

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ІШКІ ІСТЕР МИНИСТРЛІГІ

МАҚАН ЕСБОЛАТОВ атындағы
АЛМАТЫ АКАДЕМИЯСЫ

**СЕНСОРЛАР МЕН ЭЛЕКТРОНДЫ
ТҮРЛЕНДІРГІШТЕРДІҢ ЗАМАНАУИ
ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ**

Оқу құралы

2 БӨЛІМ

Алматы 2025ж.

УДК 21.317.3: 621.382

ББК: 32.84

C52

Қазақстан Республикасы ИМ М. Есболатов атындағы Алматы академиясының ғылыми кеңесінің отырысында талқыланған және мақұлданған хаттама №9 «28» мамыр 2025 ж.

Пікір берушілер:

Тайсариева К.Н. – Satbayev University, Автоматика және ақпараттық технологиялар институты, Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы, қауымдастырылған профессор, PhD

Чукумов Ғ.Б. – Қазақстан Республикасы ИМ М. Есболатов атындағы Алматы академиясының жоспарлау және бақылау бөлімінің бастығы, PhD, полиция подполковнигі

C52 Смайлов Н.К., Кадырова Р.Т., Сәбиболда Ә.М. Сенсорлар мен электронды түрлендіргіштердің заманауи технологиялары. 2 Бөлім: Оқу құралы. – Алматы: ООНИиРИР Алматинской академии МВД Республики Казахстан им. М. Есбулатова, 2025. – 186 б.

ISBN 978-601-360-180-9

Оқу құралында физикалық шамалардың сенсорларының теориялық негіздері, әрекет принциптері, құрылымдары мен сипаттамалары баяндалған. Оқу құралы ғылыми қызметкерлерге, студенттерге, докторанттарға, сенсорларды, өлшеуіш құралдарды, есептеу техникасы элементтері мен басқару жүйелерін әзірлеу саласындағы мамандарға арналған.

УДК 21.317.3: 621.382

ББК: 32.84

ISBN 978-601-360-180-9

© Қазақстан Республикасы ИМ
М. Есболатов атындағы
Алматы академиясы 2025ж.

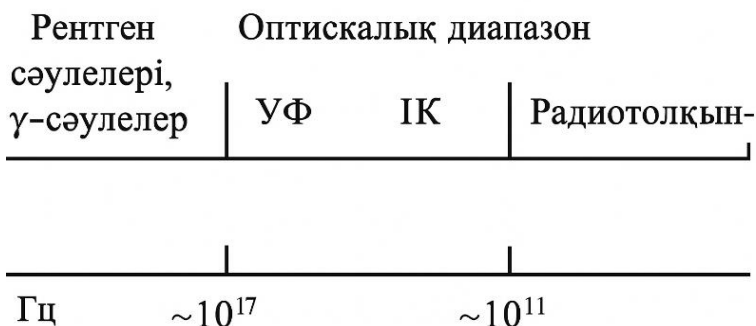
6 ТАРАУ

ДАТЧИКТЕРДІҢ ОПТИКАЛЫҚ ЭЛЕМЕНТТЕРІ

6.1. Жалпы мәліметтер

Сәуле – бұл толқын ұзындығы 1 нм-ден 1 мм-ге дейінгі немесе жиілігі 10^{17} -ден 10^{11} Гц-ке дейінгі электромагниттік тербелістер.

Оптикалық диапазон көрінетін (К), ультракүлгін (УК) және инфрақызыл (ИК) болып бөлінеді (6.1-сурет).



6.1-сурет. Электромагниттік толқындар шкаласы

Оптикалық сәуле шығару заттардың құрамындағы электрондар мен иондардың тербелістері нәтижесінде пайда болады және бір мезгілде толқындық әрі корпускулалық қасиеттерге ие.

Оптикалық сәуленің пайда болуы атомдағы электрондардың энергетикалық күйлерінің өзгеруіне, сондай-ақ сәуле шығаратын дененің құрамындағы молекулалардың тербелмелі және айналмалы қозғалыстарына байланысты.

Сәуле шығарудың жылулық (температуралық) және люминесценттік түрлері ажыратылады.

Жылулық сәуле шығару – бұл атомдар мен молекулалардың жылулық қозуы нәтижесінде пайда болатын және абсолюттік нөлден жоғары температурада кез келген денемен шығарылатын сәуле.

Жылулық сәуле дененің температурасына байланысты және тепе-теңдік сипатқа ие: сәуле шығару кезінде энергия азайып, температура төмендесе де, бұл процесс энергияның сіңірілуі арқылы өтеледі.

Қатты және сұйық денелердің жылулық сәулеленуі үздіксіз спектрге ие болады.

Люминесценттік сәуле шығару – бұл заттағы атомдар мен молекулалардың жылудан тыс кез келген энергия түрімен (мысалы: электр тогы, жарық кванттары, химиялық реакциялар және т.б.) қоздырылуы нәтижесінде пайда болады.

Люминесценттік сәуле қозу тоқтағаннан кейін де белгілі бір уақыт бойы (шамамен 10^{-10} секундтан бірнеше сағатқа дейін) сақталады.

Жылулық және люминесценттік сәулеленулер, жоғары энергетикалық деңгейлерден төмен деңгейлерге өздігінен (спонтанды) және жиілік пен фаза жағынан бір-бірімен үйлеспейтін өтулер нәтижесінде пайда болғандықтан, олар когерентті емес және кеңістікте бағытталмаған болады.

Люминесценттік сәулеленудің бір түрі – мәжбүрлі (стимулданған) сәуле шығару, ол басқа бір мәжбүрлейтін сәуленің әсерінен пайда болады.

Мұндай сәуле шығару мәжбүрлейтін сәулемен бірдей жиілікке, бағытқа және фазаға ие болады, яғни ол когерентті, монохроматты және бағытталған болады.

Сәуле шығару қасиеттері жиілік диапазонына байланысты өзгереді:

Ультракүлгін (УК) сәуле – ең жоғары квант энергиясына ие және қарқынды фотохимиялық, биологиялық және фотоэлектрлік әсер етеді.

Көрінетін сәуле (жарық) – адам көзімен тікелей қабылданады және қоршаған орта туралы ақпарат алуға

мүмкіндік береді. Сонымен қатар, ол да айтарлықтай фотоэлектрлік және фотохимиялық әсерге ие.

Инфрақызыл (ИК) сәуле – квант энергиясы УК мен көрінетін сәулеге қарағанда төмен. ИК-сәулеленудің басты ерекшелігі – оның жылулық әсері.

6.1-кесте. Оптикалық диапазон спектрінің аймақтарын бөлу

Спектр аймағы	Толқын ұзындығы- ның диапазоны, λ , мкм	Жиілік диапазоны, ν , Гц
Ультракүлгін (УК):	0,005 – 0,4	$6 \cdot 10^{16} - 7,5 \cdot 10^{14}$
– Вакуумдық УК	0,005 – 0,185	$6 \cdot 10^{16} - 16,2 \cdot 10^{14}$
– С аймағы	0,185 – 0,280	$16,2 \cdot 10^{14} - 10,7 \cdot 10^{14}$
– В аймағы	0,280 – 0,315	$10,7 \cdot 10^{14} - 9,53 \cdot 10^{14}$
– А аймағы	0,315 – 0,4	$9,53 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$
Көрінетін (оптика- лық):	0,4 – 0,76	$7,5 \cdot 10^{14} - 3,94 \cdot 10^{14}$
– Күлгін	0,4 – 0,455	$7,5 \cdot 10^{14} - 6,6 \cdot 10^{14}$
– Көк	0,455 – 0,485	$6,6 \cdot 10^{14} - 6,19 \cdot 10^{14}$
– Көк-жасыл	0,485 – 0,505	$6,19 \cdot 10^{14} - 5,94 \cdot 10^{14}$
– Жасыл	0,505 – 0,55	$5,94 \cdot 10^{14} - 5,45 \cdot 10^{14}$
– Сары-жасыл	0,55 – 0,575	$5,45 \cdot 10^{14} - 5,22 \cdot 10^{14}$
– Сары	0,575 – 0,587	$5,22 \cdot 10^{14} - 5,11 \cdot 10^{14}$
– Қызғылт	0,587 – 0,61	$5,11 \cdot 10^{14} - 4,92 \cdot 10^{14}$
– Қызыл	0,61 – 0,76	$4,92 \cdot 10^{14} - 3,94 \cdot 10^{14}$
Инфрақызыл (ИК):	0,76 – 1000	$3,94 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{11}$
– Жакын ИК	0,76 – 2,0	$3,94 \cdot 10^{14} - 1,5 \cdot 10^{14}$
– Орташа ИК	2,0 – 5	$1,5 \cdot 10^{14} - 1,2 \cdot 10^{14}$
– Алыс ИК	50 – 1000	$6 \cdot 10^{12} - 3 \cdot 10^{11}$

Жарықтың екі теориясы белгілі – корпускулалық (кванттық) және толқындық (электромагниттік) теориялар.

Толқындық теория жарықтың дифракциясы, интерференциясы және поляризациясын жақсы түсіндіреді.

Кванттық теорияның көмегімен жарықтың сіңірілуі, фотоэффект және сәулеленудің әртүрлі энергетикалық сипаттамаларын сипаттау ыңғайлы.

Қандай да бір құбылыстар, мысалы, жарық қысымы, екі теорияның да шеңберінде түсіндірілетін болады [1, 3, 8].

Жарықтың табиғаты мен жарықтық құбылыстарға байланысты мәселелерді қарастыратын оптиканы физикалық оптика деп атайды.

Оптикалық және оптикоэлектронды құрылғыларды жасау мен қолданудың көпшілік кезеңдерінде сәуле оптикасы қолайлы болады. Бұл оптика жарық сәулелерінің көмегімен бейне қалыптастыруды қарастырады.

Сәулелер біртекті ортада тәуелсіз және тік сызықты болады, ал ортааралық шекараларда олар сыну (немесе кему) құбылыстарымен өтеді. Бұл оптиканы геометриялық оптика деп атайды [1, 3, 8].

Бұл тарауда тек датчиктерде ең жиі қолданылатын оптикалық элементтер қарастырылады, мұнда олардың сипаттамалары үшін геометриялық оптика қолданылады.

6.2. Геометриялық оптиканың элементтері

Қолданбалы оптиканың көптеген мәселелері геометриялық оптика қағидаттары арқылы қанағаттанарлық түрде шешілуі мүмкін, бірақ кейбір жағдайларда дұрыс шешім тек кванттық және толқындық жарық теорияларының тұрғысынан ғана мүмкін болады. Геометриялық оптиканы физикалық оптиканың шегі ретінде қарастыруға болады, яғни $\lambda \rightarrow 0$ кезінде.

Жарық нүктесі деп өлшемі жоқ сәуле көзін түсінеді.

Жарық сәулесі – бұл сәулелену энергиясының таралатын сызығы.

Физикалық оптикада жарық сәулесіне сәйкес келетін нәрсе – жарық толқынының бетіне нормаль.

Оптикалық сәуленің ұзындығы деп сәуленің әртүрлі ортада өткен қашықтықтарының, сол ортадағы сыну көрсеткіштеріне көбейтілген қосындысы аталады.

Егер толқын беті – сфера болса, онда оған сәйкес барлық нормальдар, ал демек барлық сәулелер бір нүктеге – яғни сфераның орталығына қарай шоғырланады. Мұндай сәулелердің жиынтығын гомоцентриалық пучок деп атайды, яғни ортақ орталығы бар пучок.

Пучок, сәулелері ортақ орталықтан тарайтын болса, таралатын гомоцентриалық пучок деп аталады, ал сәулелер пучок орталығына қарай бағытталады болса, пучок жиналатын гомоцентриалық пучок деп аталады.

Егер гомоцентриалық пучок шексіз қашықтықта орналасқан жарық көзінен тарайтын болса, онда ол параллель болады.

Оптикалық жүйеге кіретін гомоцентриалық пучоктың орталығы заттық нүкте деп аталады, ал оптикалық жүйеден шыққан гомоцентриалық пучоктың орталығы заттық нүктенің бейнесі деп аталады.

Геометриялық оптикада оптикалық жүйе деп сәуле пучоктарын қалыптастыру үшін арналған оптикалық элементтердің (призмалар, линзалар, айна және т.б.) жиынтығы аталады.

Әрбір оптикалық элемент бетпен шектеледі. Беттер түзу, сфералық, асферикалық және басқалар болуы мүмкін.

Оптикалық жүйе центрленген деп аталады, егер сфералық беттердің орталықтары немесе басқа беттердің симметрия осьтері бір түзу бойында жатса, оны оптикалық ось деп атайды. Оптикалық осьті қамтитын кез келген жазықтық меридиандық деп аталады.

Геометриялық оптиканың заңдары

Геометриялық оптиканың теориясы төрт физикалық заңды қолдануға негізделген [3, 8, 9, 11].

Жарықтың түзу сызықпен таралу заңы.

Бұл заң бойынша жарық екі нүкте арасындағы біртекті және изотропты ортада (оптикалық қасиеттері нүктенің орнына және сәуленің бағытына тәуелді емес орта) сол нүктелерді байланыстыратын түзу бойымен таралады.

Жарық пучктерінің таралу тәуелсіздігі заңы.

Бұл заңның мәні мынада: жеке сәулелер мен пучктер бір-бірімен кездесе отырып, қиылысып, бір-біріне әсер етпейді. Геометриялық оптикада бірнеше пучек бірдей алаңға түсетін немесе бір нүктеде жиналатын болса, онда осы пучктердің әсері қосылады. Интерференция ескерілмейді.

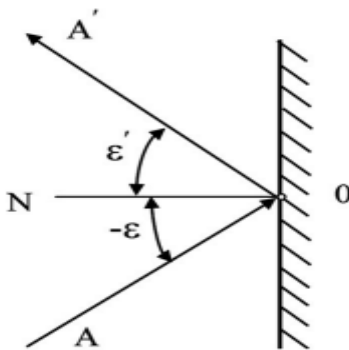
Жарықтың шағылу заңы.

Егер сәулелер біртекті оптикалық ортада қозғалып, айна тәрізді немесе жылтыр беттерге кездессе, онда олар толық немесе ішінара шағылып, шағылу заңы бойынша орындалады. Бұл заң келесі түрде формулаланған:

1) Құлау сәулесі A_0 , шағылысу бетіне түсу нүктесі N_0 және шағылысқан сәуле OA' бір жазықтықта жатады.

2) Шағылу бұрышы ε' абсолютті мөлшерде құлау бұрышына ε тең, яғни $\varepsilon' = \varepsilon$.

3) Құлау сәулесі және шағылысқан сәуле кері қайтарымды. Осылайша, егер құлау сәулесін $A'O$ бағытымен бағыттаса, ол OA бағытына шағылысады. Айна мен шағылыстырғыш призмалардың жұмыс принципі оптикалық құрылғылардың элементтері ретінде жарық шағылу заңына негізделген.



Сурет 6.2. Айна бетінен сәуленің шағылуы

ε' бұрышымен шекарадан шағылысқан жарық ағынының үлесі қосылған екі ортадағы жарық жылдамдығына байланысты. Шағылған жарық ағыны Φ_p -нің түскен жарық ағыны Φ_0 -ға қатынасы шағылу коэффициенті ρ деп аталады және оны екі ортаның сыну коэффициенттері арқылы өрнектеуге болады:

$$\rho = \frac{\Phi_p}{\Phi_0} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2. \quad (6.1)$$

Бұл өрнектен шағылу және жұту (сәуле шығару) коэффициенттері тек материалдың белгілі бір толқын ұзындығындағы сыну көрсеткіштеріне ғана тәуелді екені шығады.

Жарықтың сыну заңы. Жарық сәулесі бір мөлдір ортадан екіншісіне өткенде, олардың шекарасында ішінара шағылысумен қатар сыну да байқалады. Снеллиус Снелл және Декарт ашқан сыну заңы мынадай түрде тұжырымдалады:

Түскен сәуле (A_0), түсу нүктесіндегі шекараға түсірілген нормаль (N_0) және сынған сәуле (OA') бір жазықтықта жатады (6.3-сурет).

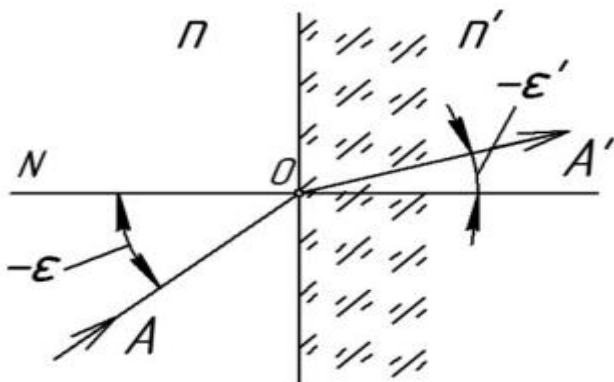
Сәуленің бір ортадан екіншісіне өткенде, ортаның сыну көрсеткіші мен нормальға қатысты бұрыш синусының көбейтіндісі тұрақты шама болып саналады, яғни

$$n \sin \varepsilon = n' \sin \varepsilon'. \quad (6.2)$$

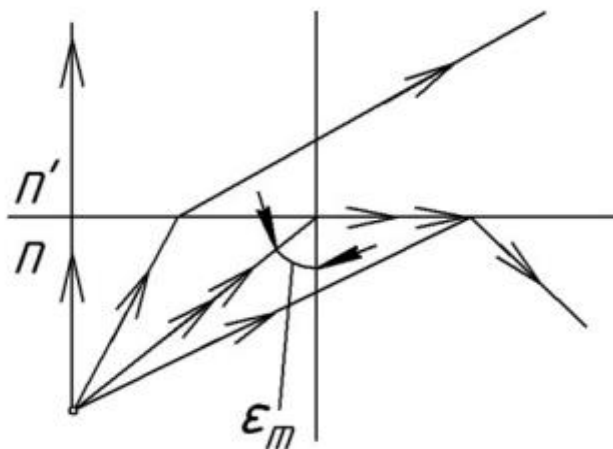
Түскен сәуле және сынған сәуле. Жарық тығыз оптикалық ортадан (n) аз тығыз ортаға ($n' < n$) тараған кезде, түсу бұрышының белгілі бір мәнінде (ε_m) толық ішкі шағылу құбылысы байқалуы мүмкін. Бұл құбылыс кезінде сәуле екінші ортаға өтпей, орталар шекарасынан толық шағылады (6.4-сурет).

Түсу бұрышының шектік мәні ε_m (сәуленің шекара бойымен сырғанап бастайтын бұрыш) мына формула бойынша анықталады:

$$\sin \varepsilon_m = n' / n. \quad (6.3)$$



Сурет 6.3. Екі орта шекарасында жарықтың сынуы



Сурет 6.4. Сәулелердің толық ішкі шағылуы

Толық ішкі шағылу құбылысы оптикалық бөлшектерді жасауда кеңінен қолданылады. Мысалы, шағылыстырылған призмалар, жарық өткізгіштер және т.б.

Шағылу заңын сыну заңының ерекше жағдайы ретінде көрсетуге болады, егер $n' = -n$ болса, онда $\sin \epsilon = -\sin \epsilon'$ немесе $\epsilon = -\epsilon'$ болады.

Жарық барлық орталарда вакуумге қарағанда айтарлықтай баяу таралады.

Сыну көрсеткіші – бұл жарықтың вакуумдегі жылдамдығы (c_0) мен ортадағы жылдамдығының (c) қатынасы: $n = c_0/c$.

$$n = \frac{c_0}{c}. \quad (6.4)$$

$c < c_0$ болғандықтан, ортаның сыну көрсеткіші әрқашан бірден үлкен болады.

Жарықтың ортадағы жылдамдығы ортаның диэлектрлік өтімділігіне (ϵ_r) тәуелді болады, ол өз кезегінде сыну көрсеткішін анықтайды:

$$n = \sqrt{\epsilon_r}. \quad (6.5)$$

Әдетте, n сыну көрсеткіші толқын ұзындығына да тәуелді болады. Сыну көрсеткішінің толқын ұзындығына тәуелділігі призмада айқын көрінеді. Осындай призмалардың бірін Исаак Ньютон жарық спектрін зерттеу барысында өз тәжірибелерінде қолданған. Көрінетін спектр аймағында сыну көрсеткіші n әдетте 0,58756 мкм толқын ұзындығында (гелийдің сары-қызыл сызығына сәйкес) анықталады. 6.2-кестеде кейбір материалдардың сыну көрсеткіштері келтірілген.

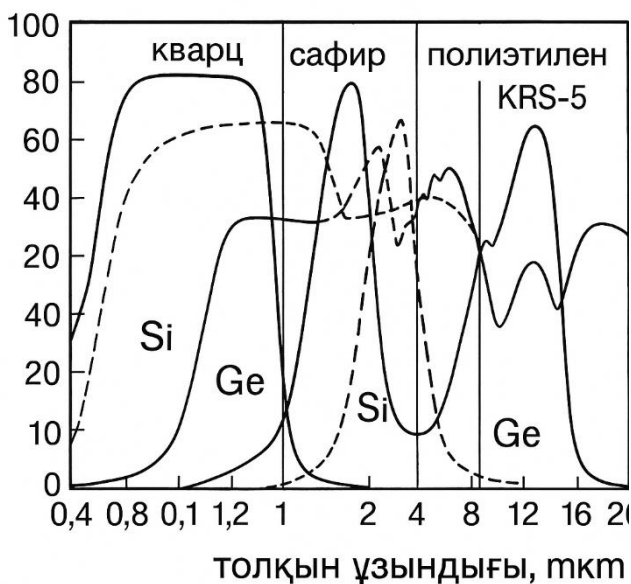
Сыну көрсеткішінің толқын ұзындығына тәуелділігі дисперсия деп аталады. Толқын ұзындығы артқан сайын n -нің өзгеруі өте біртіндеп жүреді және материал мөлдірлігін жоғалтатын аймаққа жақындамағанша, жиі байқалмайды. 6.5-суретте әртүрлі оптикалық материалдардың өткізгіштік коэффициентінің толқын ұзындығына тәуелділігі көрсетілген [12].

$$\rho = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2. \quad (6.6)$$

6.2-кесте. Кейбір материалдардың көрінетін жарық және ИК сәулелену үшін сыну көрсеткіштері [12]

Материал	n	Толқын ұзындығы, мкм	Ескертпе
Вакуум	1,0	—	—
Ауа	1,00029	—	—
Акрил	1,5	0,41	—
AMTIR-1 (Ge ₃₃ As ₁₂ Se ₅₅)	2,5	14	Аморфты шыны
AMTIR- (Ge ₃₃ Sb ₁₂ Se ₅₅)	2,4	18	Аморфты шыны
As ₂ S ₃	2,45	10	—
CdTe	2,67	16	—
Өсіру арқылы алынған шыны	1,52	3	—
Алмас	2,42	0,54	Жақсы жылу өткізгіштік
Кремний диоксиді (SiO ₂)	1,46	0,35	—
Боросиликатты шыны	1,47	10	TEMPRAX®, мөлдір: 0,3-2,7 мкм
GaAs	3,3	16	Лазерлік терезелер
Германий	4,0	12	—
Ең ауыр кремнийлі шыны	1,89	7	—
Ауыр кремнийлі шыны	1,65	3	—
Irtran 2 (ZnS)	2,25	4,3	IR сенсорларға ар- налған терезелер
KBr	1,53	25	Гигроскопиялық
KCl	1,46	20	Гигроскопиялық
KRS-5	2,21	40	Улы
KRS-6	2,0	25	Улы
NaCl	1,48	20	Гигроскопиялық, коррозиялық
Полиэтилен	1,52	50	Арзан IR те- резе/линза

Полистирол	1,5	0,5	—
Пирекс 7740	1,47	0,589	Жақсы термиялық және оптикалық қасиеттер
Кварц	1,46	3	—
Сапфир (Al_2O_3)	1,76	5	Химиялық төзімді
Кремний	3,42	7	IR сенсорларға арналған терезе
Күміс бромиді (AgBr)	2,25	22	Коррозиялық
Күміс хлориді (AgCl)	2,0	20	Коррозиялық
Cy (20 °C)	1,33	6,1	—
ZnSe	2,4	16	IR терезе, сынғыш



6.5-сурет. Оптикалық материалдардың жарық өткізу сипаттамалары [12]

Жарық сыну көрсеткіші n_3 болатын ортаның шекарасына жеткенде (6.6-сурет), оның бір бөлігі ε'_2 бұрышымен шағылысады. Қалған бөлігі үшінші ортаға ε_3

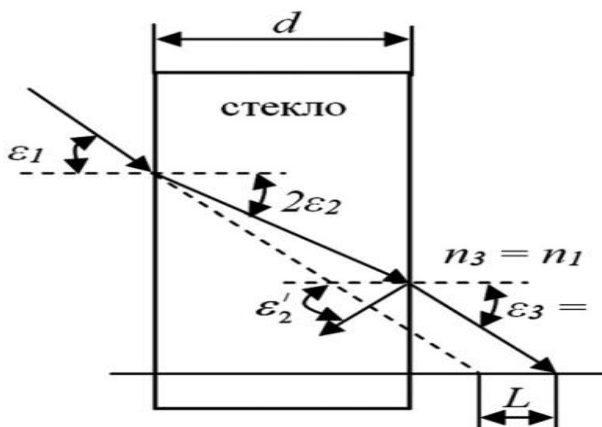
сыну бұрышымен енеді, ол да Снелл заңымен анықталады. Егер пластинаның екі жағындағы 1-және 3-орттар бірдей болса (мысалы, екеуі де ауа), онда $n_1 = n_3$ және $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$ шарттары орындалады (6.6-сурет). (6.1) өрнегінен шығатыны, шағылысу коэффициенті жарықтың екі орта шекарасын қай бағытта (төменгі сыну көрсеткішінен жоғарыға немесе керісінше) өткеніне тәуелді емес.

Пластинаның екі бетінен толық шағылысу коэффициентін жеңілдетілген формула бойынша табуға болады [12]:

$$\rho_2 \approx \rho_1(2 - \rho_1), \quad (6.7)$$

Мұнда ρ_1 – бір беттен шағылысу коэффициенті. Шын өмірде екінші шекарадан шағылысқан жарық бірінші шекараға қайта шағылысып, екінші шекараға қарай қайталана береді және т.б. Сондықтан, егер материалда жарықтың жұтылуы болмаса, онда материалдың сыну көрсеткішін біле отырып, пластина ішіндегі жалпы шағылысу шығындарын анықтауға болады [12]:

$$\rho_2 = 1 - \frac{2n}{n^2 + 1}. \quad (6.8)$$



6.6-сурет. Жарықтың әйнек пластина арқылы өтуі

Сыну көрсеткіштерінің айырмашылығы үлкен болған кезде шағылысу күшейеді. Мысалы, егер көрінетін жарық ауадан флинт әйнегі (оптикалық шыны) арқылы өтіп, қайтадан ауаға түссе, екі рет шағылысу нәтижесінде шамамен 11% шығын болса, ал жарық ауа-германий-ауа жолымен (алыс ИК спектр аймағында) өткенде, ұқсас шағылысу шығындары 59% құрайды. Шағылысу шығындарын азайту үшін оптикалық материалдарға антирефлектілік қаптамалар жабылады. Олардың сыну көрсеткіші мен қалыңдығы нақты толқын ұзындығына байланысты таңдалады [3, 8, 12].

Жазық және сферикалық беттер арқылы жарық сәулелерінің сынуы

1. Жазық шекара арқылы сыну ($n < n'$)

6.7-суретте көрсетілгендей, екі ортаның жазық шекарасында (мысалы, ауа-шыны) жарық сәулесінің сынуы Снеллиус заңымен сипатталады:

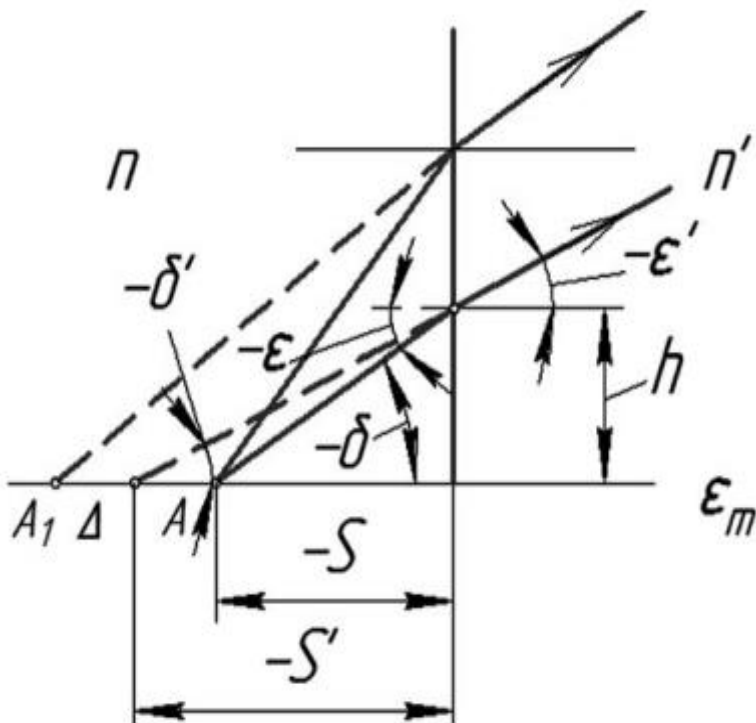
$$\sin \varepsilon' = (n / n') \sin \varepsilon. \quad (6.9)$$

$\varepsilon = \sigma$ және $\varepsilon = \sigma$ болғандықтан, $\sin \sigma = (n/n) \sin \sigma$. 6.7-суреттен $\text{stg} \sigma = \text{stg} \sigma$ шығады, демек, $s = \text{stg} \sigma / \text{tg} \sigma$. s кесіндісі мен σ бұрышы нысандық А нүктесінің орнын анықтайды, ал s кесіндісі мен σ бұрышы сәйкесінше осы нүктенің кескіні А нүктесінің орнын анықтайды. $\sigma = 0$ болғанда, $\sigma = 0$ болады, яғни жазық бетке перпендикулярлық сәулелер бағытын өзгертпей өтеді.

А нүктесінен гомоцентрлік сәуле шоғы шықты деп есептейік. Бұл шоқ жазық бет арқылы сынған кезде гомоцентрлілігі сақтала ма? 6.7-суреттен мынау байқалады:

$$\sin \sigma = \sin \varepsilon = \frac{h}{\sqrt{h^2 + s^2}} \quad (6.10)$$

$$\sin \sigma' = \sin \varepsilon' = \frac{h}{\sqrt{h^2 + s'^2}}.$$



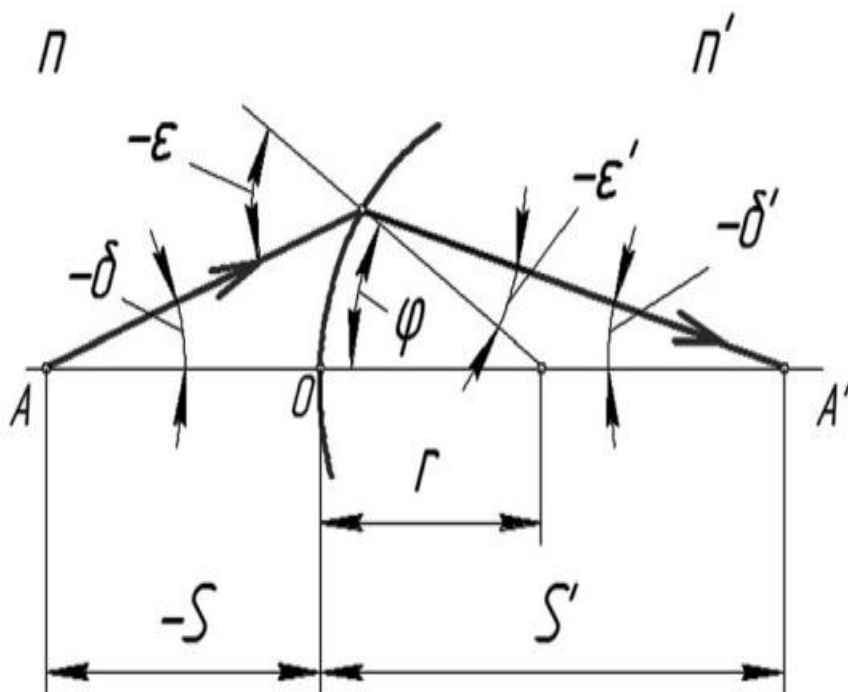
6.7-сурет. Екі ортаның жазық шекарасындағы сәуленің сынуы

Осы синустардың мәндерін (6.9) формуласына қойсақ, мынаны аламыз:

$$s' = \frac{n'}{n} \sqrt{s^2 + \left(1 - \frac{n^2}{n'^2}\right) h^2}. \quad (6.11)$$

6.10) формуласынан шығатыны, сәуле шоғының гомоцентрлілігі сақталмайды, себебі $s' \cdot h$ биіктігінің сызықты емес функциясы болып табылады [3, 8].

Жазық бет арқылы сынған сәуле шоғы құрайтын нүктенің кескіні анық емес болады, өйткені бұл зат нүктесіне кескін нүктелерінің бүкіл жиыны сәйкес келеді.



6.8-сурет. Сфералық бет арқылы сәуленің сынуы

Оптикалық орталарды бөлетін сфералық бет үшін (сыну көрсеткіштері n және n') келесі негізгі қатынастар орынды [3, 8]:

$$\begin{aligned} \sin \varepsilon &= (r - s) \sin \sigma / r; \\ \sin \varepsilon' &= (r - s') \sin \sigma' / r; \\ n \sin \varepsilon &= n' \sin \varepsilon'; \\ s' &= r - \frac{n}{n'} (r - s) \frac{\sin \sigma}{\sin \sigma'}; \\ \sigma' &= \sigma - \varepsilon + \varepsilon'. \end{aligned} \quad (6.12)$$

Бұл өрнектер бойынша сәуле шоғының гомоцентрлігі бұзылмайды ($s' = \text{const}$), егер синустардың келесі шарты орындалса:

$$n \sin \sigma / (n' \sin \sigma') = \text{const.}$$

$s = -\infty$ болғанда (6.11) формуласы бойынша $\sin \varepsilon = h/r^7$

Жазық және сфералық беттерде сәулелердің шағылуы

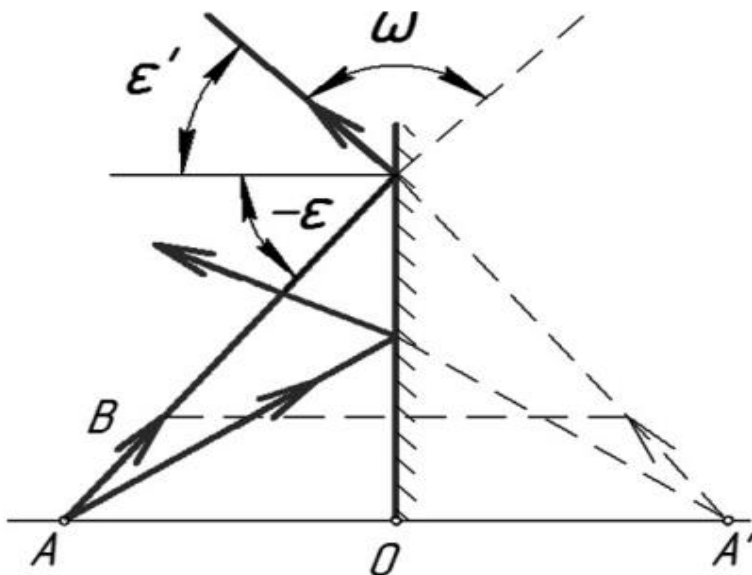
А нүктесінен келетін гомоцентрлі сәуле шоғы айнаға түседі (6.9-сурет). Айнадан шағылғаннан кейін, бұл сәулелер қайтадан гомоцентрлі шоқ құрайды, оның орталығы А нүктесінде болады және AN перпендикулярды орналасады, сонымен қатар $AN = NA$. Шағылған сәулелер таралушы шоқты құрайды, яғни А' нүктесінің кескіні жорамал болады. Бұл сәулелер жолына қойылған көз айнаның артында жарық нүктесін көреді. Түскен және шағылған сәулелер бағыттары арасындағы ω бұрышы ауытқу бұрышы деп аталады. Айна жазықтығы осы бұрыштың биссектрисасы болып табылады.

Егер айнаның алдына нысан қойылса (6.9-сурет), онда нысанның әрбір нүктесі үшін өз кескіні пайда болады. Шағылған сәулелер жолына қойылған көз бір жазықтықта аударылған кескінді көреді. Мұндай кескін айналы кескін деп аталады. Егер сәулелер бағыты бойынша екінші жазық айнаны қолданса, онда айналы кескін қайтадан тура кескінге айналады. Жазық айна нысанға симметриялы орналасқан жорамал айналы кескін береді.

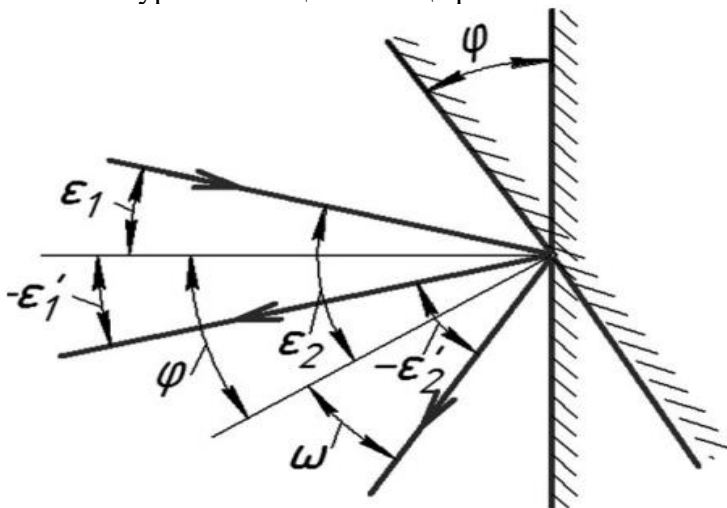
Оптикалық аспаптарда бағытты өзгерту үшін жиі айналмалы айналар қолданылады. Айнаның φ бұрылыс бұрышы мен шағылған сәуленің ω ауытқу бұрышы мына тәуелділікпен байланысқан: $\omega = 2\varphi$ (6.10-сурет).

Екі жазық айнадан тұратын жүйеде, олар Υ бұрышымен орналасқан кезде (6.11-сурет), ω ауытқу бұрышы түскен сәуле бағытына тәуелді емес және мына формуламен анықталады:

$$\omega = 2\gamma. \quad (6.13)$$



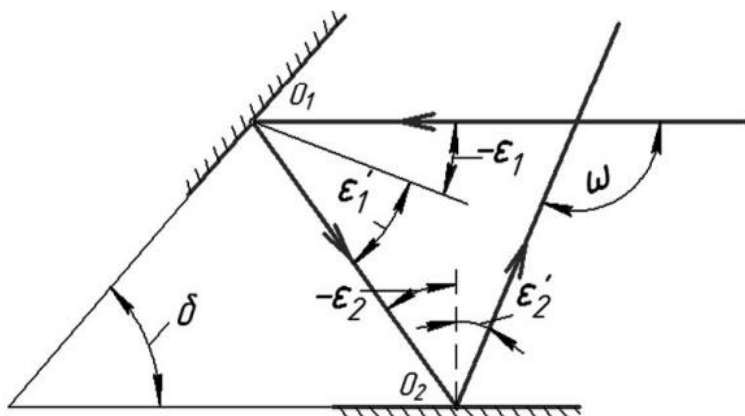
6.9-сурет. Жазық айнаның әрекет схемасы



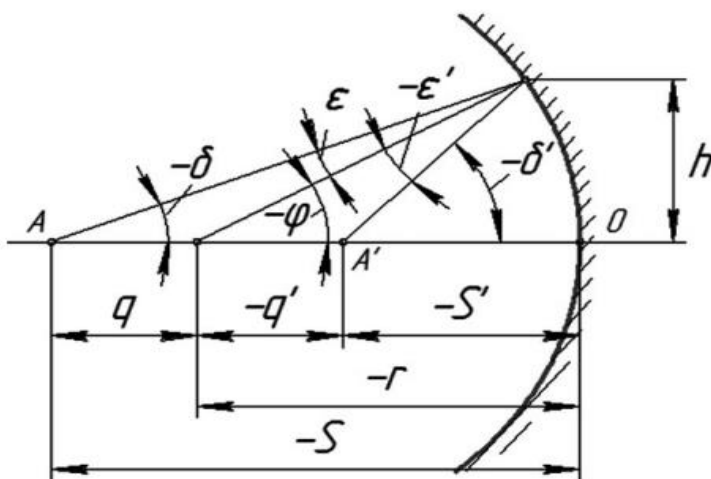
6.10-сурет. Жазық айнаның айналуы

Екі айнадан тұратын жүйені бұрған кезде ω бұрышы өзгеріссіз қалады. Бұл қасиет бір блокта біріктірілген айналар

жұбын оптикалық аспаптарды реттеу және баптау кезінде қолданылады. Сфералық беттен сәулелердің шағылуын сынғанудың ерекше жағдайы ретінде қарастыруға болады, егер $n' = -n$ болса.



Сурет 6.11. Екі жазық айнадан тұратын жүйе



Сурет 6.12. Сфералық айнада сәуленің шағылуы

Ойыс сфералық шағылыстырғыш бет үшін (радиусы r , сурет 6.12) мына қатынастар орынды:

$$\begin{aligned}q &= r - s; \sin \varepsilon = (q / r) \sin \sigma; \\ \sigma' &= \sigma + 2\varepsilon'; \\ q' &= r \sin \varepsilon' / \sin \sigma'; \\ s' &= r - q'.\end{aligned}\quad (6.14)$$

S кесіндісі мен σ бұрышы A зат нүктесінің A бейнесінің орнын анықтайды. (6.14) формулаларынан көрінетіндей, s кесіндісі σ бұрышының сызықтық емес функциясы болғандықтан, сфералық шағылыстыратын бет сәуле шоғының шағылысқаннан кейінгі гомоцентрлігін (ортақ орталықтылығын) бұзады.

Осы бет үшін σ бұрышы мен s кесіндісінің мәндері күрделі жүйенің келесі шағылысатын немесе сынатын беті арқылы сәуле жүрісін есептеуде негізгі деректер болып табылады.

Оптикалық жүйелерді есептеу мысалдарын [3, 8, 9, 11] дереккөздерінен табуға болады.

6.3. Фотометрия

Фотометрия – физикалық оптиканың бөлімі болып табылады, онда оптикалық сәуле шығарудың энергетикалық-фотометриялық сипаттамалары оның шығарылу, таралу және затпен өзара әрекеттесу процестерінде қарастырылады.

Тарихи тұрғыдан фотометриялық шамаларды бағалау, ең алдымен, көрінетін сәулеге қатысты болды және жарық шамаларымен өлшенді. Фотометриялық шамаларды оптикалық диапазонның барлық электромагниттік тербелістеріне қолдану оларды энергетикалық бірліктермен бағалауды анықтады.

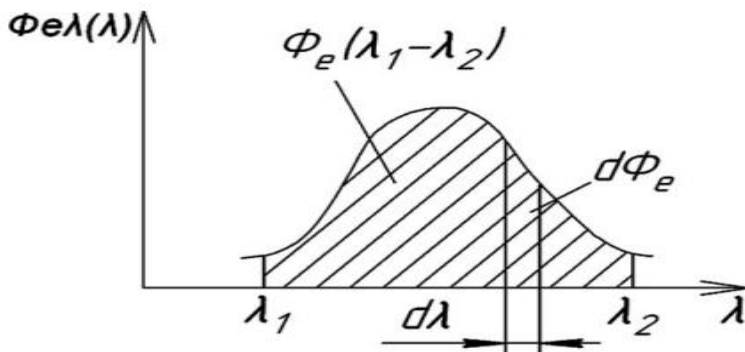
Көрінетін диапазон шегіндегі әрбір энергетикалық шамаға стандартты фотометриялық бақылаушы арқылы сәуле шығаруды бағалау нәтижесінде алынған жарық шамасы

сәйкес келеді. Екі түрдегі шамалардың әрқайсысында бірдей әріптік белгілеу қолданылады, сәйкесінше e (энергетикалық) және ν (көрнекі) индекстері қосылады. ν индексі әдетте түсіріліп қойылады [3, 8, 11].

Сәуле шығарудың негізгі энергетикалық сипаттамасы – сәуле ағыны (Φ_e) – сәуле тасымалдайтын энергияның тербеліс периодынан ұзақ dt уақыт аралығына қатынасы ретінде анықталады және ваттпен (Вт) өлшенеді:

$$\Phi_e = dW_e / dt,$$

dW_e – сәуле шығару энергиясы, джоульмен (Дж) өлшенеді.



6.13-сурет. Сәуле ағынының спектрлік сипаттамасы

Спектр сәулеленуі – бұл сәулелену қуатының толқын ұзындықтарына (немесе жиіліктерге) қатысты таралуы. Қызған булардың немесе газдардың, сондай-ақ лазерлердің сәулеленуі сызықтық спектрмен сипатталады және шартты түрде толқын ұзындығы арқылы анықталады. Ал көптеген сәулелену көздері монохроматикалық сәулеленудің үздіксіз жиынтығын шығарады, яғни үзіліссіз спектр көзі болып табылады.

Негізгі энергетикалық, фотондық, жарықтық шамалар мен олардың өлшем бірліктерін ГОСТ 26148-84 стандартынан табуға болады.

Көзге әсері бойынша бағаланатын спектрдің көрінетін бөлігі үшін негізгі шама – жарық күші I , ол берілген бағыттағы жарық ағынының кеңістіктік тығыздығын сипаттайды.

Жарық күшінің өлшем бірлігі ретінде кандела (кд) қабылданған – бұл платинаның қату температурасында ($T = 2045 \text{ K}$) және $101\,325 \text{ Па}$ қысымда қара дене бетінің $1/600000 \text{ м}^2$ ауданына перпендикуляр бағытта шығарылатын жарық күші.

Жарық ағыны Φ деп, көрінетін бөліктің оптикалық сәулелену қуатын анықтайтын шаманы айтады, ол сәуле шығарушының жарық күші I мен ағын таралатын қатты бұрыш V көбейтіндісіне тең:

$$\Phi = I\Omega.$$

Жарық ағыны люменмен өлшенеді.

