

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ІШКІ ІСТЕР МИНИСТРЛІГІ**

**МАҚАН ЕСБОЛАТОВ атындағы
АЛМАТЫ АКАДЕМИЯСЫ**

**СЕНСОРЛАР МЕН ЭЛЕКТРОНДЫ
ТҮРЛЕНДІРГІШТЕРДІҢ ЗАМАНАУИ
ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ**

Оқу құралы

1 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. 1 Бөлім: Оқу құралы. – Алматы: ООНИиРИР Алматинской академии МВД Республики Казахстан им. М. Есбулатова, 2025. – 160 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.

АЛҒЫ СӨЗ

Бұл оқулық «Сенсорлар мен электронды түрлендіргіштердің заманауи технологиялары» тақырыбы аясында дайындалып, заманауи техникалық білім беру бағдарламаларына сай оқытушылар мен магистранттарға, сондай-ақ қолданбалы электроника және сенсорлық жүйелер саласында жұмыс істейтін мамандарға арналған.

Оқулықтың басты мақсаты – сенсорлық технологиялар мен электронды түрлендіргіштердің теориялық және практикалық негіздерін ғылыми жүйеде ұсыну, сондай-ақ заманауи өлшеу құралдары мен оларды басқару жүйелеріндегі қолдану тетіктерін жан-жақты қарастыру болып табылады. Қазіргі таңда автоматтандырылған басқару, өнеркәсіптік өндіріс, медицина, көлік, ауыл шаруашылығы мен ғарыш салаларында сенсорлық технологиялардың қолдану аясы қарқынды кеңейіп келеді. Осы орайда, болашақ инженерлер мен зерттеушілердің бұл бағыттағы базалық білімді меңгеруі аса маңызды. Аталған оқулық осы қажеттілікті өтеуге бағытталған.

Оқулық материалдарын дайындау барысында отандық және шетелдік ғылыми еңбектер, халықаралық стандарттар, зертханалық нәтижелер мен өнеркәсіптегі нақты тәжірибе кеңінен пайдаланылды. Сонымен қатар, сенсорлық жүйелердің құрылымдық элементтері, сигналдарды цифрлық және аналогтық түрлендіру әдістері, интерфейстік құрылғылар мен интеллектуалды сенсорлар мәселелері тереңірек талданды.

Осы еңбекті әзірлеу барысында ғылыми әдістемелік қолдау көрсеткен әріптестеріме, оқу процесінде қатысқан студенттерге және практикалық ұсынымдарымен бөліскен кәсіби мамандарға ерекше алғысымды білдіремін. Сондай-ақ бұл кітаптың мазмұнын жетілдіруге өз үлесін қосқан ғылыми редакторлар мен сарапшыларға да алғыс айтамын.

Бұл оқулық қазіргі заманғы инженерлік ойлауды қалыптастыруға, заманауи сенсорлық жүйелерді зерттеуге және жобалауға бағытталған кешенді оқу құралы ретінде қызмет етеді деп сенемін. Оқырман қауымға бұл еңбек пайдалы болып, кәсіби дамуына септігін тигізеді деген үміттемін. Кітапта физикалық шамаларды өлшейтін датчиктердің теориялық негіздері, жұмыс істеу принциптері, конструкциялары мен сипаттамалары баяндалады.

Әр тараудың соңында кеңейтілген библиография мен датчиктерді жасап шығарушы және өндіруші кәсіпорындардың сайттары келтірілген.

1-тарауда негізгі ұғымдар енгізіліп, терминдер мен анықтамалар қарастырылады, датчиктердің жіктелуі мен олардың құрылымында қолданылатын кейбір физика-техникалық эффекттер сипатталады.

2 және 3-тарауларда датчиктердің жалпы теориясының элементтері, электромеханикалық ұқсастықтар әдісі, датчиктердің статикалық, динамикалық және метрологиялық сипаттамалары, сондай-ақ типтік динамикалық буындар баяндалады.

4, 5, тарауларда датчиктерде жиі қолданылатын электрондық құрылғылар мен серпімді және оптикалық элементтер сипатталады.

7-10-тарауларда резистивті, сыйымдылықты, пьезоэлектрлік және электромагниттік датчиктер қарастырылып,

Кітап ғылыми қызметкерлерге, студенттерге, магистранттар мен аспиранттарға, сондай-ақ датчиктерді, өлшеу аспаптарын, есептеу техникасы элементтері мен басқару жүйелерін жобалау саласындағы мамандарға арналған.

I ТАРАУ

НЕГІЗГІ ҰҒЫМДАР МЕН АНЫҚТАМАЛАР.

ДАТЧИКТЕРДІҢ ЖІКТЕЛУІ

Датчик – бұл өлшенетін (бақыланатын) физикалық шаманы әрі қарай түрлендіруге немесе өлшеуге ыңғайлы шамаға түрлендіретін түрлендіргіш.

Датчик – өлшеу құралдарының, бақылау және реттеу жүйелерінің міндетті элементі болып табылады. Шын мәнінде, датчиктерсіз өлшеу де, бақылау да, реттеу де мүмкін емес.

Датчиктерді құрастыру үшін 500-ден астам физикалық эффектiлер (принциптер) пайдаланылады. Олардың кейбірі 1.1-кестеде келтірілген.

Датчиктердің дамуы мен жетілдірілуі көбіне физика, химия, физикалық химия, механика, радиотехника және басқа ғылымдар саласындағы жетістіктерге байланысты. Датчиктердің дамуына заманауи технологиялардың мүмкіндіктері мен жетістіктері ерекше ықпал етеді.

Датчиктердің жұмыс істеу принциптері өлшенетін шаманың физикалық табиғатына, оның абсолюттік мәніне, түрлендіру дәлдігіне және басқа факторларға байланысты әртүрлі болуы мүмкін. Алайда, көп жағдайда кіріс физикалық шамаларын сәйкес шығыс сигналдарына түрлендіру энергияны түрлендірумен байланысты, яғни бір түрдегі энергияны басқа түрге айналдыру процесі жүреді. Өлшеу түрлендіргіштерінің жұмыс істеу принципін энергетикалық түрде қарастыру – яғни энергияның сақталу заңы мен қайтымдылық принципіне негізделген – А.А. Харкевичтің өлшеу түрлендіргіштерінің жалпы теориясының негізін қалауға және оларды әртүрлі физикалық табиғаты бар пассивті төрт полюстік элементтер түрінде сипаттауға мүмкіндік берді [53].

Өлшеу түрлендіргіштерінің жалпы теориясы Д.И. Агейкин, Л.А. Островский, А.М. Туричин, П.В. Новицкий және басқа зерттеушілердің еңбектерінде жалғасын тапты.

Жекелеген физикалық шамаларға арналған датчиктердің теориясы мен практикасына Д.И. Агейкин, Ж. Аш, Ф.Б. Байбаков, А.И. Бутурлин, В.И. Ваганов, В.А. Викторов, Дж. Вульвет, Г. Выглеб, А.Н. Гордов, З.Ю. Готра, Р. Джексон, В. Домаркас, Г.Г. Ишанин, П.П. Кремлевский, Л.Ф. Куликовский, Е.С. Левшина, Я. Луцик, В.В. Малов, Ф. Мейзда, И.Г. Минаев, П.В. Новицкий, Ю.Р. Носов, Г. Нуберт, П.П. Орнатский, Е.П. Осадчий, Л.А. Осипович, Е.С. Полищук, В.П. Преображенский, С.И. Пугачев, А.С. Совлуков, В.В. Солодовников, С.А. Спектор, Б.И. Стадник, С.Г. Таранов, Р. Тиль, Н.Г. Фарзане, Дж. Фрайден, А.В. Храмов, В.М. Шарапов, В. Эрлер, Н.Н. Norton, S. Thomson, R.W. White және басқалар елеулі үлес қосты (1-тарауға арналған әдебиеттерді қараңыз).

1.1. Терминдер мен анықтамалар

Кез келген мәселені зерттеуді бастамас бұрын терминология туралы келісіп алған дұрыс. Бұл әсіресе әртүрлі көзқарастар бар, бір техникалық құрылғыға әртүрлі атаулар қолданылатын, ұзақ қалыптасқан дәстүрлері бар салаларда өте маңызды.

Анықтама – бұл шынайы құбылыс не объектінің тілдік моделі және кез келген модель сияқты шектеулі, қарапайымдандырылған және жуықталған сипатта болады, онда шынайы, шартты түрде шынайы және жалған ақпараттар да болуы мүмкін. Осыдан, бір ғана құбылысқа немесе объектіге бірнеше модельдер (демек, бірнеше анықтамалар) сәйкес келуі мүмкін. Яғни әр анықтама – зерттеліп отырған құбылыстың немесе объектінің бір қыры.

Әдебиеттерде кеңінен қолданылатын терминдер: «өлшеу түрлендіруі», «өлшеу түрлендіргіші», «датчик»,

«сезгіш элемент», «сенсор», «өлшеуіш құрал», «өлшеу құралдары» – олардың анықтамалары да сан түрлі. Мысалы:

Түрлендіргіштер – бұл бір физикалық шаманы, бір энергия түрін немесе ақпаратты басқа физикалық шамаға, энергия түріне немесе ақпаратқа түрлендіретін құрылғылар [41, 43].

Кең мағынада түрлендіргішке мыналар жатады: қысымды электрлік сигналға түрлендіретін құрылғы (қысым датчигі), бір деңгейдегі кернеуді басқа деңгейге түрлендіретін құрылғы (трансформатор), электрлік кернеуді білік айналуына айналдыратын құрылғы (электр қозғалтқышы), энергияны қозғалысқа айналдыратын жүйелер (ұшақ, автомобиль), тіпті тірі ағза да өзінше бір түрлендіргіш болып саналады.

Өлшеу түрлендіруі – бұл бір физикалық шаманың шамасын екінші, функционалды түрде байланысқан басқа физикалық шама арқылы бейнелеу [39, 40].

Өлшеу түрлендіргіші – белгілі бір физикалық принципке негізделген, бір өлшеу түрлендіруін орындайтын техникалық құрылғы [39, 40].

Тағы бір анықтама бойынша, өлшеу түрлендіргіші – бұл бір физикалық шаманы қолдануға және өңдеуге ыңғайлы басқа шамамен түрлендіретін құрылғы [18, 39].

Өлшеу түрлендіруі – бұл кіріс өлшеу сигналының онымен функционалды байланысқан шығыс сигналына түрленуі.

Өлшеу түрлендіргіші (ӨТ) – бұл өлшеу құралы, оның міндеті – кіріс өлшеу сигналы (өлшенетін шама) мен оны әрі қарай өңдеуге, жеткізуге, сақтауға ыңғайлы, бірақ тікелей бақылаушы қабылдай алмайтын шығыс сигналын түрлендіру [29].

Өлшеуіш құрал – бұл өлшенетін физикалық шаманың мәнін бақылаушының тікелей қабылдауына мүмкіндік беретін формада шығыс сигналын шығаратын өлшеу құралы [39].

Бастапқы өлшеу түрлендіргіші – бұл өлшеу немесе бақылау объектісімен тікелей әрекеттесетін, бір физикалық шаманы нақты функционалды түрде басқа физикалық шамаға түрлендіруге арналған техникалық құрылғы [54].

Объект – адам осы сәтте бақылайтын немесе бақылай алатын құбылыс немесе ішкі/сыртқы дүниенің бөлігі.

Материалдық объект – зерттеушіге қажетті ақпарат беретін материалдық зерттеу нысаны.

Өлшеу немесе бақылау объектісі – бұл өлшенетін физикалық шамалармен немесе олардың арасындағы тәуелділіктермен сипатталатын материалдық объект немесе процесс.

Сезгіш элемент (бастапқы сезгіш түрлендіргіш) – өлшенетін физикалық шаманы қабылдайтын құрылымдық элемент немесе құрылғы [60]. Ол өлшеу тізбегіндегі бастапқы түрлендіргіш болып табылады және кіріс сигналын (өлшенетін шаманы) әрі қарай ақпараттық өңдеуге ыңғайлы шамаға түрлендіреді.

Техникада сезгіш элементтерді детектор, датчик, қабылдағыш, зонд немесе өлшеу басы деп атайды.

Датчик – бұл жеке сезгіш элемент немесе біріктірілген сезгіш элементтер тобы [60].

Детектор – сәуле, өрістер немесе бөлшектерді өлшеу немесе тіркеу үшін қолданылатын сезгіш элемент (датчик) [60].

Өлшеу түрлендіргішінің басты элементі – белгілі бір физикалық эффектiге (принципке) негiзделген сезгiш элемент – сенсор [24, 39, 55, 61].

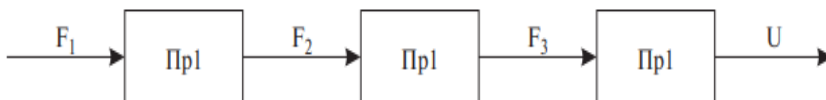
Принцип (лат. *principium* – негіз, бастау) – қандай да бір ғылымның, теорияның бастапқы ережесі, құрылғының немесе механизмнің жұмыс істеуінің негізі [29].

Сенсор (лат. *sensus* – сезім, түйсік) – бұл жасанды сезгіш құрылғылар немесе тірі организмдердің сезгіш органдары [29].

Датчик – бұл сигналдар мен сыртқы әсерлерді қабылдап, оларға жауап қайтаратын құрылғы [49].

Датчик – бұл өлшеу объектісіне орнатылатын және біріктірілген бір не бірнеше өлшеу түрлендіргіштерінен тұратын құрылымдық торап [24].

Жалпы жағдайда датчик бірнеше түрлендіргіштен тұруы мүмкін [24, 39, 55, 60].



Сурет 1.1. Датчиктің функционалдық схемасы:

Pr1, Pr2, Pr3 – түрлендіргіштер;

F_1 – кіріс физикалық шама;

F_2, F_3 – аралық физикалық шамалар;

U – шығыс электрлік сигнал

Кез келген датчик – бұл энергияны түрлендіргіш. Өлшенетін шаманың түріне қарамастан, зерттелетін объектіден датчикке энергия беріледі. Датчиктің жұмысы – ақпарат беру процесінің ерекше түрі, ал кез келген ақпарат беру энергия берумен тығыз байланысты [50].

Датчик – бұл механизмнің, тірі организмнің немесе басқа да құбылыстардың жұмысын арнайы аспаптарға жеткізетін және қабылдайтын құрылғы [29].

Өлшеу түрлендіргіші – бұл өлшеу құралы болып табылатын және оның техникалық және метрологиялық сипаттамалары қалыпқа келтірілуі мүмкін құрылғы [39, 40].

Кейде **датчик** деп – өлшеу процесінде зерттелетін объект аймағында тікелей орнатылатын және өлшеу түрлендіргішінің функциясын орындайтын құрылымдық тұрғыдан аяқталған құралды айтады [57].

Ағылшын тілінде «**sensor**» сөзі «сенсор», «датчик», «сезгіш элемент» деген мағыналарды білдіреді.

«Датчик» («сенсор», «сезгіш элемент») және «бастапқы түрлендіргіш» терминдерінің мағыналары шамамен бірдей болғанымен, олардың арасында мағыналық және мазмұндық

айырмашылықтар да бар. Датчик (сенсор, сезгіш элемент) – физикалық шаманы «сезеді», ал түрлендіргіш – оны түрлендіреді (соның ішінде физикалық шаманы да).

Мұндағы «сезу» ұғымы – физикалық шаманы кейінгі өңдеуге немесе қабылдауға ыңғайлы түрге түрлендіруді білдіреді. Әдетте, бұл – индикатор көрсеткішіне оңай түрлендіруге болатын **электрлік сигнал**. Дегенмен, бұл міндетті түрде электрлік сигнал болмауы мүмкін – бұл, мысалы, ерітіндіде немесе газда белгілі бір заттың болуын білдіретін **түстің өзгеруі** (ерітіндіде немесе лакмус қағазында) болуы мүмкін.

Ал **«түрлендіру»** ұғымы, жоғарыда атап өткендей, әлдеқайда кең мағынаға ие.

Өлшеу құралы – бұл өлшеу кезінде қолданылатын және метрологиялық сипаттамалары қалыпқа келтірілген техникалық құрал.

Өлшеу түрлендіргіші – бұл өлшеу құралы ретінде қолданылатын және оның техникалық әрі метрологиялық сипаттамалары стандартталған құрылғы [39, 40].

Кейде «датчик» деп зерттелетін объект аймағына тікелей орнатылып, өлшеу түрлендіргішінің қызметін атқаратын құрылымдық жағынан толық құралды атайды [57].

Ағылшын тіліндегі «sensor» сөзі қазақ тіліне «сенсор», «датчик» немесе «сезгіш элемент» деп аударылады.

«Датчик» (сенсор, сезгіш элемент) және «бастапқы түрлендіргіш» ұғымдары өзара мағынасы жағынан жақын болғанымен, олардың арасында мазмұндық айырмашылықтар бар. Датчик (сенсор, сезгіш элемент) физикалық шаманы «сезсе», түрлендіргіш оны белгілі бір түрге түрлендіреді (оның ішінде физикалық шамаларды да).

Мұндағы «сезу» дегеніміз – физикалық шаманы әрі қарай өңдеуге немесе қабылдауға ыңғайлы формаға келтіру. Көп жағдайда бұл индикатор көрсеткішіне оңай түрлендіруге болатын электрлік сигнал түрінде жүзеге асады. Алайда бұл міндетті түрде электр сигналы болмауы да мүмкін – мысалы,

ерітіндіде немесе газда белгілі бір заттың бар екенін білдіретін түс өзгерісі (лакмус қағазы арқылы) болуы мүмкін.

Ал «түрлендіру» ұғымы бұдан кең мағынаға ие екенін жоғарыда атап өттік.

Өлшеу құралы – бұл өлшеу жүргізу кезінде қолданылатын және метрологиялық сипаттамалары стандартталған техникалық құрал.

1.2. Датчиктердің жіктелуі

Жіктеу – берілген объектіні бір классқа жатқызу операциясы, оның ішінде объектілер бір-бірінен ажыратылмайтын болып саналады. Жіктеу – осы операцияның нәтижесі [38, 58]. Жіктеу – ең қарапайым модельдеу түрі, оның ішінде өлшеудің ең әлсіз түрі [38, 58].

Жіктеу – бастапқы, ең қарапайым модель. Жіктеу толықтығы оның құрылуында ерекше назар аударуды талап етеді. Көп жағдайда бір класс ішінде шектеулер қою қажет болып, бірақ осы шектеулерді сақтай отырып, жалпы ұқсастықты жоюға болмайды. Мұндай жағдайда ішкі класстар пайда болып, нәтижесінде көп деңгейлі, иерархиялық жіктеу жүйесі қалыптасады.

Лингвистикалық модельдер сияқты, жіктеу де кез келген модель сияқты шектеулі, қарапайым және жуықтама болып табылады, оның ішінде шынайы, шартты шынайы және жалған ақпараттар болуы мүмкін.

Осыдан шығатын қорытынды – әртүрлі классификациялық белгілер бойынша түрлендіргіштер мен датчиктердің көптеген жіктелулері болуы мүмкін. Мысалы, [55] жұмысында 24 классификациялық белгілер бойынша датчиктердің жіктелуі көрсетілген.

Датчиктерді жіктеу мәселесі, ең алдымен, тиімді классификациялық белгілерді анықтауды талап етеді [66]. Датчиктердің барлық алуан түрлілігі туралы ең толық түсінік

алу үшін көптеген классификациялық белгілерді ескеретін жалпы жіктемені ұсынуға болады (сурет 1.2).

Ең жалпы жіктеу датчиктерді ақпаратты тұтынушыларға байланысты бөледі.

Датчиктердің тұтынушылары үшін маңызды ақпарат – бұл белгілі бір физикалық шама (ФШ) өлшенетін датчиктер туралы мәліметтер, оның шығыс және кіріс параметрлері мен сигналдары, техникалық және метрологиялық сипаттамалары. Мұндай тәсіл физикалық шама түрлеріне байланысты классификациялық схема құруды талап етеді.

Датчиктерді әзірлеушілерге, студенттерге, датчиктердің жұмысын зерттейтін мамандарға маңызды ақпарат – олардың әрекет ету физикалық принциптері, немесе дұрысы, олардың әрекет принциптерін анықтайтын физикалық заңдылықтар.

Кіріс және шығыс шама түрлеріне қарай өлшеу түрлендіргіштерін (датчиктер) төрт үлкен классқа бөлуге болады (сурет 1.3) [61]:

- электрлік шамаларды электрлікке түрлендіру, мысалы, уақыт бойынша үздіксіз (аналогтық) сигналдарды үзілісті (дискретті, сандық) сигналдарға түрлендіру;

- электрлік емес шамаларды электрлік емеске түрлендіру, мысалы, мембрананың қатты орталығының жылжуы арқылы қысымды жылжыту;

- электрлік шамаларды электрлік емеске түрлендіру, мысалы, тоқты құралдың көрсеткішінің ауытқуымен;

- электрлік емес шамаларды электрлікке түрлендіру. Бұл түрлендіргіштерге (датчиктерге) бүкіл кітапта көптеген мысалдар келтірілген, сондықтан олар туралы қосымша мәліметтер келтірілмейді.

Датчиктер үшін ең маңызды классификациялық белгі – әрекет ету физикалық принципі, яғни физикалық шамаларды түрлендіру принципі, ол белгілі бір физикалық, электрохимиялық, биоэлектрондық, химиялық және басқа да әсерлерге (құбылыстарға) негізделген. Мұндай классификация сурет 1.4-те көрсетілген.



Сурет 1.3. Өлшеу түрлендіргіштерін кіріс және шығыс шамалар түріне қарай жіктеу



Сурет 1.4. Датчиктерді әрекет принципі бойынша жіктеу

Сондай-ақ, датчиктерді өлшенетін электрлік емес шамалар түріне (сурет 1.5) және электрлік шамалар түріне (сурет 1.6) қарай жіктеуге болады.

Физикалық принцип бойынша датчиктер (түрлендіргіштер) физикалық (электрлік, магниттік, жылулық, оптикалық, акустикалық және т.б.), химиялық және комбинирленген (физико-химиялық, электрохимиялық, биоэлектрлік және т.б.) болып бөлінеді. Датчиктің әрекет ету принципі негізінен қандай заңдылық қолданылатынына байланысты анықталады. Дегенмен, кейбір датчиктер ешбір аталған кластарға жатпайды, мысалы, механоэлектрлік датчиктер. Мұндай датчиктер комбинирленген деп аталады.

Шығу шамасының түрі мен сыртқы энергия көзіне қажеттілікке қарай датчиктерді генераторлық (белсенді) және параметрлік (пассивті) деп бөлуге болады. Генераторлық датчиктердің шығыс шамасы электрлік шамалар (кернеу, заряд, ток, электродвижушы күш (ЭДС)), ал параметрлік датчиктердің шығыс шамасы электрлік емес параметрлер (мысалы, кедергі, индуктивтілік, сыйымдылық, диэлектрлік немесе магниттік өтімділік және т.б.) болады.

Генераторлық датчиктерде сыртқы энергия көзі қажет емес. Мысалы, пьезоэлектрлік датчикте өлшенетін күштің

әсерінен пьезоэлемент электродтарында электр заряды (немесе электр кернеуі) пайда болады.

Параметрлік датчиктерде өлшенетін физикалық шама әсерінен параметрлердің бірі (мысалы, тензорезисторларда электр кедергісі) өзгереді. Шығу электрлік сигналын алу үшін энергия көзі (ток немесе кернеу) қажет. Демек, датчиктер қосымша энергия көзін (немесе қосымша энергия көзсіз) талап етуі мүмкін.



Сурет 1.5. Датчиктерді өлшенетін электрлік емес шамалар түріне қарай жіктеу



Сурет 1.6. Датчиктерді өлшенетін электрлік шамалар түріне қарай жіктеу

Датчиктерде қолданылатын қосымша энергия көздері әртүрлі болуы мүмкін: электрлік, гидравликалық, пневматикалық, механикалық, оптикалық және т.б. Бір датчикте бірнеше осындай көздер болуы мүмкін.

Функционалдық мақсаты бойынша датчиктерді (түрлендіргіштерді) келесідей топтастыруға болады:

– Индикаторлық (метрологиялық сипаттамалары қалыпқа келтірілмеген). Бұл датчик физикалық шаманың бар екендігі немесе жоқтығы туралы ақпарат береді.

– Өлшеуіш (метрологиялық сипаттамалары қалыпқа келтірілген). Бұл датчик физикалық шаманы дәл өлшейді.

– Комбинирленген.

Физикалық шаманы түрлендіру әдісі бойынша датчиктер (түрлендіргіштер) келесідей бөлінеді (сурет 1.7):

– Тікелей бір сатылы немесе көп сатылы түрлендіру датчиктері. Мұнда өлшенетін физикалық шама басқа физикалық шамаға түрлендіріледі, нәтижесінде датчиктің шығыс сигналы пайда болады.

– Тікелей емес түрлендіру датчиктері. Мұнда өлшенетін физикалық шама алдымен аралық физикалық шамаға түрленеді, содан кейін осы аралық шама датчиктің шығыс сигналына түрлендіріледі.

– Комбинирленген типті датчиктер.



Сурет 1.7. Физикалық шамаларды түрлендіру әдістері бойынша датчиктердің классификациясы

Физикалық шаманы түрлендіру сипаттамасына қарай датчиктер екі топқа бөлінеді:

– Непрерывді әрекет ететін датчиктер – физикалық шаманың мәні үздіксіз түрлендіріледі.

– Дискретті (циклді) әрекет ететін датчиктер – физикалық шаманың мәні үзіліссіз немесе циклдер арқылы түрлендіріледі.

Объектпен өзара әрекеттесу түріне және элементтердің санына қарай датчиктер келесідей бөлінеді:

- Стационарлық немесе қозғалып тұратын датчиктер.
- Контактты немесе бейконтактты датчиктер.
- Кеңістіктегі таралуы бойынша (үздіксіз, дискретті немесе көп элементті) кеңістіктік таралған датчиктер.
- Жинақталған (бір элементті) датчиктер.

Кеңістіктік таңдау ерекшелігі бойынша датчиктер екі топқа бөлінеді:

- Бағытталған әрекет ететін датчиктер.
- Бағытталмаған әрекет ететін датчиктер.

Шығару сәулесінің көзінің болуы бойынша датчиктер:

- Сәулелену көзін қолданатын датчиктер (мысалы, газ анализаторларының ионизациялық датчиктері).
- Сәулелену көзін қолданбайтын датчиктер.

Қосымша өндеуге арналған электронды және есептеу құрылғыларымен жабдықталған түрлендіргіштердің кең таралуы байқалады. Мұндай өндеу датчиктің шығатын сигналын түзетуі мүмкін, мысалы, әсер ететін факторларға байланысты қателіктерді түзету.

Түрлендіру теңдеулерінің түріне байланысты датчиктер:

- Тең сызықты тәуелділігі бар датчиктер – шығатын сигнал мен өлшенетін физикалық шаманың арасында сызықтық байланыс бар.
- Теңсіз сызықты тәуелділігі бар датчиктер – шығатын сигнал мен өлшенетін физикалық шаманың арасында сызықтық емес байланыс бар.

Өндіріс технологиясына қарай датчиктер:

- Көлемдік монтаж технологиясы бойынша жасалатын.
- Баспа монтажі технологиясы бойынша жасалатын.

– Гибридітік және полупроводниктік технологиялар қолданылатын.

– Микро және нанотехнологиялар арқылы жасалатын.

Фазалық өзгеріс немесе полярлықты айқындау мүмкіндігіне қарай датчиктер:

– Фаза сезгіш (реверсивті) – кіріс физикалық шамасының фазасы мен полярлығына байланысты өзгерістерді сезеді.

– Фаза сезімтал емес (нереверсивті) – шығыс сигналы кіріс шамасының полярлығына тәуелсіз болады.

Шығатын сигналдың өзгеру сипатына қарай датчиктер үш топқа бөлінеді:

– Аналогтық шығыс сигналы бар датчиктер – сигнал үздіксіз өзгеріп отырады.

– Дискретті шығыс сигналы бар датчиктер – мысалы, импульс түрінде өзгертін сигнал.

Физикалық шамаларды түрлендіру әдістері:

– Тікелей түрлендіру әдісі.

– Дифференциалды әдіс.

– Орнына қою әдісі.

– Нөлдік әдіс (сурет 1.8).



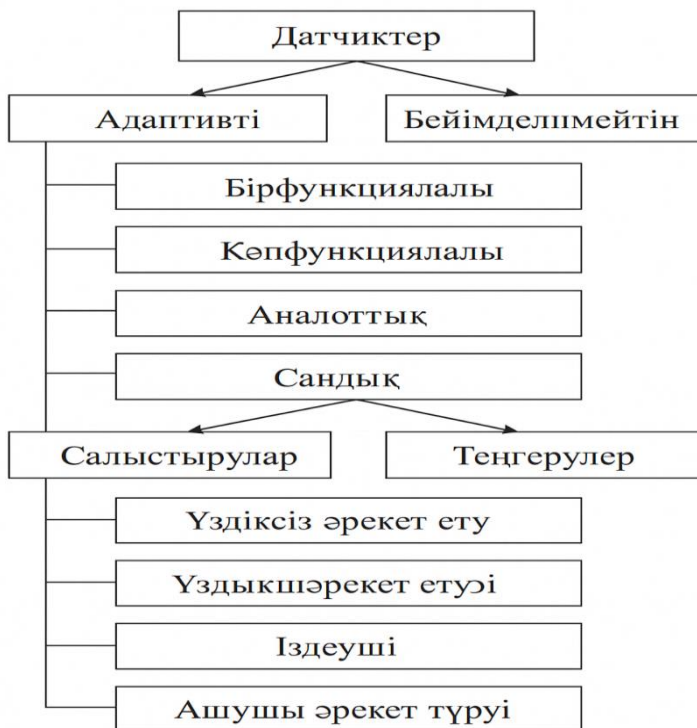
Сурет 1.8. Датчиктерде қолданылатын түрлендіру әдістері

Дифференциалдық әдіс, ауыстыру әдісі және нөлдік әдіс жалпы салыстыру әдісіне жатады [54, 59].

Түрлендіру әдістері де тікелей түрлендіру әдістері және теңгеру түрлендіру әдістері болып бөлінеді.

Теңгеру түрлендіру әдісі тізбектерде тура түрлендіру және кері байланыс болған жағдайда жүзеге асырылады.

Датчиктерде (түрлендіргіштерде) ақпараттық түрлендірулердің сипатына және шығыс сигналдарын алу тәсіліне қарай датчиктерді бірнеше топқа бөлуге болады (1.9-сурет).



1.9-сурет. Шығыс сигналдарын алу тәсілі және оларда орындалатын ақпараттық түрлендірулердің сипаты бойынша датчиктердің жіктелуі

Физикалық шамаларды түрлендірудің ерекшеліктеріне бейімделу сипатына қарай датчиктер бейімделмелі (адаптивті) және бейімделмеген (адаптивті емес) болып бөлінеді. Олар өз кезегінде бір функционалды және көпфункционалды болуы мүмкін.

Шығыс ақпаратының түріне қарай датчиктер (түрлендіргіштер) аналогтық, дискретті (сандық) және аналогты-сандық болуы мүмкін. Сонымен қатар, датчиктерде салыстыру немесе теңгеру принциптері қолданылуы мүмкін.

Салыстыру принципі негізінде жасалған түрлендіргіштер

- үздіксіз әрекет ететін немесе
- циклдік әрекет ететін болып бөлінеді.

Теңгеру принципі негізінде жасалған түрлендіргіштер

- іздеу (следающий) немесе
- тарату (развертывающего) әрекеті түрінде жүзеге асырылуы мүмкін.

Берілген датчиктердің жіктелуі өлшеу техникасында және автоматты басқаруда кеңінен қолданылса да, олар мүлдем дұрыс және толық аяқталған деп санауға болмайды. Бұл жіктемелер тек осы саладағы білім деңгейімізді сипаттайды.

1.3. Физикалық шамалар датчиктерінде қолданылатын кейбір физикалық эффектілер

Датчиктерде пайдаланылатын негізгі физикалық эффектілер 1.1-кестеде көрсетілген.

1.1-кесте – Датчиктерде пайдаланылатын негізгі физикалық эффектілер

№	Эффект атауы	Қысқаша сипаттамасы
1	Акустикалық парамагниттік резонанс	Тұрақты магнит өрісінде орналасқан парамагниттік кристал арқылы белгілі жиіліктегі ультрадыбыстық толқын өткен кезде оның энергиясын резонанстық сіңіруі.
2	Желдеткіш фототиім	Оптикалық сәулелену сіңірілген кезде әртүрлі жартылайөткізгіштердің немесе жартылайөткізгіш пен металл арасындағы түйіспеде пайда болатын электрқозғаушы күш.
3	Құйын токтары (Фуко токтары)	Магнит ағыны қарқындылығы өзгерген кезде электрөткізгіштің ішінде тұйықталған токтардың пайда болуы.
4	Гальваноупругий магниттік эффект	Магнит өрісінде орналасқан ферромагниттің электрлік кедергісінің серпімді созылу немесе қысу әсерінен өзгеруі.
5	Магнит өрісінің электр тогы бар контурға әсері	Біртекті магнит өрісінде орналасқан ток бар рамкаға әсер ететін айналу моментінің әсерінен рамканың айналуы.
6	Электрожылулық эффект	Электр өрісінің әсерінен пироэлектрлік кристалдың температурасының өзгеруі.
7	Электростатикалық индукция	Электр өрісі әсерінен өткізгіш немесе диэлектриктің бетінде қарама-қарсы зарядтардың жинақталуы.
8	Электромагниттік индукция	Уақыт бойынша өзгеретін магнит ағыны кезінде электрөткізгіш контурда электрқозғаушы күштің пайда болуы.
9	Зеебек эффектісі	Тізбекке әртүрлі температурадағы өткізгіштерді қосқанда пайда болатын термоэлектрлік қозғаушы күш.
10	Томсон эффектісі	Температура градиенті бар өткізгіште ток өткенде жылу бөлінуі немесе сіңірілуі (Джоуль жылуынан басқа).

1.1-кестенің жалғасы

№	Эффект атауы	Қысқаша сипаттамасы
11	Пельтье эффектісі	Әртүрлі металдардың түйіспесі арқылы электр тогы өткенде жылудың бөлінуі немесе сіңірілуі.

12	Холл эффектісі	Электр тогы өтетін өткізгіште сыртқы магнит өрісінің әсерінен пластинаның шетінде потенциалдар айырмасы пайда болады.
13	Электрострикция	Сыртқы электр өрісінің әсерінен диэлектриктердің пішінінің өзгеруі (деформациясы).
14	Фарадей эффектісі	Сызықты поляризацияланған жарықтың магнит өрісінде айналуы (оптикалық айналу эффектісі).
15	Нернст эффектісі	Магнит өрісінде орналасқан заттағы температура градиенті әсерінен токтың пайда болуы.
16	Нернст-Эттингсхаузен эффектісі	Магнит өрісіндегі өткізгіште токқа перпендикуляр бағытта қосымша электр өрісі пайда болады.
17	Ритт-Ледюк эффектісі	Магнит өрісіндегі өткізгіште температура айырмасы әсерінен екінші температура айырмасының пайда болуы.
18	Кулон заңы	Зарядталған денелер арасындағы өзара әсер күші олардың зарядтарының көбейтіндісіне тура, ал арақашықтық квадратына кері пропорционал.
19	Бүкіләлемдік тартылыс заңы	Екі дененің арасындағы тартылыс күші олардың массаларының көбейтіндісіне тура, арақашықтығының квадратына кері пропорционал.
20	Ампер заңы	Электр тогы бар өткізгішке магнит өрісі тарапынан әсер ететін механикалық күш.
21	Ом заңы	Электр тогының пайда болуы кернеуге тура, ал кедергіге кері пропорционал.
22	Био-Савара Лаплас заңы	Электр тогының магнит өрісін тудыруын сипаттайтын заң.
23	Кері пьезоэффект	Кристалл құрылымдағы диэлектрикте электр өрісі әсерінен серпімді деформацияның пайда болуы.
24	Джоуль–Ленц заңы	Өткізгіш арқылы ток өткенде бөлінетін жылу токтың квадратына, кедергіге және уақытқа тура пропорционал.
25	Фарадей заңы	Электролиз кезінде бөлінетін зат массасы ток күші мен уақытқа тура пропорционал.

