрінеді. Юнг модулін қолдана отырып өлшеу бізге деформацияны өлшеудің көрнекі мысалын береді (сурет 3.9) [118].



Сурет 3.9 – Юнг модулінің өлшеуі

Қолданылатын күштің мәні  $F$ , содан кейін ТБТ датчигіндегі иілу моментінің сәйкес мәні формула бойынша анықталады [119]:

$$M(s) = \frac{F_b}{a+b} * s \quad (3.18)$$

Сынақ бетон арқалығы көлденең күштің әсерінен иілгенде, сынақ бетон арқалығының төменгі бетіндегі ТБТ орнату орнындағы оң кернеу:

$$\sigma = \frac{M(s)}{W} = \frac{6Fs}{mh^2} * \frac{b}{a+b} \quad (3.19)$$

мұндағы,  $W$ -иілу сынағына жататын бетон Арқалықтың көлденең қимасының коэффициенті. Гук Заңына сәйкес оң кернеу  $s$  және Юнг модулі  $E$  мен деформация мәні  $\epsilon$  арасындағы қатынас :

$$\sigma = E\epsilon \quad (3.20)$$

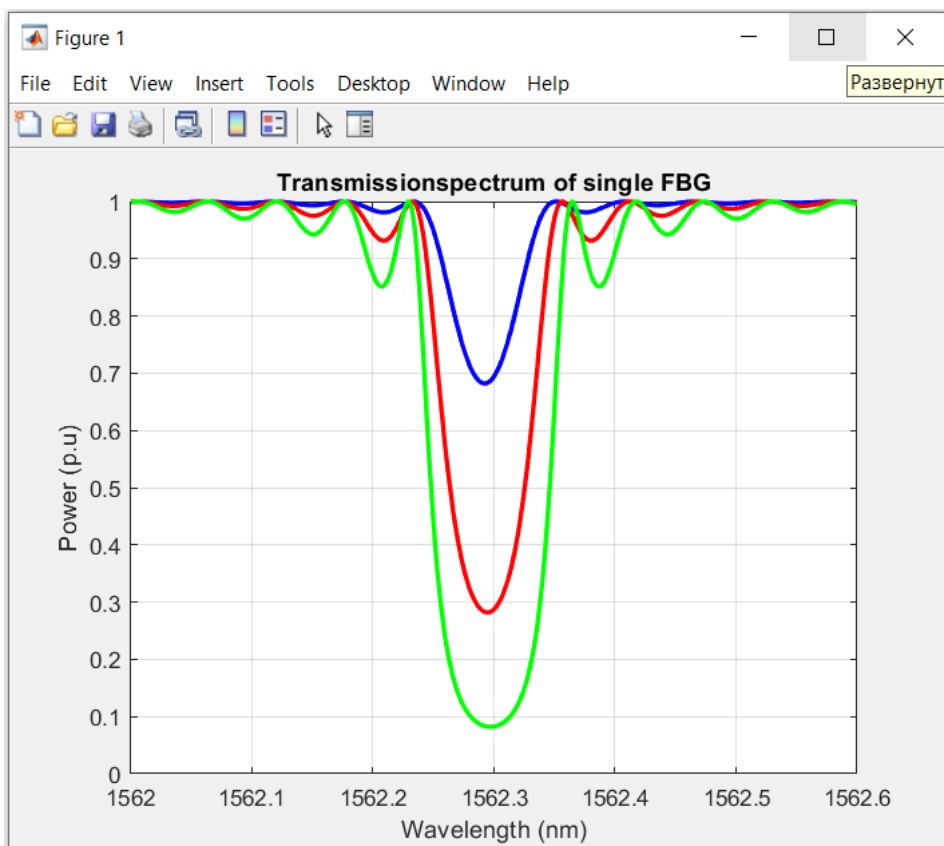
(3.19)–(3.20) формаулаларды ала отырып келесі Юнг модулін



айқындайтын формуалны көрсетеміз [118]:

$$E = \frac{6ks\lambda_B}{mh^2 \frac{\Delta\lambda_B}{E}} * \frac{b}{a+b} \quad (3.21)$$

(3.21) формуладан экспериментте F-ге тең қолданылатын күшпен ТБТ шағылысу центрінің толқын ұзындығының өзгеруін дұрыс өлшеу жағдайында өлшенген сәулені жүзеге асыруға болатындығын көруге болады.



сурет 3.10 – Әртүрлі созылулардағы ТБТ толқын ұзынды,а бойынша созылу графигі

Бұл график бір Брэгг торының (FBG) өткізу спектрін білдіреді. Графикте үш қисық бейнеленген, олардың әрқайсысы әртүрлі мәліметтер жиынтығын білдіреді. X осі "толқын ұзындығы (нм)" деп белгіленеді және 1562-ден 1562.6 нм-ге дейін өзгереді. Ал Y осі "қуат (дБ)" деп белгіленеді және 0-ден 1 дБ-ге дейін өзгереді.

3.10 суреттен байқағанымыздай, арнайы күш түсіру арқылы созылған қатты дененің (біздің жағдайда бетон) ТБТ торы арқылы созылу процесі көрсетілді. Бұл жерде толқын ұзындығы артқан сайын, түсірілген күш арқылы созылған дененің графигі де төменге қарай иіле береді. Жалпы созылу немесе иілу процесстері кезінде дененің созылу көрсеткіштері өсе бастайды.

### 3.4 Механикалық кернеулердің әсерін сенсорлық жүйеде бағалау моделі

Қазіргі заман талабына сай техникалық және ғылыми-зерттеу салаларында талшықты-оптикалық датчиктер дәл және тиімді өлшеу құралы болып табылады. Бұл датчиктен деректерді алып, оны контроллерге жіберетін физикалық параметр модификаторлары болып келетін негізгі құрал болып табылады. Датчиктер мен контроллер арасындағы байланыс талшықты-оптикалық кабельдер арқылы ұйымдастырылады. Содан кейін, датчиктерден алынған барлық деректер тікелей контроллерде өңделеді.

Штамм өлшегіштер, экстензорлар, термисторлар, жарықдиодты шамдар және т.б. температура, ылғалдылық, коррозия, жарық және деформация сияқты физикалық параметрлерді өлшеу үшін талшықты-оптикалық датчиктер кеңінен қолданылып келеді.

Мұндай датчиктер бұрын қолданылғандарға қарағанда көптеген артықшылықтарға ие, олардың арасында сезімталдықтың жоғары деңгейі, кедергіден қорғаудың жоғары сезімталдығы және төмен бағалау жүйесінің иелігі бар. Осылайша, мұндай датчиктер агрессивті ортада дұрыс және тиімді жұмыс істеуге арналған техникалық құралдармен жабдықталған.

Оптикалық физикаға негізделген датчиктердің ішінде талшықты-оптикалық желіге негізделген талшықты-оптикалық датчиктер ерекшеленеді. Бұл датчиктер бүгінгі күнге дейін ең перспективалы болып табылады. Мұндай сенсорлық жүйелер нақты уақыт режимінде қарастырылып отырған объектінің физикалық күйін толық бақылауға мүмкіндік береді, сонымен қатар, датчиктердің жұмысы толқын ұзындығын мультиплекстеу негізінде қамтамасыз етіледі.

Талшықты-оптикалық торлар оптикалық талшықтың орталық режимін түзу бағытта және басқа орталық талшық режимін қарама-қарсы бағытта біріктіруді ұйымдастырады. Екі режим арасындағы мұндай байланыс резонанс деп аталатын толқын ұзындығында болады. Біз бұл қатынасты (3.22) формуладан көреміз:

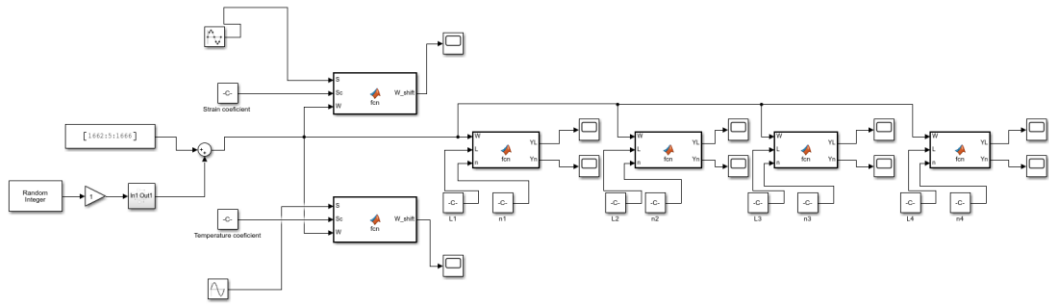
$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (3.22)$$

мұндағы,  $\lambda_B$  – орталық толқын ұзындығының мәні;

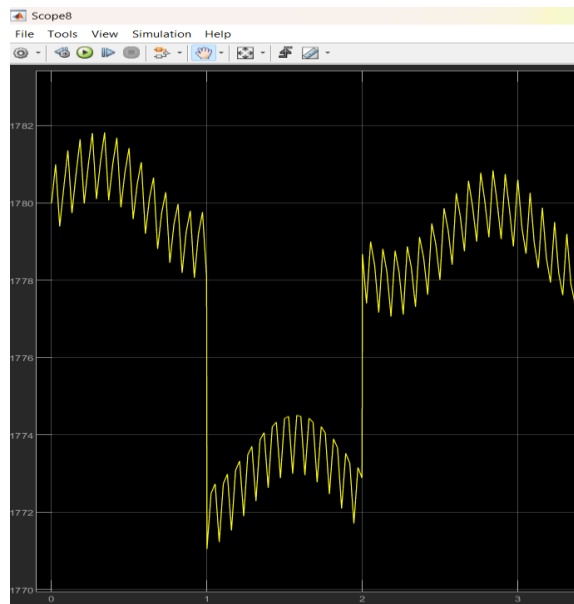
$n_{eff}$  – оптикалық талшық өзегінің орталық режимінің тиімді сыну көрсеткіші(1.46);

$\Lambda$  – Брэгг талшықты торының периоды.

Талшықты Брэгг торларына негізделген талшықты-оптикалық датчиктер жүйесін 3.11 суреттен көреміз. Жүйе Matlab Simulink бағдарламасында жасалған.



Сурет 3.11 – Талшықты Брэгг торларына негізделген талшықты-оптикалық датчиктер жүйесі



Сурет 3.12– Имитациялық модельдеу нәтижесіндегі ТБТ негізінде механикалық кернеудің сипаты

3.11 және 3.12 суретте көрсетілген имитациялық модель және оның нәтижесі теориялық және тәжірибелік мәндерге сүйене отырып жасалды. Алынған имитациялық модельдің нәтижелік сипаты теориялық сипатқа сәйкес келеді.

Талшықты торлардың маңызды параметрлерінің бірі-спектрлік қасиет. Осы қасиеттердің ішінде резонанстың спектрлік күйі, ені және максималды нүктедегі шағылысу сияқты параметрлерді атап өткен жөн. Брэгг талшықты торларының барлық спектрлік қасиеттерін есептеу үшін оптикалық талшықтағы байланысқан режимдер теориясын қолдану қажет. Байланысты мод теориясының 3.23 формуласына сүйене отырып, біз Брэгг торындағы талшықтағы шағылысу толқын ұзындығының келесі параметрге қатынасын табамыз:

$$r = \frac{sh^2(\gamma_B L)}{ch^2(\gamma_B L) - \frac{\sigma^2}{k^2}}, \quad (3.23)$$

$$\gamma_B = \sqrt{k^2 - \sigma^2} \quad (3.24)$$

мұндағы,  $\sigma$  – қатаң резонанстан спектрлік ажырату;  
 $k$  – Брэгг талшықты торының байланыс коэффициенті.

Қатты резонанстан спектрлік ыдырауды есептеу үшін оптикалық талшықтың орталық режимінің екі таралу коэффициенті арасындағы айырмашылық ретінде көрсетілген 3.25 формуласын қолдану қажет:

$$\sigma = \beta - \beta_B = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda}, \quad (3.25)$$

Деформацияның толқын ұзындығына тәуелділігі механикалық кернеуге (мысалы, кернеу немесе қысым) ұшыраған кезде Брэгг талшықты торының толқын ұзындығының өзгеруін білдіреді. Бұл құбылыс Брэггтың талшықты-оптикалық датчиктерін осы физикалық шамаларды өлшеу және бақылау үшін датчиктер ретінде пайдалануға негіз болады.

Қолданылатын кернеу мен нәтижесінде пайда болған Брэгг толқын ұзындығы арасындағы байланысты Оптикалық деформация коэффициентімен немесе оптикалық қысым коэффициентімен сипаттауға болады. Бұл коэффициенттер Брэгг талшықты торының қолданылатын кернеуге сезімталдығын көрсетеді және талшық параметрлері мен тор дизайнына байланысты. Мысалы, деформация анықталған жағдайда, тензорлық оптикалық коэффициент Брэггтың талшықты торларына қолданылатын деформацияны Брэггтың толқын ұзындығының сәйкес өзгеруімен байланыстырады. Мысалы, деформация анықталған жағдайда, тензорлық оптикалық коэффициент ТБТ-на қолданылатын деформацияны Bragg толқын ұзындығының сәйкес өзгеруімен байланыстырады. Ол әдетте пикометрлерде/микро кернеуде (pm/ $\mu\epsilon$ ) немесе нано/микро кернеуде (nm/ $\mu\epsilon$ ) көрсетіледі.