6.3-кесте. Сәуле шығару көздерінің жарықтылығы [1, 3, 4, 8]

Сәуле көздері	$L, \text{кд/м}^2$
Көздің сезгіштік шегіне сәйкес келетін көз	$10^{-7}10^{-7}$
Түнгі бұлтсыз аспан	$10^{-4}10^{-4}$
АЛ 102Д жарықдиод	$0,75 \cdot 1030 \cdot 10^3$
Ай беті	$2,5 \cdot 1032 \cdot 10^3$
Люминесцентті шамдар	$(0,3 \div 1,0) \cdot 104(0 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^4)$
Бұлтпен жабылған күндізгі аспан	$(1 \div 1,2) \cdot 104(1 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4)$
Көзінді шағылыстыратын жарық көзі	10510^5
Киноаппаратураға арналған қыздыру шамы К30-400	$2,2 \cdot 1072 \cdot 10^7$
ДКШ 1000-3 доғалық ксенон шамы	$2,5 \cdot 1082 \cdot 10^8$
ДРШ 100-2 жоғары қысымды сынап шамы	10910^9
Күн	$1,5 \cdot 1091 \cdot 10^9$
Лазер	$(0,1 \div 1,0) \cdot 1012(0 \cdot 10^1 \div 1 \cdot 10^{12})$

6.4-кесте. Объектілердің бетіндегі жарықтандырылу дәрежесі

Жарықтандырылатын объектілер	$E, \text{лк}$
Көз қарашығы, жарықтандыру шегі	$10^{-9}10^{-9}$

Жер беті: жұлдызды аспаннан	$0,3 \cdot 10^{-30} \cdot 10^{-3}$
Айдан	$0,250 \cdot 10^{-25}$
Күні бойы қара бұлттар арқылы	10410^4
Күні бойы ашық бұлттар арқылы	$2 \cdot 1042 \cdot 10^4$
Күні бойы тікелей Күннен	10510^5
Атмосферадан тыс Күн сәулесі	$1,36 \cdot 1051 \cdot 10^5$
Жоғары дәлдікті жұмыс орны	$4 \cdot 102 \cdot 5 \cdot 1034 \cdot 10^2 \div 5 \cdot 10^3$

6.4. Оптикалық сәулелендіру көздері

Оптикалық сәулелендіру көздерін екі үлкен топқа бөлуге болады – жасанды (адам жасаған) және табиғи.

Жасанды көздер белсенді болса, табиғи көздер белсенді (Күн, жұлдыздар, галактикалар) немесе пассивті (Ай, атмосфера, Жер беті, т.б.) болуы мүмкін.

Белсенді көздер шығарушылар болса, пассивті көздер тек белсенді көздерден келетін жарықты түрлендіреді (әсіресе, шағылыстырады).

Белсенді көздер, негізінен, энергияның бір түрін (көбінесе электр энергиясын) жарық энергиясына айналдыратын түрлендіргіштер болып табылады.

Қара дене (ҚД) – оған түсетін барлық сәулеленуді жұтатын шығарушы деп аталады. ҚД сәулелену ағынының эталондық көзі болып табылады [11].

Кирхгоф заңы бойынша спектрлік энергетикалық жарқыраудың тығыздығы (СЭЖТ) пен спектрлік жұту коэффициентінің қатынасы берілген температура мен толқын ұзындығы үшін тұрақты шама болғандықтан, ал ҚД-нің спектрлік жұту коэффициенті бірге тең, СЭЖТ ҚД берілген T және λ үшін мүмкін болатын ең жоғары мәнге ие болады. Сондықтан ҚД-ні толық шығарушы деп атайды.

ҚД моделін шағын тесігі бар тұйық қуыс түрінде алуға болады. Мұндай көзге түсетін сәулелену қабырғаларда қайта-қайта шағылысып, жұтылады. Кіру тесігі неғұрлым кіші болса, сәулеленудің қуыстан шығу ықтималдығы соғұрлым

төмен, яғни жұту коэффициенті соғұрлым жоғары болады. Мұндай шығарушы қасиеттері жағынан ҚД-ге жақындайды.

Қыздыру шамы

Қыздыру шамы (ҚШ) – электр тогының өтуінен қызған қатты дененің жылулық сәулеленуі нәтижесінде алынатын сәулелену көзі.

ҚШ жарық көзі және ЖИҚ-аймақтағы сәулелену көзі ретінде кеңінен қолданылады [4, 11].

ҚШ артықшылықтарына үздіксіз спектр (көптеген жағдайларда қолайлы түс беруді қамтамасыз етеді), әртүрлі қуаттарда шамдарды өндірудің жетілдірілген технологиясы, төмен бағасы, жеткілікті жоғары сенімділігі жатады.

ҚШ кемшілігі – төмен жарық шығымдылығы (жарықтандыру шамдарының жарық ПӘК-і 1-3%). ҚШ спектрлік құрамы жағынан Күн сәулеленуінен айтарлықтай ерекшеленеді.

Жарық шығымдылығының максималды коэффициенті $K_{\text{и max}} = 689 \text{ лм/Вт}$.

ҚШ нитьтерін әртүрлі қоспалармен вольфрамнан жасайды, өйткені таза вольфрам сымдары жеткілікті берік емес және пішінін нашар сақтайды.

Колбаларды өндіру үшін БД-1 және ЗС-5 сияқты арнайы шыны маркалары қолданылады. Колба ЖИҚ-спектр аймағында жұмыс істеу үшін кремний терезесіне ие болуы мүмкін. Шыны берік, жылуға төзімді, сызықтық кеңею коэффициенті тұрақты және минималды электр өткізгіштігі болуы керек.

Колбаға металл енгізулер үшін платинат және молибден қолданылады. Соңғысы ЗС-5 шынысынан жасалған колбалар үшін пайдаланылады. Көрсетілген металдардың сызықтық кеңею коэффициенттері шынының сызықтық кеңею коэффициенттеріне жақын.

Колбаны инертті газбен толтыру нитьтің қызу температурасын 2900 К-ге дейін арттыруға мүмкіндік береді, бұл жарық шығымдылығын айтарлықтай арттырады. Бұл

жағдайда газ арқылы жоғалтулардың артуына қарамастан, шамның жалпы сәулелену ағыны өседі [4, 9, 11].

Галогенді шамдар

Галогенді қыздыру шамы – колбасына аз мөлшерде галоген (әдетте йод немесе бром) енгізілген шам. Нитьтен шашырайтын вольфрам галогенмен бірігіп, вольфрам галогениді деп аталатын газ тәрізді зат түзеді. Бұл қосылу реакциясы колба температурасына жақын 573 К температурада жүреді. Қызған нить температурасына жақын температурада вольфрам галогениді галогенге және қалпына келтірілген вольфрамға ыдырайды, оның бір бөлігі спиральға шөгіп қалады. Шашыраған вольфрамның спиральге қайта оралуы оның колба қабырғаларына түсуін жояды және шамның қызмет ету мерзімін ұзартады. Галогенді циклге ие қыздыру шамдары қызмет ету мерзімі жағынан кәдімгі шамдарға қарағанда екі-үш есе ұзағырақ, ал бірдей қызмет ету мерзімінде жарық шығымдылығы жоғары және жылу денесінің өлшемі кішірек болады. Нить температурасын 3400 К-ге дейін жеткізуге болады ($T_{бал} = 3600K$) [4, 9, 11].

Жарықдиодтар

Жарық шығаратын диодтың (ЖШД) жұмыс принципі р-п-қосылысы бар құрылымдарда тікелей бағытта ток ағып жатқанда инжекциялық электролюминесценция құбылысына негізделген.

Оптикалық спектр аймағында сәуле шығару қасиеті кейбір жартылай өткізгіш қосылыстарға тән: GaAs (галлий арсениді), GaP (галлий фосфиді), $GaAs_{1-x}Px$, $Ga_{1-x}Al_xIn_{1-x}GaP$, мұнда x – қосылыстағы элементтердің үлесі.

Қажетті жарық түсін (спектрлік құрамын) алу үшін материалдарды қоспалармен легирлейді немесе олардың құрамын сандық түрде өзгертеді. Мысалы, жасыл жарық алу үшін ($\lambda_{max} = 550$ нм) GaP азотпен легирленеді. Егер $Ga_{1-x}Al_xAs$ -та $x = 0,05 / 0,1$ болса, ЖШД ЖИҚ-аймақта ($\lambda_{max} = 800$ нм) сәуле шығарады, ал $x = 0,3$ болса, қызыл жарық ($\lambda_{max} = 675$ нм) шығарылады.

ЖШД сәуле шығаратын бетінің ауданы бірнеше шаршы миллиметрден аспайды.

Жартылай өткізгіш құрылымды ЖШД сәуле шығу үшін терезесі (линзасы) бар пластикалық немесе металл корпуска орналастырады. ЖШД өлшемдері қосылу арматурасымен бірге бірнеше миллиметрді құрайды [4, 9, 11].

ЖШД ең маңызды кемшілігі – үлгіден үлгіге параметрлердің ауытқуы және олардың температураға тәуелділігі.

Лазерлер

Лазерлердің жұмысының физикалық негізі – кванттық жүйелерде белгілі бір жағдайларда байқалатын ынталандырылған сәулелену көмегімен жарықты күшейту.

Кванттық жүйе – жеке бөлшектер (атом, ион, молекула) немесе бөлшектер жиынтығы, олардағы процестер кванттық физика заңдарына бағынады. Кванттық жүйелердің қасиеттері жүйенің энергетикалық күйімен анықталады. Мұндай жүйелердің ішкі энергиясы қатаң анықталған дискретті мәндерді қабылдай алады. Энергияның мүмкін болатын дискретті мәндерінің бірі энергия деңгейі деп аталады. Кванттық жүйенің бір энергетикалық күйден екіншісіне өтуі тек секірмелі түрде жүреді және энергияның шығуы немесе жұтылуымен байланысты, ол әртүрлі формада болуы мүмкін – электромагниттік, жылулық немесе дыбыстық. Электромагниттік энергия шығарылатын немесе жұтылатын өтулер оптикалық деп аталады.

Кванттық жүйенің ең төмен энергиясы бар күйі негізгі күй деп аталады. Негізгі күйде кванттық жүйе энергияны жұта алады, бірақ шығара алмайды. Басқа мүмкін болатын күйлер, оларға жүйенің ішкі энергиясының жоғарылауы сәйкес келеді, қозған күйлер деп аталады және негізгі күйден айырмашылығы тұрақсыз, яғни кванттық жүйе қозған күйден негізгі күйге оралуға ұмтылады.

Қозған күйдегі (жоғары энергетикалық деңгейде) Ем бөлшегі үшін белгілі бір уақыт аралығынан кейін ол төмен

энергиялық деңгейге E_n өтетіні және ν_{mn} жиіліктегі фотон шығарылатыны ықтимал, ол бастапқы E_m және соңғы E_n күйлерінің энергиясымен анықталады.

$$\nu_{mn} = (E_m - E_n) / \hbar, \quad (6.15)$$

Мұнда $\hbar$ – Планк тұрақтысы.

Өту жиілігіне сәйкес келетін сыртқы электромагниттік өрістің әсері осы өту ықтималдығын арттырады.

Осыған байланысты, сыртқы өріске тәуелді емес және қозған бөлшектердің бір-біріне тәуелсіз, ретсіз өтулеріне байланысты спонтанды (өздігінен) сәуле шығару және сыртқы электромагниттік өрістің әсерінен туындайтын, m деңгейінен n деңгейіне өту жиілігімен немесе оған жақын жиіліктегі ынталандырылған сәуле шығару ажыратылады.

Соңғы жағдайда, сыртқы фотонның $(\hbar\nu_{mn})_1$ қозған бөлшекпен өзара әсері бөлшектің энергиясы төмен деңгейге өтуін туындатады, нәтижесінде қосымша фотон $(\hbar\nu_{mn})_2$ шығарылады. Сонымен қатар, өтуді ынталандыратын (стимулдайтын) фотон мен өту нәтижесінде шығарылатын фотон бір-бірінен ажыратылмайды. Олардың жиілігі, таралу бағыты және фазасы бірдей, бұл ынталандырылған сәуле шығарудың монохроматтылығын, когеренттілігін және бағыттылығын қамтамасыз етеді.

Деңгейлердің инверсиялық популяциясы. Егер N бөлшектен тұратын кванттық жүйе термиялық тепе-теңдік күйінде болса, онда бөлшектердің энергия деңгейлері бойынша таралуы немесе осы деңгейлердің популяциясы Больцман заңымен анықталады.

$$N_n / N_m = A_i e^{-(E_n - E_m) / (kT)}, \quad (6.16)$$

N_n – n деңгейінің толығы; N_m – m деңгейінің толығы; A_i – нормаланған тұрақты; E_n — n деңгейінің энергиясы (төменгі); E_m – m деңгейінің энергиясы (жоғарғы); k – Больцман тұрақтысы.

(6.16) өрнегінен көрініп тұрғандай, $T > 0$ болғанда $N_n > N_m$, яғни тепе-теңдік күйде жоғарғы деңгейлердің толығы

эрқашан төменгі деңгейлердің толығынан аз болады. Бұл жағдайда энергетикалық деңгей неғұрлым жоғары орналасса, оның толығы соғұрлым аз болады. Төменгі деңгейлердің толығына сәйкес сіңірілетін энергия мөлшері, ал жоғарғы деңгейлердің толығына сәйкес шығарылатын энергия мөлшері пропорционал болғандықтан, тепе-теңдік күйдегі ортада сіңіру шығарудан артық болады. Мұндай ортаның сіңіру коэффициенті $a > 0$, яғни орта арқылы өтетін сәуле ағыны әлсірейді.

Егер $N_m > N_n$ болса, онда шығару сіңіруден артық болады. Мұндай ортада сәуле ағыны таралғанда, оның күшеюі ($a < 0$) байқалады, яғни ағын ортадан энергияны алып қояды. Кванттық жүйенің $N_m > N_n$ болатын күйі инверсті толығы күй деп аталады. Инверсті толығы күйді қалыптастыруға болатын орта лазердің активті ортасы болып табылады. Кванттық жүйені инверсті күйге ауыстыру үшін энергия жұмсау қажет, бұл энергия шабыттау энергиясы деп аталады.

Инверсті күй тепе-теңдік емес. Инверсті толығы орта өздігінен бір уақыттан кейін тепе-теңдік күйге оралады.

Көптеген қозған күйлер үшін өмір сүру уақыты (яғни жүйенің тепе-теңдік емес күйде болу уақыты) өте қысқа және 10^{-6} - 10^{-9} секундты құрайды. Дегенмен, кейбір орталарда метастабильді деңгейлер деп аталатын ұзақ өмір сүру уақыты бар күйлер бар болады. Метастабильді деңгейдегі бөлшек басқа деңгейлерге қарағанда ұзағырақ сақталады. Сондықтан кванттық жүйені метастабильді деңгейге шабыттағанда бөлшектерді «жинауға», яғни инверсті толығы қалыптастыруға болады.

Инверсті толығы бар орта сәулеленуді күшейткіш ретінде қызмет ете алады. Бұл үшін бастапқы ынталандыру әсері қажет. Мәжбүрлеп шығару процесін ынталандыру үшін сыртқы сигнал (өріс) немесе ортаның өзіндегі спонтанды сәулеленудің бір кванты (өздігінен ынталану) пайдаланылуы мүмкін.

Сәулеленуді айтарлықтай күшейту үшін активті ортаны екі айнадан тұратын оптикалық резонаторға орналастыру қажет. Резонатордың бір айнасы жартылай өткізгіш болуы тиіс, бұл сәулеленуді шығару үшін қажет. Резонаторда сәуле резонатор осінің бағыты бойынша қозғалып, айналардан қайта-қайта шағылысады және орта арқылы өтеді. Нәтижесінде әр өту кезінде қозған бөлшектердің жаңа топтары сәулеленуге қосылып, оны күшейтеді.

Резонаторда толқын тараған кезде энергия жоғалтулар байқалады, олар активті элементтегі сіңіру мен шашыраудан, сондай-ақ айналардағы жоғалтулардан туындайды. Егер резонатордағы жалпы жоғалтулар толқынның активті элемент арқылы өту кезінде алатын энергиядан аз болса, онда сәулеленудің генерациясы мүмкін болады.

Осылайша, мәжбүрлеп (лазерлік) сәулеленуді алу үшін мынадай жағдайлар қажет:

- Лазерлік зат, ондағы қоздыру процесінде инверсиялық күй жасалуы мүмкін;

- Инверсиялық хал тығыздығын қамтамасыз ететін қоздыру жүйесі;

- Бағытталған сәуле шығаруды күшейту және қалыптастыруға арналған оптикалық резонатор.

Жаңылтпалы (лазерлік) сәуле шығарудың ерекшеліктері. Жылулық және люминесценттік көздердің өздігінен шығарылатын сәулеленуінен айырмашылығы, лазерлердегі жаңылтпалы сәуле шығару жоғары монохроматтылық, когеренттілік және бағыттылық дәрежесімен сипатталады.

Монохроматтылық жаңылтпалы сәуле шығарудың табиғатына байланысты, ол резонанстық процесс болып табылады және сондықтан өздігінен шығарылатын сәулеленуге қарағанда жиілік жолағы анағұрлым тар болады.

Когеренттілік сәуле шығарудың фазалары арасындағы үйлесімділікті білдіреді.

Жаңылтпалы сәуле шығару уақыт пен кеңістікте когерентті болады.

Лазерлердің жіктелуі және жалпы сипаттамалары

Қазіргі уақытта кең таралған лазерлерді әртүрлі белгілер бойынша топтарға бөлуге болады [6, 10, 11].

Лазерлік заттың түрі бойынша лазерлер қатты денелі (кристалды және аморфты), газды, жартылай өткізгіш және сұйықтықты болып бөлінеді. Әр топты ішкі топтарға бөлуге болады. Мысалы, газды лазерлер нейтралды газдардағы атомдық, иондық, молекулалық, газодинамикалық және т.б. болып жіктеледі.

Қоздыру әдісіне байланысты да лазерлерді бөлуге болады. Қоздыру оптикалық сәулеленумен, электр тогымен, электрондық ағынмен, химиялық реакциялар арқылы және басқа әдістермен жүзеге асырылуы мүмкін.

Жұмыс режимінің сипаты бойынша үздіксіз және импульстік режимде жұмыс істейтін лазерлер ажыратылады.

Импульстік лазерлер қысқа бір импульстерді (моноимпульстер) шығарады немесе жиілігі F_0 болатын импульстер тізбегін береді.

Қатты денелі лазерлер

Жұмыс принципі. Лазерлік сәуле шығара алатын көптеген заттардың ішінде қатты денелі лазерлерде синтетикалық рубин кристалдары $Al_2O_3:Cr^{3+}$ ($\lambda = 0,694$ мкм), неодим Nd қосылған шыны ($\lambda = 1,058$ мкм) және иттрий-алюминий гранаты (ИАГ, $\lambda = 1,064$ мкм) қолданылады.

Генерацияны алу үшін қоспа иондарының (Cr , Nd) энергетикалық деңгейлері арасындағы ауысулар пайдаланылады. Негізгі зат тікелей генерациялау процесіне қатыспайды және тек жұмыс иондарының белгілі бір концентрациясын құру үшін қызмет етеді.

Қатты денелі лазерлерде қоздыру әдетте газ разрядтық шамдардың күшті жарық ағыны арқылы жүзеге асырылады.

Қатты денелі активті орталарда иондардың метастабилді күйдегі қозу уақыты айтарлықтай ұзақ ($\sim 10^{-3}$ с), сондықтан олар энергия жинауға арналған. Бұл $\sim 10^{10}$ Вт және одан да жоғары қуатты импульстер алуға мүмкіндік береді.

Лазердің негізгі функционалдық блогы – активті элемент, қоздыру көзі, рефлектор және оптикалық резонатордан тұратын сәуле шығарушы болып табылады.

Газды лазерлер

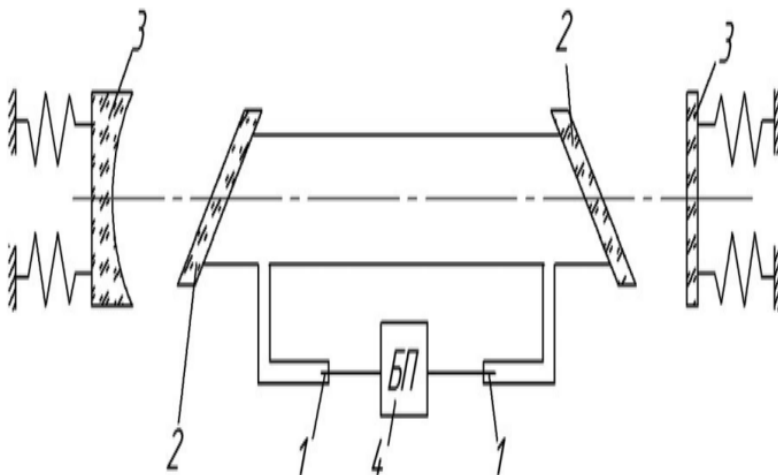
Газды лазерлерде активті орта ретінде газ, газдардың қоспалары немесе газдың металл буларымен қоспасы қолданылады.

Газ разрядты лазерлерде инверсиялық хал тығыздығы газдағы электр разряды әсерінен пайда болады. Газодинамикалық лазерлерде инверсия жоғары қысымда қыздырылған газ қоспасының тез салқындауы арқылы жасалады.

Газды лазерлердің спектрлік диапазоны $\sim 0,15$ мкм-ден ~ 700 мкм-ге дейін созылады. Газды орталардың оптикалық біртектілігі жоғары болғандықтан, олардың сәуле шығаруы аз дивергенциямен және жоғары когеренттілікпен сипатталады.

Дегенмен, газды лазерлердің кемшілігі – орта бірлік көлемінен алынатын қуаттың салыстырмалы түрде төмен болуы. Бұл газдардағы жұмыс бөлшектерінің концентрациясының аздығымен түсіндіріледі.

Гелий-неон лазері газ разрядты түтіктен және оптикалық резонатор көздерінен тұрады. Түтік әдетте 5 см-ден 3 м-ге дейін және диаметрі 3-10 мм аралығында болады. Резонатор екі айнадан тұрады, олардың біреуі сфералық, ал екіншісі жазық болуы мүмкін.

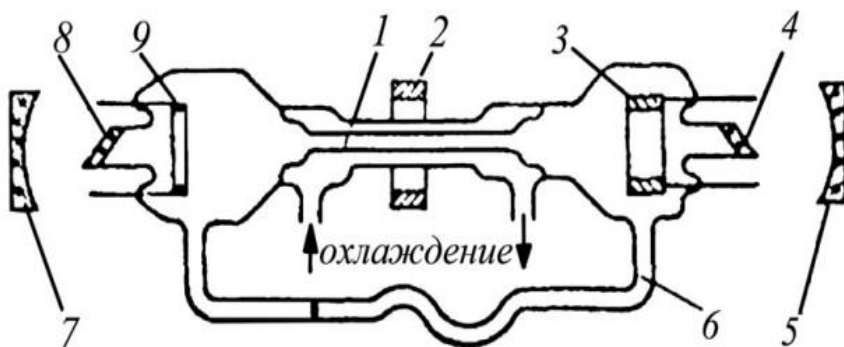


6.14-сурет. Гелий-неон лазері:

1 – электродтар; 2 – шығу терезесі;
3 – резонатор көздері; 4 – қоректендіру блогы.

Иондық лазерлер. Иондық лазерлерде газдардың иондарының энергетикалық деңгейлері арасындағы ауысулар арқылы ынталандырылған сәуле шығару қолданылады. Белсенді орта ретінде аргон, криптон, ксенон және басқа газдар қолданылады, олар негізінен УФ-ауқымында және көрінетін спектрдің көк-жасыл аймағында сәуле шығарады.

Ең кең таралған аргондық лазерлер (6.15-сурет), олар 8-10 спектрлік сызықтарда сәуле шығарады. Аргон лазерінің сәуле шығаруының негізгі қуаты 0,488 және 0,514 мкм толқын ұзындықтарына шоғырланған [6, 11].



6.15-сурет. Аргон лазерінің құрылымы: 1 – капиллярлы газразрядты түтік; 2 – магнит; 3 – анод; 4, 8 – шығу терезелері; 5, 7 – резонатор көздері; 6 – айналып өтетін түтік.

Жарық шығарушы құрылғы газразрядты түтікшеден және капиллярдан тұрады. Түтікшеге электродтар (катод, анод) дәнекерленген, оларға қуат көзі қосылады. Түтікшенің ұштарында Брюстер бұрышы бойынша тығыз бекітілген кварц терезелері орналасқан. Қуатты доғалық разряд жанған кезде айтарлықтай жылу бөлінеді, сондықтан түтікшелер жылуға төзімді материалдардан (мысалы, керамика, кварц, бериллий оксиді) жасалып, сумен салқындатылады. Электрондар концентрациясын, демек, жарық шығару қуатын арттыру үшін тұрақты магнит немесе соленоид арқылы магнит өрісі құрылады. Оптикалық резонатор 7 және 5 айналардан тұрады.

Жартылай өткізгіш лазерлер

Жартылай өткізгіш лазерлерде активті элемент ретінде жартылай өткізгіш кристалл қолданылады, оның қоздыруы әртүрлі әдістермен жүзеге асырылады:

- заряд тасымалдаушыларды электрон-деректеуіш кимасы аймағына сырттан енгізу (ток арқылы қоздыру),
- энергиясы $20 \cdot 10^3$ эВ-тан астам жоғары энергиялы электрондар ағыны (электрондық қоздыру),

– оптикалық сәулелену. Соңғы әдіс тиімсіздігі себебінен сирек қолданылады [6, 11].

Жартылай өткізгіштерде активті бөлшектердің жоғары концентрациясы байқалады, сондықтан олардағы сәулеленудің күшейту коэффициенті бірлік ұзындыққа газразрядтық және қатты активті заттарға қарағанда анағұрлым жоғары. Бұл қасиет жартылай өткізгіштерде өте кішкентай көлемді активті элементтерде (текше миллиметрдің бөлшектері) генерацияны алуға мүмкіндік береді. Сонымен бірге, активті элементтің кіші өлшемдері импульстік қуаттың төмен болуына себеп болады (ондаған ватт), себебі элемент беті шамамен $\sim 4 \cdot 10^6$ Вт/см² қуат тығыздығын ғана шыдайды. 1 кВт және одан да жоғары импульстік қуат алу үшін жеке активті элементтерді тығыз орналастыру арқылы көпэлементті шығарушылар қолданылады.

Қазіргі уақытта ең кең таралған инжекциялық лазерлер – галлий арсениді (GaAs) негізіндегі лазерлер. Олар өте кішкентай өлшемдерге, төмен энергия шығынына ие және импульстік немесе үздіксіз режимде (салқындатумен де, салқындатпай да) жұмыс істей алады [6, 11].

Инжекциялық лазерлердің жұмыс принципі

Жартылай өткізгіштерде электрондардың энергетикалық деңгейлері валенттік жолақта және өткізгіш жолақта орналасады, олар $\Delta\varepsilon$ еніне ие тыйым салынған аймақпен бөлінген. Егер электрон $\Delta\varepsilon$ -дан астам қосымша энергия алып, валенттік жолақтан өткізгіш жолаққа ауысса, онда валенттік жолақта орын бос қалады – яғни оң зарядты "дырка" пайда болады. Біраз уақыттан кейін қозған электрон кері ауысып, дырканы толтырады. Бұл процесс электрон-дырка жұбының рекомбинациясы деп аталады. Рекомбинация кезінде электрон босатылған энергия фотон түрінде шығарылуы мүмкін немесе кристалдық торға берілуі мүмкін.

Тепе-теңдік күйінде валенттік жолақтағы төмен деңгейлердің толуы әрқашан өткізгіш жолақтағы жоғарғы

деңгейлерге қарағанда жоғары болады, сондықтан сәулеленуді күшейту мүмкін емес. Жартылай өткізгіште инверсті толу күйін (сәулеленуді күшейту үшін қажетті шарт) алу үшін, өткізгіш жолақтағы электрондар саны валенттік жолақтағы электрондар санынан асып түсетіндей жағдай қамтамасыз етілуі керек.

p-n-қимасы бар жартылай өткізгіштерде инверсті күйге жету үшін, олардың арқылы жоғары тығыздықтағы тоқты тізбектей өткізу керек. Бұл жағдайда p-аймаққа көптеген электрондар диффузияланады, ал n-аймақта дыркалардың артықшылығы пайда болады. Нәтижесінде p-n-қимасының бірнеше микрометрлік жіңішке аймағында инверсті толуы бар активті аймақ қалыптасады. Жартылай өткізгішке қосылған тура кернеу потенциалдық тосқауылды төмендетіп, заряд тасымалдаушылардың өтуін жеңілдетеді, нәтижесінде электрондар мен дыркалар өзара рекомбинацияланады.

Инверсті толуды сақтау үшін заряд тасымалдаушылардың жоғалуын үнемі қалпына келтіру қажет, бұл сыртқы қуат көзінің көмегімен p-n-қимасы аймағына бос заряд тасымалдаушыларды инжекциялау арқылы жүзеге асырылады.

Резонатор айналары ретінде көбінесе жартылай өткізгіш активті элементтің өз беткі жақтары қызмет етеді. Айналардың шағылысу коэффициенті $\sim 0,3$ шамасында болады, бұл активті ортаның жоғары күшейту коэффициентінің арқасында генерацияны бастау үшін жеткілікті.

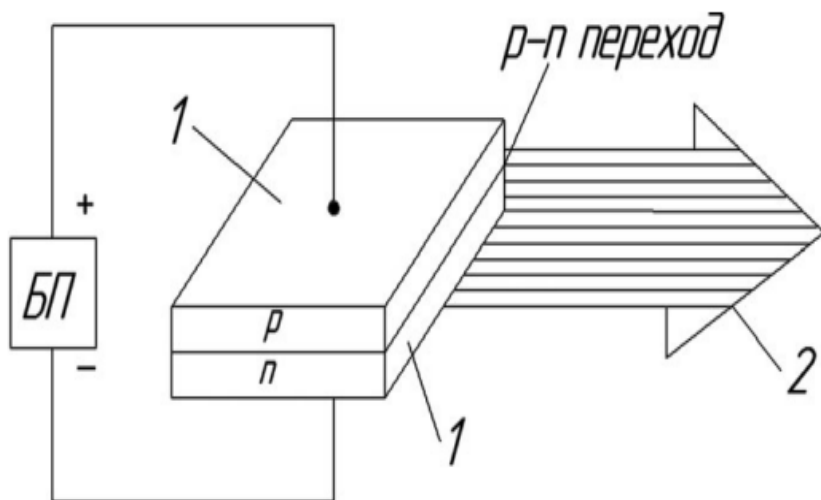
Инжекциялық лазерлердің негізгі элементтері:

- активті элемент – лазерлік диод,
- қоздыруды қамтамасыз ететін қуат көзі.

Лазерлік диод параллелепипед түрінде жасалған. Шығару бетінің биіктігі 1-2 мкм, ұзындығы 0,1-1,5 мм аралығында болады. Резонатор ретінде қарама-қарсы екі тегіс бет қызмет етеді. Қалған беттер паразитті тербелістерді болдырмау үшін тегіс емес етіп жасалады.

Төмен температурада (77 К және одан төмен) жұмыс істейтін лазерлік диодтар криостатта орналастырылады, онда сұйық азот немесе гелий сияқты суытқыштар қолданылады. Бөлме температурасына жақын жағдайда жұмыс істейтін лазерлер үшін термоэлектрлік салқындатқыштар жиі қолданылады. Бөлме температурасында жұмыс істейтін лазерлерде жылу екі үлкен металл пластина арқылы шығарылады, олар активті элементпен жылу және электрлік байланыста болады.

Инжекциялық лазерлерді одан әрі жетілдіру нәтижесінде гетеролазерлер жасалды. Оларда сәулелену мен инжекцияланған бос зарядтардың таралу аймағының тарылуы арқасында ПӘК 10%-ға жетеді.



Сурет 6.16. Инжекциялық лазер:
1 – айна беттері (резонатор); 2 – лазер сәулеленуі.

6.5. Оптикалық материалдар

Оптикалық бөлшектерді жасау үшін келесі материалдар қолданылады:

- оптикалық шыны – түссіз және түсті (ГОСТ 3514-76, ГОСТ 13659-78, ГОСТ 9411-81Б);
- кварцтық оптикалық шыны (ГОСТ 15130-79);
- кейбір кристалдар;
- пластмассалар;
- басқа материалдар [9].

Оптикалық материалдардың негізгі сипаттамалары [3, 4, 8, 9]:

- Сыну көрсеткіші – материалдың жарықтың таралу жылдамдығын өзгерту қабілеті.
- Спектрлік диапазон және өткізгіштік коэффициенті – материалдың қандай толқын ұзындықтарында жарықты өткізетіндігін көрсетеді.
- Термооптикалық тұрақтылық – температура өзгеруіне материалдың оптикалық қасиеттерінің төзімділігі.
- Орташа дисперсия – материалдың әртүрлі толқын ұзындықтарында сыну көрсеткішінің өзгеру дәрежесі.

6.6. Линзалар

Линза (немісше Linse, латынша Lens – «мергімдек») – екі сындыратын беттермен шектелген оптикалық бөлшек, олардың кем дегенде біреуі айналу беті болып табылады. Оптикалық жүйелерде ең көп таралған линзалар – сфералық орталықтандырылған беттері бар линзалар. Сирек қолданылатын линзалардың бір немесе екі беті асферикалық (мысалы, параболалық, эллиптикалық, цилиндрлік т.б.) болуы мүмкін. Линзалардың түрлері 6.17-суретте көрсетілген [8, 9].

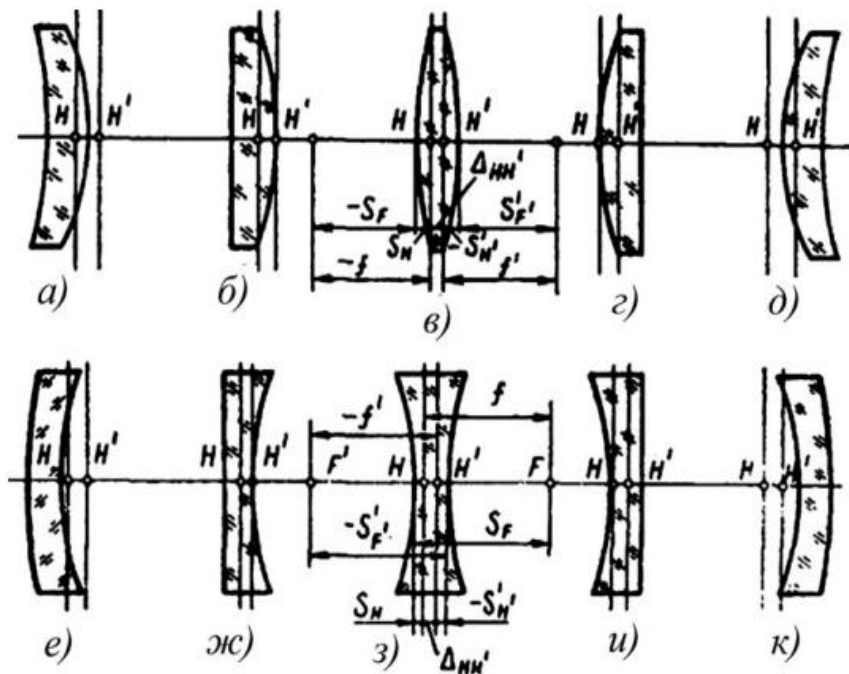
Линзалар үш топқа бөлінеді:

- Оң (жинақтағыш) линзалар – оң артқы фокустық аралыққа ие.

– Теріс (шашыратқыш) линзалар – теріс артқы фокустық аралыққа ие.

– Телескопиялық (афокальды) линзалар – оптикалық күші нөлге тең.

– Линзаларды есептеу әдістерін [3, 8, 9, 11] дереккөздерінен табуға болады.

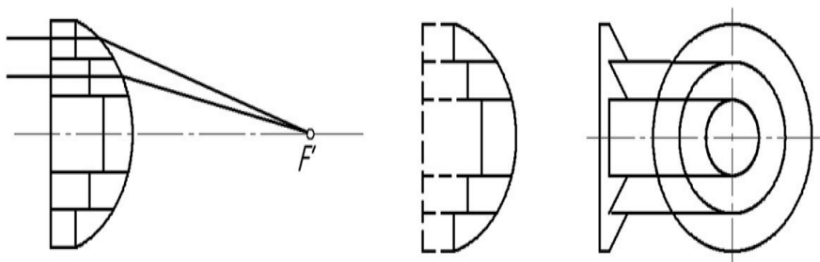


6.17-сурет. Линзалардың түрлері

Френель линзалары

Френель линзалары – бұл сатылы беті бар оптикалық элементтер. Олар фокусировканың жоғары сапасы қажет емес сенсорларда, жарық конденсаторларында, лупаларда және қозғалыс детекторларын фокусировкалау құрылғыларында кеңінен қолданылады. Френель линзалары шыныдан, полиметилметакрилаттан (орг. шыны, көрінетін және жақын ИҚ диапазон үшін) және полиэтиленнен (алыс ИҚ диапазон

үшін) жасалады. Френель линзаларының тарихы 1748 жылы граф Буффо шыны линзалардың ішінде концентрлік дөңгелек сатыларды құюды ұсынған кезде басталды. Бұл линзалардың қалыңдығын азайтып, энергия жоғалтуын төмендетуге мүмкіндік берді. Дегенмен, мұндай линзаларда жарықтың сынуы тек бетінде ғана болады, өйткені олардың ішінде сәулелер түзу сызықтар бойымен өтеді. Граф Буффоның идеясы 1822 жылы Августин Френель (1788-1827) өзгертілді, ол әртүрлі сақиналардың қисықтығы орталыққа дейінгі қашықтыққа байланысты болатын линзаларды жасап шығарды, нәтижесінде мұндай құрылғыларда сфералық абберация іс жүзінде жоқ (6.18-сурет) [12].



Сурет 6.18. Френель линзаларының концепциясы

Френель линзалары кәдімгі линзалармен салыстырғанда бірқатар артықшылықтарға ие: салмағы аз, қалыңдығы жұқа, қисықтығын өзгерте алады (пластикалық линзалар үшін қолданылады) және, ең бастысы, жарық ағынын жұтудың төмен шығындары. Соңғы қасиет ортаңғы және алыс ИҚ диапазондарына арналған линзаларды жасау кезінде өте маңызды, себебі материалдардағы жұту өте жоғары болуы мүмкін. Осы себептен, алыс ИҚ диапазонда жұмыс істейтін қозғалыс детекторларының барлығына жуығы Френель линзалары негізінде жасалған [12].

Қазіргі уақытта екі түрлі Френель линзалары кеңінен қолданылады: тұрақты қадамды және тұрақты тереңдікті. Іс

жүзінде әрбір саты бетінің қисықтығын бірдей жасау өте қиын болғандықтан, барлық сатылар жазық профильмен жасалады. Линзаның фокустау қасиеттерін нашарлатпау үшін, барлық сатылар бір-біріне мүмкіндігінше жақын орналасуы керек.

Френель линзаларын есептеу формулаларын [12] дереккөзінен табуға болады.

6.7. Жарық өткізетін терезелер

Терезелердің негізгі функциялары мыналар:

- сенсордың ішкі бөліктерін қоршаған ортаның әсерінен қорғау;

- белгіленген толқын ұзындығы диапазонында жарық сәулелерін ең аз жоғалтулар мен бұрмаланулар арқылы өткізу.

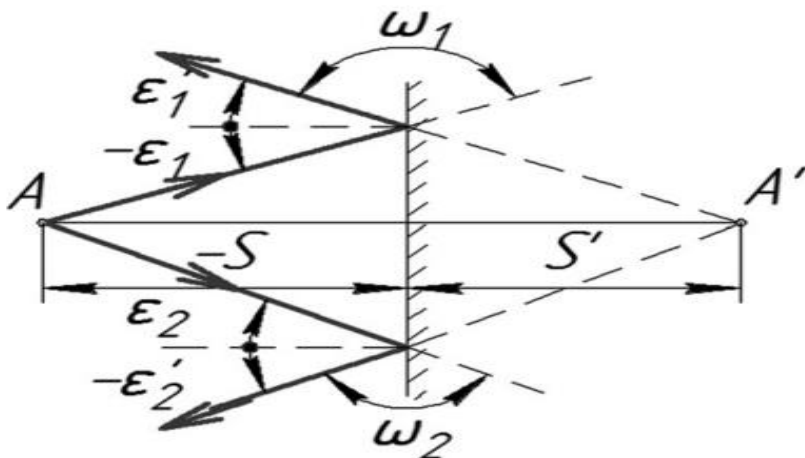
Терезелер жазық пластиналар немесе сфера бөліктері түрінде жасалуы мүмкін. Оптикалық жоғалтуларды азайту үшін терезенің бір немесе екі бетіне арнайы қабаттар жағылады (бұл «ағарту» деп аталады [9]). Мұндай қабаттар терезенің көкшіл, күлгін немесе сары түске боялуына әкеп соғады және көбінесе фотообъективтерді жасауда қолданылады.

6.8. Жазық және сфералық айналар

Сыртқы немесе ішкі жаныштау қабаты бар жазық айналар (қабат сәйкесінше жазық-параллель әйнек пластинаның алдыңғы немесе артқы бетіне жағылады) оптикалық жүйелерде бағытты өзгерту, оптикалық осьті жылжыту, сәуле шоғырын бөлу немесе бейнені төңкеру үшін қолданылады.

Жазық айна заттың жорамал кескінін құрады. Айна бетінен сәулелердің шағылуы шағылу заңына бағынады: түсу бұрышы шағылған бұрышқа тең ($-\varepsilon = \varepsilon$), ал зат пен кескін нүктелері айна жазықтығына нормаль бойынша одан тең

қашықтықта ($-s = s$) орналасады (6.19-сурет). Жазық айнамен сәуленің ауытқу бұрышы $\omega_i = 180 - 2|\epsilon_i|$ [3, 8, 9].



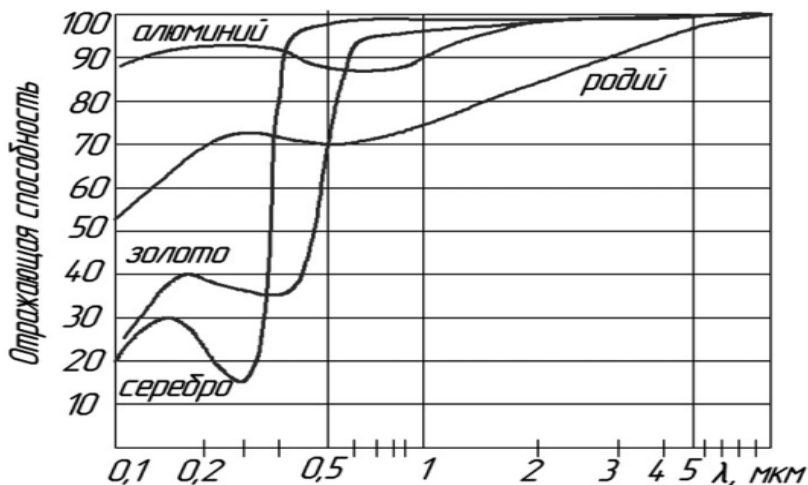
6.19-сурет. Жазық айнадан шағылу

Сфералық айна беттері әртүрлі мақсаттағы оптикалық жүйелерде қолданылады (жарықтандыру және проекциялау жүйелерінде, фотоэлектрлік бақылау құрылғыларының объективтерінде және т.б.). Линзалардың әсеріне тең әсер ететін сфералық айналар линзалық жүйелермен салыстырғанда ықшамдырақ жүйелерді алуға мүмкіндік береді. Айна беттерін қолданудың кейбір жағдайларда сыну беттерін қолдануға қарағанда артықшылығы бар, себебі хроматикалық абберрациялар болмайды.

Сфералық айналарды есептеу формулаларын [3, 8, 9] дереккөздерінен табуға болады.

Көрінетін және жақын ИҚ диапазондарында жұмыс істейтін айналардың бетіне шағылыстырушы жабындар ретінде күміс, алюминий, хром және родий қолданылады. Спектрдің алыс ИҚ аймағында пайдаланылатын құрылғылар үшін алтын ең қолайлы. Тиісті жабындарды таңдау арқылы

шағылысу коэффициентін іс жүзінде 0-ден 1-ге дейін (6.20-сурет) [12] қалаған деңгейде іске асыруға болады.



6.20-сурет. Өртүрлі жабындармен жасалған айналардың спектрлік шағылысу қабілеті

Толық ішкі шағылысу әсерін пайдаланатын, шағылыстырушы қабаттарды жағуды қажет етпейтін басқа типтегі шағылыстырғыш құрылғылар бар. Мұндай шағылыстырғыштар ретінде призмалар қолданылады, оларда толық шағылысу бұрышы сыну көрсеткішінің функциясы болып табылады.

$$\theta_0 = \arcsin \left(\frac{1}{n} \right). \quad (6.17)$$

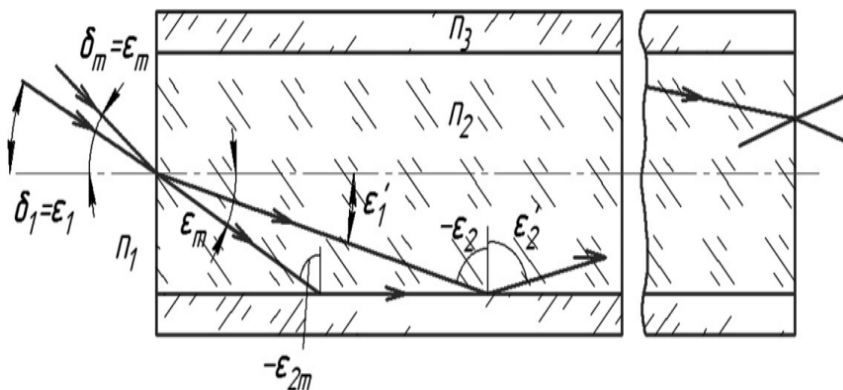
Бұл типтегі рефлекторлар спектрдің көрінетін және жақын ИК диапазондарында ең тиімді болып табылады, өйткені олардың шағылысу коэффициенті бұл аймақта бірлікке жақын. Толық ішкі шағылысу принципіне негізделген оптикалық талшықты желілер құрылған.

6.9. Таспа-тамырлы оптикалық сымдар

Оптикалық таспа-тамыр — бұл толық ішкі шағылысу құбылысына негізделген, оптикалық диапазондағы сәулелерді беру үшін арналған, диаметрі 5-6 мкм-ден 0,3 мм-ге дейін болатын, дөңгелек көлденең қималы, бүйір беті мен ұштары жылтыратылған шыны таяқша. Таспа-тамырлар сымдарға (жағымды сымдарға) жинақталады, олар иілген кезде сәуле өткізуді бұзбайды, егер иілу радиусы жеке таспа-тамыр диаметрінен 50 есе (ыстық күйде иілгенде) және 300 есе (суық күйде иілгенде) асып түссе. Толық ішкі шағылысу шарттарын қамтамасыз ету және сәуле шығындарын азайту үшін оптикалық таспа-тамырды құрамалы етіп жасайды. Ол үлкен сыну көрсеткіші бар материалдан (мысалы, Ф8 шынысы, $n_e=1,6291$, ВС 682 шынысы, $n_e=1,6855$) жасалған өзекшеден және кіші сыну көрсеткіші бар материалдан (мысалы, ВО 488 шынысы, $n_e=1,4898$, ВО 513 шынысы, $n_e=1,5150$) жасалған қабықтан тұрады.

Қабық өзекшенің бетін зақымданудан, ластанудан қорғайды және сәуленің шашырауына немесе көрші таспа-тамырлардан сәуле өтуіне кедергі жасайды [2, 8].