1.1-кестенің жалғасы

№	Эффект атауы	Қысқаша сипаттамасы
26	Нернст теңестірілген потенциалының температураға және концентрацияға тәуелділігі	Металл электродтың потенциалы температураға және ерітіндідегі зат концентрациясының логарифміне тура пропорционал.
27	Сұйық заттардың электропроводтілігінің концентрацияға тәуелділігі	Сұйықтың өткізгіштігі электрод ауданына және меншікті электропроводтілікке тура, ал электрод арасындағы арақашықтыққа кері пропорционал.
28	Кристалл заттардың балқу температурасының қысымға тәуелділігі	Кристалл заттардың балқу температурасы қысым артқанда көтеріледі. Егер балқу кезіндегі көлемнің өсуі байқалса, температура артады.
29	Қатты денелердің электрлік кедергісінің қысымға тәуелділігі	Қатты дененің электрлік кедергісі жоғары қысымда өзгереді, әсіресе металл емес заттарда қысым артқанда кедергі азаяды.
30	Газ сыну көрсеткішінің тығыздыққа тәуелділігі	Газдың сыну көрсеткіші оның тығыздығына тура пропорционал. Бұл тәуелділік квадарттық сипатта болады.
31	Газдың сыну көрсеткішінің қысымға тәуелділігі	Газ қысымының артуымен сыну көрсеткіші де артады, бұл қысым мен температура тұрақты болғанда сызықтық сипатта болады.
32	Серпімділік модулінің температураға тәуелділігі	Температура артқанда қатты денелердің серпімділік модулі азаяды.
33	Металдар мен қорытпалардың аққыштық шекарасының температураға тәуелділігі	Температура артқанда металдардың аққыштық шекарасы азаяды. Бұл тәуелділік экспоненциалдық сипатта.
34	Металдардың балқу температурасына жақын тығыздық өзгерісі	Балқу температурасына жақын кезде металдардың тығыздығы күрт төмендейді.
35	Акустоимпульссия	Интенсивті акустикалық тербеліс әсерінен сұйықтық ағыны пайда болады (акустикалық кавитация).

1.1-кестенің жалғасы

№	Эффект атауы	Қысқаша сипаттамасы
36	Газдың электр өрісі әсерінен ионизациясы	Күшті электр өрісінің әсерінен газ атомдары мен молекулалары оң және теріс иондарға, сондай-ақ еркін электрондарға айналады.
37	Газдың рентген сәулесімен ионизациясы	Рентген сәулесінің әсерінен газда оң және теріс иондар мен еркін электрондар пайда болады.
38	Фотоионизация	Люминесценттік жарық немесе электрондық шоқ әсерінен заттың ионизациясы.
39	Магнитокедергілік эффект	Өткізгіштердің электрлік кедергісінің магнит өрісінің әсерінен өзгеруі.
40	Магнитострикция	Дененің пішіні мен өлшемінің оны намагнитчеу нәтижесінде өзгеруі.
41	Магниттік гистерезис	Ферромагниттік материалдың магниттелуі мен сыртқы өріс кернеуінің өзгеруіне байланысты оның магниттік сипаттамасының қайтымсыз өзгеруі.
42	Материалды намагнитчеу	Заттың магниттік қасиеттерін өзгерту, әсіресе пара- және ферромагнитті фазалар арасындағы ауысу кезінде.
43	Пьезоэлектрлік эффект	Белгілі бір кристалды диэлектриктерде механикалық қысымның әсерінен электр поляризациясының пайда болуы.
44	Электромагниттік қысым	Электромагниттік өріс әсерінен намагнитчелу кезінде механикалық қысымның пайда болуы.
45	Беттік эффект	Электр тогы өткізгіштің бетіне шоғырланады және ток жиілігі артқанда тереңдік азаяды.
46	Дыбысты жұту	Акустикалық толқынның энергиясының материал арқылы өткенде азаюы, бұл энергия жылуға айналады.
47	Жарықты жұту	Зат арқылы өткен электромагниттік сәулеленудің энергиясын жұтуы.
48	Поляризациялық диэлектрик	Ұзын толқынды электромагниттік өріс әсерінен диэлектрикте пайда болатын дипольдік қасиет.

49	Сверхпроводимость (Салқын өткізгіштік)	Электр тогының өтуі кезінде қарсылықтың толық жойылуы, өте төмен температурада байқалады.
50	Сұйықтықтың акустоимпульсиясы	Акустикалық тербеліс әсерінен сұйықтық қозғалысы пайда болады (кавитациялық эффект).

1.1-кестенің жалғасы

№	Эффект атауы	Қысқаша сипаттамасы
51	Лоренц күші	Магнит өрісінде қозғалатын зарядталған бөлшекке оның жылдамдық векторына және магнит индукциясы векторына перпендикуляр бағытта әсер ететін күш.
52	Тензорезистивтік эффект	Қатты өткізгіш материалдарда тартылу немесе қысылу кернеуінің әсерінен электрлік кедергінің өзгеруі.
53	Жылулық ұлғаю эффектісі	Дененің қыздырылуы салдарынан оның өлшемдерінің өзгеруі. Қатты денелер үшін – сызықтық, ал сұйықтар мен газдар үшін – көлемдік ұлғаюмен сипатталады.
54	Термоэлектрондық эмиссия	Қыздырылған қатты денелердің вакуумға немесе басқа ортаға электрондар шығару құбылысы.
55	Термоэлектрикалық эффект	Электрөткізгіштердің электрлік кедергісінің температураға байланысты өзгеруі. Металл өткізгіштерде температура артқанда кедергі артады, ал жартылайөткізгіштерде – кемиді.
56	Фотоэлектрондық эмиссия (сыртқы фото	

Әдебиеттер тізімі

1. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования. – М.: Машиностроение, 1965. – С. 928.
2. Аш Ж и др. Датчики измерительных систем: Пер. с франц. / Под ред. А.С. Обухова. – М.: Мир. – Кн. 1, 1992. – С. 480., Кн. 2, 1992. – С. 460.
3. Байбаков Ф.Б., Шарапов В.М. Контроль примесей в сжатых газах. – М.: Химия, 1989. – С. 260.
4. Берлинер М.А. Измерения влажности. – М.: Энергия, 1973. – С. 400.
5. Бутурлин А.И. Газочувствительные датчики на основе металлоксидных полупроводников //Зарубежная электронная техника. – 1983. – Вып. 10.
6. Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
7. Ваня Я. Анализаторы газов и жидкостей / Под ред. О.С. Арутюнова. – М.: Энергия, 1970. – С. 552.
8. Викторov В.А., Совлуков А.С. Радиоволновые датчики. – М.: Наука, 1983. – С. 314.
9. Вульвет Дж. Датчики в цифровых системах: Пер. с англ. / Под ред. А.С. Ярошенко. – М.: Энергоиздат, 1981. – С. 200.
10. Выглеб Г. Датчики: Устройство и применение. – М.: Мир, 1989. – С. 196.
11. Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванова А.С. Основы температурных измерений. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – С. 304.
12. Гордов А.Н., Стадник Б.И., Бычковский Р.В. и др. Приборы для измерения температуры: Справочник. – Львов: Наукова думка, 1986. – С. 348.
13. Гордов А.Н. Основы пирометрии. – М.: Металлургия, 1971. – С. 472.
14. Готра З.Ю., Ильницкий Л.Я., Полищук Е.С. и др. Датчики: Справчник / Под ред. З.Ю. Готры и О.И. Чайковского. – Львов: Каменяр, 1995. – С. 312.

15. Джексон Р. Новейшие датчики. – М.: Техносфера, 2006. – С. 620.
16. Домаркас В., Кажис Р. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. – Вильнюс: Минтис, 1975. – С. 258.
17. Дубовой Н.Д. Автоматические многофункциональные измерительные преобразователи. – М.: Радио и связь, 1989. – С. 256.
18. Зарипов М.Ф. Датчики малых угловых скоростей. – Уфа: Изд. Уфимского авиационного института, 1975.
19. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Челибанов В.П. Приемники излучения. – СПб: Папирус. 2003. – С. 527.
20. Котюк А.Ф. Датчики в современных измерениях. – М.: Радио и связь, 2006. – С. 96.
21. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1989. – С. 701.
22. Кремлевский П.П. и др. Расчет и конструирование расходомеров / Под ред. П.П. Кремлевского. – Л.: Машиностроение, 1978. – С. 224.
23. Куликовский Л.Ф., Жиров В.Г. Магнитомодуляционные измерительные преобразователи. – М.: Энергия, 1977. – С. 87.
24. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – С. 320.
25. Луцик Я., Буняк Л., Стадник Б. Использование ультразвуковых сенсоров. – Львов: СП Бак, 1998. – С. 232. (На укр. яз.).
26. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 272.
27. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений. – М.: Мир, 1990. – С. 535.
28. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. – Л.: Энергия, 1968. – С. 248.

29. Новый словарь иностранных слов. – Минск: Современный литератор, 2005. – С. 1088.

30. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника, физические основы, приборы и устройства, – М.: Машиностроение, 1978. – С. 480.

31. Нуберт Г. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Введение в теорию, расчет и конструирование. – Л.: 1970. – С. 360.

32. Ожегов С.И. Словарь русского языка / Под ред. Н.Ю. Шведовой. – М.: Русский язык, 1978. – С. 846.

33. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. – Киев: Вища школа, 1983. – С. 455.

34. Осадчий Е.П. и др. Проектирование датчиков для измерения механических величин. – М.: Машиностроение, 1979. – С. 480.

35. Осипович Л.А. Датчики физических величин. – М.: Машиностроение, 1979. – С. 160.

36. Островский Л.А. Основы общей теории электроизмерительных устройств. – Л.: Энергия, 1971. – С. 544.

37. Павленко В.А. Газоанализаторы. – М. – Л.: Машиностроение, 1965. – С. 296.

38. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. — М.: Высшая школа, 1989. – С. 367.

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

40. Полищук Е.С., Дорожовец М.М., Стадник Б.И., Ивахив О.В., Бойко Т.Г., Ковальчик А. Средства и методы измерений неэлектрической величины: Учебник /Под ред. проф. Е.С. Полищука. – «Бескид-Б it», 2008. – С. 618. (На укр. яз).

41. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергия, 1978. – С. 704.

42. Пьезокерамические преобразователи: Справочник / Под ред. С.И. Пугачева. – Л.: Судостроение, 1984.

43. РМГ29-99. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.

44. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 320.

45. Таранов С.Г., Фахралева М.Е. Методы и средства измерения параметров магнитных полей. – Киев, 1985. – С. 392.

46. Телеников Ф.Е. и др. Теоретические основы информационной техники. – М.: Энергия, 1971. – С. 424.

47. Техническая кибернетика / Под ред. В.В. Солодовникова. Измерительные устройства, преобразующие элементы и устройства. – М.: Машиностроение, 1973. – С. 680.

48. Тиль Р. Электрические измерения неэлектрических величин: Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 192.

49. Фарзане Н.Г. и др. Автоматические детекторы газов и жидкостей. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – С. 96.

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

51. Франко Р.Т. и др. Газоаналитические системы и приборы. М.: Машиностроение. – С. 218.

52. Харкевич А.А. Теория преобразователей. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1948. – С. 188.

53. Харкевич А.А. Избранные труды. – М.: Наука, 1973. Т. 1 – С. 400.

54. Хомерики О.К. Гальваномагнитные элементы и устройства автоматики и вычислительной техники. – М.: Энергия, 1975. – С. 176.

55. Храмов А.В. Первичные измерительные преобразователи измерительных приборов и автоматических систем. – Киев, Вища школа, 1988. – С. 527. (На укр. яз.).

56. Sharapov V. Piezoceramic sensors. – Springer, 2011. – 498 p.
57. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006. – С. 632.
58. Шарапов В.М., Шарапова Е.В. Универсальные технологии управления. – М.: Техносфера, 2006. – С. 632.
59. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезокерамические преобразователи физических величин. – Черкассы: ЧГТУ, 2005. – С. 496.
60. Шульц Ю. Электроизмерительная техника: 1000 понятий для практиков. Справочник: Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 288.
61. Электрические измерения неэлектрических величин / Под ред. П.В. Новицкого. – Изд. 5-е перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1975. – С. 576.
62. Эрлер В., Вальтер Л. Электрические измерения неэлектрических величин полупроводниковыми тензорезисторами. – М.: Мир, 1974. – С. 286.
63. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – М.: Машиностроение, 1989. – С. 360.
64. Norton, Handbook of Transducers. Pretice-Hall, Englewood cliffs, NI, 1989.
65. Thomson, S. Control Systems: Engineering & Design. Longman Scientific & Technical, Essex, UK, 1989.
66. White, R.W. A sensor classification sceme. In.: Microsensors. IEEE Press, New York, 1991.

2 ТАРАУ

ӨЛШЕУШІ ТҮРЛЕНДІРГІШТЕРДІҢ ДАТЧИКТЕРДІҢ) ЖАЛПЫ ТЕОРИЯСЫНЫҢ ЭЛЕМЕНТТЕРІ

2.1. Жалпы мәліметтер

Кез келген өлшеуіш құрал немесе құрылғы әртүрлі функционалдық мағынаға және әрекет принципіне ие бірқатар түрлендіргіштерден тұратын тізбек түрінде ұсынылуы мүмкін. Мұндай түрлендіргіштер бір физикалық шаманы екіншісіне (аналогтық) түрлендіруге де, үздіксіз (аналогтық) шамаларды дискретті – лездік немесе квантталған (дөңгелектенген) мәндерге және керісінше түрлендіруге де арналған болуы мүмкін.

Аналогтық түрлендіргіштердің жалпы теориясы жүйеде жиналған энергия мен онда пайда болатын күштер арасындағы байланысты орнататын энергетикалық түсініктерге негізделген. Өлшеу түрлендіргіштері саласында мұндай түсініктер А.А. Харкевич, Л.А. Островский, Е.Г. Шрамков және т.б. зерттеулерінің нәтижесінде кеңінен дамыды [3,8]. Бұл жұмыстар физикалық шамаларды түрлендіргіштерді жалпыланған төрттік полюстіктер ретінде қарауға мүмкіндік берді, ал теория тек өзаралық принципі орынды кері түрлендіргіштерге ғана қолданылады.

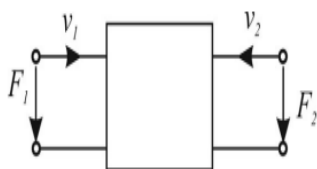
Әдетте, кез келген жүйенің энергиясын механикалық жүйелерге ұқсастыра отырып, біреуі күш, ал екіншісі – орын ауыстыру (координата) болатын екі шаманың көбейтіндісі ретінде көрсетуге болады. Физикалық шамаларды таңдау, олар механикалық күш пен орын ауыстыруға эквивалентті болуы керек, бірақ олардың көбейтіндісі энергияға сәйкес келуі тиіс. Жалпыланған параметрлер ретінде күш пен жылдамдықты (орын ауыстырудың уақыт бойынша туындысы) да қабылдауға болады, олардың көбейтіндісі физикалық шама ретінде қуатқа сәйкес келеді.

Қозғалыстағы денелер жүйесіндегі күштер мен орын ауыстырулар арасындағы байланысты табу үшін Лагранжтың екінші теңдеуі кеңінен қолданылады. Бұл теңдеулер байланысты жүйелер динамикасының есептерін салыстырмалы түрде оңай шешуге мүмкіндік береді.

Механикалық жүйелер үшін алынған Лагранж теңдеулері басқа, механикалық емес жүйелер үшін де қолданылады. Мысалы, олар Д. Максвелл электромагниттік құбылыстарды зерттеу үшін, В. Томсон (лорд Кельвин) жылу құбылыстарын зерттеу үшін пайдаланған, нәтижесінде электродинамиканың және термодинамиканың теориялық негіздері құрылған.

Жалпы жағдайда Лагранж теңдеулерінде жалпыланған координаттар ретінде жүйенің энергетикалық күйін анықтайтын кез келген физикалық шамаларды қабылдауға болады. Бұл кіріс және шығыс шамалары әртүрлі физикалық табиғатта болуы мүмкін өлшеу түрлендіргіштерінің (ӨТ) жұмысын талдау үшін Лагранж теңдеулерін пайдалануға мүмкіндік береді.

Осылайша, өлшеу түрлендіргіші (2.1-сурет) жалпыланған пассивті төрттік полюстің Z-түрінің теңдеулерімен сипатталуы мүмкін [3]:



$$F_1 = Z_{11}v_1 + Z_{12}v_2; \quad (2.1)$$

$$F_2 = Z_{21}v_1 + Z_{22}v_2.$$

2.1-сурет. Төрттік полюстік ретіндегі өлшеуіш түрлендіргіш

Z_{11} және Z_{22} кедергілері сәйкес жалпыланған күштердің қарсы жағында қозғалыс болмаған кезде ($v = 0$, бос жүріс режимі) жалпыланған жылдамдықтарға қатынасы ретінде анықталады. Бос жүріс режимінде Z_{12} және Z_{21} кедергілері де анықталады. Осылайша, бұл кедергілердің мәндері

түрлендіргішке қосылатын келесі құрылғылардың қасиеттеріне тәуелді емес және тек түрлендіргіштің өз қасиеттерін сипаттайды.

Сондықтан, Z_{11} және Z_{22} кедергілері түрлендіргіштің **өзіндік кіріс және шығыс кедергілері** деп аталады, ал Z_{12} және Z_{21} – **өзіндік өзара (беру) кедергілері** деп аталады. Кейінірек көрсетілетіндей, Z_{12} және Z_{21} түрлендіру коэффициенттері мағынасына ие.

Түрлендіргіш шығысына қандай да бір Z_H жалпыланған кедергісі қосылған кезде, түрлендіргіштің **кіріс кедергісі** былай анықталады:

$$Z_{ax} = \frac{F_1}{v_1} = Z_{11} + Z_{12} \frac{v_2}{v_1} = Z_{11} - \frac{Z_{12} Z_{21}}{Z_H + Z_{22}} = Z_{11} - \Delta Z, \quad (2.2)$$

Екінші төрттік полюстік теңдеуді пайдалана отырып, жүктеме Z_H қосылған кезде (2.2-сурет), қатынас

$$V_2/V_1 = -Z_{21}/Z_H + Z_{22}$$

(мұнда

$$Z_H = -F_2/V_2$$

және ол физикалық мағынада жүктеме кедергісі болып табылады; минус таңбасы Z -түріндегі төрттік полюстік теңдеулердегі шығыс жалпыланған күш пен шығыс жалпыланған жылдамдық бағыттарының қарама-қарсылығын ескереді).

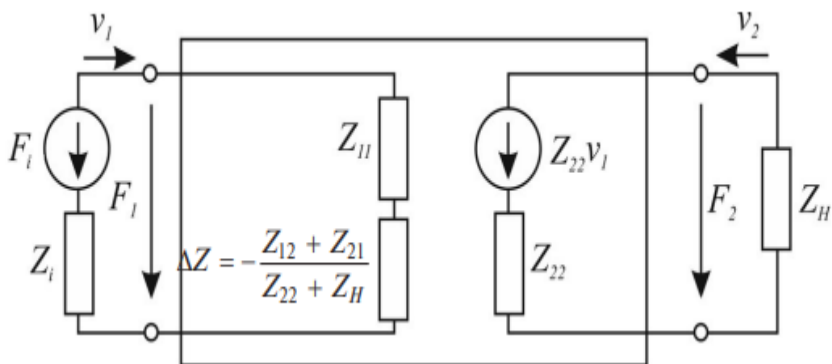
Соңғы өрнектен көрініп тұрғандай, кіріс кедергісі Z_{11} (параметрі көзі) өзіндегі кіріс кедергісінен, яғни Z_{11} кедергісінен, Z_δ деп аталатын енгізілген кедергі мөлшеріне өзгеше болуы мүмкін. Бұл енгізілген кедергі өзіндегі шығыс кедергісі мен жүктеме кедергісінің қосындысына кері пропорционал болады.

2.2. Жалпыланған генераторлық түрлендіргіш

Жоғарыда айтылған төрттік полюстік өлшеу түрлендіргішінің теңдеулері өзгергіштік принципі орындалатын түрлендіргіштерге қатысты. Осыған жататын генераторлық түрлендіргіштер кіріс шамасының әсерінен шығыста белгілі бір энергетикалық үрдіс тудырады.

Z-түріндегі теңдеулерді және кіріс кедергісінің өрнегін ескере отырып, генераторлық түрлендіргіштің эквиваленттік схемасын 2.2-суретте көрсетілгендей бейнелеуге болады. Мұнда:

– F_i – ішкі кедергісі Z_i болатын кіріс күшінің көзі.



2.2-сурет. Генераторлық түрлендіргіштің эквиваленттік схемасы

Енгізу және шығу параметрлерінің қайсысы ақпараттық екендігіне байланысты, төрттік полюстің теңдеуін шешу арқылы өлшеу түрлендіргішінің түрлендіру теңдеуін және сәйкесінше жалпыланған кедергілер арқылы өрнектелетін түрлендіру коэффициенттерін табуға болады:

$$v_2 = k_1 F_1 = \frac{Z_{21}}{Z_{12} Z_{21} - Z_{11}(Z_H + Z_{22})} F_1, \quad (2.3)$$

$$F_2 = k_2 F_1 = \frac{Z_{21}}{Z_{11} + \frac{1}{Z_H}(Z_{11} Z_{22} - Z_{12} Z_{21})} F_1, \quad (2.4)$$

$$v_2 = k_3 v_1 = -\frac{Z_{21}}{Z_{22} + Z_H} v_1, \text{ или } F_2 = k_4 v_1 = \frac{Z_{21}}{1 + \frac{Z_{22}}{Z_H}} v_1. \quad (2.5)$$

Берілген теңдеулер түрлендіргіштің кіріс және шығыс параметрлерін жүктемесі бар ең жалпы жағдайда байланыстырады. Өлшеуіш түрлендіргіштің жұмысын бірінші жуықтауда қарапайым формулалармен сипаттауға болады.

Шынында да, шығыс ақпараттық параметрі жалпыланған F_2 күші түрінде болатын өлшеуіш түрлендіргіштің жұмыс режимі бос жүріс режиміне ($Z_H = \infty$) жақын болуы керек, ал ақпараттық параметрі жалпыланған v_2 жылдамдық түрінде болатын түрлендіргіштің жұмыс режимі қысқа тұйықталу режиміне ($Z_H = 0$) жақын болуы тиіс. Сонда:

$$v_2 = \frac{Z_{21}}{Z_{12} Z_{21} - Z_{11} Z_{22}} F_1, F_2 = \frac{Z_{21}}{Z_{11}} F_1; \quad (2.6)$$

$$v_2 = -\frac{Z_{21}}{Z_{22}} v_1, F_2 = Z_{21} v_1. \quad (2.7)$$

Сызықтық түрлендіргіштер үшін k_1 , k_2 , k_3 және k_4 түрлендіру коэффициенттері тұрақты болып, v_1 және v_2 аргументтеріне тәуелді емес.

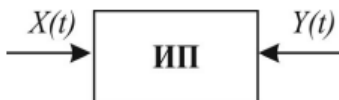
Жоғарыда келтірілген өлшеуіш түрлендіргіштер теңдеулеріндегі Z_{ik} коэффициенттері операторлық кедергілер болып табылады және мынаған тең:

$$Z_{ik} = p^2 m_{ik} + p R_{ik} + W_{ik},$$

мұндағы m_{ik} , R_{ik} және W_{ik} – түрлендіргіштің жалпыланған параметрлері, сәйкесінше: жалпыланған масса, жалпыланған активті кедергі және жалпыланған серпімділік.

Осылайша, Z_{ik} операторлық кедергісін түрлендіргіш параметрлері арқылы өрнектеу арқылы, түрлендіргіштің дифференциалдық теңдеуіне көшуге болады. Ең жалпы жағдайда, операторлық түрдегі түрлендіргіштің дифференциалдық теңдеуі (2.3-сурет) кіріс шамасы $X(t)$ және шығыс шамасы $Y(t)$ үшін мынадай болады:

$$(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0) Y(t) = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0) X(t). \quad (2.8)$$



2.3-сурет. Өлшеуіш түрлендіргіш құрылымдық элемент ретінде

Қарапайым өлшеу түрлендіргіштері (ӨЛ) бірінші немесе екінші ретті дифференциалдық теңдеулер арқылы жеткілікті дәлдікпен анықтала алады.

Төрттірек ретіндегі өлшеу түрлендіргішінің теңдеулері және оның жалпыланған кіріс және шығыс параметрлері бар дифференциалдық теңдеулері жалпыланған түрлендіргіштің жұмысын сипаттайды. Нақты түрлендіргіштердің әртүрлі физикалық шамаларды өлшеу жұмысын бағалау үшін осы теңдеулерді қолдану кезінде аналогия әдістері қолданылады. Бұл әдістер әртүрлі физикалық табиғаттағы жалпыланған күштер, орын ауыстырулар, жылдамдықтар және кедергілер арасындағы ұқсастыққа негізделген.

2.3. Электромеханикалық ұқсастық әдісі

Электромеханикалық ұқсастық әдісі түрлендіргіштердің ішкі құрылымын зерттеу үшін өте ыңғайлы құрал болып табылады [3, 7].

Бұл әдіс берілген механикалық жүйенің қозғалыс теңдеулерін эквивалентті электр тізбегінің теңдеулерімен алмастыруға мүмкіндік береді, бұл зерттеу мәселесін айтарлықтай жеңілдетеді. Осы арқылы әртүрлі құрылымды және мақсатты түрлендіргіштердің механикалық жүйелерінің жиіліктік және өтпелі сипаттамалары анықталады. Көптеген жағдайларда мәселе эквивалентті тербелмелі контурды зерттеуге келтіріледі, оның қасиеттері электр тізбектері теориясында жан-жақты зерттелген.

Жүйенің механизмін білуді талап етпейтін зерттеу әдісі ретінде Лагранжтың екінші теңдеулері қолданылды, ал жалпыланған координат ретінде Максвелл электр зарядын, ал жалпыланған жылдамдық ретінде сәйкесінше электр тогын таңдады, яғни...

$$i = \frac{dq}{dt}, \quad (2.9)$$

мұндағы q – электр зарядының мөлшері.

Егер жүйедегі өзгерістердің себебі ретінде жалпыланған күшті қарастырсақ, онда жоғарыда айтылғандай, бұл күш таңдалуы тиіс, сонда күш пен жалпыланған координата өсімшесінің көбейтіндісі жұмысқа тең болады. Максвелл таңдаған жалпыланған координаталар жағдайында мұндай күш электр қозғаушы күш (ЭҚК) болып табылады.

Теориялық электртехника дамуының алғашқы кезеңінде теориялық механиканың математикалық аппараты қолданылды [6].

Дегенмен, көп ұзамай электртехниканың өз әдістері дамып, жетілдірілді. Электртехникалық есептердің дайын шешімдерінің мол болуы кері үрдісті туғызды - яғни механика

есептерін электртехниканың жетілген әдістері арқылы шешуге көшу. Осылайша электромеханикалық ұқсастық әдісі пайда болды, оның негіздері механикалық және электрлік жүйелер теңдеулерінің формалды ұқсастығынан туындайды [2, 3, 7, 8].

Мысал ретінде келесі белгілі теңдеулерді келтірейік:

1. Синусоидалы ЭҚК әсеріндегі тізбектей жалғанған тербелмелі контур үшін электр қозғаушы күштер теңдеуі:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = E_m \sin \omega t, \quad (2.10)$$

мұндағы L , R және C – сәйкесінше контурдың индуктивтілігі, кедергісі және сыйымдылығы. Осы теңдеуді барлық токтарды электр заряды (q) арқылы өрнектеп жазуға болады.

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = E_m \sin \omega t. \quad (2.11)$$

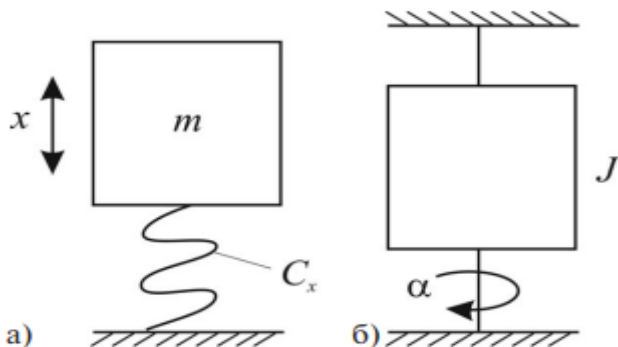
Электромеханикалық түрлендіргіштердің басым көпшілігі бір еркіндік дәрежесі бар механикалық жүйелер болып табылады. Әдетте мұндай жүйелерде энергияның екі әртүрлі түрі – массаның инерциясы мен серіппенің серпімділігі – энергия жинақтаушы ретінде әрекет етеді. Бұл жүйелер екінші ретті дифференциалдық теңдеулермен сипатталады және 2.4-суреттегі ілгерілемелі және айналмалы қозғалыс жүйелері сияқты шартты түрде бейнеленуі мүмкін. Бұл жүйелердің қозғалыс теңдеулері, теориялық механикадан белгілі болғандай, әртүрлі түрде жазылуы мүмкін.

2. Серіппеге орнатылған массаның ілгерілемелі қозғалыс теңдеуі келесідей түрде болады:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + R_m \frac{dx}{dt} + \frac{1}{C_x} x = F_m \sin \omega t, \quad (2.12)$$

мұндағы m , R және C_x – сәйкесінше масса, ілгерілемелі қозғалысқа қарсы механикалық кедергі және серіппенің серпімділігі немесе иілгіштігі.

Оң жақта, әдеттегідей, синусоидалы түрде өзгеретін сыртқы күш орналасқан.



2.4-сурет. Ілгерілемелі (а) және айналмалы (б) қозғалысы бар механикалық тербелмелі жүйелер

3. Серпімді аспаға ілінген массаның айналмалы қозғалыс теңдеуі де дәл сондай ұқсас түрде жазылады:

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + \frac{1}{C_\alpha} \alpha = D_m \sin \omega t, \quad (2.13)$$

мұндағы J – жүйенің инерция моменті; P – жайылу коэффициенті, ол кейін көрсетілетіндей, айналмалы қозғалысқа қарсы механикалық кедергі болып табылады; C_α – созылатын элементтер мен серіппелердің серпімділігі.

Әдетте серпімділікке кері шама – W деп белгіленетін меншікті қарсы әсер моменті қолданылады, мұнда...

$$W = \frac{1}{C_\alpha}. \quad (2.14)$$

Бұрыштық ауытқу жүйесі әдетте α арқылы белгіленеді.

Ұсынылған теңдеулер пішін жағынан ұқсас, сондықтан олардың шешімдері де ұқсас болады.

Бұл теңдеулерді шешуге тоқталмай-ақ, барлық жағдайларда әрекет ететін күш пен оның әсерінен пайда болатын жылдамдық арасындағы қатынасты, яғни кедергіні табу өте қарапайым екенін атап өтейік.

Осылайша толық кедергі модульдерін алуға болады:

а) электр тізбегі үшін...

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}; \quad (2.15)$$

б) трансляциялық қозғалыстағы механикалық жүйе үшін...

$$Z_{m_x} = \sqrt{R_m^2 + \left(\omega m - \frac{1}{\omega C_x}\right)^2}; \quad (2.16)$$

в) айналмалы қозғалыстағы механикалық жүйе үшін...

$$Z_{m_a} = \sqrt{P^2 + \left(\omega J - \frac{W}{\omega}\right)^2}. \quad (2.17)$$

Бастапқы дифференциалдық теңдеулерді де, толық кедергілердің өрнектерін де салыстыру 2.1-кестедегі ұқсастықтар жинағы түрінде берілген бірінші ұқсастық жүйесін негіздеуге мүмкіндік береді.

Ұқсастық әдісі арқылы эквивалентті электр тізбектерін құрудың негізгі принциптерін қарастырайық.

Электромеханикалық ұқсастық жүйесі белгілі бір ережелерді сақтау шартымен механикалық жүйелерге эквивалентті электр тізбектерін құруға мүмкіндік береді [3].

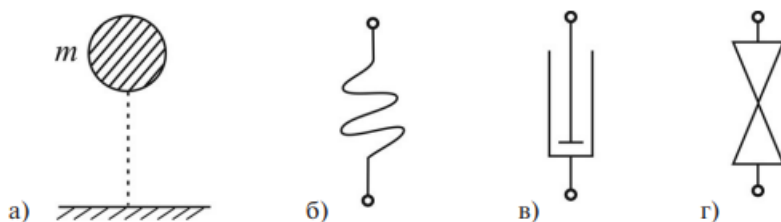
Өлшеу түрлендіргіштерінің механикалық сұлбаларын құру үшін негізгі механикалық элементтер немесе механикалық екіұштылар туралы түсініктер қолданылады. Келесі негізгі механикалық элементтер ажыратылады.

2.1-кесте. Механикалық және электрлік ұқсастықтар

Механикалық шамалар	Электрлік аналогиялар
Туыстық орын ауыстыру x	Количество электричества
Угловое орын ауыстыру α	
Механикалық жылдамдық	Электрический ток $I = \frac{dq}{dt}$
Сүйенің реакциялық күші F_x , момент M	Электрқозғаушы күш E Кернеу U
Толық механикалық кедергі	Толық электрлік кедергі
Жоғалту кедергісі	Активті кедергі R
Масса m , инерция моменті J	Индуктивтік L
Серпімділік, серішпенің иілімділігі	Электрлік сыйымдылық
Упругость, меншікті қарсы момент	Кері сыйымдылық шамасы, яғни $1/C$

Масса элементі шекті массасы m болатын жүйе ретінде қарастырылады, ол шексіз үлкен массамен (есептеу жүйесінің бас нүктесі ретінде) байланысты нүктемен қатар жұмыс істейді. Мұндай шексіз үлкен масса ретінде Жер массасы қабылданады. Шексіз массамен байланыстылық күштерді белгілі бір тартылыстар деп түсінуден туындайды, бұл кем дегенде екі өзара әрекеттесетін денені қажет етеді.

Масса элементі шартты түрде, мысалы, **2.5-сурет, а-да** көрсетілгендей бейнеленуі мүмкін.



2.5-сурет. Механикалық жүйелер элементтері:

а – масса; б – серпімділік; в – тежелу (үйкеліс) элементі;

г – жалпыланған механикалық элемент.

Серпімділік элементі идеалдандырылған элемент болып табылады, онда ұштарының кез келген салыстырмалы ығысуына тек серпімділік күші F_x немесе M моменті қарсылық көрсетеді, мына теңдіктер орындалады:

мұндағы:

C_x – элементтің серпімділігі немесе иілгіштігі; W – меншікті қарсылық моменті.

Серпімділік элементі **2.5-сурет, б**-де көрсетілгендей бейнеленеді.

Тежелу элементі әдетте идеалды екіұшты ретінде түсініледі, онда ұштарының кез келген салыстырмалы қозғалысы үйкеліс күшінің қарсылығына әкеледі, бұл қарсылық жылдамдыққа пропорционалды, яғни:

$$F_x = \frac{1}{C_x} x; M = W\alpha,$$

$$F_{ycn} = R_m \frac{dx}{dt}$$

$$M_{ycn} = P \frac{d\alpha}{dt}.$$

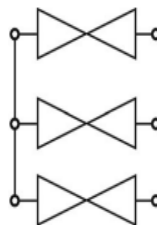
Екі жағдайда да күштің (моменттің) бағыты мен ығысу бағыттары қарама-қарсы болады. Тежелу элементі **2.5-сурет, в**-де көрсетілген.

Схемаларда кез келген механикалық элемент, егер ол нақты емес жалпыланған түрде берілсе, жиі **2.5-сурет, г**-де көрсетілгендей бейнеленеді.

Механикалық элементтер бір-бірімен әртүрлі жолдармен қосыла алады, ең қарапайым қосылымдар тізбектей (**2.6-сурет, а**) немесе түйін арқылы (**2.6-сурет, б**) қосылымдар болып табылады.