Толқын ұзындығының жылжуы мен ( $\Delta\lambda$ ) қолданылатын деформация ( $\epsilon$ ) арасындағы байланысты келесі теңдеумен жуықтауға болады:

$$\Delta\lambda = S * \epsilon, \quad (3.26)$$

мұндағы,  $\Delta\lambda$  - толқын ұзындығының ығысуы,  
 $S$  - деформация-оптикалық коэффициент,  
 $\epsilon$  – қолданылатын деформация.

Оптикалық деформация коэффициентінің нақты мәні талшық түрі, тор жасау технологиясы және тор геометриясы сияқты факторларға байланысты.

Мұны калибрлеу бағдарламасы арқылы эксперименталды түрде анықтауға болады.

Брэггтың талшықты торын толқын ұзындығының өзгеруін бақылау арқылы кернеу немесе қысым сияқты жүктеме арқылы дәл өлшеуге және есептеуге болады. Бұл Брэгг талшықты торына негізделген сенсорлық жүйелеріне нақты уақыт режимінде бақыланатын физикалық параметрлер туралы ақпарат беруге мүмкіндік береді.

Брэгг талшықты торының әртүрлі модельдері мен конфигурациялары үшін деформация мен толқын ұзындығының сдйсуы арасындағы байланыс әртүрлі болуы мүмкін екенін атап өткен жөн. Сондықтан практикалық қосымшаларда қолданылатын Брэгг талшықты-оптикалық сенсорлық жүйенің нақты сипаттамалары мен калибрлеуін ескеру қажет.

(3.27) формуласын деформация сияқты параметрдің әсерінен шағылысқан сәулеленудің негізгі толқын ұзындығының өзгеру мәнін анықтау үшін пайдалануға болады :

$$\Delta\lambda_B D = \lambda_B(1 - p_e) \cdot \varepsilon, \quad (3.27)$$

мұндағы,  $p_e$  – ТОБЖ деформация коэффициенті;

$\lambda_B$ – орталық толқын ұзындығының мәні;

$\varepsilon$ – қатаң резонанстан спектрлік ажырату.

Кесте 3.1 – Есептеулер нәтижелері

$\lambda$ (нм)	$n_{eff}$	$\lambda_B$	$\sigma$	$\Delta\lambda_B D$
1562	1,46	$4,56104 \cdot 10^{-6}$	$-2.02711 \cdot 10^{-6}$	$4,03652 \cdot 10^{-12}$
1562,5	1,46	$4,525 \cdot 10^{-6}$	$-2.02581 \cdot 10^{-6}$	$4,00463 \cdot 10^{-12}$
1563	1,46	$4,56396 \cdot 10^{-6}$	$-2.02581 \cdot 10^{-6}$	$4,0391 \cdot 10^{-12}$
1563,5	1,46	$4,56542 \cdot 10^{-6}$	$-2.0245 \cdot 10^{-6}$	$4,0404 \cdot 10^{-12}$
1564	1,46	$4,56688 \cdot 10^{-6}$	$-2.0232 \cdot 10^{-6}$	$4,04151 \cdot 10^{-12}$
1564,5	1,46	$4,56834 \cdot 10^{-6}$	$-2.02189 \cdot 10^{-6}$	$4,04298 \cdot 10^{-12}$
1565	1,46	$4,5698 \cdot 10^{-6}$	$-2.02059 \cdot 10^{-6}$	$4,04427 \cdot 10^{-12}$
1565,5	1,46	$4,57126 \cdot 10^{-6}$	$-2.01939 \cdot 10^{-6}$	$4,04557 \cdot 10^{-12}$
1566	1,46	$4,57272 \cdot 10^{-6}$	$-2.01929 \cdot 10^{-6}$	$4,04686 \cdot 10^{-12}$

Опто-талшықты Брэгг торының негізінде қолданылатын талшықты-оптикалық сенсорлық жүйелер технологиялары әртүрлі физикалық шамаларды және құбылыстарды өлшеудің кеңінен таралған және нәтижелі әдісі болып табылады. Брэгг талшықты торы - Талшықты Брэгг торы (талшықты Брэгг тор) – бұл бойлық бағытта өзегінің сыну көрсеткіші (СК) периодты өзгертін оптикалық талшықтың (ОТ) бір бөлігі.

Келесі кезекте талшықты Брэгг торларының негізіндегі жұмыс жасайтын сенсорлық жүйенің жұмыс істеу қағидаларына тоқталамыз:

Брэгг торларының өндірісі: Брэгг торлары көбінесе, сыну көрсеткішінің межелі модуляциясын шығаратын, жоғары лазер сәулесімен оптикалық талшық аумағына әсер ету арқылы жасалады. Торлар арасындағы арақашықтық шағылысқан жарық сәуле Брэгг торының толқын ұзындығын айқындайды.

### **3- бөлім бойынша қорытынды**

Диссертациялық жұмыстың үшінші бөлімінде талшықты Брэгг торын қолдана отырып механикалық кернеудің әсері қарастырылды. Бірінші қатты материалдар құрылымының күйі қарастырылды, оның ішінде бетон арқалықтардың сипаттамалары көрсетілді. Сонымен қатар арнайы шектеулерді еңсеру үшін нақты уақыт режимінде салыстырмалы түрде жоғары дәлдіктегі, ұзақ мерзімді және үздіксіз анықтауды қамтамасыз ете алатын және бір уақытта туындаған өзгерістерді тудырмайтын құрылымдардың күйін бақылау технологиясы (ҚКБТ) әдісі құрылды.

Материалдар күйінің деформацияға тәуелділігін есептеу жүргізілді. Сонымен қатар есептеу нәтижелеріне сәйкес арнайы графиктер тұрғызылып есептелді.

Бетон арқалықтардың деформациясын ТБТ датчиктері арқылы модельдеу үшін арнайы Юнг модулі арқылы математикалық модель құрастырылды. Бұл Юнг модулі арқылы біз бетон арқалықтардағы деформацияны есептеп қана қоймай, оның созылу процесстері мен деформация мен температуралық тәуелділіктерін қарастыра аламыз. Соған сәйкес Matlab Simulink бағдарламасында модель құрылып, графиктері көрсетілді.

Сонымен қатар Matlab Simulink бағдарламасында механикалық кернеулердің әсерін сенсорлық жүйеде бағалау моделін құрастырып, арнайы есептеулер жүргізілді, нәтижесі кестеде көрсетілген.

Бөлім бойынша негізгі зерттеу нәтижелері келесі ғылыми жариялымдарда келтірілген [118, б.60].

## 4 ТАЛШЫҚТЫ БРЭГГ ТОРЫ ДАТЧИКТЕРІНІҢ МЕХАНИКАЛЫҚ КЕРНЕУЛЕРДІ ӨЛШЕУГЕ АРНАЛҒАН МАТЕМАЛЫҚ МОДЕЛІН ҚҰРУ

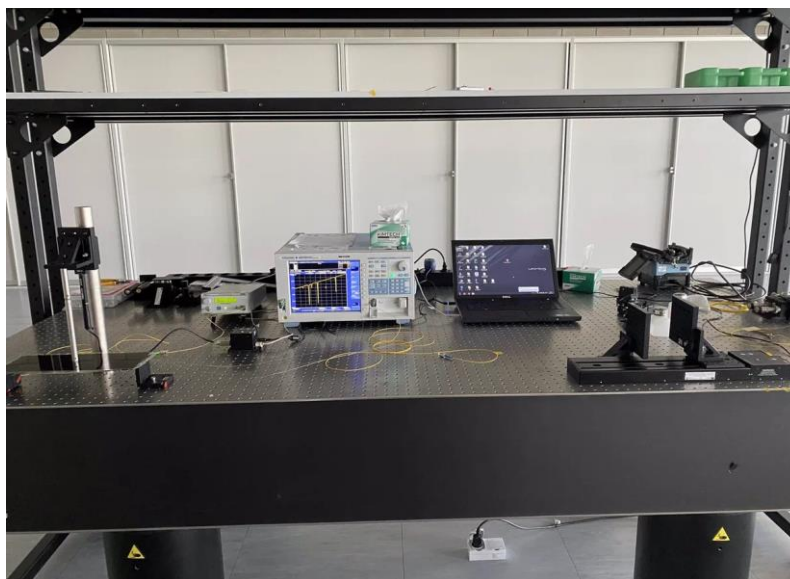
### 4.1 Тәжірибелік жұмыстарға негізделіп алынған ТБТ датчиктерінің нәтижелерін MATLAB бағдарламасында модельдеу

Люблин технологиялық университетінің «Электроника және ақпараттық технологиялар» факультетінің, «Оптоэлектроника» зертханасында профессор Вальдемар Войчиктің арнайы талшықты Брэгг торының түрлі сипаттамалары мен қасиеттерін зерттеуге арналып құрастырылған.

Осы зертханада диссертация тақырыбы бойынша алынған талшықты Брэгг торының датчигі арқылы қатты денелерде деформацияны өлшеуге арналған құрылымдық сұлба құрастырылды. Бұл өлшеу жүйесі арқылы талшықты оптикалық Брэгг торы датчигі негізінде қатты құрылымдардың параметрлерін, қасиеттерін және олардың спектрлік сипаттамаларын анықтауға мүмкіндік береді.

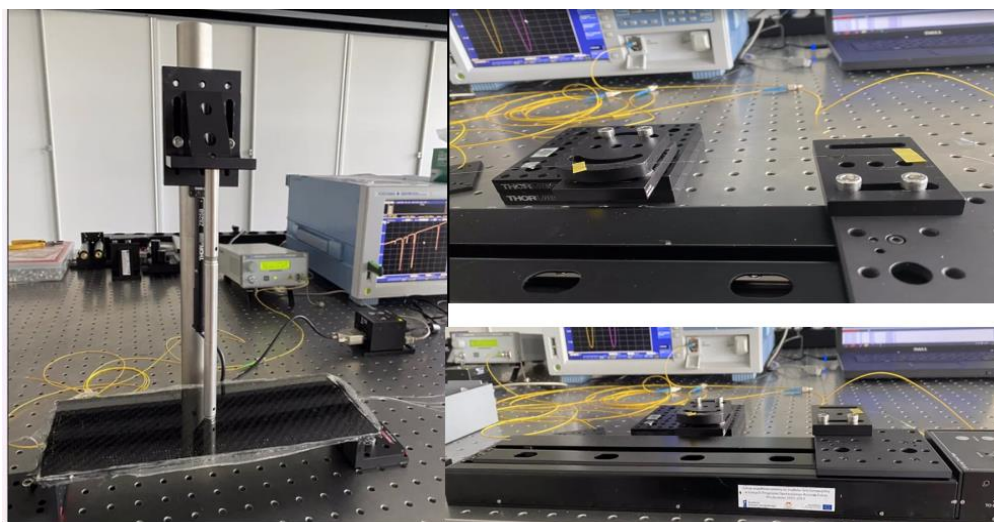
Талшықты Брэгг торының тиімді өлшеу әдісін жоғарлату және толқын ұзындықтарының параметрлерін қарастыру барсында оптикалық арнайы үстелдер мен стендтерді белсенді пайдалану тиімді нәтижелерге қолжеткізді.

Арнайы тәжірибеде қолданылған арнайы есептелген қадам бойынша созу және керілу стендтері осы тәжірибелік жұмыстың артықшылығы болып табылады.



Сурет 4.2 – ТБТ негізінде деформацияны өлшеуге арналған тәжірибелік жұмыстар жүргізілген арнайы стенд

4.2 суретте көрсетілген стендте осы опто-талшықты Брэгг торлары арқылы деформацияны немесе температураны өлшеуге арналған құрылғылар жиынтығы құралған. Бұл стендте арнайы тәжірибелік жұмыстар жүргізіліп нәтижесін тікелей компьютерге шығарып отырады.



Сурет 4.3 – ТБТ негізінде деформацияны өлшеуге арналған тәжірибелік жұмыс барысы

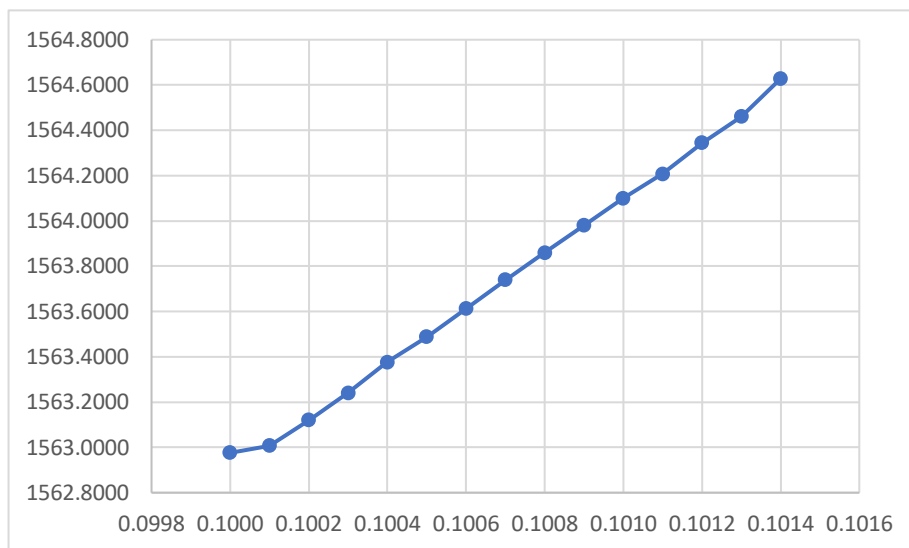
4.3 суретте арнайы зертханадағы тәжірибелік стендта талшықты Брэгг торы негізінде деформацияны өлшеу барысы көрсетілген. Бұл стендте арнайы екі темір бекіткішке оптоалшық төселеді, кейін арнайы тарту күші арқылы талшықты екі жаққа тарту арқылы ортаға күш түсіріледі. Сонда түсірілген механикалық кернеу арқылы деформацияны есептейді. Негізгі ақпарат арнайы компьютерлік құрылғыға түсіп отырады, ал сандық осциллографта осы деформацияның спектрлік графиктерінің көрінісі көрсетіледі.