Ауада ($n_1=1$) орналасқан, тік ұштары бар цилиндрлік сым арқылы сәуленің өтуі 6.21-суретте көрсетілген. Өзекше мен қабықтың сыну көрсеткіштері n_2 және n_3 деп белгіленген, ал сәуленің кіру ұшындағы түсу және сыну бұрыштары $\sigma'=\varepsilon_1$ және ε_1' , ал қабық бетіндегі сәуленің түсу және шағылысу бұрыштары ε_2 және ε_2' деп көрсетілген. Егер сымның кіру және шығу ұштары бірдей ортада болса, онда сымнан шыққан сәуленің осымен σ' бұрышы кірудегі сәуленің осымен σ_1 бұрышына тең болады.



Сурет 6.21. Цилиндрлік сым арқылы сәуленің өтуі

Жеңіл жүзгіштердің өзегі мен қабығының материалдарына байланысты олар мына түрлерге бөлінеді: шынылық (өзегі де, қабығы да шыныдан жасалған), шыны-полимерлік (өзегі шыныдан, қабығы пластикаттан), полимерлік (өзегі пластикаттан, қабығы басқа материалдардан), кварцты (өзегі кварцтан). Сонымен қатар ИК-сәулелерге өткізгіш жеңіл жүзгіштер бар, олардың өзегі инфрақызыл сәулеленуден өтеді. Ультракүлгін, көрінетін және инфрақызыл диапазондардағы сәулеленуді өткізу үшін 0,18-5 мкм спектрлік диапазонында мөлдір полихроматикалық жеңіл жүзгіштер қолданылады.

Жеңіл жүзгіштер қадамды және градиентті болып екіге бөлінеді. Қадамды жеңіл жүзгіштерде сыну көрсеткіші тұрақты материалдан жасалған, сәулелер сынық сызық траекториясы бойынша таралады. Градиентті жеңіл жүзгіштердің (градан немесе селфок) сыну көрсеткіші ортадан шетке қарай біртіндеп азаяды, нәтижесінде сәулелер жеңіл жүзгіш бойымен тегіс траекториямен таралады. Градиентті жеңіл жүзгіштердің қадамдыларға қарағанда артықшылығы – жарықтың шашырауының азаюы, себебі жеңіл жүзгіш пен ортаның арасындағы шекара өткір болмайды [2, 8].

Жеңіл жүзгіштердің көлденең қимасы дөңгелек, тікбұрышты, алтыбұрышты немесе одан да күрделі пішінде болуы мүмкін.

Екі ұшының көлденең қимасының ауданына қарай жеңіл жүзгіштер цилиндрлі және конусты болып бөлінеді. Соңғылары шығу ұшына қарай тарылатын немесе кеңейетін талшықтардан тұрады, олар сәйкесінше фокондар немесе афокондар деп аталады [2, 8].

Өндірісте алынған жеңіл жүзгіштердің ұзындығы бірнеше километрге жетеді, ал әлсіреу көрсеткіші бірнеше децибел/километр (дБ/км) құрайды.

Жеңіл жүзгіштердің ажыратымдылық қабілеті (1 мм-ге шаққандағы сызықтар санымен өлшенеді) 1 мм-ге орналасқан талшықтар санының жартысына тең және талшықтың диаметріне, қабықтың қалыңдығына және талшықтарды жинау әдісіне байланысты. Жеңіл жүзгіштердің ажыратымдылық қабілеті 20 – 100 сыз/мм-ге жетеді.

6.10. Жылу сәулеленуді жұтатын жабындар

Жылу сәулелену детекторлары (белсенді де, пассивті де) электромагниттік толқындарды инфрақызыл алыс спектр аймағында жұту немесе шығару принципіне негізделген. Кирхгоф жұту коэффициенті (α) мен шығару коэффициенті (ϵ) бірдей физикалық шама екенін анықтады [12]. Детекторлардың тиімді жұмыс істеуі үшін бұл коэффициенттердің мәндері максималды (яғни бірге мүмкіндігінше жақын) болуы керек. Мұны қамтамасыз ету үшін детектор беті арнайы өңделеді немесе жоғары шығару қабілеті бар жабындар жағылады. Мұндай жабындардың жылу өткізгіштігі жақсы, ал жылу сыйымдылығы өте төмен болуы керек, сондықтан олар өте жұқа жасалады.

Детекторлардың шығару қабілетін арттырудың бірнеше әдісі бар [12]:

– жоғары шығару коэффициенті бар жұқа металл пленкаларды (мысалы, нихромды) жағу;

– кеуекті платина қарасын гальваникалық түрде шөгінділеу және металлды төмен қысымда азот атмосферасында шашу.

Жоғары жұту (шығару) қабілеті бар материалды жасаудың ең тиімді әдісі – оның бетін кеуекті етіп қалыптастыру, себебі толқын ұзындығынан әлдеқайда кіші бөлшектер жарық сәулелерін сындырады немесе жұтады [12].

Кеуекті беті бар материалдар кең спектрлік диапазонда жоғары шығару қабілетіне ие, бірақ толқын ұзындығы ұлғайған сайын бұл қабілет айтарлықтай төмендейді. 500 мкг/см² тығыздығы бар алтын қарасы пленкасы жақын, орта және алыс ИК диапазонда 0,99 шығару қабілетіне ие.

Кеуекті платина қарасы қабатын электролиттік әдіспен қалыптастыру үшін келесі рецептті қолдануға болады [12]: талшықтың диаметрі, қабықтың қалыңдығы және талшықтарды жинау әдісі.

Тағы бір кең таралған сәуле шығару қабілетін арттыру әдісі – бетке металл тотығы қабатын жабу, бұл төмен вакуум жағдайында жабылған металл пленкасын тотықтыру арқылы жүзеге асырылады.

Сәуле шығару қабілетін арттырудың тағы бір белгілі әдісі – бетті органикалық бояулармен (көрінетін түсі мұнда мүлдем маңызды емес) бояу, олардың сәуле шығару коэффициенті 0,92...0,97 аралығында болады.

Дегенмен, органикалық материалдардың жылу өткізгіштігі төмен, сондықтан оларды 10 мкм-ден жұқа қабатпен жабу қиын, бұл датчиктердің жылдамдығына айтарлықтай әсер етуі мүмкін.

Микродатчиктерде жиі келесі әдіс қолданылады: үстіңгі бетке шыны қабаты жабылады, ол қоршаған ортаның зиянды әсерінен қорғауға қанаттандырмайды, сонымен қатар алыс ИК-спектр аймағында 0,95-ке тең сәуле шығару коэффициентіне ие болады [12].

Әдебиеттер тізімі

1. Афанасьев В.А. Оптические измерения. – М.: Высшая школа, 1981. – С. 230.
2. Вейнберг В.Б., Саттаров Д.К. Оптика световодов. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 320.
3. Заказнов Н.П. Прикладная геометрическая оптика. – М.: Машиностроение, 1984. – С. 184.
4. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Челибанов В.П. Приемники излучения. Учебное пособие для вузов. – СПб: Папирус, 2003. – С. 527.
5. Ишанин Г.Г., Козлов В.В. Источники оптического излучения. – СПб: Политехника, 2009. – С. 415.
6. Климов Ю.М. Прикладная лазерная оптика. – М.: Машиностроение, 1985. – С. 128.
7. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. Радио, 1988. – С. 400.
8. Прикладная оптика: Учеб. пособие для приборостроительных специальностей вузов / Л.Г. Бебчук, Ю.В. Богачев, Н.П. Заказнов и др. / Под ред. Н.П. Заказнова. – М.: Машиностроение, 1988. – С. 312.
9. Справочник конструктора оптико-механических приборов/Под ред. В.А. Панова. – Л.: Машиностроение, 1980. – С. 742.
10. Справочник по лазерам/Под ред. А.М. Прохорова. В 2-х т. – М.: Сов. радио, 1978. – С. 400.
11. Теория и расчет элементов приборов / Г.Г. Ишанин, Э.Д. Панков, В.С. Радаikin, А.Э. Потемкин. – СПб.: Политехника, 1993. – С. 224.
12. Фрайден Дж. Современные датчики. – М.: Техносфера, 2005. – С. 592.

7-ТАРАУ

РЕЗИСТИВТІ ДЕТЕКТОРЛАР

7.1. Негізгі сипаттамалары

Электр кедергісі – әртүрлі түрлендіргіштердің өлшеу тізбектерінде ең көп таралған параметрлердің бірі [5]. Жиналған параметрлері бар тізбектерде электр кедергісі конструктивті түрде жасалған жеке элемент – резистор түрінде бейнеленеді. Резистор оқшаулағыш каркастан және оған бекітілген сезгіш элементтен (сым немесе электр өткізетін материалдың жұқа қабаты) тұрады, олар белгілі бір электр кедергісіне ие.

Қазіргі резисторлардың номиналды кедергілерінің ауқымы өте кең – төмен кедергілі (бірліктен бөлшек омға дейін) жоғары кедергілі ($10^5 \dots 10^7$ Ом және одан да жоғары) резисторларға дейін. Дәлдік резисторлардың қателігі пайыздың жүзден бір бөлігіне дейін, ал жалпы мақсаттағы резисторларда бірнеше ондаған пайызға жетуі мүмкін.

Резисторлардың негізгі сипаттамалары:

- Номиналды кедергі ($R_{ном}$)
- Рұқсат етілген қателік
- Рұқсат етілген уақыттық тұрақсыздық

Бұл параметрлер резистордың дәлдік класына және түріне байланысты стандарттармен реттеледі. Сонымен қатар, резисторлардың сапасын немесе жұмыс жағдайларын анықтайтын маңызды параметрлер:

- Номиналды қуат ($P_{ном}$) немесе максималды жұмыс кернеуі (U_{max})
- Температуралық тұрақсыздық немесе кедергінің температуралық коэффициенті
- Өздік шу деңгейі

Номиналды қуат – бұл резистордың өзінің дәлдік класы бойынша белгіленген қателік шегін асырмай, ұзақ уақыт бойы жоя алатын максималды активті қуат. Номиналды қуат пен

номиналды кедергіге сүйене отырып, резистордың максималды жұмыс кернеуі анықталады.

$$U_{\max} = \sqrt{R_{\text{ном}} P_{\text{ном}}}.$$

Температуралық тұрақсыздық немесе кедергінің температуралық коэффициенті (ТКК) – кедергінің температура өзгеруіне байланысты салыстырмалы өзгеруін сипаттайды.

Резисторлардың өздік шулары жылулық және тоқтық шулардан құралады. Жылулық шулардың пайда болуының себебі – электр өткізетін материалдағы электрондардың көлемдік концентрациясының тербелмелі өзгеруі, ол жылулық қозғалыс нәтижесінде болады. Жылулық шулар барлық резистор түрлеріне тән және олардың деңгейі Найквист теңдеуі бойынша анықталатын жылулық шу кернеуінің мәнімен сипатталады.

$$U_T = \sqrt{4kTR\Delta f},$$

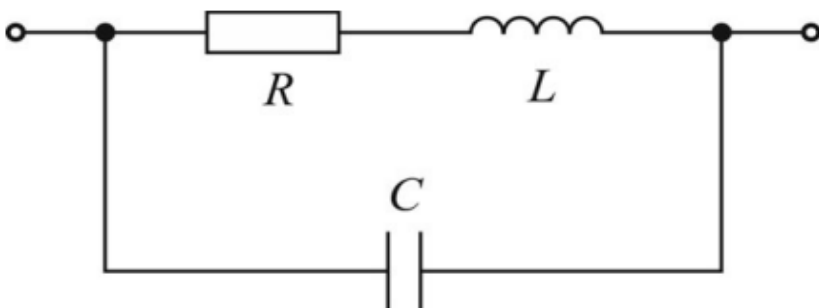
мұндағы: k – Больцман тұрақтысы; R – резистордың кедергісі; T – оның абсолюттік температурасы; Δf – жұмыс жиілік жолағы.

Тоқтық шулар негізінен өткізгіш қабаты түйірлі құрылымды (яғни сымсыз) резисторларда ғана пайда болады. Бұл шулар өткізгіш түйірлер арасындағы контактілердің тұрақсыздығынан туындайды.

Тоқтық шулар деңгейі резисторға түсірілген кернеудің (U) шу кернеуінің (U_m) өлшенген мәніне қатынасымен анықталады және бірнеше мкВ/В шамасына жетуі мүмкін.

Резистор кедергісінің уақытша тұрақсыздығы оның белгілі бір уақыт аралығында (әдетте бір жыл ішінде) салыстырмалы өзгеруімен сипатталады. Бұл өзгеріс өткізгіш материалдың қасиеттеріне, конструкциясына және негізінен резистордың өндіріс технологиясына байланысты болады.

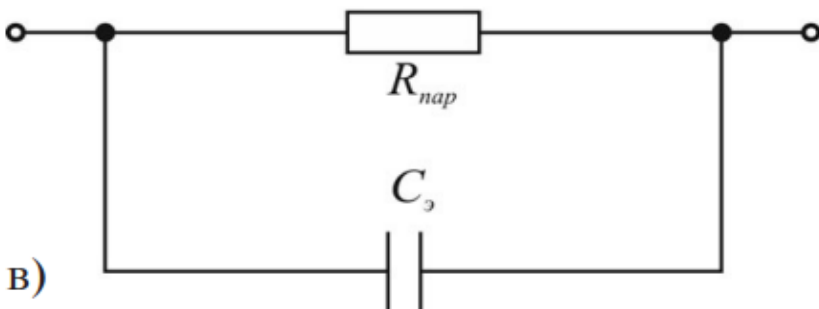
Жалпы жағдайда резистор кедергісі таза активті болмайды (7.1-сурет, а). Қалдық параметрлердің қайсысы басым болуына байланысты, бұл схеманы 7.1-сурет, б-де көрсетілгендей көрсетуге болады, мұнда:



а)



б)



в)

7.1-сурет. Резисторлардың эквиваленттік сұлбалары

$$R_{\text{носл}} = \frac{R}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2},$$

$$L_{\text{э}} = \frac{L(1 - \omega^2 LC) - R^2 C}{(1 - \omega^2 LC) + (\omega RC)}.$$

$$R_{\text{нар}} = R \left[1 + \omega^2 \left(\frac{L}{R} \right)^2 \right],$$

$$C_{\text{э}} = C - \frac{1}{\omega^2 L + \frac{R^2}{L}}.$$

Төмен жиіліктерде, ω^2 мүшелері бар қосылғыштарды ескермеуге болады.

$$R_{\text{носл}} = R_{\text{нар}} = R; L_{\text{э}} = L - R^2 C; C_{\text{э}} = C - \frac{L}{R^2}.$$

Резисторлар, тек тұрақты ток тізбектерінде ғана емес, сонымен қатар айнымалы ток тізбектерінде де жұмыс істеуге арналған, қалдық реактивтіктерінің аз мәнімен сипатталады және реактивсіз резисторлар деп аталады. Айнымалы тоқтағы резистордың негізгі сипаттамасы оның уақыт тұрақтысы болып табылады.

$$T = \frac{L}{R} (1 - \omega^2 LC) - RC \approx \frac{L}{R} - RC.$$

Өткізгіш материалдың түріне байланысты резисторлар сымды және сымсыз болып бөлінеді. Сымды резистордың сезгіш элементі өткізгіш материалдан жасалған сым болып табылады, ол дөңгелек немесе жазық оқшаулағыш материалдан жасалған каркасқа немесе металл оқшауланған каркасқа оралған. Салыстырмалы түрде үлкен диаметрлі (шамамен 0,005 мм және одан да көп) сымдардан жасалған резисторлар сымды, ал одан жіңішкелері микросымды резисторлар деп аталады.

Өткізгіш материалдардың қасиеттерін сипаттайтын негізгі параметрлерге: меншікті электр кедергісі, меншікті кедергінің температуралық коэффициенті (ТКС), мыспен жұптастырылған термо-ЭҚК және сызықтық кеңею коэффициенті жатады.

Меншікті кедергі резистордың өлшемдерін анықтайды. Сондықтан, басқа жағдайлар тең болғанда, резистордың минималды өлшемдерін алу үшін сезгіш элемент материалдың меншікті кедергісі жоғары болуы керек. ТКС – температуралық тұрақсыздықтың сипаттамасы, сондықтан оның мәні өте аз, ал идеалды жағдайда нөлге тең болуы тиіс. Атап айтқанда, резистордың ТКС-і негізінен сезгіш элемент материалдың ТКС-імен анықталады. Дегенмен, резистордың ТКС-іне тензоэффект, яғни сезгіш элементтегі механикалық кернеулердің әсерінен кедергінің өзгеруі (сезгіш элемент пен каркастың сызықтық кеңею коэффициенттерінің әртүрлі болуынан температура өзгерген кезде пайда болатын) едәуір әсер етеді.

Сымда пайда болатын механикалық кернеулер резистордың кедергісінің уақыт бойынша тұрақсыздығына да күшті әсер етуі мүмкін. Сондықтан прецизионды резисторлардың каркастары әдетте алюминий қорытпаларынан немесе тіпті мыстан жасалады, олардың сызықтық кеңею коэффициенттері сезгіш элементтер материалдарының коэффициенттеріне жақын.

Пластмассалардан АГ-4 маркалы материал ең қолайлы болып табылады. Дегенмен, каркас күрделі пішінге ие болған кезде оны престеу қиынға соғады [6].

Резисторларды жасау үшін ең типтік және кең таралған материал – манганин: мыс (шамамен 85%), марганец (12...13%) және никель (шамамен 3%) қорытпасы. Оның меншікті электр кедергісі $\rho = 0,42...0,48$ мкОм/м; ТКС α_r $(-3...+4) \cdot 10^{-5}$ 1/К; мыспен жұптасқанда термо-ЭҚК $e_t = 1...2$ мкВ/К. Манганин уақыт бойынша жоғары тұрақтылықпен ерекшеленеді, бұл оны арнайы термиялық өңдеу арқылы – вакуумде $550...600$ °С температурада отжигтеп, баяу салқындату арқылы қол жеткізіледі. Резисторларды орау кезінде материалда пайда болатын механикалық кернеулерді жою үшін дайын резисторлар жасанды түрде ескірітіледі, яғни $120...130$ °С-қа дейін циклдік қыздырылып, бөлме температурасына дейін салқындатылады. Ескірітілген манганин сымды резистордың жылдық тұрақсыздығы 0,001% немесе одан да аз болуы мүмкін.

Жоғары меншікті кедергіге ие басқа бір қорытпа – константан (шамамен 60% мыс және 40% никель), оның $\rho = 0,48...0,52$ мкОм/м; $\alpha_r = (0,5...2,5) \cdot 10^{-5}$ 1/К. Константанның елеулі кемшілігі – мыспен жұптасқанда үлкен термо-ЭҚК ($e_t = 45...55$ мкВ/К), бұл оның қолданылуын айтарлықтай шектейді.

Мыс–марганец–германий, алтын–хром және т.б. қорытпалары өте перспективалы болып табылады. Сымды резисторлар айтарлықтай қалдық реактивтілікке ие, оны азайту үшін бифилярлы орама, арнайы құрылымды каркастар қолданылады, нәтижесінде жазық каркасты резисторларда тұрақты уақыт $(1...5) \cdot 10^{-9}$ с-қа, ал дөңгелек каркасты резисторларда $(1...50) \cdot 10^{-7}$ с-қа дейін азаюы мүмкін.

Сымды резисторлардың номиналды кедергілерінің диапазоны 0,001 Ом-ден (каркассыз сымды ілмек) 10^6 Ом-ге дейін. Одан да жоғары кедергілі микросымды резисторлар

болуы мүмкін, олар құйма манганин микросымдары негізінде жасалады. Атап айтқанда, микросымды құю процесі бастапқы материалдың химиялық құрамының негізгі компоненттерінің булануы мен тотығуына байланысты өзгеруіне әкеледі. Нәтижесінде дайын микросымда марганец мөлшері 5...13%, ал никель мөлшері 2...3% аралығында өзгеруі мүмкін. Бұл меншікті кедергі мен ТКС-тің салыстырмалы түрде үлкен шашыраңқылығына, уақыттық тұрақсыздықтың артуына әкеледі, бұл микросымды резисторлардың дәлдігін шектейді. Олардың қателігі әдетте 0,01%-тан аз емес.

Сымсыз резисторлардың сезгіш элементі – оқшаулағыш қарқасқа жабылған өткізгіш материалдың жұқа қабаты. Сымсыз резисторлардың негізгі түрлері: көміртекті, металлдандырылған (металлпленкалы және металл-тотықты) және композициялық. Соңғыларының өткізгіш қабаты өткізгіш және өткізгіш емес материалдардың композициясын құрайды.

Сымсыз резисторлардың барлық түрлерінің тұрақсыздығы жылына 1...5% аралығында болады. Бұл реттен металлпленкалы резисторлар бөлек, олардың тұрақсыздығы 0,05...0,1%-тан аспайды. Көптеген сымсыз резисторлардың ТКС-і $(3...10) \cdot 10^{-4}$ 1/К тең. Металл-тотықты резисторлардың ТКС-і бір реттік шамаға аз.

Сымсыз резисторлардың ерекшелігі – аздық қалдық реактивтілік. Арнайы құрылымды сымсыз резисторлардың тұрақты уақыты $(0,2...2) \cdot 10^{-10}$ с-қа дейін азайтылуы мүмкін.

Өлшеу техникасында сымды да, сымсыз да прецизионды резисторлар кеңінен қолданылады, олар резистивтік кернеу бөлгіштерінің, универсал шунттардың, қосымша кедергілердің элементтері ретінде пайдаланылады. Кең таралған резистор түрлерінің негізгі сипаттамалары 7.1-кестеде келтірілген.

Таблица 7.1. Негізгі резистор түрлерінің сипаттамалары

Резистор түрі	Кедергі диапазоны, Ом	Төзу, ± %	Номинал қуаты, Вт	ТКС, $10^{-4}/K$
Сымды				
ПТ	$20 \dots 106 \cdot 10^6$	2	0,5; 1; 2	+2,0
ПТМН	$1 \dots 106 \cdot 10^6$	0,25; 0,5; 1	0,5; 1	$\pm(1 \dots 1,5)$
Микросымды				
C5-5	$1 \dots 180 \cdot 103 \cdot 10^3$	0,05... 5	1; 2; 5; 8; 10	$\pm(0,5 \dots 1,5)$
C5-41T	$15 \dots 10 \cdot 103 \cdot 10^3$	0,1...2	0,25	± 1
C5-15	$100 \dots 100 \cdot 103 \cdot 10^3$	0,05... 1	0,05	$\pm 1,5$
МПХ	$100,3 \cdot 10^3 \dots 20 \cdot 106 \cdot 10^6$	0,2...1	0,25	$\pm 0,1$
C5-25T	$1 \dots 30 \cdot 103 \cdot 10^3$	0,1...1, 5	0,1; 1,5	$\pm 0,35$

Басып шығарылған резисторлар сымды емес резисторлардың бір түрі болып табылады. Оларды фотолитография әдісі арқылы жасайды. Мұндай резисторлардың сезімтал элементтері үшін шикізат ретінде манганиндік немесе нихромды фольга қолданылады, ол тегіс окшаулағыш (әдетте стеклотекстолитті) немесе окшауланған металл тақтайшасына жабыстырылады. Дәл басып шығарылған резисторлардың кедергісінің номиналды мәндері $5 \cdot 10^{-3}$ Ом-нан $5 \cdot 10^3$ Ом-ға дейін болады. Төмен кедергілі резисторларды әдетте манганиннен, ал жоғары кедергілі резисторларды нихромнан жасайды.

Басып шығарылған резисторлардың технологиясының ерекшелігі бір басылған платада кедергілердің декадаларын, тіпті кернеу бөлгіштері сияқты өлшеу құралдарын алуға мүмкіндік береді. Бір платадағы барлық резисторлардың параметрлерінің бірдейлігі, жұмыс жағдайларының (атап айтқанда, температуралық) ұқсастығы кедергілердің қатынасының жоғары дәлдігін, уақыттық тұрақтылықты және

температураға тәуелсіздігін қамтамасыз етеді. Кедергілердің қатынасының жылдық тұрақсыздығы әдетте 0,0005...0,001% шегінде болмайды.

7.2. Жылжу сенсорлары – реостаттық сенсорлар

Реостаттық сенсорлар – бұл реостат түрінде жасалған датчиктер, олардың жылжымалы бөлігі (жылғауыш) өзгертілетін кіріс шамасының әсерінен қозғалады. Шығыс шамасы ретінде жылғауыштың орнына функционалды түрде байланысты электр кедергісі қарастырылады. Реостаттық сенсорлардың тек жылжуларды өзгерту үшін ғана қолданылмайтынын атап өткен жөн. Механикалық серпімді элементтердің көмегімен көптеген электрлік емес шамалар (қысым, күш, ағын деңгейі, т.б.) жылжуларға айнала алатындықтан, реостаттық түрлендіргіштер қысым, күш, ағын, деңгей және т.б. датчиктерде қолданылады [4].

Сезімтал элементтің материалына байланысты реостаттық түрлендіргіштер сымды, сымсыз, фотоэлектрлік, сұйықтық және өткізгіш керамикалық болып бөлінеді.

Сымды реостаттық сенсорлар ең жоғары дәлдік пен түрлендіру функциясының тұрақтылығымен ерекшеленеді, оларда төмен өту кедергісі, аз шу деңгейі, төмен температуралық кедергі коэффициенті (ТКС) болады. Дегенмен, олардың ажыратымдылық қабілеті төмен, салыстырмалы түрде кедергісі ондаған килоомнан аспайды, алмастырылмалы токта қолдану мүмкіндігі шектеулі, себебі ораманың қалдық индуктивтілігі мен сыйымдылығы әсер етеді. Бұл кемшіліктер сымсыз датчиктерде жоқ, бірақ олар дәлдік жағынан сымдылардан анағұрлым төмен.

Ең кең таралғандары – сымды реостаттық түрлендіргіштер. Олар құрылымдық ерекшеліктеріне байланысты түзу сызықты жылжулы және айналмалы қозғалысты түрлендіргіштерге бөлінеді.

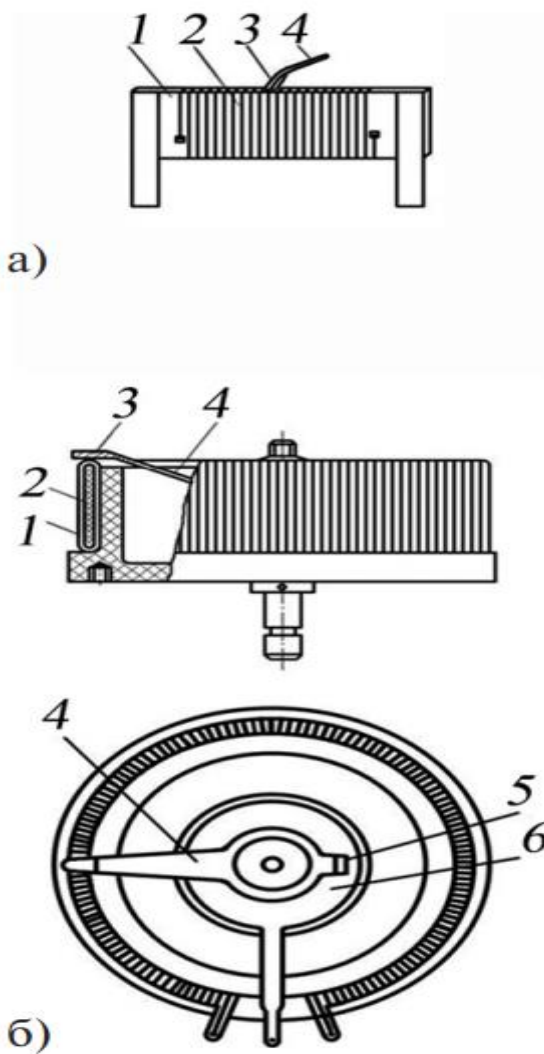
– Түзу сызықты жылжулы түрлендіргіштер (7.2-сурет, а) әдетте стерженьдік, түтікше немесе пластиналық каркастарда (1) жасалады, оларға белгілі бір қадаммен немесе бір-біріне тығыз оралған оқшауланған резистивті сым (2) орналастырылады. Жылжымалы элемент – контактілі щетка, ол контактіден (3) және контакті ұстағыштан (4) тұрады.

– Айналымды қозғалысты түрлендіргіштер бір айналымды және көп айналымды болуы мүмкін. Бір айналымды түрлендіргіштерде (7.2-сурет, б) сезімтал элемент сақиналы каркасқа (2) салынған орама (1) түрінде болады. Мұндай түрлендіргіштердің жылжымалы бөлігі – щеткодержательге (4) бекітілген ток жинау щеткасы (3). Ток жинау қозғалмайтын ток жинау сақинасы (6) бойымен сырғанайтын контактілі серіппе (5) арқылы жүзеге асырылады.

Реостаттық түрлендіргіштердің сым материалдарына бірқатар талаптар қойылады:

- жоғары меншікті электр кедергісі,
- төмен ТКС,
- уақыт өте келе сипаттамаларының тұрақтылығы,
- жоғары коррозияға төзімділік,
- созылуға беріктік.

Реостаттық түрлендіргіштерде манганинді, константанды сымдар кеңінен қолданылады. Ал жоғары температурада жұмыс істеуі тиіс түрлендіргіштер темір-хромды немесе никель-хромды қорытпалардан жасалады.



7.2-сурет. Реостаттық түрлендіргіштер

Әсіресе жауапты жағдайларда және жұмыстың ерекше жағдайларында құнды металдар негізіндегі қорытпалар қолданылады. Мысалы, реостатты түрлендіргішке жоғары тозуға төзімділік талаптары қойылған кезде, атап айтқанда,

платина-иридий қорытпасы (90% платина және 10% иридий) қолданылады.

Иридийдің платинаға қосылуы оның қаттылығын, тозуға төзімділігін және химиялық тұрақтылығын арттырады. Бұл қорытпаның меншікті кедергісі $\rho = 0,23 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, ал сымның диаметрі жеткілікті дәрежеде кіші болуы мүмкін (0,01 мм-ден бастап), бұл өте кішкентай габаритті жоғары кедергілі түрлендіргіштерді жасауға мүмкіндік береді.

Реостатты түрлендіргіштердің сипаттамаларының жоғары тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін каркастарға да белгілі талаптар қойылады. Олар кең температуралық диапазонда және жоғары ылғалдылық жағдайларында өлшемдерін сақтауы керек. Сонымен қатар, каркастардың жоғары жылу өткізгіштігі болуы керек, бұл түрлендіргіште таратылатын меншікті қуатты арттыруға мүмкіндік береді. Сондықтан дәл реостатты түрлендіргіштердің каркастары АМг, Д1, Д16 сияқты алюминий қорытпаларынан жасалады. Түрлендіру қателігі 1% және одан да көпке рұқсат етілетін түрлендіргіштерде олар изоляциялық материалдардан, мысалы, гетинакс, текстолит, шыны пластиктер және т.б. жасалуы мүмкін.

Контактілі щеткалардың конструкциясы түрлендіргіштің сапасын айтарлықтай дәрежеде анықтайды және, ең алдымен, щетка түрлендіргіш жолы бойымен қозғалған кезде пайда болатын контактiлiк шу деңгейiн анықтайды. Контактiлiк шум контактi аймағында пайда болады және контактiлiк кедергінің өзгеруіне байланысты, ол өз кезегінде контактiлiк ауданның және контактiлiк қысымның өзгеруіне, әсіресе жолда бөтен бөлшектер болған кезде байланысты. Контактiлiк шум уақыт өте келе тозу, ластану және жол мен щетканың тотығуы салдарынан өсуге бейім.

Дәл реостатты түрлендіргіштердің контактiлiк щеткалары диаметрі 0,1...0,2 мм болатын екі-үш сымшықтан (ұзындығы бір-бірінен сәл өзгешеленетін) тұрады, олар щетка

ұстағышына бекітілген. Контакттік сымшықтардың әртүрлі ұзындығы олардың механикалық тербелістерінің әртүрлі меншікті жиіліктерін қамтамасыз етеді, бұл түрлендіргіштің діріл жағдайында тұрақты жұмыс істеуіне ықпал етеді. Аз дәл түрлендіргіштерде щеткалар бір немесе екі кесуді қамтитын бір профильденген пластинадан тұратын пластина түрінде жасалады, бұл оның жеке шығыңқы бөліктерінің тербелістерінің әртүрлі меншікті жиіліктерін қамтамасыз етеді. Сымды щеткалар 0,003...0,005 Н контакттік күштерге, ал пластиналы щеткалар 0,05...0,1 Н күштерге есептелген. Щетканың контакттік бетінің ені сезгіш элементтің сым диаметрінің екі-үш есесіне тең болуы керек.

Щеткалар не таза металдардан (платина, күміс), не қорытпалардан (платина-иридий немесе платина-бериллий, фосфорлы қола, мыс-күміс қорытпалары және т.б.) жасалады. Щеткалар материалын таңдаған кезде, әсіресе тұрақты токта жұмыс істейтін түрлендіргіштер үшін, термоэлектрлік эффектін ескеруді ұмытпау керек.

Реостатты түрлендіргіштің $R_{\text{шығыс}} = f(x)$ түрлендіру функциясының түрі каркастың ұзындығы бойынша орау қадамының өзгеру сипатымен, немесе бірқалыпты орау қадамында каркастың профилімен (конструкцияны жеңілдету үшін әдетте каркастың сатылы пішініне жүгінеді), немесе орам учаскелерін сәйкес кедергілермен шунттау арқылы анықталады. Соңғы әдіс, яғни электрлік профильдеу әдісі, бірқатар артықшылықтарына байланысты (ең қарапайым және технологиялық сызықты реостат негізінде әртүрлі түрлендіру функцияларын алу мүмкіндігі, бастапқы сызықты түрлендіргіштің қателіктерін түзету мүмкіндігі және т.б.) ең кең таралған [4].

График бойынша эквивалентті кедергілердің m қатынастарын анықтап, оларды сызықты түрлендіргіштің сәйкес кедергі мәндеріне қатынасын тауып, эквивалентті кедергілердің нақты мәндерін анықтайды.

Реостатты түрлендіргіштің конструктивті есебі әдетте орау сымның диаметрі мен ұзындығын, сондай-ақ каркастың геометриялық өлшемдерін анықтауға келеді. Бастапқы деректер ретінде әдетте толық кедергі R_{Π} , орау ұзындығы l , орау сым материалы және оның меншікті электр кедергісі ρ , максималды қуат, өлшеу тогы, рұқсат етілген қателік мәні қарастырылады.

Реостатты түрлендіргіштерді есептеу әдістемесін, мысалы, [6] деректерінен табуға болады.

Реостатты түрлендіргіштердің қателік көздеріне шығыс кедергісінің дискреттілігі, орау сым диаметрінің және оның меншікті электр кедергісінің тұрақсыздығынан туындайтын түрлендіру функциясының есептік мәннен ауытқуы, түрлендіргіш температурасының өзгеруі, термодинамикалық және ток шуылдары, жүктеме кедергісінің әсері жатады.

Бірқалыпты оралған (сызықты) түрлендіргіштер үшін дискреттілік қателігі

$$\delta_{\text{дискр}} = \frac{\Delta R_{\min}}{2 R_{\Pi}} = \frac{1}{2\omega},$$

Мұнда $\Delta R_{\min}$ – түрлендіргіштің бір орамының кедергісі; R_{Π} , ω – түрлендіргіштің орамының толық кедергісі және орам саны.

Нақты сызықтық реостатты түрлендіргіштердің конструкциясында орам саны шамамен 2000-ға жуық, ал дискреттілік қатесі 0,02...0,03% құрайды. Түрлендіргіштің электрлік параметрлерінің тұрақсыздығынан туындайтын жиынтық қате 0,03...0,1% деңгейіне жетеді. Температуралық қате, бұл негізінен орам сымның кедергісінің температуралық коэффициентімен анықталады, әдетте 10°C-та 0,1%-дан аспайды.

Жүктеме кедергісінің әсерінен болатын әдістемелік қате жалпы жағдайда түрлендіргіш пен жүктеме кедергілерінің қатынасымен анықталады және әртүрлі өлшеуіш тізбектерде әркелкі көрінеді. Мысалы, егер сызықтық реостатты

түрлендіргіш кернеу бөлгіш ретінде қосылған болса (7.3-сурет, а), онда

$$\frac{U_{\text{блх}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_x / R_{\Pi}}{1 + R_x / R_{\text{н}}(1 - R_x / R_{\Pi})}.$$

Қосымша жүктемесіз түрлендіргіш үшін ($R_{\text{н}} = \infty$)

$$\frac{U'_{\text{блх}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_x}{R_{\Pi}},$$

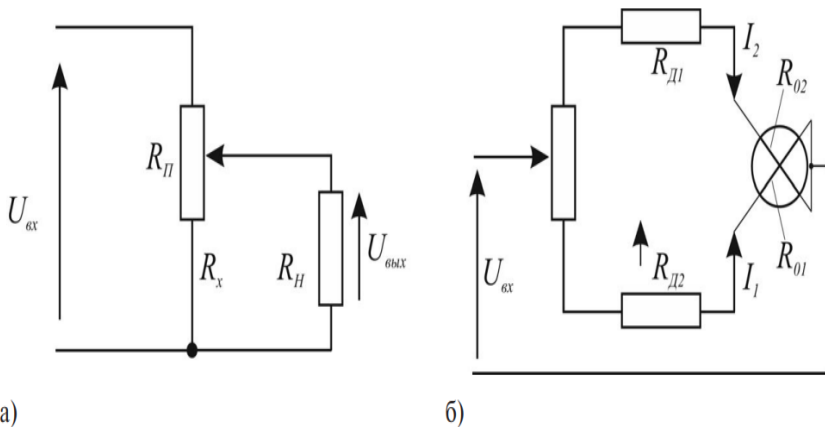
онда $U_{\text{шығ}}/U$ енг арақатынасының әдістемелік қателігі

$$\delta_U = \frac{U'_{\text{блх}} - U_{\text{блх}}}{U'_{\text{блх}}} = \frac{R_{\Pi}}{R_{\text{н}}} \left(\frac{R_x}{R_{\Pi}} - 1 \right) \frac{R_x}{R_{\Pi}}.$$

Бұл өрнектен реостатты түрлендіргіштің әдістемелік қатесі тек жүктеме кедергісі түрлендіргіштің толық кедергісінен он есе артық болған жағдайда ғана аз болатыны көрінеді.

Реостатты түрлендіргіштің ең көп таралған өлшеуіш тізбегі – логометрлік тізбек (7.3-сурет, б). Логометр параметрлері мен түрлендіргішке сәйкес келетін $R_{\text{д1}}$ және $R_{\text{д2}}$ реттегіш кедергілері анықталады. Логометрдың ток қатынасы ауқымын $I_2 I_1$, орамдарының R_{01} және R_{02} кедергілерін, сондай-ақ логометрдың тұрақты жұмыс істеуі үшін қажетті $I_{1\text{min}}$ және $I_{2\text{min}}$ минималды ток мәндерін біле отырып, $R_{\text{д1}}$ және $R_{\text{д2}}$ кедергілерін келесі теңдіктер арқылы анықтауға болады:

$$\left(\frac{I_1}{I_2} \right)_{\text{min}} = \frac{R_{\text{ä2}} + R_{02}}{R_{\Pi} + R_{\text{ä1}} + R_{01}},$$



7.3-сурет. Реостатты түрлендіргіштердің өлшеуіш тізбектері

$$\left(\frac{I_1}{I_2} \right)_{\max} = \frac{R_{\Pi} + R_{\text{ä}2} + R_{02}}{R_{\text{ä}1} + R_{01}}.$$

Қоректендіру кернеуі:

$$U > I_{1\min}(R_{01} + R_{\text{ä}1} + R_{\Pi}) \text{ и } U > I_{2\min}(R_{02} + R_{\text{ä}2} + R_{\Pi}).$$

Реостатты түрлендіргіштер сызықтық және бұрыштық ығысулар мен үдеулерді, сонымен қатар статикалық қысымдарды өлшеуге арналған датчиктерде қолданылады. Мұндай құрылғылардың кейбір конструкциялары [4] дереккөзінде келтірілген.

7.3. Тензорезисторлік датчиктер

Тензорезисторлардың жұмыс принципі тензоэффект құбылысына негізделген, яғни өткізгіш материалдың электр кедергісінің оның механикалық деформациясына байланысты өзгеруі.

Материалдың механикалық деформацияға сезімталдығының негізгі сипаттамасы – салыстырмалы тензосезімталдық коэффициенті k , ол өткізгіш кедергісінің салыстырмалы өзгерісінің оның ұзындығының салыстырмалы өзгерісіне қатынасы ретінде анықталады:

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}.$$

Өткізгіштің кедергісі оның материалдың меншікті электр кедергісі ρ , ұзындығы l және көлденең қимасының ауданы S_q шамаларына келесі тәуелділікпен байланысты:

$$R = \rho \frac{l}{S_q},$$

Бірқалыпты механикалық кернеу әсерінен өткізгіштің деформациясына байланысты кедергінің салыстырмалы өзгерісі мынаған тең болады:

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{d\sigma} = \frac{1}{l} \frac{dl}{d\sigma} - \frac{1}{S_q} \frac{dS_q}{d\sigma} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\sigma}.$$

Соңғы өрнектен шығатыны, σ кернеуінің шекті өзгеруінде кедергінің салыстырмалы өзгерісі:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S_q}{S_q} + \frac{\Delta \rho}{\rho}.$$

Қатты денелердің деформациясы кезінде олардың ұзындығының өзгеруі көлемнің өзгеруімен байланысты.

Серпімді деформация аймағында әрбір материал үшін көлемнің өзгеруі тұрақты шама болып табылады және Пуассон коэффициенті арқылы сипатталады:

$\mu = -\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_l}$, мұндағы $\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d}$ (d – дөңгелек қималы өткізгіштің диаметрі немесе шаршы қималы өткізгіштің көлденең өлшемі)

Осыны ескере отырып, $\frac{\Delta d}{d} = \frac{1}{2} \frac{\Delta S_q}{S_q} = -\mu \frac{\Delta l}{l}$, салыстырмалы тензосезімталдық коэффициентінің өрнегін аламыз:

$$k = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l}.$$

Кейбір металдар үшін электр кедергісінің меншікті мәні механикалық деформация әсерінен іс жүзінде өзгермейді, ал k коэффициенті үшін $k = 1 + 2\mu$ қабылдануы мүмкін. Металдар үшін Пуассон коэффициенті 0,24...0,4 аралығында болғандықтан, тензосезімталдық коэффициентінің мәні жиі шамамен 1,48...1,8 деп есептеледі. Жалпы жағдайда, өткізгіштің тензосезімталдық коэффициенті оның электр кедергісінің өзгеруіне байланысты құраушыны қамтиды және оң да, теріс те болуы мүмкін. Металдар үшін тензосезімталдық коэффициенті 0,5...4 аралығында болады.

Зерттелетін бөлшектегі механикалық кернеу σ осы бөлшектің материалының серпімділік модулі E -мен келесі қатынаспен байланысты:

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l}.$$

Сондықтан, тензорезистордың түрлендіру теңдеуін былай өрнектеуге болады:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{k\sigma}{E}.$$

Зерттелетін бөлшектің материалы да, тензорезистор сымдың материалы да серпімді деформация шегін аспайтын механикалық кернеуге ұшырауы тиіс. Әйтпесе, материалда қайтымсыз деформациялар пайда болады. Сондықтан рұқсат етілетін кернеу мәндері серпімділік шегінің 20...30%-ын аспауы керек.

Материалдың серпімді қасиеттер шегіндегі салыстырмалы деформация $\Delta l/l$ $2,5 \cdot 10^{-3}$ -тен аспайтындықтан және $k = 0,5 \dots 4$ болғанда, кедергінің салыстырмалы өзгерісі $\Delta R/R = (1,25 \dots 10) \cdot 10^{-3}$ болады, яғни 1%-дан аспайды. Осыған байланысты тензорезистор кедергісі уақыт бойынша жоғары тұрақтылыққа ие болуы керек және температуралық кедергі коэффициенті (ТКС) аз болуы тиіс.

Тензорезистор материалдарына қойылатын негізгі талаптар:

- мүмкіндігінше жоғары тензосезімталдық коэффициенті,

- жоғары меншікті электр кедергісі,

- сенсорлық элементтің сызықтық кеңею температуралық коэффициентінің зерттелетін объект материалының сызықтық кеңею коэффициентіне мүмкіндігінше жақын болуы.

Жартылай өткізгіш тензорезисторлардың тензосезімталдық коэффициенті негізінен меншікті электр кедергісінің өзгеруі арқылы анықталады.

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} \approx m = \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l}.$$

Жартылай өткізгіш тензорезисторлардың k коэффициенті өткізгіштерден айырмашылығы деформация дәрежесіне, температураға, меншікті электр кедергісіне және өткізгіштік типіне байланысты айтарлықтай өзгеріп, **150...200** мәндеріне жетеді. Сонымен қатар, **n-типті** жартылай

өткізгіштерде тензосезімталдық коэффициенті **теріс**, ал **p-типті** жартылай өткізгіштерде **оң** болады (7.2-кесте).

7.2-кесте. Тензосезімтал материалдардың негізгі сипаттамалары

Материал	Тензосезімдік коэффициенті k	Серпімділік модулі E , ГПа	$TKS, 10^{-6} 1/K10^{-6}\{6\} \backslash 1/K$	Сызықтық ұлғаю коэффициенті, $10^{-6} 1/K10^{-6}\{6\} \backslash 1/K$	Меншікті кедергі, мкОм·м	Термо-ЭҚК, мысқа қатысты, мкВ/К	Тензосезімдік ТК, $10^{-6} 1/K10^{-6}\{6\} \backslash 1/K$
Константан	1,9... 2,1	±15 0	±50	14...15	0,46 ...0,50	− 40	—
Нихром	2,1... 2,3	180	22	14	1,0	+22	—
Платинородий	5,1... 5,5	—	1700	9	0,97	—	—
Элинвар	0,7... 3,8	176	300	0,9	0,84	—	—
Германий (дендрит):							
– n-тип [111]	−150	155	1500	0,1...0,6	$2,5 \cdot 10^4$	—	3000
– p-тип [111]	+100	155	3000...8000	0,1...0,6	$2,5 \cdot 10^4$	—	5000
Кремний:							
– n-тип [100]	−130	190	6000	0...0,1	$0,35 \cdot 10^4$	—	3000
– p-тип [111]	+175	190	1300	0...0,1	$7,8 \cdot 10^4$	—	4000

Сұйық тензорезистивті материалдар үшін (сынап, электролиттер сияқты), көлемі деформация кезінде іс жүзінде өзгермейтіндер үшін тензосезімталдық коэффициенті $k = 2$ болады.