а)



б)

2.6-сурет. Элементтерді тізбектеме (а) және түйіндеме (б) арқылы қосу

Механикалық элементтердің анықтамасынан және олардың қарапайым қосылым тәсілдерінен келесі негізгі қорытындылар шығады.

Элементтерді тізбектеме арқылы қосу. Элементтерді тізбектеме арқылы қосқанда келесі шарттар орындалады:

1. Тізбектеме ұштарының салыстырмалы ығысуы әрбір элемент ұштарының ығысуларының қосындысына тең.

2. Тізбектеме ұштарының салыстырмалы жылдамдығы элементтер ұштарының жылдамдықтарының қосындысына тең.

Бұл ережені электр тізбегіндегі токтардың таралу заңымен салыстырсақ, тізбектеме арқылы қосылудың тізбектей емес, параллель қосылымға сәйкес келетіні анық болады, себебі токтар тек параллель қосылымда ғана қосылады.

Жүйенің тепе-теңдік шарты бойынша тізбектемедегі әрбір элементке әсер ететін күш қолданылған күшке тең. Бұл соңғы шарт параллель қосылған электр тізбегі элементтеріне әсер ететін электр қозғаушы күшке сәйкес келеді.

Сонымен, механикалық элементтерді тізбектеме арқылы қосу электр тізбегі элементтерінің параллель қосылымына сәйкес келеді. Бұдан механикалық жүйенің икемділігі (яғни механикалық кедергіге кері шама) жеке элементтер икемділіктерінің қосындысына тең болатыны шығады.

Элементтерді түйіндеме арқылы қосу. Ұштарының қосылуын мүлдем қатты деп есептесек, келесі қорытындыларға келеміз:

1. Түйіндердің салыстырмалы ығысуы, 2.6-сурет, б-ден көрініп тұрғандай, әрбір элемент ұштарының ығысуына тең.

2. Осыған сәйкес түйіннің салыстырмалы жылдамдығы қосылған элементтер ұштарының жылдамдығына тең. Мұндай жылдамдықтар теңдігі электр тізбегіндегі параллель емес, тізбектей қосылымға тән, себебі бұл жағдайда әр элементтегі токтар бірдей болады.

3. Түйіндегі барлық элементтердің реакцияларының қосындысы түсірілген сыртқы күшке тең. Электр тізбегінде бұл тізбектей қосылған элементтердегі кернеудің төмендеуінің қосындысына сәйкес келеді.

Бұл қасиеттер механикалық элементтерді түйіндеме арқылы қосудың электр тізбегі элементтерінің тізбектей қосылымына сәйкес келетінін көрсетеді. Егер мұндай жүйенің механикалық кедергісі туралы айтатын болсақ, ол жеке элементтер кедергілерінің қосындысына тең болады.

Механикалық және электрлік тізбектер арасындағы негізгі ұқсастықтар 2.2-кестеде келтірілген, мұнда айналмалы қозғалыс үшін арнайы белгілер қарастырылмаған.

Нақты механикалық жүйелер әрқашан үлестірілген параметрлері бар жүйелер екенін атап өту керек. Мұндай жүйелерді шоғырланған параметрлері бар эквивалентті схемалар арқылы қарастыру жуықтау әдісі болып табылады, оның дәлдігі мен қолайлылығы есептің нақты жағдайларына байланысты. Мұнда жуықтау дегенде нақты жүйенің кейбір қасиеттерін эквивалентті жүйеде сақтауға болады. Қанша көп қасиеттер сақталса, эквивалентті схема соғұрлым күрделене түседі және оны зерттеу қиындай түседі.

Сондықтан ең маңызды қасиеттерді бөліп көрсетіп, екінші дәрежелілерінен ақылды түрде бас тарту әрқашан маңызды. Үлестірілген параметрлері бар механикалық

жүйелерді зерттеу әдістері электроакустикада егжей-тегжейлі қарастырылған [2, 3, 7, 8].

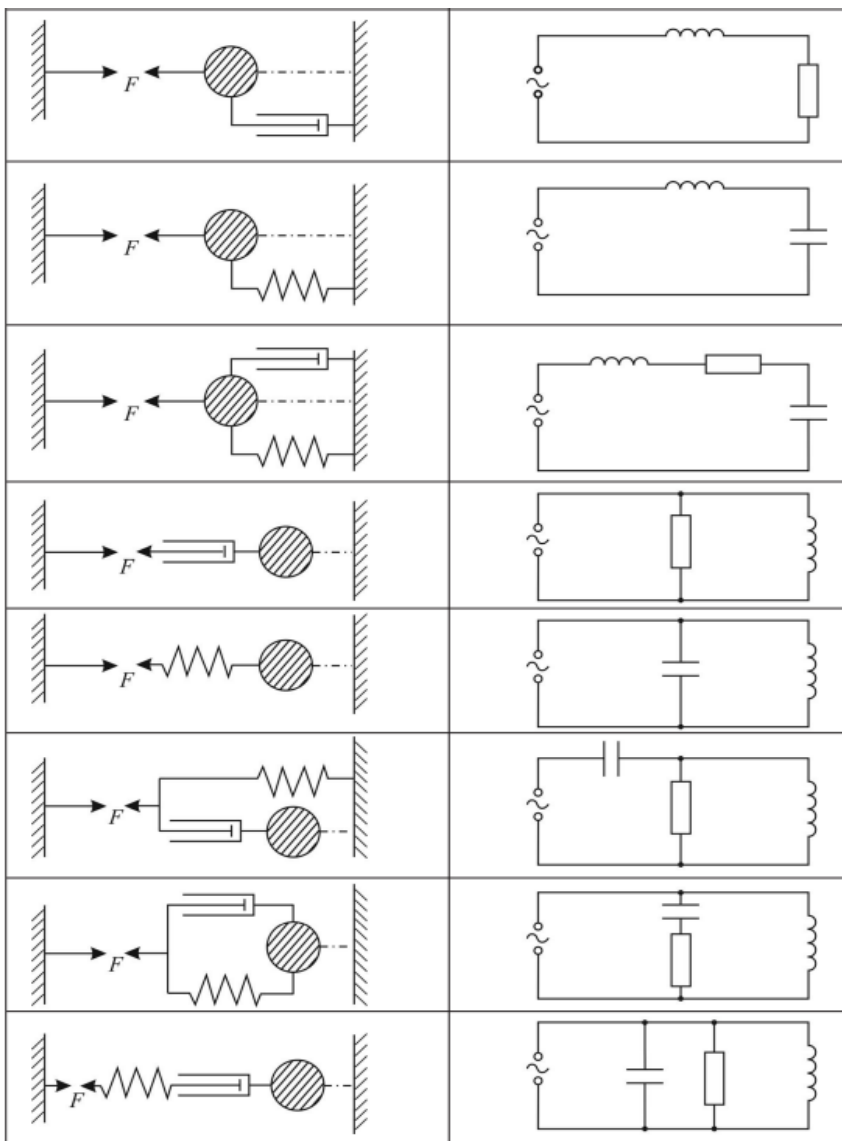
Сол сияқты ұқсастықтар электромагниттік және электротермиялық тізбектер мен құрылғылар үшін де құрастырылған [1, 3, 8].

Жалпыланған параметрлер мен олардың әртүрлі табиғаттағы тізбектердегі ұқсастықтары 2.3-кестеде келтірілген.

2.3-кестеде мынадай белгілер қолданылған:

- ρ – электр кедергісінің меншікті шамасы
- ρ_μ – магниттік кедергінің меншікті шамасы
- ρ_m – дененің тығыздығы
- l және S – сәйкес физикалық табиғаттағы тізбектің ұзындығы және көлденең қимасының ауданы
- w – орамдар саны
- $F_{Tr} = P_N S_{Tr}$ (мұнда P_N – үйкеліс бетіне S_{Tr} нормаль қысымы)
- k_{Tr} – үйкеліс коэффициенті
- $e_m = d\Phi/dt$ – меншікті ЭҚК (бір орамда индукцияланатын ЭҚК)
- ϵ_0 – электр тұрақтысы
- μ_0 – магнит тұрақтысы
- Q – жүйенің жылу энергиясы (жылу мөлшері)
- CQ – меншікті жылу сыйымдылығы
- μ және ϵ – салыстырмалы диэлектрлік және магниттік өткізгіштіктер

2.2-кесте. Механикалық және электрлік тізбектердің ұқсастықтары



2.3-кесте. Жалпыланған параметрлер және олардың әртүрлі табиғаттағы тізбектердегі ұқсастықтары

Жалпы- ланған па- раметр	Механи- калық	Электрлік	Магниттік	Жылулық
Жалпы- ланған күш	F [Н] — күш	U [В] — кернеу	$F_m = Iw$ [А] — магнит қозғаушы күш	ΔT [К] — температура айырмасы
Жалпы- ланған орын ауыстыру	x [м] — орын ауы- стыру	q [Кл] — за- ряд	φ [Вб] — магнит ағыны	$S_0 = Q / T_{sp}$ [Дж/К] — эн- тропия
Жалпы- ланған жыл- дамдық	$v = dx/dt$ [м/с] — жылдам- дық	$I = dq/dt$ [А] — ток	$e_m = d\varphi/dt$ [В] — маг- нит өрісінің ЭҚК	$vQ = dS_0/dt$ [Вт/К] — эн- тропия өз- геру жыл- дамдығы
Жалпы- ланған кедергі	$R_p = k_p \Gamma_p$ [Н·с/м] — үйкеліс кедергісі	$R = l / S$ [Ом] — ак- тивті кедергі	$R_m = \rho_m l / S$ [А·Вб] — магнит кедергісі	$R_t = T_{sp} /$ $\lambda \Gamma S$ [K ² /Вт] — жылулық кедергі
Жалпы- ланған масса (ин- дуктивтік)	$m = \rho p / S$ [кг] — масса	$L = \omega^2 \mu_0 l S /$ U [Гн] — ин- дуктивтік	$L_m = \varepsilon \varepsilon_0 S /$ l [Гн] — маг- ниттік ин- дуктивтік	—
Жалп. сер- пімділік (сыйымды- лық)	$C_n = x / F$ [м/Н] — сер- пімділік	$C = \varepsilon \varepsilon_0 S / l$ [Ф] — сыйымды- лық	$C_m = \mu_0 S /$ l [Гн] — маг- ниттік сыйымды- лық	$C_t = Q_0 / T_{sp}$ [Дж/К ²] — жылулық сыйымды- лық

Әдебиеттер тізімі

1. Зарипов М.Ф., Петрова Н.Ю. Проблемы информационной базы систем управления. Уфа: Башкирский филиал АН СССР, 1979.
2. Ольсон Г. Динамические аналогии. – М.: Изд. ин. лит., 1947.
3. Островский Л.А. Основы общей теории электроизмерительных устройств. – Л.: Энергия, 1971. – С. 544.
4. Гаврилюк М.А., Полищук Е.С., Обозовский С.С. и др. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин / Под ред. Е.С.Полищка. – Киев: Вища школа, 1984. – С. 360.
5. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи. – Киев: Вища школа, 1981. – С. 296.
6. Савин Г.Н., Путята Т.В., Фрадлин Б.Н. Курс теоретической механики. – Киев: Вища школа, 1973. – С. 360.
7. Фурдуев В.В. Электроакустика – М.: Гостехиздат, 1948.
8. Харкевич А.А. Избранные труды. – М.: Наука, 1973. Т. 1. – С. 400.

3 ТАРАУ

СЕНСОРЛЕРДІҢ СИПАТТАМАЛАРЫ

3.1. Жалпы мәліметтер

Сипаттама (грек тілінен - ерекшелік, белгі) - бір нәрсенің (немесе біреудің) ерекше қасиеттерін, артықшылықтарын және кемшіліктерін анықтау және сипаттау.

Сенсорлардың сипаттамалары, өлшеу құралдары сияқты, екі топқа бөлінеді:

1. Түрлендіру сипаттамалары
2. Метрологиялық сипаттамалар

Техникалық (түрлендіру) сипаттамалары – кіріс және шығыс шамалары арасындағы байланысты орнататын сипаттамалар. Оларға мыналар жатады:

– Түрлендіру функциялары (градуировкалық сипаттамалар)

- Түрлендіру коэффициенттері
- Сезімталдық
- Түрлендіру диапазоны
- Сезімталдық шегі

Метрологиялық сипаттамалар - өлшеу құралдарының дәлдік параметрлерін (қателіктерін) реттейтін сенсор сипаттамалары.

Жұмыс режиміне байланысты, техникалық және метрологиялық сипаттамалар статикалық және динамикалық болып бөлінеді:

– Статикалық сипаттамалар – сенсордың статикалық жұмыс режиміне сәйкес келеді, мұнда түрлендірілетін (өлшенетін) шама уақытқа тәуелді болмайды.

– Динамикалық сипаттамалар – сенсордың (түрлендіргіштің) динамикалық жұмыс режимінде, яғни түрлендірілетін шама уақыт функциясы болған кезде көрінеді.

3.2. Статикалық сипаттамалар

Түрлендіру функциясы. Бұл сипаттама сенсордың (түрлендіргіштің) кіріс x және шығыс y шамалары арасындағы байланысты орнатады.

$$y = f(x) \quad (3.1)$$

Жалпы алғанда, шығыс шамасы тек кіріс (өлшенетін) шамаға ғана емес, сонымен қатар басқа да шамаларға (әсер ететін факторларға) тәуелді болады — мысалы, қоршаған орта температурасына, қысымға, дірілге, қуат көзінің кернеуіне және т.б.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.2)$$

Дегенмен, көптеген жағдайларда түрлендіру функциясы бірөлшемді болады, яғни ол түрлендіргіштің шығыс шамасын (сигналын) тек бір кіріс шамасымен байланыстырады.

Бұл сипаттама сызықты да (мысалы, түзу сызықты), сызықты емес те (мысалы, логарифмдік, экспоненциалды, дәрежелік және т.б.) болуы мүмкін.

Бірөлшемді сызықты функцияның түрі, белгілі болғандай, келесідей:

$$y = a + S_x x, \quad (3.3)$$

мұндағы:

– a – тұрақты құраушы (яғни, кіріс әсері нөлге тең болғандағы шығыс сигналының мәні);

– S_x – түзудің көлбеу бұрышының тангенсі.

Логарифмдік түрлендіру функциясы мына тәуелділікпен сипатталады:

$$y = a + s \ln x, \quad (3.4)$$

экспоненциальная

$$y = ae^{sx}, \quad (3.5)$$

степенная

$$y = a + bx^k, \quad (3.6)$$

мұндағы:

– **b, k** – тұрақты сандар.

Көптеген жағдайларда сызықты емес түрлендіргіштер кіріс шамасының шектелген диапазонында сызықты деп санала алады. Кең диапазон үшін сызықты емес түрлендіру функциясы бірнеше түзу сызықты кесінділер түрінде берілуі мүмкін. Бұл процедура **кесіндеп-сызықты жуықтау** деп аталады.

Жалпы алғанда, бір типтегі түрлендіргіштердің (сенсорлардың) түрлендіру функциялары жеке ерекшеліктеріне байланысты бір-бірінен сәл өзгеше болуы мүмкін, яғни әрбір жеке түрлендіргіш өзінше жеке түрлендіру функциясымен сипатталады.

Осы типтегі түрлендіргіштердің жалпыланған сипаттамасы ретінде көптеген өлшемдер нәтижелері бойынша орташаланған немесе бір типтегі түрлендіргіштердің үлкен тобы үшін алынған түрлендіру функциясы қабылданады.

Бұл түрлендіру функциясын анықтау түрлендіру диапазонының белгілі бір нүктелерінде қалыпты жағдайларда да, сол сияқты осы түрлендіргіш (сенсор) үшін нормативтік құжаттарда көрсетілген сыртқы факторлар әсер еткенде де жүргізілуі мүмкін [1, 5, 7, 9].

Түрлендіргішке осылай анықталған орташаланған түрлендіру функциясы **немесе** оған ең жақын жуықтау болып табылатын математикалық функция тағайындалады. Түрлендіргішке тағайындалған функция **номиналды (паспорттық) статикалық түрлендіру функциясы** немесе **градуировкалық сипаттама** деп аталады.

Ол аналитикалық түрде жазылуы мүмкін, сонымен қатар кесте немесе график түрінде берілуі мүмкін [4, 5].

Кейбір шетелдік әдебиеттерде түрлендіру функциясы **беріліс функциясы** деп аталады. Отандық әдебиетте беріліс функциясы деп **нөлдік бастапқы шарттарда шығыс және кіріс шамаларының Лаплас бейнелерінің қатынасы** аталады [2].

Түрлендіру коэффициенті

2-тарауда көрсетілгендей, түрлендіру коэффициенті тек түрлендіргіш түріне ғана емес, сонымен қатар берілген түрлендіргіш үшін **жұмыс режиміне** де байланысты болады. Бұл жағдайда екі жақта да **бос жүріс** және **қысқа тұйықталу** режимдерінің әртүрлі комбинациялары мүмкін, бұл түрлендіру коэффициентінің төрт түрлі өрнегіне әкеледі.

Егер түрлендіру теңдеулерінде аргумент ретінде **жалпыланған жылдамдықтар (токтар)** пайдаланылса, онда түрлендіру коэффициенті **өзара кедергінің** мағынасын береді, яғни:

$$K_0 = Z_{12} = Z_{21} [4].$$

Көптеген жағдайларда **екі жақта да бос жүріс режимінде** өлшенген түрлендіру коэффициенті қолданылады.

$$K_o = \left. \frac{F_1}{F_2} \right|_{v_1=0}, \quad (3.7)$$

мұндағы:

– F_1 , F_2 – сәйкесінше түрлендіргіштің кірісі мен шығысындағы жалпыланған күштер;

– v_1 – түрлендіргіштің кірісіндегі жалпыланған жылдамдық.

Практикада түрлендіру коэффициентін анықтау үшін мына өрнек қолданылады [5]:

$$K_o(x) = \frac{y}{x} = \frac{f(x)}{x}, \quad (3.8)$$

Мұндағы:

– x – кіріс шамасы;

– y – шығыс шамасы.

Номинальды түрлендіру коэффициенті номинальды түрлендіру функциясы бойынша мына түрде анықталады:

$$K_{ном}(x) = \frac{f_{ном}(x)}{x}. \quad (3.9)$$

Мынаны атап өту қажет: $K_{\text{ном}}(x) = \text{const}$ тек қана номинальды түрлендіру функциясы сызықты және оның графигі координаталар басынан өткенде ғана орындалады.

Жалпы жағдайда x және y шамалары әртүрлі физикалық табиғатта болады. Номинальды түрлендіру коэффициентінің көмегімен шығыс шамасы y түрлендіргіштің кірісіне келтірілуі мүмкін, нәтижесінде **келтірілген түрлендіру функциясын** алуға болады:

$$x = \frac{y}{K_{\text{ном}}(x)}. \quad (3.10)$$

Түрлендіргіштің сезімталдығы. Түрлендіргіштің сезімталдығы – бұл түрлендіру функциясының кіріс шамасы бойынша туындысы:

$$S = \frac{dy}{dx}, \quad (3.11)$$

Немесе соңғы өсімшелер түрінде:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (3.12)$$

Басқаша айтқанда, түрлендіргіштің сезімталдығы – бұл шығыс шамасының өзгерісінің, сол өзгеріс тудырған кіріс шамасының өзгерісіне қатынасы.

Сызықты түрлендіру функциясы бар түрлендіргіштер үшін сезімталдық **тұрақты** болады. Егер түрлендіру функциясының графигі координаталар басынан өтсе, онда сезімталдық **түрлендіру коэффициентіне тең** болады.

Егер түрлендіру функциясы **сызықты емес** болса, онда сезімталдық кіріс шамасына тәуелді функция болады және түрлендіру коэффициентімен мына тәуелділікпен байланысады [5]:

$$S(x) = \frac{dy}{dx} = \frac{d[k(x)x]}{dx} = k(x) + \frac{dk(x)}{dx} x. \quad (3.13)$$

Бұл түрлендіру коэффициентінің түрлендіргіштің сезімталдығына қарағанда ақпараттылығы жоғары сипаттама екенін білдіреді.

Түрлендіргішке арналған құжаттамада сезімталдықтың анықталу шарттарын нақты көрсету қажет, өйткені ол түрлендіру коэффициентіне тәуелді болады.

Сызықты емес түрлендіргіштерді сипаттау үшін жиі түрлендіру диапазонындағы **орташа сезімталдық** ұғымы қолданылады [1]:

$$S_{cp} = \frac{y_k - y_n}{x_k - x_n}, \quad (3.14)$$

Мұнда:

– $y_k - y_n$ және $x_k - x_n$ – сәйкесінше шығыс және кіріс шамалары бойынша түрлендіру диапазондары;

– y_k, y_n, x_k, x_n – өлшеулердің соңғы және бастапқы шектері.

Салыстырмалы сезімталдық деп шығыс шамасының салыстырмалы өзгерісінің кіріс шамасының салыстырмалы өзгерісіне қатынасы түсініледі:

$$S_{отн} = \frac{\Delta y / y}{\Delta x / x}. \quad (3.15)$$

Егер кіріс шамасы уақыт функциясы болса, онда сезімталдық та уақыттың белгілі бір функциясы болады. Осылайша, кіріс шамасының гармоникалық өзгеруі және түрлендіргіштің тұрақты жұмыс режимі жағдайында күрделі сезімталдық $S(j\omega)$ туралы айту қажет.

Осыған сәйкес, ауыспалы процестерді зерттеу кезінде ауыспалы сезімталдық $S(t)$ ұғымын қолдану табиғи.

Ең жалпы түрі – операторлық сезімталдық $S(p)$. Автоматты реттеу теориясында бұл сипаттама **беріліс функциясы** деп аталады [2, 4].

Соңғы сипаттамалар уақыт функциялары болып табылады, яғни олар динамикалық сипаттамалар болып табылады және 3.4-бөлімде қарастырылады.

Бірнеше қатар қосылған аралық түрлендіргіштерден (буындардан) тұратын түрлендіргіштің сезімталдығы:

$$S = S_1 \cdot S_2 \cdot \dots \cdot S_n. \quad (3.16)$$

Сезімталдық шегі. Сезімталдық шегі деп түрлендіргіш сенімді түрде анықтай алатын кіріс шамасының ең кіші мәні түсініледі.

Оптикалық өлшеулерде сезімталдық шегі жиі «ажыратымдылық қабілеті» деп аталады [4].

Түрлендіру диапазоны. Кіріс (түрлендірілетін) физикалық шаманың максималды және минималды мәндерінің айырмасы кіріс шамасының түрлендіру диапазоны деп аталады.

$$D_x = x_k - x_n, \quad (3.17)$$

Мұндағы:

– x_k , x_n – сәйкесінше кіріс шамасының максималды (соңғы) және минималды (бастапқы) мәндері.

Шығыс шамасы бойынша түрлендіру диапазоны осыған ұқсас түрде анықталады:

$$D_y = y_k - y_n, \quad (3.18)$$

Мұнда y_k , y_n – сәйкесінше шығыс шамасының максималды (соңғы) және минималды (бастапқы) мәндері.

Түрлендіргіш кедергісі. 2-тарауда біз кедергінің түрлендіргіштің маңызды сипаттамасы екенін атап өткенбіз.

Кедергі – жалпыланған күш пен оның әсерінен туындайтын жалпыланған жылдамдықтың қатынасы (электротехникада бұл сәйкесінше электр кернеуі мен ток). Кедергі жүйедегі энергия жоғалтуларын сипаттайды.

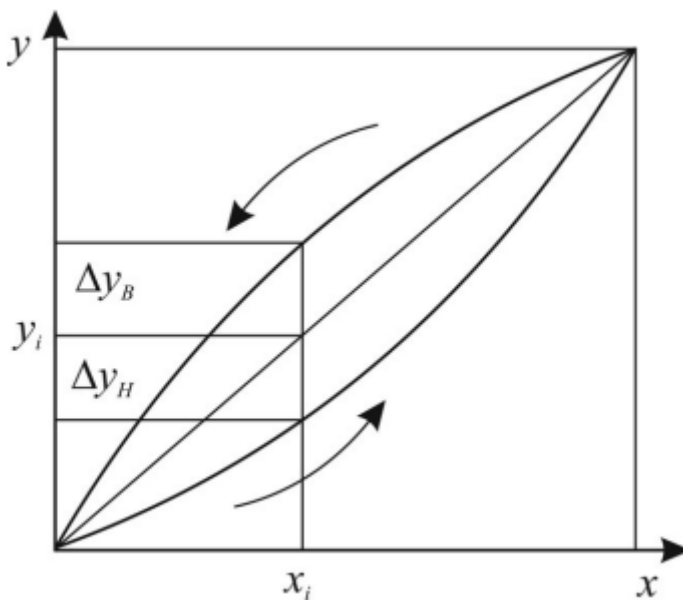
Кедергі белсенді, реактивті және күрделі болуы мүмкін.

Түрлендіргіш үшін кіріс және шығыс кедергісі, сондай-ақ ауысу, динамикалық және басқа кедергілер туралы айтуға болады (2-тарауды қараңыз).

Гистерезис – бұл заттың физикалық сипаттамасының өзгеруінің оны тудыратын физикалық шаманың өзгеруінен қалып қоюы. Мысалы:

– **Магниттік гистерезис** – ферромагнетиктің магниттену күйінің сыртқы магнит өрісінің кернеулігінің өзгеруінен қалып қоюы.

– **Серпімді гистерезис** – дененің деформациясының өзгеруінің механикалық кернеудің өзгеруінен қалып қоюы.



3.1-сурет. Гистерезис әсері бар түрлендіру функциясы:

y – гистерезис әсерінен пайда болатын қателік

Өлшеу түрлендіргіштері үшін гистерезис болуы қосымша қателікке әкеледі. Бұл қателік кіріс шамасы x -тың өсуі («тікелей жүріс») және кемуі («кері жүріс») кезінде

шығыс шамасы u -дың мәндері арасындағы Δu айырмашылығымен және номиналды u мәнімен сипатталады (3.1-сурет).

Гистерезистің пайда болуының негізгі себептері: үйкеліс және материалдардың құрылымдық өзгерулері.

Сызықты еместік. Сызықты еместік, түрлендіру функциясын түзу сызықпен жуықтауға болатын түрлендіргіштер үшін анықталады. Сызықты еместік деп түрлендіру функциясының жуықтау түзу сызықтан ең үлкен ауытқуы түсініледі [1, 5].

Сызықты еместік әдетте шығыс шамасының максималды мәнінің пайызымен немесе сол шаманың бірліктерімен өрнектеледі.

Бұл жерде атап өткен жөн, түрлендіру функциясын сызықтықтандырудың әртүрлі әдістері бар:

1. Түрлендіру функциясының соңғы нүктелері арқылы түзу жүргізу [6].

2. Ең кіші квадраттар әдісін қолдану, оның мәні, мысалы, [1] дереккөзінде көрсетілген.

Тағы бір әдіс – ең жақсы түзу әдісі. Бұл әдіс шынайы түрлендіру функциясының барлық шығыс мәндерін қамтитын және бір-біріне мүмкіндігінше жақын орналасқан екі параллель түзу арасындағы орта сызықты табуға негізделген [6].

Қайталанатындық. Қайталанатындық – бұл түрлендіргіштің бірдей жағдайларда бірдей нәтижелер беру қабілеті. Қайталанатындықты шығыс шамасының ең үлкен айырмашылығымен немесе орташа квадраттық ауытқу мөлшерімен бағалауға болады [1].

Сенімділік. Сенімділік – объектінің (атап айтқанда, датчик пен түрлендіргіштің) барлық параметрлерінің мәндерін белгіленген шектерде сақтау қасиеті, бұл оның берілген жұмыс режимдері мен қолдану жағдайларында қажетті функцияларды орындау қабілетін сипаттайды.

Сенімділік уақыт өте келе датчик (түрлендіргіш) қызметін сипаттайды және мынадай ұғымдарды қамтиды:

– **Ақаусыздық** – объектінің белгіленген уақыт аралығында жұмыс істей алу қасиеті (ақаулар болмауы). Ақау деп техникалық құжаттамада көрсетілген функциялардың немесе режимдердің орындалмауы түсініледі. Ақаусыздық жұмыс істеу ықтималдығымен немесе ақауға дейінгі жұмыс уақытымен сипатталады.

– **Төзімділік** – объектінің шекті күйге жеткенше жұмыс істей алу қасиеті. Шекті күйде объект өз функцияларының бірін немесе бәрін орындай алмайды, соның ішінде параметрлерді берілген шектерде қамтамасыз ете алмайды.

3.3. Метрологиялық сипаттамалар

Өлшеу дәлдігі. Өлшеудің соңғы мақсаты – өлшенетін шаманың шынайы мәнін бағалау ретінде өлшеу нәтижесін анықтау. Өлшеудің сапалық сипаттамасы – өлшеу дәлдігі, ол өлшеу нәтижесінің өлшенетін шаманың шынайы (нақты) мәніне жақындығын сипаттайды. Өлшеу нәтижесі шынайы мәнге неғұрлым жақын болса, өлшеу соғұрлым дәл болады. Және керісінше.

Дәстүрлі түрде өлшеулер сапасын сандық бағалау үшін теріс сипаттама – өлшеу қателігі қолданылады [1].

Өлшеу қателігі – өлшеу нәтижесінің өлшенетін шаманың шынайы мәнінен ауытқуы [1].

Датчиктердің (түрлендіргіштердің) қателіктері, өлшеу құралдарының басқа қателіктері сияқты, әртүрлі белгілер бойынша жіктелуі мүмкін.

Өрнектеу әдісі бойынша қателіктер абсолюттік, салыстырмалы және келтірілген деп бөлінеді.

Жоғарыда аталған өлшеу қателігінің анықтамасы – өлшеу нәтижесінің x өлшенетін шаманың шынайы (нақты) x_0 мәнінен ауытқуы ретінде...

$$\Delta = x - x_0, \quad (3.19)$$

Абсолюттік қатенің анықтамасы. Датчиктер (түрлендіргіштер) үшін абсолюттік қатенің ерекшелігі – физикалық шаманың (кіріс немесе шығыс) шынайы мәні ретінде номиналды статикалық түрлендіру функциясындағы (градуирлеу сипаттамасындағы) осы шаманың мәні қабылданады.

Абсолюттік қате өлшеу сапасы туралы толық түсінік бермейді. Мысалы, $m = 100$ кг массаны өлшеу кезінде $0,1$ кг абсолюттік қате – бұл өте жақсы нәтиже. Ал $m = 1$ кг массаны өлшеу кезінде $0,1$ кг абсолюттік қате – өлшеудің өте төмен дәлдігін білдіреді.

Өлшеу сапасын сандық сипаттау үшін бұл жағдайда **салыстырмалы қатені** қолдану ыңғайлырақ.

Салыстырмалы қате абсолюттік қатенің өлшенетін шаманың нақты мәніне қатынасы ретінде анықталады және әдетте пайызбен немесе бөлшек түрінде өрнектеледі. Бұл әртүрлі шамаларды өлшеудің дәлдігін салыстыруға мүмкіндік береді.

$$\delta = \frac{\Delta}{x_0} \approx \frac{\Delta}{x}. \quad (3.20)$$

Бұл шама жиі пайызбен ($\delta\% = \delta \times 100\%$) немесе промилле (ppm – миллионнан бір бөлік) арқылы өрнектеледі: $\delta_{\text{ppm}} = \delta \times 10^6$

Осы жағдайда келесі қатынас орынды болады:
 $1\% = 10\,000 \text{ ppm}$

$$1_{\text{ppm}} = 0,0001\% = 10^{-6}.$$

Өлшеу нәтижесінің анықталмағандығы

Физикалық шаманы өлшеу кезінде оның шынайы мәні белгісіз болып қалады, сондықтан қателік ұғымын дәл анықтау мүмкін емес. Осыған байланысты халықаралық ұйымдар (ISO, IEC, IMECO т.б.) өлшеу сапасын бағалау үшін "өлшеу нәтижесінің анықталмағандығы" терминін қолданатын нормативтік құжаттар әзірледі. Ресми түрде

өлшеу нәтижесінің анықталмағандығы деп өлшенетін шаманың шынайы мәні орналасқан мәндер ауқымын сипаттайтын баға түсініледі. Бұл терминді енгізу және қолданудың негізгі қағидалары «Өлшеу анықталмағандығын қолдану бойынша нұсқаулықта» [11] көрсетілген.

Анықталмағандықтың бірнеше категориялары бар, олар мазмұны және анықтау әдісі бойынша ерекшеленеді, бірақ бәрі де өлшенетін шаманың мүмкін болатын мәндерінің алынған нәтиже айналасындағы таралу өлшемі болып табылады. Ең кең тарағаны – стандартты анықталмағандық ($u(x)$ деп белгіленеді). Бұл стандартты ауытқу түрінде өрнектелген нәтиже анықталмағандығы. Дисперсия түрінде де $u^2(x)$ – стандартты анықталмағандықтың квадраты ретінде өрнектелуі мүмкін.

А түріндегі стандартты анықталмағандық бақылау нәтижелерінің сериясын статистикалық өңдеу арқылы анықталады:

$$u_A(x) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2}, \quad (3.21)$$

Мұнда:

x_i – i -ші бақылаудың нәтижесі

x_n – n бақылау нәтижелерінің орташа мәні

Аналогтық өлшеуіш құрал арқылы өлшеу жағдайында В түріндегі стандартты анықталмағандықты анықтау үшін негіз болып дәлдік класы γ және нормирлеуші мән X_N болып табылады. Аналогтық (сандық құралдар сияқты) құралдар үшін бұл көбінесе өлшеу шегі X_k -ге тең болады – құрал шкаласының соңғы мәні:

$$X_N = X_k.$$

Біркелкі таралу тығыздығы моделін қабылдай отырып, X_k өлшеу шегі бар аналогтық құралдың $x = x_n$ көрсеткішінің стандартты анықталмағандығы $u_B(x_n)$ мына формула бойынша табылады:

$$u_B(x_n) = \frac{\gamma}{100\% \sqrt{3}} X_k. \quad (3.22)$$

Сандық өлшеуіш құралдардың дәлдік класы әдетте екі мүшелі формуламен анықталады: **c/d**. Бұл жағдайда сандық құралдың көрсеткішінің стандартты анықталмағандығы мына формула бойынша есептеледі:

$$u_B(x_n) = \frac{d \cdot X_k + (c - d) \cdot x_n}{100\% \sqrt{3}}. \quad (3.23)$$

Өлшеу түрлендіргіштерінің номинальды түрлендіру коэффициенті бірлікке тең болмаған жағдайда, қателікті кіріс бойынша да, шығыс бойынша да анықтауға болады.

Кіріс бойынша өлшеу түрлендіргішінің абсолюттік қателігі – түрлендіргіш кірісіндегі шаманың нақты (шын) мәні мен градуирлеу сипаттамасы арқылы анықталған теориялық мән арасындағы айырмашылық. Іс жүзінде шын мәндердің орнына олардың нақты (действительді) мәндері қабылданады.

Шығыс бойынша өлшеу түрлендіргішінің абсолюттік қателігі – өлшенетін шаманы бейнелейтін түрлендіргіш шығысындағы шаманың нақты (шын) мәні мен градуирлеу сипаттамасы арқылы кірістегі нақты (шын) мәннен анықталған шығыс мәні арасындағы айырма ретінде анықталады [1, 6].