Кесте 4.1 – Тәжірибелік өлшеулер

№	L	$\lambda_B$	$\Delta L$
1	0,1000	1562,9760	0,0990
2	0,1001	1563,0080	0,0991
3	0,1002	1563,1200	0,0992
4	0,1003	1563,2400	0,0993
5	0,1004	1563,3760	0,0994
6	0,1005	1563,4880	0,0995
7	0,1006	1563,6120	0,0996
8	0,1007	1563,7400	0,0997
9	0,1008	1563,8600	0,0998
10	0,1009	1563,9800	0,0999
11	0,1010	1564,1000	0,1000
12	0,1011	1564,2080	0,1001
13	0,1012	1564,3440	0,1002
14	0,1013	1564,4600	0,1003
15	0,1014	1564,6280	0,1004

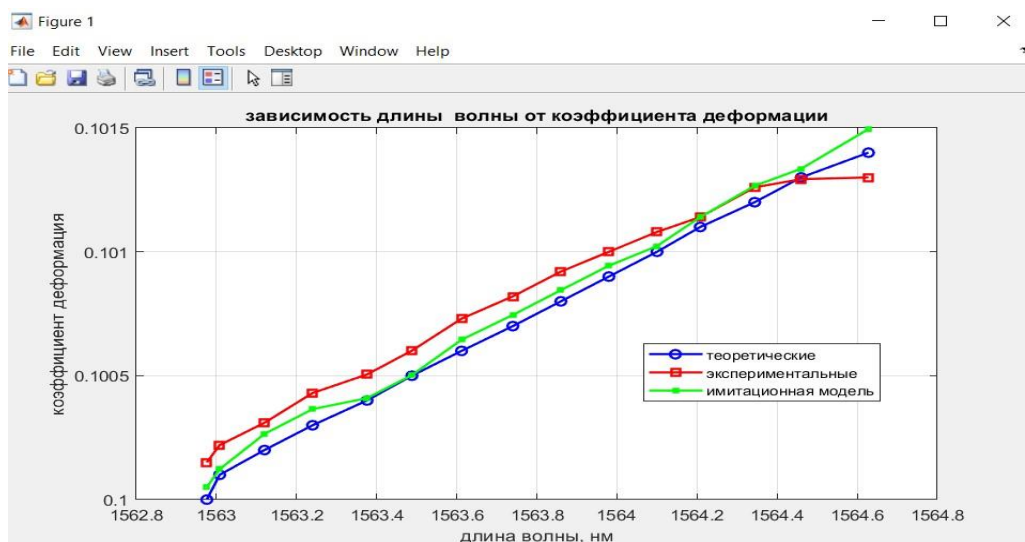


Диссертация аясында жүргізілген тәжірибелік өлшеулер мен нәтижелер тізімі келесі кесте мен суретте көрсетілген.



Сурет 4.4 – ТБТ негізінде деформацияның толқын ұзындығына қатынасы

4.4 суретте көрсетілгендей арнайы тәжірибеде жасалған ТБТ негізінде деформацияны өлшеу барысында қолданылған қадамдар жүйесі мен толқын ұзындығы берілген. Бұл суретте деформацияға түскен талшық қадам сайын созылған кезде (біздің жағдайда 0,0998-ден 0,1-ге), соғұрлым толқын ұзындығы ( $\lambda$ ) 1562 нм-ден өзінің деңгейіне дейін өсе береді, яғни ол тура пропорционал болып есептеледі.

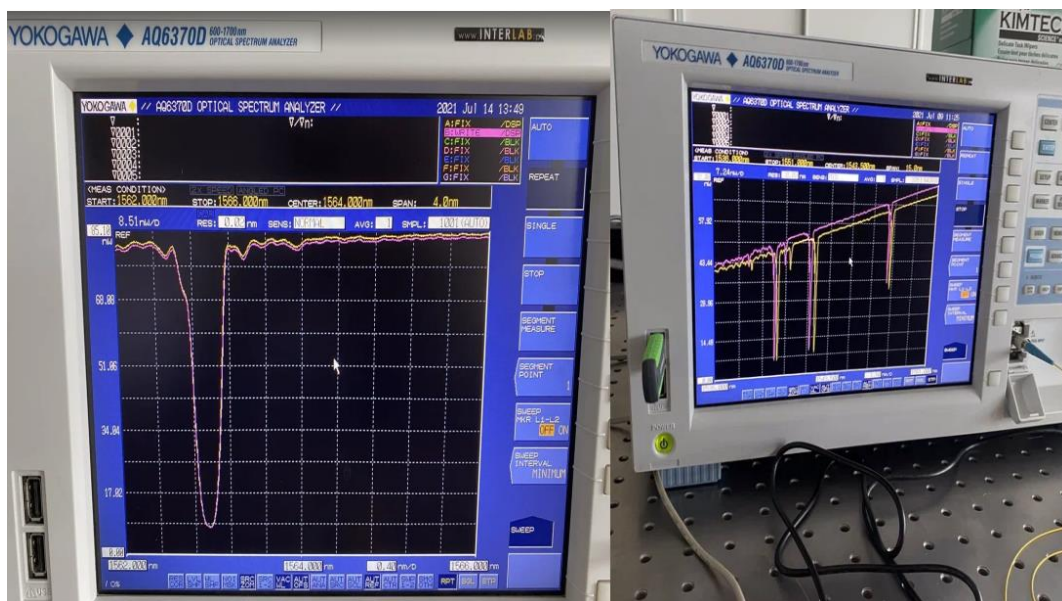


Сурет 4.5– ТБТ негізінде пайда болған деформация коэффициентінің толқын ұзындығына қатынасының теориялық, модельді және эксперименталді мәндері

4.5 суретте көрсетілгендей тәжірибе барысында алынған, сонымен қатар арнайы алынған теориялық мәндер мен жасалған имитациялық модель

арасындағы өзгерістерді бақылау мақсатында алынған графиктер. Бұл жерде байқағанымыздай көк сызықты график теориялық мәндерге сәйкес келеді, ал қызыл түсті график эксперименталды түрдегі мәліметтер болып табылады. Екеуінің айырмашылығы мен абсолютті қателік мәндерін көрсету мақсатында осындай зерттеулер жүргізілді. Теориялық, тәжірибелік және модельдеу бойынша арнайы алынған мәндердің салыстырмалы қателігі 3 % аспайды.

Ендігі кезекте осы тәжірибеден алынған арнайы сандық осциллографтың мәндеріне қарасақ, быз мынандай мәліметтерді аламыз:



Сурет 4.6 – ТБТ негізінде механикалық кернеуді өлшеу барысындағы сандық осциллограф графиктері

4.6 суреттен көріп отырғанымыздай ТБТ негізінде өлшенген деформация графиктерінің спектрлік сипаттамалары берілген. Олар теориялық мәліметтермен салыстырғанда едәуір тұрақсыз болып келеді, себебі оптикалық талшық қозғалған сайын, деформация пайда болу әсерінен, графиктегі мәліметтер де өзгеріске ұшырап жатады.

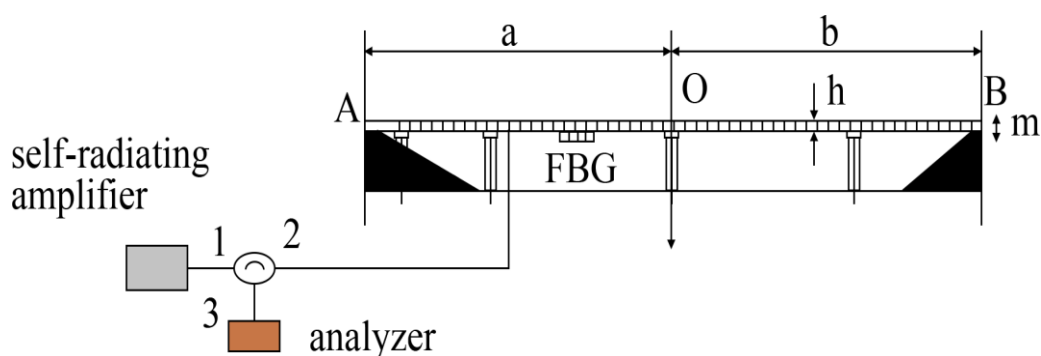
Бұл суретте оптикалық спектрлер көрсетілген. Суретте сол жақ экранда орналасқан әр түрлі толқын ұзындығында немесе жиілікте қарқындылықтың өзгеруін білдіретін бірнеше шыңдары мен ойықтары бар күрделі график көрінеді. Ал оң жақ экранда бір ерекше шыңы бар қарапайым графиканы көрсетеді. Екі экранда да «YOKOGAWA AQ6370» деп белгіленген және оптикалық спектроанализаторлар болуы мүмкін. Графиктер оптикалық талшықтар, лазерлер немесе басқа оптикалық құрылғылар сияқты спектрдің әртүрлі аймақтарындағы жарық қарқындылығын өлшеуге байланысты болуы мүмкін. Бұл жабдық оптикалық сигналдарды талдау үшін өнеркәсіптік немесе зертханалық жағдайларда қолданылуы мүмкін.

## 4.2 Талшықты Брэгг торын қолдана отырып бетон арқалықтарға механикалық әсер ету кезіндегі деформация параметрлерін моделдеу

Бұл жұмыс үшін Autodesk және MATLAB бағдарламаларында арнайы алгоритмдер ұсынылды және әзірленді. Бұл бағдарламалық жасақтама алгоритмдері эксперименттік мәндерге жақын дәлірек деректерді модельдеуге мүмкіндік береді. Осы модельдер арқылы біз созылу деформациясы кезінде талшықты Брэгг торының негізгі аспектілерін егжей-тегжейлі зерттей аламыз және оларды өндірістің әртүрлі салаларында қолданудың ең оңтайлы әдістерін ұсына аламыз.

Бетон сәулесінің микро қозғалысын өлшеу дәлдігін арттыру үшін ТБТ қолданылады. Бұл жұмыста мәселені шешу үшін Юнг модулі қолданылады. Деформацияны өлшеу схемасы төмендегі суретте көрсетілген. 4.6 суретте бетон конструкцияларымен екі ұшына бекітілген А және В бетон арқалықтарының екі ұшын көрсетеді.

Нүктеден нүктеге созылу әдісі бетон арқалыққа оның иілуіне және деформациясына күш салу үшін қолданылады. Күш қолдану нүктесі-О нүктесі, ал ТБТ жүктеме ұяшығы сыналатын бетон арқалықтың төменгі бетіне жабыстырылады. ТБТ түйісу орны мен А нүктесі арасындағы қашықтық S. кең жолақты өздігінен шығарылатын жарық көзінен үздіксіз жарық ағыны циркулятор арқылы өткеннен кейін жарық көзінен үздіксіз жарық ағыны ТБТ кірісіне сезімтал болады. Осылайша, иілу деформациясы туралы ақпаратты тасымалдайтын шағылысқан ТБТ жарығы циркулятордың 3 порты мен шағылысу спектрі арқылы шығарылады. Сайып келгенде, ТБТ арқылы өтетін көз спектр анализаторымен жазылады. Осылайша, 4.6 суретте көрсетілгендей, біз деформацияны экологиялық таза жолмен, сондай-ақ нақты өлшеулер үшін ең дәл есептеулермен өлшеуге болатынын көреміз.