Шынында да, тұрақты көлем V жағдайында, кеңістік қимасы бойынша бірқалыпты өткізгіштің кедергісі R оның ұзындығының квадратына пропорционал болады:

$$R = \rho \frac{l}{S_q} = \rho \frac{l^2}{V}.$$

Көлемі тұрақты ($V = \text{const}$) және меншікті кедергісі өзгермейтін ($\rho = \text{const}$) жағдайда кедергінің өзгеруі:

$$\Delta R = \frac{\rho}{V} 2l\Delta l.$$

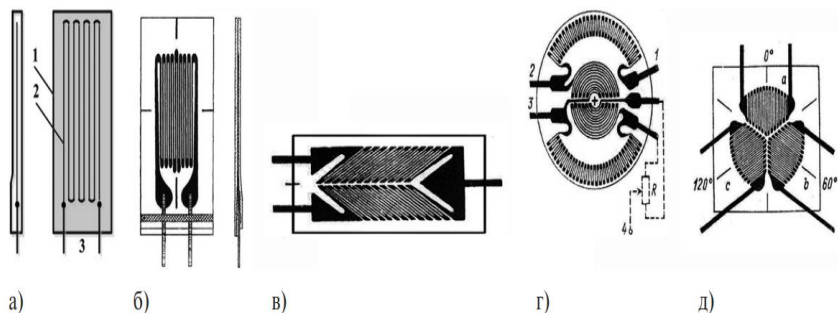
$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = 2.$$

Өлшемді түрлендіру тәжірибесінде тензоэсер екі бағытта қолданылады. Біріншісі – өткізгіш немесе жартылай өткізгіш кедергісінің көлемдік қысылу нәтижесінде өзгеруі. Мұндай түрлендіргіштің кіріс шамасы – оны қоршайтын газдың немесе сұйықтықтың қысымы. Осы принцип бойынша жоғары және аса жоғары қысымды өлшейтін датчиктер жасалады, олар әдетте манганин сымнан жасалған каркассыз орама түрінде болады. Ал төмен қысымды түрлендіргіштер ретінде германийлік немесе кремнийлік тензорезисторлар қолданылады.

Екінші бағыттың мәні – созылатын немесе қысылатын тензосезімтал материалдың тензоэсерін пайдалануға негізделген. Осы топтағы түрлендіргіштер желімделетін сымды, фольгалық немесе пленкалық, немесе бос (ілемкті) тензотүрлендіргіштер түрінде жасалуы мүмкін.

Сымды тензорезисторлар үшін материал ретінде көбінесе константан, нихром, элинвар, платинородий (7.2-кесте) қолданылады. Дегенмен, отандық тензометрияда ең кең тарағаны – диаметрі 0,025...0,035 мм арнайы константан микросымнан жасалған тензорезисторлар.

Желімделетін тензодатчиктердің ең көп тараған конструкциялары 7.4-суретте көрсетілген, ал кейбір тензорезистор түрлерінің сипаттамалары 7.3-кестеде берілген.



Сурет 7.4. Тензодатчиктердің кейбір түрлері

Жазық торлы датчик (7.4-сурет, а) жұқа қағаздан немесе лактық пленкадан жасалған 1 негізгі қабаттан тұрады. Оған тензосезімтал сымнан жасалған 2 жазық тор жабыстырылған. Сымның ұштарына 3 мыс сымды шығарулар дәнекерлеу немесе дәнекерсіз дәнекерлеу арқылы бекітілген. Датчик үстіне лак қабаты жағылады.

Мұндай датчиктердің өлшеу базасы (сымның алып жатқан ұзындығы) әдетте 3...20 мм аралығында болады, ал олардың кедергісі 20...500 Ом құрайды.

7.3-кесте. Тензорезисторлардың кейбір түрлерінің негізгі сипаттамалары

Тензорезистор түрі	Маркировкасы	База II, мм	Тензосезгімдік коэффициенті	Номиналды кедергі R _{0R} , Ом	Шекті деформация, %	Пайдалы жұмыс уақыты, сағ
Сымды бірэлементті	ПКБ-3-50	3...30	1,9...2,2	50...400	±0,3	0,5...2,5

ілімекті қағаз негізде						
	ПКБ-30–400					
	2ПКБ-5–502	5...20	1,9...2,2	50...400	±0,3	0,5
	К-2–200	2...30	1,9...2,2	20...200	±0,5	2,0
	К-30–200					
	Е428-005	3	1,9...2,2	65	±0,5	1,0
	Е428-012			130		
	Е428-025			200		
Бірэлементті ілімекті пленка негізде	ПКП5–100	5...20	1,9...2,2	100...400	±0,3	0,1...0,5
	ПКП–20400					
Көпэлементті ілімекті қағаз негізде	2ППКБ К–10–150	10...100	1,9...2,2	150...300	±1,0	0,5
	2ППКБ К–100–300					
Көпэлементті ілімекті пленка негізде	2ППКП –10–150	10...150	1,9...2,2	150	±1,0	0,5
	3ППКП –10–150					
	3ППКП –20–150					
Фольгалы бірэлементті тік торшалы	2ФКПА	1...20	2,0...2,2	50...200	—	0,5
	1ФКТК	5...15	2,0...2,2	100...400	—	0,5
	2ФКПД	5	2,0...2,2	50...200	—	0,5

Жарты- лайөткізгіш, негізсіз крем- нийлі	Ю–8А	1,4	+100	110; 162; 220	0,1	3...5
	Ю–8Б	1,4	+100	90; 138; 180	0,1	3...5
	Ю–12А	2,4; 6,4; 12,4	+100	110...7 50	0,1	3...5
	Ю–12Б	2,4; 4,4; 6,4	+100	90...61 0	0,1	3...5

Қысқа базалы (1...3 мм) тензодатчиктер алу үшін оларды қабатты жасап, тензосезімтал сымды қағаздық түтікше каркасқа орап жасайды. Оны желімдегеннен кейін жазып қысып, тақтайшаға жабыстырады.

Сымды тензорезисторлардың қателігі 0,1...0,2% дейін азайтылады.

Фольгалы тензотүрлендіргіштер (7.4-сурет, б) – бұл тақтайшаға жабыстырылған, 0,01...0,02 мм қалыңдықтағы фольгадан өңделген тензосезімтал торлар. Олар сымды тензодатчиктерге қарағанда бірқатар артықшылықтарға ие. Атап айтқанда, тензосезімді жолшықтың бетінің қимасына қатынасы үлкен болғандықтан, жылудың таралуы жақсарып, токтың тығыздығын айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді. Бірақ, егер тензотүрлендіргіш жабыстырылған бөлшектің жылусыйымдылығы өте төмен болса, бұл мүмкін емес. Кәдімгі фольгалы тензотүрлендіргіштердің кемшілігі – салыстырмалы түрде төмен кедергі (50 Ом-нан аспайды).

Соңғы жылдары пленкалы тензорезисторлар кеңінен қолданыла бастады. Оларды өндіру үдерісі тензосезімді материалды вакуумда буландырып, оны тақтайшаға конденсациялаудан тұрады. Пленкалы тензорезисторларды жасау үшін металл (мысалы, титан-алюминий қорытпасы) және жартылай өткізгіш (германий, кремний) материалдар

қолданылады. Фольгалы да, пленкалы тензо түрлендіргіштерді жасау кезінде олардың торларының кез келген суретін қарастыруға болады, бұл олардың маңызды артықшылығы болып табылады. Осының арқасында олар әртүрлі конфигурациядағы бөлшектердің механикалық кернеулерін зерттеу үшін қолданылады.

Мысалы, 7.4-суреттегі (в) тензотүрлендіргіш екі тензосезімді элементтен тұрады, олардың сезімтал осьтері 90° бұрышпен орналасқан. Олар біліктердің айналдыру моменттерінен туындаған деформацияларын өлшеу үшін қолданылады.

7.4-суретте, г-де төрт тензорезистордан тұратын көпірлік құрылым көрсетілген. Бұл құрылым өлшеу көпірінің төрт қанатын құрайды. Тензокөпір қатты мембранаға жабыстырылған. Мембранаға өлшенетін қысым әсер еткенде, орталықта орналасқан тензорезисторлар ұлғаю деформациясын, ал шеткілер сығылу деформациясын сезеді. 1 және 3 шығыстары көпірдің қуатталу кернеуін қосуға, ал 2 және 4 шығыстары өлшеу диагностикасы үшін арналған. R тендестіру резисторы өлшенетін қысым болмаған кезде көпірді алдын ала теңестіру үшін қолданылады.

Үш тензорезистордан тұратын розетка (7.4-сурет, д) жазық керілу күйіндегі бөлшектердің механикалық кернеулерін өлшеу кезінде қолданылады. Бұл жағдайда кернеулердің әсер ету бағыты мен мәндері осы үш тензорезистордың кедергісінің өзгеруі арқылы анықталады.

Қазіргі ғылым мен техниканың жоғары талаптары, атап айтқанда, тензорезисторлардың салыстырмалы түрде жоғары кедергі мәндері (> 6 кОм) қажеттілігі (4...20 мА унификацияланған шығыс сигналы бар түрлендіргіштермен үйлесімділік үшін) және өлшеуіштердің миниатюризациясы литография техникасының жаңа жетістіктері арқылы қол жеткізіледі.

Фотолитография әдісі арқылы механикалық серпімді элементтің (мембрананың) алдын ала оқшауланған бетіне

наносалынатын жұқа қабатты тензорезистивті түрлендіргіштер пайда болды. Жұқа қабатты тензорезисторлар фольгалықтармен салыстырғанда айтарлықтай артықшылықтарға ие – олар жабыстырылған мембрананың қасиеттерін әлдеқайда аз өзгертеді, нәтижесінде өте жұқа мембраналарды пайдалануға және төмен қысымды (5 бардан аз) түрлендіргіштер жасауға мүмкіндік береді.

Жұқа қабатты тензорезисторлық түрлендіргіштер үшін металдар (хром-кремний, хром-никель, платина-иридий) пайдаланылады, ал оқшаулағыш материалдар ретінде кремний диоксиді немесе алюминий диоксиді қолданылады.

Жұқа қабатты тензорезистивті түрлендіргіштердің негізгі кемшілігі – оларды өндірудің салыстырмалы түрде жоғары құны.

7.4. Жартылай өткізгіштер тензодатчиктері

Жартылайөткізгіштер монокристалды тензорезисторлар негізінен кубтық кристалдық торы бар германий мен кремнийден жасалады. Мұндай торда Миллер индекстері арқылы белгіленетін үш кристаллографиялық бағытты ажыратады. [111] индекспен белгіленген бағыт кубтың диагоналымен, [110] – жақ диагоналымен, [100] – қырымен сәйкес келеді. Жартылайөткізгіш тензорезистордың тензосезімталдығы оның сезімтал элементінің кристаллографиялық бағыттарға қатысты орналасуына байланысты болады.

Сериялық жартылайөткізгіш тензорезисторлар үшін негізінен [111] р-тіпі кремний (меншікті кедергісі $\rho_0=0,02...0,04 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) және [100] n-тіпі кремний (меншікті кедергісі $\rho_0=0,02...0,03 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) қолданылады. Мұндай тензорезисторлардың орташа түрлендіру функциясы (қарсылықтың салыстырмалы өзгерісі $\Delta R/R$ -дің салыстырмалы деформация ε -ға тәуелділігі) келесідей болады:

$$\frac{\Delta R}{R} = 120\varepsilon + 4000\varepsilon^2$$

$$[111], \rho_0 = 0,02 \text{ Ом} \cdot \text{см и}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = 110\varepsilon + 10000\varepsilon^2$$

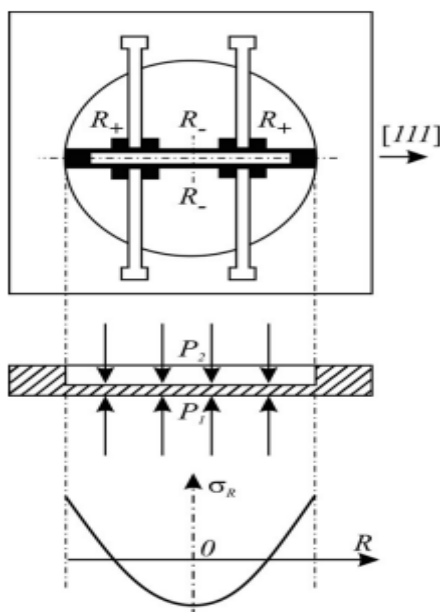
n-типі [100] кремнийден жасалған тензорезисторлар үшін, меншікті кедергісі $\rho_0=0,03 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Қазіргі замандық жартылай өткізгіш тензометрияның бірнеше бағыттары бар. Олардың бірі жеке жабыстырылатын тензорезисторларды дамытумен байланысты, олар сымды тензорезисторлардың функционалды аналогы болып табылады. Бұл, атап айтқанда, Ю-8 және Ю-12 тензорезисторлары. Конструкциялық тұрғыдан олар максималды тензоэффектісі бар кристаллографиялық бағыттағы кремнийдің «гантель» тәрізді пластинасы ретінде жасалған. Мұндай элементтердің тензосезімталдық коэффициенті $25 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ температурада салыстырмалы деформация $0,1\%$ дейін болғанда $90...130$ шегінде болады, базалық ұзындығы $5...7 \text{ мм}$, номиналды электр кедергісі $100...200 \text{ Ом}$.

Мұндай тензотүрлендіргіштердің артықшылықтарына жоғары сезімталдық, әлсіз өлшемі, арзан бағасы (сериялық өндірісте), тензорезистивтік құрылымдарға біріктіру мүмкіндігі жатады. Дегенмен, олардың кемшіліктері де бар: орнатудың қиындығы, шағын партияларды өндіруде салыстырмалы түрде төмен рентабельділік, температураға байланысты салыстырмалы тензосезімталдық коэффициентінің айтарлықтай тәуелділігі, дірілге және қысымның секірмелі өзгерісіне («қысым соққысына») сезімталдық, түрлендіру функциясының сызықсыздығы, сипаттамалардың айтарлықтай шашыраңқылығы. Жеке жартылай өткізгіш тензорезисторлардың қателігі $0,5...1,0\%$ құрайды.

Екінші бағыт қатты дене физикасы мен жартылай өткізгіш технологиясының жетістіктеріне [10, 11] негізделген және интегралды тензомодульдерді [1-3, 8, 9] жасауды көздейді. Мұндай тензотүрлендіргіштерде (7.5-сурет) серпімді элемент (мембрана) кристаллды жартылай өткізгіштен (әдетте кремний) жасалады, оған диффузия әдісімен мосттық интегралды тензосезімтал схема қалыптастырылады.

Мұнда тензорезистор мен серпімді элемент біртұтас болып табылады. Демек, жабыстырылатын сымды тензорезисторлардан айырмашылығы, мұнда серпімді элемент пен тензорезистор арасында қосымша қателердің себебі болып табылатын желім сияқты аралық зат жоқ. Сезімтал элементтің серпімді элементтен оқшаулануы р-п-переход арқылы жүзеге асырылады.



7.5-сурет. Мембраналық типтегі интегралды тензомодуль

Мұндай түрлендіргіштердің габариттік өлшемдері 2...6 мм құрайды, ал тензорезистордың қалыңдығы 20...25 мкм

аралығында болады. Мосттық тензоқұрылымдарға негізделген датчиктер салыстырмалы түрде жоғары дәлдікке ие. Олардың қателігі 0,1...0,2% деңгейіне дейін азайтылуы мүмкін.

Әдебиеттер тізімі

1. Байцар Р.И., Варшава С.С. Полупроводниковые микросенсоры. – Львов: Вид. ЛьЦНТЕИ. – 2001. – С. 288. (На укр. яз.).
2. Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – С.36.
3. Курмашев Ш.Д., Сидорец Р.Г., Шенкевич А.Л. Датчики давления на основе поверхностно-барьерных структур: Тезисы докладов Украинской научн. конф. по физике полупроводников. – Т. 1. Одесса, – 2002. – С. 122.
4. Осадчий Е.П., Тихонов В.И. и др. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. – С. 480.
5. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи. – Киев: Вища школа, 1981. – С. 296.
6. Полищук Е.С. и др. Средства и методы измерений неэлектрических величин: Учебник. – Львов: Бескид Бит, 2008. – С. 618. (На укр. яз).
7. Ренский А.Б., Баранов Д.С., Макаров Р.А. Тензометрирование строительных конструкций и материалов. – М.: Строиздат, 1977. – С. 239.
8. Schaumburg H. Sensoren. Band 3. B.G. Teubner Stuttgart: 1992.
9. Schaumburg H. (Hrsg.) Sensoranwendungen. Band 8. B.G. Teubner Stuttgart: 1995.
10. Шарапов В.М. и др. Технологии приборостроения. – Черкассы: Брама. – 2009. – С. 320.

8-ТАРАУ. СЫЙЫМДЫЛЫҚ ДАТЧИКТЕРІ

8.1. Жалпы мәліметтер

Кез келген пішіндегі конденсатордың сыйымдылығы ССС оның конструкциялық параметрлері мен электр өрісі әсер ететін кеңістікті толтыратын ортаның қасиеттеріне байланысты болады.

Атап айтқанда, параллель жазық электродтары бар идеалдандырылған конденсатор үлгісі үшін:

$$C = \frac{\varepsilon_c S}{\delta} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{\delta}, \quad (8.1)$$

мұндағы $\varepsilon C = \varepsilon \varepsilon_0$ – ортаның абсолютті диэлектрлік өтімділігі;

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}$ – вакуумның диэлектрлік өтімділігі;

ε – ортаның салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі;

S – электродтардың ауданы;

δ – электродтар арасындағы қашықтық.

Осы функционалдық тәуелділік орын ауыстыруларды өлшейтін сыйымдылық түрлендіргіштерінің жұмыс істеу принципінің негізі болып табылады. Бұл түрлендіргіштер ССС немесе δ -ға тікелей әсер ету арқылы, сондай-ақ ε арқылы ортаның диэлектрлік қасиеттеріне әсер ету арқылы жұмыс істейді. Аралық түрлендіргіштерді, атап айтқанда, механикалық серпімді түрлендіргіштерді – статикалық күштерді, қысымды, үдеуді және т.б. сызықтық немесе бұрыштық орын ауыстыруларға түрлендіретін құрылғыларды – қолдану конденсаторлық датчиктердің қолдану аясын едәуір кеңейтеді (динамометрлер, манометрлер, виброметрлер, акселерометрлер және т.б.).

ε арқылы әсер ету деңгей өлшегіштерде, құрам анализаторларында және, атап айтқанда, ылғалдылықты өлшейтін құрылғыларда (17-тарауды

қараңыз), сондай-ақ басқа да өлшеу түрлендіргіштерінде қолданылады.

Сыйымдылықты өлшеу түрлендіргіші кейде бір ғана потенциалды электродпен сипатталады, екінші электрод шексіз алыста орналасқан деп есептеледі. Идеал жағдайда, егер потенциалды электрод радиусы r болатын сфера түрінде болса, онда мұндай конденсатордың сыйымдылығы келесі өрнекпен анықталады:

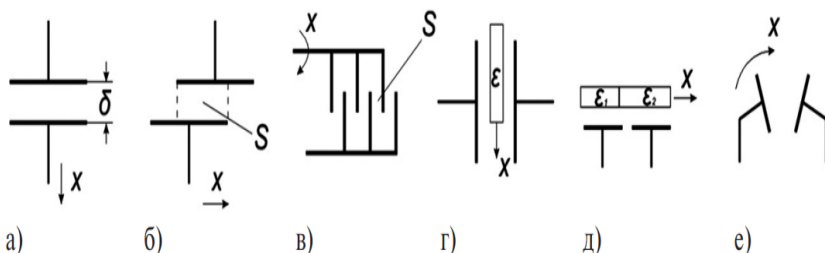
$$C = 4\pi\epsilon_c r. \quad (8.2)$$

Сыйымдылық түрлендіргіштердің конструкциялық түрлері өте көп болғанына қарамастан, оларды үш негізгі топқа біріктіруге болады: – жазық электродтары бар датчиктер (8.1-сурет); – коаксиалды электродтары бар датчиктер (8.2 а, б-суреттер); – еркін пішінді электродтары бар датчиктер (8.2 в-сурет).

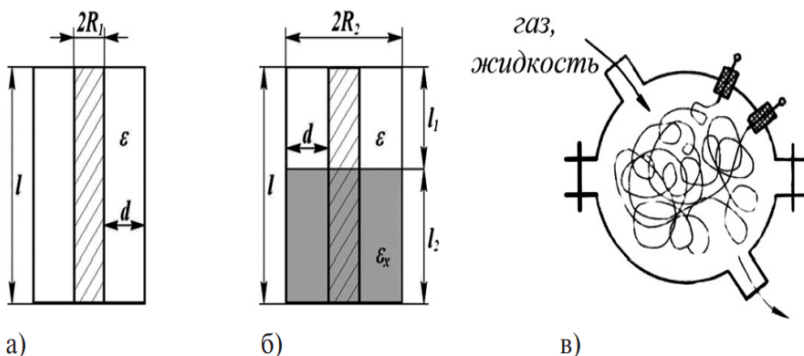
8.1-сурет жазық электродтары бар сыйымдылық түрлендіргіштерінің құрылу принципі түсіндіреді:

а) және е) – электродтар арасындағы қашықтық өзгеретін түрлендіргіштер;

б) және в) – электродтардың қабаттасу ауданы өзгеретін түрлендіргіштер; г) және д) – электродтар арасындағы диэлектрлік өтімділік өзгеретін түрлендіргіштер.



8.1-сурет. Жазық электродтары бар сыйымдылық датчиктердің жұмыс істеу принципі



8.2-сурет. Сыйымдылық түрлендіргіштер:
 а) және б) – коаксиалды электродтары бар; в) – еркін пішінді электродтары бар

Коаксиалды түрлендіргіш үшін (8.2-сурет, а, б) сыйымдылықты анықтайтын сәйкес өрнектер келесі түрде болады:

$$C_a = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln(1 + d / R_1)} \text{ и } C_\delta = \frac{2\pi\epsilon_0 (\epsilon l_1 + \epsilon_x l_2)}{\ln(1 + d / R_1)}, \quad (8.3)$$

мұндағы:

1 – электродтың толық ұзындығы,

l₁ – электродтардың ауада немесе салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі $\epsilon_{\text{вак}} \epsilon_0$ болатын басқа газ тәріздес ортада орналасқан бөлігі,

l₂ – электродтардың зерттелетін ортада салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі ϵ_2 болатын бөлігінің ұзындығы,

d – электродтар арасындағы қашықтық,

R₁ – ішкі электродтың радиусы.

Еркін пішінді электродтары бар сыйымдылық датчиктердің конструкциялары алуан түрлі болуы мүмкін: сақиналы, сферикалық, конус тәріздес және т.б. Мұндай әртүрлілік нақты өлшеу жағдайларының ерекшелігіне байланысты туындайды. Атап айтқанда, 8.2-сурет, в-де сұйықтықтар немесе газдардың диэлектрлік қасиеттерін өлшейтін датчиктің ықтимал нұсқасы көрсетілген [16].

Мұндай датчиктің электродтары ретінде екі икемді сым (біржіпті немесе көпжіпті) қолданылады. Олардың кемінде біреуі оқшаулағышпен қапталған болуы тиіс. Сымдар шоғыр ретінде жинақталып, қажет формаға (сфера, тор, цилиндр және т.б.) сай еркін түрде иіліп, пішінделеді. Бұл шоғырды толықтай нығыздауға болмайды, яғни сым электродтардың арасында зерттелетін ортамен толтырылатын, ұзындығы бойымен ретсіз таралған саңылаулар қалдырылуы қажет.

Әрбір сым бір немесе екі шетімен датчиктің клеммаларына жалғанады, ал бұл клеммалар сыйымдылықты өлшейтін құрылғыға қосылады. Сымдардың ұзындығын және оларды нығыздау деңгейін өзгерте отырып, датчиктің бастапқы сыйымдылығын кең диапазонда өзгертуге болады. Бұл жағдайда өткізгіштердің «паразиттік» сыйымдылығы пайдалы, яғни жұмысшы сыйымдылыққа айналады және 1 см³ үшін 200-300 пФ-қа дейінгі жоғары меншікті көрсеткішке жетеді.

Аталған датчик газ-сұйықтық, сұйықтық-сұйықтық секілді екі ортаның шекарасын нақты анықтау үшін дискретті деңгей бақылау жүйелерінде де қолданылуы мүмкін. Еркін пішінді конденсаторлардың сыйымдылығын есептеуді жеңілдету үшін **ELCUT** бағдарламалық кешенін пайдалануға болады. Оның жеңілдетілген нұсқасы www.elcut.ru сайтында орналасқан.

Келесі қадам – сыйымдылық датчиктің қандай да бір кіріс шамасына сезімталдығын анықтау [11].

Өйткені жазық конденсатор үшін:

$$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{S_{\Pi}}{\delta} = \epsilon_c \frac{S_{\Pi}}{\delta}, \text{ то}$$

$$dC = \frac{\partial C}{\partial \epsilon_c} d\epsilon_c + \frac{\partial C}{\partial S_{\Pi}} dS_{\Pi} + \frac{\partial C}{\partial \delta} d\delta \quad (8.4)$$

Немесе, шекті өсулерге көшсек, келесі өрнекті аламыз:

$$\Delta C = \frac{S_0}{\delta_0} \Delta \varepsilon_c + \frac{\varepsilon_{c0}}{\delta_0} \Delta S - \frac{\varepsilon_{c0} S_0}{(\delta_0 + \Delta \delta)^2} \Delta \delta \quad (8.5)$$

және сәйкесінше, сыйымдылықтың салыстырмалы өзгерісі мына түрде жазылады:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta \varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} + \frac{\Delta S}{S_0} - \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0}\right)^2} \frac{\Delta \delta}{\delta_0}, \quad (8.6)$$

ε_{c0} , S_0 , δ_0 – бастапқы мәндер (кіру әсері жоқ кезде) диэлектрлік өтімділік, белсенді алаң және электродтар арасындағы қашықтық; C_0 – түрлендіргіштің бастапқы сыйымдылығы.

Осындай түрлендіргіштің салыстырмалы сезімталдығы, $\varepsilon_c = \text{const}$ және $S_{\Pi} = \text{const}$ жағдайында сыйымдылықтың салыстырмалы өзгерісінің загордың салыстырмалы өзгерісіне қатынасы ретінде анықталады.

$$S_{\delta} = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta \delta / \delta_0} = - \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0}\right)^2}, \quad (8.7)$$

Салыстырмалы сезімталдық, $\varepsilon_c = \text{const}$ және $S_{\Pi} = \text{const}$ жағдайында сыйымдылықтың салыстырмалы өзгерісінің диэлектрлік өтімділіктің салыстырмалы өзгерісіне қатынасы ретінде анықталады.

$$S_{\varepsilon} = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta \varepsilon_c / \varepsilon_{c0}} = 1.$$

Өйткені сыйымдылықтың кедергі $X_c = \frac{1}{\omega C}$, егер $\omega = \text{const}$ болса

$$dX_c = \frac{\partial X_c}{\partial \varepsilon_c} d\varepsilon_c + \frac{\partial X_c}{\partial S_{\Pi}} dS_{\Pi} + \frac{\partial X_c}{\partial \delta} d\delta.$$

Осыдан, соңғы өсу мәндеріне $\Delta \epsilon_c$, ΔSP және $\Delta \delta$ өтей отырып, салыстырмалы сезімталдықтардың сәйкес өрнектерін аламыз:

$$S'_\delta = \frac{\Delta X_c / X_{c0}}{\Delta \delta / \delta_0} = 1; \quad (8.9)$$

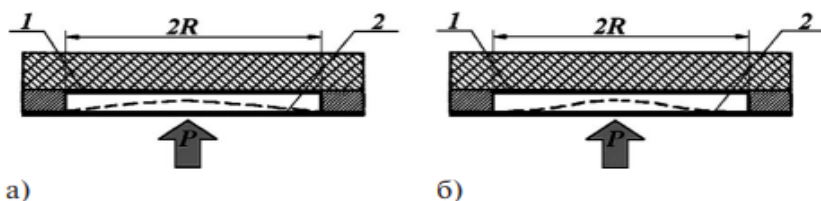
$$S'_\epsilon = \frac{\Delta X_c / X_{c0}}{\Delta \epsilon_c / \epsilon_{c0}} = -\frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta \epsilon_c}{\epsilon_{c0}}\right)^2}; \quad (8.10)$$

$$S'_s = \frac{\Delta X_c / X_{c0}}{\Delta S / S_0} = -\frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta S}{S_0}\right)^2}. \quad (8.11)$$

Келтірілген өрнектерден, түрлендіргіштің сыйымдылығының салыстырмалы өзгерісі алаңның немесе диэлектрлік өтімділіктің өзгерісінің сызықты функциясы және зазордың өзгерісінің сызықсыз функциясы екені анықталады. Реактивті кедергінің салыстырмалы өзгерісі зазордың салыстырмалы өзгерісіне пропорционалды және алаң S мен диэлектрлік өтімділіктің ϵ салыстырмалы өзгерісінің сызықсыз функциясы болып табылады. Сызықсыз түрлендіру функциясы бар бірлік сенсорлар үшін түрлендіру функциясын іс жүзінде сызықты деп санауға болатын жағдайда сәйкес кіріс параметрінің салыстырмалы өзгерісі 10-15%-дан аспауы керек. Кіріс шамасының үлкен салыстырмалы өзгерістері (шамамен 40%-ға дейін) үшін дифференциалды сенсорларды қолдану қажет [11].

8.2. Сыйымдылықты қысым сенсорлары

Сыйымдылықты қысым сенсорларының сезімтал элементтері мембрана мен диафрагмалар болып табылады, олар өлшенетін қысымды орын ауыстыруға түрлендіреді. Сонымен қатар олар сыйымдылықты сенсордың қозғалатын электроды ретінде бір уақытта қолданылуы мүмкін. Сыйымдылықты қысым сенсорының (тұрақты жазық электрод 1 және қозғалмалы электрод 2 түрінде эластикалық мембрана, сурет 8.3, а) сыйымдылықтың салыстырмалы өзгерісі мен өлшенетін қысым P арасындағы қатынасты осындай пайымдауларға негізделе отырып анықтауға болады.



Сурет 8.3. Сыйымдылықты қысым сенсорларының сезімтал элементтері

Өлшенетін қысым болмаған жағдайда, осындай сенсордың бастапқы сыйымдылығы тең болады

$$C_0 = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\pi R^2}{\delta}. \quad (8.12)$$

Тенгерілген қысымның әсерінен эластикалық мембрана сфералық пішінді қабылдайды, бұл электродтар арасындағы қашықтықтың азаюы нәтижесінде сыйымдылықтың өсуіне әкеледі, ол келесі мөлшерде болады

$$\Delta C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \pi R^4}{8 \delta^2 W} P, \quad (8.13)$$

Ал сыйымдылықтың салыстырмалы өзгерісі келесідей болады:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{R^2}{8\delta W} P, \quad (8.14)$$

Мұнда R – мембрананың радиусы; W – оның қаттылығы; δ – өлшенетін қысым болмаған кезде мембрана мен тұрақты электрод арасындағы қашықтық.

Осылайша, эластикалық мембранасы бар сыйымдылықты қысым сенсорларының сезімталдығы оның кішігірім қисайуларында қолданылатын қысымға пропорционалды болады. Алынған нәтиже тек статикалық ауытқулар үшін жарамды екенін атап өткен жөн, себебі мембрана мен тұрақты электрод арасындағы жұқа ауа қабатының демпфирлеуші әсерін елемеуге болады. Бұл ауа жастығы қаттылықты айтарлықтай арттырып, динамикалық қысымдарға сезімталдықты төмендетеді. Ауа қабатының демпфирлеуші әсерін елемеуге болатын өте кіші мәнге дейін төмендету үшін тұрақты электродты перфорациялау қажет [12, 20].

Егер қысым сенсорының сезімтал элементі ретінде эластикалық емес, қатты мембрана қолданылса (сурет 8.3, б), онда түрлендіру теңдеуі осы жағдайда біршама өзгеше болады:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{1}{16} \frac{(1 - \mu^2) R^4}{E \delta h^3} P, \quad (8.15)$$

Мұнда E – мембрана материалының серпімділік модулі; h – оның қалыңдығы; μ – Пуассон коэффициенті.

Осылайша, қатты мембранасы бар сыйымдылықты қысым сенсорларының сезімталдығы оның кішігірім қисайуларында да қысымға пропорционалды болады және мембрананың өлшемдеріне қатты тәуелді (нақтырақ айтқанда, радиустың төртінші дәрежесіне пропорционалды және мембрананың қалыңдығының кубына кері пропорционалды).

Сыйымдылықты датчиктерді жобалау кезінде материалдарды таңдауға ерекше назар аудару қажет. Температуралық қателікті барынша азайту үшін сыйымдылықты сезімтал элементтің бөлшектері сызықтық ұлғаю коэффициенттері өте аз және бір-біріне мүмкіндігінше жақын материалдардан жасалуы тиіс. Мысалы, серпімді элементтерді дайындау үшін жоғары серпімді қасиеттерімен, температураға тәуелді серпімділік модулінің тұрақтылығымен және коррозияға төзімділігімен ерекшеленетін 55 БТЮ дисперсиялық-қатайтылатын магнитсіз қорытпасын қолдануға болады. Ал оқшаулағыш тіректерге ЛК6 маркалы оптикалық шыны ұсынылады.

Сыйымдылықты датчик сымдарының электростатикалық экрандалуы да аса маңызды. Экрандаусыз бос орындар қалмауы үшін бұл процедура мұқият орындалуы тиіс. Осы себепті кабельдің белгілі бір бөлігі әдетте датчиктің ажырамас бөлігі ретінде жасалады.

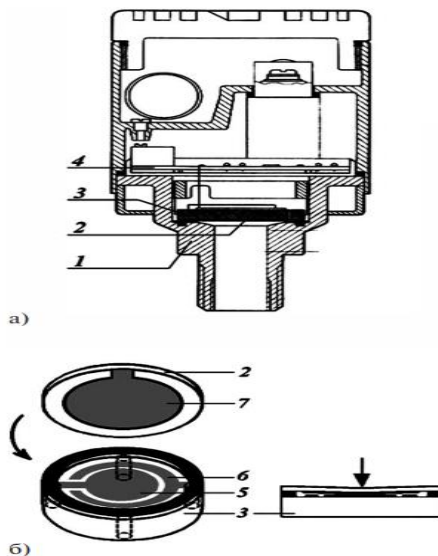
Сыйымдылықты түрлендіргіштер әдетте 200...800 Па диапазонында қысымды өлшеуге арналған, олардың сезімталдығы 0,5...1,0 пФ/Па, ал бастапқы сыйымдылығы 10...20 пФ шамасында болады. Негізгі өлшеу қателігі – 1...2%.

Қазіргі заманғы материалдар, соның ішінде металлкерамика және жаңа технологиялар, бір корпуста бастапқы өлшеу түрлендіргішін (сезімтал элементті) және екінші реттік өлшеу схемасын біріктіре отырып, жоғары дәлдіктегі сыйымдылықты қысым түрлендіргіштерін жасауға мүмкіндік береді.

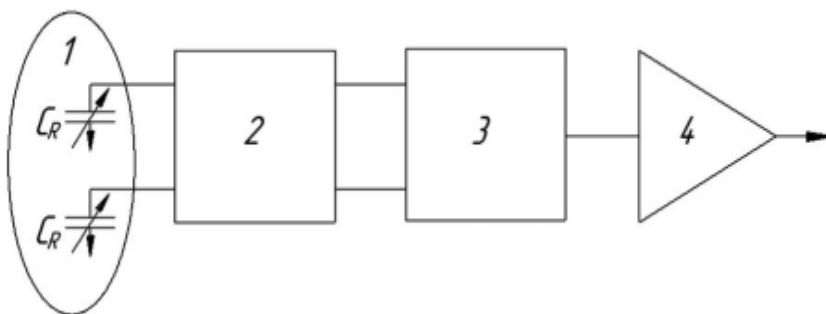
Мысал ретінде 8.4-суретте керамикалық барометр деп аталатын CERABAR сыйымдылықты дифференциалды қысым датчигінің және оның сезімтал элементі – сыйымдылықты бастапқы датчиктің құрылысы көрсетілген [13, 22].

8.5-суретте CERABAR қысым датчигінің құрылымдық схемасы келтірілген [22].

8.4-суреттегі (а) 1-корпуста сезімтал элемент – өлшеу датчигі орнатылып, герметикалық түрде тығыздалған. Ол сезімтал элемент корпусына арналған негізден (3) және мембранадан (2) тұрады. Бастапқы түрлендіргіштің шығысы 4-платформада біріктірілген екінші реттік электронды түрлендіргішпен электрлік түрде қосылған



8.4-сурет. CERABAR типті қысым датчигінің құрылысы



8.5-сурет. CERABAR қысым датчигінің құрылымдық схемасы: 1 – датчик; 2 – осциллятор; 3 – фазаға сезімтал детектор; 4 – күшейткіш

Сезімтал элемент корпусының негізі мен мембрана алюминий-оксидті (Al_2O_3) керамикадан жасалған. Корпус негізінің үстіңгі бетіне алтынмен металдандыру (бұрку) арқылы өлшеу электроды (5) мен компенсациялық электрод (6) орнатылады, ал мембрананың ішкі бетіне – мембраналық электрод (7) орнатылады (8.4-сурет, б). Мембрана корпусының негізімен қажетті электродаралық қашықтықты сақтай отырып тығыз біріктірілген.

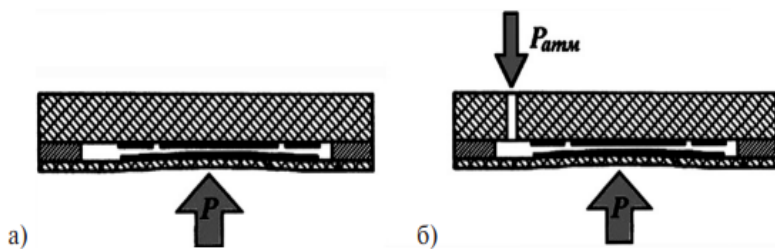
Өлшенетін қысымның мембранаға әсері нәтижесінде ол майысады, бұл алғашқы түрлендіргіштің сыйымдылығын өзгертеді. Бұл бастапқы түрлендіргіш солай жасалған, ол қысым өзгергенде мембраналық электрод пен өлшеу электродтары арасындағы C_p сыйымдылығы артса, мембраналық пен компенсациялық электродтар арасындағы C_k сыйымдылығы тиісінше азаяды. Яғни, $C_p + \Delta C_p$ болғанда $C_k - \Delta C_k$ болады.

Компенсациялық электродтың болуы C_p мен C_k -ны дифференциалды қосу арқылы қоршаған ортаның өлшеу нәтижелеріне әсерін жоюға мүмкіндік береді. Бұл, мысалы, температура өзгеруі салдарынан геометриялық өлшемдердің аз да болса өзгеруі, ортаның салыстырмалы диэлектрлік өтімділігінің өзгеруі сияқты факторларды болдырмайды.

CERABAR типті датчиктер екі түрінде шығарылады:

- абсолютті қысым датчиктері (8.6-сурет, а)
- салыстырмалы қысым датчиктері (8.6-сурет, б)

Олардың құрылымдық айырмашылығы шамалы. Салыстырмалы қысым датчигінің корпус негізінде атмосферамен байланысатын тесігі бар, ол электродаралық камерада атмосфералық қысымды қамтамасыз етеді. Абсолютті қысым датчиктерінде мұндай тесік болмайды, ал электродаралық кеңістікте вакуум жасалады.

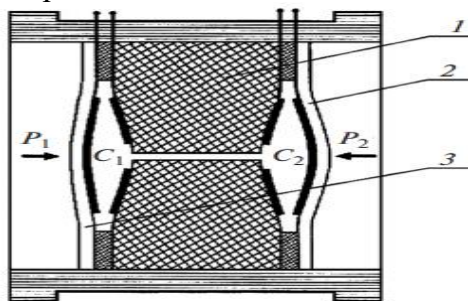


8.6-сурет. Абсолюттік және салыстырмалы қысым датчиктерінің жұмыс принципі

Бұл түрлендіргіштердің өлшенетін қысымның номиналды мәндері 40 миллибардан (4 кПа) 10 барға (1 МПа) дейінгі аралықта орналасқан. Түрлендірудің қателігі өлшеу ауқымының 0,1%-нан аспайды, уақыт бойынша тұрақсыздығы жылына 0,01%-дан жоғары емес, түрлендіру функциясының сызықсыздығы $< 0,2\%$, ал температуралық қателігі $< 0,15\% / 10 \text{ K}$. Жұмыс температурасының диапазоны $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ -тан $+130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ -қа дейін.

Сезімтал элементтің өлшемдері барлық өлшеу диапазондары үшін бірдей: корпус диаметрі – 32 мм, қалыңдығы – 5,1 мм.

Тек өлшеу диапазонына байланысты мембрананың қалыңдығы өзгереді – 0,03 мм-ден 3 мм-ге дейін [18, 20].



8.7-сурет. DELTABAR датчигінің сезімтал элементі

8.7-суретте DELTABAR қысым айырмасын өлшеуге арналған датчиктің сезімтал элементінің құрылысы

көрсетілген [21, 22]. Сезімтал элементтің керамикалық негізіне (1) екі жұқа керамикалық мембрана (2 және 3) шынымен күйдіру әдісі арқылы мықтап бекітілген. Керамикалық негіздің бетіне және бір-біріне қарама-қарсы орналасқан мембраналардың ішкі беттеріне алтынмен металдандыру арқылы электродтар жағылады, олар конденсаторлар C_1 және C_2 -ні құрайды.

Негіз бен мембраналар арасындағы кеңістік силикон майымен аздап қысымда толтырылып, негіздегі арнайы тесіктер арқылы гидравликалық түрде байланысқан.

Өлшенетін қысым айырмасы $\Delta P = P_1 - P_2$ мембраналарға әсер еткенде, конденсаторлардың C_1 және C_2 сыйымдылықтары өзгереді: жоғары қысым жағында сыйымдылық артады, ал төмен қысым жағында – азаяды.

C_1 мен C_2 сыйымдылықтарының айырмасы өлшенетін қысым айырмасының $\Delta P = P_1 - P_2$ шамасын білдіреді. DELTABAR датчиктерінің өлшеу тізбектері CERABAR типті дифференциалды қысым датчиктерінің өлшеу тізбектеріне ұқсас.

DELTABAR датчиктерінің негізгі техникалық сипаттамалары:

- Өлшенетін қысым айырмасының номиналды мәндері: 25 миллибар (2,5 кПа)-дан 3 бар (0,3 МПа)-ға дейін.
- Түрлендіру дәлдігі: 0,1%-дан артық емес.
- Түрлендіру функциясының сызықсыздығы: $< 0,1\%$.
- Температуралық қателігі: $< 0,1\% / 10K$.
- Жұмыс температурасының диапазоны: $- 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -тан $+80^{\circ}\text{C}$ -қа дейін.

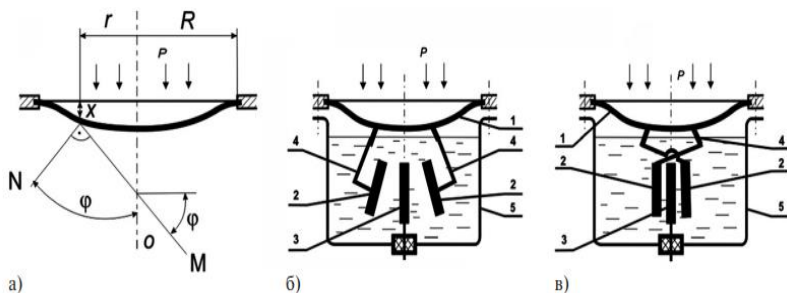
Серіппелі элемент ретінде контуры бойымен қатты бекітілген тұрақты қималы дөңгелек мембрана қолданылатын сыйымдылықты қысым датчиктерінің сезімталдығын арттыру үшін, мембрананың майысу шамасын емес, оның бетіне қатысты елестетілген нормаль сызығының оське қатысты көлбеу бұрышын аралық физикалық шама ретінде қолдануға болады.

[1] еңбекте көрсетілгендей, дөңгелек пластинаның (8.8-сурет, а) элементі x нүктесінің ығысуы қысым P әсерінен келесі өрнекпен анықталады:

$$x = \frac{P(R^2 - r^2)^2}{64D}, \quad (8.16)$$

мұндағы R – мембрананың радиусы; r – пластина элементінің осьтен арақашықтығы; D – цилиндрлік қаттылық.

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)}.$$



8.8-сурет. Сыйымдылықты қысым датчиктері:

а – қысым P әсерінен дөңгелек мембрананың деформациялану схемасы; б, в – датчиктердің орындалу нұсқалары

Анық көрініп тұрғандай, мембрананың ортасында және оның шеттеріндегі бекіту сызығы бойында, елестетілген нормаль сызығының оське қатысты көлбеу бұрышы φ нөлге тең болады.

Осыған сәйкес, $\varphi = F(r)$ функциясы (басқа шарттар өзгермейтін жағдайда) экстремумға ие болуы тиіс.

Сондықтан, екінші ретті туындыны d^2x/dr^2 есептеп, оны нөлге теңестіру арқылы r_0 нүктесін табуға болады.

Көрсетілген әрекеттерді орындау арқылы келесі өрнек алынады:

$$r_0 = \frac{R}{\sqrt{3}} = 0,57 R.$$

8.8-суретте, б және в нұсқаларында жоғарыда сипатталған принципті іске асыратын сыйымдылықты датчиктер көрсетілген [1, 11].

Тіректер (4) мембрана ортасынан r_0 қашықтықта, диаметрлік тұрғыда қарама-қарсы бағытта орналастырылған. Бұл орналасу максималды сезімталдықты қамтамасыз етеді.

а) және б) нұсқалары артық қысым P өзгергенде қозғалмалы электродтар (2)-нің орын ауыстыру бағытымен ерекшеленеді:

б) нұсқасында қысым артқанда электродтар арасы ашылады, бұл датчиктің сыйымдылығын азайтады;

в) нұсқасында электродтар жақындайды, сәйкесінше сыйымдылық артады.

Датчиктің қаптамасы (5) диэлектрлік сұйықтықпен толтырылуы мүмкін. Бұл шешім конденсаторлы датчиктің сыйымдылығын қосымша арттыруға және қозғалмалы электродтардың механикалық тербелістерін жоюға мүмкіндік береді.

8.3. Деңгей датчиктері

Сыйымдылықты деңгейөлшегіштердің көптеген конструкциялық түрлері бар, олардың негізгі айырмашылықтары зерттелетін заттың электрөткізгіштік дәрежесіне байланысты анықталады.

Электрөткізгіш сұйықтықтарға арналған деңгейөлшегіштерде электродтардың бірі оқшаулағыш материалмен қапталады, ал электрөткізгіш емес сұйықтықтар үшін электродтар оқшауланбайды. Еске салайық, электрөткізгіш деп меншікті электрлік кедергісі $\rho < 10^6$ Ом·м және диэлектрлік өтімділігі $\varepsilon < 7$ болатын сұйықтықтарды айтады [12, 13].

Электрөткізгіш те, электрөткізбейтін де сұйықтықтарға арналған деңгейөлшегіштерде датчик электродтары стержень, жазық пластина немесе цилиндр түрінде жасалуы мүмкін. Екінші электрод ретінде зерттелетін зат құйылған ыдыстың металл қабырғасы пайдаланылуы мүмкін.

Ең жиі қолданылатын түрлердің бірі – коаксиалды датчик конструкциясы. Бұл жағдайда ішкі және сыртқы цилиндрлік электродтар зерттелетін сұйықтық құйылған резервуарда орналасады. Егер резервуарда сұйықтық болмаса, датчиктің электродтары арасындағы сыйымдылық

$$C = C_0 + \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln(1 + d / R_1)},$$

мұндағы

l – электродтардың толық ұзындығы;

R_1 және d – ішкі электродтың радиусы және электродтар арасындағы қашықтық;

C_0 – өтпелі оқшаулағыштармен және электродтардан екінші реттік өлшеу аппаратурасына дейінгі жалғау сымдарымен байланысты сыйымдылық.