Қателіктердің пайда болуы – нақты түрлендіру функциясы **F(x)** мен номинальды түрлендіру функциясы **F_{ном}(x)** сәйкес келмеуінің салдары болғандықтан (3.2-сурет), шығыс бойынша абсолюттік қателікті мына формуламен анықтауға болады [5]:

$$\Delta y = y_{\partial} - y_{ном} = [k_{\partial}(x) - k_{ном}(x)] \cdot x_{\partial}, \quad (3.24)$$

Мұнда:

x_d – өлшеу түрлендіргішінің кірісіне берілетін шаманың нақты (действительді) мәні;

y_d – түрлендіргіш шығысында өлшенген шығыс шамасының нақты мәні;

$y_{ном}$ – кіріс шамасының x_d нақты мәні бойынша номинальды түрлендіру функциясы $F_{ном}(x)$ арқылы анықталған шығыс шамасының мәні;

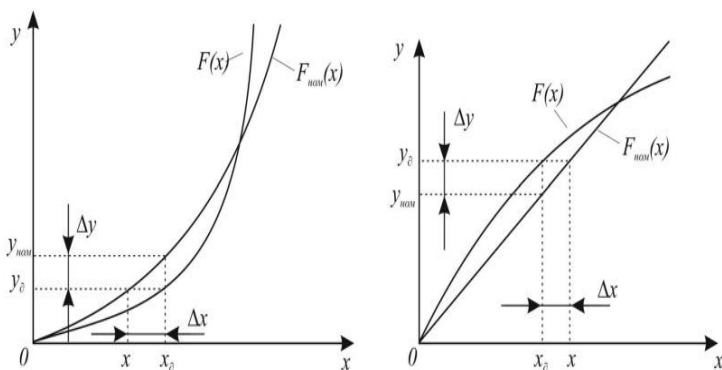
$k_d(x)$ және $k_{ном}(x)$ – нақты және номинальды түрлендіру коэффициенттері.

Кіріс бойынша абсолюттік қателік

$$\Delta x = x - x_d = \frac{y_d}{k_{ном,y}(x)} - x_d, \quad (3.25)$$

Мұнда x – шығу шамасы y_d мәніне сәйкес келетін және номинальды түрлендіру функциясы арқылы анықталатын кіріс шамасының мәні; $k_{ном,y}(x)$ – y_d мәні үшін номинальды түрлендіру коэффициенті.

Қателіктердің белгісіздік дәрежесіне (немесе көріну сипатына) қарай олар жүйелі және кездейсоқ болып бөлінеді.



3.2-сурет. Өлшеу түрлендіргішінің кіріс және шығыс бойынша қателіктерін анықтау

Жүйелі қателік – бұл қайталанатын өлшеулер кезінде мәні тұрақты болып қалатын қателік компоненті. Мысалы, нақты градуирлеу сипаттамасының сызықтық емес болуынан және оны сызықтық тәуелділікпен жуықтаудан туындайтын қателік жүйелі қателік болып табылады.

Кездейсоқ қателік – бұл өлшеу (түрлендіру) жалпы қателігінің бір бөлігі болып табылатын және өлшенетін шама мөлшері өзгеріссіз қалған жағдайда да қайталанатын түрлендірулер кезінде кездейсоқ өзгеретін қателік.

Сондықтан, белгісіздік дәрежесіне байланысты, датчиктің (түрлендіргіштің) қателігін кіріс немесе шығыс бойынша келесі түрде көрсетуге болады:

$$\Delta_{вх} = \overline{\Delta}_{вх} + \dot{\Delta}_{вх}; \quad (3.26)$$

$$\Delta_{вых} = \overline{\Delta}_{вых} + \dot{\Delta}_{вых}, \quad (3.27)$$

Мұнда $\Delta_{вх}$, $\Delta_{вых}$ және $\delta_{вх}$, $\delta_{вых}$ – сәйкесінше **жүйелі** және **кездейсоқ** қателіктер.

Дегенмен, қателіктерді қосу мәселесі алғаш қарағандағынан әлдеқайда күрделі және әрбір нақты жағдайда жеке талдауды қажет етеді [1, 5-7].

Кездейсоқ қателіктер математикалық статистика мен ықтималдықтар теориясы әдістері арқылы сипатталады [1, 6]. Кездейсоқ қателікті анықтау үшін әрбір (немесе таңдалған) диапазон нүктесі үшін көптеген өлшеулер жүргізіп, тәжірибелік деректер бойынша қателіктердің таралу гистограммасын құру қажет.

Егер қателіктердің таралуы **қалыпты заңға** (Гаусс үлестіріміне) сәйкес келсе, кездейсоқ қателік орташа квадраттық ауытқу (стандартты ауытқу) шамасы арқылы бағаланады:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3.28)$$

Мұнда:

- n – өлшеулер саны;
- x_i – i -ші өлшеудің нәтижесі;
- $\bar{x}$ – n өлшеу үшін математикалық күту (орташа мән).

Зерттеулер нәтижесінде анықталғандай, жеткілікті үлкен n мәнінде кездейсоқ қателік:

- $\pm\delta$ аралығында **0,68** ықтималдықпен (68%);
- $\pm2\delta$ аралығында **0,95** ықтималдықпен (95%);
- $\pm3\delta$ аралығында **0,997** ықтималдықпен (99,7%)

орналасады [1].

Түрлендіргіштің жұмыс жағдайына байланысты қателіктер негізгі және қосымша болып бөлінеді.

Негізгі қателік – бұл түрлендіргіштің қалыпты қолдану жағдайындағы қателігі. «Қалыпты жағдайлар» ұғымы стандарттарда және түрлендіргіш техникалық құжаттамасында көрсетіледі. Мысалы, қалыпты жағдайлар ретінде мыналар қабылдануы мүмкін:

- қоршаған орта температурасы $20\pm5^{\circ}\text{C}$;
- атмосфералық қысым 760 ± 20 мм сын.бағ.;
- $20\pm5^{\circ}\text{C}$ температурадағы салыстырмалы ылғалдылық

$60\pm20\text{-}15\%$.

Қосымша қателіктер – бұл техникалық құжаттамада көрсетілген әсер етуші факторлардың шектен тыс өзгеруінен туындайтын қателіктер (мысалы, жоғарыда аталған жағдай үшін температура 25°C -тан асқан кезде).

Әдістемелік қателіктер – өлшеу әдісіне байланысты қателіктер. Мысалы, компрессиялық манжет арқылы қан қысымын өлшеу әдісінің (Коротков тондары әдісі) қателігі 8 мм сын.бағ. құрайды, ал манжеттегі пневматикалық қысымды өлшеудің қателігі ± 1 мм сын.бағ. шамасында болуы мүмкін.

3.4. Динамикалық сипаттамалар

Динамикалық сипаттамалар деп өзгерткіштің динамикалық режимінде жұмыс істеген кезде ғана көрінетін сипаттамалар аталады, яғни өзгертілетін шама уақыт функциясы (процесі) болғанда.

Процестің үлгісі уақытқа тәуелділігін көрсете отырып, түрлендірудің динамикасын, оның динамикалық режимін сипаттайды. Бұл режимде өзгерткіш динамикалық жүйе ретінде қарастырылады да, кіріс сигналының $X(t)$ шығыс сигналына $Y(t)$ түрленуі символды түрде былай жазылады [5].

$$Y(t) = AX(t), \quad (3.29)$$

Мұндағы A – динамикалық жүйенің операторы, бұл түсінік «түрлендіру коэффициенті» ұғымын жалпылайды және $X(t)$ -ті $Y(t)$ -ге айналдыру үшін қажетті математикалық және логикалық операцияларды қамтиды.

Оператордың нақты түрі динамикалық жүйенің құрылымы мен параметрлерімен анықталады. Егер оператор суперпозиция принципінің талаптарын қанағаттандырса, онда ол **сызықты** болып табылады, ал динамикалық жүйе де сызықты болады. Әйтпесе, олар **сызықты емес** деп саналады.

Параметрлері уақытқа тәуелді болмайтын жүйе **стационарлы** деп аталады, ал егер тәуелді болса – **стационарлы емес**.

Теориялық тұрғыдан барлық нақты динамикалық жүйелер аз не көп дәрежеде **сызықты емес** және **стационарлы емес**, ал олардың параметрлері **үлестірілген** болады.

Практикада олардың көпшілігін, әдетте, **сызықты стационарлы динамикалық жүйелер** ретінде қарастыруға болады, тек қана қызмет принципіне сызықты емес қасиеттер негізделген жүйелерді қоспағанда [4, 6].

Тұрақты коэффициенттері бар дифференциалдық теңдеумен сипатталатын сызықты стационарлы динамикалық жүйе:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x, \quad (3.30)$$

ол операторлық түрде [2, 4] былай өрнектеледі:

$$(a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0) y(t) = (b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0) x(t), \quad (3.31)$$

$$(a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0) y(t) = (b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0) x(t), \quad (3.31)$$

$$A_n(p) \cdot y(t) = B_m(p) \cdot x(t), \quad m \leq n, \quad (3.32)$$

$$y(t) = \frac{B_m(p)}{A_n(p)} x(t) = Lx(t), \quad (3.33)$$

Мұндағы $p = d/dt$ – дифференциалдау операторы; L – стационарлы динамикалық жүйенің сызықты операторы.

Уақыт облысындағы түрлендіру сипаттамасы. Динамикалық жүйенің дифференциалдық теңдеуі оның толық сипаттамасы болып табылады, бірақ оның коэффициенттерін тәжірибе жүзінде анықтау қиынға соғады. Сондықтан уақыт облысындағы түрлендіру сипаттамасы ретінде сызықты динамикалық жүйенің **импульстік (салмақтық) функциясы $q(t)$ және өтпелі функциясы $h(t)$** қолданылады.

Импульстік функция $q(t) = L\delta(t)$ (3.3-сурет) – бұл динамикалық жүйенің δ -функция түріндегі кіріс әсеріне жауабы (реакциясы). Анықтама бойынша δ -функция мынадай қасиеттерге ие:

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t \neq 0, \\ \infty, & \text{при } t = 0, \end{cases} \quad (3.34)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1. \quad (3.35)$$

Мұндай жүйенің шығыс сигналы $x(t)$ кез келген шектелген мәндері бар сигнал үшін (ол өте қысқа уақыт аралығында $x(t) = \text{const}$ шартын қанағаттандыратын болса) $q(t)$ арқылы интегралдық түрде былай өрнектеледі:

$$y(t) = \int_0^t q(t)x(t)dt. \quad (3.36)$$

Өтпелі функция (3.3-сурет)

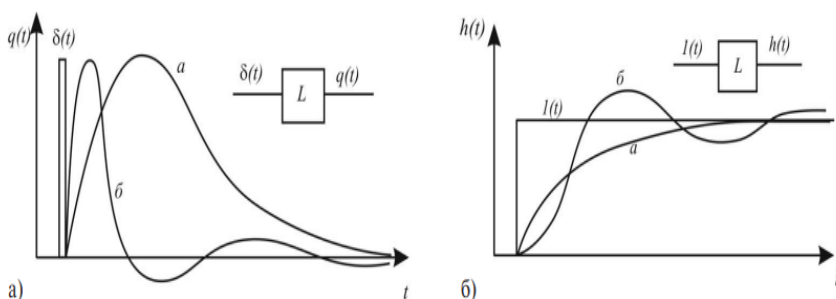
$$h(t) = L1(t) = \int_0^t q(t)dt \quad (3.37)$$

Сызықтық динамикалық жүйенің бірлік функциясы $1(t)$ түріндегі кіріс әсеріне берілген жауабы болып табылады,

$$\frac{d1(t)}{dt} = \delta(t).$$

оның туындысы

бірлік функциясы $1(t)$, оның туындысы



Сурет 3.3. Импульстік және өтпелі функциялардың графиктері: а – периодсыз (апериодтық); ә – тербелмелі

$$y(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t x(t)h(t)dt = \int_0^t x(t)dh(t). \quad (3.38)$$

Өтпелі сипаттаманың $h(t)$ мысалы ретінде магнит-электрлік гальванометрдің қозғалатын бөлігінің оны кернеуі бар тізбекке қосқан кездегі ауытқуы қарастырылуы мүмкін.

Импульстік және өтпелі сипаттамалар сызықтық динамикалық жүйенің динамикалық қасиеттерін толық сипаттайды. Оларды эксперименттік түрде анықтау салыстырмалы түрде оңай. Олардағы ақпаратты пайдалана отырып, дифференциалдық теңдеу коэффициенттерінің мәндерін табуға болады, оларды басқа жолмен анықтау қиын.

Күрделі өлшеу техникасы құралдарының (ӨТҚ) динамикалық қасиеттерін өлшеу түрлендіргіштерінің динамикасы арқылы бағалауға болады. Сонымен қатар, көптеген жағдайларда ӨТҚ-нің динамикалық қасиеттері негізінен біріншілік өлшеу түрлендіргіштерінің динамикалық қасиеттерімен анықталады. Сондықтан ӨТҚ-ге қатысты келесі есептеулер өлшеу түрлендіргіштерінің динамикасына қысқартылады.

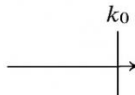
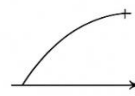
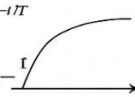
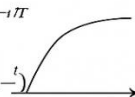
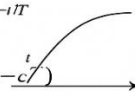
Өлшеу түрлендіргіштерінің динамикасын сипаттайтын дифференциалдық теңдеу ретіне (теңдеудегі туынды ретіне) байланысты түрлендіргіштер бірінші, екінші немесе жоғары ретті түрлендіргіштерге бөлінеді. Кейбір идеалды және нақты бірінші ретті түрлендіргіштердің салыстырмалы сипаттамалары 3.1-кестеде келтірілген.

Бірінші ретті өлшеу түрлендіргіштеріндегі өтпелі процесс апериодтық, ал екінші ретті түрлендіргіштерде тербелмелі (периодтық) болады. Сәйкесінше, динамикалық жүйеде апериодтық, тербелмелі немесе басқа да күрделі өтпелі процесс жүруі мүмкін.

Апериодтық өтпелі процесс термиялық және химиялық түрлендіргіштерге тән. Электрлік, механикалық, акустикалық түрлендіргіштерде өтпелі процестің тербелмелі сипаты байқалады. Мұндай түрлендіргіштердің жұмысы екінші ретті дифференциалдық теңдеулермен сипатталады. Бұл жағдайда шығыс шамасы белгіленген мәнге жетпей бұрын, бірнеше рет

одан жоғары немесе төмен болады, яғни осы деңгейдің айналасында тербеліс жасайды.

3.1-кесте. Бірінші ретті түрлендіргіштердің динамикалық сипаттамалары

Түрлендіргіш түрі	Жийіктік сипаттамалар	Уақыттық сипаттамалар
Пропорционал (энергиясыз)	$a_0 Y(t) = b_0 X(t)$ $W(s) = k_0$ $T = \frac{b_1}{a_0}$	$h(t) = k_0$ $g(t) = k_0$ 
Идеалды дифференциалдаушы	$a_0 \frac{dY(t)}{dt} = b_1 dX(t)$ $W(s) = Ts$ $T = \frac{b_1}{a_0}$	$h(t) = T \delta(t)$ $g(t) = T \delta(t)$ 
Идеалды интегралдаушы	$a \frac{dY(t)}{dt} = b_0 X(t)$ $W(s) = \frac{1}{Ts}$ $T = \frac{a_1}{b_0}$	$h(t) = \frac{1}{T}$ $g(t) = \frac{t}{T}$ 
Нақты дифференциалаушы	$a_1 dY(t) + a_0 Y(t) = b_1 dX(t)$ $W(s) = \frac{k_1 Ts}{T^2 s^2 + 1}$ $k_1 = \frac{b_1}{a_0}$	$h(t) = k_1 e^{-t/T}$ $g(t) = k_1 (1 - e^{-t/T})$ 
Нақты интегралдаушы	$a_1 dY(t) + a_0 Y(t) = b_0 X(t)$ $W(s) = \frac{k_0}{Ts + 1}$ $k_0 = \frac{b_0}{a_0}$	$h(t) = k_0 e^{-t/T}$ $g(t) = k_0 (1 - e^{-t/T})$ 
Нақты интегралдаушы	$a_1 dY(t) + a_0 Y(t) = b_0 X(t)$ $W(s) = \frac{k_0}{Ts + 1}$ $k_0 = \frac{b_0}{a_0}$	$h(t) = k_0 e^{-t/T}$ $g(t) = k_0 (1 - e^{-t/T})$ 

Түрлі физикалық табиғаты бар түрлендіргіштердің дифференциалдық теңдеулерінің бірдейлігі себебінен, екінші ретті түрлендіргіштердің динамикалық қасиеттерін сипаттау жалпыланған сипаттамалар арқылы жүзеге асырылуы мүмкін. Бұл сипаттамалар алдын ала белгілі екінші ретті дифференциалдық теңдеуді жалпыланған параметрлермен шешу арқылы алынады, яғни келесі түрдегі теңдеу:

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t), \quad (3.39)$$

мұндағы a_2 , a_1 , a_0 және b_0 – жалпыланған түрлендіргіштің коэффициенттері, олардың мәндері түрлендіргіш параметрлері арқылы анықталады.

Мұндай түрлендіргіштің беру функциясы келесі түрде болады:

$$W(s) = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = k_0 \frac{1}{\frac{a_2}{a_0} s^2 + \frac{a_1}{a_0} s + 1}. \quad (3.40)$$

Түрлендіргіштің тежелу дәрежесін былай белгілейік $\beta = a_1 / 2\sqrt{a_0 a_2}$ а оның тербелістерінің меншікті жиілігін былай белгілейік $\omega_0 = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$ күрделі түрлендіру коэффициентінің өрнегі келесі түрде болады.

$$K(j\omega) = k_0 \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j2\beta \frac{\omega}{\omega_0}}. \quad (3.41)$$

Егер кіріс сигналының салыстырмалы жиілігін $\eta = \omega/\omega_0$ деп белгілесек, жиіліктік сипаттама мына түрге ие болады

$$K(j\eta) = k_0 \frac{1}{1 - \eta^2 + j2\beta\eta} = k_0 \frac{1 - \eta^2 - j2\beta\eta}{(1 - \eta^2)^2 + 4\beta^2 \eta^2} = A(\eta)e^{j\varphi(\eta)}, \quad (3.42)$$

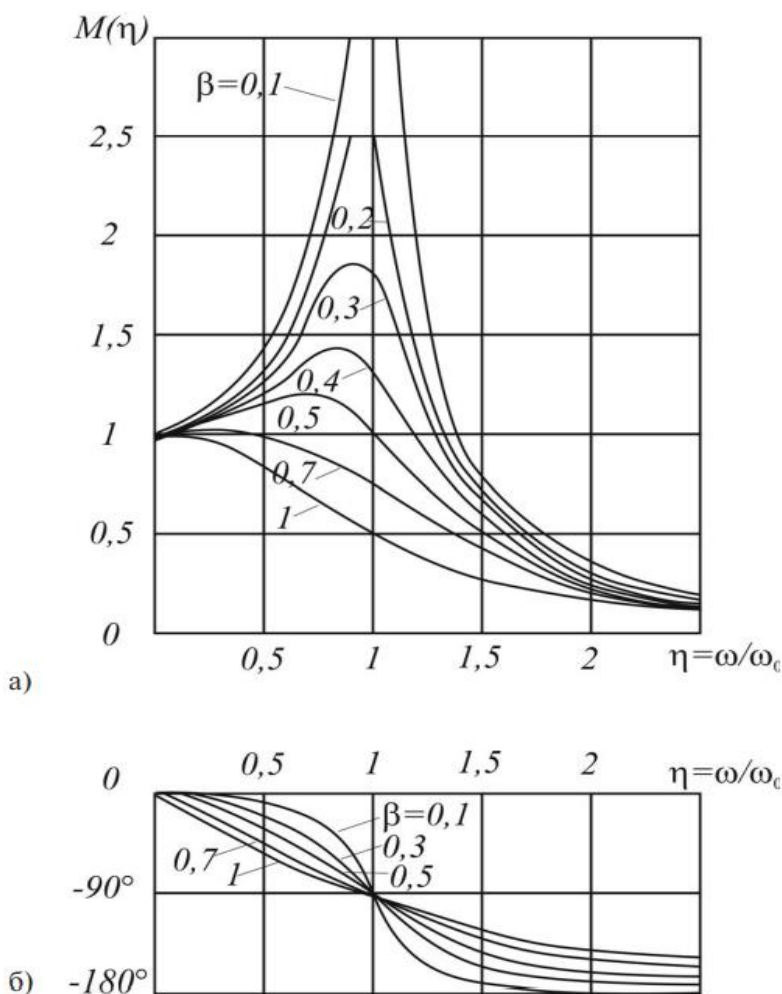
где $A(\eta) = k_0 \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + 4\beta^2 \eta^2}}$ – амплитудно-частотная характеристика;
 $\varphi(\eta) = -\arctg \frac{2\beta\eta}{1 - \eta^2}$ – фазочастотная характеристика преобразователя.

Уақыт бойынша тұрақты кіріс сигналы үшін, яғни $\omega = 0$ (демек, $\eta = 0$) болғанда, $A(\eta)|_{\eta=0} = k_0$ болады.

Соңғы өрнекті ескере отырып, тербелмелі түрлендіргіштің амплитуда-жиіліктік сипаттамасын екі ось бойынша салыстырмалы координаттарда былай жазуға болады:

$$M(\eta) = \frac{A(\eta)}{k_0} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + 4\beta^2 \eta^2}}. \quad (3.43)$$

Бұл өрнекте, сондай-ақ фаза-жиіліктік сипаттама өрнегінде де түрлендіргіш параметрлерінің абсолютті мәндері кірмейді. Сондықтан бұл өрнектерді кез келген физикалық табиғаттағы және кез келген параметрлері бар түрлендіргіштің жұмысын сипаттау үшін пайдалануға болады, егер бұл параметрлер салыстырмалы бірліктерде берілсе (3.4-сурет).



3.4-сурет. Екінші ретті түрлендіргіштің жиіліктік сипаттамалары

Осылайша, өлшенетін сигналдарды түрлендіруді процесс ретінде қарастырсақ, онда оларды сипаттаудың ең жақсы тәсілі (статикалық түрлендіруді қоспағанда немесе оған қарама-қарсы) динамикалық параметрлер болып табылады. Олар: импульстік және өтпелі сипаттамалар (өтпелі

процестің сипаттамалары), АЖЖ (амплитуда-жиілік жауабы) және ФЖЖ (фаза-жиілік жауабы), яғни уақыт бойынша өзгеретін синусоидалы сигналдардың сипаттамалары.

Екінші ретті түрлендіргіштің өтпелі сипаттамаларын анықтау үшін оның беру функциясы жоғарыда келтірілген белгілеулерді ескере отырып, келесі түрде жазылады.

$$W(s) = k_0 \frac{\omega_0^2}{(s + \beta\omega_0)^2 + \omega_0^2(1 - \beta^2)}. \quad (3.44)$$

Сонда, **ыдырау теоремасына** сәйкес, **өтпелі функция** келесі түрде болады:

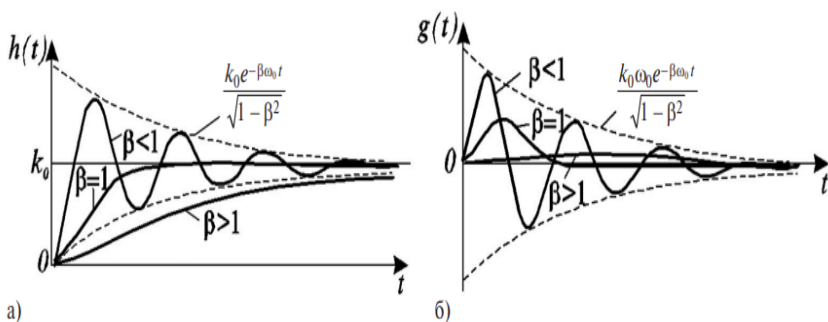
$$h(t) = k_0 \left[1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \sin \left(\omega_0 t \sqrt{1 - \beta^2} + \arctg \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{\beta} \right) \right], \quad (3.45)$$

Сонда, **ыдырау теоремасы** бойынша **импульстік-өтпелі функция** (ИӨФ) келесі түрде анықталады:

$$q(t) = k_0 \omega_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} e^{-\beta\omega_0 t} \sin \omega_0 \sqrt{1 - \beta^2} t. \quad (3.46)$$

β -нің мәніне байланысты үш жағдай болуы мүмкін:

1. $\beta < 1$ – өтпелі процесс еркін тербелістердің жиілігімен $\omega_B = \omega_0 \sqrt{1 - \beta^2}$ тербелмелі болады, ал амплитудасы экспоненциальды төмендейді (3.5-сурет).



3.5-сурет. Екінші ретті түрлендіргіштердің уақыттық сипаттамалары

2. $\beta > 1$ – периодсыз (апериодты) өтпелі процесс сипатталады; бұл жағдайда өтпелі және импульстік өтпелі функциялар $\sin jx = jshx$ және $tg jx = jthx$ ескеріле отырып, келесі түрде болады:

$$h(t) = k_0 \times \left[1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{\beta^2 - 1}} sh \left(\omega_0 t \sqrt{\beta^2 - 1} + \operatorname{arcth} \frac{\sqrt{\beta^2 - 1}}{\beta} \right) \right], \quad (3.47)$$

$$g(t) = k_0 \omega_0 \frac{1}{\sqrt{\beta^2 - 1}} e^{-\beta\omega_0 t} sh [\omega_0 \sqrt{\beta^2 - 1} t]; \quad (3.48)$$

3. $\beta = 1$ – бұл шектік (критикалық) режимді сипаттайды, ол периодсыз өтпелі процестің ерекше жағдайы болып табылады. Бұл жағдайда өтпелі және импульстік өтпелі функциялардың өрнектері келесі түрде болады:

$$h(t) = k_0 [1 - e^{-\omega_0 t} (1 + \omega_0 t)], \quad (3.49)$$

$$g(t) = k_0 \omega_0 t e^{-\omega_0 t}. \quad (3.50)$$

Айта кету керек, β бірден сәл кіші болғанда ($\beta \approx 0,8$) ең үлкен практикалық маңызға ие болғандықтан, өтпелі процестің ұзақтығы осы жағдайда ең қысқа болады.

3.5. Типтік динамикалық буындар

Физикалық табиғаты, құрылымы, қуаты және басқа сипаттамалары әртүрлі болғанмен, бірдей сызықтық дифференциалдық теңдеулермен (бірдей беруші функциялары бар) сипатталатын элементтер бірдей динамикалық буындар болып табылады [2, 4].

Көптеген жағдайларда [4] датчиктерді белгілі беруші сипаттамасы, жиілік-амплитудалық (АЖС), фаза-жиіліктік (ФЖС), импульстік және өтпелі сипаттамалары бар бірнеше типтік буындар түрінде көрсету ыңғайлы. Мұндай болжамды әдетте эксперимент арқылы тексеру оңай.

Көптеген түрлендіргіштер екінші реттіктен жоғары емес ss көпмүшелерінен тұратын алымдары мен бөлгіштері бар типтік динамикалық буындармен сипатталады [2].

Жалпы жағдайда динамикалық буынның беруші функциясын келесі түрдегі көбейткіштердің көбейтіндісі ретінде көрсетуге болады:

$$\left. \begin{aligned} &K; S^v; \frac{1}{T_s + 1}; \frac{1}{T^2 S^2 + 2\xi T_s + 1}; \\ &\tau s + 1; \tau^2 s^2 + 2\xi \tau s + 1 \end{aligned} \right\}, \quad (3.51)$$

Мұнда:

K, v, T, ξ , $\tau\xi$ – тұрақты шамалар,

– **K > 0**,

– **v** – оң немесе теріс бүтін сан болуы мүмкін,

– **T > 0**,

– **0 < ξ < 1**,

– **τ > 0**,

– **0 < ξ < 1**.

Тербелмелі, дифференциалдаушы және интегралдаушы буындардың динамикалық сипаттамаларын [2, 4] дереккөздерінен табуға болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. – М.: Изд. стандартов, 1985. – С. 256.

2. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). – М.: Машиностроение, 1977. – С. 464.

3. Новый словарь иностранных слов. – Минск: Современный литератор, 2005. – С. 1088.

4. Островский Л.А. Основы общей теории электроизмерительных устройств. – Л.: Энергия, 1971. – С. 544.

5. Полишук Е.С. Измерительные преобразователи. – Киев: Вища школа, 1981. – С. 296.

6. Полищук Е.С. и др. Средства и методы измерений неэлектрической величины: Учебник/Под ред. проф. Е.С. Полищука. – «Бескид-Біт», 2008. – 618 с. (На укр. яз.).

7. Рудзит Я.А., Плуталов В.М. Основы метрологии, точность и надежность в приборостроении. – М.: Машиностроение, 1991. – С. 304.

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

9. ГОСТ 8.009-89. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

10. ГОСТ 27.002-89. Надежность. Термины и определения.

11. Guide of the Expression of Uncertainty in Measurement. ISO 1993. 1995.

4-ТАРАУ

СЕНСОРЛЫҚ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ҚҰРЫЛЫСТАР

4.1. Жалпы мәліметтер

Сенсорлардың шығыс сигналы әдетте әлсіз болады, шулар мен кедергілермен бірге жүреді және көбінесе процессорлар немесе стандартты өлшеу құралдары тікелей қабылдай алмайтын форматта болады. Сонымен қатар, параметрлік сенсорлардың қалыпты жұмыс істеуі үшін қоректендіру немесе қоздыру көздері қажет.

Сенсорлардың шығыс сигналдарын кейінгі өңдеуге ыңғайлы түрге түрлендіретін электрондық құрылғыларды өлшеуіш [6] немесе үйлестіргіш [11,13] электрондық схемалар деп атайды.

Мұндай құрылғылардың міндеттері мыналарды қамтиды [3, 10]:

1. Сенсордың шығыс сигналының параметрлерін келесі өлшеу немесе есептеу құрылғыларының кіріс параметрлерімен үйлестіру;
2. Сенсордың шығыс кедергісін осы құрылғылардың кіріс кедергісімен үйлестіру.

Үйлестіргіш құрылғылар көбінесе екіншілік өлшеу түрлендіргіштері болып табылады, олардың техникалық және метрологиялық сипаттамалары сенсорлардың сәйкес сипаттамаларына әсер етеді.

Жалпы тенденция (дегенмен, оны әрдайым іске асыру мүмкін емес) – паразиттік параметрлердің (қосылу сымдары мен кабельдердің сыйымдылығы мен кедергісі), кедергілер мен индукциялық әсерлердің әсерін болдырмау үшін электрондық схемаларды сенсор корпусына орналастыруға ұмтылу [3].

Әрбір сенсор түрі үшін электрондық құрылғылардың өзіндік ерекшеліктері бар және олар сәйкес бөлімдерде сипатталған. Бұл тарауда нақты сенсорлардың электрондық схемаларын құру үшін жиі қолданылатын универсалды

электрондық схемалар (күшейткіштер, өлшеу мосттары, генераторлар, аналогты-сандық түрлендіргіштер және т.б.) туралы кейбір мәліметтер келтірілген.

4.2. Операциялық күшейткіш

Операциялық күшейткіш (ОУ) – күшейткіш схемалардың бір түрі болып табылады. Қарапайым күшейткіш сияқты, ол кіріс сигналының токын, кернеуін немесе қуатын күшейтуге арналған. Дегенмен, қарапайым күшейткіштің сипаттамалары мен параметрлері оның схемасымен толық анықталатын болса, операциялық күшейткіштің сипаттамалары мен параметрлері бірінші жуықтауда кері байланыс тізбегінің параметрлерімен анықталады.

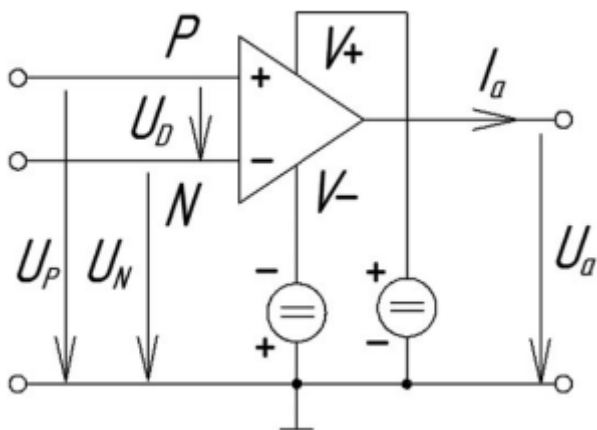
Қазіргі микроэлектроника техникасының жетістіктерінің арқасында, тұрақты токта немесе төмен жиіліктерде электр сигналдарымен жұмыс істеген кезде операциялық күшейткіштердің сипаттамалары айтарлықтай жақсарды. Олар сонымен қатар жоғары күшейту коэффициенті, жоғары кіріс кедергісі және төмен шығыс кедергісі сияқты артықшылықтарға ие.

Бұрын мұндай жоғары сапалы күшейткіштер тек аналогтық есептеуіш құрылғыларда қосуды және интегралдауды сияқты математикалық операцияларды орындау үшін қолданылды. Сол себепті олар «операциялық күшейткіштер» деп аталды [3-5, 9-11].

Операциялық күшейткіштер әдетте монолитті интегралдық микросхемалар түрінде жасалады және қазіргі уақытта өлшемдері мен бағасы жағынан жеке транзистордан іс жүзінде айырмашылығы жоқ. Олардың іс жүзінде идеалды сипаттамаларына байланысты, олардың негізінде әртүрлі схемаларды жүзеге асыру жеке транзисторлармен салыстырғанда әлдеқайда қарапайым. Сондықтан операциялық күшейткіштер сызықтық схематехниканың көптеген салаларында схема элементтері ретінде қолданылады.

4.1-суретте операциялық күшейткіштің схемалық белгісі көрсетілген. Оның кіріс каскады дифференциалдық күшейткіш түрінде жасалған, сондықтан операциялық күшейткіштің екі кірісі бар. Төмен жиіліктер аймағында оның шығыс кернеуі U_a кіріс кернеулерінің айырмасымен бір фазада болады:

$$U_D = U_P - U_N.$$



4.1-сурет. Операциялық күшейткіштің схемалық белгісі

P-кіріс **инверттеусіз кіріс** деп аталады және операциялық күшейткіш схемасында «плюс» белгісімен белгіленеді. N-кіріс **инвертирующий кіріс** деп аталып, схемада «минус» белгісімен көрсетіледі.

Операциялық күшейткіштің оң да, теріс де кіріс сигналдарымен жұмыс істеу мүмкіндігін қамтамасыз ету үшін **екі полярлы қоректендіру кернеуі** қолданылады. Бұл үшін 4.1-суретте көрсетілгендей, операциялық күшейткіштің қоректендіру терминалдарына қосылатын екі тұрақты кернеу көзі қарастырылуы керек.

Әдетте, интегралдық жасақтамада шығарылатын стандартты операциялық күшейткіштер $\pm 15 \text{ В}$ қоректендіру кернеуімен жұмыс істейді.

Операциялық күшейткіштің дифференциалдық күшейту коэффициенті

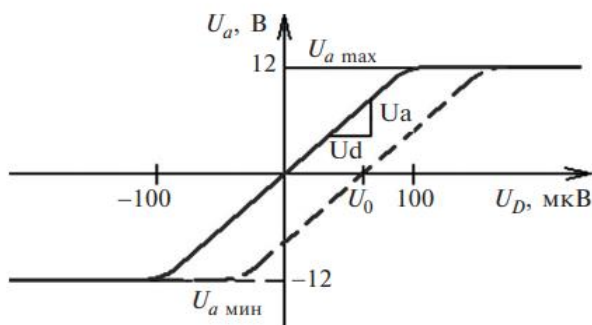
$$A_D = \Delta U_a / \Delta U_D = \Delta U_a / \Delta (U_P - U_N) \quad (4.1)$$

Оның шекті мәні 10^4 -тен 10^6 -ға дейін болады. Бұл параметр операциялық күшейткіштің **өздік күшейту коэффициенті** деп те аталады, яғни кері байланыс жоқ кездегі күшейту дәрежесі.

4.2-суретте операциялық күшейткіштің шығыс кернеуінің U_D -ға тәуелділігінің типтік графигі көрсетілген. $U_{a \text{ мин}} < U_a < U_{a \text{ max}}$ аралығында шығыс кернеуі U_D -ге дерлік сызықты тәуелді болады. Бұл аралық **күшейту аймағы** деп аталады.

Қанығу аймағында U_D өссе де, U_a -ның сәйкес өсуі байқалмайды. Күшейту аймағының шекаралары ($U_{a \text{ мин}}$ және $U_{a \text{ max}}$) қоректендіру кернеуінің оң және теріс мәндерінен шамамен **3 В** алыс орналасқан.

Операциялық күшейткіш $\pm 15 \text{ В}$ қоректендіру кернеуінде жұмыс істегенде, шығыс кернеуінің типтік күшейту аймағы $\pm 12 \text{ В}$ шамасында болады [3, 10].