Сурет 4.7 - Деформацияны өлшеу схемасы

4.7 суретте сыналатын бетон арқалықтың биіктігі  $h$  және ені  $M$  және  $O$  күш қолдану нүктесі мен  $a$  және  $B$  бетон арқалығының ұштары арасындағы алақанның  $A$ -дан  $O$ -ға дейінгі қашықтығы  $A$ . Қолданылатын күштің мәні  $F$ , содан кейін ТБТ датчигіндегі иілу моментінің сәйкес мәні формула бойынша анықталады [119, б 040604-2]:

$$M(s) = \frac{Fb}{a+b} \cdot s \quad (4.1)$$

Сынақ бетон арқалығы көлденең күштің әсерінен иілгенде, сынақ бетон арқалығының төменгі бетіндегі ТБТ орнату орнындағы оң кернеу:

$$\sigma = \frac{M(s)}{W} = \frac{6Fs}{mh^2} \cdot \frac{b}{a+b} \quad (4.2)$$

мұндағы  $W$ -иілу сынағына жататын бетон Арқалықтың көлденең қимасының коэффициенті. Гук Заңына сәйкес оң кернеу  $s$  Мен Юнг модулі  $E$  мен деформация мәні  $\varepsilon$  арасындағы қатынасы:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.3)$$

(4.1) – (4.3) формаулаларды ала отырып келесі Юнг модулін айқындайтын формуалны көрсетеміз:

$$E = \frac{6ks\lambda_B}{mh^2 \frac{\Delta\lambda_B}{E}} \cdot \frac{b}{a+b} \quad (4.5)$$

(4.5) формуладан экспериментте  $F$ -ге тең қолданылатын күшпен ТБТ шағылысу центріннің толқын ұзындығының өзгеруін дұрыс өлшеу жағдайында өлшенген сәулені жүзеге асыруға болатындығын көруге болады.

Сынақ кезінде температураның ТБТ шағылысу орталығының толқын ұзындығына әсерін елемеуге болады [119, б.040604-3]. Эксперимент шарттарына сәйкес (4.5) формуланы келесіге дейін жеңілдетуге болады:

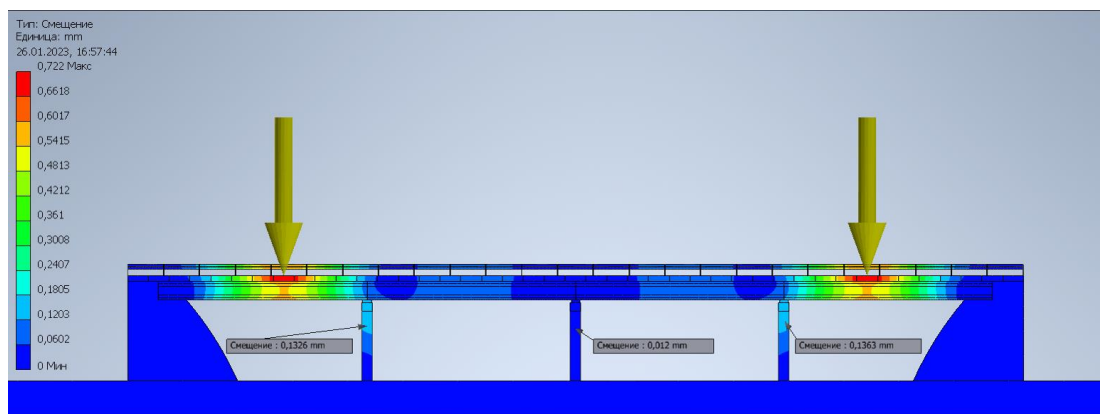
$$\Delta\lambda_B = \frac{3ks\lambda_B}{mh^2 E} F = K \cdot F \quad (4.6)$$

Тәжірибелі түрде, ТБТ шағылысу спектрін өлшеу арқылы ТБТ орталық толқын ұзындығының ығысуы мен қолданылатын қысым арасындағы байланыс Лоренцке сәйкес келеді. Оның көлбеуінен  $k$  бетон модулін алуға болады [120].

$$E = \frac{3ks\lambda_B}{mh^2 K} \quad (4.7)$$

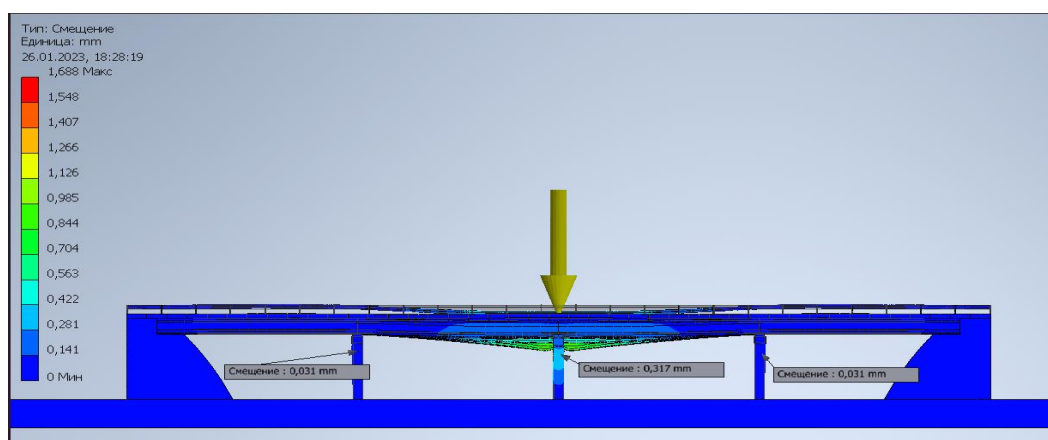
Осы жұмыстың нәтижесінде бағдарламалық модельдеу кезінде бетон арқалықтарының деформациясы мен орын ауыстыруының бірнеше түрі анықталды. Бағдарламалық модельдеу негізінде кернеудің әртүрлі компоненттеріндегі тең және нүктеден нүктеге дейінгі деформациялар қарастырылды. Датчиктердің созылуының негізгі сипаттамалары алынды. Яғни, нәтижесінде бетон арқалықтарға бекітілген деформация датчигі көпірдің бүкіл ұзындығы бойынша осьтер түрінде деформацияларды өлшеп, көрсетті. Оптикалық датчиктің көмегімен бетон көпіріндегі механикалық кернеуді өлшеудің нақты нәтижелері де алынды.

Эксперимент алдымен рефлексия центрiнiң толқын ұзындығы мен зерттелетiн бетон арқалықтағы әртүрлi жүктемелер арасындағы байланысты зерттейдi (сурет 4.7).



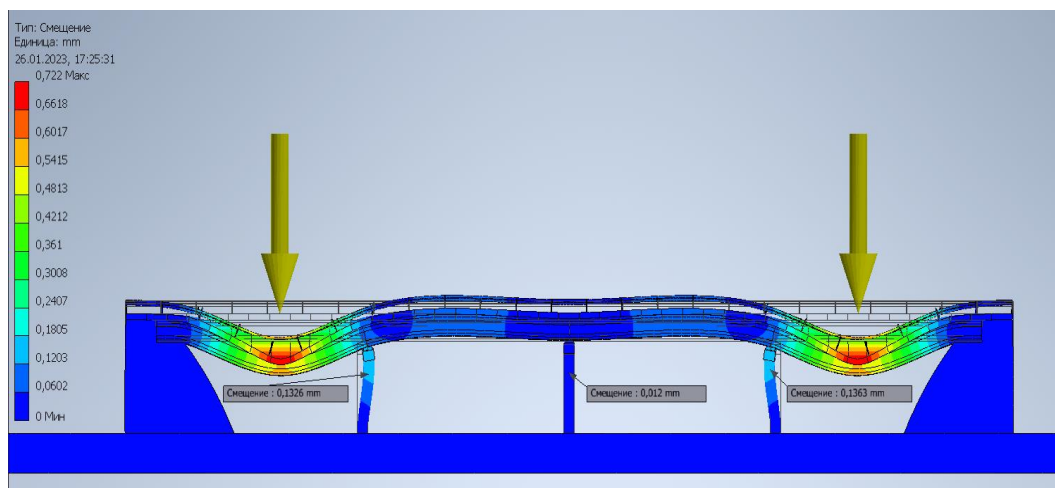
Сурет 4.8 – Талшықты Брэгг датчиктері орнатылған автомагистральдi көпiр сұлбасының моделi

4.8 суретте екi нүктеде механикалық кернеу түсiрiлген автомагистральдi көпiр моделi ұсынылған. Көпiрдiң құрылымы ретiнде бетонды материал алынған, сонымен бiрге арқалықтары да бетоннан тұрады. Көпiр ұзындығы 100 метр, ал көлемi 9718 м<sup>2</sup>.



Сурет 4.9 - Талшықты Брэгг датчиктері орнатылған автомагистральдi көпiр сұлбасының моделi

4.9 суретте орталық (бiр) нүктеде механикалық кернеу түсiрiлген автомагистральдi көпiр моделi ұсынылған. Көпiрдiң құрылымы ретiнде бетонды материал алынған, сонымен бiрге арқалықтары да бетоннан тұрады. Көпiр ұзындығы 100 метр, ал көлемi 9718 м<sup>2</sup>.

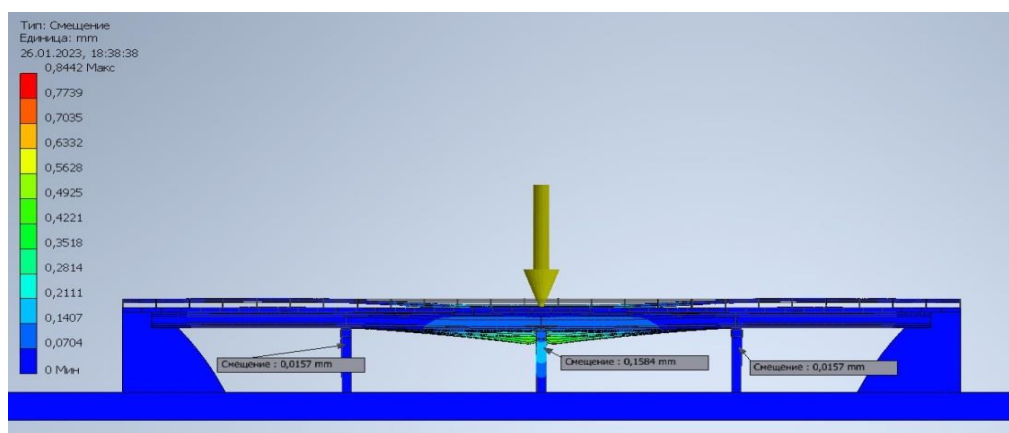


Сурет 4.10 - Талшықты Брэгг датчиктері орнатылған автомагистральді көпір сұлбасының деформациялан моделі

Бұл арнайы Authodesk модельдеу бағдарламалық тілінде құрастырылған модель. 4.10 суретте көріп отырғанымыздай, механикалық кернеу әсерінен автомагистральды көпір арқалықтары деформацияға ұшыраған. Түскен механикалық кернеудің жүктемесі 3000 Н шамасында. Деформацияға түскен бетон арқалықтардың талдау нәтижелері төменгі кестеде көрсетілген.

Кесте 4.2 – Деформацияға түскен бетон арқалықтардың талдау нәтижелері

Орташа жағдайда	Массалық тығыздық	2,407 кг/см <sup>3</sup>
	Өтімділік шегі	2,413 МПа
	Созылу беріктігінің соңғы шегі	2,400 МПа
Деформацияланған жағдайда	Юнг Модулі	23,23 ГПа
	Пуассон коэффициенті	0,167 бр
	Ығысудағы серпімділік модулі	9,961 ГПа



Сурет 4.11 – Талшықты Брэгг датчиктері орнатылған автомагистральді көпір сұлбасының деформациялан моделі

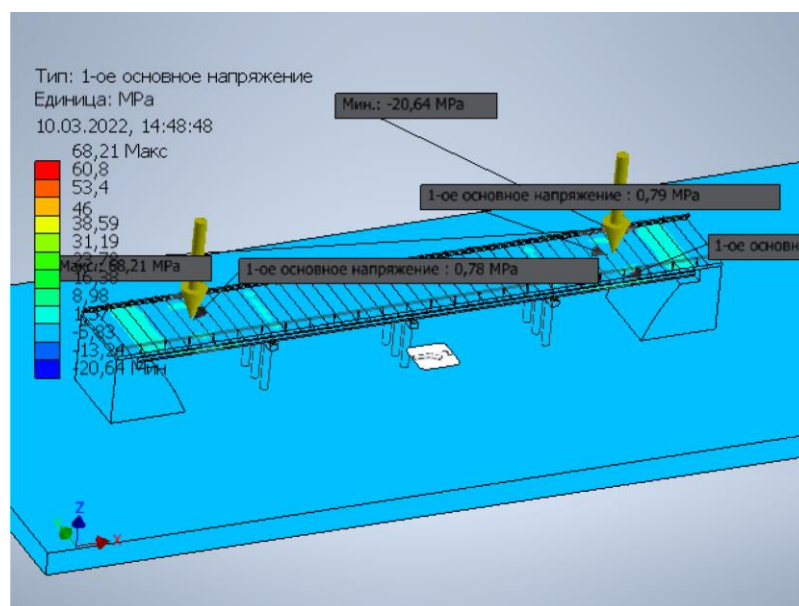
Бұл арнайы Authodesk модельдеу бағдарламалық тілінде құрастырылған модель. 4.11 суретте көріп отырғанымыздай, орталық нүктеге бойынша түсірілген механикалық кернеу әсерінен автомагистральды көпір арқалықтары деформацияға ұшыраған. Түскен механикалық кернеудің жүктемесі 4000 Н шамасында. Деформацияға түскен бетон арқалықтардың талдау нәтижелері төменгі кестеде көрсетілген.