Резервуарды h деңгейіне дейін сұйықтықпен толтырғаннан кейін, жалпы сыйымдылық келесі мәнге өзгереді

$$C = C_0 + \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln(1 + d / R_1)} + \frac{2\pi\epsilon_0 (\epsilon_X - \epsilon) h}{\ln(1 + d / R_1)}. \quad (8.17)$$

Келтірілген өрнек – электрөткізбейтін сұйықтық деңгейін өлшеуге арналған сыйымдылықты датчиктің түрлендіру функциясының қарапайымдалған түрі. Мұндай датчиктің эквивалентті сыйымдылығы параллель жалғанған үш сыйымдылықтың қосындысы ретінде қарастырылады. Егер зерттелетін ортаның диэлектрлік өтімділігін ϵ_X тұрақты деп есептеуге болса, онда ақпараттық мәнге тек үшінші құрамдас бөлік ие болады.

Бірінші және екінші құрамдастар ақпараттық емес болғандықтан, сыйымдылықты түрлендіргіштің

сезімталдығын арттыру үшін оларды сызбалық түрде өтеу (компенсациялау) қажет.

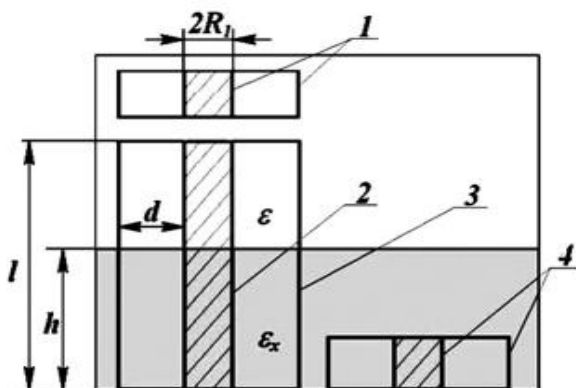
Сондай-ақ, нақты жағдайларда ϵ_x мәні өзгеруі мүмкін, мысалы, сұйықтық температурасының немесе оның химиялық құрамының өзгеруінен. Өлшеу нәтижесіне ϵ_x өзгеруінің әсерін азайту үшін, датчиктің құрылымына қосымша компенсациялық конденсатор енгізіледі. Ол негізгі түрлендіргіш элементтің төменгі бөлігіне жақын орналастырылады (8.9-сурет).

Мұнда:

2 және 3 – негізгі конденсатордың электродтары, оның сыйымдылығы зерттелетін сұйықтықтың деңгейіне және диэлектрик өтімділігіне тәуелді,

4 – қосымша (компенсациялық) конденсатордың электродтары, ол әрдайым сұйықтық ішінде орналасады және оның сыйымдылығы тек ϵ_x мәніне тәуелді.

Өлшеу тізбегіне қосылған кезде бұл компенсациялық конденсатордың сыйымдылығы ϵ_x өзгерген кезде деңгейөлшегіштің шығыс сигналын түзету үшін қолданылады.



8.9-сурет. Компенсациялық конденсаторлары бар сұйықтық деңгейін өлшеуге арналған сыйымдылықты датчик

Зерттелетін сұйықтықтың үстіндегі кеңістік әрдайым булармен ластанған күйде болатындықтан және олардың

диэлектрлік өтімділігі ауаның ε -інен өзгеше болғандықтан, сыйымдылықты түрлендіргіштерде бұл әсерді азайту үшін жұмыс конденсаторының үстіне орналастырылатын екінші компенсациялық конденсатор (1) қолданылады.

Электрөткізгіш сұйықтықтарға арналған сыйымдылықты деңгей датчиктерінде электродтардың бірі оқшауланған стержень түрінде орындалады, ал екіншісі ретінде резервуардың металл қабырғасы қызмет атқара алады. Металл емес резервуарлар үшін екінші электрод ретінде оқшауланған металл стерженьді қоршайтын оқшауланбаған цилиндр қолданылады.

Сыйымдылықты деңгейөлшегіштер келесі артықшылықтарымен ерекшеленеді:

- салыстырмалы түрде жоғары дәлдік,
- төмен құны,
- құрылымының қарапайымдылығы,
- резервуарға оңай орнату мүмкіндігі,
- температуралардың кең диапазонында жұмыс істеу қабілеті.

Алайда, олардың кемшіліктеріне келесілер жатады:

- тұтқыр, кристалданатын немесе тұнбаға түсетін сұйықтықтар үшін жарамсыздық,
- зерттелетін сұйықтықтың электрлік қасиеттерінің өзгеруіне өте жоғары сезімталдық,
- түрлендіргіш пен екінші реттік аппаратура арасындағы сымдар арасындағы сыйымдылықтың өзгеруінен туындайтын қателіктер.

Кәдімгі сыйымдылықты деңгейөлшегіштердің жалпы қателігі 2...5% аралығында болады [13].

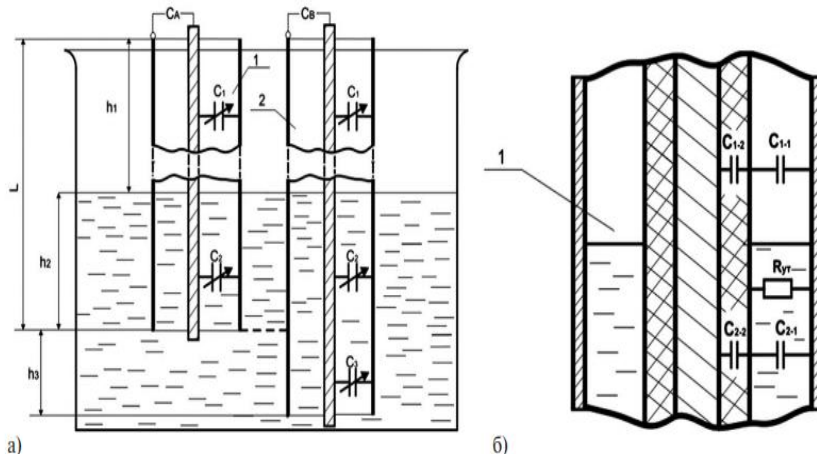
Сонымен қатар, өлшенетін шаманың мәніне қатысты шығыс сигналдың сипатына да көңіл аудару қажет, өйткені шығыс сигнал сыйымдылықтың өзгеруіне немесе сыйымдылықты кедергінің өзгеруіне байланысты сызықты тәуелділікте болуы мүмкін.

Коаксиалды конденсаторлар негізіндегі сыйымдылықты деңгей датчиктерінің тағы бір кемшілігі – электродтарда сұйықтықтың тамшылары қалып қойса, бұл өлшеу дәлдігінің төмендеуіне алып келеді [16, 18].

Зерттелетін ортаның қасиеттері өзгерген кезде (мысалы, трансформатор майы немесе күкірт қышқылы) қайта калибрлеуді қажет етпейтін электрөткізгіш және диэлектрлік сұйықтықтардың деңгейін өлшеудің сыйымдылықты әдісі ерекше қызығушылық тудырады [8].

Жалпы жағдайда, сыйымдылықты деңгейөлшегіш екі бірдей коаксиалды конденсаторлық датчиктен (1 және 2) тұрады (8.10-сурет, а), олардың біреуі екіншісіне қарағанда ұзындау болады. Бұл жағдайда, қысқалау датчиктің ұзындығы бақыланатын сұйықтық деңгейінің өзгеру диапазонынан кем болмауы тиіс.

2-датчиктің төменгі ұшы әрдайым сұйықтық ішінде орналасады және сұйықтықтың диэлектрлік қасиеттерін өлшейтін датчик функциясын атқарады.



8.10-сурет. Деңгей өлшеу тәсілі:

а – диэлектрлік сұйықтыққа арналған коаксиалды датчиктері бар сыйымдылықты деңгейөлшегіштің эквивалентті электрлік схемасы;

б – «ауа – электрөткізгіш сұйықтық» шекарасындағы коаксиалды датчиктің бөлігінің эквивалентті схемасы

Әдістің мәні келесідей:

1-конденсаторлық датчиктің C_A сыйымдылығы өлшенеді:

$$C_A = C_1 + C_2,$$

Мұндағы

C_1 – 1-конденсаторлық датчиктің сұйықтықпен толтырылмаған бөлігінің сыйымдылығы; C_2 – осы датчиктің сұйықтыққа батырылған бөлігінің сыйымдылығы.

Одан кейін 2-датчиктің жалпы сыйымдылығы C_{BC_BCB} өлшенеді:

$$C_B = C_1 + C_2 + C_3,$$

Мұндағы C_3 – 2-конденсаторлық датчиктің бақылаудағы сұйықтыққа үнемі батырылып тұратын төменгі бөлігінің сыйымдылығы.

Коаксиалды датчиктің бірлік ұзындығына шаққандағы меншікті сыйымдылық (γ) ұғымын қолдана отырып, толтырылмаған күйдегі датчик үшін C_1 және C_2 сыйымдылықтарын келесі түрде өрнектеуге болады:

$$C_1 = \gamma h_1 \varepsilon_1,$$

$$C_2 = \gamma \varepsilon_2 (L - h_1),$$

Мұндағы

ε_1 – ауаның салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі ($\varepsilon_1 \approx 1$); h_1 – датчиктердің сұйықтыққа батырылмаған бөлігінің ұзындығы; ε_2 – бақылаудағы сұйықтықтың салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі; L – 1-конденсаторлық датчиктің жалпы ұзындығы.

2-датчиктің сұйықтыққа үнемі батырылып тұратын төменгі бөлігінің сыйымдылығы келесідей түрде өрнектеледі:

$$C_3 = C_0 \varepsilon_2 = \gamma h_3 \varepsilon_2,$$

Мұндағы C_0 – 2-конденсаторлық датчиктің төменгі бөлігінің бастапқы сыйымдылығы, яғни бақыланатын сұйықтыққа батырылмаған кездегі (ауамен қоршалған кездегі) сыйымдылығы.

Қарапайым түрлендірулер арқылы келесі өрнекті алуға болады:

$$h_1 = \frac{\gamma \frac{C_B - C_A}{C_0} L - C_A}{\gamma \frac{C_B - C_A}{C_0} - \gamma \epsilon_1}.$$

Жазбаны жеңілдету үшін сыйымдылықты датчиктердің конструктивтік тұрақтылары енгізіледі:

$$\frac{\gamma}{C_0} = A \text{ [м}^{-1}\text{]}; \quad \frac{\gamma}{C_0} L = AL = D$$

$$\gamma \epsilon_1 = B \text{ [пФ/м]}.$$

Сонда есептеу формуласы ықшам түрде жазылады:

$$h_1 = \frac{D(C_B - C_A) - C_A}{A(C_B - C_A) - B},$$

Мұндағы

A , B және D – 1 және 2-датчиктердің конструктивтік параметрлері, олар датчиктерді дайындау кезінде тәжірибелік жолмен анықталады.

Келтірілген есептеу формуласы коаксиалды 1 және 2-датчиктердің жоғарғы шетінен бастап деңгей биіктігін анықтауға арналған.

Егер деңгей өлшеу шкаласын (h_2) 1-датчиктің төменгі ұшына сәйкестендіріп алсақ, онда деңгей биіктігін есептеу алгоритмі сәл өзгеше болады:

$$h_2 = \frac{C_A - E}{A(C_B - C_A) - B}.$$

мұндағы: $E = \gamma L \varepsilon_1$ – жаңа конструктивтік параметр.

Жалпы жағдайда, есептеу үшін бастапқы нүкте ретінде резервуардың ішіндегі елестетілген тік осьтің кез келген белгісін алуға болады.

Қарапайым геометриялық салулар арқылы сәйкес түзету коэффициенті h_0 -ды оңай есептеуге болады.

Сонда есептеу формулалары келесі түрге енеді:

$$\begin{cases} h_1 = \frac{D(C_B - C_A) - C_A}{A(C_B - C_A) - B} \pm h_0 \\ h_2 = \frac{C_A - E}{A(C_B - C_A) - B} \pm h_0 \end{cases} \quad (8.18)$$

Электрөткізгіш сұйықтық деңгейін өлшеу жағдайында сыйымдылықты 1 және 2 датчиктердің бір электродында оқшаулағыш қабат болуы тиіс. Әрине, мұндай электрод – потенциалды электрод болуы қажет. Бұл жағдайда оқшаулағыш қабаттың материалы екі датчик үшін де (1 және 2) бірдей болуы керек.

Осы талаптар орындалған жағдайда, 1 және 2 датчиктер екі қабатты конденсаторға айналады. 8.10-сурет, б-де «ауа-сұйықтық» шекарасындағы датчиктің учаскесінің эквивалентті схемасы көрсетілген.

Анық байқауға болады: сұйықтықпен толтырылмаған 1 және 2 датчиктердің бөлігі C_1 сыйымдылығына ие болады, ол қатар жалғанған екі сыйымдылықтан – C_{1-2} және C_{1-1} тұрады.

Ал сұйықтыққа батырылған бөліктің импедансы өлшеу құрылғысымен кейбір «көрінетін» немесе тиімді сыйымдылық элементі C_2 ретінде қабылданады. Бұл C_2 шамасы бірнеше параметрлерге тәуелді:

- сұйықтықтың электрөткізгіштігіне (яғни, ағып кету кедергісі $R_{\gamma T}$ – 8.10-сурет, б),
- оқшаулағыш қабаттың диэлектрлік қасиеттеріне,

– сұйықтықтың өз қасиеттеріне, нақтырақ айтқанда, R_{YT} пен C_{2-1} конденсатордың сыйымдылықты кедергісі арасындағы қатынасқа.

Атап айтқанда, егер $R_{YT} \rightarrow 0$ болса, онда $C_2 \rightarrow C_{2-1}$ болады.

Мұндай мінез-құлықты 2-датчиктің сұйықтыққа тұрақты батырылған төменгі бөлігі де көрсетеді, өйткені оның потенциалды электроды да сол оқшаулағыш материалмен қапталған.

Сондықтан бұл жағдайда есептеулерге сұйық ортаның «көрінетін» немесе тиімді салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі $\varepsilon_{\text{эфф}}$ қатысады. Және ол ерекше жағдайда $R_{YT} \rightarrow 0$ кезінде тек оқшаулағыш қабаттың диэлектрлік қасиеттерімен ғана анықталады.

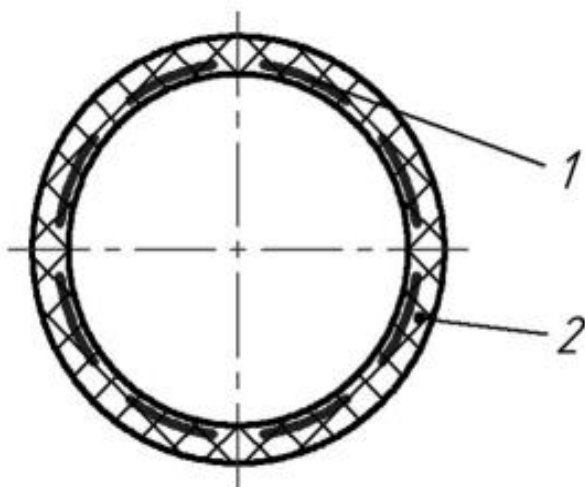
Осыны ескере отырып, заманауи микроконтроллерлер негізінде оңай іске асырылатын есептеу алгоритмдері өзгеріссіз қалады (8.19-сурет). Осы әдістің бірегейлігі де осында – ол:

– «ауа-сұйықтық» шекарасындағы диэлектрлік қасиеттер айырмашылығын тіркеудің классикалық принципі қолданады;

– бірақ есептеу алгоритмінен тек «диэлектрлік өтімділік» ұғымын ғана емес, сонымен қатар оған әсер ететін басқа да бақыланатын сұйықтық параметрлерін (температура, құрамы, электрөткізгіштігі және т.б.) толықтай алып тастайды.

1 және 2 сыйымдылықты датчиктерді бірдей ұзындықта жасауға болады. Бұл жағдайда 2-датчиктің төменгі ұшында сұйықтыққа батырылғанға дейінгі сыйымдылығы C_0 болатын компактты диэлектрлік қасиеттер датчигі орналасуы тиіс. Ол 2-датчикке параллель қосылады.

Мұндай құрылғы ретінде 8.2-сурет, в көрсетілген датчик түрін пайдалануға болады.



8.11-сурет. Ішкі бетіне электродтар орнатылған түтік түріндегі сыйымдылықты деңгей датчигі:
1 – электродтар; 2 – түтік

8.11-суретте цилиндрлік түтік (2) түрінде орындалған сыйымдылықты деңгей датчигінің конструкциясы көрсетілген. Бұл датчиктің ішкі бетіне орналасқан электродтар (1) параллель жалғанған конденсаторлар жүйесін құрайды.

Электродтар оқшаулағыш материалмен қапталған. Электродтарға кернеу берілген кезде олардың айналасында біртекті емес электр өрісі пайда болады. Бұл өріс:

- электродтардың еніне,
- арақашықтығына,
- зерттелетін сұйықтың диэлектрлік өтімділігіне,
- және электродтардың сұйықтыққа батырылу тереңдігіне тәуелді болады.

Электродтардың батырылу тереңдігі өзгерген сайын электр өрісінің кернеулігі өзгереді, ал бұл өз кезегінде датчиктің сыйымдылығының өзгеруіне әкеледі.

Мұндай датчиктің сыйымдылығы келесі формула бойынша есептеледі [2, 5, 14, 16]:

$$C \approx \int_0^l 2n \sum_{i=1}^{n/2} \frac{\varepsilon \pi}{2 \sqrt{1 + \lambda^2 - 2\lambda \cos \left(\pi - \frac{\pi(2i-1)}{n} \right)}} \ln \frac{1 + \lambda}{1 - \lambda}, \quad (8.19)$$

мұндағы $\lambda = \sqrt{1 + \frac{a}{d}}$, $2n$ – электродтар саны; a – электродтардың ені; l – электродтардың ұзындығы; d – электродтан көрші электродтармен түзілетін бұрыштың төбесіне дейінгі қашықтық.

Датчиктің сыйымдылығы екі сыйымдылықтың параллель жалғанған эквиваленті болып табылады. Оның бірі – биіктігі h болатын, диэлектрлік өтімділігі ε сұйықтықпен толтырылған бөліктің сыйымдылығы; екіншісі – $(H - h)$ биіктіктегі сұйықтықсыз бөліктің сыйымдылығы.

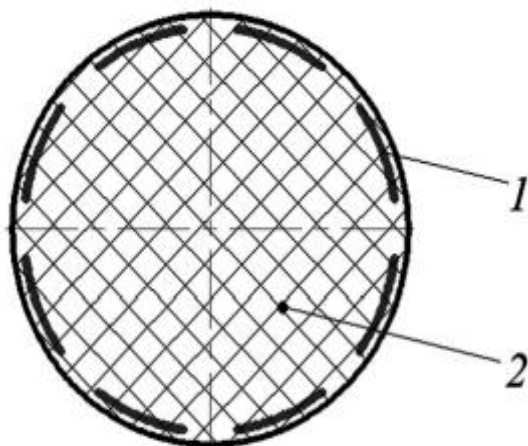
Осыған сүйене отырып, сұйықтыққа батырылған датчиктің жалпы сыйымдылығы келесі түрде өрнектеледі [13, 15]:

$$C = C_0 \times (\varepsilon \cdot h + H - h) = C_0 \cdot [H + h(\varepsilon - 1)], \quad (8.20)$$

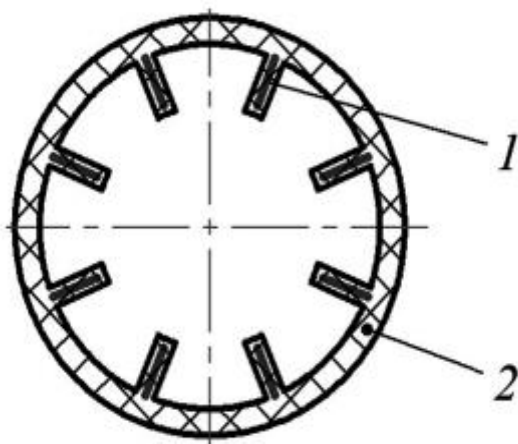
мұндағы: C_0 – сұйықтықсыз күйдегі датчиктің бірлік ұзындыққа шаққандағы сыйымдылығы; H – электродтардың биіктігі; h – сұйықтық деңгейінің биіктігі.

Бұл датчиктің кіріс шамасы – $h \cdot (\varepsilon - 1)$ көбейтіндісі болып табылады. Датчик сыйымдылығының C сұйықтыққа батырылу тереңдігіне (h) тәуелділігі – сызықтық сипатта.

8.12-суретте электродтары сыртқы бетіне орналасқан цилиндр (2) түрінде орындалған сыйымдылықты датчиктің конструкциясы көрсетілген. Бұл электродтар (1) параллель жалғанған конденсаторлар түзеді [1].



8.12-сурет. Цилиндрлік сыйымдылықты датчик: 1 – электродтар; 2 – диэлектрлік цилиндр



8.13-сурет. Радиалды электродтары бар сыйымдылықты деңгей датчигі: 1 – электродтар; 2 – түтік

8.13-суретте ішкі бетіне электродтар (1) орнатылған цилиндрлік түтік (2) түріндегі сыйымдылықты датчиктің конструкциясы көрсетілген. Электродтар цилиндрлік түтікке

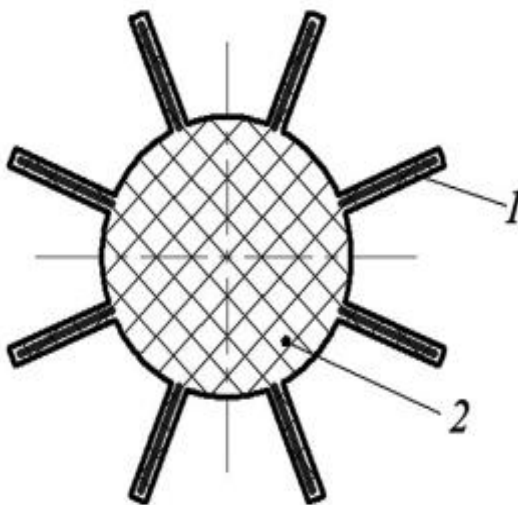
жанасу нүктелеріндегі жанамаларға перпендикуляр бағытта орналасқан және параллель жалғанған конденсаторлар құрайды [16].

Сыйымдылықтың C сұйықтыққа батырылу тереңдігіне (h) тәуелділігі – сызықтық сипатта.

8.13-суретте көрсетілген датчик конструкциясын пайдалану, электродтардың өлшемдері бірдей болған жағдайда, 8.11-суреттегі датчикпен салыстырғанда сезімталдықты 1,22 есеге арттыруға мүмкіндік берді.

[16] еңбекте электродтары цилиндрдің сыртқы бетіне орнатылған және оқшаулағыш материалмен қапталған сыйымдылықты деңгей датчигінің конструкциясы ұсынылған (8.14-сурет).

[15] жұмысында 8.14 және 8.15-суреттерде көрсетілген датчиктердің сыйымдылығын есептеу әдістемесі келтірілген.



8.14-сурет. Цилиндрдің сыртқы бетіне орнатылған радиалды электродтары бар сыйымдылықты деңгей датчигі: 1 – электродтар; 2 – цилиндр

8.4. Жылжуды (беттегі тегіс еместікті) өлшейтін сыйымдылықты датчик

Бірнеше микрометрден бірнеше сантиметрге дейінгі диапазонда сызықтық шамаларды өлшеу ғылым мен техниканың әртүрлі салаларында маңызды орын алады. Бұл диапазонда жиі кездесетін өлшеулерге мыналар жатады:

- бөлшектердің геометриялық өлшемдерін анықтау,
- бөлшек өлшемдерінің номиналды мәннен ауытқуын өлшеу,
- беттегі тегіс еместіктер мен кедір-бұдырлық параметрлерін өлшеу,
- жабын қабатының қалыңдығын өлшеу,
- аз шамадағы жылжуларды тіркеу [12, 13].

8.15-суретте Thrymus–Sylvac фирмасының сыйымдылықты орын ауыстыру түрлендіргішінің құрылымдық сызбасы және оның өлшеу тізбегінің құрылымдық схемасы көрсетілген [19].

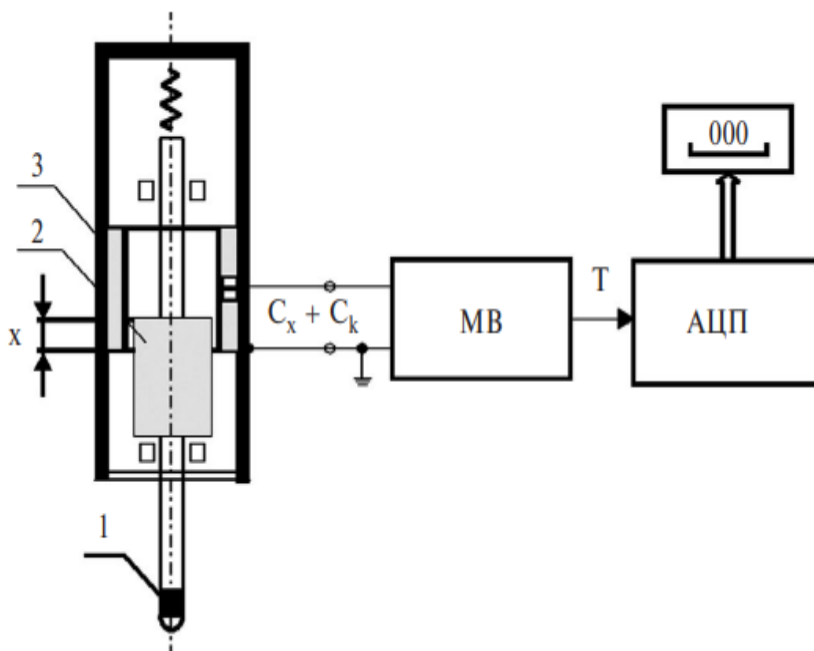
Қозғалмалы цилиндрлік электрод (2) өлшеу щупымен (1) механикалық түрде жалғасқан және қозғалмайтын электродтың (3) ішіне қарай қозғала алады. Электродтар арасындағы C_x сыйымдылығы мультивибратор МВ құрамындағы LC-контурдың бір бөлігі болып табылады. Мультивибратордың шығыс кернеуінің периоды T_x C_x -ке, яғни өлшенетін орын ауыстыруға тәуелді.

Шығыс сигналды тіркеуші құрылғы – сандық период өлшегіш.

Кабель сыйымдылығының (C_k) әсерін азайту үшін мультивибратор түрлендіргіштің корпусына орналастырылған.

Мұндай түрлендіргіш келесі сипаттамаларға ие:

- жылжу диапазоны – 20 мм,
- ажырату қабілеттілігі – 0,001 мм,
- өлшеу нақтылығы – 0,002 мм.



8.15-сурет. Thrymus–Sylvac фирмасының орын ауыстыруды өлшейтін сыйымдылықты түрлендіргіші

8.5. Сыйымдылық датчиктерінің өлшеу сұлбалары

Сыйымдылық датчиктері салыстырмалы түрде жоғары дәлдікке және төмен бағаға ие. Алайда, бұл датчиктерді өз құрылымына енгізуді жоспарлаған әзірлеушілер алдымен сыйымдылықты кернеуге, содан кейін бұл кернеуді прецизионды аналог-сандық түрлендіргіш (АЦТ) арқылы цифрлық сигналға түрлендіруді қамтамасыз етуі тиіс. Соның нәтижесінде жүйе қымбатқа түсуі, дәлдігінің төмендеуі немесе осы екі кемшіліктің қатар орын алуы мүмкін [3, 4].

Сыйымдылықты өлшеудің бірнеше типтік әдістері бар.

Тікелей әдіс – конденсаторды белгілі бір уақыт аралығында ток көзінен зарядтап, содан кейін конденсатордағы кернеуді өлшеу. Бұл әдіс өте аз ток беретін

дәл ток көзін және жоғары кіріс кедергісі бар кернеу өлшегішті қажет етеді.

Екінші әдіс – өлшенетін сыйымдылықты РС-генератордағы уақытты анықтайтын элемент ретінде пайдалану, содан соң уақыт тұрақтысын, жиілікті немесе периодты өлшеу. Бұл әдіс қарапайым, бірақ әдетте жоғары дәлдікке қол жеткізбейді.

Тағы бір тәсіл – айнымалы токтағы конденсатордың импедансын өлшеу. Бұл жағдайда конденсаторға синусоидалы сигнал көзі қосылады, әрі конденсатор арқылы өтетін кернеу мен ток өлшенеді. Егер төртсымды логометриялық қосу әдісі (импеданстар қатынасы өлшенетін) және синхронды демодулятор қолданылса, ең жоғары дәлдікке қол жеткізуге болады. Алайда, бұл сұлба күрделі және көптеген компоненттерден тұрады.

Кішкентай сыйымдылық мәндері бар прецизионды датчиктер үшін ең жиі қолданылатын әдіс – зарядтық күшейткішті пайдалану. Бұл күшейткіш өлшенетін және тірек сыйымдылықтарының арақатынасын кернеу сигналына түрлендіреді. Мұндай сұлба арнайы микросхемалар түрінде шығарылады және жаппай өндіріс жағдайында кейбір жүйелер үшін қолайлы [2].

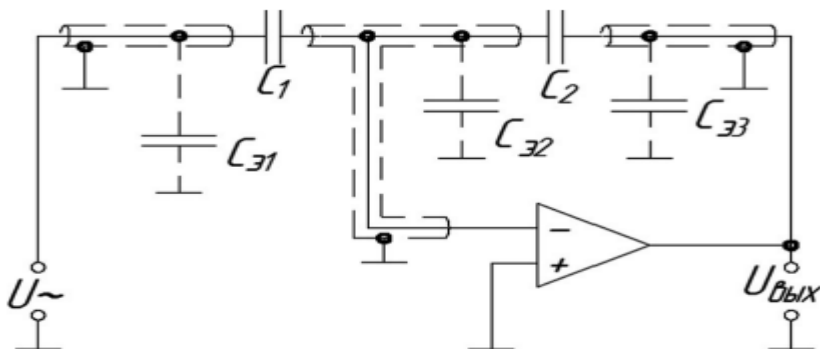
Барлық сипатталған әдістерде алдымен сыйымдылық кернеуге, ал кейін бұл кернеу прецизионды АЦТ арқылы цифрлық кодқа түрлендіріледі.

8.16-суретте ОУ негізіндегі сұлба көрсетілген, ол кернеу бөлгіш принципіне негізделген [6]. Бұл жағдайда шығыс кернеуі $U_{\text{шығ}} = U \approx C_1/C_2$ формуласы бойынша анықталады. Мұндай сұлба конденсатор пластиналары арасындағы саңылаудың өзгерісін кернеуге түрлендіру үшін өте қолайлы.

$$C_2 (U_{\text{вых}} = U \sim \frac{C_1 \delta_2}{\epsilon_0 S_2})$$

немесе конденсатордың бет ауданының өзгерісі

$$C_1 (U_{\text{ВЫХ}} = U \sim \frac{\varepsilon_0 S_1}{\delta_1 C_2}).$$



8.16-сурет. Сыйымдылықты кернеуге түрлендіру сұлбасы

Екі жағдайда да шығыс кернеуінің өлшенетін шамадан тәуелділігі сызықтық болады. 8.16-суреттегі сұлбада экрандалған сымдардың C_{31} , C_{32} , C_{33} сыйымдылықтары өлшеу құрылғысының жұмысына іс жүзінде әсер етпейді. Бұл C_{31} және C_{33} сыйымдылықтарының айнымалы кернеу көзі $U \sim$ және шығысы төмен ішкі кедергіге ие операциялық күшейткішпен параллель қосылуымен түсіндіріледі. Ал C_{32} сыйымдылығы операциялық күшейткіштің кірістерімен параллель жалғанған және ондағы кернеу шамамен нөлге тең.

Дифференциалды сыйымдылық датчиктері көбінесе көпірлік өлшеу сұлбаларында қолданылады. 8.17-суретте индуктивті байланысқан иықтары бар көпірлік сұлбалардың мысалдары көрсетілген [6].

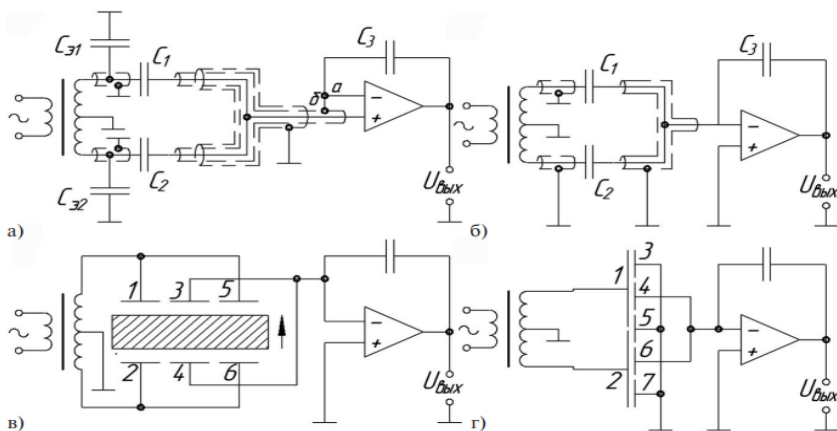
8.17-сурет, а сұлбасында шығыс сигналы операциялық күшейткіш негізіндегі кернеу қайталағыштың кірісіне беріледі. Егер трансформатордың екінші орамының әрбір жартысында кернеу $U \sim$ деп қабылданса, онда шығыс кернеуі мынаған тең:

$$U_{\text{шығ}} = U \sim \cdot (C_1 - C_2) / (C_1 + C_2).$$

Датчик пен трансформаторды жалғайтын экрандалған сымдардың C_{31} және C_{32} сыйымдылықтары трансформатор орамдарының жарты бөлігіне параллель қосылғандықтан, құрылғы жұмысына әсер етпейді.

Датчик пен күшейткіш арасындағы экрандалған сым сыйымдылығының әсерін азайту үшін эквипотенциалды қорғаныс сұлбасы қолданылады. Бұл мақсатта қос экранды сым пайдаланылады: сыртқы экраны жерге қосылады, ал ішкі экраны – кернеу қайталағыштың шығысына жалғанады. Себебі, а және б нүктелерінің жерге қатысты кернеулері бірдей болғандықтан, орталық сымнан ішкі экранға ток жүрмейді. Ал ішкі және сыртқы экрандар арасындағы ток құрылғы жұмысына әсер етпейді, өйткені ол кернеу қайталағыштың төменгі кедергілі шығысын ғана жүктейді.

Мост шығысы операциялық күшейткіштің инвертирлеуші кірісіне жалғанған жағдайда қос экранды қолдану қажеттілігі жойылады (8.17-сурет, б). Бұл кірістегі потенциал нөлге жуық болғандықтан, оған қосылған сым мен оны қоршаған экран арасындағы ток іс жүзінде нөлге тең болады. 8.17-б сұлбасы үшін келесі қатынас орындалады: $U_{\text{шығ}} = U_{\sim} \cdot (C_1 - C_2) / C_3$.



8.17-сурет. Сыйымдылық датчиктеріне арналған көпірлік өлшеу сұлбалары

8.17-сурет, в сұлбасында – қозғалмалы пластинадан сыйымдылық арқылы ток алу жағдайындағы көпірлік сұлбаның модификациясы көрсетілген. Сұлбаны жеңілдету мақсатында 8.17-сурет, в және кейінгі сұлбаларда экрандар мен паразиттік сыйымдылықтар көрсетілмеген.

Қозғалмайтын және қозғалмалы пластиналар арасындағы сыйымдылықтарды белгілеу үшін қозғалмайтын пластина нөміріне сәйкес индекс қолданылады.

Көпірдің иықтарына $C_1 + C_5$ және $C_2 + C_6$ сыйымдылықтары кіреді. $C_3 + C_4$ сыйымдылығы арқылы көпірдің өлшеу диагоналының төбесі операциялық күшейткіштің шығысына қосылған.

Нәтижесінде, шығыс кернеуі $U_{\text{шығ}}$ келесі формуламен анықталады:

$$U_{\text{вых}} = U_{\sim} \frac{(C_1 + C_5) - (C_2 + C_6)}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6} \frac{C_3 + C_4}{C_{o.c.}}. \quad (8.21)$$

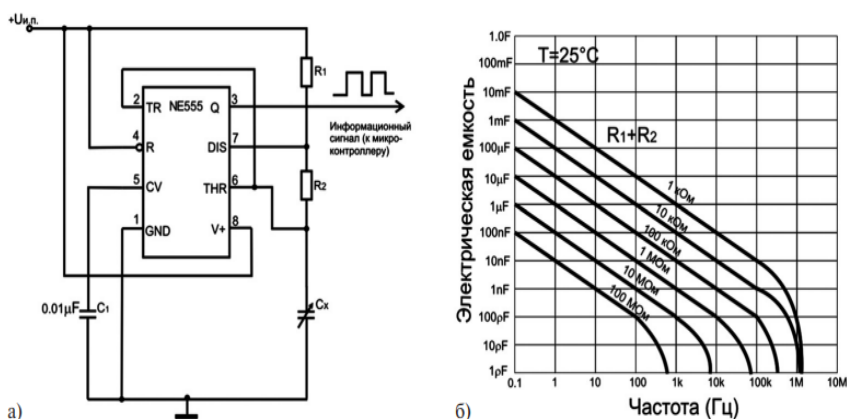
Пластина көрсетілген бағытта орын ауыстырғанда, $C_1 + C_5$ сыйымдылығы артады, ал $C_2 + C_6$ сыйымдылығы кемиді. Ал $C_3 + C_4$ ток алу сыйымдылығы іс жүзінде өзгеріссіз қалады, себебі C_3 сыйымдылығы артып, C_4 сыйымдылығы азаяды.

8.17-сурет, г сұлбасында қорғаныс электродтарының көмегімен сыйымдылық түрлендіргіштердің сипаттамаларын қалай жақсартуға болатыны көрсетілген. Мұнда сыйымдылық түрлендіргіштері 1, 4 және 2, 6 пластиналарымен түзіледі. Ал 3, 5, 7 пластиналары қорғаныс электродтары ретінде қызмет етеді. Себебі 4 және 6 пластиналары операциялық күшейткіштің инвертирлеуші кірісіне қосылған, сондықтан бұл пластиналардағы кернеу нөлге өте жақын болады. Осыған байланысты 1 және 3, 4, 5 пластиналары, сондай-ақ 2 және 5, 6, 7 пластиналары арасындағы электр өрісі іс жүзінде біртекті болады. Соның арқасында түрлендіргіштердің жұмысына шеткі эффекттің әсері жойылады (енді шеткі өріс бұрмаланулары тек 1, 2 және 3, 5, 7 пластиналары арасында байқалады).

8.16 және 8.17-суреттердегі сұлбалардың ортақ кемшілігі – олар тек барлық пластиналары корпустан оқшауланған датчиктерге ғана ұсыныла алады, ал бұл жағдайды кейде құрылымдық түрде іске асыру қиынға соғады.

Қызығушылық тудыратын тағы бір тәсіл – NE555 прецизионды таймерінің (биполяр транзисторлар негізінде) немесе оның КМОП-технологиясындағы заманауи аналогы ICM7555 микросхемасын пайдалану [19].

8.18-сурет, а сұлбасында C_x датчигін NE555 микросхемасына қосу схемасы көрсетілген.



8.18-сурет. Таймер негізіндегі өлшеу құрылғысы:

а – сыйымдылық-жиілік түрлендіргішінің сұлбасы; б – ақпараттық сигнал жиілігінің R_1 , R_2 және C_x параметрлеріне тәуелділік графигі.

Микросхема мультивибратор режимінде қосылған. RC-генератордың уақытты анықтайтын тізбегіне белгілі қарсылық мәндеріне ие R_1 және R_2 резисторлары қосылған. Түрлендірілген сигнал жиілік түрінде беріліп, оны әрі қарай өңдеу үшін кез келген микроконтроллерлік құрылғыға жіберуге болады.

Айта кету керек, өлшенетін сыйымдылықтың қажетті диапазонында құрылғының сезімталдығы мен тұрақты жұмысын қамтамасыз ету үшін уақытты анықтайтын R_1 және R_2 элементтерінің параметрлерін дұрыс таңдау қажет (8.18-сурет, б қараңыз).

Құрылғының сезімталдығы 0,01 пФ деңгейінде. Galltec+MELA компаниясы бұл сұлбаны ылғалдылықты өлшейтін құрылғылардың сезімтал элементтеріне арналған электрондық сұлбаларда сәтті қолдануда.

Таймер ретінде ICM7555 микросхемасын қолдану құрылғының тұтынатын тогын 10 мА-дан 100 мкА-ға дейін төмендетуге мүмкіндік береді, бұл автономды қуат көздерімен жұмыс істейтін құрылғыларды жасау кезінде елеулі артықшылық береді.

Ең тиімді шешім – бұл микроконтроллерлік өлшеу құрылғылары, олар тек датчик сыйымдылығын өлшеу ғана емес, сонымен қатар өлшеу нәтижелері негізінде қажетті есептеулер жүргізуге мүмкіндік береді.

Атап айтқанда, 8.10-суреттегі тәсілді және (8.18) алгоритмдерін жүзеге асыру Atmel компаниясының AVR ATMEGA 8-16PI микроконтроллері негізінде орындалады. Бұл құрылғыны пайдаланушы жүйелерімен RS-232/RS-422/RS-485 стандартты оқшауланған интерфейс арқылы біріктіруге болады (8.19-сурет).

Бұл құрылғыдағы электрлік сыйымдылықты өлшеу принципі – C_A және C_B конденсаторлық датчиктерінің берілген кернеу шегіне дейін зарядталу уақытын өлшеуге негізделген. Бұл кернеулерді микроконтроллердің құрамына ендірілген аналог-сандық түрлендіргіш (АЦТ) бақылайды.

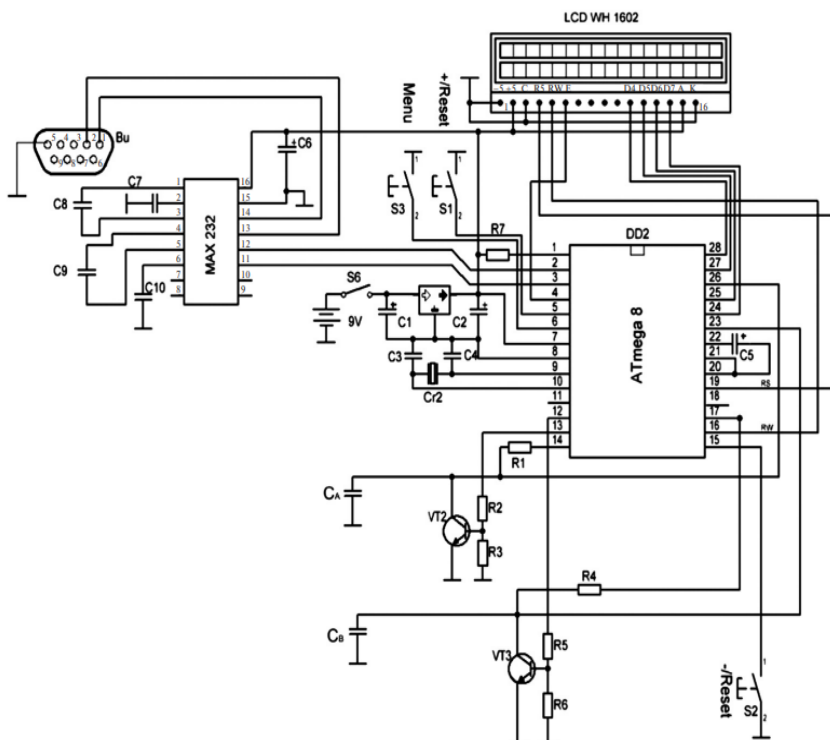
АЦТ-ның жұмыс істеуі үшін қажетті тірек кернеуді қалыптастыруға C_5 конденсаторы қызмет етеді.

C_A және C_B конденсаторлық датчиктері R_1 және R_4 уақытты анықтайтын резисторлар арқылы зарядталады, ал келесі өлшеу циклдарына дейін разрядтау V_{T1} және V_{T2} транзисторлық кілттері арқылы жүзеге асырылады.

Құрылғыны қайта бағдарламалау және функционалдық міндеттерін өзгерту үшін сұлбада бағдарламалау интерфейсінің разьемы ISP орнатылған (суретте көрсетілмеген).

Алынған конденсаторлық датчиктердің электрлік сыйымдылық мәндері кезекпен және бірнеше рет өлшеніп, кейін орташа мәні есептеледі және (8.18) алгоритмдерінің біріне сәйкес одан әрі есептеулерге қатысады.

Микроконтроллердің порттарында бос шығыстар болғандықтан, бұл құрылғы электрлік сыйымдылықты өлшеумен қатар, мысалы, температура сияқты басқа шамаларды да өлшеуге мүмкіндік береді.



8.19-сурет. C_A және C_B датчиктерінің сыйымдылығын өлшеуге арналған құрылғының электрлік принциптік сұлбасы

Өлшеу нәтижелерінің визуализациясы микроконтроллердің микробағдарламасына (прошивкасына) байланысты сандық сұйықкристалды дисплейде әртүрлі форматта жүзеге асырылады, мысалы:

$C_A = \text{XXXXXX h} = \text{XXXXXX мм/см/м};$

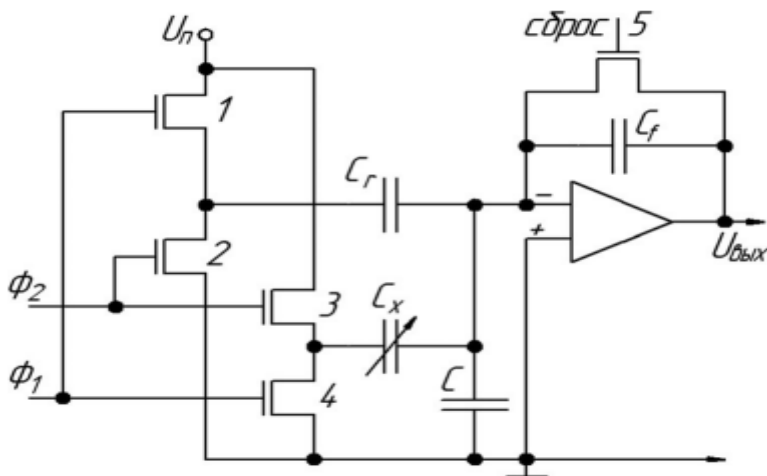
$C_B = \text{XXXXXX}.$

Құрылғы әмбебап болып табылады және бірнеше жұмыс режиміне ие: – өлшеу режимі, – баптау (настройка) режимі, – өлшеу/баптау режимі.

Режимдерді ауыстыру және константалар мен басқа параметрлерді енгізу үш тактілік батырманың көмегімен жүзеге асырылады: $S_1 + /Reset$, $S_2 - /Reset$, $S_3 /menu$.