4.2-сурет. Операциялық күшейткіштің шығыс кернеуінің кіріс кернеулерінің айырмасына тәуелділігі

Идеалды операциялық күшейткіштің беріліс сипаттамасы нөлдік нүкте арқылы өтуі керек. Дегенмен, 4.2-суретте көрсетілгендей (кесік сызықпен), нақты операциялық күшейткіштер үшін бұл сипаттама аздап ығысқан болады. Сондықтан, шығыс кернеуін нөлге теңестіру үшін кіріске белгілі бір кернеулер айырмасын беру қажет.

Бұл кернеу айырмасы **нөлдік ығысу кернеуі (U_0)** деп аталады. Әдетте ол бірнеше милливольт шамасында болады және көптеген жағдайларда ескерілмейді. Дегенмен, мұны елемеу мүмкін болмаған кезде, оны операциялық күшейткіштің бір кірісіне қарама-қарсы полярлылықтағы тұрақты өтелу кернеуін қосу арқылы жоюға болады.

Нақты күшейткіште нөлдік ығысу кернеуінің мәні уақыт өте келе және температура мен қоректендіру кернеуінің өзгеруіне (дрейф) байланысты өзгеруі мүмкін:

$$\Delta U_0(\theta, t, U_b) = (\partial U_0 / \partial \theta) \Delta \theta + (\partial U_0 / \partial t) \Delta t + (\partial U_0 / \partial U_b) \Delta U_b.$$

Бұл формулада дрейфтің келесі құраушылары айырмашылық танытады:

1. $\partial U_0 / \partial T$ - температуралық дрейф, әдетте 3...10 мкВ/К аралығында болады;

2. $\partial U_0 / \partial t$ - уақыттық дрейф, айына бірнеше микровольтка жетуі мүмкін;

3. $\partial U_0 / \partial U_b$ - қоректендіру кернеуінің өзгеруінен туындайтын дрейф.

$\partial U_0 / \partial U_b$ құраушысы нөлдік нүктенің ығысуына қоректендіру кернеуінің номиналды мәннен ауытқуының әсерін сипаттайды және әдетте 10...100 мкВ/В шамасында болады. Сондықтан, егер бұл дрейф құраушысын минимизациялау қажет болса, қоректендіру кернеуін бірнеше милливольт дәлдікпен қамтамасыз ету керек.

Әрі қарайғы түсіндіруде нөлдік ығысу кернеуінің өтелген және нөлге тең деп есептелетінін ескертеміз. Сонда (4.1) формуласынан мынау шығады:

$$U_a = A_D U_D = A_D (U_P - U_N). \quad (4.2)$$

Осылайша, динамикалық диапазон шегінде операциялық күшейткіштің шығыс кернеуі кіріс кернеулерінің айырмасына пропорционал болады.

Жалпы мақсатта қолданылатын операциялық күшейткіш тұрақтылықты қамтамасыз ету үшін бірінші ретті төмен жиіліктерді сүзгісінің жиілік сипаттамасына ие болуы керек. Бұл талап кем дегенде $|A_D| \geq 1$ болатын жиілікке дейін орындалуы тиіс [2].

Бұл талапты қанағаттандыру үшін операциялық күшейткіш схемасы өте төмен қиылу жиілігі бар төмен жиіліктер сүзгісін қамтуы керек. 4.3-суретте мұндай «жиілік бойынша түзетілген» операциялық күшейткіштің дифференциалдық күшейту коэффициентінің типтік жиілік сипаттамасы көрсетілген.

Мұндай күшейткіштің дифференциалдық күшейту коэффициенті кешенді жазылымда келесі формуламен өрнектеледі:

$$A_D = \frac{A_D}{1 + j(f / f_{gA})}, \quad (4.3)$$

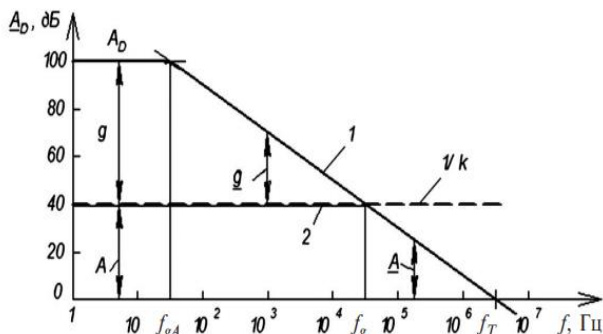
Мұндағы A_D – төмен жиіліктердегі $A_{_D}$ коэффициентінің шекті мәні.

3 дБ деңгейіндегі өткізу жолағының шекарасына сәйкес келетін f_{gA} жиілігінен жоғары күшейту коэффициентінің модулі A_D жиілікке кері пропорционал болады.

Осылайша, жиіліктің осы диапазонында келесі қатынас орындалады:

$$|A_D|f = A_D f_{gA} = f_T. \quad (4.4)$$

F жиілігінде дифференциалдық күшейту коэффициентінің модулі $|A_D|=1$ болады. (4.4) өрнегінен көрініп тұрғандай, f_T жиілігі күшейту коэффициенті мен жолақ енінің көбейтіндісіне тең [3, 10].



4.3-сурет. Операциялық күшейткіштің жиілік сипаттамасы:

- 1 – кері байланыссыз (ОС жоқ);
- 2 – кері байланыспен (ОС бар)

Кіріс кедергісі

Нақты операциялық күшейткіштердің кіріс кедергісінің шекті мәні болады. Кіріс кедергісі дифференциалды сигнал үшін және синфазалық сигнал үшін ерекшеленеді.

Биполярлы транзисторлармен жасалған операциялық күшейткіштерде:

- Дифференциалды сигнал үшін кіріс кедергісі r_D бірнеше мегаомды құрайды
- Синфазалық сигнал үшін кіріс кедергісі r_{GI} бірнеше гигаомға жетеді

Бұл кедергілер арқылы анықталатын кіріс токтарының мәні бірнеше наноампер шамасында болады.

Тұрақты кіріс токтары операциялық күшейткіш кірістері арқылы ағып жатқан токтар әлдеқайда жоғары мәндерге ие:

- Стандартты биполярлы операциялық күшейткіштер үшін бастапқы кіріс тогы 20-200 нА аралығында болады
- Өріс транзисторларымен жасалған кіріс каскадтары бар операциялық күшейткіштерде бұл мән тек бірнеше наноамперді құрайды

4.1-кестеде кейбір операциялық күшейткіштердің параметрлері көрсетілген [15-25].

4.1-кесте. Операциялық күшейткіштердің параметрлері

ОУ	К В/мВ	Е см мВ	Ивх. нА	DIвх нА	Ксф дБ	Квп. мкВ/В	Ft МГц	V В/мкс	Удф В	U вых В	Еп В
140УД1А	0.9-4.0	7	5000	1500	-		-	-		+3.5-6	6.3
140УД1Б	2.-10.5	7	8000	1500	60		5	0.5		+8-6.3	12.6
K140УД1А	0.5-4.5	7	7000	2500							6.3
K140УД1Б	1.3-12.	7	9000	2500							12.6
K140УД1В		7	9000	2500							12.6
140УД2	35-150	5	700	200			2	0.12		10	12.6
140УД5А	0.8-4.0	7	800	200	60		8	3	1.5	+3.5-3	6
140УД5А	2.0-11	8	1000	200	60		14	6	1.5	+8-6	12
140УД5Б	1.4-7.0	5	3600	1500	80		8	3	1.5	+3.5-3	6
140УД5Б	3-17	5	5100	1500	80		14	6	1.5	+8-6	12
K140УД5А	0.5-	10	5000	1000	50		14	6	3	+6.5-5	12
K140УД5Б	1.0-	5	10000	5000	60		14	6	3	+6.5-5	12
140УД6А	70-	5	30	10	80	200	1	2.5		+12-10	15
140УД6Б	50-	8	50	15	70	200	1	2		+12-10	15
K140УД6	70-	10	30	10	70	200	0.35	-		+11-10	15
140УД7	45-	4.5	200	55	70	150	0.8	0.3	-	11.5	15
K140УД7	20-	6.0	500	200	70	150	0.8	0.3	24	10.5	15
153УД1	20-50	5	600	250	65		1	0.06	5	10	15
K153УД1А	20-80	7.5	1500	500	65		1	0.2τ	5	10	15
153УД2	50-	5	500	200	70		1	0.5τ	30	11	15
K153УД2	20-	7.5	1500	500	65			0.5τ	4.5	10	15
153УД3	25-	2	200	50	80	100дБ	1	0.2τ	5	10	15
153УД4	5-	5	400	150	70		0.7	0.12	3.5	4	6
153УД5А	1000-	1	100	20	110	20	0.2	0.01	5	10	15
153УД5Б	1000-	1	100	20	100	20	-	-	5	10	15
K153УД5	400-	2.5	125	30	94	35	0.2	0.01	4.5	10	15
K157УД4А	50-	3	500	150				0.5		13	15
K157УД4Б	50-	3	500	150				0.5		13	15
K544УД1А	50-	30	0.15	0.05	64	300	1	2	10	10	15
K544УД1Б	20-	50	1	0.5	64	300	1	2	10	10	15
K544УД1В	20-	50	1	0.5	64	300	1	5	10	10	15
K544УД2А	20-	30	0.1	0.1	70	300	15	20	10	10	15
K544УД2Б	10-	50	0.5	0.5	70	300	15	20	10	10	15
K544УД2В	20-	50	1	1	70	300	15	10	10	10	15
K544УД2Г	20-	10	0.1		70	300	15	10	10	10	15

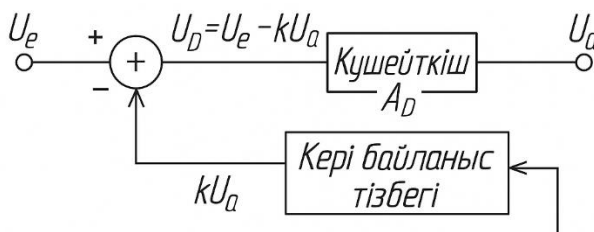
4.1-кестенің жалғасы

ОУ	К В/мВ	Е см мВ	I _{вх.} нА	D I _{вх} нА	Ксф дб	Квп. мкВ/В	Ft МГц	V В/мкС	Удф В	U _{вых} В	Еп В
К544УД3А	200-	2	0.05		86	50	1	5		12	15
К544УД3Б	100-	5	0.1		80	100	1	3		12	15
КР1005УД1	30-	5	300	150	70	150	0.5	0.3	10	11.5	15
КФ1032УД1	25-	5	50	20			1			0.7	1.2
КР1040УД1	25-	7	250	50	65				13		15
К1040УД2	1-	50	2500	250	60				+22	+22.5	+24
КФ1053УД2	25-	7	250	50	70				3	3	+5
КФ1053УД3	25-	7	250	50	70				3	3	+5
К1401УД1	2-	5	150				2.5	0.5		12.5	+15
1408УД2А	50-	5	200	50	70	150	0.55	0.3		11.5	15
1408УД2Б	50-	5	200	50	70	150	0.55	0.3		11.5	15
КР1408УД2А		3	80	30	70	150	0.5	0.3		11.5	15
КР1408УД2Б		6	200	50	70	150	0.5	0.3		11.5	15

Сондай-ақ арнайы операциялық күшейткіштер бар, олар арнайы қолдану жағдайларына арналған, мысалы, аз ығысу кернеуі бар күшейткіштер немесе сигнал жоқ кезде кіру тогы аз күшейткіштер.

Теріс кері байланыс принципі

Операциялық күшейткіштің теріс кері байланысын енгізу принципі 4.4-суретте көрсетілген. Шығыс кернеуінің бір бөлігі кері байланыс тізбегі арқылы күшейткіш кірісіне қайтарылады. Егер кері байланыс кернеуі кіріс кернеуінен алынып тасталса, онда бұл теріс кері байланыс деп аталады. Ал егер ол кіріс кернеуіне қосылатын болса, онда бұл оң кері байланыс болады. Бұл жерде біз тек теріс кері байланысты (ТКБ) қарастырамыз.



4.4-сурет. Теріс кері байланыс принципі

4.4-суреттегі сұлба автоматты басқару жүйесінің ең қарапайым элементінің құрылымдық схемасын бейнелейді [7, 14].

Теріс кері байланыс қосылғанда шығыстағы кернеу келесі шамаға теңеседі:

$$U_a = A_D U_D = A_D (U_e - k U_a).$$

Бұл теңдеуді A -ға қарағанда шешсек, мынаны аламыз:

$$A = U_a / U_e = A_D / (1 + k A_D). \quad (4.5)$$

Егер $k A_D \gg 1$ болса, кері байланыспен қамтылған күшейткіштің күшейту коэффициенті мынаған тең болады:

$$A \approx 1 / k. \quad (4.6)$$

Бұл қатынастан шығатыны, кері байланысты күшейткіштің A күшейту коэффициенті $A_D \gg 1$ болған жағдайда тек кері байланыспен анықталады және күшейткіштің өз параметрлеріне тәуелді емес.

Қарапайым жағдайда кері байланыс тізбегі кернеу бөлгіші ретінде жұмыс істейді. Бұл жағдайда 4.4-суретте көрсетілген схема сызықты күшейткіш ретінде әрекет етеді, оның күшейту коэффициенті тек кері байланыс тізбегінің коэффициентімен анықталады.

Егер кері байланыс тізбегі ретінде LC-тізбегі қолданылса, онда активті сүзгі құрылады. Соңында, кері байланыс тізбегінде диодтар немесе транзисторлар сияқты сызықты емес элементтерді қолдану арқылы есептеуіш

техникада қолданылатын операциялық күшейткіштердің сызықты емес қосылыстарын алуға болады.

(4.5) формуласынан көрініп тұрғандай, идеалды катынастан ауытқу бірліктен ауытқу шамасымен анықталады.

$$g = kA_D \approx A_D / A, \quad (4.7)$$

Ол шынжырлы күшейту коэффициенті деп аталады. Бұл термин автоматты реттеу теориясынан алынған [7]. Операциялық күшейткіштің шығыс кернеуі $kU_a \approx U_e$ катынасы орындалатындай етіп орнатылады. Бұл шаманың дәлдігі шынжырлы күшейту коэффициенті g арқылы анықталады (4.3-суретті қараңыз).

Кері байланыспен қамтылған күшейткіш үшін күшейту коэффициенті мен жолақ енінің көбейтіндісі, кері байланыссыз операциялық күшейткіштің бірлік күшейту жиілігіне тең болады.

$$f_g A = f_{gA} A_D = f_T. \quad (4.8)$$

Инвертімейтін күшейткіш

Кері байланыс тізбегі ретінде жайырақ кернеу бөлгішін қолданып, операциялық күшейткіштің дифференциалды кірістері арқылы кернеулерді азайту операциясын жүргізсек, 4.5-суретте көрсетілген – кері байланыспен қамтылған инвертімейтін күшейткіштің негізгі схемасы алынады. Кері байланыс коэффициенті k мынаған тең: $R_1/(R_1 + R_N)$ [3-5, 9-12].

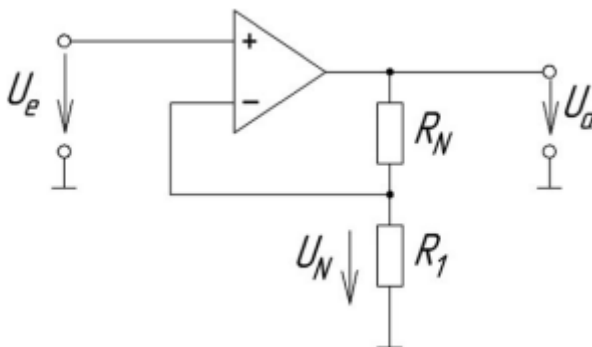
Операциялық күшейткіштің идеалды сипаттамаларын ескере отырып, күшейту коэффициенті мына формуламен анықталады:

$$A = U_a / U_e = 1 / k = 1 + (R_N / R_1). \quad (4.9)$$

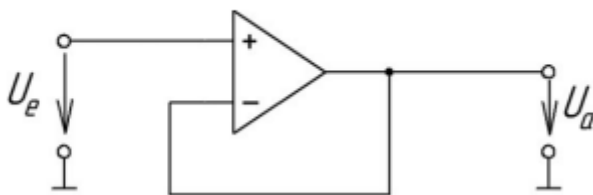
Нақты операциялық күшейткішті қолданған кезде кернеулерді азайту операциясы идеалды емес жүреді, себебі синфазалық сигналды әлсірету коэффициентінің мәні шектеулі болады.

Инвертімейтін күшейткіштің маңызды ерекше жағдайы – $k = 1$ болған кез, яғни $R_N = 0$ және $R_1 = \infty$. Мұндай

күшейткіштің схемасы 4.6-суретте көрсетілген, ал оның күшейту коэффициенті 1-ге тең. Операциялық күшейткіштің осындай қосылу схемасы «іздегіш» (слеящая) схема деп аталады.



4.5-сурет. Фазасын өзгертпейтін күшейткіш



4.6-сурет. Бақылау схемасы ($A=U_a/U_e=1$)

Кері байланыс әсерінен ОЖ-мен күшейткіштің дифференциалды кіріс кедергісі g коэффициентіне көбейтіледі.

Мұндай кері байланыс потенциометриялық деп аталады. Нәтижелік кіріс кедергісі үшін [10] деп анықталады.

$$r_e = \Delta U_e / \Delta I_e = gr_D || r_{Gl} \approx r_{Gl}. \quad (4.10)$$

Бұл шама тіпті кірістерінде биполярлы транзисторлары бар операциялық күшейткіштер үшін де 10^9 Ом-дан асып түседі. Дегенмен, бұл жерде тек дифференциалды шама

туралы айтылатынын ескеру керек. Яғни, ΔI_e токтың өзгерісі өте аз болса да, кіріс тогының орташа мәні I_B әлдеқайда жоғары мәндерге ие болуы мүмкін.

Схема параметрлерінің арақатынасын сандық мысал арқылы түсіндіруге болады. Мысалы, $R_g = 1 \text{ МОм}$ ішкі кедергісі бар сигнал көзі бар делік. Сонымен қатар, күшейткіштің ақырлы кіріс кедергісі әсерінен пайда болатын қатенің **0,1%**-дан аспауы талап етілсін. Онда күшейткіштің кіріс кедергісіне қойылатын талапты келесідей жазуға болады:

$$r_e \approx r_{gl} \geq 1 \text{ ГОм.}$$

Кіріс кедергісі, 4.1-кестедегі мәліметтерге сәйкес, операциялық күшейткіштердің көптеген түрлерін қолдану арқылы қол жеткізуге болады. Дегенмен, сигнал жоқ кездегі кіріс тогы $I_B = 200 \text{ нА}$ болса, сигнал көзі арқылы ағын кезінде ол қосымша $\sim 200 \text{ мВ}$ кернеудің төмендеуін тудырады. Принципти түрде бұл кернеудің төмендеуін операциялық күшейткіштің кері байланыс тізбегіндегі кернеу бөлгішінің ішкі кедергісін R_g мөлшеріне тең етіп таңдау арқылы компенсациялауға болады. Бұл ретте тек күшейткіштің кіріс токтарының айырмашылығының әсері ғана қалады. Дегенмен, бұл әдіс сирек қалаған нәтижеге әкеледі, себебі жиі сигнал көзінің ішкі кедергісі алдын ала дәл белгісіз болады. Сондықтан, 50 кОм -нан жоғары кедергісі бар сигнал көздері болған кезде, кірісіне жалғыз өрістік транзисторлар қолданылған операциялық күшейткіштерді пайдалану тиімдірек. Бұл шешім сонымен қатар тиімді, себебі жалғыз өрістік транзисторлармен жабдықталған операциялық күшейткіштер жоғары кедергілі сигнал көзімен жұмыс істегенде шуға қатысты жақсы сипаттамаларға ие болады.

Шығыс кедергісі

4.1-кестеде көрсетілгендей, нақты операциялық күшейткіштер шығыс кедергісі жағынан идеалдан

айтарлықтай алшақ. Дегенмен, кері байланыс қолдану арқылы оны айтарлықтай төмендетуге болады:

$$r'_a = r_a / (1 + kA_D) \approx r_a / g. \quad (4.10)$$

Күшейту коэффициенті $A = 10$ және дифференциалдық күшейту коэффициенті

$A_D = 10^5$ болған жағдайда, кері байланыс қосылған операциялық күшейткіштің шығыс кедергісі **1 кОм-нан 0,1 Ом-ға дейін** төмендейді.

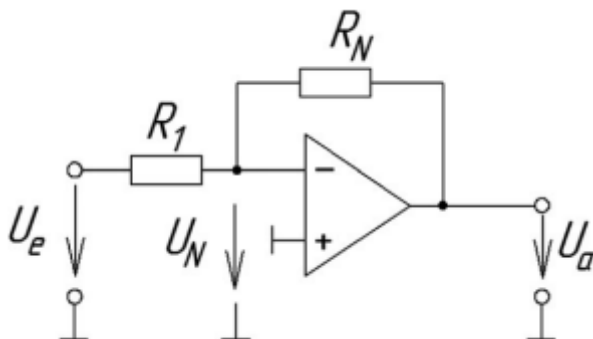
Жоғарыда айтылғандар, жалпы алғанда, операциялық күшейткіштің жұмыс жиілік диапазонында ($f_g A$ жиілігіне дейін) дұрыс болып табылады, бұл шығыс сигналының деңгейі **3 дБ-ға** төмендеуіне сәйкес келеді. Жоғары жиіліктерде кері байланыстың шамасы $|g|$ азайғандықтан, операциялық күшейткіштің шығыс кедергісі өседі. Сонымен қатар, ол индуктивтік сипат алып, жоғары жиіліктерде кері байланыссыз күшейткіштің шығыс кедергісіне тең болады **[3, 10]**.

$A=10$ күшейту коэффициенті мен $A_D=10^5$ дифференциалдық күшейту коэффициенті көрсетілген кезде, кері байланыс қосылған операциялық күшейткіштің шығыс кедергісі **1 кОм-нан 0,1 Ом-ға дейін** азаяды.

Бұл тұжырымдар, жалпы айтқанда, операциялық күшейткіштің жұмыс істейтін жиілік диапазонында ($f_g A$ жиілігі шегінде) дұрыс болып саналады, бұл шығыс сигналының деңгейінің **3 дБ-ға** төмендеуіне сәйкес келеді. Жоғары жиіліктерде $|g|$ шамасының азаюына байланысты кері байланыс қосылған операциялық күшейткіштің шығыс кедергісі артады. Сонымен қатар, ол индуктивтік қасиетке ие болып, жоғары жиіліктерде кері байланыссыз күшейткіштің шығыс кедергісіне тең болады **[3, 10]**.

$$U_N = [R_N / (R_N + R_1)] U_e,$$

Бірінші уақыт мезетінде шығыс кернеуі U_a әлі нөлге тең болғандықтан, $U_D = U_P - U_N$ кернеуі теріс мәнге ие болады. АР күшейту коэффициентінің жоғарылығы себебі, шығыс кернеуі тез арада белгілі бір теріс мәнге орналасады. Бұл ретте U_N кернеуі де азая бастайды. Шығыс кернеуі, күшейткіштің кіріс кернеуі U_N нөлге жуықтайынша, азаюын жалғастырады.



4.7-сурет. Инверциялайтын күшейткіш ($A=U_a/U_e = -R_N/R_1$)

Шығыс кернеуінің тұрақты мәнін есептеу үшін ($U_N \approx 0$ болған кезде), операциялық күшейткіштің N-кіресінің түйін нүктесі үшін Кирхгофтың бірінші заңын жазамыз. Идеалды операциялық күшейткіште кіріс тогы нөлге тең екенін ескере отырып:

$$U_e / R_1 + U_a / R_N \approx 0.$$

$$U_a \approx -(R_N / R_1) U_e. \quad (4.11)$$

Бұл схемадағы теріс кері байланыстың әрекет принципін келесідей тұжырымдауға болады: сызықтық аймақ шегінде операциялық күшейткіш шығыс кернеуінің мөлшерін

$U_N \approx 0$ болатындай етіп реттейді. Осылайша, N-кіресі нөлдік потенциал нүктесіне ұқсас болып табылады,

сондықтан оны виртуалды жер нүктесі немесе қосу нүктесі деп те атайды [10].

Инверцияламайтын күшейткіш схемасынан айырмашылығы, бұл жағдайда синфазалы сигналдың күшейту коэффициенті ешқандай рөл атқармайды, ал шығыс кернеуінің фазасы кіріс кернеуінің фазасына қарама-қарсы болады.

Инверциялайтын күшейткіштің кіріс кедергісі операциялық күшейткіштің өз кіріс кедергісінен айтарлықтай төмен болады. Оны 4.7-суреттегі схеманы $U_N \approx 0$ деп есептеп қарау арқылы анықтауға болады.

Нәтижесінде келесі өрнек шығады [3, 10]:

$$r_e \approx R_1.$$

Шығару схемасы

Суретте 4.8-де көрсетілген сигналдарды азайту схемасы басқа принципке негізделген. Ол үшін мынадай теңдеу дұрыс болады:

$$U_a = k_1 U_1 + k_2 U_2.$$

$U_2 = 0$ болғанда, схема U_1 сигналын инверттейтін күшейткіш ретінде жұмыс істейді, оның шығыс кернеуі $U_a = -\alpha N U_1$ болады. Бұдан $k_1 = -\alpha N$ екені шығады. $U_1 = 0$ болғанда, схема кернеу бөлгіші бар электромтрлік күшейткіш болады:

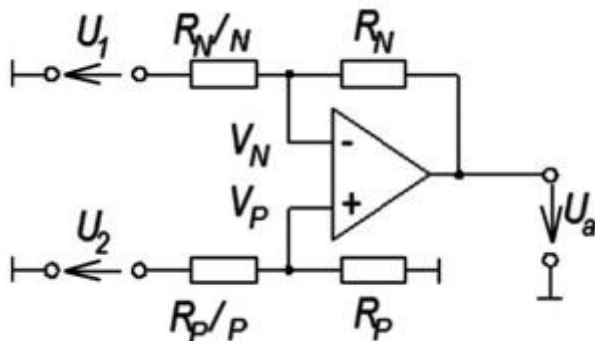
$$U_a = (U_2 - U_1).$$

Потенциал

$$V_P = \frac{R_P}{R_P + R_P / \alpha_P} U_2$$

Бұл жағдайда сигнал $(1 + \alpha N)$ есе күшейеді, ал шығыс кернеуі мына формуламен анықталады [3, 10]:

$$U_a = [\alpha_P / (1 + \alpha_P)] (1 + \alpha_N) U_2.$$



4.8-сурет. Бір операциялық күшейткіште жасалған шегеру схемасы

Егер екі кірістегі кедергілер бірдей болса, яғни $\alpha N = \alpha P = \alpha$ болса, онда шығыс кернеуі

$$U_a = \alpha U_2$$

Сонымен қатар, $k_2 = \alpha$ болады. Бұдан шығыс кернеуі

$$U_a = \alpha(U_2 - U_1).$$

мынаған тең болады:

Егер P және N кірістеріндегі кедергілер қатынасы берілген шамадан өзгеше болса, онда қарастырылып отырған схеманың шығыс кернеуі кіріс сигналдарының айырмасына дәл пропорционал болмайды, ал ол мына қатынас арқылы анықталады:

$$U_a = [(1 + \alpha_N) / (1 + \alpha_P)] \alpha_P U_2 - \alpha_N U_1.$$

Жоғары кіріс кедергісі бар дифференциалдау схемасы

4.9-суретте жоғары кіріс кедергісі бар операциялық күшейткішпен жасалған дифференциалдау схемасының мысалы келтірілген. Бұл схема үшін шығыс кернеуі

$$U_a = RC(dU_e / dt).$$

Толық кіріс кедергісі

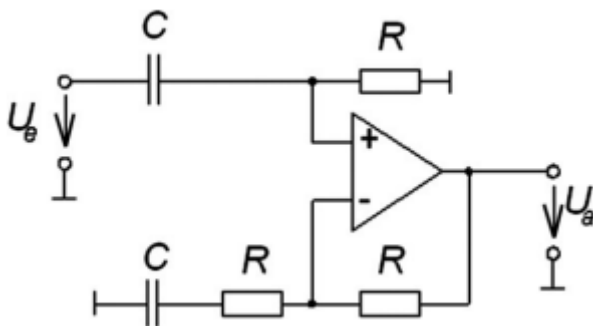
$$|Z_e| \geq R.$$

Бұл схеманың жұмыс принципі мынадай:

1. Айнымалы төмен жиілікті кіріс кернеуі кіріс RC тізбегінде дифференциалданады. Бұл жиілік аймағында операциялық күшейткіш $A = 1$ күшейту коэффициенті бар электрометрлік күшейткіш ретінде жұмыс істейді.

2. Жоғары жиілікті айнымалы кіріс кернеуі кіріс RC тізбегін толық өтіп, теріс кері байланыс арқылы қамтылған күшейткіш арқылы дифференциалданады. Егер бұл RC тізбектердің уақыт тұрақтылары жеткілікті үлкен болса, онда төмен және жоғары жиіліктердегі сигналдарды дифференциалдау аймақтары қиылысады.

Тұрақтылықты қамтамасыз етуге келетін болсақ, онда бұл жағдайда алдыңғы схемада қолданылған шараларды қабылдауға болады.



4.9-сурет. Жоғары кіріс кедергісі бар дифференциалдау схемасы

Интегратор схемасы

Жалпы жағдайда интегратор мына өрнекпен сипатталады:

$$U_a(t) = K \int_0^t U_e(\tilde{t}) d\tilde{t} + U_a(t=0).$$

Операциялық күшейткішке құрылған интегратор схемасы 4.10-суретте көрсетілген [3,10]. Бұл интегратор инверттейтін күшейткіш негізінде жасалған, онда R_N кері байланыс резисторы C конденсаторымен алмастырылған. Бұл жағдайда шығыс кернеуі мына өрнекпен сипатталады:

$$U_a = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \left[\int_0^t I_C(\tilde{t}) d\tilde{t} + Q_0 \right],$$

мұндағы Q_0 – интеграция басталған сәтте ($t = 0$) конденсаторда болған заряд мөлшері. $I_C = -U_e/R$ екенін ескере отырып, **мынаны жазуға болады:**

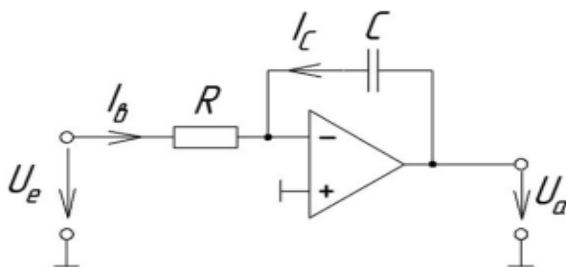
$$U_a = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_e(\tilde{t}) d\tilde{t} + U_{a0}.$$

U_0 тұрақты мүшесі интеграцияның бастапқы шартын анықтайды:

$U_0 = U_a(t=0) = Q_0/C$. Арнайы әдістер қолданып, кез келген бастапқы шарттарды жүзеге асыруға болады.

$$U_a = -(U_e / RC) t + U_{a0},$$

яғни шығыс сигналы уақыт өте келе сызықты түрде өседі. Сондықтан қарастырылған схема араша тәрізді кернеу қалыптастыру үшін қолайлы болады.



4.10-сурет. Инверттейтін интегратор

Егер кіріс сигналы косинусоидалық заңға сәйкес өзгеретін айнымалы кернеу болса, яғни $u_e = U_e \cos \omega t$ болса, онда шығыс кернеуінің формуласы келесідей болады:

$$U_a(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t \hat{U}_e \cos \omega \tilde{t} d\tilde{t} + U_{a0} = -\frac{\hat{U}_e}{\omega RC} \sin \omega t + U_{a0}.$$

Бұл өрнектен көрініп тұрғандай, шығыс сигналының амплитудасы айналым жиілігі ω -ға кері пропорционал. Логарифмдік масштабтағы амплитуда-жиілік сипаттамасы

– 6 дБ/октава еңісі бар түзу сызық түрінде болады. Бұл схеманың интегратор екенін анықтауға мүмкіндік беретін қарапайым критерий болып табылады [3, 10].

4.3. Заряд күшейткіштері

Заряд күшейткіштері шығыс сигналы электр заряды болып табылатын датчиктермен жиі қолданылады. Бұл күшейткіштер ұзын қосылым кабельдерін пайдалануға мүмкіндік береді. Ал кернеу күшейткіші бар жүйелерде кабель ұзындығының өзгеруі жабдықтың күшейту коэффициентін реттеуді және жүйені қайта калибрлеуді талап етеді.

Заряд күшейткіші операциялық күшейткіш пен сыйымдылықты кері байланыстан тұрады. Кері байланыс

тізбегінде конденсаторы бар операциялық күшейткіш іс жүзінде кіріс тоғын интегралдайтын электронды интегратор болып табылады [3-5, 9-11] (4.10-суретті де қараңыз).

Пьезоэлектрлік датчикке қосылған заряд күшейткішінің эквиваленттік электр схемасы 4.11-суретте көрсетілген.

Схемадағы белгіленулер:

- $Q_{ПЭ}$ – пьезоэлемент беретін электр заряды
- $C_{ПЭ}$ – пьезоэлементтің сыйымдылығы
- $R_{ПЭ}$ – пьезоэлементтің кедергісі
- C_K – қосылым кабелі мен коннекторлардың

сыйымдылығы

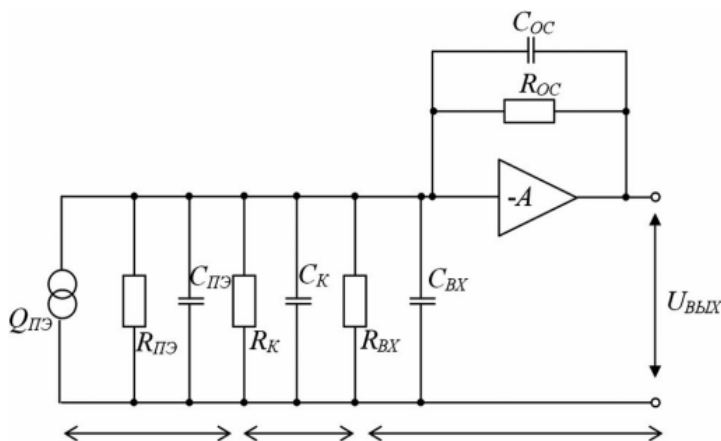
- R_K – қосылым кабелі мен коннекторлардың кедергісі
- $C_{ВХ}$ – алдын-ала күшейткіштің кіріс тізбегі

сыйымдылығы

- $R_{ВХ}$ – алдын-ала күшейткіштің кіріс тізбегі кедергісі
- $C_{ОС}$ – кері байланыс тізбегінің сыйымдылығы
- $R_{ОС}$ – кері байланыс тізбегінің кедергісі
- A – операциялық күшейткіштің күшейту

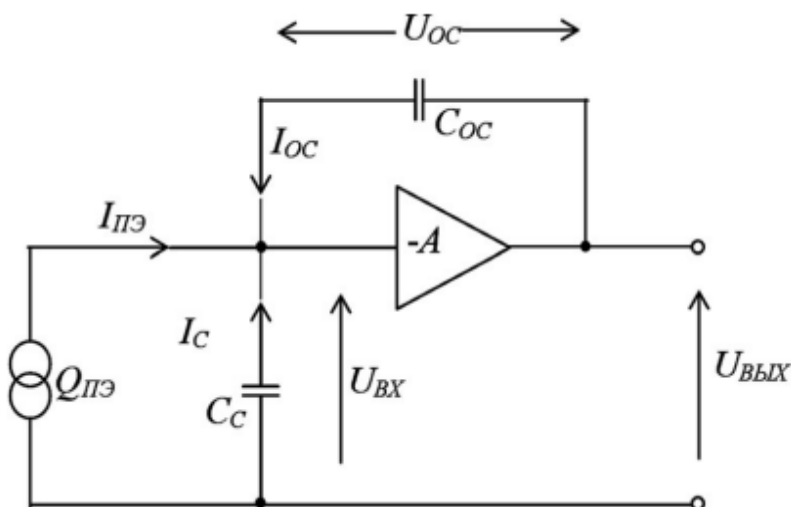
коэффициенті

- $U_{ВЫХ}$ – күшейткіштің шығыс кернеуі



Сурет. 4.11. Пьезоэлектрикалық сенсормен кабель арқылы жалғанған зарядты күшейткіштің эквиваленттік электр схемасы

Пьезоэлементтің, кіріс және кері байланыс тізбектерінің кедергілері әдетте жоғары мәндерге ие болады. Сондықтан, 4.11-суретте көрсетілген эквивалентті электр схемасын жеңілдетуге болады және оны 4.12-суретте келтірілген түрде көрсетуге болады.