Кесте 4.2 – Деформацияға түскен бетон арқалықтардың талдау нәтижелері

Орташа жағдайда	Массалық тығыздық	2,267 кг/см <sup>3</sup>
	Өтімділік шегі	2,318 МПа
	Созылу беріктігінің соңғы шегі	2,300 МПа
Деформацияланған жағдайда	Юнг Модулі	23,26 ГПа
	Пуассон коэффициенті	0,159 бр
	Ығысудағы серпімділік модулі	9,863 ГПа

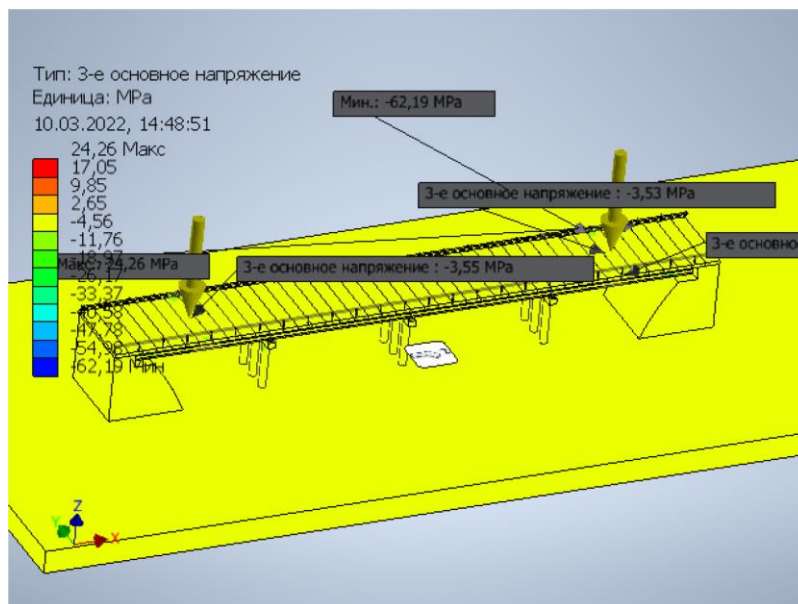
Әдістің басқа қатты қатты материалдардың Юнг модулін өлшеуге қолданылатынына көз жеткізу үшін эксперименттер үшін темір арқалықтың орнына ұзындығы, ені және қалыңдығы 1000, 50 және 0,6 м тікбұрышты бетон Арқалық пайдаланылды. орталық шағылысу толқын ұзындығы 1562 нм ТБТ датчигі а тірек нүктесінен 100 м қашықтықта орнатылды және Юнг сәулелік модулі ТБТ көмегімен бөлек өлшенді. Бетон материалының қаттылығы аз болғандықтан, экспериментте қосылған салмақ бір қадамға 0,5 МН болатын және 3 МН-ге дейін жүктелген.

4.12 суретте осы өлшеулердің нәтижесінде минималды кернеуі -20,64 МПа және максимум - 68,21 МПа болатын екі нүктелі механикалық кернеудегі деформацияны өлшеу кезінде бірінші негізгі кернеу табылғаны көрсетілген.



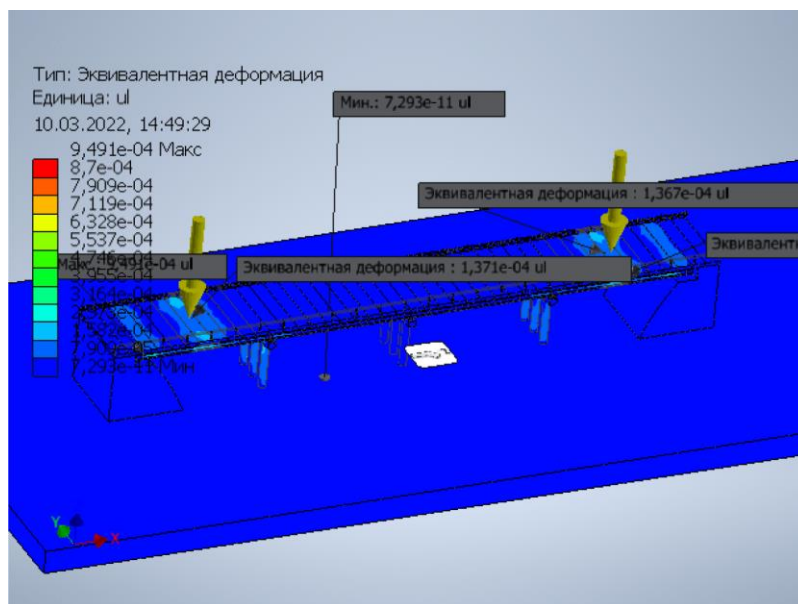
Сурет 4.12 – Деформацияны өлшеу кезіндегі бірінші негізгі кернеу

4.13 суретте осы өлшемдердің нәтижесінде минималды кернеуі 62,19 МПа және максимумы 24,26 МПа болатын екі нүктелі механикалық кернеудегі деформацияны өлшеу кезінде үшінші негізгі кернеу табылғандығы көрсетілген.



Сурет 4.13 – Деформацияны өлшеу кезіндегі үшінші негізгі кернеу

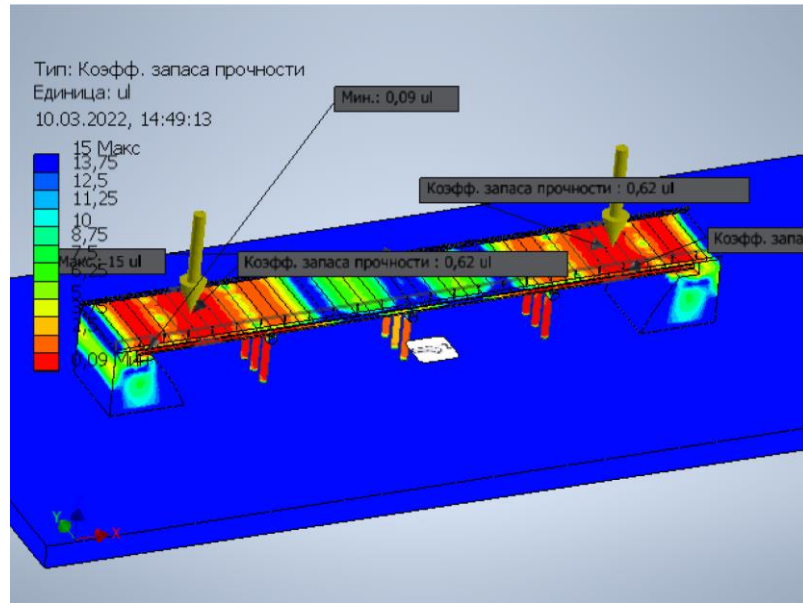
4.14 суретте осы өлшеулер нәтижесінде екі нүктелі механикалық кернеуде эквивалентті деформация табылғандығы көрсетілген.



Сурет 4.14 – Эквивалентті деформация

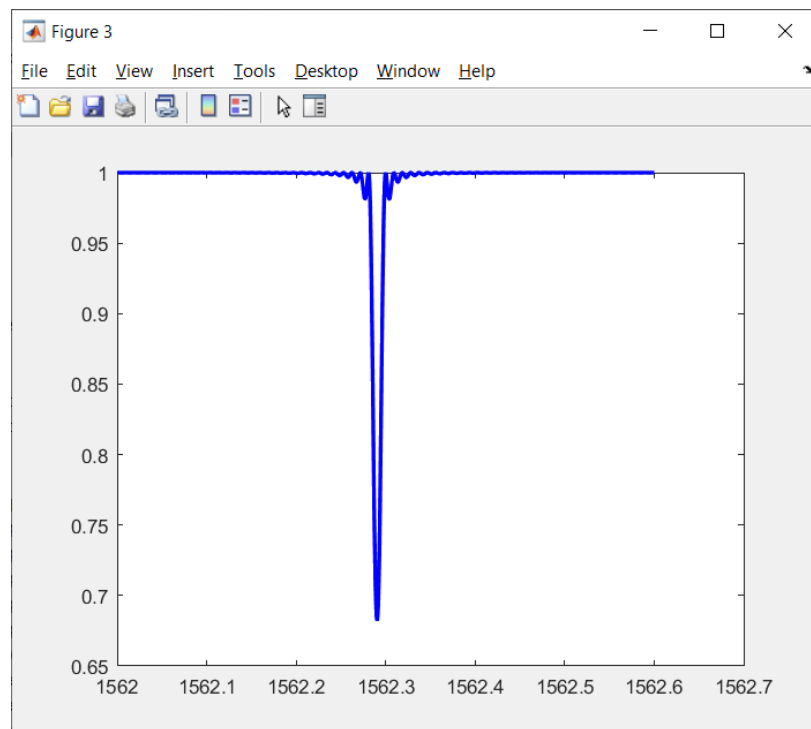
Эквивалентті деформацияны өлшегеннен кейін бағдарлама қауіпсіздік коэффициентін өлшейді. 4.15 суретте қауіпсіздік коэффициентінің минималды және максималды мәндері көрсетілген.





Сурет 4.15 – Қауіпсіздік коэффициенті

Енді осы Authodesk бағдарламасында құрылған автомагистральді көпір нұсқаларының графикті – математикалық моделін қарастырсақ. Бұл жерде біз температураны ескермейміз, себебі температураны кез келген мән алса болады. Ескеретін шама ол деформация, яғни алынып отырған бетон материалының деформацияға тәуелділігін көрсету (4.16 сурет).

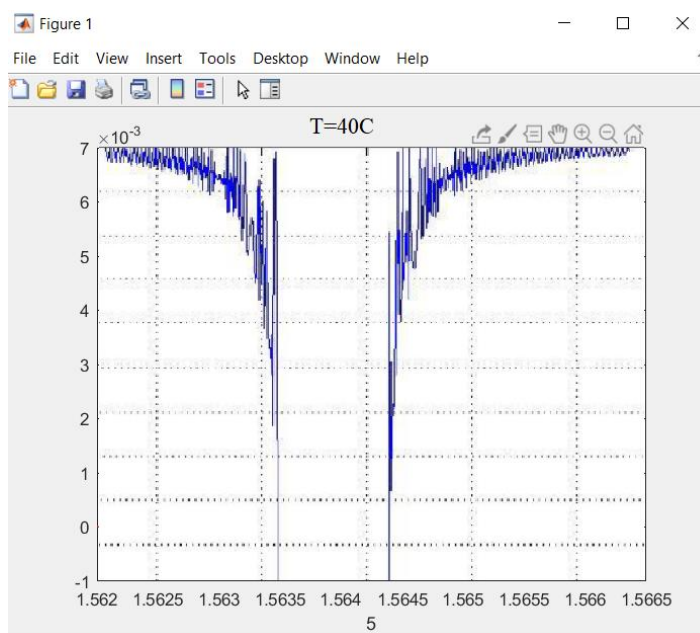


Сурет 4.16 – Берілген толқын ұзындығы бойынша деформацияның тәуелділік графигі

Графиктің келесі сипаттамалары бар:

- У осі (тік): у осіндегі мәндер шамамен 0.65-тен 1-ге дейін өзгереді;
- Х осі (көлденең): Х осіндегі мәндер шамамен 1562.1-ден 1562.7-ге дейін.

Бұл график оптикалық өлшеулермен немесе спектрлік талдаумен байланысты. Ол оптикалық талшықтар сияқты спектрдің әртүрлі аймақтарындағы жарық қарқындылығын көрсете алады.



Сурет 4.17 –ТБТ негіздегі өлшенген механикалық кернеудің спектрлік сипаттамасы

Бұл график 40°C температурада талшықты оптикалық Брэгг торы негізінде өлшенетін спектрлік сипаттамалар болып табылады. Толығырақ қарастырайық:

- У осі (тік): у осіндегі мәндер  $\times 10^9$  шамасы бойынша берілген, бірақ нақты бірліктер көрсетілмеген;
- Х осі (көлденең): шамамен 1.562-ден 1.5665-ке дейінгі сандық мәндермен қол қойылған, бірақ нақты өлшем бірліктері жоқ;
- Деректер графигі: графикте спектрлік сипаттамаларды білдіретін көк нүктелер көрінеді;
- Екі тән нүкте: көк нүктелер арасында минимум аймағы бар екі айқын шыңды құрайды.

Бұл деректер әртүрлі толқын ұзындықтарындағы талшықты оптикалық Брэгг торы арқылы механикалық кернеудің өзгеруімен байланысты. Мұндай өлшеулер үшін 40°C температура өте маңызды болуы мүмкін.