Бұл екіншілік құралдың ерекшелігі – өлшенетін шаманы цифрлық түрде алу және беру, бұл қашықтықтан деректерді жіберу кезінде туындайтын қосымша қателіктерді болдырмауға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, цифрлық сигналдың алынуы бұл құрылғыны кез келген қабылдаушы құралмен оңай байланыстыруға мүмкіндік береді [7, 47].



8.20-сурет. Сыйымдылықты кернеуге түрлендіретін дифференциалды түрлендіргіштің қарапайымдатылған сұлбасы

8.20-суретте конденсаторларды ауыстырып қосу арқылы жұмыс істейтін түрлендіргіштің қарапайымдатылған сұлбасы көрсетілген [16]. Бұл сұлбада айнымалы конденсатор C_x және эталондық конденсатор C_T – симметриялы кремнийлі қысым датчигінің құрамдас бөліктері болып табылады.

Орнатылған МОП-кілттер (1-4) қарсы фазада жұп болып жұмыс істейді және ϕ_1 және ϕ_2 тактілік импульстерімен басқарылады.

Сәйкес кілт жұбы қосылған кезде, тиісті конденсатор тұрақты кернеу көзі U_p -ден зарядталады. Конденсаторлардың жалпы торабындағы жинақталған заряд – C_x мен C_T айырмасына, демек, датчикке түсірілген қысымға пропорционал болады.

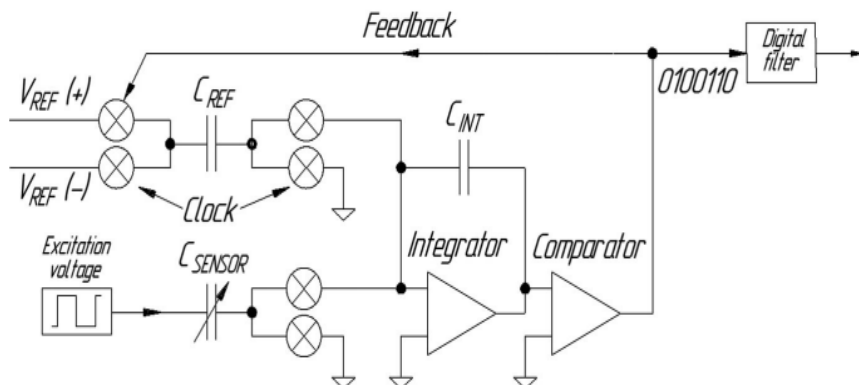
Бұл заряд ОУ, интегралдаушы C_f конденсаторы және C_T -ті разрядтауға арналған МОП-кілт 5 құрамындағы зарядты кернеуге түрлендіргіштің кірісіне бөріледі.

Мұндай түрлендіргіштің шығыс сигналы амплитудасы өзгертін импульстік сигнал түрінде болады. Бұл сигнал беріліс желісі арқылы жіберілуі, сызықтық сигналға демодуляциялануы немесе цифрлық кодқа айналдырылуы мүмкін.

Жоғары күшейту коэффициенті бар операциялық күшейткіш (ОУ) пайдаланылатындықтан, интегратордың шығыс кернеуі паразиттік кіріс сыйымдылығына, ығысу кернеуіне, немесе температуралық өзгерістерге тәуелді болмайды.

8.21-суретте сигма-дельта модуляторының модификацияланған сұлбасы көрсетілген [3].

Тұрақты кіріс кернеуі бұл жағдайда қоздыру кернеуі ретінде қарастырылады. Сыйымдылығы өзгертін конденсатор – бұл сыйымдылық датчигі. Нәтижесінде, шығыс коды – датчик сыйымдылығы мен эталондық сыйымдылық (C_{ref}) арасындағы қатынасты көрсетеді.



8.21-сурет. Сыйымдылықты тікелей өлшейтін сигма-дельта АЦТ [3]

Бұл тәсіл сыйымдылық датчигін сигма-дельта түрлендіргішіне тікелей қосуды жүзеге асыруға мүмкіндік береді, ал бұл өз кезегінде жоғары рұқсаттылық (ажырату қабілеті), дәлдік және сызықтылық сияқты артықшылықтарды қамтамасыз етеді.

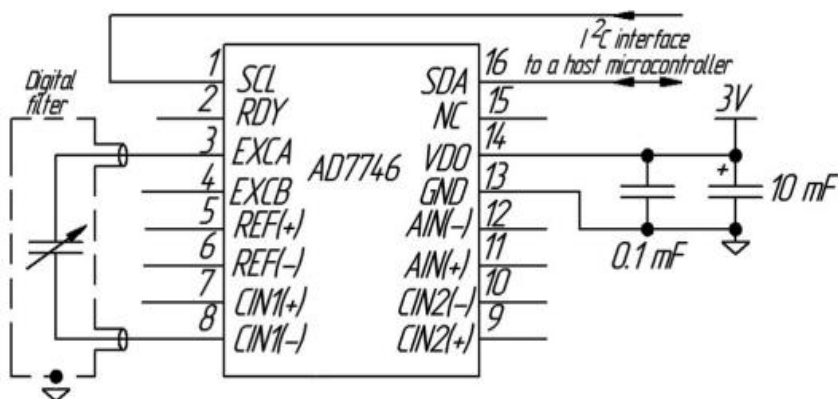
Сонымен қатар, бұл сұлбаны нақты жүйеде қолданудың өзге де ерекшеліктері бар. Мұндай интерфейс нақты құрылымдарға тән шығыстар арасындағы сыйымдылық мәніне сезімтал емес.

Сыйымдылықты цифрлық кодқа түрлендіретін түрлендіргіш толығымен бір кристалды құрылғы түрінде жүзеге асырылуы мүмкін. Бұл өз кезегінде: – жоғары интеграция деңгейін, – сұлбаның қарапайым орындалуын, – жоғары қайталанғыштықты, – сенімділікті, және, маңыздылығы бойынша соңғы болмаса да, – жобаның өзіндік құнын едәуір төмендетуді қамтамасыз етеді [2].

[3] дереккөзінде жылжымалы элементтің сыйымдылық датчигі сипатталған. Оның жұмыс принципі қарапайым: белгілі бір салыстырмалы диэлектрлік өтімділікке ие диэлектрлік жолақ екі қозғалмайтын пластинаның арасында қозғалады.

Жолақтың ені – 10 мм. Бастапқы сыйымдылық (жолақ саңылауға енбей тұрғанда) 4,5 пФ-қа тең. Жолақ конденсатор пластиналары арасындағы саңылауда қозғалған сайын, сыйымдылық шамамен 1 мм сайын 0,126 пФ-қа өзгереді.

Датчик C_{DC} түрлендіргішіне тікелей қосылған, осылайша түрлендіргіштің бүкіл сұлбасы бір ғана интегралдық сызбадан (ИС) тұрады (8.22-сурет). Датчик подключен непосредственно к преобразователю CDC, и таким образом вся схема преобразователя состоит из одной ИС (рис. 8.22)



8.22-сурет. Сыйымдылық датчикті AD7746 интегралдық сызбасына қосу сұлбасы

Бүкіл сұлба датчикпен бір баспа платасында орналасқан. Түрлендіргіш датчик электродтары мен «жер» арасындағы паразиттік сыйымдылыққа сезімтал емес, бұл өз кезегінде датчикті экрандау мәселесін едәуір жеңілдетеді. Тіпті датчиктен түрлендіргішке дейінгі жолақтарды да «жерлік» қабатпен қоршап, коаксиалды кабельге ұқсас құрылым жасауға болады.

Бұл мысалда қолданылған AD7746 CDC түрлендіргіші ± 4 пФ сыйымдылықты өлшеу диапазонына ие [3]. Конфигурациялау арқылы бұл диапазонды 17 пФ-қа дейін

ығыстыруға болады. ± 4 пФ диапазонында типтік рұқсаттылығы – 18 разряд. CDC түрлендіргіштің интегралдық сызықтық емес қателігі 0,01%-дан аспайды. Зауыттық калибрлеудің арқасында күшею коэффициентінің қатесі 4 фемтофарадтан ($4 \cdot 10^{-15}$ Ф) аспайды.

Датчик пен түрлендіргіш параметрлерін салыстыру келесі көрсеткіштерді береді: – қозғалыстың толық диапазоны – шамамен 65 мм; – рұқсаттылық – 0,25 мм; – интегралдық сызықтылық – ± 7 мм.

AD7746 CDC микросхемасында кіріктірілген температура датчигі, сондай-ақ екінші сыйымдылық өлшеу арнасы бар, сондықтан осы ИС негізінде жоғарыда сипатталған кез келген әдісті жүзеге асыруға болады.

ИС $-40...+125$ °С температура диапазонында жұмыс істеуге арналған, бұл оны датчикке жақын орналастыруға мүмкіндік береді. Мұндай жағдайда AD7746 кристалы мен датчиктің температурасы бір-біріне жақын болады.

Бұған қоса, бұл ИС-де стандартты дифференциалды кернеу кірісі және тірек кернеу кірісі бар, сондықтан оған сыртқы температура датчигін (мысалы, термистор немесе RTD – резистивті температуралық датчик) қосуға болады [3].

Кейбір сыйымдылық датчиктерінің техникалық сипаттамалары өндіруші және сауда компанияларының ресми сайттарында қолжетімді [24-47].

Әдебиеттер тізімі

1. А.с. 669237, G01L9/12. Преобразователь давления / И.Г. Минаев, И.Н. Постильняк (СССР). – №2609417/18-10 заявл. 27.04.78; опубл. 25.06.79. Бюл. №23, 1979.

2. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. Пер. С англ. – М.: Энергия, 1970.

3. Брихта М. (Пер. А. Власенко). Преобразователь емкость-код на основе сигма-дельта модулятора. www.compitech.ru/html.cgi/archiv/06-01/stat_cdc.htm.

4. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб. пособие для вузов/ Н.Н. Евтихийев, Я.А. Купершмидт, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скугаров. Под общ. ред. Н.Н. Евтихьева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 352.

5. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. – Л.: Энергия, 1969. – С. 240.

6. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – С. 320.

7. Минаев И.Г., Мастепаненко М.А. Информационно-измерительная система контроля уровня различных жидкостей// Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2010. – №3. – С. 61-63.

8. Патент 2407993 Российская Федерация. МПК 8 G01F23/24. Емкостной способ измерения уровня жидкостей и устройство для его осуществления / Минаев И.Г., Мастепаненко М.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ПО Ставропольский государственный аграрный университет. – №2009141472/28; заявл. 09.11.2009; опубл. 27.12.2010. Бюл. №36. – С. 2.

9. Патент України №30145 по заявці у 2007 12622 від 14.11.2007. Ємнісний датчик рівня / Шарапов В.М., Базіло К.В.

10. Патент України по заявці у 2008 00967 від 28.01.2008. Ємнісний датчик рівня / Шарапов В.М., Базіло К.В.

11. Патент 2423679, Российская Федерация, МПК 9 G01L9/12. Измерительный преобразователь давления / Минаев И.Г., Шарапов В.М., Самойленко В.В.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «Ставропольский государственный аграрный университет» (RU). – №2010115873/28; заявл. 21.03.2010; опубл. 10.07.2011. Бюл. №19, 2010.

12. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи. – Киев: Вища школа. 1981. – С. 296.

13. Полищук Е.С., Дорожовец М.М., Стаднык Б.И., Ивахив О.В., Бойко Т.Г., Ковальчик А. Устройства и методы измерений

неэлектрических величин / Под ред. проф. Е.С. Полищука. – Львов: Бескид Бит, 2008. – С. 618. (На укр. яз.).

14. Ренне В.Т. Электрические конденсаторы. – Л.: Энергия, 1969. – С. 592.

15. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник. – М.: Техносфера, 2005. – С. 592.

16. Емкостные датчики. Шарапов В.М., Минаев И.Г., Базило К.В., Куницкая Л.Г., Сотула Ж.В. / Под. ред. В.М. Шарапова. – Черкассы: Брама-Украина, 2010. – С. 184.

17. Шарапов В.М., Базило К.В. Емкостные датчики уровня // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2007. – №3-4.

18. Шарапов В.М., Базило К.В. Повышение технических характеристик емкостных

датчиков уровня // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2008. – №1.

19. Ушкур Д.Г. Микроконтроллерное устройство для исследования диэлектрических

свойств биологических объектов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008 – №1. – С. 50-51

20. Jan Zakrzewski. Czujniki i przetworniki pomiarowe. Podręcznik problemowe. Gliwice. 2004.

21. Schaumburg H. Sensoren. Band 3. B.G. Teubner Stuttgart: 1992.

22. Schaumburg H. (Hrsg.) Sensoranwendungen. Band 8. B.G. Teubner Stuttgart: 1995.

23. Jorg Hoffman. Tashenbuch der Messtechnik. Leipzig: Fachbuchverlag: 2000.

24. www.baumerelectric.com

25. www.endress.com

26. www.ifm-electronic.com

27. www.jumo.de

28. www.krohne.com

29. www.omron.com

30. www.ad.siemens.de

31. www.vegacontrols.co.uk
32. www.welotec.de
33. www.balluff.com
34. www.ege-elektronik.com
35. www.bannerengineering.com
36. www.sick.com
37. www.fraba.com
38. www.bdsensors.de
39. www.hlplanar.de
40. www.meshanotron.com
41. www.sensor.ru
42. www.terraelectronica.ru
43. www.turck.ru
44. www.megasensor.com
45. www.imrad.kiev.ua
46. www.trigla.kiev.ua
47. www.npoei.ru

9 ТАРАУ. ПЬЕЗОЭЛЕКТРЛІК ДАТЧИКТЕР

9.1. Жалпы мәліметтер

Пьезоэлектрлік датчиктердің жұмыс принципі тікелей немесе кері пьезоэлектрлік эффектін қолдануға негізделген. Тікелей пьезоэлектрлік эффектінң мәні – белгілі бір диэлектриктер (пьезоэлектриктер, сегнетоэлектриктер, ферроэлектриктер) механикалық кернеуге ұшырағанда олардың материалында электрлік поляризацияның пайда болуы.

Кері пьезоэлектрлік эффектi – керісінше, электрлік поляризацияның пьезоматериалда механикалық кернеу тудыруымен немесе пьезоэлементтердің геометриялық өлшемдерінің өзгеруімен сипатталады.

Басқаша айтқанда, тікелей пьезоэффект – пьезоэлектрлік материалға механикалық күш әсер еткенде электр зарядының

пайда болуы, ал кері пьезоэффект – пьезоэлементті электр кернеу көзіне қосқанда механикалық тербелістердің пайда болуы.

Пьезоэлектрлік эффектінің ерекшелігі – оның таңбаға сезімталдығы: кристалды сығудан кері кернеуге (созуға) өткенде заряд таңбасы өзгереді, сондай-ақ поляризация өрісінің бағыты өзгергенде де деформация бағыты өзгереді.

Пьезоэлектрлік құбылысты оған жақын құбылыс – электрострикциямен шатастырмау керек. Электрострикция кезінде де сыртқы күш әсерінен диэлектриктің поляризациясы пайда болады, алайда электрострикцияда поляризация қолданылған механикалық кернеудің квадратына пропорционал және қолданылған күштің таңбасы өзгерсе де, поляризация таңбасы өзгермейді. Электрострикция көбіне пьезоэлектрлік эффектпен салыстырғанда әлсіз білінеді, сондықтан егер пьезоэффект бар болса, электрострикцияны елеуге болады [18-22].

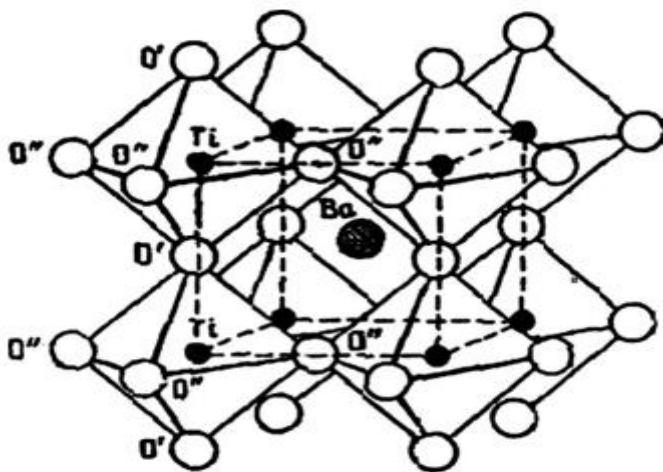
Осы физикалық эффектілерге жақын тағы бір құбылыс – пьезоэлектрлік эффект, оның мәні – қыздыру нәтижесінде поляризацияның пайда болуы. Пьезоэлектриктерді жобалағанда және қолданғанда пьезоэлектрлік құбылысты ескеру қажет. Мысалы, қорғасын цирконат-титанаты сияқты заманауи пьезоэлектрлік керамикаларда температура өзгерісінен туындайтын поляризация өлшеу нәтижелерінде елеулі қателіктерге әкелуі мүмкін.

Пьезокерамикалық материалдардың анизотропиясы

Кристалды заттардың көптеген қасиеттері – векторлық немесе тензорлық сипатта болады және кристаллографиялық бағыттарға тәуелді әртүрлі мәнге ие. Мысалы, сызықтық жылулық ұлғаю коэффициенті, диффузия, жылу өткізгіштік, серпімділік модулі, меншікті электрлік кедергі, сыну көрсеткіші немесе диэлектрлік өтімділік. Бұл қасиеттердің анизотропиясы кристалл торының симметриясымен байланысты [8, 10].

Көпкристалды керамика көптеген ретсіз бағытталған кристалдық дәндерден тұратындықтан, жалпы алғанда изотропты болуы тиіс. Алайда текстураланған керамикада, яғни кристалдық фазаның дәндері белгілі бір бағытта бағытталған болса, анизотропия байқалады.

Сондай-ақ барий титанаты, қорғасын цирконат-титанаты (ҚЦТ) сияқты заттардан жасалған, алдын ала электр өрісінде қыздырылып поляризацияланған сегнетоэлектрлік керамика да анизотропты қасиетке ие [1, 2].



9.1-сурет. Барий титанатының құрылымы

Мысал ретінде тәжірибеде жиі қолданылатын пьезокерамикалық материал – барий титанатын қарастырайық.

Барий титанатының кристалдық құрылымы – перовскит құрылымы, ол 9.1-суретте көрсетілген. Бұл құрылым кубтық, оның бұрыштарында Ba^{2+} иондары, қыр орталарында O^{2-} иондары, ал текше ортасында Ti^{4+} ионы орналасқан. Мұндағы маңызды жайт – титан ионы алты оттегі ионымен қоршалып, TiO_6 октаэдрін түзеді [10].

Кюри температурасынан жоғары кезде TiO_6 октаэдрі симметрия центріне ие болады, сондықтан дипольдік момент

нөлге тең. Ал титан ионы оттектен иондарының біріне қатысты ығысқанда, октаэдр диполь моментіне ие болады.

BaTiO_3 -тегі сегнетоэлектрлік қасиеттердің пайда болуы – бұл поляризациялық «катастрофаның» нәтижесі. Бұл құбылыста поляризация туындатқан электр өрісі иондар арасындағы серпімді қалпына келтіруші күштерге қарағанда тезірек өседі.

Кластерлік қосылыстар, яғни металл атомы мен оған байланысқан лигандтардан (металдық немесе ковалентті байланысқан атомдар топтары) тұратын жүйелер, әдетте негізгі электрон күйінің немесе оған жақын қозған күйлердің вырождениемен сипатталады.

Ядролардың қозғалысын осындай электрондық вырождение жағдайында сипаттау үшін Ян–Теллер теоремасы қолданылады [10]. Керамикада, әсіресе төмен симметриялы құрылымдарда, көбінесе псевдо-Ян–Теллер эффектісі орын алады. Бұл жағдайда виброндық теңдеулер жүйесін шешу қажет, ол үшін адиабаталық потенциалдарды білу талап етіледі [18, 19].

Перевскит құрылымына ие сегнетоэлектриктерде көптеген Ян–Теллер орталықтары болады. Олар Ti , Zr сияқты ауысу металдары атомдарын қамтитын кластерлер. Біздің мақсат үшін маңыздысы – бұл орталықтардың электрондық (нақтырақ – псевдовырожденное) күйде болуы.

Бұл сегнетоэлектриктер жоғары симметриялы кристалл торына ие. Мұндай симметриялы құрылымдардың бастапқыда дипольдік моменттері болмайды, бірақ фазалық сегнетоэлектрлік ауысу кезінде дипольдер пайда болып, барлық кристаллға немесе оның жеке домендеріне электрлік поляризация туындайды.

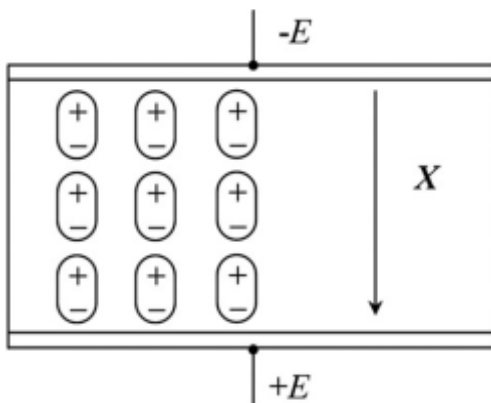
Перевскит құрылымындағы сегнетоэлектрикте титан атомдарының кластерлері жалпы оттектен атомдары арқылы бір-бірімен тығыз байланысқандықтан, кооперативті псевдо-Ян–Теллер эффектісі орын алады.

Кластерлер арасындағы фонондық байланыс арқылы қосымша виброндық параметр енгізу кристалдың макрополяризацияланған күйге құрылымдық фазалық ауысуын түсіндіруге мүмкіндік береді. Бұл ауысу: – қажетті температураны таңдау арқылы (сегнетоэлектрлік күйге өту) немесе – сыртқы электр өрісін қолдану арқылы (керамиканы поляризациялау) жүзеге асырылады.

Бұл кезде виброндық байланыспен өзара байланысқан Ян–Теллер кластерлері тобы – домен түзеді. Поляризацияланған домендердің бір бағытта орналасуы – таныс физикалық эффектілердің (мысалы, айқын пьезоэффект, диэлектрлік анизотропия) себебі.

Домен ішіндегі поляризация табиғатын білу – керамикадағы айқын анизотропты өткізгіштік механизмін түсінуге мүмкіндік береді.

9.2-суретте көрсетілгендей кернеу түсіру арқылы біз домендерді поляризациялап және белгілі бір бағытта орналастыра аламыз.



9.2-сурет. Пьезокерамиканың домендік құрылымы

Домендер арасындағы орта – бұл да кристалдық қатты ерітінді, бірақ мұндағы атомдар домен ішіндегіден өзгеше фонондық байланыспен байланысқан. Бұл ортада Ян-Теллер

орталықтарының виброндық корреляциясы жоқ. Дегенмен, поляризацияланған домендердің электр өрісінің әсерінен бұл орта арқылы да электр өткізгіштік жүруі мүмкін.

Электрондар астар электродынан ортаға инъекцияланады және домен кластерлері арасында жартылай өткізгіштікке ұқсас механизммен, бірақ домен өрісімен күшейтілген түрде тасымалданады.

Кристалл торындағы атомдар тізбегі арқылы домен кластеріне қарай электронның қозғалысы оңай жүреді.

Алайда электронның домен ішіндегі одан әрі қозғалысы поляризация әсерінен тежелуі тиіс сияқты көрінеді.

Бұл мәселе шешіледі, егер домен ішінде сегнетоэлектрлік қасиеттің қалыптасуына әкелген химиялық және физикалық әсерлердің табиғатын ескерсек.

Атомдардың орын ауыстыруынан туындаған дипольдік тұрақсыздық – бұл кластер ішіндегі негізгі және қозған күйлердің виброндық араласуының нәтижесі.

Бұл құбылыс валенттік аймақ пен өткізгіштік аймақтың араласуына балама, бірақ домен ішінде локализацияланған түрде жүреді.

Әрбір кластер ішіндегі химиялық байланыстардың делокализацияланған сипаты, сондай-ақ кластер ішіндегі және кластерлер арасындағы «жайылған» тербелістердің виброндық белсенділігі – электрондардың кластер ішінде еркін қозғалуын қамтамасыз етеді.

Осылайша, 9.2-суретте көрсетілгендей, Х осі бойымен электрон тасымалы едәуір жеңіл жүзеге асады, ал пьезоэлементтің бүйір қабырғаларына кернеу түсірілгендегі перпендикуляр бағыттағы тасымалмен салыстырғанда тиімдірек болады.

9.2. Пьезоэлектрлік материалдар

Пьезоэлектрлік материалдардан датчиктердің сезімтал элементтері болып табылатын пьезоэлементтер жасалады.

Пьезоэлемент – бұл пьезоэлектрлік материалдан жасалған, бетіне металл электродтар жағындалған құрылғы (9.3-сурет қараңыз).



9.3-сурет. Пьезокерамикалық элементтер [19]

Пьезоэлектрлік материалдар ретінде мыналар қолданылады:

- монокристалды материалдар (кварц, литий ниобаты, сегнет тұзы және т.б.);

- поликристалды материалдар (пьезокерамика).

Кварцтың артықшылықтарына мыналар жатады:

- температура мен ылғалдылыққа төзімділік,
- механикалық беріктік.

Кварцтың сызықтық ұлғаю коэффициенті өте аз, оның пьезомодулі температураға тәуелсіз – 200 °C-қа дейін өзгермейді, ал 200...500 °C аралығында тек аздап өзгереді.

Кварцтың меншікті электрлік кедергісі шамамен 10^{16} Ом/м,

дегенмен ол температураға қатты тәуелді және әртүрлі кристалл осьтері бағытында әртүрлі мәнге ие болады.

$$d_{ij} \left(10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{Н}} \right)$$

Кварцтың пьезомодуль мәндері

Кварцтың пьезомодуль мәндері келесідей:

$$d_{21} = -d_{11} = 2,31 \text{ пК/Н};$$

$$d_{25} = -d_{14} = 0,67 \text{ пК/Н};$$

$$d_{26} = 4,62 \text{ пК/Н}.$$

Қалған пьезомодульдер нөлге тең.

Қазіргі таңда датчиктерді жасау үшін ең кең қолданылатын материалдар – пьезокерамикалық материалдар, олар алғаш рет 1944 жылы КСРО-да синтезделген [4, 19].

Пьезоэлектрлік керамикалық материалдар (ПКМ) – бұл сегнетоэлектрлік қосылыстар немесе олардың қатты ерітінділері, олар түрлі оксидтер мен тұздардың қоспасынан синтезделу арқылы алынады (9.1-кесте қараңыз).

9.1-кесте. Пьезокерамикалық материалдардың параметрлері

Материал	Температуралық сезгіштік m_{BC}	Абсолюттық тығыздық, г/см^3	Пьезоотқыт-тік 10^{-11}Кл/Н-м $d_{31} \quad d_{33}$	Сезімталдық 10^{-11}Кл/Н/м	Салыстырмалы электрлік өтімділігі, ϵ_r	Танген-ны дәре- 10^{-3}	Модуль Y , ГПа	Электр-тік Температураль $T_{10} \text{ } ^\circ\text{C}$	Сыз-комм-пак-тулену дәсл, 10^{-8}C	Меха-ника-лық Q_n
ЦТС-16	0,5	6,9	-150...-80	165	4800	2	78	—	1,5	60
ЦТС-9(III)	0,6	6,6	-150...-340	105	4800	<0,03	88	—	1,5	60
ЦТС-20	0,4	6,9	-180...185	85	3800	<0,03	59	—	1,5	60
ЦТС-30	6,5	6,9	-195...340	105	4800	<0,03	88	—	1,5	60
ЦТС-26	6,3	6,3	-150...80	45,5	4800	<0,03	86	775	—	60
ЦТС-35	6,8	6,5	-305...160	100	4800	<0,0	75	365	400	60
ЦТС-36	6,6	6,8	-330...800	10	4800	—	75	—	610	30
ЦТС-42	6,6	6,6	-180...1800	9	4800	—	—	350	900	30
ЦТС-42	0,44	6,4	—	15	4000	—	—	1,0	350	60
НТС-3	0,44	6,0	—	<0,3	4000	—	—	90	330	60
ННВ-1	0,44	6,0	—	0	3500	—	—	10	350	60
ГНВ-2	0,06	0,0	—	<0,03	—	—	—	—	300	60

Қазіргі заманғы пьезокерамикалық материалдардың (ПКМ) негізі – бұл қорғасын цирконат-титанатының (ҚЦТ немесе PZT) әртүрлі компоненттер мен қоспалармен модификацияланған қатты ерітінділері.

– Сондай-ақ барий титанаты (БТ), қорғасын титанаты (ҚТ), қорғасын ниобаты (ҚН), висмут титанаты (ВТ) және басқа негіздегі ПКМ де шығарылады.

– Стандартты керамикалық үлгілер негізінде анықталатын ПКМ-нің негізгі қасиеттері мыналар:

– жоғары диэлектрлік өтімділік мәндері;

– домендер түріндегі өздігінен пайда болатын поляризация;

– гистерезис ілмектерінің болуы (поляризация – электр өрісі, деформация – электр өрісі тәуелділіктерінде);

– температура артқан сайын диэлектрлік өтімділіктің өсуі;

– Кюри температурасының болуы – бұл диэлектрлік өтімділік – температура қисығында сегнетоэлектрлік қасиеттер жоғалатын шекті нүкте;

– тұрақты электр өрісімен әсер еткеннен кейін күйдіру арқылы алынған үлгілер бетінде қалдық поляризация мен қосарланған электр қабатының пайда болуы – бұл пьезоэффекттің пайда болуына (яғни механикалық энергияны электрлікке және керісінше түрлендіруге) мүмкіндік береді.

ПКМ-нің қолдану салаларына байланысты жіктелуі:

1. «Сегнетожұмсақ» ПКМ

– Жоғары сезімталдыққа ие түрлендіргіштерді жасау үшін қолданылады.

– Олар сыртқы дестабилизациялаушы факторларға (жоғары температура, электрлік және механикалық өрістер) катал талап қойылмайтын жағдайларда қолданылады.

Мысалдар: ҚЦТ-19 және ҚЦТ-19 (цт) – соңғысы жоғары пьезомодуль мәндеріне ие модификация.

Бұл нәтижеге цирконий және титан оксидтерін жоғары белсенді цирконат титанатпен (цт) алмастыру арқылы қол жеткізілді.

ҚЦТ-36 – қабылдау режимінде жоғары сезімталдыққа және төмен диэлектрлік өтімділікке ие. Әдетте ыстық престелген блоктар түрінде шығарылады. Негізгі қолдану саласы – ультрадыбыстық кідіріс желілерінің түрлендіргіштері. НҚЦТ-2 – жоғары диэлектрлік өтімділік және жоғары пьезомодульдерге ие. Жоғары сезімтал телефон құрылғыларында қолданылады.

2. «Сегнетоқатты» ПКМ

– Күшті электр немесе механикалық өрістер әсер ететін жағдайда қабылдау және/немесе генерация режимдерінде жұмыс істейтін түрлендіргіштерді жасауға қолданылады. Мысалдар:

– ҚЦТ-23, ҚЦТСт-3 (цт) және ҚТБС-7.

– ҚЦТ-23 және ҚЦТСт-3 (цт) – тұтандыру және гидроакустикалық жүйелердегі пьезоэлементтерде өздерін жақсы көрсетті.

– ҚТБС-7 – жоғары қуатты пьезотрансформаторлар мен ультрадыбыстық генераторлар үшін ұсынылады.

3. Жиілік бойынша таңдайтын құрылғыларға арналған ПКМ

– Көлемдік және беткі акустикалық толқындарда жұмыс істейтін жиілік таңдаушы құрылғыларға арналған пьезоэлементтер жасау үшін қолданылады. Мысалдар:

– ҚЦТ-38, ҚЦТ-39, ҚЦТ-40 – көлемдік толқындардың планарлық мода сүзгілеріне арналған.

– ҚЦТ-35 және ҚЦТ-35У – қалыңдық бойымен сығылу/созылу модаларында жұмыс істейтін көлемдік толқын сүзгілеріне арналған.

– ҚЦТ-33 – беткі акустикалық толқындарға арналған сүзгілерге қолданылады, жиілігі 40 МГц-ке дейін.

4. Жоғары температуралы ПКМ

– 250 °С және одан жоғары температурада жұмыс істейтін пьезоэлементтерді жасауға арналған. Мысалдар:

– ҚЦТ-21, ҚЦТ-26, ТНаВ-1 және ТНВ-1 – жұмыс температурасы 250–750 °С.

– ҚЦТ-26М және ТНаВ-1М – пьезомодульдің (d_{33}) температуралық тұрақтылығын арттырылған модификациялар.

5. Электрооптикалық материалдар

– Жарық модуляциялайтын құрылғылардың (соның ішінде қорғаныс жүйелерінің және сандық индикаторлардың) активті элементтерін жасау үшін қолданылады. Мысалдар:

– ҚЦТЛ-А – қалдық поляризациясы бар элементтер үшін (Поккельс эффекті режимінде).

– Жоғары пьезо- және пироэлектрлік параметрлерімен ерекшеленеді.

– ҚЦТЛ-Б және ҚЦТЛ-В – Керр эффекті режимінде жұмыс істейтін жарық модуляторларына арналған.

Жаңа технологиялар диаметрі 3000 мм²-ден асатын, 0,5-8 мкм диапазонында 98% жарық өткізу қабілеті бар дерлік кеуексіз керамика мен ЭО-пластиналарды жасауға мүмкіндік береді.

9.1-кестеде жоғарыда сипатталған пьезокерамикалық материалдардың негізгі сипаттамалары келтірілген.

Қосымша ақпаратты келесі сайттардан алуға болады:

– ОАО «ЭЛПА» (Зеленоград, Ресей)

– ОАО «Аврора» (Волгоград, Ресей)

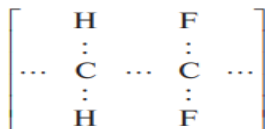
Формулалар мен есептеу әдістерін [18-20] дереккөздерінен табуға болады.

Пьезоэлектрлік пленкалар

1969 жылы Каваи [16] поливинилиденфторид (ПВДФ, PVDF) пленкаларында күшті пьезоэлектрлік эффектін анықтады. Ал 1975 жылы Pioneer Ltd компаниясы ПВДФ негізінде алғашқы динамиктер мен құлаққаптарды шығарды.

ПВДФ – жартылай кристалды полимер, оның кристалдану дәрежесі 50%. Басқа жартылай кристалды полимерлер сияқты, ПВДФ құрылымы қабатты, аморфты аймақтары бар.

Оның химиялық формуласы қайталанатын $\text{CF}_2\text{--CH}_2$ звеноларынан тұрады.



ПВДФ полимерінің молекулалық массасы шамамен 105, бұл шамамен 2000 қайталанатын звеноға сәйкес келеді. Пленка көрінетін және жақын инфрақызыл (ИК) диапазонда дерлік мөлдір, ал электромагниттік спектрдің алыс ИК аймағындағы сәулеленуді жақсы сіңіреді. Тығыздығы шамамен 1780 кг/м^3 .

ПВДФ – механикалық берік және иілгіш материал. Оны пьезодатчиктерде қолдану үшін әдетте бір немесе екі бағытта созады, осылайша пленканың өлшемдері бірнеше есеге ұлғаяды.

Упругілік коэффициенттері (мысалы, Юнг модулі) созылу дәрежесіне байланысты. Мысалы:

- Егер пленка 140°C температурасында 4:1 қатынасында созылса, Юнг модулі – 2,1 ГПа,
- Ал 6,8:1 қатынасында созылғанда – 4,1 ГПа.

Пленканың меншікті электрлік кедергісі де оның созылу дәрежесіне байланысты өзгереді:

- Шағын созылу кезінде – $6,3 \cdot 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{см}$,
- Ал созылу дәрежесі 7:1 болғанда – $2 \cdot 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

ПВДФ пленкаларының пьезоэлектрлік тұрақтылары BaTiO_3 немесе ҚЦТ (PZT) сияқты кейбір материалдарға карағанда төмен болғанымен, олардың ерекше артықшылығы – өте күшті айнымалы электр өрістерінде де поляризацияны сақтау қабілеті. Мысалы, ПВДФ пленкасының d_{31} мәні ҚЦТ-мен салыстырғанда 10 есе аз, алайда ПВДФ материалында

рұқсат етілетін электр өрісі ҚЦТ-ға қарағанда 100 есе жоғары, сондықтан деформация шегі одан бір деңгейге үлкен болуы мүмкін.

Сонымен қатар, ПВДФ пленкалары уақыт бойынша өте тұрақты: 60 °С температурасында алты ай бойы сақталған кезде сезімталдығы тек 1–2% ғана төмендейді. Пьезопленкалардың пьезокерамикамен салыстырғандағы тағы бір маңызды артықшылығы – олардың акустикалық импедансының төмендігі, ол суға, адам тіндеріне және органикалық материалдарға жақын. Мысалы: Пьезопленканың акустикалық импедансы судан тек 2,6 есе үлкен, Ал пьезокерамикада ол шамамен 11 есе жоғары. Импеданстардың жақындығы – суды немесе тіндерді қолданатын ортада акустикалық сигналдарды тиімдірек беру мүмкіндігін қамтамасыз етеді. Пьезоэлектрлік пленкалардың бірегей қасиеттері [16]:

Кең жиілік диапазоны – 0,001...10⁹ Гц; Динамикалық диапазон – μ Торр-дан Мбар-ға дейін; Акустикалық импеданстың төмендігі (суға, адам тіндеріне және желімдерге жақын); Жоғары серпімділік; Шығыс кернеудің жоғары мәні – бірдей күште пьезокерамикаға қарағанда 10 есе көп; Жоғары электр беріктігі – 75 В/мкм-ге дейінгі өрістерге төзімді, бұл мәндерде көптеген пьезокерамикалар поляризациясын жоғалтады; Жоғары механикалық беріктік және соққыға төзімділік – 10⁹-10¹⁰ Па шегінде; Жоғары тұрақтылық – ылғалға төзімділік (ылғал сіңіргіштігі < 0,02%), – көптеген химиялық реактивтерге, тотықтырғыштарға, ультракүлгін және ядролық сәулелерге төзімділік; Кез келген пішіндегі құрылымдарды жасауға болады; Кәдімгі желімдермен біріктіруге болады.

9.2-кесте – Пьезоэлектрлік пленкалардың негізгі сипаттамалары [16]

Белгілеу	Параметр	ПВДФ	Сополимер	Өлшем бірлігі
t	Қалыңдық	9, 28, 52, 110	$< 1 \dots 1200$	мкм
d_{31}	Пьезоэлектрлік модульдер	23	11	10^{-12} м/м немесе В/Н, Кл/м ² , Н/м ²
d_{33}		-33	-38	
g_{31}	Пьезоэлектрлік кернеу коэффициенттері	216	162	10^{-3} В·м/Н немесе Н/м ² , Кл/м ²
g_{33}		-330	-542	
K_{31}	Электромеханикалық байланыс коэффициенті	12 %	20 %	%
K_t		14 %	25–29 %	%
C	Сыйымдылық	380 (28 мкм кезінде)	68 (100 мкм кезінде)	пФ/см ² , 1 кГц жиілікте
Y	Юнг модулі	2–4	3–5	10^9 Н/м ²

9.2-кестенің жалғасы

Белгілеу	Параметр	ПВДФ	Сополимер	Өлшем бірлігі
V_0	Дыбыс жылдамдығы	1,5	2,3	10^3 м/с
	салыстырмалы ұзаруы			
	қалыңдығы	2,2	2,4	мкм
P	Пьезоэлектрлік коэффициент	30	40	10^{-6}
ε	Диэлектрлік өтімділік	106–113	65–75	10^{-12} Ф/м
$\varepsilon/\varepsilon_0$	Салыстырмалы диэлектрлік өтімділік	12–13	7–8	
ρ_m	Тығыздық	1,78	1,82	10^3 кг/м ³
ρ_0	Көлемдік меншікті кедергі	$> 10^{13} 10^{13}$	$> 10^{14} 10^{14}$	Ом·м

Rs	Металданған бетінің меншікті кедергісі	< 3,0	< 3,0	Ом/аудан (NiAl үшін)
R		0,1	0,1	Ом/аудан (Ag пастасы үшін)
$\tan \delta_{f_0}$	Жоғалту бұрышының тангенсі	0,02	0,015	1 кГц
	Ағып кету шегі	45–55	20–30	10^{-6} Н/м ² (осьтік созылу)
	Температуралық диапазон	–40...100 (80)	–40...145 (115)	°C
	Ылғал сіңірілуі	< 0,02	< 0,02	%H ₂ O
	Максималды жұмыс кернеуі	750 (30)	750 (30)	В/мил (В/мкм), тұрақты кернеу, 25°C
	Беріктік кернеуі	2000 (80)	2000 (80)	В/мил (В/мкм), тұрақты кернеу, 25°C

Пьезоэлектрлік (ферроэлектрлік) материалдар сияқты, ПВДФ те пирозлектрлік қасиетке ие, яғни температура өзгерген кезде оның бетінде электрлік сигнал пайда болады. ПВДФ пленкалары инфрақызыл сәулелерді 7...20 мкм толқын ұзындықтары диапазонында күшті сіңіреді. Бұл диапазон адам денесінің жылулық сәулеленуіне сәйкес келеді. Алайда, ПВДФ пленкалары жылулық сәуле шығару энергиясын сіңіре алатын болғанымен, пирозлектрлік сенсорларда олар екі жұқа электродтың арасына орналастырылады. Бұл электродтар кейде осы диапазондағы сәулелерді едәуір дәрежеде шағылыстырады. Мұндай жағдайларда сәуле көзіне жақын орналасқан электродтың бетіне жылу сіңіргіш қабат жағылады немесе ол жоғары сіңіру қабілетіне ие нихромнан

(қорытпа) жасалады. ПВДФ негізіндегі пленкалар адамдардың қозғалысын тіркейтін датчиктер мен түнгі көру бейнекамералары және лазерлік көшіру құрылғылары сияқты күрделі құрылғыларға арналған пирозлектрлік сенсорлар жасау үшін қолданылады.

Соңғы жылдары жасалған ПВДФ сополимерлері пьезолектрлік полимер сенсорларында кеңінен қолданыс тапты. Бұл сополимерлер жоғары температураларда (135 °C дейін) жұмыс істеуге мүмкіндік береді және олардың негізінде цилиндрлік немесе жартылай сфералық пішіндегі жаңа сенсор түрлерін жасауға болады. Сонымен қатар, олардан ПВДФ пленкаларының шекті қалыңдығынан асып түсетін, мысалы, ультрақалың (200 Å) жаппамен кремний сенсорлары мен қабырғасының қалыңдығы 1200 мкм-ден асатын цилиндрлік гидролокаторлар жасауға болады. Пьезолектрлік кабельдер де осы сополимерлер негізінде іске асырылады.

Пьезокерамикалық түрлендіргіштерден айырмашылығы, пьезолектрлік пленкаларға негізделген сенсорлар кеңірек динамикалық және жиілік диапазондарына ие. Полимерлердің жұмсақ құрылымының арқасында мұндай сенсорлар кең жиілік жолағын (шамамен 0-ден 2 ГГц-ке дейін) және төмен сапа коэффициентін қамтамасыз етеді. Олар 50 кГц-ке дейінгі жиілікте жұмыс істейтін ультрадыбыстық техникада кеңінен қолданылады. Ал 500 кГц-тен жоғары жиіліктердегі ультрадыбыстық таратқыштарда пьезодатчиктердің жиілігі d_{33} коэффициентімен анықталады. Максималды энергия беру қалыңдығы бойынша резонанстық жиілікте байқалады. Қалыңдығы 28 мкм болатын пленкалық пьезолектрлік сенсор үшін жарты толқындық резонанс шамамен 40 МГц жиілікте байқалады. Жалпы, резонанстық жиілік пленка қалыңдығына тәуелді: қалың пленкалар үшін (≈ 1000 мкм) бірнеше МГц-ке дейін, ал жұқа пленкалар үшін (> 100 МГц) дейін жетеді.

Дегенмен, пьезоэлектрлік пленкалар негізіндегі сенсорлардың кемшіліктері де бар. Олар, әсіресе резонанстық және төмен жиіліктерде, пьезокерамикалық сенсорлармен салыстырғанда электромеханикалық байланыстың әлсіз коэффициентіне ие. Сополимерлерден жасалған пленкаларды 135°C-тан аспайтын температурада ғана қолдануға және сақтауға болады, ал ПВДФ пленкаларын 100 °C-қа дейінгі температурада қолдану ұсынылады.

ЦТС негізіндегі жұқа пленкалар AlN және ZnO-мен салыстырғанда үлкен пьезоэлектрлік модульге ие, бұл оларды жылулық сәулеленуді тіркеуге арналған детекторларда қолдануға перспективті етеді. ЦТС қабаттарын жасау үшін көптеген әдістер қолданылады: электрон-сәулелік бүрку, радиожиіліктік шашырату, иондық тұндыру, эпитаксиялық өсіру, магнетрондық шашырату, лазерлік бүрку және зольгельдік технологиялар [16].

9.3. Пьезоэлектрлік датчиктердің жіктелуі

Пьезоэлектрлік датчиктерді олардың жұмыс істеу негізінде жатқан физикалық құбылыстарға байланысты екі негізгі класқа бөлуге болады [19].

Бірінші класқа тікелей пьезоэффектті пайдаланатын датчиктер жатады. Бұл датчиктер сызықтық және тербелмелі үдеуді, динамикалық және квазистатикалық қысым мен күшті, дыбыстық және ультрадыбыстық өрістердің параметрлерін және басқа да шамаларды өлшеу үшін қолданылады.

Екінші, кем емес ауқымды класқа резонанстық пьезодатчиктер деп аталатын құрылғылар жатады [12, 19]. Олар кері пьезоэффектке негізделуі мүмкін (пьезоэлектрлік резонаторларға негізделген резонанстық пьезотүрлендіргіштер) немесе кері және тікелей пьезоэффекттерді біріктіре отырып жұмыс істейді (пьезоэлектрлік трансформаторларға негізделген резонанстық

пьезодатчиктер). Сонымен қатар, бұл құрылғылардың жұмыс істеу принципі басқа да физикалық құбылыстарға (созылу сезімталдығы, акустикалық және температуралық сезімталдық және т.б.) негізделуі мүмкін. Мұндай құрылғылар статикалық және динамикалық қысым мен күшті, сызықтық және тербелмелі үдеуді, газдардағы заттар концентрациясын, тұтқырлықты, көлбеу бұрышын және басқа да параметрлерді өлшеу үшін қолданылады.

9.4. Пьезоэлектрлік датчиктерді зерттеу әдістері

Пьезоэлектрлік материалдардан жасалған қатты денелердің деформациялану теориясы электродинамика мен механика тоғысқан салада дамып келеді және соңғы уақытта дербес ғылыми бағыт ретінде қалыптасты [23].

Пьезоэлектрліктердің физика-математикалық қасиеттерінің анизотропиясы мен электромагниттік өрістің механикалық қозғалыстармен өзара байланысы деформация және беріктік үдерістерін сипаттауды едәуір күрделендіреді. Осыған байланысты сандық талдауға арналған математикалық әдістерді әзірлеу мен дамытуға айрықша назар аударылады.