Сурет 4.12. Пьезоэлементпен кабель арқылы жалғанған заряд күшейткішінің жеңілдетілген эквиваленттік электр схемасы

Бұл суретте:

$$C_C = C_{ПЭ} + C_K + C_{ВХ},$$

мұндағы:

- $I_{ПЭ}$ – пьезоэлемент бөліп шығаратын зарядтан туындайтын жалпы ток;
- I_C – C_C көзінен алынатын ток;
- I_{OC} – операциялық күшейткіштің кері байланыс тізбегіндегі ток.

Күшейткіштің кіріс және шығыс кернеулері ($U_{кір}$ және $U_{шық}$) өзара мына өрнекпен байланысқан:

$$V_{BЫX} = -AU_{BX}.$$

V_{OC} кернеуі үшін мына өрнекті жазуға болады:

$$U_{OC} = U_{BЫX} - U_{BX} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) U_{BЫX}.$$

Идеалды операциялық күшейткіштің кіріс тогы нөлге тең. 4.12-суретте көрсетілген токтар Кирхгоф заңы бойынша мына теңдеу арқылы байланысқан:

$$I_{ПЭ} + I_C + I_{OC} = 0.$$

4.2-суретте көрсетілген эквиваленттік схеманың басқа параметрлерін ескере отырып, $I_{ПЭ}$, I_C және I_{OC} токтары үшін келесі өрнектерді жазуға болады:

$$I_{ПЭ} = \frac{dQ_{ПЭ}}{dt};$$

$$I_{OC} = C_{OC} \frac{dU_{OC}}{dt} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) C_{OC} \frac{dU_{BЫX}}{dt};$$

$$I_C = -C_C \frac{dU_{BЫX}}{dt} = \frac{1}{A} C_C \frac{dU_{BЫX}}{dt}.$$

Бұл өрнектерді жоғарыда келтірілген Кирхгоф теңдеуіне қойғаннан кейін мына өрнек алынады:

$$\frac{dQ_{ПЭ}}{dt} = -\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_{OC} \frac{dU_{BЫX}}{dt} - \frac{1}{A} C_C \frac{dU_{BЫX}}{dt}. \quad (4.12)$$

Бұл дифференциалдық теңдеудің шешімін интегралдау арқылы алуға болады. Операциялық күшейткіштің шығысындағы тұрақты ток кернеулеріне сәйкес келетін тұрақты шамалар нөлге тең деп қабылданады. Бұл толықтай

негізделген, себебі операциялық күшейткіштің белсенді жұмыс істеуі кезінде кез келген ығысу кернеулері тез арада нөлге дейін азаяды. Сондықтан, аталған теңдеудің шешімін келесі түрде көрсетуге болады:

$$U_{ВЫХ} = - \frac{Q_{ПЭ}}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_{ОС} + \frac{1}{A} C_C}. \quad (4.13)$$

Жоғары күшейту коэффициентінің үлкен мәнін ескере отырып ($A \approx 10^5$), (4.13) өрнегі жеңілдетіліп, келесі түрге ие болады:

$$U_{ВЫХ} \approx \frac{Q_{ПЭ}}{C_{ОС}}. \quad (4.14)$$

(4.14) өрнегінен келесідей қорытынды шығады: күшейткіштің шығыс кернеуі кіріс зарядына пропорционал және кері байланыс тізбегінің сыйымдылығына кері пропорционал болады.

Күшейткіштің кіріс эквиваленттік сыйымдылығы шығыс сигнал кернеуіне әсер етпейді, себебі идеалды жағдайда $A \rightarrow \infty$ болғанда кіріс кернеуі нөлге тең болады.

Демек, эквиваленттік кіріс кедергісі күшейткіштің шығыс сигнал кернеуіне әсер етпейді. Бұл күшейткіштің кірісінде тек пьезоэлементтен және операциялық күшейткіштің кері байланыс тізбегіндегі конденсатордан келетін токтар бар екенін білдіреді. Бұл токтардың амплитудалары бірдей, бірақ таңбалары қарама-қарсы. Сондықтан, датчик берген барлық электр заряды операциялық күшейткіштің кері байланыс тізбегіндегі конденсаторға беріледі.

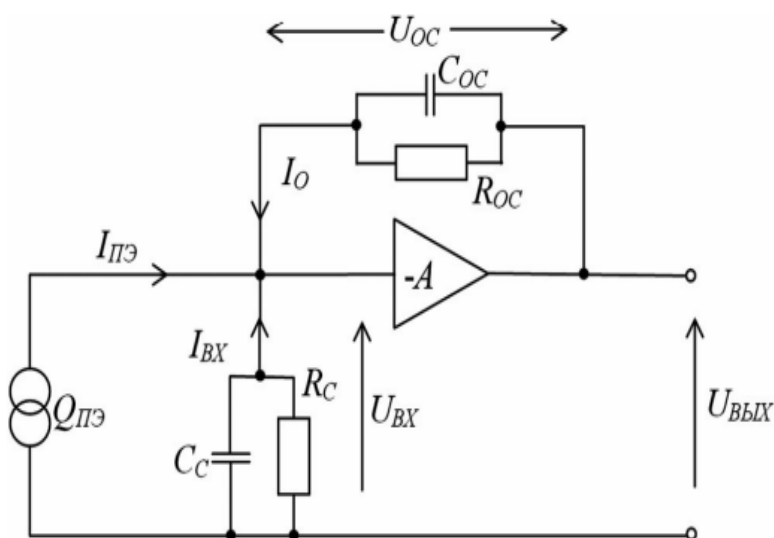
Нақты өлшеу жағдайларын ескере отырып, $R_{ПЭ}$, R_K және $R_{ВХ}$ кедергілерін есепке алатын күрделірек үлгіні қарастыру қажет (4.13-сурет).

Бұл схема үшін келесі теңдеулерді жазуға болады:

$$\frac{1}{R_C} = \frac{1}{R_{ПЭ}} + \frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_{БХ}};$$

$$U_{БХ} = -AU_{БХ};$$

$$U_{OC} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) U_{БХ};$$



4.13-сурет. Пьезоэлемент датчик кабелімен жалғанған зарядты күшейткіштің эквиваленттік электр схемасы

$$I_{OC} = C_{OC} \frac{dU_{OC}}{dt} + \frac{U_{OC}}{R_{OC}} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) \left[C_{OC} \frac{dU_{BЫX}}{dt} + \frac{U_{BЫX}}{R_{OC}} \right];$$

$$I_{BX} = -C_C \frac{dU_{BX}}{dt} - \frac{U_{BX}}{R_C} = \frac{1}{A} \left[C_C \frac{dU_{BЫX}}{dt} + \frac{U_{BЫX}}{R_C} \right];$$

$$\frac{dQ_{ПЭ}}{dt} = -\left(1 + \frac{1}{A}\right) \left[C_{OC} \frac{dU_{BЫX}}{dt} + \frac{U_{BЫX}}{R_{OC}} \right] - \frac{1}{A} \left[C_C \frac{dU_{BЫX}}{dt} + \frac{U_{BЫX}}{R_C} \right]. \quad (4.15)$$

(4.15) дифференциалдық теңдеуінің шешімін жай интегралдау арқылы табу мүмкін емес. Дегенмен, барлық ток пен кернеудің амплитудалары уақыт бойынша гармоникалық заң бойынша өзгереді деп есептесек және операциялық күшейткіштің шығысындағы тұрақты ток кернеулеріне сәйкес келетін тұрақты шамалар нөлге тең деп алсақ, бұл теңдеудің шешімін табуға болады. Соңғы болжам операциялық күшейткіштің белсенді жұмыс істеуі кезінде әртүрлі ығысу кернеулері тез арада нөлге дейін төмендейтіндіктен толықтай қабылданады.

Сондықтан, (4.15) дифференциалдық теңдеуінің шешімін [16] келесі түрде көрсетуге болады:

$$j\omega Q_{ПЭ} = -\left(1 + \frac{1}{A}\right) \left[j\omega U_{BЫX} C_{OC} + \frac{U_{BЫX}}{R_{OC}} \right] - \frac{1}{A} \left[j\omega U_{BЫX} C_C + \frac{U_{BЫX}}{R_C} \right]. \quad (4.16)$$

Бұл теңдеуді қарапайым түрлендіру арқылы күшейткіштің шығыс кернеуі $U_{шығыс}$ үшін өрнек алуға болады, яғни:

$$U_{ВЫХ} = - \frac{Q_{ПЭ}}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) \left(C_{OC} + \frac{1}{j\omega R_{OC}}\right) + \frac{1}{A} \left(C_C + \frac{1}{j\omega R_C}\right)}. \quad (4.17)$$

Полагая, что $A \rightarrow \infty$ и $R_C \rightarrow \infty$, получим:

$$U_{ВЫХ} \approx \frac{Q_{ПЭ}}{C_{OC}}. \quad (4.18)$$

RC-ның шекті мәнін ескере отырып

$$U_{ВЫХ} = - \frac{Q_{ПЭ}}{C_{OC} \left(1 + \frac{1}{j\omega R_{OC} C_{OC}}\right)}. \quad (4.19)$$

Пьезоэлемент берілетін $Q_{ПЭ}$ электр заряды күшке (немесе үдеуге) пропорционал болғандықтан, пьезоэлемент пен күшейткіш жинағының жалпы сезімталдығын кері байланыс тізбегінің сыйымдылығын (C_{OC}) өзгерту арқылы басқаруға болады. Сонымен қатар, кері байланыс тізбегінің уақыт тұрақтысын реттеу арқылы күшейткіштің амплитуда-жиілік сипаттамасын төмен жиіліктер аймағында басқаруға болады [13].

Заряд күшейткішінің төмен жиіліктер аймағындағы амплитуда-жиілік сипаттамасы кері байланыс тізбегінің уақыт тұрақтысы $\tau_{OC} = R_{OC} C_{OC}$ арқылы анықталады және алдыңғы күшейткіштің кіріс жүктемесіне мүлдем тәуелді емес. Заряд күшейткішінің төмен жиілік шегі (кесу жиілігі) кері байланыс тізбегінің кедергісін реттеу арқылы реттеледі.

Осылай анықталған жиілік төмен жиілік шегі (немесе кесу жиілігі) деп аталады және амплитуда-жиілік сипаттамасының төмендеуіне, демек шығыс сигналы деңгейінің 3дБ-ге төмендеуіне және фазалық бұрыш мәнінің 45°-қа өзгеруіне сәйкес келеді.

Осылайша, заряд күшейткішінің төмен жиілік шегі операциялық күшейткіштің кері байланыс тізбегінің уақыт тұрақтысымен анықталады, яғни $\tau_{OC} = R_{OC} C_{OC}$. Кіріс және шығыс сигналдарының фазалар айырмашылығы әдетте 180° -ті құрайды (алдыңғы күшейткіш фазаны өзгертетін құрылғы болып табылады), ал төмен жиілік шегінде қосымша 45° фазалық ығысу болады.

(4.17) өрнегінен шығатыны, заряд күшейткішінің кіріс кедергілік жүктемесі төмен жиілік шегінің мәніне R_{OC} / A мәнімен салыстырмалы болғанша әсер етпейді. Демек, C_{OC} және C_C сыйымдылықтарының мәндері бір-біріне жақын деп болжағанда, жүктеме кедергісінің әсері заряд күшейткішін қолданғанда қарапайым кедергілі-сыйымдылықты тізбекке қарағанда A есе аз болады.

Мысалы, 1 Гц ($A = 105$, $C_{OC} = 1$ нФ) төмен жиілік шегін қамтамасыз ету үшін:

$$R_{OC} \approx 1,6 \text{ кОм.}$$

Заряд күшейткіштерінің төмен жиілік шегі бірнеше герцтің бөлшектері ретінде болады. Бұл күшейткіштерге тән төмен жиілікті сигналдарды өңдеу қабілеті ұзақ импульстік және квазистатикалық механикалық шамаларды зерттеу кезінде өте маңызды.

Заряд күшейткішінің күшейту коэффициенті қосылым кабелінің сыйымдылығы өзгерген кезде іс жүзінде өзгермейді. Ұзын қосылым кабельдерін қолдану жоғары жиіліктер аймағында амплитуда-жиілік сипаттамасының аздап төмендеуіне әкеледі [16].

Қосылым кабелінің максималды ұзындығын осыны қолдану нәтижесінде акселерометр мен заряд күшейткіші жинағының заряд бойынша жалпы сезімталдығы 1%-дан аспайтын өзгеріске ұшырайтындай етіп оңай анықтауға болады.

$C_{OC} = C_{пэ} = 1$ нФ және операциялық күшейткіштің күшейту коэффициенті $A = 105$ деп болжағанда, $U_{вых}$ үшін берілген өрнектен...

$$U_{ВЫХ} = - \frac{Q_{ПЭ}}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_{OC} + \frac{1}{A} C_C}$$

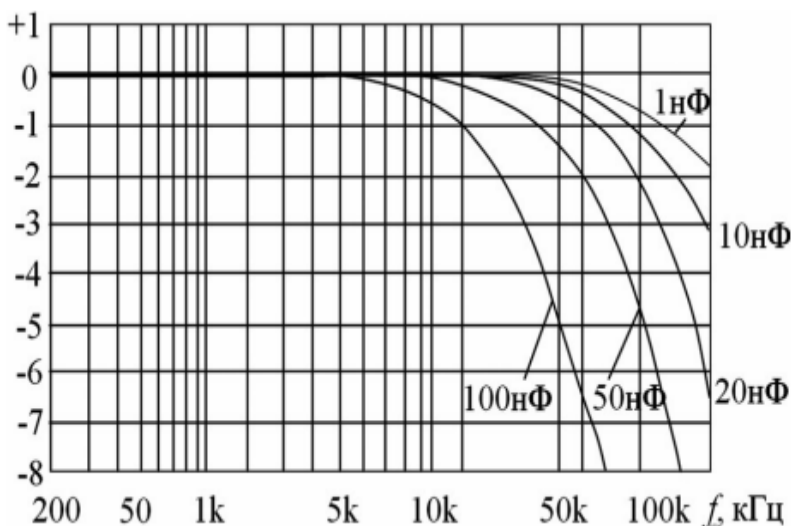
демек,

$$C_C = 0,01(A + 1) C_{OC} = 0,01 (10^5 + 1) 1 \text{ нФ} = 10^3 \text{ нФ} = 1 \text{ мкФ}.$$

Есептелген мән 100 пФ/м сыйымдылығы және 10000 м ұзындығы бар жалғау кабелінің жалпы сыйымдылығына сәйкес келеді.

Алдыңғы күшейтгіш кірісіндегі үлкен сыйымдылық жүктемесі оның амплитуда-жиілік сипаттамасына, әсіресе жоғары жиіліктер аймағына жататын бөлігіне әсер етуі мүмкін. Бұл әсер операциялық күшейткіштердің жоғары жиіліктер аймағында күшейту коэффициентінің төмендеуіне байланысты болуы мүмкін.

Параллель сыйымдылықтың ұлғаюы пьезодатчиктің зарядқа сезімталдығына іс жүзінде әсер етпесе де, тізбектей жалғанған конденсатордың қосылуы шығыстағы электр зарядының азаюына әкеледі. Алдыңғы күшейткіш кірісіне түсетін зарядтың азаюы үлкен амплитудалы механикалық тербелістерді зерттеу кезінде, әсіресе жоғары сезімталдықты акселерометр қолданылғанда, мақсатқа сай болуы мүмкін. Осы арқылы заряд күшейткішінің кіріс асып кетуінен сақтануға болады. Сондықтан, пьезоэлемент шығысына дәл таңдалған және мұқият анықталған сыйымдылықтары бар конденсаторларды тізбектей және параллель жалғау арқылы күшейткіш кірісіне түсетін электр зарядын әлсіретуге болады.



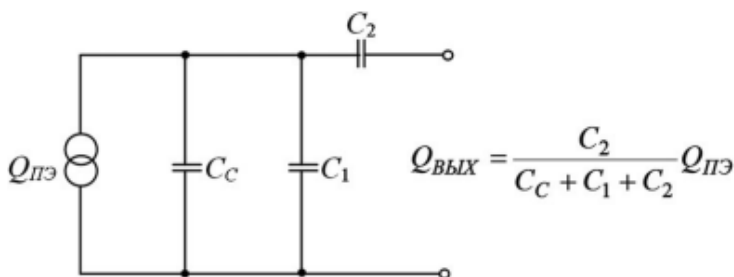
Сурет 4.14. Заряд күшейткішінің амплитуда-жиілік сипаттамасына кіріс сыйымдылық жүктемесінің әсері

4.15-суретте сипатталған сыйымдылықтың аттенюаторымен жалғанған акселерометрдің эквиваленттік электр схемасы көрсетілген [16].

Ұзын жалғау кабельдерін пайдалану және заряд күшейткішінің күшейту коэффициентінің төмен мәндері өздік шудың артуына, демек, сигнал-шудың жалпы қатынасының төмендеуіне әкеледі. Заряд күшейткішінің кіріс кедергісін айтарлықтай төмендету де өздік шудың артуына себеп болады [13].

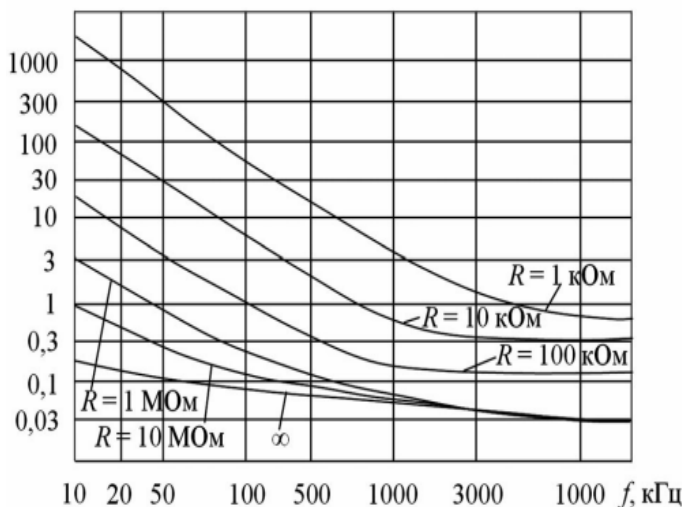
Атап айтқанда, механикалық тербелістерге ұшырайтын жалғау кабельдері электр шуын туғызады.

Төмен амплитудалы механикалық тербелістерді зерттеуде пайдаланылатын жүйелерде аз шулы кабельдерді қолдану өте маңызды. Қолданылатын жалғау кабельдері мықтап бекітілуі керек.



4.15-сурет. Акселерометрдің эквиваленттік электр схемасы

Төмен жиіліктер аймағында (<100 Гц) заряд күшейткішінің өздік шуы жиілікке кері пропорционал болады, яғни оның амплитудасы жиілік азайған сайын артады (4.16-сурет) [13]. Төмен жиіліктерде өздік шудың артуы операциялық күшейткіштердің қалаусыз қасиеті болып табылады. Мұндай шуды басу үшін жоғары жиіліктердің қосымша сүзгілерін қолдану тиімді әдіс болып табылады.



4.16-сурет. Заряд күшейткішінің тар жолақты ішкі шуының кіріс кедергісіне байланыстылығы

Брүль & Кьер (Brüel & Kjør) фирмасы шығаратын күшейткіштердің ішіндегі көпшілігі жоғары жиіліктер сүзгілерімен жабдықталған [13, 16].

Күшейткіштің кіріс кедергісін төмендету (шамамен 10 МОм-нан төмен мәндерге дейін) өзіндік шудың артуына әкеледі. Бұл шудың артуы ең алдымен төмен жиіліктер аймағында айқын байқалады. Дегенмен, бұл құбылыстың себептерін анықтау оңай емес, себебі кіріс каскадындағы схема элементтерінің параметрлері мен олардың қосылымдары туралы толық ақпарат қажет [13, 16].

4.4. Аналогты-сандық түрлендіргіштер

Белгілі болғандай [3-6, 9-11], аналогты шама деп уақыт бойынша үздіксіз өзгертін шама аталады. Датчиктер арқылы өлшенетін көптеген физикалық шамалар (температура, қысым, т.б.) аналогты сипатта болады.

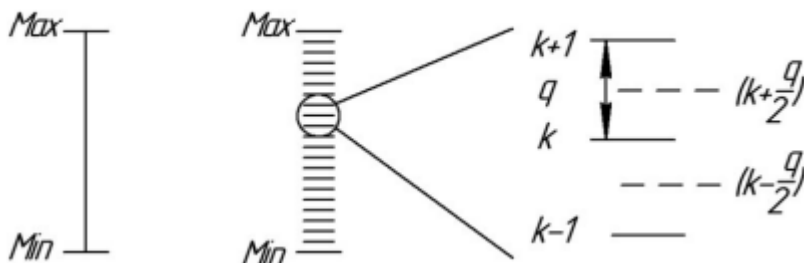
Аналогты сигналды сандық түрге түрлендіру үшін аналогты-сандық түрлендіргіштер (АЦП) кеңінен қолданылады [3-5, 9-11].

Аналогты (үздіксіз) сигналды сандық параметр ретінде шектеулі сандар санымен көрсетуге болады. Аналогты параметрді түрлендірудің бір әдісі – оны шекті шамалармен (кванттармен) шектеу [5]. Бұл процесс кванттау деп аталады. Кванттар саны аналогты параметрді қанша цифрмен көрсетуге байланысты анықталады. Көбінесе АЦП-лер екілік (бинарлық) сандарды пайдаланады. Осылайша, n -битті түрлендіргіш кіріс сигналының ең үлкен және ең кіші мәндері арасында 2^n кванттау деңгейіне ие болады (4.17-сурет) [5].

Кванттау деңгейлерінің саны толық шкала деп аталады. Толық шкаланың ажыратымдылық қабілеті $1/2^n$ ретінде анықталады. Мысалы, 10-битті түрлендіргіш үшін толық шкалада $2^{10} = 1024$ кванттау деңгейі болады. Ажыратымдылық қабілеті:

$$1/1024 \approx 0,098\%.$$

Түрлендіргіштің дәлдігі кіріс шамасының (сигналдың) өлшенген мәні мен шын мәні арасындағы ауытқуды сипаттайды.



4.17-сурет. Аналогтық сигналдың амплитудалық шкаласы, кванттау және кванттау қатесі

Кванттау қатесі – бұл кіріс сигналының мәні мен ең жақын кванттау деңгейі арасындағы айырмашылық. Кванттаудың максималды қатесі кванттау интервалының жартысына тең, яғни $q/2$ (4.17-сурет).

Осыған дейін біз аналогтық сигналдың амплитудасын сандық кодқа түрлендіру процесін қарастырдық. Енді осы процесті уақыт өлшемінде талдап көрейік.

Кіріс сигналы уақыт өте келе өзгереді, өйткені ол туралы толық ақпарат алу үшін оны белгілі бір уақыт аралығында немесе белгілі жиілікпен **дискреттеу** (таңдау іріктеу) қажет. **Котельников-Найквист теоремасы** бойынша, егер сигналдың жұмыс жиілік диапазоны f_i -пен шектелген болса, онда оны **ақпарат жоғалтпай** қалпына келтіру үшін сигналды $f_s \geq 2f_i$ жиілігімен (немесе $t_s \leq 1/2f_i$ уақыт аралығында) іріктеу керек. $f_s = 2f_i$ жиілігі **Найквист жиілігі** (дискреттеудің минималды рұқсат етілген жиілігі) деп аталады [5].

Сонымен, **аналогтық сигналды сандық пішінге түрлендіру үшін:**

1. Сигналды деңгей бойынша **кванттау**,

2. Оны дискреттеу жиілігі f_s кіріс сигналының жиілік диапазонынан кем дегенде **2 есе жоғары** болуы қажет.

АЦП-да қолданылатын сандық кодтар

Аналогтық сигналды кванттау кезінде қарапайым екілік кодты қолдануға болады. Дегенмен, бұл әдіс тек барлық кванттау деңгейлері оң болғанда ғана қолайлы. Тәжірибеде оң, теріс және нөлдік деңгейлері бар сигналдар жиі кездеседі. Мұндай жағдайларда кодтың ең маңызды биті (MSB) қолданылады, ол екілік кодтың полярлығын көрсетеді. Бірақ мұндай кодтауда нөлдің екі мәні болатынын атап өту керек: +0 (0000) және -0 (1000) [5].

Нөлдің осы анықталмағандығын жою үшін ең маңызды биті бар төрт биттік екілік код қолданылады, онда:

- 1 барлық оң кванттау деңгейлерін және нөлдік деңгейді білдіреді (1000),

- ал ең маңызды биттегі 0 барлық теріс деңгейлерді білдіреді.

Екілік толықтауыш коды микропроцессорларда оң және теріс сандарды көрсету үшін жиі қолданылады. Бұл әдіс екілік арифметика үшін, әсіресе азайту амалдары үшін өте ыңғайлы. Санды екілік толықтауыш кодқа ауыстыру өте оңай және жылдам, сондықтан бұл әдіс сандық электроникада кеңінен қолданылады. Екілік толықтауыш кодта:

- ең маңызды биттегі 0 барлық оң сандар мен нөлді білдіреді,

- ал 1 барлық теріс сандарды білдіреді.

Екілік-ондық код (BCD) да кеңінен қолданылады. Ондық санның әрбір цифры өз төрт биттік екілік эквивалентімен беріледі. Санның полярлығы ең маңызды битте көрсетіледі. Кейде екілік-ондық кодты 8421 BCD деп те атайды, себебі әрбір цифр төрт биттік кодтың салмағын білдіреді [4, 5, 10].

Excess 3 коды 8421 BCD кодтың өзгертілген нұсқасы болып табылады. Ол оң бүтін сандарды көрсету үшін

қолданылады және 8421 BDD кодтағы әрбір цифрға 3 санын (немесе 0011) қосу арқылы алынады.

4.2-кесте. Сандарды бейнелеу үшін қолданылатын екілік кодтар

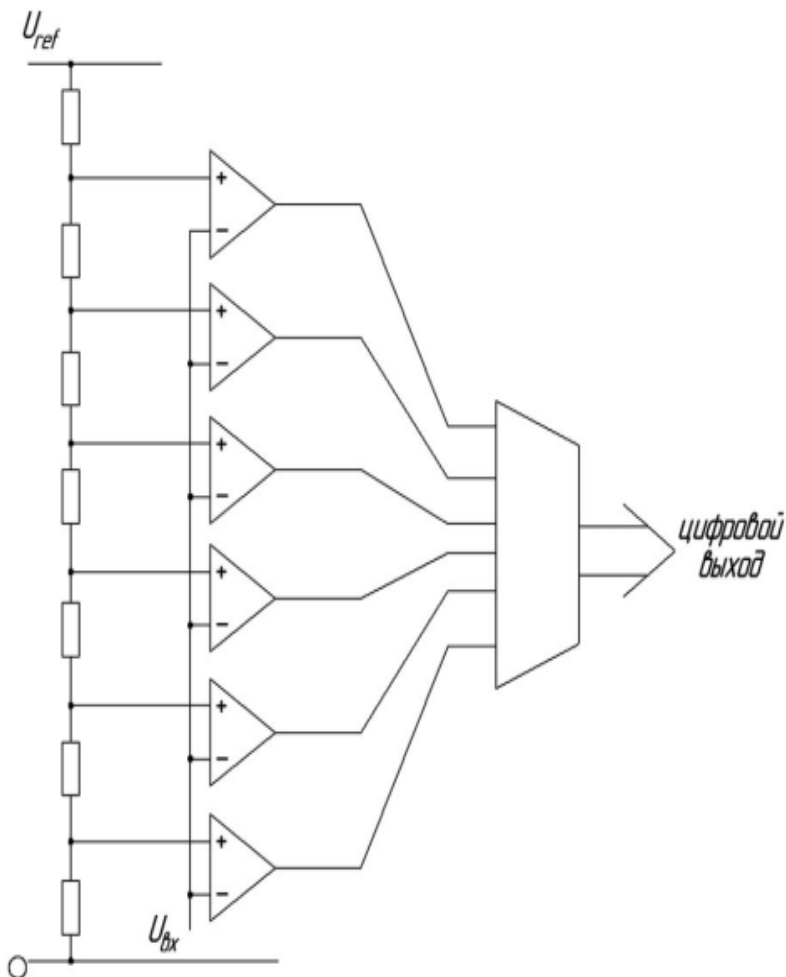
Число	Sign-Magnitude	Offset Binary	2's Complement	8421 BCD	2421 BCD	Excess 3
+9				1001	1111	1100
+7	0111	1111	0111	0111	1101	1010
+6	0110	1110	0110	0110	1100	1001
+1	0001	1001	0001	0001	0001	0100
0	0000	1000	0000	0000	0000	0011
-1	1001	0111	1111			
-6	1110	0010	1010			
-7	1111	0001	1001			
-8		0000	1000			

Қазіргі уақытта сенсорларды әзірлеушілердің көпшілігі өздерінің АЦП-ін жасаудың қажеті жоқ, себебі өнеркәсіп әртүрлі типтегі АЦП-лерді, соның ішінде кейбір сенсорларға арналғандарды көп мөлшерде шығаруда [17-27].

Дегенмен, сигналдарды түрлендіру әдістері мен АЦП құру принциптері туралы ақпарат алып, АЦП-ді дұрыс таңдауға болады.

Параллельді АЦП

Параллельді АЦП-дің қарапайым схемасы 4.18-суретте көрсетілген [10]. Кернеу бөлгіші кванттау деңгейлерін анықтайды. Бөлгіштің әр каскады компаратордың бір кірісіне жалғанады, ал кіріс сигналы барлық компараторларға параллель беріледі. Компараторлардың шығыстары логикалық құрылғыға қосылған, ол компараторлардан алынған сигналдарды сандық кодқа түрлендіреді.



4.18-сурет. Параллельді АЦП схемасы

Бұл АЦП-нің кемшілігі – әрбір кванттау деңгейіне арнайы компаратор қажет болуы. Мысалы, 8-биттік АЦП $2^8 = 256$ жеке компараторды қамтуы керек, ал полярлылықты ескерсек, компараторлар саны екі есе артады.

Бұл АЦП-нің артықшылығы – оның жылдамдығы. Компараторлар бір мезгілде жұмыс істейді, сондықтан сигналды түрлендіру уақыты бір компаратордың іске қосылу уақытына плюс логикалық құрылғының сигналды өңдеу уақытына байланысты. Практикада бұл уақыт әдетте шамамен **5 нс** құрайды, бұл оны **шамамен 100 МГц жиіліктегі сигналдарды** (мысалы, бейнесигналды) түрлендіру үшін қолдануға мүмкіндік береді [5].

Цифрлы-аналогтық түрлендіруі бар АЦП

Динамикалық өтеу әдісін қолданатын АЦП аналогты-цифрлық түрлендіруді цифрлы-аналогтық түрлендіру арқылы жүзеге асырады. Мұндай АЦП-нің блок-схемасы 4.19-суретте көрсетілген. Түрлендірудің басында цифрлық есептегіш нөлден санауды бастайды. Есептегіш шығысына сәйкес келетін ЦАП-тың аналогтық шығысы кіріс аналогтық кернеумен салыстырылады. Екі аналогтық сигнал тең болған кезде, АЦП шығысының күйі өзгереді. Бұл есептеуді тоқтатады және есептегіштегі сан кіріс аналогтық сигналдың цифрлық коды болады (яғни кіріс анықталады). Түрлендіру осымен аяқталған деп саналады, есептегіш нөлге қайтады және қайтадан санауды бастайды [5].

Динамикалық өтеу әдісі бар АЦП қарапайым және тұрақты құрылғы болып табылады, бірақ оның жылдамдығы төмен. Ең төмен түрлендіру жылдамдығы кіріс сигналының максималды мәнінде байқалады, себебі есептегіш кіріс сигналының барлық мүмкін диапазонын аралауы керек. Егер тактілік генератордың жиілігі 1 МГц болса және шығыс 8-биттік болса, онда түрлендіру жылдамдығы $10^6/2^8 = 4$ кГц болады.

Бұл типтегі АЦП сонымен қатар кірістегі шуға және кедергілерге сезімтал, сондықтан шығыста қателік жоғары болады [5, 10].



4.19-сурет. Дәйекті жуықтау әдісімен жұмыс істейтін АЦП

Дәйекті жуықтау әдісімен жұмыс істейтін АЦП

Дәйекті жуықтау әдісін қолданатын АЦП динамикалық өтеу әдісіндегі АЦП-ге қарағанда әлдеқайда қарапайым болып келеді және бір уақытта кіріс аналогтық сигналдың цифрлық кодын әлдеқайда тез анықтайды. Дәйекті жуықтау әдісіндегі АЦП-нің блок-схемасы динамикалық өтеу әдісіндегі АЦП-мен бірдей (4.19-сурет), бірақ есептегіштің орнына кодты бекітуге арналған регистр қолданылады.

Барлық деңгейлерді кезекпен қарап шығудың орнына, бұл түрлендіргіште дәйекті жуықтау алгоритмі қолданылады. Алдымен кіріс сигналы регистрде бекітілген толық кванттау шкаласының жартысымен салыстырылады. Егер кіріс сигналы үлкен болса, ең маңызды битке (MSB) 1 жазылады. Келесі салыстыру үшін толық шкаланың 3/4 бөлігі алынады. Кіріс сигналының цифрлық эквивалентінің қай ширекте орналасқаны анықталады. Сәйкесінше, келесі бит 0 немесе 1 мәнімен толтырылады. Салыстырулар саны түрлендіргіштің шығысындағы бит санына тең. Егер шығыс коды 8-биттік болса, онда 8 салыстыру жүргізу қажет, бұл динамикалық өтеу әдісіндегі $2^8 = 256$ салыстыруға қарағанда әлдеқайда тез орындалады. Нәтижесінде максималды түрлендіру жылдамдығы $10^6/8 = 125$ кГц болады, ал 4 кГц емес.

Осылайша, іздеу және қадағалау стратегиясын қолдану арқылы түрлендіру жылдамдығын арттыруға болады. Бұл түрлендіру процесінде кіріс сигналының орташа мәннен жоғары немесе төмен өзгеруі үздіксіз логикалық түрде қадағаланады. Бұл әдіс кіріс сигналы баяу өзгерген кезде ең тиімді болады.

Дәйекті жуықтау әдісіндегі АЦП да динамикалық өтеу әдісіндегі АЦП сияқты шуға және кедергілерге сезімтал болады [5, 10].

Интегралдайтын АЦП

Интегралдайтын АЦП-нің негізгі ерекшелігі - аналогтық кіріс сигналының интегралдануында: түрлендіру процесінің әрбір кезеңінде алдыңғы қадамдардың орташа арифметикалық мәні анықталады. Бұл әдіс шулар мен кедергілердің әсерін айтарлықтай азайтады. 50 Гц желілік кедергілер сияқты периодтық бұзылулар толық циклдағы синусоиданың орташа мәні нөлге тең болғандықтан толығымен жойылады. Бұл түрлендіргіштің өте пайдалы қасиеті өлшеу құралдарында кеңінен қолданылады.

Екі кезеңді интегралдау әдісіндегі түрлендіргіштер схемадағы компоненттер санын азайту, сонымен қатар түрлендірудің жоғары тұрақтылығын және дәлдігін қамтамасыз ету үшін интегралдаудың екі фазасын қолданады.

4.20-суретте, а – АЦП-нің блок-схемасы, ал 4.20-суретте, б – түрлендіру процесінің графигі көрсетілген. Түрлендіру интегратор шығысын (конденсатордағы кернеуді) нөлге қою арқылы басталады. Бірінші интегралдау фазасында (t_{BX} уақытында) кіріс сигналы алдын ала анықтау үшін интегралданады. Екінші фазада эталондық $U_{ЭТ}$ кернеуі интегратор шығысы нөлге жеткенше интегралданады.