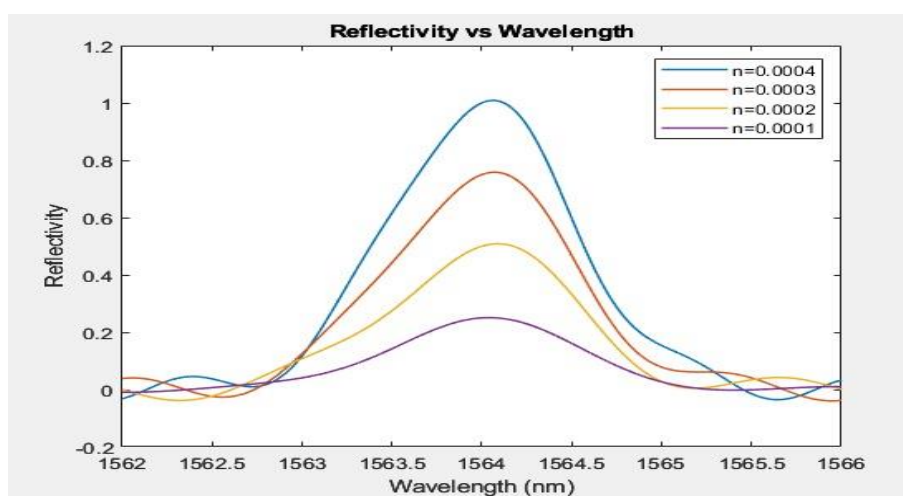
4.17 суретте талшықты Брэгг торына негізделген механикалық кернеу мен толқын ұзындығы тәуелділік графигі көрсетілген. Бұл жерде температура тұрақты  $\Delta T=40^\circ\text{C}$ .

Брэгг торының сыну көрсеткішінде әртүрлі өзгерістерге тап болып келеді, бұл процесс шағылу спектрінің сәйкес өзгеруіне әкеліп соғады. Шағылысу

спектрі дегеніміз - оптикалық Брэгг торымен шағылған жарықтың толқын ұзындығы болып табылады.

Сыну көрсеткішіндегі бұл өзгерістер және шағылысу спектріндегі кейінгі өзгерістер опто – талшықты Брэгг торының пішіні мен атқаратын қызметі үшін өте құнды болып келеді. Олар толқын ұзындығын сүзіп алу, дисперсиялық компенсация, оптикалық зондтау және телекоммуникациялық байланыстарды ұйымдастыру сынды көптеген қолданыстарда қызмет атқаруға мүмкіншілік береді.

Matlab Simulink бағдарламасындағы тордың ұзындығы  $L = 300$  мм кезінде сыну көрсеткішінің біршама өзгеруі мен Брэгг торының шағылысу спектрін 4.18 суреттен көреміз.



Сурет 4.18 –Тор ұзындығы  $L = 300$  мм кезінде сыну көрсеткішінің әртүрлі өзгеруі мен Брэгг торының спектрлік сипаттамалары

Бұл графикте тордың ұзындығы  $L = 300$  мм болатын Брэгг торының спектрлік сипаттамалары көрсетілген. Толығырақ қарастыратын болсақ:

– Y осі (тік): шағылысуды білдіреді (шағылысу) және 0-ден 1.2-ге дейінгі мәндерге ие;

– X осі (көлденең): шамамен 1562-ден 1566 нм-ге дейін өзгертін нанометрлердегі (нм) толқын ұзындығының мәндерімен қол қойылған.

Қисықтар бойынша:

– көк түсті қисық  $n = 0.0004$  сәйкес келеді, ол 1563.5 нм шамасында күрт өседі, максималды шағылысу қабілеті 1.2-ге жақын;

–  $n = 0.0003$  үшін қызыл түсті қисық көк түсті қисықпен салыстырғанда кеңірек шыңға және төменгі максималды шағылыстыруға ие;

–  $n = 0.0002$  үшін сары түсті қисық сонымен қатар кеңірек шыңды және төмен шағылысуды көрсетеді;

–  $n = 0.0001$  үшін күлгін түсті қисық ең кең шыңға және ең төменгі шағылыстыруға ие.

Бұл деректер әртүрлі толқын ұзындықтарындағы Брэгг торының оптикалық өлшемдерімен немесе спектрлік талдауымен байланысты.

Әртүрлі ұзындықтағы талшықты Брэгг торында шағылу индексі ( $n$  белгіленеді) аз мөлшерде өзгергенде (мысалы,  $n = 0,0001$ ), бұл шағылу спектрінің сәйкес өзгеруіне әкеледі. Шағылысу спектрі - Брэгг талшық торымен шағылған жарықтың толқын ұзындығы.

Қысқа тор ұзындығы: қысқа талшықтары бар Брэгг торында шағылысу индексінің  $n = 0,0001$  өзгеруі шағылысу спектрінің салыстырмалы түрде аз ығысуына әкелуі мүмкін. Бұл ығысу шағылысу көрсеткішінің өзгеруіне пропорционал болады. Мысалы келтіретін болсақ, егер  $n$  мәні үлкейсе, шағылысу спектрінде көк түсті ығысу пайда болады, ал  $n$  мәнін азайтсақ, шағылысу спектрінде қызыл ығысу пайда болып жатады.

Аралық тордың ұзындығы: аралық ұзындықтағы Брэгг талшық торларында шағылысу индексінің  $n = 0,0001$  өзгеруі қысқа торлармен салыстырғанда шағылысу спектрінің дәлме-дәл ығысуына әкеледі. Бұл ығысу процесі бұрынғыға қарағанда, шағылу индексінің өзгеруіне пропорционалды болады, бірақ тордың ұзағырақ ұзындығына байланысты жиынтық әсер айқынырақ болады.

Ұзын тордың ұзындығы: Ұзын талшығы бар Брэгг торында  $n=0,0001$  шағылу индексінің өзгеруі шағылысу спектрінің айтарлықтай ығысуына әкелуі әбден мүмкін. Тор ұзындығы ұзарған сайын сыну көрсеткішін өзгертудің жалпылама әсері артады, бұл шағылу спектрінің едәуір ығысуына әкеледі.

Шағылысу спектрінің негізгі сипаттамалары мен қасиеттері әртүрлі факторларға байланысты болады, мысалы соның ішінде, талшықты Брэгг торының пішіні, сыну индексінің модуляция профилі, тор ұзындығы және қоршаған ортасы. Шағылысу спектріндегі өзгерістерді негізгі математикалық модельдер немесе сандық модельдеу арқылы есептеуге болады.

Қазіргі қолданыста шағылысу спектрлеріндегі өзгерістер оптикалық фильтрлеу, толқын ұзындығын таңдау құрылғылары, дисперсиялық компенсация және оптикалық зондтау сынды көптеген мақсаттарда қолданылуы мүмкіндігі айқындалды. Оптикалық Брэгг торларының сыртқы пішіні мен атқаратын қызметінің көмегімен кез келген қолданбаның талаптарына сәйкес келетін белгілі бір шағылыстыру спектрлік қасиеттерін алуға болады.

#### **4-бөлім бойынша қорытынды**

Талшықты Брэгг торлы датчиктер екі нүктелі және орталық нүкте бойынша түсірілген механикалық кернеудің тәжірибелік әдісіне сүйене отырып, механикалық әсер ету кезінде деформация параметрлерін өлшей алатын әмбебап датчик моделі ұсынылды. Бұл графикті – математикалық модельдер Authodesk және Matlab бағдарламаларында құрастырылды.

Қатты материалға арналған Юнг Модулінің формуласы және бетон арқалыққа арналған Юнг Модулінің өлшемі зерттелді. Тәжірибелік нәтижелер толқын ұзындығынан ТБТ–ның шағылысуы түсірілген механикалық жүктемеге жақсы сызықтық тәуелділікке ие екенін көрсетті.

## ҚОРЫТЫНДЫ

Диссертациялық жұмыста Брэгг торына негізделген механикалық кернеуді датчикты зерттеу және модельдеу жұмыстарын ұйымдастыруда Брэгг торын модельдеудің маңыздылығы қарастырылды. Брэгг торының басқа оптикалық талшықты датчиктерден ерекшеліктері мен артықшылықтары туралы мәліметтер келтірілді. Брэгг торының негізгі сипаттамалары, оны жасау кезінде қолданылатын негізгі параметрлердің сипаттамалары зерттелді. Оптикалық талшыққа негізделген датчиктердің әртүрлі құрылғыларда және көптеген салалардағы маңызды іс-әрекеттері қарастырылды. Оптикалық талшықты Брэгг торының жаңа дәуір технологиясы екендігіне тағы да бір көз жеткізілді, себебі көлемі жағынан шағын, бағасы жағынан тиімді және ең бастысы жұмысы жағынан эффективті болып келетін талшықты Брэгг торын қолдану бізге өті тиімді технология екенін көрсетті.

Жұмыстың мақсаты мен алға қойылған мәселелерге қатысты барлық талаптар орындалды.

Нақты айтқанда:

– тақырыпта көтерілген мәселелерге тікелей қатысы бар ғылыми еңбектерге әдебиеттік шолулар жасалып, Брэгг торын пайдаланып, қоғамдағы әр түрлі құбылыстарды тіркеуге арналған датчиктерді құрастыру мен пайдалануға қатысты еңбектер анықталды. Талшықты датчиктердің әртүрлі құрылғыларда оптикалық талшықтың көптеген салалардағы маңызды іс-әрекеттері қарастырылды. Сонымен бірге талшықты оптикалық Брэгг торларының негізгі теориялық мәліметтері көрсетілді. Талшықты Брэгг торларының типтері мен торды жазудың арнайы әдістері туралы, сонымен қатар Брэгг торларының деформациясы және температуралық сезімталдығы туралы мәліметтер көрсетілді;

– механикалық кернеулерді өлшеуге арналған талшықты-оптикалық датчиктердің жіктелуі қарастырылды, оның ішінде Фабри – Пэро даичктері, Брэгг торлары, Рамандық датчиктер және де т.б. датчиктер қарастырылды. Солардың ішінен біздің диссертация бойынша алынған оптоталшықты Брэгг торлары негізінде деформацияны өлшеуге арналған талшықты-оптикалық жүйелерді құрудың қолданыстағы әдістері талданды.

– қатты материалдар құрылымының күйі қарастырылды, арнайы шектеулерді еңсеру үшін нақты уақыт режимінде салыстырмалы түрде жоғары дәлдіктегі, ұзақ мерзімді және үздіксіз анықтауды қамтамасыз ете алатын және бір уақытта туындаған өзгерістерді тудырмайтын құрылымдардың күйін бақылау технологиясы (ҚКБТ) әдісі құрылды. Юнг модулін пайдалана отырып, қатты материалдарға түсірілген жүктеменің әсерінен туындайтын деформация параметрлерін есептелді. Нәтижесінде Гук заңымен сипатталатын деформация параметрлерін, Юнг модулі арқылы арнайы математикалық өрнек бейімделді.

– талшықты Брэгг торлы датчиктер екі нүктелі және орталық нүкте бойынша түсірілген механикалық кернеудің тәжірибелік әдісіне сүйене отырып, механикалық әсер ету кезінде деформация параметрлерін өлшей алатын әмбебап

датчик моделі ұсынылды. Бұл графикті – математикалық модельдер Authodesk және Matlab Simulink бағдарламаларында құрастырылды. Нәтижесінде бізде 1562-1566 нм толқын ұзындығы аралығында Юнг модулі бойынша алынған бетонның деформация параметрі 22 ГПа тең болды, бұл стандартты орта көрсеткішті көрсететті;

– жұмыс аясында қарастырылған теориялық, тәжірибелік және модельдеу нәтижелерінің салыстырмалы қателігінің ықтималдығы анықталды, ол орта шамамен 3% құрады.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Mitschke F. Glasfasern, Physik und Technologie // Elsevier Spektrum Akademischer Verlag.– 2005. p.20-52
- 2 Trutzel M. Dehnungsermittlung mit faseroptischen Bragg-Gitter-Sensoren. – Berlin. - 2001. – 83 p.
- 3 <https://habr.com>.12.12.2023.
- 4 <https://m-focus.ru> .12.12.2023.
- 5 Othonos A., Kalli K. Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing // Artech House. – Boston. – 1999. – p.100-125
- 6 Bennion I. J., Williams A. R., Zhang L., Sugden K., Doran N. J. “UV-written in-fiber Bragg gratings // Opt. and Quantum Electron. – 1996. - №28. – P. 93-135.
- 7 Othonos A. Fiber Bragg gratings // Review of Scientific Instruments. – 1997. - №68. – P.4309-4341.
- 8 Eggleton B. J., Ahuja A., Westbrook P. S., Rogers J. A., Kuo P., Nielsen T. N., Mikkelsen B. Integrated tunable fiber gratings for dispersion management in high-bit rate systems // J. Lightwave Technol. – 2000. - №18. - P.1418-1432.
- 9 Laming R. I., Loh W. H., Gu X., Zervas M. N., Cole M. J., Ellis A.D. Dispersion compensation with chirped fiber Bragg grating to 400 km at 10 Gbit/s in nondispersion-shifted fiber // Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC'96), Techn. Digest. - San Jose. – 1996. - Vol. 2. - P.203-204.
- 10 Brennan J. F., Matthews M. R., Dower W. V., Treadwell D. J., Wang W., Porque J., Fan X. Dispersion correction with a robust fiber grating over the full C-band at 10-Gb/s rates with < 0.3-dB power penalties // IEEE Photon. Technol. Lett. -2003. – 15. – P. 1722-1724.
- 11 Chen X., Xu X., Zhou M., Jiang D., Li X., Feng J., Xie S. Tunable dispersion compensation in a 10 Gb/s optical transmission system by employing a novel tunable dispersion compensator // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2004. - №16. – P. 188-190.
- 12 Feng K.-M., Cai J.-X., Grubsky V., Starodubov D. S., Hayee M. I., Lee S., Jiang X., Willner A. E., Feinberg J. Dynamic dispersion compensation in a 10 Gbit/s optical system using a voltage controlled tuned nonlinearly chirped fiber Bragg grating // IEEE Photon. Technol. Lett. – 1999. - №11. – P.373-375.
- 13 Lauzon J., Thibault S., Martin J., Ouellette F. Implementation and characterization of fiber Bragg gratings linearly chirped by temperature gradient // Opt. Lett. – 1994. - №19. – P. 2027-2029.
- 14 Hill P.C., Eggleton B.J. Strain gradient chirp of fiber Bragg grating // Electron. Lett. – 1994. - №30. – P. 1172-1174.
- 15 Pacheco M., Medez A., Zenteni L. A., Mendoz Santoyo F. Chirping optical fiber Bragg gratings using tapered-thickness piezo-electric ceramic // Electron. Lett. – 1998. - №34. – P. 2348-2350.
- 16 Ohn M. M., Alavie A. T., Maaskant R., Xu M. G., Bilodeau F., Hill K. O. Dispersion variable fiber grating using a piezoelectric stack // Electron. Lett. – 2000. - №32. – P. 2000-2001.