Электроупругтық сызықтық теорияның негізгі теңдеулері [23] екі бөліктен тұрады: пьезоэффекттің механикалық жағын сипаттайтын теңдеулер (бұлар сақтау заңдары, геометриялық байланыстар негізінде алынады және кез келген сызықты орта үшін орынды), және ортадағы электрлік құбылыстарды сипаттайтын Максвелл теңдеулері. Бұл екі типтегі айнымалылардың арасындағы байланыс пьезоэффект теңдеулерімен анықталады. Механикалық жағынан бұл теңдеулерге кернеу және деформация симметриялық тензорлары кіреді, ал электрлік жағынан – электрлік индукция және электр өрісінің кернеулігі векторлары. Сызықтық байланыс коэффициенттері – кешенді шамалар. Кешенді коэффициенттерді енгізу пьезоэлектриктің

циклдік деформация жағдайындағы диссипациялық қасиеттерін ескеруге мүмкіндік береді.

Пьезоэлектрлік дене үшін анықтаушы тендеулер жүйесі 22 дифференциалдық тендеуден тұрады. Электроупругтық шеттік есептің дәл шешімін тек қарапайым геометриялық облыстар үшін ғана табуға болады. Тәжірибелік маңызы бар есептерде жуық шешімдермен шектелуге тура келеді.

Жуық шешімдерді табудың тиімді тәсілдерінің бірі – вариациялық әдістер. Вариациялық тұжырымдамаларда есеп шешімі сәйкес вариациялық принциптің функционалы стационар мәнге ие болатын функцияларды табуға негізделеді.

Пьезоэлектрлік денелерде жүретін үдерістерді терең түсіну үшін жіңішке геометриялық пішіндерге ие денелерге (мысалы, стерженьдер, жұқа дискілер мен пластиналар, сақиналар, шексіз цилиндрлер) арналған бірөлшемді есептердің шешімдері маңызды. Мұндай денелердің тербелістері скалярлық тендеулермен сипатталады және олардың дәл шешімдерін табу салыстырмалы түрде оңай.

Баламалы әдіс ретінде пьезоэлектрикті оған эквивалентті электрлік сұлбамен алмастырып, одан кейін электр тізбектерінің теориясы бойынша есептеулер жүргізу ұсынылады [10]. Бұл тәсіл пьезоэлектриктің орынбасар сұлбасы жалпы электр тізбегінің бір бөлігі ретінде қарастырылатын жағдайларда үйлестіру мен талдау үшін табиғи әдіс болып табылады. Алайда бұл әдіс механикалық және электрлік беріктік, сондай-ақ күрделі объектілердің (векторлы емес модельдермен сипатталатын) оңтайлы құрылымын анықтау секілді мәселелерді шеше алмайды.

Бірөлшемді есептер тәжірибеде ерекше маңызды. Біріншіден, бірөлшемді тербеліс режимдері көптеген нақты құрылғыларда жүзеге асады, екіншіден, физикалық тендеулердегі кешенді коэффициенттер осы бірөлшемді

тербелістерге жүргізілген эксперименттер арқылы анықталады.

Көптеген есептер осьтік симметриялы пьезоэлектрлік денелердің тербелістеріне арналған. Мұндай тербелістер физикалық тұрғыдан кеңістіктік құбылыс болса да, математикалық жағынан олар екіөлшемді тендеулермен сипатталады.

Түрлендіргіштерді талдауда автоматты басқару теориясының әдістері де кеңінен қолданылады [4, 11, 25].

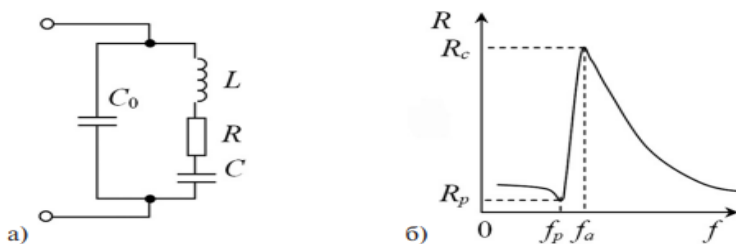
Соңында, ең дәл нәтижелерді алу үшін тәжірибелік (эксперименттік) зерттеу әдістері пайдаланылады.

9.5. Пьезоэлектрлік резонаторлар

Екі электроды бар пьезоэлементтер *резонаторлар* деп аталады. Пьезоэлектрлік (кварцты) резонаторлардың алғашқы қолданылуы – электр генераторларының жиілігін тұрақтандыру болды [6].

Пьезоэлементке берілетін электрлік кернеу (немесе механикалық күш) жиілігі оның меншікті тербеліс жиілігімен сәйкес келген жағдайда *электромеханикалық резонанс* құбылысы пайда болады. Параметрлері кеңістікте таралатын жүйелер үшін, яғни пьезоэлементтер үшін, резонанс толқын таралу бағытында бүтін санды жарты толқынның сыйып кетуімен сипатталады.

Резонатордың қарапайым баламалы электрлік сұлбасы – тізбектей-параллель жалғанған контур (9.4-сурет) – үшін бұл резонанс жағдайы индуктивтік және сыйымдылық кедергілерінің теңдігін білдіреді.



Сурет 9.4. Резонатордың баламалы электрлік сұлбасы (а) және оның типтік жиіліктік сипаттамасы (б)

Пьезоэлементте түрлі типтегі тербелістер пайда болуы мүмкін: бойлық, қалыңдығы бойынша, радиалдық, бұралмалы, иілгіш және ығысу тербелістері. Практикада резонаторда әрдайым бір-бірімен өзара байланысқан бірнеше тербеліс түрлері қатар жүреді, олар негізгі бағыттағы тербелістерге кедергі келтіреді. Сондықтан бір тербеліс түрінің басым болуын қамтамасыз етіп, қалған тербелістерді басатын жағдайларды жасау қажет.

Резонаторлардың жиі кездесетін тербеліс түрлерінің резонанстық жиіліктері мына формулалар бойынша анықталады: бойлық тербелістер үшін

$$f_p = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{Y}{\rho}}; \quad (9.1)$$

қалыңдығы бойынша ығысу тербелістері үшін:

$$f_p = \frac{n}{2a} \sqrt{\frac{Y}{\rho} \frac{1 - \delta}{(1 + \delta)(1 - 2\delta)}}; \quad (9.2)$$

радиалдық тербелістер үшін жиілік мына формуламен анықталады:

$$f_p = \frac{z_n}{2\pi r} \sqrt{\frac{Y}{\rho(1 - \delta)^2}}, \quad (9.3)$$

мұндағы:

– Y – Юнг модулі;

- ρ – пьезоэлемент материалының тығыздығы;
- δ – Пуассон коэффициенті;
- n – гармониканың рет саны;
- l, a, r – пьезоэлементтің ұзындығы, қалыңдығы және радиусы;
- z_n – Бессель функциялары арқылы анықталатын параметр.

Тәжірибеде бойлық тербелістердің резонанстық жиілігін анықтау үшін келесі жуық формула қолданылады:

$$f_p \approx \frac{c}{2l}, \quad (9.4)$$

мұндағы c – пьезоэлемент материалының ішіндегі дыбыс жылдамдығы, ал l – резонанстық өлшемі. Немесе қысқаша былай жазылады:

$$f_p \approx \frac{200}{l}, \text{ кГц.}$$

Дисктің радиалдық тербелістерінің резонанстық жиілігі [19]:

$$f_p \approx \frac{1,35c}{4r}. \quad (9.5)$$

Кварцтық резонатордың тербеліс түрі оның қиығына (кесіндісіне) байланысты. Бойлық тербелістерді қоздыру үшін х-қимасы, ал көлденең ығысу тербелістерін қоздыру үшін АТ және ВТ қималары қолданылады [6, 12].

Тұтас электродтары бар пьезоэлектрлік резонатордың резонанстық және антирезонанстық жиіліктерін балама сұлбаның параметрлері арқылы өрнектеуге болады (9.4-суретті қараңыз):

$$\left. \begin{aligned} f_p &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}; \\ f_a &= \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{LCC_0}{C+C_0}}} \end{aligned} \right\} \quad (9.6)$$

Пьезорезонатордың сапалылығы (добротность) келесі өрнек арқылы анықталады:

$$Q = \frac{2\pi f_p L}{R}. \quad (9.7)$$

Пьезоэлектрлік резонаторлардың электрфизикалық және механикалық параметрлерін ескеретін баламалы сұлбалары, сондай-ақ резонаторларды есептеу әдістері [8, 10, 19] еңбектерінде келтірілген.

9.6. Пьезокерамикалық трансформаторлар

Пьезоэлектрлік трансформатор деп үш немесе одан да көп электродтары бар, бір немесе бірнеше электр сигнал көздері мен жүктемелерге қосылатын пьезоэлектрлік элементті атайды [9, 10, 19, 21]. Ең қарапайым жағдайда пьезоэлектрлік трансформатор екі электрод жүйесін құрайтын үш электродты пьезоэлементтен тұрады. Пьезоэлектрлік трансформатордың электр сигналының көзіне қосылған бөлігін қоздырғыш, ал жүктемеге қосылған бөлігін генератор деп атайды [9].

Қоздырғыш бөлігінде айнымалы электрлік сигнал кері пьезоэффект әсерінен акустикалық толқындар энергиясына айналады. Бұл толқындар электродтардың шекарасынан бастап трансформатордың барлық көлеміне таралады. Трансформатордың механикалық резонанстық жиіліктерінің біріне сәйкес келетін жиілікте максимал амплитудасы бар тұрған толқын пайда болады. Пьезоэлектрлік

трансформатордың генератор бөлігінде механикалық кернеу тікелей пьезоэффект арқылы қайта электрлік сигналға түрленеді. Резонанстық жиіліктерде түрлендіру коэффициенті ең үлкен мәнге ие болады.

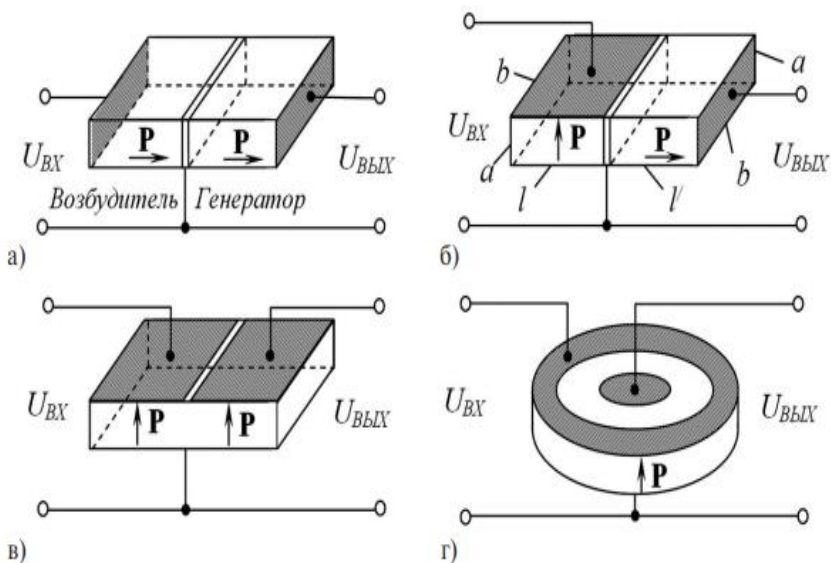
Пьезоэлектрлік трансформаторлар, негізінен, кернеу трансформаторлары болып саналады. Дегенмен кернеу бойынша түрлендіру коэффициенті төмен, бірақ бірнеше амперге дейін үлкен токтармен жұмыс істей алатын трансформаторлар да жасалған [9]. Олар пьезоэлектрлік ток трансформаторлары деп аталады.

Қоздырғыш және генераторда энергияны түрлендіру әдісіне қарай пьезоэлектрлік трансформаторлар келесі түрлерге жіктеледі:

- көлденең-көлденең;
- бойлық-бойлық;
- көлденең-бойлық;
- бойлық-көлденең.

Тербеліс түріне байланысты пьезоэлектрлік трансформаторлар бойлық, радиалдық, ығысу және иілу тербелістерін қоздыратын түрлерге бөлінеді.

Пьезоэлектрлік трансформаторлардың кейбір конструкциялары 9.5-суретте келтірілген [9, 14]. Қоздырғыш пен генераторы бойлық поляризацияланған трансформатор (9.5, а-сурет) сақиналы типті трансформатор деп аталады, ал көлденең-бойлық және көлденең поляризацияланған түрлері (9.5, б және в-сурет) – көлденең типті трансформаторлар. Дискілік трансформатор (9.5, г-сурет) та көлденең типті трансформаторға жатады, бірақ оның жұмыс ерекшеліктері болғандықтан, дискілік трансформаторларды жеке топқа бөледі. Бойлық-бойлық және көлденең-көлденең трансформаторлар симметриялы болып келеді. Олардың түрлендіру коэффициенті геометриялық өлшемдерге тәуелсіз болып, бірнеше ондаған, тіпті жүздеген бірлікке жетуі мүмкін [9].



Сурет 9.5. Пьезоэлектрлік трансформаторлардың конструкциялары:

а – бойлық-бойлық; б – көлденең-бойлық; в – көлденең-бойлық; г – дискілік типті трансформатор.

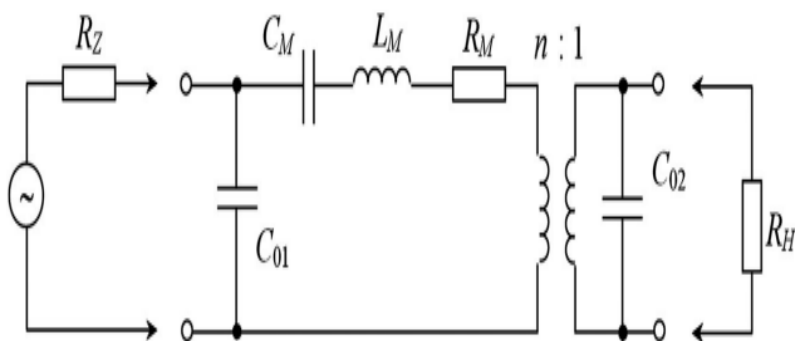
Поперечно-продольный трансформатор симметриясыз болып табылады және оның түрлендіру коэффициенті геометриялық өлшемдерінің арақатынасына байланысты. Бұл трансформатор конструкциясы практикалық тұрғыдан ең үлкен қызығушылық тудырады. Поперечно-продольный трансформатордың түрлендіру коэффициенті бірнеше мыңға дейін жетуі мүмкін [10].

Дискілі трансформатордың түрлендіру коэффициенті поперечный трансформаторға қарағанда жоғары. Егер тербелістер радиалды режимде қоздырылса, онда энергия ағыны цилиндрлік бет арқылы кез келген радиус үшін тұрақты болып қалады және, тиісінше, дискінің орталығында энергия концентрациясы орын алады. Егер трансформатордың

генераторлық секциясы дискінің орталығына орналастырылса, энергияның шоғырлануы есебінен түрлендіру коэффициенті қосымша артады [9].

Кіріс және шығыс импеданстары, негізінен, электрод жүйелерінің сыйымдылықтарына байланысты анықталады.

Пьезоэлектрлік трансформаторлардың жұмысы, сондай-ақ пьезоэлектрлік резонаторлардың жұмысы сияқты, баламалы (эквиваленттік) схемалар арқылы талдануы мүмкін. Пьезоэлектрлік трансформатордың эквиваленттік схемасы екі пьезоэлектрлік резонатордың схемасынан тұрады, олардың бірі – қоздырғыш, ал екіншісі – генератор. Дискілі пьезотрансформатор үшін бұл схема 9.6-суретте көрсетілген [9, 10].



9.6-сурет. Дискілі пьезотрансформатордың қарапайымдатылған эквиваленттік сұлбасы

Трансформатор параметрлері арқылы алынған кернеу бойынша трансформация коэффициентінің өрнегі: көлденең-бойлық түрлендіргіш үшін

$$K_{u0} = \frac{4Q_M}{\pi^2} \frac{Y_{33}^E g_{33} d_{31}}{1 - k_{33}^2} \frac{l}{a}; \quad (9.8)$$

бойлық-бойлық түрлендіргіш үшін

$$K_{u0} = \frac{4Q_M k_{33}^2}{\pi^2} = \frac{4Q_M g_{33} d_{33} Y_3}{\pi^2}, \quad (9.9)$$

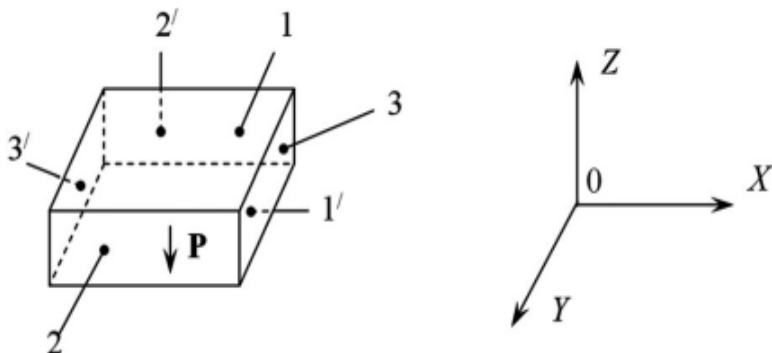
Көлденең-көлденең түрлендіргіш үшін

$$K_{u0} = \frac{4Q_M}{\pi^2} \frac{k_{31}^2}{1 - k_{31}^2} = \frac{4Q_M}{\pi^2} \frac{g_{31} d_{31} Y_3}{\pi^2}. \quad (9.10)$$

Жоғарыда атап өтілгендей, ең жоғары трансформация коэффициенті көлденең-бойлық пьезоэлектрлік трансформаторда болады. Егер өлшемдері $l \rightarrow \infty$, $a \rightarrow \infty$ деп болжасақ, онда $K_{u0} \rightarrow \infty$ болады. Алайда өлшемдер рұқсат етілген габариттік талаптармен, оларды жасау технологиясының күрделілігімен және шығындармен шектеледі. Егер ұзындығы l 100 мм-ден аспауы, ал қалыңдығы 0,25 мм-ден кем болмауы тиіс деп есептесек, онда геометриялық коэффициент $N_9 = l/a = 200$ болады. Бұл шекке ЦТС-23 пьезокерамикасынан жасалған трансформатор үшін 7000-ге тең трансформация коэффициенті сәйкес келеді [12]. Алайда тәжірибеде бұл мән едәуір төмен болады.

9.7. Пьезокерамикалық элементтің кеңістіктік энергия-күш құрылымы

Пьезокерамикалық элементтің кеңістіктік энергия-күш құрылымын үш вектормен сипаттауға болады – поляризация векторы P , пьезоэлементке әсер ететін күш векторы F , сондай-ақ шығыс сигналдың электр өрісінің кернеулілік векторы E [18-20]. Енді ең қарапайым түрдегі, тік бұрышты параллелепипед пішініндегі пьезокерамикалық элементті қарастырайық (9.7-сурет).



9.7-сурет. Параллелепипед түріндегі пьезокерамикалық элемент

Электродтар параллелепипедтің барлық қырларына жағылған және бір-бірімен қосылмаған болсын, ал пьезоэлемент 1-1' қырлары арасында поляризацияланған деп есептейік. Сондай-ақ, өлшенетін F күші поляризация векторы P -мен параллель және 1 қырына перпендикуляр бағытта әсер етеді, ал шығыс кернеу 1-1' қырларынан алынады делік. Осылайша, бұл датчик үшін барлық үш вектор Z осіне параллель орналасқан ($F \downarrow P \downarrow E$).

Айта кету керек, осы векторлардың біреуінің бағытын 180° -қа өзгерту тек сигнал фазасының өзгеруіне әкеледі.

Жоғарыда қарастырылған, үш вектордың параллель орналасуымен сипатталатын датчик – ең кең таралған және танымал түрі болып табылады [4, 10, 14, 18].

Ол үшін келесі өрнекті жазуға болады:

$$U_{вих} = \frac{Q}{C_{1-1'}} = \frac{d_{31} \cdot F}{C_{1-1'}}, \quad (9.11)$$

Мұндағы Q – 1-1' қырларында пьезоэлемент генерациялайтын заряд; $C_{1-1'}$ – 1-1' қырлары арасындағы сыйымдылық; d_{31} – пьезомодуль. Поляризация векторы P өзінің бағытын өзгертпейді делік, ал F күші 1, 2 немесе 3

қырларына әсер етуі мүмкін, бұл кезде электрлік кернеу 1-1', 2-2' немесе 3-3' қырларынан алынуы мүмкін. Осылайша, F және E векторлары P векторына параллель де, перпендикуляр да болуы мүмкін (қ. 9.3-кесте). Егер өлшенетін күш F пьезоэлементке әсер еткенде, оның бағыты мен поляризация векторы P арасындағы бұрыш 90° болса (9.3-кестедегі 2 және 5 түрлендіргіштер), онда мұндай датчик көлденең (немесе поперечный) деп аталады.

Мұндай датчиктер үшін сезімталдық (S) келесі түрде жазылады:

$$S = \frac{Q}{F} = d_{ij} \frac{h}{a}, \quad (9.12)$$

Мұндағы Q – сәйкес қырда пайда болатын заряд; h – пьезоэлементтің биіктігі; a – қалыңдығы.

Көлденең пьезоэлементтер Brüel & Kjaer (Дания) және Kistler Instrumente AG [27, 28] компанияларының датчиктерінде қолданылады. Шығыс сигналдың электр өрісінің кернеулілік векторы E мен поляризация векторы P арасындағы бұрыш 90° болатын датчиктер жасалған (9.3-кестедегі 3 және 6 түрлендіргіштер). Мұндай түрлендіргіштер доменді-диссипативті деп аталған [18, 19]. Сондай-ақ, F және E векторлары P поляризация векторына перпендикуляр болатын датчик те қызығушылық тудырды (9.3-кестедегі 4 және 7 түрлендіргіштер). Бұл түрлендіргіштер көлденең доменді-диссипативті деп аталды [18, 19].

9.3-кестеде көрсетілген 1-7 нөмірлі датчиктерде P , F , және E векторлары YOZ жазықтығында жатады. Ал 8 және 9 нөмірлі датчиктерде бұл векторлар кеңістіктік энергия-күш құрылымын түзеді.

9.3-кестеде берілген датчиктердің құрылымдық сұлбалары олардың орындалу мүмкіндіктерін толық қамтымайды.

9.3-кесте. Датчиктердің кеңістіктік энергия-күш құрылымы

№	Датчик түрі	Векторлардың бағыті	Датчик схемасы
1	Дәстүрлі		
2	Көлденең		
3	Көлденең		
4	Домейді-дисситативті		
5	Көлденек дисситативті		
6	Көлденек Дисситативті		
7	Көлденең		
8	Көлемдік домейді-домейді-дисситативті		
9	Көлемдік көлденең домейді-дисситативті		
0	Көлемдік көлденең домейді-дисситативті		
1	Көлшеп онта		

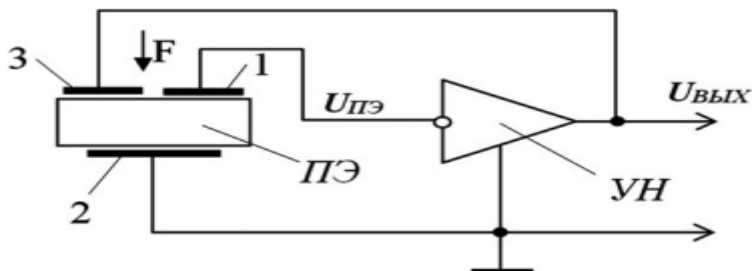
Егер біз поляризация векторының бағытын өзгертіп, оны параллелепипедтің 2-2' қырларына перпендикуляр етіп орналастырсақ, онда датчиктің тағы 9 түрін алуға болады. Соңында, поляризация векторын пьезоэлементтің 3-3' қырларына перпендикуляр етіп бұрсақ, тағы да 9 жаңа орындалу нұсқасын алуға болады. Осылайша, тік бұрышты параллелепипед түріндегі бір пьезоэлементтен әртүрлі сипаттамаларға ие 27 түрлі датчик жасауға болады. Салыстыру үшін 9.9-суретте 9.3-кестеде сипатталған, $50 \times 10 \times 10$ мм брустан жасалған датчиктердің эксперименттік

амплитудалы-жиіліктік (АЖС) және импульстік сипаттамалары келтірілген.

9.8. Пьезоэлектрлік датчиктердегі кері байланыс

Теріс кері байланыс (ТКБ) автоматты басқару, радиотехника, электроника, өлшеу техникасы және басқа да салаларда кеңінен қолданылады [11, 13]. Көп жағдайда өлшеу құрылғыларында ТКБ кіріс әсеріне енгізіледі. Күш өлшеу түрлендіргіштері үшін бұл күштік компенсаторларды жасауды талап етеді, ал бұл өз кезегінде ТКБ енгізудің артықшылықтарын жоққа шығарады. Пьезоэлектрлік датчиктердің шығыс кернеуі тек қолданылған күшке (қысым, үдеу және т.б.) ғана емес, сонымен қатар олардың кірісіндегі электрлік кернеуге де тәуелді. Мұндай жағдайда И.Г. Минаев кері байланысты негізгі (өлшеу) арна арқылы емес, датчиктің қосымша арнасы арқылы енгізуді ұсынды [19, 20].

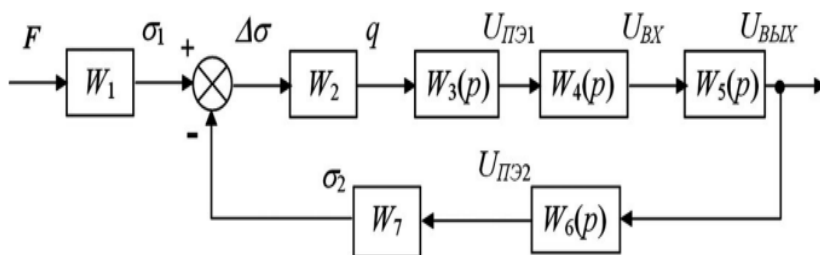
Ұсынылған әдіс күштік компенсаторлар жасаудан бас тартуға мүмкіндік береді, бұл пьезокерамикалық датчиктердің ТКБ бар конструкцияларын едәуір жеңілдетеді. Мұндай жағдайда пьезоэлементтің өзі күштік компенсатор рөлін атқара алады деуге болады. Сонымен қатар, тікелей түрлендіру сигналы мен ТКБ сигналының қосындысы пьезоэлемент көлемінде жүзеге асатындықтан, мұндай ТКБ кеңістіктік электромеханикалық кері байланыс деп аталады [18-20].



9.8-сурет. Кері байланысы бар пьезоэлектрлік датчик

Кері байланыспен жұмыс істейтін пьезокерамикалық түрлендіргіштің сұлбасы 9.8-суретте көрсетілген. 9.8-суретте бейнеленген датчик – бұл тұйықталған статикалық қадағалау жүйесі [11, 13], ол пьезоэлементтен (ПЭ) және кернеуді келістіру күшейткішінен (УН) тұрады. Пьезоэлементке үш электрод (1, 2 және 3) жағылған: – электрод 1 – келістіру күшейткішінің кірісіне қосылған, – электрод 2 – сұлбаның ортақ шына қосылған, – ал электрод 3 – пьезоэлементтің қосымша электроды — күшейткіштің шығысына қосылған.

Бұл түрлендіргіштің құрылымдық сұлбасы 9.9-суретте көрсетілген. Мұнда W_1 беру коэффициентіне ие буын F күшінің пьезоэлементке әсер етуін механикалық кернеуге σ_1 түрлендіруін сипаттайды.



9.9-сурет. Электромеханикалық кері байланысы бар пьезоэлектрлік түрлендіргіштің құрылымдық сұлбасы

W_2 буыны – механикалық кернеуді σ_1 пьезоэлементтің электродтарындағы q зарядына түрлендіруді сипаттайды. W_3 буыны – q зарядын пьезоэлементтің электродтарындағы $U_{ПЭ1}$ кернеуіне түрлендіруді сипаттайды. $W_4(p)$ буыны – жүктеме пьезоэлементке қосылған кездегі процесті сипаттайды (яғни, $U_{ПЭ1}$ кернеуін күшейткіштің кіріс тізбегіне беру). W_5 буыны – кернеу күшейткішінің беру сипаттамасын білдіреді. $W_6(p)$ буыны – $W_4(p)$ -ке кері процесті сипаттайды: яғни, күшейткіштен шығатын кернеуді ($U_{БЫX}$)

пьезоэлементтің қосымша электродына беру, нәтижесінде УПЭ2 кернеуі пайда болады.

Соңында, W_7 буыны – УПЭ2 кернеуін механикалық кернеуге σ_2 түрлендіруді сипаттайды.

Кері байланысы бар датчиктің беріліс функциясы келесі түрде жазылады:

$$W_{oc}(p) = \frac{W_1 W_2 W_3(p) W_4(p) W_5(p)}{1 + W_2 W_3(p) W_4(p) W_5(p) W_6(p) W_7} = W_1 \frac{W(p)}{1 + W(p)\beta(p)}, \quad (9.13)$$

Мұндағы

$W(p) = W_2 W_3(p) W_4(p) W_5(p)$ – кері байланыспен қамтылған тікелей түрлендіру тізбегінің беру коэффициенті, $\beta(p) = W_6(p) W_7$ – кері байланыс тізбегінің беру коэффициенті.

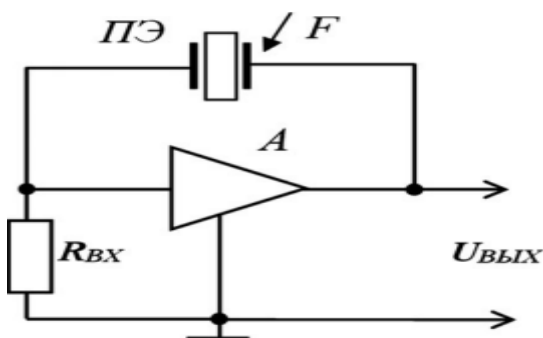
[18–20] еңбектерінде $W(p) \cdot \beta(p) = 1$ шарты орындалғанда мыналар дәлелденген:

- Датчиктің сезімталдығы екі есеге азаяды;
- Датчиктің амплитудалық-жиіліктік сипаттамасы (АЖС) жеткілікті кең жиілік диапазонында сызықты болады;
- Датчиктің салыстырмалы қателігі нөлге ұмтылады.

Теріс кері байланыс доменді-диссипативті датчиктердің сипаттамаларын да жақсартады [19].

Кері байланысы бар пьезокерамикалық датчиктерде мономорфты, биморфты және триморфты пьезоэлементтер (қ. 9.9-бөлім), сондай-ақ кернеу немесе заряд күшейткіштері қолданылады.

Заряд күшейткішінің кері байланыс тізбегіне пьезоэлемент қосылған датчиктің бір нұсқасы 9.10-суретте көрсетілген.



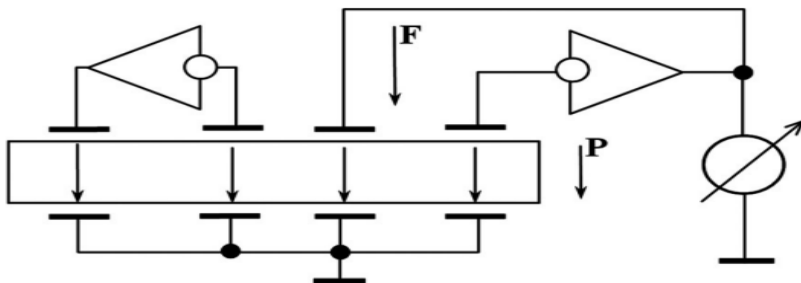
9.10-сурет. Заряд күшейткішінің кері байланыс тізбегіне қосылған пьезоэлементі бар пьезоэлектрлік датчик
Осы сұлба үшін

$$U_{\text{вых}} \approx \frac{Q}{C_{\text{ПЭ}}}, \quad (9.14)$$

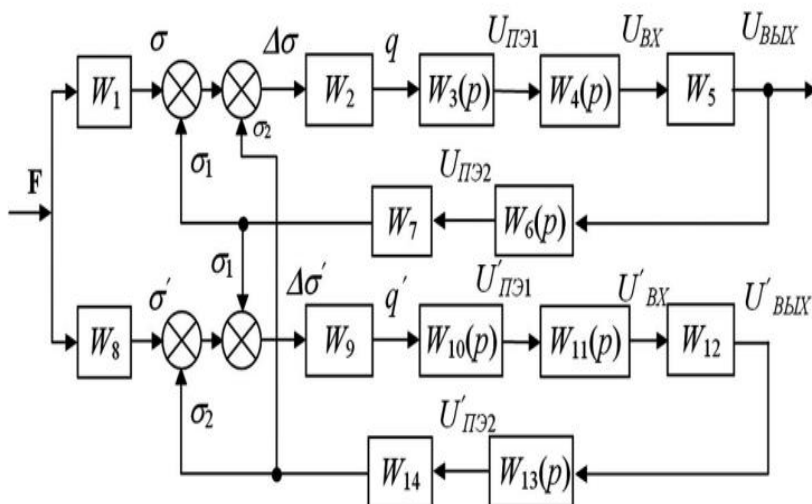
Яғни, кері байланыс тізбегіне пьезоэлемент қосылған датчиктің шығыс кернеуі күшейткішсіз жай пьезоэлементтің шығыс кернеуіне тең, яғни тікелей пьезоэффект нәтижесінде пайда болатын кернеуге тең. Демек, өлшеу қателігі тек пьезоэлементтің сипаттамаларына ғана тәуелді.

Сондай-ақ, екі кері байланыс контуры бар пьезоэлектрлік датчиктердің көптеген сұлбалары жасалған, бұл кейбір жағдайларда олардың сипаттамаларын жақсартуға мүмкіндік береді. Мұндай жағдайларда кернеу де, заряд күшейткіштері де қолданылуы мүмкін [18, 19].

9.11-суретте кернеу күшейткіштері қолданылған қос контурлы кері байланысы бар датчиктің бір нұсқасы көрсетілген. Бұл датчиктің құрылымдық сұлбасы 9.12-суретте келтірілген.



9.11-сурет. Кернеу күшейткіштерімен жабдықталған қос контурлы кері байланысы бар пьезоэлектрлік датчик нұсқасы



9.12-сурет. Қос контурлы кері байланысы бар датчиктің құрылымдық сұлбасы

Осы құрылымдық сұлбаның сипаттамасын, сондай-ақ қос контурлы кері байланысы бар датчиктердің кейбір нұсқаларын [19] еңбектен табуға болады. Алайда, мынаны атап өткен жөн: пьезоэлементтер мен кері байланыс тізбектерінің амплитудалы-жиілік сипаттамалары электродтардың кеңістіктегі орналасуына, олардың өлшемдеріне, пьезоэлемент пішініне және басқа да

факторларға қатты тәуелді болады, сондықтан кері байланыстың тиімділігі әр нақты жағдайда тәжірибелік жолмен дәлелденуі тиіс.

9.9. Биморфты және триморфты пьезоэлементтер

Биморфты пьезоэлементтер (БПЭ) екі бөліктен тұрады – екі пьезоэлементтен немесе бір пьезоэлемент пен металл пластинадан, олар бір-бірімен эпоксидті компаунд немесе жеңіл балқитын қорытпа арқылы біріктіріледі. Екі пьезоэлементтен тұратын биморфты элементтер симметриялы деп аталды. Бұл жерде симметрия деп пьезоэлементтердің иілу кезіндегі бейтарап жазықтыққа қатысты орналасу симметриясы түсініледі. Ал пьезоэлемент пен металл пластинадан тұратын биморфты элементтер осындай себептермен асимметриялы деп аталды [4, 19].

Триморфты элементтер – бұл екі пьезоэлемент пен бір металл пластинадан тұратын элементтер.

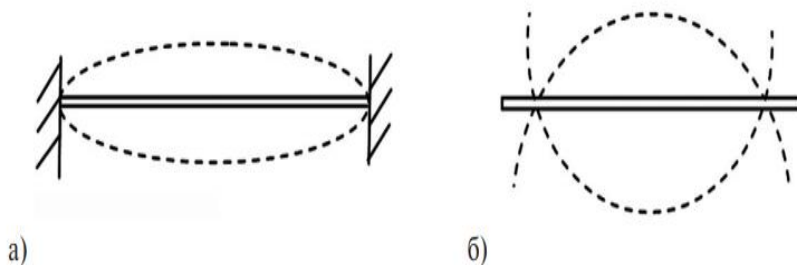
Екі пьезоэлементті немесе пьезоэлемент пен металл пластинаны бір құрылымға біріктіру түрлендіргіштің сипаттамаларының елеулі өзгеруіне әкеледі. Мысалы, диаметрі 30 мм, қалыңдығы 0,3 мм болатын ЦТС-19 пьезокерамикасынан жасалған пьезоэлементтің резонанстық жиілігі шамамен 70 кГц (радиалды тербелістер), ал 100 Гц жиіліктегі дыбыс өрісіне сезімталдығы шамамен 1 мВ/Па құрайды. Осы екі пьезоэлементті симметриялы биморф ретінде біріктіргенде 2,5 және 3,45 кГц шамасындағы иілу тербелістерінің резонанстық жиіліктері пайда болады, ал сол жиіліктегі сезімталдығы 20-30 мВ/Па дейін артады. Бұл екі есе емес, 20-30 есе артық! Ал пьезоэлемент пен аморфты металл пластинаны асимметриялы биморф ретінде біріктіру сезімталдықты 10-20 есеге арттырады [25].

Симметриялы БПЭ-дегі пьезоэлементтер, сондай-ақ асимметриялы БПЭ-дегі пьезоэлемент пен металл пластина әдетте эпоксидті компаундпен немесе жеңіл балқитын

қорытпамен (припоймен) біріктіріледі. Жабыстыру технологиясы [25]-те сипатталған. БПЭ-дегі иілу тербелістерінің пайда болуы пьезоэлементтің, металл пластинаның және желім қабатының механикалық қасиеттерінің анизотропиясымен байланысты.

Дискі тәрізді БПЭ үшін, кем дегенде, екі негізгі резонанстық иілу жиілігі болады (9.13-сурет):

– Бірінші жағдайда (9.13-сурет, а) БПЭ сыртқы жиегі бойымен бекітілген. Бұл – осындай өлшемдегі БПЭ үшін ең төмен резонанстық жиілік. – Екінші жағдайда (9.13-сурет, ә) БПЭ еркін орналастырылған. Бұл кезде негізгі резонанстық жиілік алдыңғы жағдаймен салыстырғанда шамамен 1,4 есе жоғары болады.



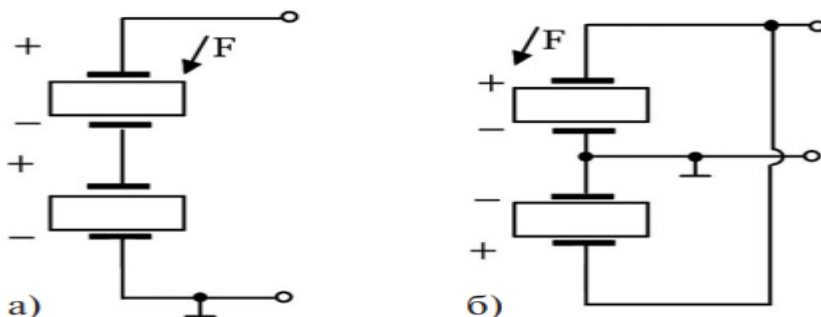
9.13-сурет. Биморфты элементтердің тербелістері:
а – цилиндрлік бүйір сызығы бойынша қатты бекітілген күйі; ә – еркін орналастырылған күйі

Симметриялы биморфты пьезоэлементтер

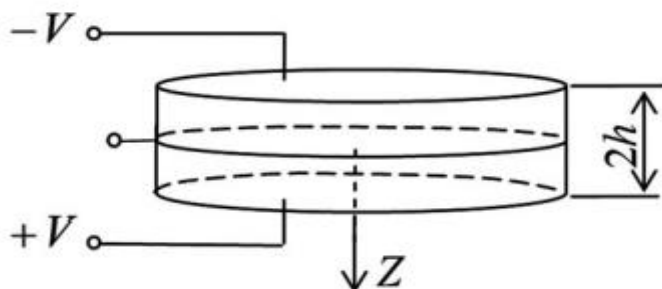
Пьезоэлементтерді қосу үшін екі схема белгілі: тізбектей және параллель қосу (тиісінше 9.14-сурет, а және ә) [19].

Дәстүрлі түрде бұл түрлендіргіштер өлшемдері және, ең бастысы, қалыңдығы бірдей пластиналардан жасалады (қ. 9.15-сурет). Бұл ең жоғары сезімталдықты қамтамасыз етеді. Алайда, мынаны атап өткен жөн: пьезоэлементтердің өлшемдері бірдей болған жағдайда, параллель қосу схемасындағы түрлендіргіштің сезімталдығы және меншікті

кедергісі тізбектей қосу схемасына қарағанда төрт есе аз болады.



9.14-сурет. Симметриялы биморфты түрлендіргіштегі пьезоэлементтерді қосу сұлбалары: а – тізбектей қосу; ә – параллель қосу



9.15-сурет. Қалыңдығы бірдей пьезоэлементтерден тұратын симметриялы биморфты түрлендіргіш

Біртекті деформациялар үшін деформацияның электр кернеуіне айналу тиімділігінің сандық көрсеткіші – электромеханикалық байланыс коэффициенттері (ЭМБК). Қалыңдығы бойынша поляризацияланған бірқабатты пластинада электр өрісі әсерінен біртекті жазық деформация пайда болады. Мұндай деформация түрі үшін статикалық электромеханикалық байланыс коэффициенті (K_p) анықтамалық шама болып табылады және ол әртүрлі

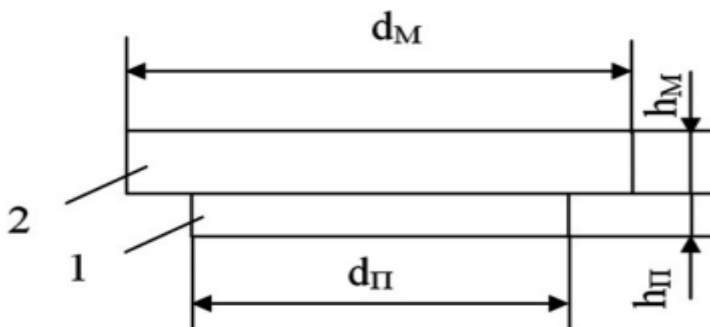
пьезокерамикалық құрамдарға байланысты әртүрлі мәнге ие болады [19].

Тербелмелі деформациялар кезіндегі энергияның электромеханикалық түрлену тиімділігін қарастыру үшін динамикалық (тиімді) ЭМК енгізіледі. Біртекті деформация үшін ол қарапайым формулалармен есептеледі [24]. Ал біртекті емес деформация жағдайында тиімді ЭМК-ны табу электроупругтық шеттік есепті шешуге және энергетикалық теорияға негізделеді [23, 24].

Асимметриялы биморфты пьезоэлементтер

Асимметриялы биморфты түрлендіргіштер жоғары механикалық беріктігімен ерекшеленеді және қалыңдығы бойынша поляризацияланған жалпақ пьезоэлемент жабыстырылған металл пластинадан тұрады (қ. 9.16-сурет). Қабылдау режимінде жұмыс істейтін түрлендіргіштердің негізгі сипаттамаларының бірі – бос жүрістегі сезімталдық болып табылады.

Симметриялы және асимметриялы БПЭ үшін тербеліс есебінің шешімін, мысалы, [19] еңбектен табуға болады, бұл бірқатар практикалық қорытындылар жасауға мүмкіндік береді.



9.16-сурет. Асимметриялы биморфты пьезоэлемент: 1 – пьезоэлемент; 2 – металл пластина

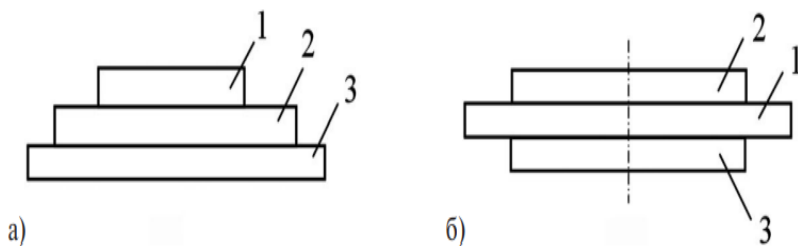
1. Сезімталдық (қабылдау және сәуле шығару режимдерінде де) пьезоэлементтің қалыңдығына кері пропорционал. Алайда, пьезоэлементтің қалыңдығын азайту оның механикалық беріктігімен және технологиялық мүмкіндіктермен шектеледі. Қазіргі уақытта БПЭ үшін дискі тәрізді пьезоэлементтердің қалыңдығы 0,15-3,0 мм және одан да көп болуы мүмкін.

2. БПЭ сезімталдығы сонымен қатар пьезоэлементтің (h_p) және металл пластинаның (h_m) қалыңдықтарының арақатынасына да тәуелді.

3. Пьезоэлемент диаметрі ұлғайған кезде, бастапқыда сезімталдық артады. Алайда диаметрді одан әрі үлкейткенде БПЭ қаттылығы соншалықты артады, сезімталдық қайтадан азаюы мүмкін. Сондықтан, әдетте, пьезоэлемент диаметрі металл пластина диаметрінің шамамен 0,5-0,7 бөлігіне тең етіп алынады [19, 24].

Триморфты пьезоэлементтер

Триморфты элементтерді орындаудың бірнеше нұсқасы болуы мүмкін (к. 9.17-сурет).



9.17-сурет. Триморфты пьезоэлементтер:
а – асимметриялы; ә – симметриялы; 1, 2 – пьезоэлементтер; 3 – металл пластина

Нейтралды жазықтықтың орналасуы биморфты және триморфты элементтер үшін өте маңызды рөл атқарады. Бұл жазықтықтың орналасуы тербелмелі жүйенің қаттылығын арттырып, сезімталдықтың төмендеуіне, екінші пьезоэлементтің қосылуымен сезімталдықтың арттыруына

әкелуі мүмкін. Нейтралды жазықтықтың орналасуы пьезоэлементтердің бірінде зарядтардың жартылай немесе толық компенсациялануына және, демек, сезімталдықтың айтарлықтай жоғалуына әкелуі мүмкін. Идеал жағдай – бұл нейтралды жазықтықтың негізгі және қосымша пьезоэлементтердің арасында орналасуы, бірақ асимметриялы триморфты элемент үшін бұл өте қиындық туғызады. Бұл талаптарға толықтай сәйкес келетін құрылым симметриялы триморфты пьезоэлемент болып табылады (қ. 9.17-сурет, ә).

Биморфты пьезоэлементтерді бақылау

Биморфты пьезоэлементтерді сериялық өндірісте жасаған тәжірибе көрсеткендей, олардың өндірісі кезінде келесі ақаулар болуы мүмкін [19]:

1. Пьезоэффектінің болмауы пьезоэлементтің материалына байланысты;

2. Пьезоэлементтер арасындағы қысқа тұйықталу. Мұндай тұйықталу пьезоэлементтің сыртқы бетінде әртүрлі металдық өткізгіштер арқылы пайда болады немесе пьезоэлементтің поляризациясы кезінде оның бұзылуынан болуы мүмкін;

3. Металл мембрана мен пьезоэлементтің электроды арасындағы электрлік байланыс жоқ немесе пьезоэлементтен күшейткішке баратын тізбекте байланыс жоқ;

4. Пьезоэлемент пен металл мембрананың желімдік қосылысының жеткіліксіз механикалық беріктігі.