Бірінші интегралдау фазасының соңында кернеу мына формула бойынша анықталады:

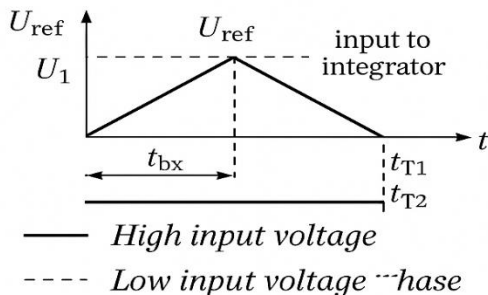
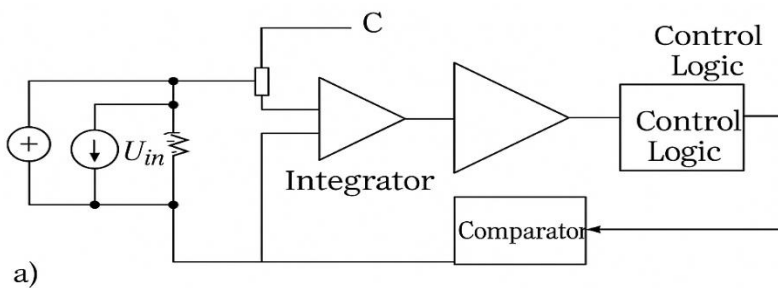
$$U_1 = \frac{U_{BX} t_{BX}}{RC}.$$

Екінші фаза кезінде интегратор шығысы U_1 мәнінен 0-ге қайтады:

$$U_1 = \frac{U_{\text{ЭТ}} t_{\text{Э}}}{RC}$$

и

$$U_1 = \frac{U_{\text{BX}} t_{\text{BX}}}{RC} = \frac{U_{\text{ЭТ}} t_{\text{ЭТ}}}{RC}. \quad (4.20)$$



4.20-сурет. Екі тактты АЦП:

а) – блок-схема; б) – түрлендіру процесіндегі шығыс кернеуінің өзгеруі

(4.20) теңдеуінен мынаны аламыз:

$$U_{\text{BX}} = -U_{\text{ЭТ}} \frac{t_{\text{ЭТ}}}{t_{\text{BX}}}.$$

Интеграциялау уақыты t сәйкес кезеңдердегі синхронизация импульстерінің санымен анықталады:

$$t = Nf_{\text{синхр}}.$$

Шығыс кернеуі анықталуы:

Шығыс кернеуі эталондық кернеуге және интеграциялау кезеңдерінің қатынасына (немесе сәйкес импульстер қосындыларының қатынасына) байланысты анықталады. Түрлендірудің дәлдігі тек эталондық кернеудің дәлдігіне тәуелді. Ол синхронизация жиілігінің дәлдігіне, резистор мен конденсатордың параметрлеріне байланысты болмайды. Жалғыз талап – түрлендіру процесінде ($t_{\text{кр}} + t_{\text{эт}}$) қосындысының тұрақты болуы қажет. Бұл талапты орындау, дәлдік пен тұрақтылық талаптарына қарағанда әлдеқайда оңай.

Екі кезеңді интеграциялауы бар АЦП:

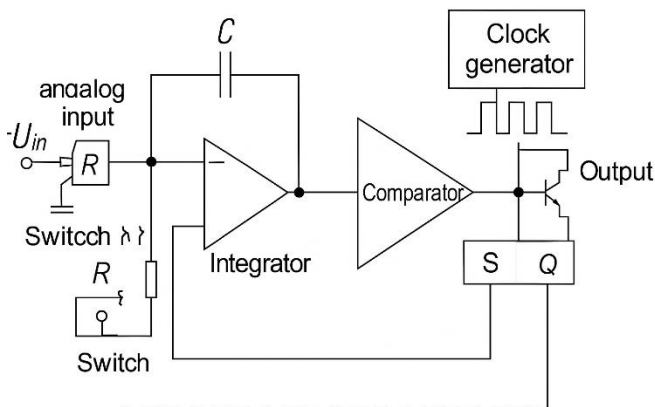
Әдетте, екі кезеңді интеграциялауы бар АЦП 10-18-биттік шығыс береді. Мұндай дәлдік пен тұрақтылық үшін олар салыстырмалы түрде арзандық ұсынады. Жақсырақ сипаттамаларға қол жеткізу үшін бірінші интеграциялау фазасының уақытын 20 мс-ке еселік етіп орнатады – бұл 50 Гц жиіліктегі кедергілерді толық жоюға мүмкіндік береді. Дегенмен, ұзақ интеграциялау уақыты мұндай түрлендіргіштерді интеграциясыз АЦП-лермен салыстырғанда салыстырмалы түрде баяу жұмыс істеуіне әкеледі [5, 10].

Жиілік резерві бар АЦП (Сигма-дельта түрлендіргіш)

Жиілік резерві бар АЦП (немесе сигма-дельта түрлендіргіш) аналогтық кіріс сигналының өзгерістерін бақылап, шығысында импульстар пакетін генерациялайды. Шығыс импульстардың орташа кернеу мәні кіріс сигналының мәніне пропорционал болады. Демек, төмен жиілікті сызықты

сүзгі арқылы бастапқы кіріс сигналын қалпына келтіруге болады.

Сигма-дельта түрлендіргіштің схемасы 4.21-суретте көрсетілген [5, 10]. Кіріс сигналының теріс кернеуі қосындылаушы интегратордың бір кірісіне жетеді. Екінші кірісі арқылы жерге қосылу арқылы оң эталондық кернеу немесе нөлдік кернеу беріледі (коммутациялық қосқыш арқылы). Интегратор шығысы оң болса (компаратор арқылы анықталады), оң эталондық кернеу интеграторды кері бағытта іске қосады. Шығыс теріс болған кезде, компаратор күйін өзгертіп, интегратордың кірісін нөлге ауыстырады.



4.21-сурет. Жиілік бойынша резерві бар АЦП (немесе сигма-дельта түрлендіргіш) схемасы

Бұл схема интегратор кірісінде нөлді ұстап тұру үшін кері байланыс жүйесі ретінде қарастырылады. Осының нәтижесінде бір кірістегі кіріс сигналының орташа мәні екінші кірістегі қарама-қарсы сигналға тең болады. Осылайша, АЦП шығысы – бұл ұзақтығы тұрақты импульстер ағыны, олардың орташа саны кіріс сигналының орташа мәнін білдіреді.

Бір іріктеуге сәйкес түрлендірудің ажыратымдылығы импульстер санымен анықталады. Сондықтан, айналмалы

импульстер жиілігі Котельников-Найквист теоремасы талап ететінен әлдеқайда жоғары болуы керек. Бұл екі жиіліктің қатынасы **жиілік резерві** деп аталады (әдетте 64 немесе 256). Осы себепті мұндай түрлендіргіштерді **жиілік резерві бар АЦП** деп те атайды.

Параллельді АЦП және кезекті жуықтау АЦП сияқты түрлендіргіштердің ажыратымдылығы мен сызықтылығы олардың құралғыштарының сипаттамаларымен анықталады. Ал сигма-дельта АЦП қарапайым бір битті элементті пайдаланады, және оның ажыратымдылығы уақыттық сипаттамасымен белгіленеді. Сондықтан нарықта сигма-дельта АЦП тек бір уақыттық көрсеткішпен сипатталады [5, 16-26].

Егер құралғыштардың шу шығару қабілетін салыстырсақ, онда кванттау тізбегіндегі шу айналмалы импульстер жиілігі мен олардың гармоникаларымен анықталады. Бұл кіріс құралғыштарына қарағанда әлдеқайда жоғары. Интеграциялау кезінде жоғары деңгейлі шулар төмендейді, және оларды сүзгілер арқылы тікелей басуға болады. Күрделірек түрлендіргіштер (16-20 бит) жоғары ажыратымдылықпен де көбірек шу шығарады. Сондықтан сигма-дельта АЦП үшін **OSNA** (шу шығару қабілеті) деген арнайы көрсеткіш бар.

Бұл АЦП-дің жұмыс жиілігі өте жоғары болғандықтан, кірісіне жиіліктердің қабасу әсерін болдырмайтын сүзгілер орнату қажет (әдетте қарапайым RC-сүзгілер).

Сигма-дельта АЦП-дегі айналмалы импульстердің максималды жиілігі оның схема құралғыштарының жылдамдығымен, ал кіріс сигналының максималды жиілігі айналмалы импульстер жиілігін жиілік резервіне бөлу арқылы анықталады [5].

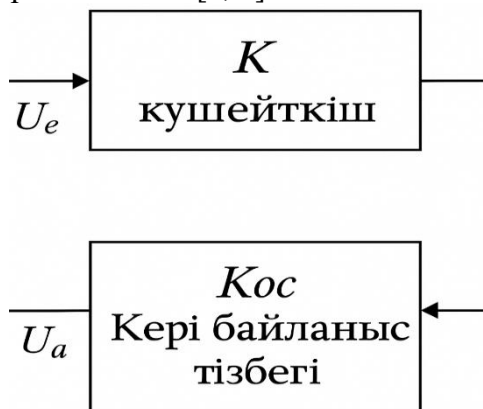
Өнеркәсіпте шығарылатын АЦП туралы ақпаратты, мысалы, [15-25] дереккөздерінен табуға болады.

4.5. Сигнал генераторлары

Сигнал генераторлары деп берілген пішіндегі айнымалы кернеуді құратын электрондық схемаларды айтады [1, 2, 5, 10, 12].

Генераторлар кейбір параметрлік сенсорларды қуаттау үшін қолданылады. Сонымен қатар, сенсорлар генераторлардың жиіліктерін анықтайтын тізбектеріне қосылуы мүмкін, нәтижесінде мұндай генератордың тербеліс жиілігі сенсор өлшейтін физикалық шаманың функциясы болады.

Генератор күшейткіштен (A күшейту коэффициентімен) және оң кері байланыс тізбегінен (K_{oc} беру коэффициентімен) тұрады (4.22-сурет). Отандық әдебиетте мұндай құрылғыны автогенератор деп атайды [1, 2].



4.22-сурет. Генератордың құрылымдық сұлбасы

Автогенераторда тербелістер мына жағдайда пайда болады:

$$K_{oc} \cdot A \geq 1. \quad (4.21)$$

Бұл шарт амплитудалар балансы деп аталады. Сонымен қатар, фазалар балансы шарты орындалуы тиіс: күшейткіштегі фазалық ығысу (φ_A)

және кері байланыс тізбегіндегі фазалық ығысу (фос) қосындысы $2\pi n$ -ге тең болуы керек, яғни:

$$\varphi_A + \varphi_{OC} = 2\pi n. \quad (4.22)$$

4.22-суреттегі схема үшін жұрттық жиілік диапазонында жұмыс істеген кезде [7, 14] былай жазуға болады:

$$K_{\text{ПЕР}} \frac{U_a}{U_e} = \frac{A}{1 - K_{OC} \cdot A}. \quad (4.23)$$

Бұл өрнек автогенератордағы тербелістердің пайда болу механизмін түсінуге мүмкіндік береді.

Кері байланыс тізбегіндегі жиілікті анықтайтын элементтер ретінде LC, RC тізбектер, пьезоэлектрик резонаторлар, трансформаторлар, сүзгілер және т.б. қолданылады.

LC-автогенераторының бір нұсқасының схемасы 4.23-суретте көрсетілген [10].

Инверттемес схема бойынша қосылған операциялық күшейткіш кіріс кернеуін $U_1(t)$ А есеге күшейтеді. Мұндай күшейткіштің шығысы төмен кедергілі болғандықтан, оң кері байланыс тізбегіндегі параллель тербелмелі контур күшейткішке R резисторы арқылы қосылады.

Біз келесі белгілеулерді енгіземіз:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC};$$

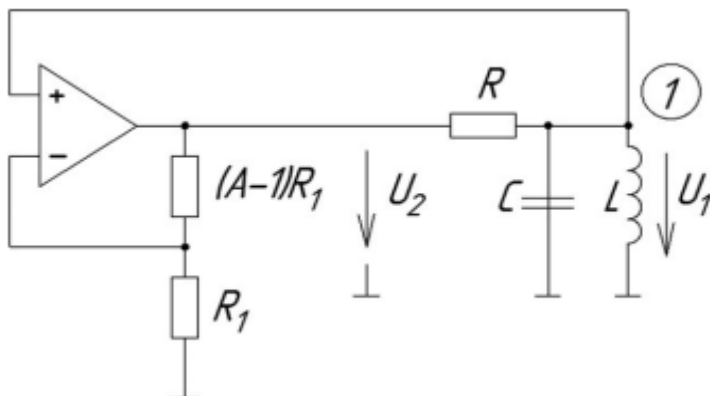
$$\gamma = \frac{1 - A}{2RC}.$$

Үш түрлі тән жағдайды ажыратамыз:

1. $\gamma > 0$, яғни $A < 1$. Бұл жағдайда шығыс кернеуінің амплитудасы экспоненциалды заң бойынша азаяды (өшіп баратын тербелістер).

2. $\gamma = 0$, яғни $A = 1$. Жиілігі $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ болатын синусоидалы тербелістер пайда болады және амплитудасы тұрақты болып қалады.

3. $\gamma < 0$, яғни $A > 1$. Шығыс кернеуінің амплитудасы экспоненциалды заң бойынша өседі.



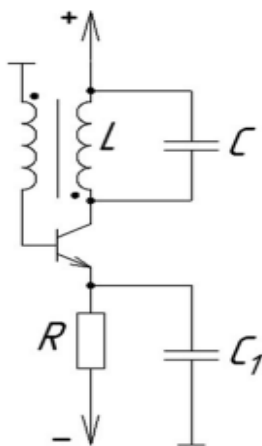
4.23-сурет. LC-генератор схемасы

Майсснер сұлбасы

Майсснер сұлбасы бойынша автогенератордың ерекшелігі – оң кері байланыстың трансформатор арқылы жүзеге асырылуы. Трансформатордың біріншілік орамы конденсатормен бірге тербелмелі контурды құрайды, бұл схеманың генерациялау жиілігін анықтайды.

Майсснер сұлбасы бойынша автогенератордың бір нұсқасы 4.24-суретте көрсетілген [10].

Фазалар балансы шартын қамтамасыз ету үшін трансформатор сигнал фазасын 180° -қа бұруы керек. Егер трансформатордың біріншілік және екіншілік орамдары бір бағытта оралған болса, онда фазаны инверттеу үшін екіншілік орамды біріншілік орамға қарсы қосу қажет. Яғни, коллекторлық кернеумен синфазалы кернеу болатын екіншілік орамның ұшы айнымалы ток бойынша заземделуі тиіс. Сонымен қатар, трансформация коэффициенті схеманың тізбектік күшейту коэффициенті KA бірліктен айтарлықтай жоғары болатындай етіп таңдалады.



4.24-сурет. Майсснер схемасы бойынша автогенератор

Хартли схемасы

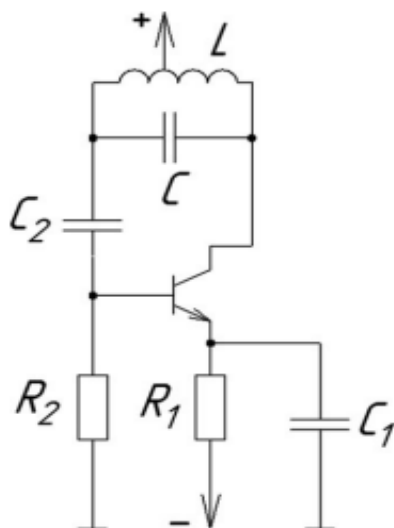
Хартли схемасы индуктивті кері байланысы бар үш нүктелі схема болып табылады (4.25-сурет). Бұл схема Майсснер схемасынан айырмашылығы – трансформатордың орнына ортасынан шығарылмасы бар дроссель қолданылады. Бұл дроссельдің L индуктивтігі мен параллель жалғанған C конденсаторының сыйымдылығы генератордың резонанс жиілігін анықтайды [10].

Колпитц схемасы

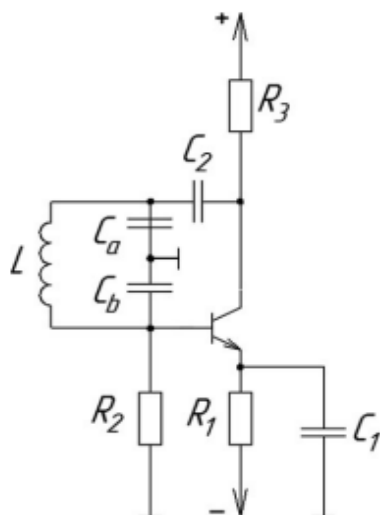
Колпитц схемасы сыйымдылықты кері байланысы бар үш нүктелі схема болып табылады (4.26-сурет). Колпитц схемасының ерекшелігі – кері байланыс коэффициентін анықтайтын кернеу бөлгіш конденсаторлардың болуы. Дроссель L мен тізбектей жалғанған конденсаторлар тербелмелі контур құрайды, оның жалпы сыйымдылығы мына формуламен есептеледі:

Екі тартпалы автотербелгіш

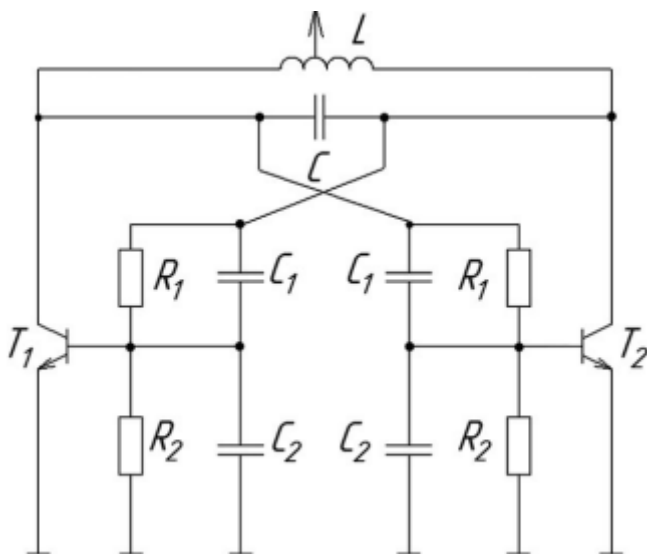
Мұндай схемалар тербелгіштерде және күшейткіштерде қуаттылықты арттыру үшін қолданылады. Генератордың бір түрінің схемасы 4.27-суретте көрсетілген [10].



4.25-сурет. Хартли схемасы



4.26-сурет. Ортақ эмиттерлі транзистормен жалғанған Колпитц схемасы



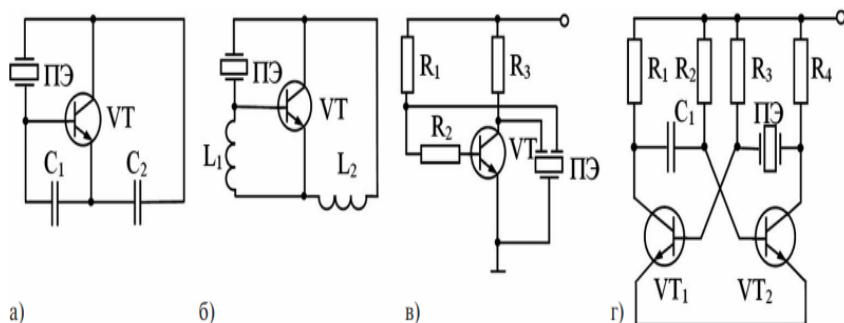
Сурет 4.27. Екітактты автогенератор сыйымдылық кері байланыспен

Бұл схемада оң кері байланыс C_1 және C_2 конденсаторларындағы сыйымдылық кернеу бөлгіші арқылы құрылады. R_1 және R_2 резисторларына параллель қосылған бөлгіштер транзисторлардың жұмыс режимін орнату үшін қызмет етеді.

Пьезоэлектрик резонаторлар және трансформаторлар негізіндегі өздік тербестік генераторлары

Өздік тербестік генераторларының жиілік тұрақтылығын арттыру үшін жиілікті реттейтін элементтер ретінде пьезоэлектрик резонаторлар мен трансформаторлар кеңінен қолданылады [1, 8, 13]. Кварц резонаторлары негізінде жасалған генераторлар 10^{-8} – 10^{-9} және одан да жоғары дәлдікті қамтамасыз етеді [1, 8], ал пьезокерамикалық резонаторлар мен трансформаторлар негізіндегілер 10^{-4} – 10^{-6} дәлдікке ие болады [13].

Пьезокерамикалық резонаторлар мен трансформаторлар негізіндегі өздік тербестік генераторларының бірнеше схемалары 4.28-суретте [14] көрсетілген. Олар сенсорлар ретінде де қолданыла алады.



Сурет 4.28. ПЭ негізіндегі генераторлардың схемалары: а) – Колпитц схемасы б) – Хартли схемасы в) – Колпитц трансформаторлы схемасы г) – мультивибратор схемасы

Пьезоэлектрик сенсорлардың сезімталдығын арттыру

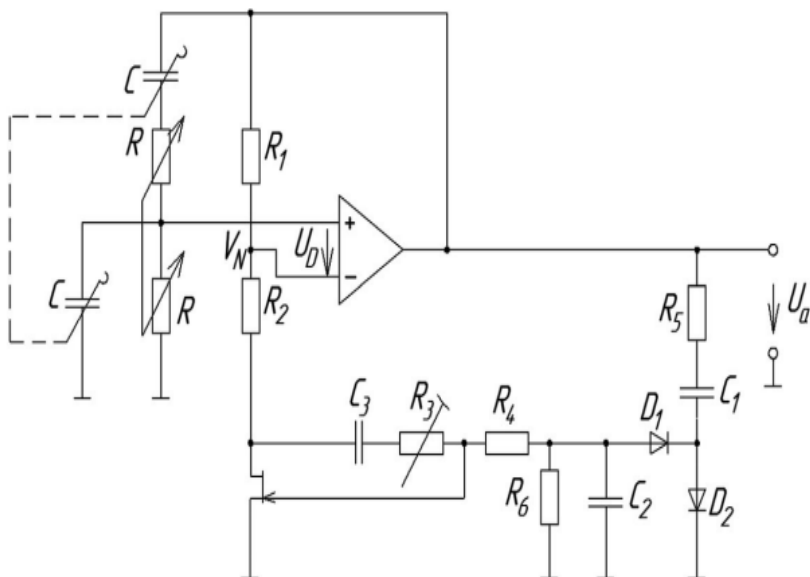
Пьезоэлектрик сенсорлардың сезімталдығын арттыру үшін жиі резонаторларды жоғары гармоникалар режимінде қоздыру әдісі қолданылады. Өрістік транзисторларды және өрістік транзисторлы кіріс каскады бар операциялық күшейткіштерді пайдаланған кезде резонаторларды қоздыру жағдайлары жақсарады [1, 8].

Вин-Робинсон RC-генераторы

Синусоидалы төмен жиілікті тербелістер генераторларында жиілікті реттейтін элемент ретінде жолақты сүзгі түріндегі RC-тізбектер қолданылуы мүмкін. Вин-Робинсон көпірі негізіндегі осындай генератордың схемасы 4.29-суретте көрсетілген [10].

RC-сүзгілердің максималды сапа факторы 1/2-ден аспайтыны белгілі. Осындай генераторда алынған синусоидалы тербелістердің жиілік тұрақтылығы төмен болар еді.

Жиіліктің жақсы тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін фаза-жиілік сипаттамасы нөлден өткен нүктеде мүмкіндігінше жоғары тіклікке ие кері байланыс схемасы қажет. Мұндай қасиет, мысалы, жоғары сапа факторы бар тербелмелі контур немесе Вин-Робинсон көпірі болуы мүмкін, бірақ соңғысының резонанстық жиіліктегі шығыс кернеуі нөлге тең. Сондықтан өздік тербестік генераторына орнату үшін оны аздап реттеусіздейді [10]. Шығыс кернеуін тұрақтандыру үшін схемада өрістік транзистор қолданылады.



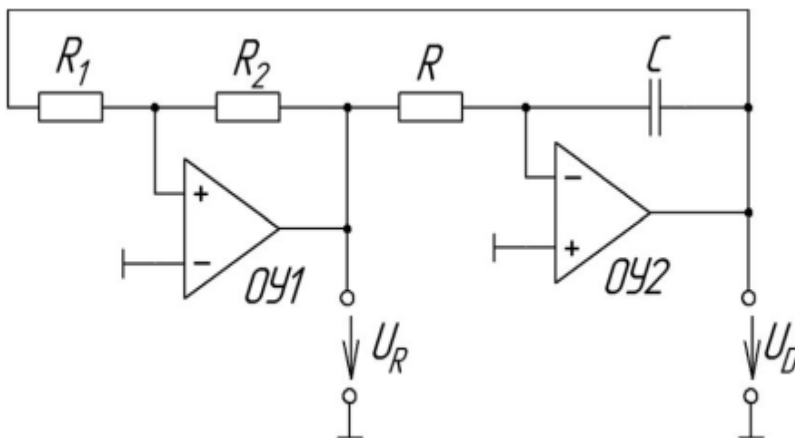
4.29-сурет. Вин-Робинсон көпірі бар генератор схемасы

Функционалды генераторлар

Функционалды генераторлар – арнайы пішінді сигналдар тудыратын генераторлар. Ең көп тарағандары – үшбұрышты және тікбұрышты сигналдар генераторлары. 4.30-суретте қарапайым үшбұрышты және тікбұрышты

сигналдар генераторының сұлбасы келтірілген. Бұл генератордың жиілігі.

$$f = \frac{1}{4RC} \cdot \frac{R_2}{R_1}.$$

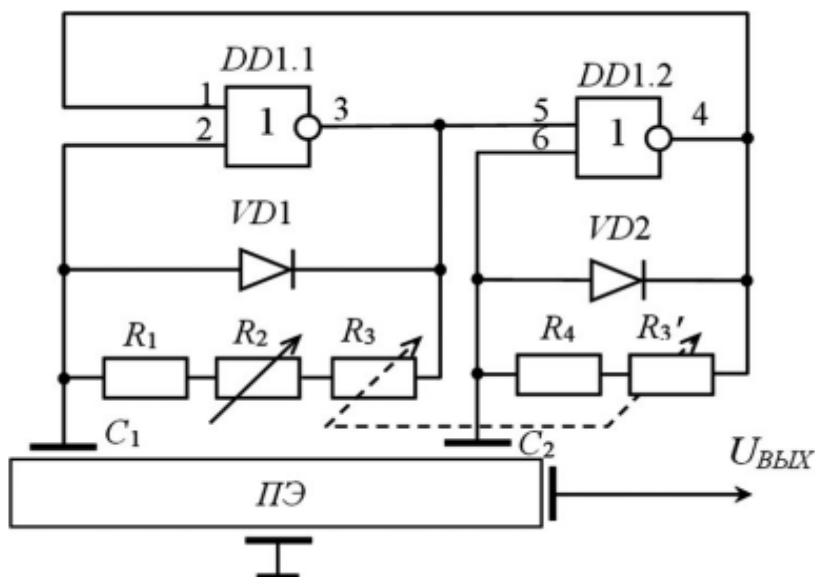


4.30-сурет. Шмитт триггері негізіндегі генератор

ОУ₂ операциялық күшейткішіндегі интегратор Шмитт триггерінің (ОУ₁) шығысындағы тұрақты кернеуді интеграциялайды. Интегратор шығысындағы кернеу Шмитт триггерінің іске қосылу шегіне жеткенде, триггер шығысындағы кернеу секірмелі түрде таңбасын өзгертеді. Нәтижесінде интегратор шығысындағы кернеу қарама-қарсы бағытта өзгеруге бастайды және Шмитт триггерінің екінші іске қосылу шегіне жеткенше осылай жалғасады.

Интеграциялау тұрақтысын өзгерту арқылы қалыптасқан кернеудің жиілігін кең шегінде реттеуге болады [10].

Тікбұрышты кернеу генераторының тағы бір сұлбасы 4.31-суретте көрсетілген [14]. Бұл генератор К176ЛА7 микросхемасының логикалық элементтерінен құрастырылған.



4.31-сурет. Тікбұрышты импульстер генераторының сұлбасы

Әдебиеттер тізімі

1. Альтшуллер Г.Б., Ефимов Н.Н., Шакулин В.Г. Кварцевые генераторы. – М: Энергоатомиздат, 1989. – С. 272.
2. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986. – С. 512.
3. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – С. 304.
4. Каплан Л., Уайт К. Практические основы аналоговых и цифровых схем. – М.: Техносфера, 2006.
5. Крерафт Д. Аналоговая электроника. – М.: Техносфера, 2006.
6. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин (Измерительные преобразователи). – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – С. 320.

7. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). – М.: Машиностроение, 1977. – С. 464.
8. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 272.
9. Пейтон А.Дж., Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. – М.: БИНОМ, 1994. – С. 124.
10. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. – М.: Мир, 1983. – С. 512.
11. Фрайден Дж. Современные датчики. М.: Техносфера, 2005. – С. 592.
12. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. В 3-х т. Пер. с англ. 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Мир, 1993.
13. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006. – С. 632.
14. Шарапов В.М., Минаев И.Г., Мусиенко М.П. Теория автоматического управления. – Черкассы: ЧГТУ, 2005. – С. 200.
15. Электрические измерения неэлектрических величин / Под ред. П.В. Новицкого. – Л.: Энергия, 1977.
16. Пьезоэлектрические акселерометры и усилители: Справочник по теории и эксплуатации. – Дания, 1987.
17. www.analog.com.
18. www.national.com.
19. www.onsemi.com.
20. www.terraelectronica.ru.
21. www.micro-m.ru.
22. www.thermooptics.com.
23. www.platan.ru.
24. www.autex.spb.ru.
25. www.sea.com.ua.
26. www.vdmais.kiev.ua.
27. www.ti.com.

5-ТАРАУ

СЕЗІМДІ ДАТЧИК ЭЛЕМЕНТТЕРІ

5.1. Негізгі түрлері және есептеу қатынастары

Мақсаты және жіктелуі. Сезімді элементтер деп жүктеме әсерінен өлшемдері өзгертін және жүктеме алынғаннан кейін бастапқы пішінін қалпына келтіретін бөлшектерді айтады. Сезімді элементтердің негізгі функцияларының бірі – жүктемелерді механикалық жылжуларға түрлендіру. Сезімді элементтерді мақсатына қарай мына топтарға бөлуге болады [1-9]:

– Күш өлшеуге арналғандар – шоғырланған күштер мен моменттерді өлшеуге арналған (жазық, спиральды және винтті цилиндрлік серіппелер);

– Манометрлік – сұйық және газ тәрізді орталардың қысымын өлшеуге арналған (мембраналар, сиффондар және түтікшелі серіппелер);

– Термоөлшеуіш – температураны өлшеуге арналған (биметалл пластиналар, мембраналар, сиффондар және түтікшелі серіппелер);

– Күш беруге арналғандар – механизмдердің бөлшектерін қозғалысқа келтіру үшін механикалық энергия көздері ретінде қолданылатын (спиральды құру және винтті цилиндрлік серіппелер);

– Кинематикалық – бір бөлшекті басқасына қатысты берілген бағытта жылжытуды қамтамасыз ететін (жазық серіппелер, мембраналар және сиффондар);

– Компенсациялық – беріліс механизмдеріндегі бөлшектер арасындағы саңылауларды, люфттар мен өлі жүрістерді жоятын (жазық, винтті цилиндрлік және тарелкалы серіппелер);

– Бөліктік – физикалық параметрлері әртүрлі екі ортаны бөліп тұратын (мембраналар, сиффондар);

– Амортизаторлар – әртүрлі құрылғыларды дірілден, соққылардан және дірілден қорғайтын (резина-металл сезімді элементтер, пішінді оралған серіппелер).

Жоғарыда келтірілген тізімнен көрініп тұрғандай, әрбір сезімді элементтің бірнеше мақсаты болуы мүмкін.

Құрылымдық ерекшеліктері мен өндіріс технологиясына қарай сезімді элементтерді екі негізгі топқа бөлуге болады:

- Стерженьдік – сым және лентадан жасалатын;
- Қабықшалар – парақтан және дайын түтікшелерден алынатын.

Амортизаторлар – металл бөлшектермен резина массивтерінің бірігуі болып табылады, олар кейбір конструкцияларда стерженьдік сезімді элементтермен бірге жұмыс істей алады.

Сезімді элементтердің құрылымдық-технологиялық ерекшеліктері олардың оңтайлы өлшемдері мен геометриялық пішіндерін табу мақсатында есептеу әдістемесін анықтайды.

Сезімді түрлендіргіштер әртүрлі физикалық шамалардың датчиктерінің біріншілік түрлендіру элементтері ретінде кеңінен қолданылады, мысалы, динамометрлер, виброметрлер, акселерометрлер. Мұндай түрлендіргіштердің кіріс шамасы шоғырланған күш, айналдыру моменті, газ немесе сұйықтық қысымы болуы мүмкін. Шығыс шамасы, әдетте, түрлендіргіш дененің өзінің деформациясы болып табылады, оны келесі түрлендіру элементі қабылдайды, оның табиғи кіріс шамасы механикалық жылжу (реостатты, сыйымдылықты, индуктивті түрлендіргіштерде) немесе механикалық кернеу (тензорезистивті түрлендіргіштерде) болып табылады [5].

Кіріс түрлендірілетін механикалық әсерлердің түрі мен мәніне байланысты сезімді элементтерді механикалық шамаларды түрлендіргіштер ретінде күш түрлендіргіштері, қысым түрлендіргіштері және айналдыру моменттерін түрлендіргіштер деп бөледі.

Стерженьдік сезімді элементтер

Күш түрлендіргіштерінің ішінде стерженьдер (5.1-кесте) ең кең таралған. Бұл олардың жасау қарапайымдылығымен, геометриялық өлшемдердің жоғары дәлдігіне қол жеткізу мүмкіндігімен түсіндіріледі. Стерженьдік сезімді элементтер төмен сезімталдыққа ие және үлкен күштерді түрлендіру үшін қолданылады (10 кН-нан жоғары).

Сезімталдықты арттыру үшін стерженьдік элементтер қуыс жасалады. Алайда, мұндай элементтердің қабырға қалыңдығын азайту технологиялық мүмкіндіктермен және пайдалану ерекшеліктерімен шектеледі, ал мұндай түрлендіру элементтерінің түрлендіретін күштерінің шегі әдетте 0,5 кН-нан төмен емес.

Стерженьдік сезімді элементтердің жалпы кемшілігі – шығыс жылжуларының аз мәні, сондықтан олар тек тензорезистивті датчиктерде ғана қолданылуы мүмкін. Стерженьдік сезімді элементтердің тағы бір кемшілігі – олардың сығу және созу кезіндегі түрлендіру сипаттамаларының бірдей еместігі [5, 8].

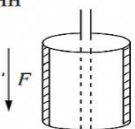
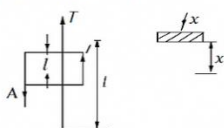
Сақиналы сезімді элементтер

Стерженьдік элементтерге қарағанда сақиналы сезімді элементтердің белгілі бір артықшылықтары бар. Олар жеткілікті үлкен шығыс жылжуларына ие, бұл оларды сыйымдылықты, индуктивті және басқа да датчиктерде қолдануға мүмкіндік береді. Сақиналы сезімді элементтер жоғары сезімталдыққа ие және бірнеше ондаған Н-нан бірнеше кН-ға дейінгі күштерді түрлендіру үшін қолданылуы мүмкін.

Сақиналы сезімді элементтердің ерекшелігі – созу деформациясы аймақтары мен сығылу деформациясы аймақтарының болуы, оларға тензорезисторлар орнатуға болады. Мұндай элементтердің кемшілігі – деформация аймақтарындағы кернеулердің біркелкі таралмауы. Біркелкірек таралу үшін айнымалы қималы сақиналар қолданылады. Сақиналы элементтер стерженьдік

элементтерге қарағанда аз технологиялы болса да, олар стерженьдік элементтер қажетті сезімталдықты қамтамасыз ете алмаған кезде немесе сезімді элементтің шығыс шамасы деформация емес, жылжу болуы керек кезде кеңінен қолданылады.