- 17 Reyes P. I., Litchinitser N., Sumetsky M., Westbrook P. S. 160-Gb/s tunable dispersion slope compensator using a chirped fiber Bragg grating and a quadratic heater // *IEEE Photon. Technol. Lett.* – 2005. - №17. – P. 831-833.
- 18 Lam D.K.W., Garside B.K. Characterization of single-mode optical fiber filters // *Appl. Opt.* – 1981. - №20. – P. 440-445.
- 19 Russell P.St. J., Archambault J. L., Reekie L. Fiber gratings // *Physics World.* – 1993. – 4146 p.
- 20 Hill K., Melt O.G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview // *J. Lightwave Technol.* – 1997. - №15. – 1263-1276.
- 21 Brady G. P., Kalli K., Webb D. J., Reekie L., Archambault J. L., Jackson D. A. Simultaneous measurement of strain and temperature using the first- and second-order diffraction wavelengths of Bragg gratings // *IEE Proceed. Optoelectron.* – 1997. - №144. – 156-161.
- 22 Delevaque E., Boj S., Bayon J. F., Poignant H., Lemellot J., Monerie M. Optical fibre design for strong gratings photoimprinting with radiation mode suppression // *Opt. Fiber Commun. Conf., Techn. Digest.* - USA. - 1995.
- 23 Patrick H., Gilbert S.L. Growth of Bragg gratings produced by continuouswave ultraviolet light in optical fiber // *Opt. Lett.* – 1993. - №18. – P. 1484-1486.
- 24 Liu Y., Williams J. A. R., Zhang L., Bennion I. Abnormal spectral evolution of fibre Bragg gratings in hydrogenated fibres // *Opt. Lett.* – 2002. - №27. – P. 586-588.
- 25 Simpson A. G., Kalli K., Zhou K., Zhang L., Bennion I. Formation of type IA fibre Bragg gratings in germanosilicate optical fibre // *Electron. Lett.* – 2004. - №40. – P. 163- 164.
- 26 Simpson A. G., Kalli K., Zhang L., Zhou K., Bennion I. Abnormal photosensitivity effects and the formation of type IA FBGs // *Conf. Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides (BGPP) Techn. Digest.* - USA. – 2003. - 31 p.
- 27 Kalli K., Simpson A. G., Zhou K., Zhang L., Bennion I. Tailoring the temperature and strain coefficients of type I and type IA dual grating sensors – the impact of hydrogenation conditions // *Measurement Science and Technology.* – 2006. - №17. – P. 949-954.
- 28 Simpson A.G., Kalli K., Zhou K., Zhang L., Bennion I. An idealised method for the fabrication of temperature invariant IA-I strain sensors postdeadline session // *OFS-16 Nara.* – Japan. – 2003. – 4 p.
- 29 Kalli K., Dobb H., Simpson A. G., Komodromos M., Webb D. J., Bennion I. Annealing and temperature coefficient study of type IA fibre Bragg gratings inscribed under strain and no strain - implications to optical fibre component reliability // *Proc. SPIE 6193, Reliability of Optical Fiber Components // Devices, Systems, and Networks III.* – 2006.- P. 119-130.
- 30 Riant I., Haller F. Study of the photosensitivity at 193 nm and comparison with photosensitivity at 240 nm influence of fiber tension: type IIA aging // *J. Lightwave Technol.* – 1997. - №15. – P. 1464-1469.



31 Archambault J. L., Reekie L., P.St. J. Russell // High reflectivity and narrow bandwidth fibre gratings written by single excimer pulse // *Electron. Lett.* – 1993. - №29. – 2829 p.

32 Кадирбаева Г.К., Чежимбаева К.С. Талшықты Брэгг торларының пайда болу механиздерін зерттеу әлемдегі ғылым мен білім: XXI ғасырдың сын-қатерлері // VIII Халықаралық ғылыми-практикалық конференцияның еңбектері. Техникалық ғылымдар. - Нур-Султан, 2021. – Т.І. - P.20-24.

33 Giallorenzi T.G., Bucaro J.A., Dandridge A., Sigel G.H. Jr J.H., Cole S.C., Rashleigh R.G. Priest, Optical fiber sensor technology // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* – 1982. - №18(4). – P. 626–665.

34 Moccia M., Pisco M., Cutolo A., Galdi V., Bevilacqua P., Cusano A. Opto-acoustic behavior of quoted fiber Bragg grating // *Opt. Express.* – 2011. - №19(20) - P.18842–18860.

35 Vivek K., Rajesh R., Sreehari C.V., Sham Kumar S., Shajahan K., Praveen T.K., Santhanakrishnan T., Moosad K.P.B. A new approach of large diameter polymer-coated fiber laser hydrophone // *J. Lightwave Technol.* – 2017. - №35(19). – P. 4097–4104.

36 Rao Y.-J. In-fiber bragg grating sensors // *Meas. Sci. Technol.* – 1997. - №8 (4). – P.355–375.

37 Liu T., Hu L., Han M. Adaptive ultrasonic sensor using a fiber ring laser with tandem fiber Bragg gratings // *Opt. Lett.* – 2014. - №39 (15). – P. 4462–4465.

38 Agrawal G.P., Radic S. Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing // *IEEE Photonics Technol. Lett.* – 1994. - №6 (8). – P. 995–997.

39 Zhao S., Liu Q., Chen J., He Z. Pe-Resolution fiber grating sensor with adjustable measurement range and ultralow probe power // *IEEE Photonics Technol. Lett.* – 2019. - №31. – P. 19–22.

40 Shao Z., Qiao X., Rong Q., Sun A. Fiber optic magnetic field sensor using a phase shifted fiber Bragg grating assisted by a TbDyFe bar // *Sens. Actuators A Phys.* – 2017. - №261. – P.49–55.

41 Orazaliyeva S., Kadirbayeva G., Chezhibayeva K. Evaluation of the effectiveness of the effect of photosensitization on the spectral characteristics of the fiber Bragg grating // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2022. - №3(117). – P. 6–14. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259033>.

42 Кадирбаева Г.К., Чежимбаева К.С. Талшықты брэгг торларын қолдана отырып оптикалық датчиктердің жазу әдістерін талдау // *Вестник Алматинского университета энергетика и связи.* - 2022. - №4(59). - 90 с. [https://doi.org/10.51775/2790-0886\\_2022\\_59\\_4\\_90](https://doi.org/10.51775/2790-0886_2022_59_4_90).

43 Muhammad A. B. J. Simulation of fiber Bragg grating characteristics and Behaviors as Strain and Temperature // *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET).* – 2021. – Vol. 9, Iss. 11. - P. 1154-1161.

44 Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors // *J. Optical Fiber Technology.* – 2003. - № 9(2). – P. 57-79.

45 Mendez A., Morse T. F., Mendez F. Applications of embedded optical fiber sensors in reinforced concrete buildings and structures in Proceedings of SPIE // The International Society for Optical Engineering. - China, 1990.

46 Yanbiao L., Libo Y., Qian T. The 40 years of optical fiber sensors in China // Acta Optica Sinica. – 2018. - Vol. 38, №3. – 328 p.

47 Kinet D., Mégret P., Goossen K., Qiu L., Heider D., Caucheteur C. Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: challenges and solutions // Sensors № - 2014. - Vol. 14, № 4. - P. 7394–7419.

48 Raffaella D.S. Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: recent advances and applications // Sensors. – 2015. - Vol. 15, №8. - P. 18666–18713.

49 Waldemar W., Piotr K. The application of inverse analysis in strain distribution recovery using the fibre bragg grating sensors // Metrol. meas. syst. – 2009. - Vol. 16, №4. – P. 649-660.

50 Orazaliyeva S., Kadirbayeva G., Chezhimbayeva K. Evaluation of the effectiveness of the effect of photosensitization on the spectral characteristics of the fiber Bragg grating // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2022. - № 3(117). – P. 6–14. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259033>.

51 Wang H.P., Zhou Z., Huang Y., Xiang P., Ou J.P. Strain transfer mechanism of quadrate-encapsulated FBG sensors embedded in rectangular structures // J. Civil Struct. Heal. Monitor. – 2015. - №5. – P. 469–480.

52 Nurzhaubayeva G., Chezhimbayeva K., Haris N. Characterization of high impedance of multilayer coplanar waveguide transmission line design for integration with nanodevices // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2022. - № 4(118). – P. 6–14. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263671>.

53 Inaudi D, Casanova N, Kronenberg P. Embedded and surface- mounted fiber optic sensors for civil structural monitoring [C] // SPIE. – 1997. – P. 236-243.

54 Pi H., Liu Q., Ye Q. Analysis and experimental study of inner stress for metallized fiber Bragg gratings // Laser and Optoelectronics Progress. – 2016. - Vol. 53, Iss. 4. - 40604 p.

55 Pang D., Sui Q., Jiang M. Fiber Bragg grating high-temperature sensing system based on improved support degree matrix model // [J]. Journal of Optoelectronics·Laser. – 2012. - №23(11). – P. 2045-2051.

56 Liu Ch., Yu Y., Hong J. Measurement of the natural frequency of bench drill based on fiber Bragg grating // [J]. Laser & Optoelectronics Progress. – 2013. - № 50(2). – 20601 p.

57 Wang Y., Wang M., Huang X. Transverse pressure sensor based on the polarization properties of fiber grating // [J]. Chinese J Lasers. – 2011. - №38 (4). – P.40-50.

58 Ou Q., Zeng Q., Qin Z. Application of coated long period fiber grating to measure the change of microrefractive index // [J]. Journal of Optoelectronics·Laser. – 2013. - №24(2). – P. 323-328.

59 Guo Y., Zhang D., Zhou Z. Research progress in fiber-Bragg-grating accelerometer // [J]. Laser & Optoelectronics Progress. - 2013. - №50(6). - 60001 p.

60 Varzhel` S.V. Volokonny`e Bre`ggovskie reshetki [Fiber Bragg Gratings]: Nanotexnologii v volokonnoj optike. - Sankt-Peterburg: Universitet ITMO, 2015.

61 Леденев В.В. Обследование и мониторинг строительных конструкций зданий и сооружений: учебное пособие. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2017. – 252 с.

62 Кадирбаева Г.К., Чежимбаева К.С., Вуйчик В., Хизирова М.А. Талшықты брэгг торларын қолдану аясы және оларды пайдалану мүмкіндіктері // Вестник КазАТК. – 2023. - № 2 (125). – 1817 с.

63 Гармаш В.Б. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // Фотон-экспресс – М.:Наука, 2005. – № 6. – С. 128–140.

64 Джексон Р. Г. Новейшие датчики. - М.: Техносфера, 2007. - 384 с

65 Finkelstein L., Watts R.D. Systems Analysis of Instruments // Journal of the Institute of Measurement & Control. - 1971. - Vol. 4. - P. 236-237.

66 Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. - М. : Техносфера, 2005. - 592 с.

67 White R. M. A Sensor Classification Scheme // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. - 1987. - Vol. 34, №2. - P. 124-126.

68 Nye J. F. Physical Properties of Crystals // Oxford: Oxford Univ., 1957. - 329 p.

69 Mason W. P. Crystal Physics of Interaction Process. - New York : Academic, 1966. - 354 p.

70 Benes E. Groschi M., Burger W., Schmid M. Sensors based on piezoelectric resonators // Sensors Actuators. 1995. A 48. P. 1-21

71 Corbett J.P. Quartz steady-state force and pressure sensor // Sensors Expo West. Proceedings. Peterborough, 1991. 12 p.

72 Fabrication and Testing of a PZT Strain Sensor for Soil Applications / J. Soman [et al.] // IEEE Sensors Journal. 2011. Vol. 11, Issue 1. P. 78-85.

73 Волоконно-оптические датчики / Под ред. Э. Удда. М.: Техносфера, 2008. 520 с

74 Кульчин Ю. Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: Физматлит, 2001. 272 с

75 Compact optical fiber sensor smart node / S. W. Lloyd [et al.] // Review of Scientific Instruments. 2007. Vol. 78, Issue 3.6 p.