1-3 тармақтарда көрсетілген ақаулар түрлендіргіштің сезімталдығын іс жүзінде нөлге дейін төмендетеді. Алайда «нөлдік» сезімталдық транзистордың істен шығуы, предусилительдің монтажында қателіктер (сигнал сымымен кабель экрандарының қысқа тұйықталуы, пьезоэлементтің күшейткіштің ортақ сымына қате қосылуы) кезінде де пайда болуы мүмкін.

Пьезоэлементтерді бақылау схемалары [21]-де сипатталған.

9.10. Резонанстық пьезодатчиктер

Бұл датчиктер механикалық шамаларды (күштер, қысым, оның ішінде статикалық қысым, сызықтық және дірілдік үдеулер), сондай-ақ электрлік, магниттік шамаларды, температураны, вискозитетті, ылғалдылықты, орын ауыстыруды және басқа да шамаларды өлшеу үшін қолданылады. Сонымен қатар, резонанстық түрлендіргіштер пьезоэлектрлік қозғалтқыштарда, гироскоптарда, автоматтандыру, байланыс, есептеу техникасы, наномикроскоптардың сканерлерінде және басқа да құрылғыларда қолданылады [19, 21].

Бұл датчиктердің негізі – олардың қаттылығын механикалық әсердің функциясы немесе қысымға байланысты жүйе арқылы резонатордың шығару – қабылдау коэффициентінің өзгеру құбылысы. Бұл түрлендіргіштерді жасау мен жетілдіру Р.Г. Джагупов, Э.А. Кудряшов, В.В. Малов, М.Г. Минаев, И.Е. Сырмолотнов, В.Ю. Снитко, А.И. Трофимов, В.М. Шарапов және басқалардың есімімен байланысты.

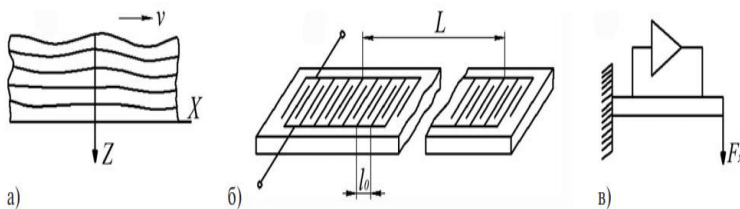
Резонанстық пьезоэлектрлік датчиктер монокристалды материалдардан (кварц, литий ниобаты және т.б.) немесе пьезокерамикадан жасалады. Монокристалды материалдардан жасалған датчиктер жоғары дәлдік пен тұрақтылыққа ие, бірақ олар күрделі және қымбат, бұл олардың қолдану саласын айтарлықтай шектейді. Бұл түрлендіргіштерге В.В. Маловтың монографиясы арналған [12].

Пьезокерамикалық датчиктер төмен дәлдік пен тұрақтылыққа ие, бірақ олар қарапайым құрылымымен, төмен бағасымен ерекшеленеді, бұл кейбір жағдайларда шешуші фактор болып табылады. Пьезорезонанстық түрлендіргіштер (ПРД) әсер ету табиғатына (механикалық, жылулық, электромагниттік және т.б.) қарай классификациялануы мүмкін. Тағы бір классификация – түрлендірудің негізгі механизміне (әсеріне) қарай классификация [12] те

көрсетілген. Классификацияға биморфты пьезоэлементтер негізгі элемент болып табылатын резонанстық датчиктер класы да кіруі керек. Бұл түрлендіргіштердің жұмысын және қолданылуын Р.Г. Джагунов және А.А. Ерофеевтің фундаменталды монографиясында [3] сипатталған.

Кварцты пьезоэлектрлік датчиктер. Тандалған кварцтың қимасына байланысты статикалық күштер, қысым, үдеулер, температура, ылғалдылық және басқа да шамаларды өлшейтін датчиктер жасалуы мүмкін [12]. Кварцты резонанстық датчиктердің әртүрлі физикалық шамалар бойынша конструкциялары [16]-да сипатталған.

ПАВ датчиктері. Беткі акустикалық толқындар (ПАВ) радиотехникалық құрылғыларда қолданылатын фильтрлер мен кешігу жолдарын әзірлеуде кеңінен қолданылады. ПАВ сондай-ақ датчиктерді жасау кезінде де қолданылады [12]. ПАВ-ты қоздыру үшін пьезоэлементтің бетіне қос электродтармен орналастырылған тісшелі құрылымдар (қ. 9.18, ә-сурет) қойылады, бұл қос тісшелі түрлендіргіш (ҚТТ) болып табылады, оның қадам ұзындығы $l_0 = \lambda$. Электродтарға кернеу қосылғанда, ҚТТ астында кері пьезоэффектінің әсерінен бөлшектердің орын ауысуы орын алады, нәтижесінде екі бағытта таралатын ПАВ пайда болады. Егер осы кезде толқын ұзындығы ҚТТ қадамына сәйкес келсе, онда әрбір электрод жұбының тербелістерінің қосылу нәтижесінде ПАВ энергиясы максималды мәнге жетеді. Егер толқын ұзындығы ҚТТ қадамына сәйкес келмесе, ПАВ энергиясы төмендейді және белгілі бір қатынаста толқын ҚТТ шегінен тыс толық өшуі мүмкін.



9.18-сурет. Беткі акустикалық толқындардағы датчик

ПАВ энергиясын қабылдау үшін екінші ҚТТ қолданылады, оның қадамы толқын ұзындығына тең. Қабылдау ҚТТ-дағы электродтарда тікелей пьезоэффектінің әсерінен зарядтар пайда болып, кернеу қалыптасады. Кешігу сызығы кіріс және шығыс ҚТТ-дан тұрады. Алғашқы жуықтау бойынша, екі ҚТТ-ны геометриялық орталықтары арасындағы қашықтық L болатын жергілікті электродтар ретінде қарастыруға болады.

Кешігу уақыты – бұл акустикалық толқынның ҚТТ арасынан өту уақыты, яғни $2\tau = L / C$, мұндағы $C = \sqrt{E_{ij} / \rho}$ – ПАВ таралу жылдамдығы; E_{ij} – серпімділік тұрақтысы; ρ – материалдың тығыздығы.

Кварцтың Y -қимасында ПАВ таралу жылдамдығы $C = 3159$ м/с тең. Осылайша, $L = 10$ мм болғанда кешігу уақыты шамамен 3 мкс болады. Толқын ұзындығы λ таралу жылдамдығы v мен толқындарды қоздыру жиілігіне байланысты анықталады және $\lambda = C / f$ формуласына сәйкес болады. Қазіргі заманғы технология ҚТТ қадамын $l_0 = 10$ мкм дейін жасау мүмкіндігін қамтамасыз етеді, сондықтан ПАВ жұмыс жиіліктері 300 МГц дейінгі диапазонда болуы мүмкін [12].

Резонанстық контактты түрлендіргіштер

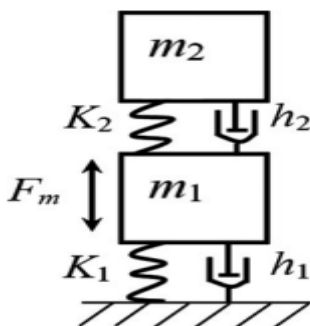
Контактты пьезокерамикалық түрлендіргіштердің шығыс сипаттамалары көбінесе өлшенетін күштің тербелмелі пьезоэлементке қолданылу тәсілімен анықталады. Пьезоэлементті іс жүзінде кез келген пішінде жасауға болады, алайда түрлендіргіштерде жиі дискі тәрізді пьезоэлементтер қолданылады. Бұл жағдайда пьезоэлементтің қоздыруы радиалды тербеліс модасы бойынша немесе қалыңдық бойымен жүзеге асуы мүмкін.

Түрлендіргіштерді құру үшін пьезорезонаторлар мен пьезотрансформаторлар қолданылады.

Өлшенетін күшті пьезоэлементтің тегіс қырларына немесе цилиндрлік бетіне қолдануға болады. Максималды сезімталдыққа ие түрлендіргіштерде өлшенетін күш

цилиндрлік бетке, радиалды модадағы резонанстық жиілікте тербелетін пьезоэлементке қолданылады [19].

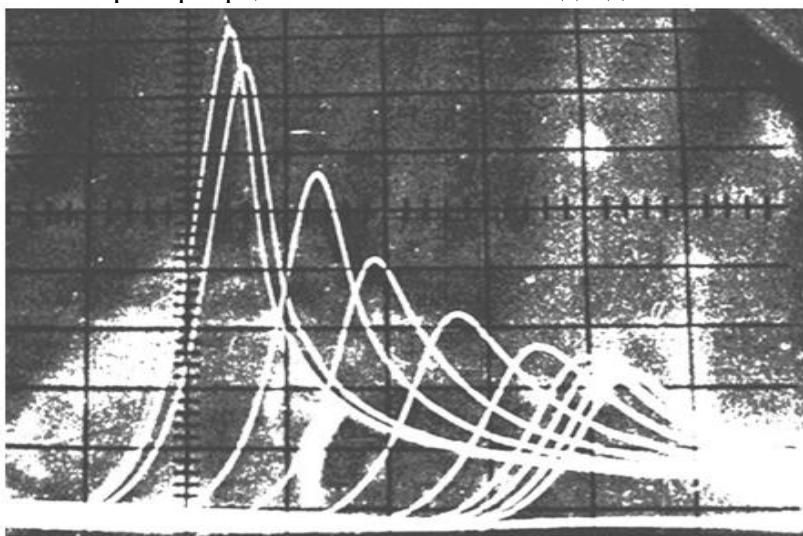
Өлшенетін күшті қабылдайтын пьезоэлементтің бетінің жеке бөліктері оның фактілік контакт аймағын құрайды. Контакттың сипаттамаларын (контакт қаттылығы және фактілік контакт аймағы) басқару датчиктің сипаттамаларын басқаруға мүмкіндік береді. Пьезоэлемент – бұл салыстырмалы түрде жоғары доброталы электромеханикалық тербелмелі жүйе, сондықтан оны дәлдікпен сараланған параметрлерімен тербелмелі жүйе ретінде қарастыруға болады [19]. Бұл тәсіл, ішкі байланыстарды ескерусіз, сыртқы әсерлердің тербелмелі жүйенің параметрлеріне әсерін анықтау үшін кеңінен қолданылады. Пьезоэлементтің механикалық моделі сараланған тұрақтылармен көрсетілген (қ. 9.19-сурет). Мұнда пьезоэлементке m_1 массасы, k_1 серпімділігі және h_1 үйкеліс элементі сәйкес келеді, олар түйінмен қосылған. Механикалық элементтерді осылай қосу тізбектелген электрлік контурға сәйкес келеді, бұл пьезоэлектрлік резонатор үшін толықтай дұрыс және пьезотрансформатор үшін тек алғашқы жуықтауда дұрыс, өйткені соңғы жағдайда оның трансформация коэффициенті ескерілмейді.



9.19-сурет. Резонанстық контактты түрлендіргіштің механикалық моделі

Пьезоэлемент тербеледі қоздырушы гармоникалық күштің $F_{msi} \sin \omega t$ әсерінен, ол қоздыру кернеуіне пропорционал. Өлшенетін күш m_2 массасындағы қатты дененің салмағымен көрсетілген, ол пьезоэлементпен жоғарыда аталған дене мен пьезоэлемент арасындағы ауырлықсыз серпімді байланыс арқылы әрекет етеді. Бұл байланыс k_2 қаттылық коэффициентімен сипатталады, ол байланысқан дене мен пьезоэлемент арасындағы серпімді қасиеттерді көрсетеді. Контакттағы жоғалту h_2 үйкеліс коэффициентімен көрсетіледі.

Контакт қаттылығының күшке тәуелділігі сызықтық емес, алайда жүктемені қалыпты мәнінен аз ауытқыту кезінде оны қалыпты деп қабылдауға болады, яғни байланыс қаттылығы тұрақты шама ретінде қарастырылады. Бұл болжамды пьезоэлементтің амплитудалық-жиіліктік сипаттамасы растады, ол сызықтық қалпына келтіретін күш бар жүйелерге тән сипатта болады (қ. 9.20-сурет). Сондай-ақ, үйкеліс күштері арқылы байланыс болмайды деп санаймыз.



9.20-сурет. 30 / 10 мм өлшемді резонанстық датчиктің күш 0-ден 5 кГс-қа өзгерген кездегі амплитудалық-жиілік сипаттамалары

Жоғарыда айтылған жорамалдар негізінде, пьезоэлементтің резонанстық тербелістерінің амплитудасы, демек, соған тікелей байланысты пьезоэлементтің шығыс кернеуі, байланыс қаттылығына кері пропорционал болатынын көрсету қиын емес.

Бұл типтегі датчиктердің сипаттамасын [19]-дан табуға болады. Резонанстық ықшам пьезодатчиктің механикалық және электрлік модельдерін қарастыру нәтижесінде практика үшін өте құнды екі тұжырым жасалады: бұл датчиктер арқылы механикалық контакттың екі маңызды сипаттамасын – **байланыс қаттылығын** және **нақты байланыс ауданын** өлшеуге болады [19].

Ультрадыбыстық концентраторлары бар түрлендіргіштер

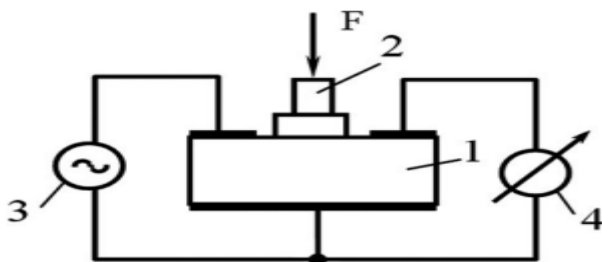
Ультрадыбыстық концентраторлар (УК) – бұл ультрадыбыс қарқындылығын, яғни бөлшектердің тербелмелі орын ауыстыру амплитудасын арттыруға арналған құрылғылар.

Ультрадыбыстық концентратор – бұл тербелістердің механикалық трансформаторы. Бұл дегеніміз, концентратордың шығыс жағындағы орын ауыстыру амплитудасы оның кірісіндегі амплитудадан K есеге артық, мұндағы K – концентратордың беру коэффициенті.

Әрекет ету принципі бойынша екі түрі белгілі:

- фокустайтын, немесе жоғары жиілікті,
- таяқша түріндегі, немесе төмен жиілікті концентраторлар.

Резонанстық пьезокерамикалық датчиктердің механикалық шамаларға сезімталдығының артуы УК қолдану кезінде алғаш рет 1976 жылы И.Г. Минаев пен В.М. Шарапов тарапынан анықталып, ішінара зерттелген. Түрлендіргіштерде УК қолданудың кейбір мысалдары А.И. Трофимовтың [15] және В.М. Шараповтың [19, 20] еңбектерінде сипатталған.

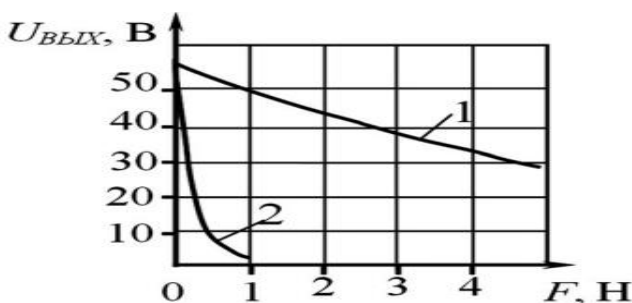


9.21-сурет. Ультрадыбыстық концентраторы бар резонанстық пьезотүрлендіргіш: 1 – пьезотрансформатор; 2 – концентратор; 3 – генератор; 4 – өлшеу құрылғысы.

УК бар ең қарапайым түрлендіргіш 9.21-суретте көрсетілген. Мұнда 1 – пьезотрансформатордың бетіне сатылы 2 – концентратор орнатылған. Пьезотрансформатор 3 – электрлік тербелістер генераторына және 4 – өлшеу құрылғысына қосылған.

9.22-суретте пьезотрансформатордың шығыс кернеуінің күшке тәуелділігі көрсетілген: – қисық 1 – концентраторы жоқ түрлендіргішке сәйкес; – қисық 2 – 9.21-суреттегі түрлендіргішке сәйкес келеді.

9.22-суреттен байқағанымыздай, концентраторды қолдану арқылы датчиктің сезімталдығы бір шамада (яғни он есе) артқан.



9.22-сурет. Пьезотүрлендіргіштің статикалық сипаттамалары: 1 – концентраторы жоқ; 2 – концентратормен.

Акустикалық байланысқан резонаторлар негізіндегі түрлендіргіштер

Акустикалық байланысқан резонаторлар негізіндегі түрлендіргіштерде [12] екі резонатордан немесе пьезотрансформаторлардан тұратын тербелмелі жүйелер қолданылады, олардың арасындағы акустикалық байланыс газдық саңылау арқылы жүзеге асырылады.

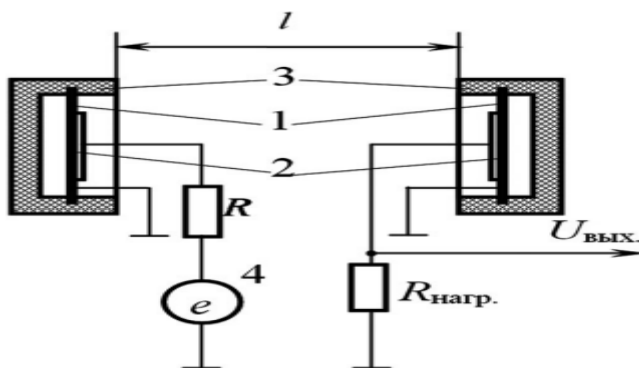
Мұндай түрлендіргішті трансформатор ретінде қарастыруға болады, оның түрлендіру коэффициенті акустикалық байланыстың шамасына тәуелді.

Акустикалық байланыс сәулелендіргіш пен қабылдағыштың геометриясы мен олардың тербелу түрі берілген кезде арақашықтыққа және газдың акустикалық кедергісіне (Z_g) байланысты анықталады.

Бұл кедергі екі құрамдас бөліктен тұрады:

– R_a – резонатордың ортаға акустикалық энергия шығындауына байланысты белсенді құрамдас бөлігі;

– X_a – тұтқыр үйкеліс есебінен энергияның ортада диссипациялануынан туындайтын реактивті құрамдас бөлік.

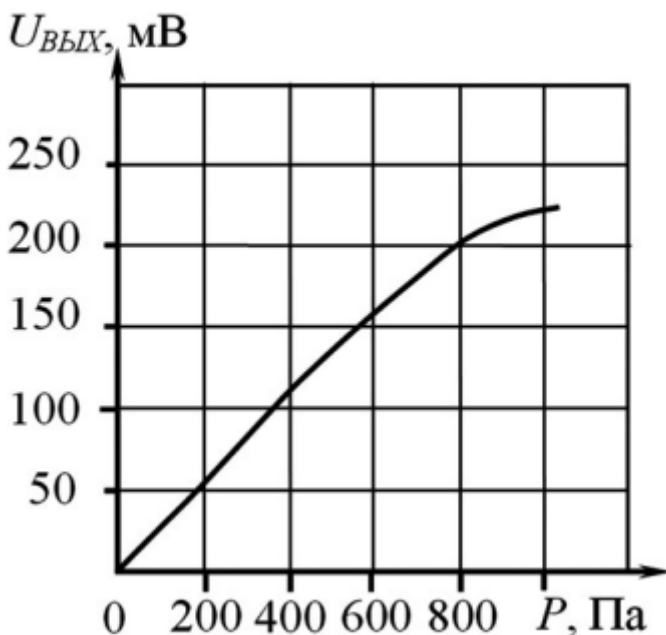


9.23-сурет. Акустикалық байланысқан резонаторлар негізіндегі газ қысымын түрлендіретін құрылғының қосылу сұлбасы: 1 – металл пластина; 2 – пьезоэлемент; 3 – корпус; 4 – генератор.

Бинарлы газ қоспалары үшін ($P = \text{const}$ жағдайында) осы принцип негізінде газоанализаторлар жасауға болады. Сәулелендіргіш пен қабылдағыш монолитті (кристалдар, пьезокерамика) немесе құрамдас болып орындалуы мүмкін.

Датчиктің бір нұсқасы және оның шығыс кернеуінің қысымға тәуелділігі 9.23 және 9.24-суреттерде көрсетілген [12].

Әр биморфты резонатор: 1 – металл пластинадан және 2 – литий ниобатынан жасалған пьезоэлементтен тұрады. Мұндай түрлендіргіштің шығыс кернеуінің қысымға тәуелділігі үлкен диапазонда – вакуумнан (10 Па) ондаған килопаскальға дейін – сызықты болады. Бұл датчиктің кемшілігі – оның тек таза және құрам тұрақты атмосферада ғана жұмыс істей алатындығы.



9.24-сурет. Акустикалық байланысқан резонаторлар негізіндегі газ қысымын түрлендіргіштің жұмыс сипаттамасы

[19]-жұмыста сипатталған датчикте сезімталдықты арттыру үшін бір сәулелендіруші резонатор 2 және екі қабылдаушы резонатор 1 мен 3 қолданылады, олар тізбектей жалғанған. 4 – генератордың электрлік кернеуі 2-резиденторда тербелістерді қоздырады, бұл тербелістер газ арқылы 1 және 3 резонаторларға беріледі және оларда да қоздыру жиілігінде тербелістер туындайды. Нәтижесінде, қабылдаушы резонаторларда пайда болатын электрлік сигналдар газ қысымының шамасына байланысты болады және олар бірдей фаза мен жиілікте қысым индикаторына беріледі.

9.11. Доменді-диссипативті пьезотрансформаторлар негізіндегі датчиктер

9.7-бөлімде айтылғандай, доменді-диссипативті деп поляризация векторы шығыс сигналдың электр өрісі векторына бұрышпен ($0 < \alpha < 90^\circ$) бағытталған пьезодатчиктер аталады [19]. Мұндай датчиктерді қолдану арқылы жұмыс жиілік диапазонын кеңейтуге болады. Сондай-ақ, биморфты пьезотрансформаторлар мен олар негізіндегі датчиктер үшін де қызықты нәтижелер алуға болады [21].

Пьезоэлектрлік датчиктердің сезімталдығын арттыру

Пьезоэлектрлік датчиктердің, әсіресе биморфты түрлерінің, сезімталдығын арттыру кейбір жағдайларда өте маңызды: – бұл су асты және су үсті объектілерін анықтау қашықтығын арттыруға, – пьезоэлектрлік қашықтық өлшеуіштердің диапазонын кеңейтуге мүмкіндік береді.

Көп жағдайда жоғары пьезомодулі бар пьезокерамика қолданылады. Сонымен қатар, биморфты пьезодатчиктердің сезімталдығын пьезоэлементтер мен металл пластиналардың өлшемдерін (қалыңдығы, диаметрі) оңтайландыру арқылы арттыруға болады. Алайда бұл тәсіл іс жүзінде: – басқа өлшемдегі пьезоэлементті пайдалану, – басқа физико-

механикалық қасиеттері бар материалдан жасалған металл пластинаны қолдану сияқты құрылымдық өзгерістерді талап етеді.

Бұл бөлімде датчикті қосу сұлбасын өзгерту арқылы сезімталдықты арттыру мүмкіндігі қарастырылады.

Бұл мақсатқа жету үшін қарапайым әрі айқын заңдылықтар қолданылады.

Жалпы түрде, кез келген датчиктің сезімталдығы келесі формула бойынша анықталады:

$$S = \frac{dy}{dx}, \quad (9.15)$$

мұндағы: x – кіріс шамасы (мысалы, қысым, күш, үдеу); y – шығыс шамасы (мысалы, кернеу, заряд, ток).

Пьезоэлектрлік датчиктер үшін заряд бойынша сезімталдық келесі формуламен анықталады:

$$S_Q = \frac{dQ}{dP_{зв}}, \quad (9.16)$$

мұндағы: Q – пьезоэлемент электродтарында пайда болатын заряд; $P_{зв}$ – дыбыстық қысым (акустикалық қысым).

Кернеу бойынша сезімталдық келесі формуламен анықталады:

$$S_u = \frac{dU}{dP_{зв}}, \quad (9.17)$$

мұндағы: U – пьезоэлементтегі кернеу.

Пьезоэлементтегі зарядты анықтау формуласы:

$$Q = d_{ij} F = d_{ij} \cdot P_{зв} S, \quad (9.18)$$

мұндағы: d_{ij} – пьезомодуль, Кл/Н (пьезоэлектрлік материалдың қасиетін сипаттайды); F – пьезоэлементке әсер ететін күш; S – пьезоэлементтің ауданы, яғни дыбыстық қысым $P_{зв}$ түсетін беті.

Айта кету керек, басқа шарттар бірдей болғанда, пьезоэлемент электродтарындағы зарядтың шамасы

электродтардың ауданына пропорционал. Егер пьезоэлементтің екі электродының аудандары әртүрлі болса, онда есепке кіші аудан алынады.

Пьезоэлементтің сыйымдылығы (C) келесі формуламен анықталады:

$$C_{пэ} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S_{эл}}{\delta}, \quad (9.19)$$

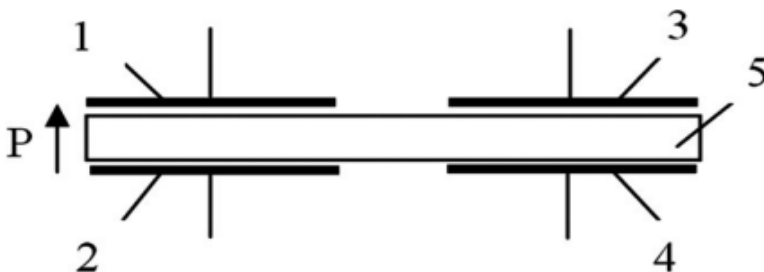
мұндағы: ϵ_0 – вакуумның диэлектрлік өтімділігі, $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{Ф/м}$; ϵ_r – салыстырмалы диэлектрлік өтімділік (пьезоматериалға тән шама); t – электродтар арасындағы қашықтық (яғни пьезоэлементтің қалыңдығы).

Пьезоэлементтегі кернеу (U) келесі формуламен анықталады:

$$U_{пэ} = \frac{Q}{C_{пэ}}. \quad (9.20)$$

Осыдан заряд пен пьезоэлементтің сыйымдылығы электродтар ауданына пропорционал болғандықтан, пьезоэлементтегі кернеу электродтар ауданына тәуелді емес деген қорытынды жасауға болады.

Енді электродтары екі бөлікке бөлінген дискі тәрізді пьезоэлементтің құрылымын қарастырайық (9.25-сурет).



9.25-сурет. Бөлінген электродтары бар пьезоэлемент: 1-4 – электродтар; 5 – пьезоэлемент.

Бұл жағдайда пьезоэлементтің әрбір шеткі бетіне орнатылған электрод екі бірдей бөлікке бөлінген (1-3 және 2-

4). Электродтардың 1-2 және 3-4 бөліктері арасындағы сыйымдылықтар бірдей, яғни $C_{1-2} = C_{3-4}$. Пьезоэлементтегі кернеуді (демек, кернеу бойынша сезімталдықты) арттыру үшін оның электродтары арасындағы сыйымдылықты азайту қажет.

Бұл талап 9.25-суретте көрсетілген датчик құрылымында орындалуы мүмкін, егер сигналдық (шығыс) электродтар ретінде 1-4 немесе 2-3 электродтары қолданылса.

Диаметрі 30 мм және қалыңдығы 0,8 мм ЦТС-19 пьезокерамикасынан жасалған биморфты пьезоэлемент пен диаметрі 36 мм жартылай қатты Л63 жезден жасалған металл пластина үшін 200 Гц жиілікте және 114 дБ (10 Па) дыбыс қысымында алынған сыйымдылық пен шығыс кернеуінің өлшеу нәтижелері 9.4-кестеде көрсетілген.

9.5-кестеден көрініп тұрғандай, бұл жағдайда сезімталдық (кернеу бойынша) 10 еседен аса артқан.

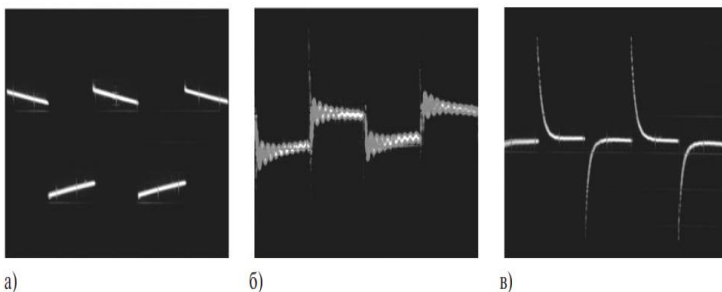
Кесте 9.4

Пьезоэлемент	1-2	3-4	1-4	2-3
$\varnothing 30 \times 0,8$ мм	4,2	4,2	0,392	0,393

Кесте 9.5

Пьезоэлемент	1-2	3-4	1-4	2-3
$\varnothing 30 \times 0,8$ мм	22	22	235	233

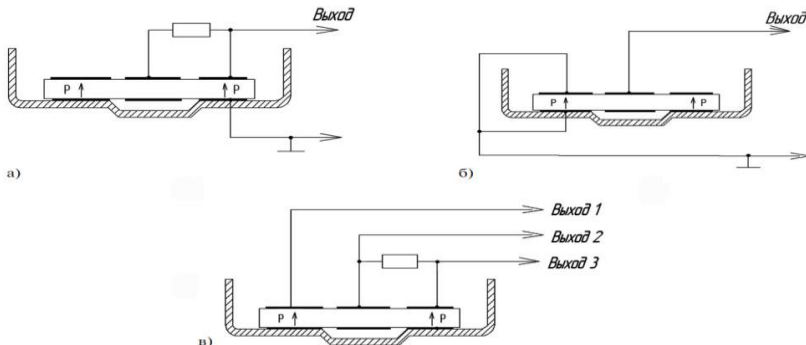
Қызықты жайт – электродтарды қосудың сұлбасын қарапайым өзгерту пьезоэлементтің динамикалық сипаттамаларына елеулі әсер етеді. Мысалы, 9.26-суретте пьезоэлементтерге меандр түріндегі электр кернеуі әсер еткен кездегі өтпелі сипаттамалар көрсетілген (9.26-сурет, а). Дәстүрлі датчик үшін өтпелі процесс тербелмелі буынға сәйкес келеді (9.26-сурет, б), ал ұсынылған сұлба бойынша жасалған датчик дифференциялайтын буын қасиеттеріне ие болады [28].



9.26-сурет. Пьезодатчиктерге меандр түріндегі электрлік кернеу әсер еткен кездегі өтпелі сипаттамалар: а – меандр түріндегі кернеу; б – дәстүрлі сұлба; в – доменді-диссипативті датчик сұлбасы.

Доменді-диссипативті пьезотрансформаторлар негізіндегі датчиктер

Доменді-диссипативті пьезотрансформаторлар негізінде механикалық шамаларды өлшеуге арналған датчиктер жасауға болады [25, 28]. Мұндай пьезодатчиктердің үш нұсқасы 9.27-суретте көрсетілген [21].



9.27-сурет. Доменді-диссипативті пьезодатчиктердің сұлбалары: а – сигналды интегралдау функциясымен; б – сигналды дифференциалдау функциясымен; в – үш шығысы бар сұлба.

Сондай-ақ, доменді-диссипативті пьезотрансформаторларды пьезоэлементтері бар электрлік сүзгі сұлбаларында қолдана отырып, механикалық шамаларды өлшейтін датчиктерді жасауға болатынын атап өткен жөн.

Пьезоэлектрлік датчиктердің сериялық түрде шығарылатын модельдері туралы ақпаратты датчик әзірлеушілердің, өндіруші кәсіпорындардың және сауда ұйымдарының ресми сайттарынан табуға болады [25-36].

9.12. Электроакустикалық түрлендіргіштер

Электроакустикалық түрлендіргіштер (ЭАТ) электр кернеуін акустикалық сигналға түрлендіруге арналған. ЭАТ газ ортасында [19, 22], суда (гидроакустикалық түрлендіргіштер, 14-тарауға қараңыз), сондай-ақ қатты ортада акустикалық сигналдарды пайдалану үшін (бұзбай бақылауға арналған түрлендіргіштер, 15-тарауға қараңыз) жұмыс істей алады.

Электроакустикалық түрлендіргіштер (таратқыштар) әдетте акустикалық сигналды қабылдағыштармен (датчиктермен) бірге жұмыс істейді. Қабылдағыш ретінде сол тарату режимінде жұмыс істей алатын түрлендіргіштер немесе бөлек датчиктер қолданылуы мүмкін.

ЭАТ әртүрлі физикалық принциптерге негізделіп жасалуы мүмкін. Механикалық, электродинамикалық, магнитострикциялық, электростатикалық және пьезоэлектрлік ЭАТ түрлері белгілі [4, 5, 7, 14, 19].

9.6-кестеде ультрадыбыстық диапазондағы түрлі ЭАТ түрлерімен жабдықталған қашықтық өлшегіштердің сипаттамалары келтірілген [19].

9.6-кесте. Қашықтық өлшегіштердің техникалық сипаттамалары

Түрлендіргіш түрі	Жұмыс жиілік диапазоны, кГц	Өлшенетін қашықтық диапазоны, м
Электродинамикалық	5-15	30 м дейін (50 м дейін)
Магнитострикциялық – тербеліс түрін түрлендірумен	16-30	70 м дейін
Магнитострикциялық – бойлық тербелістерге арналған	16-30	30 м дейін
Электростатикалық	16-30	30 м дейін
Пьезокерамикалық – тербеліс түрін түрлендірумен	16-60	30 м дейін
Пьезокерамикалық – бойлық тербелістерге арналған	20-60	30 м дейін
Пьезокерамикалық – иілу тербелістеріне арналған	40-60	70 м дейін (100 м дейін)

Жақшаның ішінде көрсетілген өлшеу қашықтықтары – бұл өлшеуіштердің жұмысы үшін идеалға жақын жағдайларда (мысалы, тегіс шағылыстыратын беттер болғанда) алынатын мәндер.

9.6-кестеден байқауға болады: ең үлкен өлшеу қашықтықтарын иілу тербелістерінде жұмыс істейтін пьезокерамикалық түрлендіргіштер қамтамасыз етеді.

Электроакустикалық түрлендіргіштерде (ЭАТ) иілу тербелістерін қолдану ең тиімді тәсіл болып табылады, өйткені бұл жағдайда түрлендіргіштердің акустикалық импеданстары басқа тербеліс түрлеріне қарағанда әлдеқайда

төмен болады. Мұндай түрлендіргіштер салыстырмалы түрде жоғары электроакустикалық түрлендіру коэффициентіне ие және жылжыманың (ығысу амплитудасының) үлкен мәндерін алуға мүмкіндік береді.

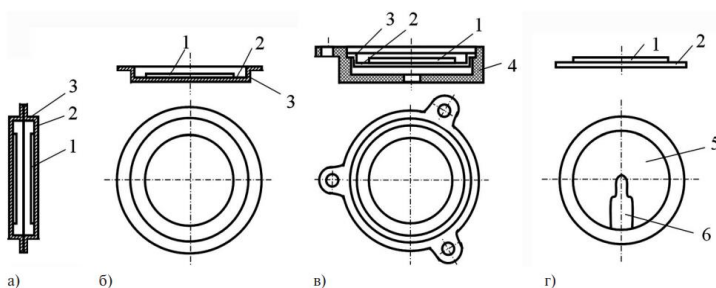
Иілу тербелістерін асимметриялы биморфты пьезокерамикалық түрлендіргіштерде қоздыру оңай (қ. 9.9-бөлім). Кейбір ЭАТ (зуммерлер, пьезоқоңыраулар) 9.28-суретте көрсетілген.

ЭАТ электрлік тербелістер генераторына қосылады немесе автогенератор сұлбасына енгізіледі.

Олар көбіне телефондарда, зуммерлерде, сиреналарда, қашықтық өлшеуіштерге арналған дыбыс таратқыштарда және басқа да құрылғыларда қолданылады.

ЗП-1 түрлендіргіші – екі биморфты элементтен тұратын құрылғы, олар өзара дәнекерлеу арқылы бекітілген. Бұл түрлендіргіш дыбыстық қысым деңгейін арттыру үшін және автогенераторлық сұлбаларда пайдалану үшін арналған.

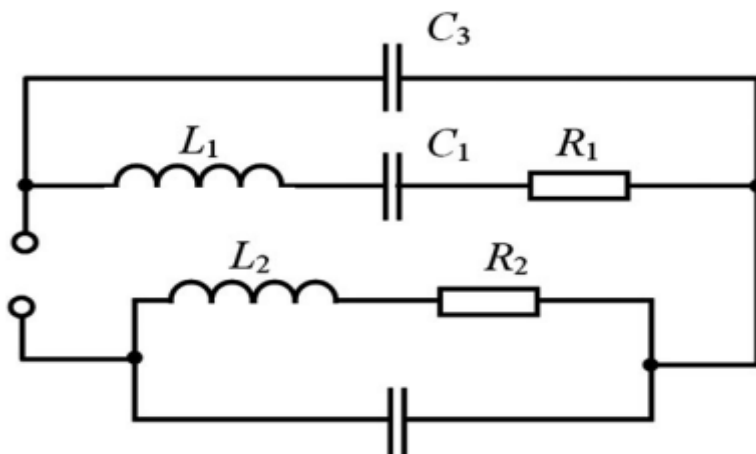
Мұндай құрылым (яғни екі биморфты элементтен тұратын) жасалатын дыбыстық қысым деңгейі бойынша аса жоғары көрсеткіштерге ие емес. ЗП-19 түрлендіргішінде биморфты элемент қатты түрде пластмасса корпусына бекітілген, ал бұл корпус Гельмгольц резонаторы ретінде қызмет атқарады. Бұл түрлендіргіштің электромеханикалық ұқсастықтар әдісімен алынған эквиваленттік электрлік сұлбасы 9.29-суретте көрсетілген.



9.28-сурет. Электроакустикалық түрлендіргіштердің (зуммерлердің, пьезоқоңыраулардың) құрылымы: а – ЗП-1; б – ЗП-2; в – ЗП-19; г – СВ 35ВВК (Taiyo Yuden Co, LTD);

Электроакустикалық түрлендіргіштердің (ЭАТ) маңызды сипаттамаларына мыналар жатады: жасалатын дыбыстық қысым деңгейі; жұмыс (резонанстық) жиілігі; түрлендіргіштің өткізу жолағы; бағыттық диаграммасы.

Дыбыстық қысым деңгейін арттыру, жұмыс жиілігін төмендету, өткізу жолағын кеңейту тәсілдері [19, 22] әдебиеттерінде сипатталған.



9.29-сурет. ЗП-19 түрлендіргішінің эквиваленттік электрлік сұлбасы

Әдебиеттер тізімі

1. Глозман И.А. Пьезокерамика. – М.: Энергия, 1972 – С. 288.
2. Грибовский П.О. Керамические твердые схемы. – М.: Энергия, 1971. – С. 448.
3. Джагулов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления. – Спб.: Политехника, 1994. – С. 608.

4. Домаркас В.И., Кажис Р.-Й.Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. – Вильнюс: Минтис, 1975. – С. 258.
5. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – С. 240.
6. Кварцевые резонаторы: Справочник / Под ред. П.Е. Кандыбы и П.Г. Позднякова. – М.: Радио и связь, 1989.
7. Королев М.В., Карнельсон А.Е. Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. – М.: Машиностроение, 1982. – С. 157.
8. Кэди У. Пьезоэлектричество и его практические применения. – М.: Изд. Иностран. лит., 1949.
9. Лавриненко В.В. Пьезоэлектрические трансформаторы. – М.: Энергия, 1975. – С. 112.
10. Магнитные и диэлектрические приборы/ Под. ред. Г. Катца. – М.: Энергия, 1964. – С. 416.
11. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). – М.: Машиностроение, 1977. – С. 464.
12. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 272.
13. Островский Л.А. Основы общей теории электроизмерительных устройств. – М.-Л.: Энергия, 1965. – С. 532.
14. Пьезокерамические преобразователи: Справочник / Под ред. С.И. Пугачева. – Л.: Судостроение, 1984. – С. 256.
15. Трофимов А.И. Пьезоэлектрические преобразователи статических нагрузок. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 64.
16. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник. – М.: Техносфера, 2005. – С. 592.
17. Харкевич А.А. Теория преобразователей. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1948. – С. 188.
18. Sharapov V. Piezoceramic sensors. – Springer Verlag, 2011. – 498 p.

19. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. – Москва: Техносфера, 2006. – С. 632.

21. Шарапов В.М., Минаев И.Г., Сотула Ж.В., Базило К.В., Куницкая Л.Г. Пьезокерамические трансформаторы и датчики / Под ред. В.М. Шарапова. – Черкассы: Вертикаль, 2010. – С. 278.

22. Шарапов В.М., Сотула Ж.В. Пьезокерамические электроакустические преобразователи. – Черкассы, 2012. – С. 280.

23. Шульга Н.А., Болкисев А.М. Колебания пьезоэлектрических тел. – Киев: Наукова думка, 1990. – 228 с.

24. Шульга Н.А., Шарапов В.М., Рудницкий С.И. Колебания дискового биморфного преобразователя типа металл-пьезокерамика // Прикладная механика. – Т. 26. – 1990. – №10.

25. www.elpapierzo.ru.

26. www.avrora.vlink.ru.

27. www.kisler.com

28. www.bkvibro.com

29. www.eurosensor.gliwice.pl

30. www.morgantechnicalceramics.com

31. www.sktbelpa.ru

32. www.akhtuba.vistcom.ru

33. www.sensorica.ru

34. www.niifi.sura.ru

35. www.priboy.ru

36. www.pgpribor.ru

ҚОРЫТЫНДЫ

Сенсорлар мен электронды түрлендіргіштердің заманауи технологиялары қазіргі техника мен ғылымның ажырамас бөлігіне айналып отыр. Бұл оқулықта сенсорлық жүйелердің теориялық негіздері, құрылымдық элементтері, әртүрлі физикалық шамаларды өлшеуге арналған сенсорлардың жұмыс принциптері, сондай-ақ аналогтық және цифрлық түрлендіру тәсілдері жүйелі түрде қарастырылды. Сонымен қатар, интеллектуалды сенсорлар мен олардың заманауи автоматтандырылған жүйелердегі орны, функционалдық мүмкіндіктері мен интеграциялық ерекшеліктері жан-жақты сипатталды.

Оқулық мазмұны арқылы болашақ мамандар тек техникалық сипаттамаларды игеріп қана қоймай, нақты инженерлік есептерді шешуде сенсорлар мен түрлендіргіштерді тиімді қолдануға дағдыланады. Теориялық білім мен практикалық мысалдардың үйлесімді берілуі, сондай-ақ өнеркәсіптік тәжірибелерге негізделген түсіндірулер бұл еңбектің қолданбалы маңызын арттыра түседі.

Зерттеулер мен техникалық жетістіктер көрсеткендей, сенсорлық жүйелердің сенімділігі, дәлдігі және жылдамдығы – түрлі салалардағы автоматтандырудың табысты жүзеге асуына тікелей әсер етеді. Сондықтан бұл оқулық тек білім алушылар үшін ғана емес, ғылыми-зерттеу және жобалау жұмыстарымен айналысатын мамандар үшін де құнды ақпарат көзі бола алады.

Жалпы алғанда, оқулық материалдары техникалық білім берудің сапасын арттыруға, инновациялық ойлау қабілетін дамытуға және заманауи өлшеу жүйелерін кәсіби деңгейде меңгеруге бағытталған. Кітап мазмұнының практикалық құндылығы мен ғылыми негізділігі алдағы уақытта инженерлік кадрлар даярлауға өзіндік үлес қосады деп сенеміз.

МАЗМҰНЫ

6 ТАРАУ ДАТЧИКТЕРДІҢ ОПТИКАЛЫҚ ЭЛЕМЕНТТЕРІ

6.1. Жалпы мәліметтер.....	3
6.2. Геометриялық оптиканың элементтері.....	6
6.3. Фотометрия	21
6.4. Оптикалық сәулелендіру көздері	24
6.5. Оптикалық материалдар	38
6.6. Линзалар	38
6.7. Жарық өткізетін терезелер.....	41
6.8. Жазық және сфералық айналар	41
6.9. Таспа-тамырлы оптикалық сымдар	44
6.10. Жылу сәулеленуді жұтатын жабындар.....	46
Әдебиеттер тізімі	48

7-ТАРАУ РЕЗИСТИВТІ ДЕТЕКТОРЛАР

7.1. Негізгі сипаттамалары.....	49
7.2. Жылжу сенсорлары – реостаттық сенсорлар	57
7.3. Тензорезисторлік датчиктер	64
7.4. Жартылай өткізгіштер тензодатчиктері	74
Әдебиеттер тізімі	77

8-ТАРАУ. СЫЙЫМДЫЛЫҚ ДАТЧИКТЕРІ

8.1. Жалпы мәліметтер.....	78
8.2. Сыйымдылықты қысым сенсорлары	84
8.3. Деңгей датчиктері.....	92
8.4. Жылжуды (беттегі тегіс еместікті) өлшейтін сыйымдылықты датчик	105

8.5. Сыйымдылық датчиктерінің өлшеу сұлбалары.....	106
Әдебиеттер тізімі	118
9 ТАРАУ. ПЬЕЗОЭЛЕКТРЛІК ДАТЧИКТЕР	
9.1. Жалпы мәліметтер	121
9.2. Пьезоэлектрлік материалдар	127
9.3. Пьезоэлектрлік датчиктердің жіктелуі	137
9.4. Пьезоэлектрлік датчиктерді зерттеу әдістері.....	138
9.5. Пьезоэлектрлік резонаторлар	140
9.6. Пьезокерамикалық трансформаторлар	143
9.7. Пьезокерамикалық элементтің кеңістіктік энергия-күш құрылымы	147
9.8. Пьезоэлектрлік датчиктердегі кері байланыс	151
9.9. Биморфты және триморфты пьезоэлементтер	156
9.10. Резонанстық пьезодатчиктер	162
9.11. Доменді-диссипативті пьезотрансформаторлар негізіндегі датчиктер	171
9.12. Электроакустикалық түрлендіргіштер	176
Әдебиеттер тізімі	179
ҚОРЫТЫНДЫ.....	182

Беттеу:
Туренова Б.Ю.,
Абайдельдинова Ж.Т.

Қазақстан Республикасы ПМ Мақан Есболатов атындағы
Алматы академиясы Ғылыми-зерттеу және редакциялық-баспа
жұмыстарын ұйымдастыру бөлімі
050060, Алматы, Өтепов көш. 29

Басуға 23 маусым 2025ж. жіберілді.
Пішімі 60х84 1/16 №1 баспаханалық қағаз.
Ризографтық басылыс. Есептік баспа табағы 5,3
Таралымы 100