76 Compact acousto-optic interrogator for fiber optic Bragg sensors / A. V. Tsarev [et al.] // International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices. Rome (Italy), 2011. P. 83-84.

77 Multiplexed Fiber Bragg Grating Interrogation System Using a Microelectromechanical Fabry-Perot Tunable Filter / W. R. Allan [et al.] // IEEE Sensors Journal. 2009. Vol. 9, Issue 8. P. 936-943.

78 Пнев А. Б. Оптико-электронные измерительные системы на основе квазираспределенных волоконно-оптических брэгговских датчиков: Дис. ... канд. техн. наук : 05.11.07. М., 2008. 175 с.

79 Butrym B. A., Kim M. H., Inman D. Fatigue life estimation of structural components using macrofibre composite sensors // *Strain*. – 2012. - №48. – P. 190–197.

80 Frangopol D.M. Life-cycle performance, management, and optimization of structural systems under uncertainty accomplishments and challenges // *Structure and Infrastructure Engineering*. – 2011. - №7. – P. 389–413.

81 Frangopol D. M., Soliman M. Life cycle of structural systems: recent achievements and future directions // *Structure and infrastructure engineering*. – 2016. - №12. – P. 1–20.

82 Mufti A. Guidelines for Structural Health Monitoring // *Design Manual ISIS Canada*. – 2006. - №2. – 120 p.

83 Ou J. P., Li H. Structural health monitoring in mainland China: review and future trends // *Structural Health Monitoring-An International Journal*. - 2010.- № 9(3). - P.219–231.

84 Li H., Ou J.P. Structural health monitoring: from sensing technology stepping to health diagnosis // *Procedia Eng*. – 2011. - №14. – P. 753–760.

85 Leung C.K.Y., Wan K.T., Inaudi D., Bao X.Y., Habel W., Zhou Z., Ou J. P., Ghandehari M., Wu H. C., Imai M. Review: optical fiber sensors for civil engineering applications // *Materials and Structures*. – 2015. - №48. – P. 871–906.

86 Panopoulou A., Roulias D., Loutas T. H., Kostopoulos V. Health monitoring of aerospace structures using fibre Bragg gratings combined with advanced signal processing and pattern recognition techniques // *Strain*. – 2012. - №48. – P. 267–277.

87 Arsenault T., Achuthan A., Marzocca P., Grappasonni C., Coppotelli G. Development of a FBG based distributed strain sensor system for wind turbine structural health monitoring // *Smart Mater. Struct*. – 2013. – P.1-11.

88 Behzad M., Richard J. B., Joannes M. C., Elizabeth H. E., Fereydoun F., Vahid S. Fast fiber Bragg grating interrogation system with scalability to support monitoring of large structures in harsh environments. *SPIE Smart Sensor Phenomena, Technology // Networks and Systems integration*. – 2014. – 9062 p.

89 Ansari F. Practical implementation of optical fiber sensors in civil structural health monitoring // *J. Intell. Mater. Syst. Struct*. 2007. - №18. - 879–889.

90 Oman K., Hoe B.V., Aly K., Peters K., Steenberge G.V., Stan N., Schultz S. Instrumentation of integrally stiffened composite panel with fiber Bragg grating sensors for vibration measurements // *Smart Mater. Struct*. – 2015. - P. 1-14.

91 Lau K. T., Yuan L. B., Zhou L. M. Strain monitoring in FRP laminates and concrete beams using FBG sensors // *Composite Structure*. – 2001. - №51. – P. 9–20.

92 Vivien G. S., Nadine K., Habel W. R. How reliably do fiber Bragg grating patches perform as strain sensors // *IEEE Sensor Journal*. – 2012. - № 12. – P. 128–132.

93 Habel W. R., Schukar V. G., Kusche N. Fibre-optic strain sensors are making the leap from lab to industrial use— reliability and validation as a precondition for standards // *Measurement Science and Technology*. – 2013. - №24. – P. 1–13.

94 Wang H. P. Strain transfer of optical fiber under damage conditions and its application in multi-layered pavements (Thesis for Doctoral Degree in Engineering). - Dalian: Dalian University of Technology, 2015.

95 Ansari F., Yuan L. B. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors // Journal of Engineering Mechanics.- 1998. -№4. – P. 385–394.

96 Wan K.T., Leung C.K.Y., Olson N.G. Investigation of the strain transfer for surface-attached optical fiber strain sensors // Smart Material and Structure. – 2008. - №17. – P.964–1726.

97 Li H. N., Zhou G.D., Ren L., Li D.S. Strain transfer coefficient analysis for embedded fiber Bragg grating sensors in different host materials // Journal of Engineering Mechanics. – 2009. - №135. – P. 1343–1353.

98 Her S. C., Chih Y. H. Effect of coating on the strain transfer of optical fiber sensors // Sensors. – 2011. - №11. – P. 6926–6941.

99 Zhao H. T., Wang Q. B., Qiu Y. Strain transfer of surface-bonded fiber Bragg grating sensors for airship envelope structural health monitoring // Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering). - 2012. - №13. – P. 538–545.

100 Feng X., Zhou J., Sun C. S., Zhang X. T., Ansari F. Theoretical and experimental investigation into crack detection with BOTDA distributed fiber optic sensors // Journal of Engineering Mechanics. – 2013. - №139. – P. 1797–1807.

101 Wang H. P., Zhou Z., Huang Y., Xiang P., Ou J. P. Strain transfer mechanism of quadrate-encapsulated FBG sensors embedded in rectangular structures // J. Civil Struct. Heal. Monitor. – 2015. - № 5. – P. 469–480.

102 Zhang W., Chen W.M., Shu Y.J., Lei X. H. Degradation of sensing properties of fiber Bragg grating strain sensors in fatigue process of bonding layers // Optical Engineering. – 2014. – 530 p.

103 Chon C. T., Sun C. T. Stress distributions along a short fibre in fibre reinforced plastics // Journal of Material Science. – 1980. - №15. - P.931–938.

104 Kreuzer M., Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensors Published Engineering // Materials Science, Physics. – 2007.

105 Parveen N.G., Murthy V. S. Determination of elastic modulus in nickel alloy from ultrasonic measurements // Bull. Mater. Sci. – 2011. - Vol. 34, №2. -P. 323–326.

106 Ensminger D., Ultrasonics – Fundamental, Technology, Applications. - New York: 2nd ed. Marcel Dekker Inc., 1988

107 McIntire P., Nondestructive Ed. Testing Handbook: Ultrasonic Testing, American Society for Nondestructive Testing. - USA. – 1991. - Vol. 7.

108 Wang Q. M., Eric L. Cross Determination of Young's modulus of the reduced layer of a piezoelectric RAINBOW actuator // J. Appl. Phys. – 1998. - Vol. 83, №10. - P. 5358-5363.

109 Kiesewetter L., Zhang J.M., Houdeau D., Steckenborn A. Determination of Young's Moduli of micromechanical thin films using the resonance method // Sensor. Actuat. A-Phys. – 1992. - Vol. 35, №2. – P. 153-159.

110 Gubicza J. Determination of Young's Modulus from depth sensing Vickers Indentation Tests // Solid. State. Phenom. – 1997. - Vol. 56. - P. 195- 200.

111 Hong S., Weihs T. P., Bravman J. C., Nix W. D. Measuring stiffnesses and residual stresses of silicon nitride films // J. Electron. Mater. – 1990. - Vol. 19, №9. - P. 903-909.

112 Pharr G.M., Oliver W.C., Brotzen F.R. On the generality of the relationship among contact stiffness, contact area, and elastic modulus during indentation // J. Mater. Res. – 1992. - Vol. 7. - P. 613-617.

113 Pethica J. B., Hutchings R., Oliver W. C. Hardness measurements at penetration depths as small as 20 nm // Philos. Mag. A. – 1983. - Vol. 48, №4. – P. 593-606.

114 Mussert K. M., Vellinga W. P., Bakker A.S., Van der Zwaag A nano-indentation study on the mechanical behaviour of the matrix material in an AA6061 – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMC // J. Mater. Sci. – 2002. - Vol. 37. – P. 789-794.

115 Rio T., Go´mez-Del P., Poza J.R. Micromechanical characterization of Al 8090/SiC composites by nanoindentation // J. Mater. Sci. – 2005. - Vol. 40, №6. - P. 1513-1515.

116 Kwaaitaal T.A., Schoofs J.G. Determination of Young's Modulus or Poisson's Ratio Using Eddy Currents // Exp. Mech. – 1979. - Vol. 19, № 12. - P. 450-455.

117 Zeeshan S.M., Fawad T., Nausheen N., Fahad M.A., Determination of Young's Modulus of Metallic and Composite Materials by Digital Image Correlation // Journal of Space Technology. – 2012. - Vol 1, №1. - P.33-37.

118 Kadirbayeva G., Chezhimbayeva K., Khizirova M., Wojcik W. Measurement of deformation parameters under mechanical impact in concrete beams using a fiber Bragg grating sensor // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. - №4 (7(124)). – P. 54–62. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285800>.

119 Wenwen Q., Juan K., Hu J., Yang L. Young's Modulus Measurement of Metal Beams Based on Fiber Bragg Grating // Laser & Optoelectronics Progress 2016. - №53(4). – 40604 p.

120 Tse M.L.V., Chung K.M., Dong L. Observation of symmetrical reflection sidebands in a silica suspended-core fiber Bragg grating // [J]. Optics Express. – 2010. - №18(16). – P. 17373-17381.

## ҚОСЫМША А

Қатты материалдарға түсірілген сыртқы жүктемелер әсерінен туандаған деформация спектрінің модельдеу кодтары

Matlab бағдарламасында құрастырылған модельдеу кодтары:

Сыртқы жүктемелер әсерінен туандағын деформация спектрі

```
Braggwave=1562.29e-9;%Bragg wavelength
```

```
w1=1562e-9; %start wavelength
```

```
w2=1562.6e-9;%stop wavelength
```

```
step=1000;
```

```
wal=[w1:(w2-w1)/step:w2];
```

```
%Reflectivity
```

```
Rmax=0.318;
```

```
rmax=sqrt(Rmax);
```

```
kL=atanh(rmax);%coupling coefficient
```

```
%Transfer matrix function
```

```
neff=1.4495;
```

```
L=1.458e-2;%grating length in metre
```

```
M=100;
```

```
dz=L/M;
```

```
kac=kL/L;%ac coupling coefficient
```

```
v=10;%fringe visibility
```

```
kdc=2*kac/v;%dc coupling coefficient
```

```
for (r=1:step+1)
```

```
    w=wal(r);
```

```
    F=[1 0;0 1];
```

```
    for (s=1:M)
```

```
        detuning=2*pi*neff*(1/w-1/Braggwave);
```

```
        selfdc=detuning+kdc;
```

```
        b1=sqrt(kac^2-selfdc^2);
```

```
        f11=cosh(b1*dz)-i*(selfdc/b1)*sinh(b1*dz);
```

```
        f12=-i*(kac/b1)*sinh(b1*dz);
```

```
        f21=i*(kac/b1)*sinh(b1*dz);
```

```
        f22=cosh(b1*dz)+i*(selfdc/b1)*sinh(b1*dz);
```

```
        ff=[f11 f12; f21 f22];
```

```
        F=ff*F;
```

```
    end
```

```
    r3(r)=F(2,1)/F(1,1);
```

```
    R3(r)=(abs(r3(r)))^2;
```

```
    t3(r)=1/F(1,1);
```

```
    T3(r)=(abs(t3(r)))^2;
```

```
End
```

# ҚОСЫМША Б

## Диссертациялық жұмыстың ғылыми нәтижелерін енгізген туралы акт

POLITECHNIKA LUBELSKA  
Katedra Elektroniki i Techniki Informatycznych  
ul. Narypsizycka 36A, 20-616 Lublin  
tel. 81 538 43 09, fax 81 538 43 12

УТВЕРЖДАЮ

Pełnomocnik Dziekana  
ds. studiów doktoranckich prowadzonych  
na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki  
Politechniki Lubelskiej  
w języku polskim

prof. dr hab. inż. Waldemar Wójcik

АКТ

### *о внедрении результатов научно-исследовательской работы*

Настоящим подтверждается, что основные научные положения и технические решения в области телекоммуникации для повышения эффективности применения оптоволоконных линий связи с применением брэгговских решеток, изложенные в диссертационной работе докторанта Алматинского университета энергетики и связи им. Г.Даукеева Кадирбаевой Гулим Кумарбекқызы представленной на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по специальности 8D06201–Радиотехника, электроника және телекоммуникации, внедрены в учебный процесс Люблинского технического университета.

Результаты научно-исследовательской работы полученные в лабораторной базе «Телеинформатика и электроника» Люблинского технического университета, показывает, что при исследовании механических напряжений с применением решетки Брэгга, появляется возможность контролировать и мониторить измеряемую деформацию. Использование датчиков для измерения деформации имеет решающее значение деформации материалов, своевременном проведении демонтажных работ и устранении неисправностей.

Эти результаты используются в лекционных курсах и лаборатории при подготовке студентов Люблинского технического университета.

Z-ca KIEROWNIKA  
Katedry Elektroniki i Techniki Informatycznych  
dr hab. inż. Konrad Gromaszek