5.1-кесте. Күштердің механикалық серпімді түрлендіргіштерін есептеуге арналған негізгі қатынастар [6-8]

1. Турақты қималы стерженн 	$\varepsilon_{\text{нб}} = \mu_{\text{л}} F$ $\varepsilon_{\text{рн}} = \frac{R}{sh} (1,9 - 3 \cos \varphi)$ $\varepsilon_{\text{вн}} = -\frac{R}{h^2} (1,9 - 3 \cos \varphi)$	$\delta_A = \frac{-1,7_l}{Eh^3 F}$ $\delta_B = -1,79 \frac{R^3}{h^3}$ $\delta_B = +1,64 \frac{R^3}{h^3} F$
2. Турақты қималы консольдік с 	$\varepsilon_{A\text{н}} = 0$ $\varepsilon_{\text{рх}} = -\frac{E(l-x)}{Eh^2 b} F$ $\delta_x = -\frac{41,79}{Eh} R^3 \varphi F$	$\delta_A = \frac{\varphi l}{Eh b}$ $\delta_A = -\frac{4l}{Eh^3} \frac{R^3}{3} F$ $\delta_B = -\frac{6x}{Eh^3} l - \frac{x}{3} F F$
3. Турақты қималы консольдік балка 	$\varepsilon = 6l$ $\varepsilon_{\text{л}} = \frac{6l}{Eh^3} F$	$\delta_A = \frac{6l}{Eh b} F$ $\delta_x = \frac{6lx^3}{Eh^3} \left(-\frac{x}{3} \right) F$
5. Турақты қималы мембрана	$\varepsilon_R = \frac{0,478}{(1-\mu^2)x} \left[\ln \frac{R}{x} - 1 \right] F$	$\delta_A = \frac{3}{A \pi R^2} R^2 F$

Арқалық серпімді элементтер

Ең сезгіш серпімді элементтер – арқалық типтегі элементтер. Олар технологиялық жағынан қолайлы, ал олардағы сығылу және созылу деформациялары бір-біріне өте ұқсас. Арқалық серпімді элементтердің кемшілігі – арқаның бір ұшын қатты бекіту қажеттілігі, сондай-ақ күш түсіру нүктесі мен бағытын бекітудің қиындығы. Сондықтан олар

тек шамалы күштерді (50 Н-ға дейін) түрлендіру үшін қолданылады, мұнда басқа серпімді элементтер қажетті сезгіштікті қамтамасыз ете алмайды.

Бірқалыпты қималы арқадағы кернеулердің таралуы біртекті емес. Кернеуді бірқалыпты тарату үшін иілуге тең кедергілі арқа қолданылады.

Серпімді элементке түсірілген күш пен оның деформациясы немесе иілуі арасындағы негізгі тәуелділіктер 5.1-кестеде келтірілген. Онда мына белгілеулер қабылданған:

- F – түсірілген күш;
- δA , δB , δX – серпімді элементтің сәйкес нүктелеріндегі иілу;
- ε_l , ε_q – салыстырмалы бойлық және көлденең деформациялар;
- ε_A , ε_X – серпімді арқаның сәйкес нүктелеріндегі салыстырмалы деформациялар;
- ε_R , ε_φ – серпімді сақинаның радиалды және айналмалы деформациялары;
- S_q – серпімді элементтің көлденең қимасының ауданы;
- E – серпімділік модулі;
- M – Пуассон коэффициенті;
- P – тығыздық.

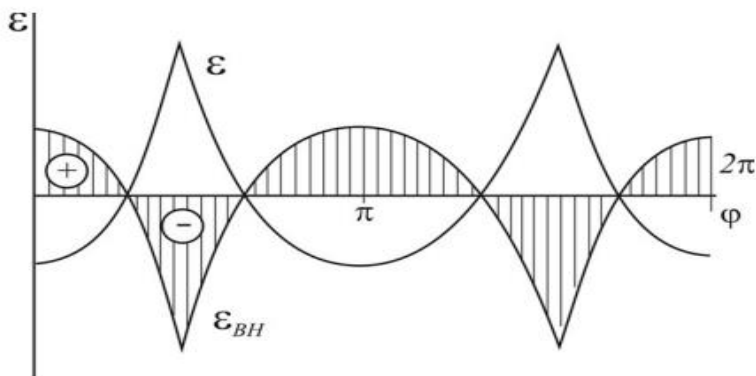
5.1-кестеде келтірілген өрнектерден көрініп тұрғандай, серпімді элементтердің салыстырмалы деформациясы жалпы жағдайда түрлендіргіш ұзындығы бойынша тұрақты емес. Бұл жағдайға тек иілуге тең кедергілі консольды арқа жатады. Сондықтан, егер серпімді элемент тензорезисторлық датчиктердің бірінші түрлендіргіші болса, кестедегі формулалар арқылы есептелген салыстырмалы деформация мәндерін тек тензорезистордың базасы серпімді элементтің ұзындығымен салыстырғанда өте аз болған жағдайда ғана қолдануға болады. Егер бұл шарт орындалмаса, онда тензорезистор базасының ұзындығына және оның серпімді элементтегі орналасуына сәйкес келетін салыстырмалы деформацияның орташа мәндерін анықтау қажет.

Серпімді элементтер мен тензорезисторлар базасының өлшемдерін үйлестіру мәселелері

Бұл мәселелер, әсіресе, сақиналы серпімді элементтерді және қатты бекітілген тұрақты қималы мембраналарды жобалау кезінде маңызды рөл атқарады. Себебі, түрлендірілетін күш әсерінен бұл элементтерде сығылу және созылу кернеулерінің деформациялары бір мезгілде пайда болады (5.1-сурет). Сондықтан, мұндай серпімді элементтердің геометриялық өлшемдері бір таңбалы деформация аймақтары тензорезистор базасынан кем емес болатындай етіп таңдалуы тиіс. Бұл жағдайда тензорезисторлар серпімді элементте бір таңбалы деформация аймағы шегінде орналастырылады.

Мембраналар

Көбінесе, сақиналы серпімді элементтің өлшемдері тензорезистор базасының ұзындығына тең бір таңбалы деформация аймағы шығатындай етіп таңдалады. Бұл жағдайда тензорезисторды серпімді элементке бекітудің ең жақсы жағдайы қамтамасыз етіледі, өйткені тензорезистор деформация кернеулері нөлге тең екі шеткі нүктеде бекітілуі мүмкін.

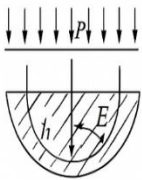
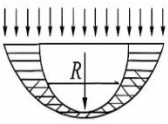
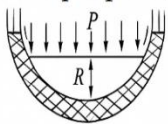


5.1-сурет. Серпімді сақина элементтегі деформациялардың таралу эпюры

Қысымды өлшеу үшін әдетте қатты мембраналар, цилиндрлік және жартысфералық қабықшалар (5.2-кесте) және басқа серпімді элементтер қолданылады. Қысымды түрлендірудің ең кең таралған серпімді түрлендіргіші – мембрана. Ол қысымды деформацияға немесе қысымды центрдік ығысуға түрлендіру үшін пайдаланылуы мүмкін.

Егер шығыс сигналдың ақпараттық параметрі ретінде деформация қолданылса, мембранада сығылу және созылу деформациясы аймақтарының бар екенін ескеру қажет (5.2-сурет).

5.2-кесте. Қысымды өлшеуге арналған механикалық серпімді түрлендіргіштерді есептеудің негізгі қатынастары

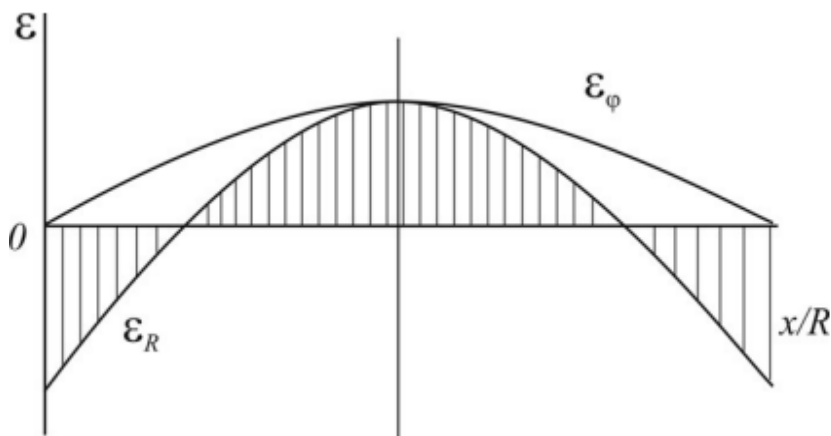
Түрлендіргіш элемент пішіні	Салыстырмалы деформация ε	Ү
Қатты мембрана 	$\varepsilon_R = \frac{\varepsilon_R}{R_h^2(1-\mu)} = 0,375 \cdot \frac{0,375R}{(1-\mu)^2}$ $\varepsilon_{ep} = 0,5 \frac{0,375}{E} \frac{(1-\mu)P}{P}$	δ_A
Цилиндрлік қабықша 	$\varepsilon_{/A} = 0,5R \frac{0,5R}{Eh} (2-\mu)P$ $\varepsilon_{vypA} = 0,5R (2-\mu\mu)P$	–
Жартышар терізі қабықша 	$\varepsilon = \frac{0,5R}{Eh} (1-\mu)P$	–

Бұл жағдайда мембрана өлшемдерін таңдау ұсыныстары **күш түрлендіруге арналған мембраналарға** ұқсас болады.

5.2-кестеден көрініп тұрғандай, **қатты мембраналар** сезгіштікті реттеуде үлкен мүмкіндіктерге ие. Шынында да, басқа параметрлер бірдей болған жағдайда, **салыстырмалы деформация** радиус квадратының қалыңдық квадратына қатынасына тең. Яғни:

– Геометриялық өлшемдердегі шамалы өзгерістер салыстырмалы деформацияның айтарлықтай өзгеруін береді

– Басқа серпімді элементтерде салыстырмалы деформация бұл қатынастың бірінші дәрежесімен анықталады



Сурет 5.2. Қатты мембранадағы деформациялардың таралу эпюрлері

Қатты мембраналар сұйық орталар жасайтын қысымды түрлендіргіш ретінде де кеңінен қолданылады. Бұл жағдайда меншікті тербелістер жиілігі былай анықталады:

$$f_c = \frac{f_0}{\sqrt{1 + 0,66 \frac{\delta_c R}{\delta h}}}, \quad (5.1)$$

Мембрана материалның тығыздығы және ортаның тығыздығы δ және δ_c болып табылады.

Өте жоғары қысымды түрлендіру үшін әдетте қатты орталығы бар мембрана қолданылады. Мұндай түрлендіргіш екі түрлендіруші элементтен тұрады: біріншісі – қысымды күшке айналдыратын мембрананың өзі, екіншісі – осы күш әсерінен деформацияға ұшырайтын қуыс стержень. Қатты орталығы бар мембрананың жұмысын талдау үшін мембрана мен қуыс стерженьге арналған негізгі есептеу қатынастарын пайдалануға болады.

Жартысфералық, цилиндрлік және басқа қабықшалар серпімді элементтер ретінде тек арнайы датчиктерді жасау үшін қолданылады, мысалы, егер конструкциялық талаптарға байланысты мембраналарды қолдану мүмкін болмаса (әсіресе, беріктікке қатаң талаптар қойылған жағдайда). Бұл талаптарға сфералық серпімді элемент ең жақсы сәйкес келеді.

Сильфондар.

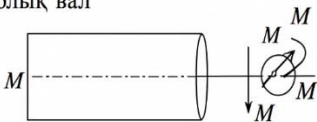
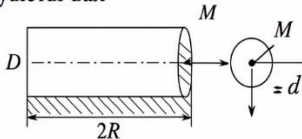
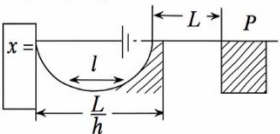
Қысым датчиктерінде сильфондар да қолданылады. Металл сильфон – серпімді материалдан жасалған жиекті құбыр, оның бір ұшы фланецпен аяқталады (осы жағынан түрлендірілетін қысым беріледі), ал екінші ұшы тегіс түбі бар. Сильфондар төмен қаттылықпен ерекшеленеді және нөлдік тұрақтылығы төмен болуы мүмкін. Сондықтан олар жиі сезімтал элементтер ретінде емес, орталарды бөлу үшін қолданылады, сонымен қатар жоғары қаттылықтағы сенімді және дәл серпімді элементтермен бірге жұмыс істейді.

Айналдыру моменттерін түрлендіргіштер. 5.3-кестеде серпімді айналдыру моменті түрлендіргіштерінің негізгі конструктивтік түрлері, сондай-ақ серпімді элементтердің геометриялық өлшемдеріне және енгізілген айналдыру моменттеріне байланысты механикалық кернеулер мен қаттылықты анықтау үшін есептеу қатынастары келтірілген.

Келтірілген есептеу қатынастарынан көрініп тұрғандай, максималды бұрыштың бұралуы (серпімді элементтің бос ұшының бұрылу бұрышы) басқа тең жағдайларда біліктің диаметрінің төртінші дәрежесіне, жазық торсионның қалыңдығының кубына және т.б. кері пропорционал. Бұл сезімталдықты кең шектерде реттеу үшін жақсы мүмкіндіктер береді. Мұндай түрлендіргіштердің бұрылу бұрышы ығысу модуліне кері пропорционал.

Айта кету керек, механикалық серпімді түрлендіргіштерді жобалау мәселелері күрделі міндет болып табылады, оны сәтті шешу тек [1, 5-8] көздерінде көрсетілген технологиялық, конструкциялық және басқа талаптарды орындау арқылы ғана мүмкін болады.

5.3-кесте. Айналмалы моменттердің механикалық серпімді түрлендіргіштерін есептеуге арналған негізгі қатынастар

Түрлендіргіш элемент пішіні	Ең үлкен бұралу бұрышы, рад	Механикалық кернеу, n
1. Толық вал 	$\varphi = \frac{16ML}{\pi d^{3.4} / \nu G}$ $\tau = \frac{16MD}{\pi(D^4 - d^4)}$	$\tau = \frac{16M}{\pi d^3}$ $\tau = \frac{16MD}{\pi d^3}$
2. Қуысты вал 	$\tau = \frac{16MD}{\pi(D^4 - d^4)}$	—
3. Жазықтық торсион 	$\varphi = \frac{16ML}{5.3 + h/L - l}$ $\frac{Bh_s}{h} = \frac{bh}{b/L} \left[\frac{P}{k} \right]$	$\tau = (3b + \frac{(36+)M}{8bh^2})$

5.2. Серпімді элементтердің материалдары

Серпімді элемент өлшеу түрлендіргішінің құрамдас бөлігі болып табылады және оның метрологиялық сипаттамаларына тікелей әсер етеді. Сондықтан серпімді элементтер материалдарының негізгі параметрлері әсер етуші факторлардың кең ауқымында жоғары тұрақтылыққа ие болуы керек.

Серпімді элементтер материалдарының ең маңызды параметрлері – серпімділік модулі және ығысу модулі. Олардың мәндері температурадан, жұмыс жүктемелерінен, уақыттан және дірілден тәуелсіз (немесе өте аз тәуелді) болуы тиіс.

Өкінішке орай, идеалды материалдар жоқ. Атап айтқанда, барлық қорытпалар үшін серпімділік модулі температурадан айтарлықтай тәуелді. Жалпы жағдайда бұл тәуелділік сызықты емес. Дегенмен, кейбір материалдарда температураның кең ауқымында бұл тәуелділік іс жүзінде сызықты болады. Мұндай материалдар көптеген жағдайларда артықшылыққа ие, себебі серпімділік модулінің температуралық өзгеруіне байланысты қателікті термокомпенсациялау жүйесі арқылы есепке алуға немесе жоюға болады. Мысалы, 36НХТЮ болаты және БрБ2 қоласы -200°C -тан $+600^{\circ}\text{C}$ -қа дейінгі температура аралығында серпімділік модулінің сызықтық тәуелділігін көрсетеді.

Серпімділік модулінің уақыт бойынша тұрақсыздығы материалдардың механикалық немесе термиялық өңдеулерінен кейін пайда болатын кейінгі әсер процестерімен байланысты. Бұл процестер материалдарда механикалық кернеулерді тудырады. Аздаған қалдық кернеулер, мысалы, 36НХТЮ болатында және БрБ2 қоласында байқалады, олар қайнатқан күйінде жоғары иілгіштікке ие. Сондықтан бұл қорытпалар серпімділік модулінің уақыт бойынша ең аз тұрақсыздығын көрсетеді.

Серпімді түрлендіргіштер үшін жүктеме сипаттамасының сызықтылығы (яғни серпімділік модулінің жұмыс жүктемесіне тәуелділігі) үлкен маңызға ие. Түрлендірілетін сигналдың максималды мәні материалдың ақырындық шегі ($\sigma_{0,2}$) арқылы анықталады. Ақырындық шегі неғұрлым жоғары болса, серпімді деформациялар мен түрлендірілетін күштер арасындағы сызықтық тәуелділік сақталатын сигнал мәні соғұрлым жоғары болады. ШХ15 шарикоподшипник болаты, 30ХГСА құрылыс болаты, 36НХТЮ болаты, БрБ2 қоласы және басқа қорытпалар салыстырмалы түрде жоғары ақырындық шекке ие (5.4-кесте).

5.4-кесте. Серпімді элементтер жасауға арналған материалдардың негізгі механикалық сипаттамалары

Марка	Шегі σ_B , МПа	Ағып кету шегі $\sigma_{0.2}$, МПа	Серпімділік модулі E, ГПа	Қатты серпімділік модулі G, ГПа	Жұмсақ серпімділік модулі S_s , ГПа	Температуралық аралық, °C	$\sigma_{0.2}$ -нің температуралық коэффициенті $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$	Тығыздық, г/см ³	Олдану саласы
Болат 65Г (ГОСТ 1050-74)	980	800	200	82	—	—	13,5	7,81	Иілуге жұмыс істейтін серпімді элементтер мен серіппелер
Болат 36НХТЮ (ЭИ702)	1127...1225	780...980	196	68	—	(-200...250)	12...14	7,9	400...500°C дейінгі агрессивті ортада жұмыс істейтін серпімді элементтер
Болат 36НХТЮМ8 (ЧМТ У / ЦНИИ ЧМ	1372...1470	1078...1274	196...274	78	—	(-200...250)	12...14	8,3	400...500°C дейінгі агрессивті ортада жұмыс істейтін серпімді элементтер

741-62)									
Болат 40НХ ТЮМ (ВТУ 187-62)	1372...1470	1078...1260	196...217	–	–	–	14...16	8,5	Жоғары қысым мен температурада жұмыс істейтін сезімтал серпімді элементтер
Никромды корытпа Н41ХТА	1400	1250	180	–	–	-20...8	–	7,9	Айнымалы жүктемеде жұмыс істейтін серпімді элементтер
Ниобийлі корытпа 55БТЮ	1058	1029	98	–	–	(-70...80)	–	8,3	Магнитсіз қасиеттерге ие серпімді элементтер
ЭП1218 корытпасы	1225...1274	833...1176	98...110	–	–	-5...0	7,0	7,9	Жоғары дәлдіктегі серпімді элементтер

5.4 кестесінің жалғасы

Марка	Шегі σв, МПа	Ағып кету шегі σ0.2, МПа	Серпімділік модулі Е, ГПа	Қатты серпімділік модулі G, ГПа	Температуралық аралық, °С	σ0.2-нің температуралық коэффициенті 10 ⁻⁶ /°С	Тығыздық, г/см ³	Қолдану саласы
Болат ШХ15	2200	1700	210	–	–	12,0	7,8	Жоғары дәлдіктегі серпімді элементтер (калыпты жағдай үшін)
Титан корытпасы Вт6	1000	900	120	–	-360	8,4	4,3	Жоғары әрекет жылдамдығындағы серпімді элементтер
Қола БрБ2 (ГОСТ 18175-72)	1300...1400	840...1200	128	–	–	8,3	8,23	Қалыпты жағдайдағы серіпшелер мен серпімді элементтер

Жез Л63 (ГОСТ 15527- 70)	380	110	105	–	-240	18,8	8,4	Инерциялық масса элемент- тері
Жез ЛС59- 1 (ГОСТ 15527- 70)	340	70	105	–	-240	21,0	8,5	Жоғарыдағы- дай (Инерци- ялық масса элементтері)
Алю- ми- ний- маг- ний қорыт- пасы АМгб	350	160	70	–	- 170...- 240	24,0	2,64	Жеңіл сал- мақты серпімді элементтер (жоғары беріктік және дәлдік қажет жағдайда)

Кейбір жағдайларда механикалық түрлендіргіш элементтер материалдарына арнайы талаптар қойылады. Мысалы, серпімді элементтің массасы минималды болуы тиіс. Бұл жағдайда дәлдік сипаттамаларына қойылатын талаптарды біршама төмендету арқылы АМгб алюминий қорытпасын немесе ВТ6 титан қорытпасын таңдауға болады. Инерциялық масса үшін, құрамында тығыздығы жоғары қорытпа қажет болғанда, мырышпен қосылған мыс қорытпасы – латунь таңдалады. Латунь жақсы құйылады, оңай соғылады, механикалық өңдеуге қолайлы, дәнекерлеу мен дәнекерлеуге оңай қабылдайды. Латуньдің кемшілігі – төмен серпімділік қасиеттері.

Соңғы кезде механикалық серпімді элементтерді жасау үшін металл емес материалдар, атап айтқанда, кварц әйнегі пайдаланыла бастады [6]. Оның қасиеттері: Серпімділік модулі – 14,5 ГПа; Пуассон коэффициенті – 0,17...0,19; Сығылуға беріктік шегі – 650 МПа; Созуға беріктік шегі – 60 МПа; Иілуге беріктік шегі – 110 МПа; Температуралық коэффициенті – $0,5 \cdot 10^{-6}$ 1/К; Жұмыс температурасының рұқсат етілген мәні – 1100 °С. Кварц әйнегі көптеген металдардан айырмашылығы оң температуралық серпімділік модулі коэффициентіне ие. Оның механикалық, ультрадыбыстық, электронды-сәулелік және басқа да өңдеу

түрлеріне жақсы икемділігі, электрлік емес шамалардың сенсорлары үшін әртүрлі түрлендіргіш элементтер жасауда перспективалы ететінін көрсетеді.

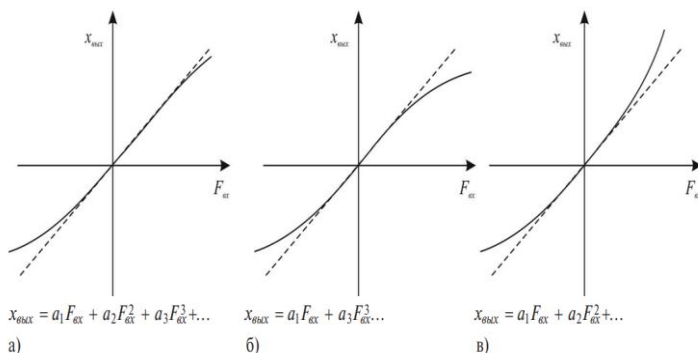
5.3. Серпімді элементтердің статикалық және динамикалық сипаттамалары

Серпімді элементтерге олардың статикалық жұмыс режимінде қойылатын негізгі талаптар: түрлендіру функциясының сызықтылығы (градуировкалық сипаттамасы), статикалық сипаттамалардың әсер етуші факторлар (әсіресе температура) әсерінен өзгермеуі, уақыт өте келе бұл сипаттамалардың тұрақтылығы және т.б.

Жалпы жағдайда, механикалық гистерезис, тұтқыр және серпімді кейінгі әсер сияқты факторларды есепке алмағанда, серпімді элементтің түрлендіру функциясы (5.3-сурет, а) келесідей болады:

$$x_{\text{вых}} = a_1 F_{\text{вх}} + a_2 F_{\text{вх}}^2 + a_3 F_{\text{вх}}^3 + \dots + a_n F_{\text{вх}}^m, \quad (5.2)$$

мұнда: $F_{\text{кiр}}$ – кіріс түрлендірілетін әсер; $x_{\text{шығыс}}$ – шығыс шамасы (жылжу немесе деформация); a_i – тұрақты коэффициенттер



5.3 – сурет. Механикалық серпімді түрлендіргіштердің түрлендіру функциялары

Механикалық серпімді түрлендіргіштердің көпшілігі симметриялы болып табылады, яғни олар бір де, екінші

таңбаның түрлендірілетін күштері әсер еткенде симметриялы деформацияға ұшырайды. Серпімді деформация кезіндегі симметрияның болуы F_m -дегі тақ дәрежелері бар тендеумен сипатталатын түрлендіру функциясының симметриясын қамтамасыз етеді (5.3-сурет, б). Симметриялы түрлендіргіштердің артықшылығы – дифференциалды режимде жұмыс істейтін, сызықты емес, бірақ симметриялы түрлендіру функциясы бар екі бірдей түрлендіргіш түрлендірілетін шаманың салыстырмалы кең шегінде іс жүзінде сызықты түрлендіру функциясын қамтамасыз етеді.

Симметриялы емес түрлендіру функциясы (конустық серіппелер және басқа симметриялы емес механикалық серпімді элементтер) F_{kip} -дегі жұп дәрежелері бар тендеумен сипатталады (5.3-сурет, в). Бұл функция екі бірдей түрлендіргіштің дифференциалды жұмыс режимінде сызықтандыруға да, басқа сызықтандыру әдістерін қолдануға да ыңғайсыз.

Серпімді элементтің түрлендіру функциясының практикалық сызықтылығының негізгі шарттарының бірі – материалдағы кернеулер 200...250 МПа-дан аспайтын жұмыс режимін қамтамасыз ету. Түрлендіру функциясының сызықтылығының айтарлықтай нашарлауынсыз түрлендірудің кең ауқымын алу үшін рұқсат етілген кернеулердің есептік шегі пропорционалдық шегінің шамамен жартысына тең мәнге дейін арттырылуы мүмкін.

Серпімді түрлендіргіштердің метрологиялық сипаттамаларын бағалау кезінде материалдардың механикалық гистерезис, ұзақ мерзімді деформация (тұтқыр кейінгі әсер), серпімді кейінгі әсер сияқты қасиеттерін ескеру қажет.

Серпімді элементтердің қателіктерінің негізгі көздерінің бірі – материалдың серпімді қасиеттерінің температураға тәуелділігі. Бұл жағдайда температураның өзгеруі, бір жағынан, серпімділік модулі мен ығысу модулінің өзгеруіне,

ал екінші жағынан, геометриялық өлшемдердің өзгеруіне әкеледі.

Температуралық қателерді бағалау үшін серпімді түрлендіргіштердің қатаңдығына арналған негізгі қатынастарды жазамыз.

Қадаған серіппелі элементтер мен арқалықтардың қаттылығы

$$W_T = k_1 \frac{GD^4}{l}, \quad (5.3)$$

Бұрама серіппелі элементтердің қаттылығы

$$W_T = k_2 \frac{GD^4}{l}, \quad (5.4)$$

Мұндағы k_1, k_2 – тұрақты коэффициенттер. Температураның $\Delta\theta$ -ға өзгеруі кезінде бұл элементтердің қаттылықтары сәйкесінше:

$$W'_k = k_1 \frac{Eh^3b(1 + \alpha_E \Delta\theta)(1 + \alpha_l \Delta\theta)}{l^3}; \quad (5.5)$$

$$W'_T = k_2 \frac{ED^4(1 + \alpha_G \Delta\theta)(1 + \alpha_l \Delta\theta)}{l}, \quad (5.6)$$

Жоғары ретті шамалардың аздығын ескермегендегі қаттылықтың салыстырмалы өзгерістері:

$$\delta W_k = (\alpha_E + \alpha_l) \Delta\theta; \quad (5.7)$$

$$\delta W_T = (\alpha_G + 3\alpha_l) \Delta\theta, \quad (5.8)$$

Мұндағы:

– α_E, α_G – серпімділік модулі мен ығысу модулінің температуралық коэффициенттері;

– α_l – сызықтық ұлғаюдың температуралық коэффициенті (анизотропиясыз деп есептеледі).

Көптеген материалдар үшін серпімділік модулі мен ығысу модулінің температуралық коэффициенттері сызықтық ұлғаю коэффициентінен шамамен бір реттік шамаға жоғары

болады. Бұл жағдайда, консольді серіппелі элементтердің температура өзгерген кездегі сызықтық өлшемдерінің өзгерісін ескермеуге болады. Алайда, торсионды серіппелі элементтер үшін, олардың температуралық қателігі 3α коэффициентімен анықталатындықтан, бұл құраушыны елемеуге болмайды.

Серіппелі элементтердің динамикалық сипаттамаларын бағалау үшін, механикалық серіппелі түрлендіргішті (5.4-сурет, а) бірінші жуықтауда екінші ретті сызықты жүйе ретінде қарастырады.

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + P_y \frac{dy}{dt} + Wy = F(t), \quad (5.9)$$

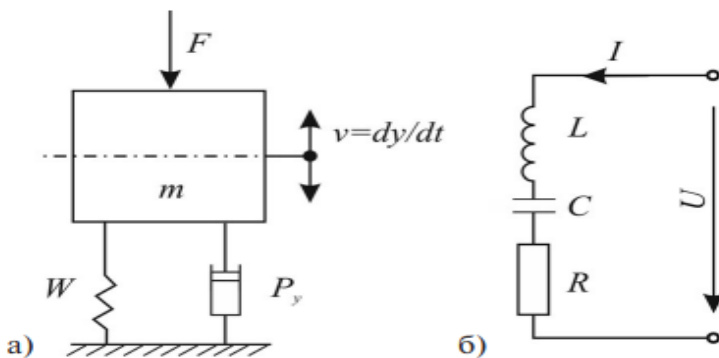
Мұндағы:

- $F(t)$ – түрлендірілетін кіріс әсері;
- y – осы әсер әсерінен пайда болатын жылжу;
- m – түрлендіргіш қозғалмалы бөлігінің массасы;
- P_y – тежелу коэффициенті;
- W – қаттылық.

Электромеханикалық аналогия әдісі бойынша (2-тарауды қараңыз), параллель жалғанған элементтерден тұратын механикалық жүйе, тізбектей жалғанған элементтері бар электр тізбегінің дифференциалдық теңдеуіне ұқсас дифференциалдық теңдеумен сипатталады (5.4-сурет, ә).

(5.9) теңдеуі мына түрде жазыла алады:

$$\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2\beta}{\omega_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{F(t)}{W}, \quad (5.10)$$



5.4-сурет. Механикалық серіппелі элемент динамикалық жүйе ретінде және оның электрлік аналогиясы

мұндағы $\omega_0 = \sqrt{\frac{W}{m}}$ – Өздік сөнген емес тербелістердің айналым жиілігі;

$\beta = \frac{P_y}{2\sqrt{Wm}}$ – Тыныштандыру дәрежесі.

Сәйкес туындылардың коэффициенттері уақыт тұрақтылары болғандықтан, олар сәйкесінше мынаған тең:

$$T_1 = \frac{2\beta}{\omega_0} \quad \text{и} \quad T_2 = \frac{1}{\omega_0^2}, \quad \text{то (5.10)}$$

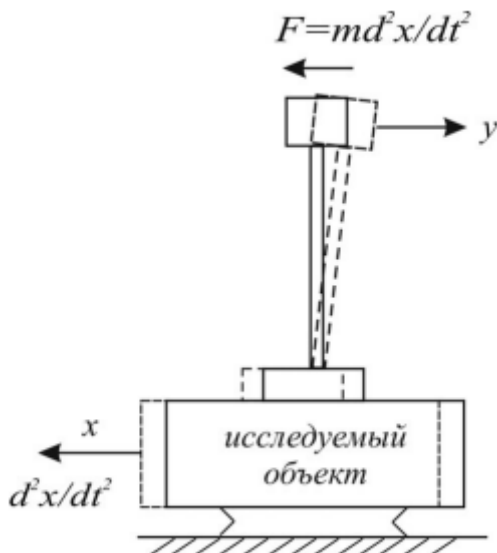
келесі түрге ие болады:

$$T_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} y = \frac{F(t)}{W}, \quad (5.11)$$

Кешенді жиіліктік сипаттама (кешенді түрлендіру коэффициенті) синусоидальды кіріс әсері кезінде

$$W(j\omega) = \frac{1}{W} \frac{1}{1 + j\omega T_1 - \omega^2 T_2^2}. \quad (5.12)$$

Серіппелі түрлендіру элементтерінің бір түрі – инерциялық серіппелі жүйе (5.5-сурет), ол виброметрлердің және акселерометрлердің бір түрінің біріншілік түрлендіру элементі ретінде қолданылады.



5.5-сурет. Инерциялық жүйенің динамикасы

Инерциялық жүйенің дифференциалдық теңдеуі

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + P_y \frac{dy}{dt} + W y = -m \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (5.13)$$

Немесе жоғарыда қабылданған белгілеулерді ескере отырып:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\beta\omega_0 \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = -\frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (5.14)$$

Мұндағы:

- m – инерциялық масса;
- x – объектінің түрлендірілетін жылжуы (вибрация);
- y – инерциялық массаның жылжуы.

Соңғы теңдеуден кешенді түрлендіру коэффициентін немесе кешенді сипаттаманы анықтауға болады.

$$W(j\eta) = \frac{\eta^2}{(1 - \eta^2) + j2\beta\eta}, \quad (5.15)$$

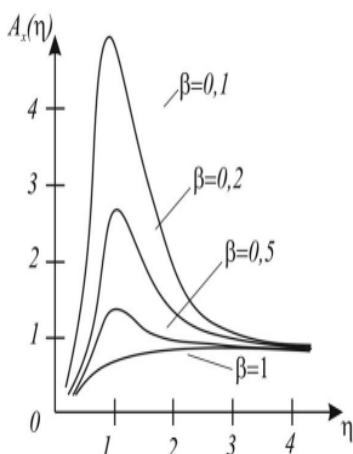
Амплитуда-жиілік сипаттамасы (АЖС)

$$A_x(\eta) = \frac{\eta^2}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2\beta\eta)^2}}, \quad (5.16)$$

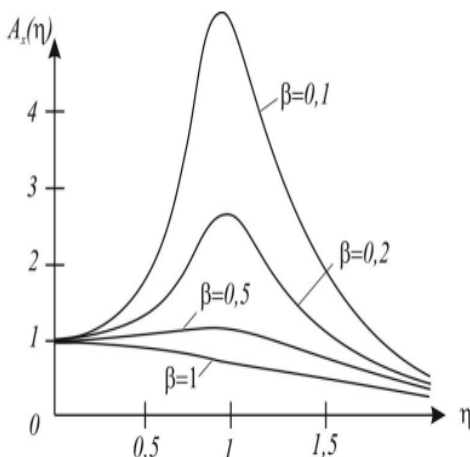
және фаза-жиілік сипаттамасы (ФЖС)

$$\varphi(\eta) = \arctg \frac{2\beta\eta}{1 - \eta^2}. \quad (5.17)$$

(5.16) теңдеуінен шығатыны, вибрацияны түрлендіруге арналған инерциялық жүйенің меншікті жиілігі зерттелетін объектінің вибрация жиілігінен айтарлықтай төмен болуы тиіс (5.6-сурет, а).



а)



б)

5.6-сурет. Инерциялық түрлендіргіштердің амплитуда-жиілік сипаттамалары

$$\eta = \frac{\omega}{\omega_0} \gg 1,$$

Бұл жағдайда, яғни амплитуда-жиілік сипаттамасы (АЖС) келесі түрде болады:

$$A_x(\eta)|_{\eta \gg 1} = 1, \quad (5.18)$$

Фаза-жиілік сипаттамасы (ФЖС)

$$\varphi(\eta)|_{\eta \gg 1} = -180^\circ, \quad (5.19)$$

инерциялық массаның орын ауыстыруы

$$y(t) = -x_{\max} \sin \omega t, \quad (5.20)$$

мұндағы $x_{\max}$ – зерттеліп отырған объектінің тербеліс амплитудасы.

Демек, бұл жағдайда инерциялық масса зерттеліп отырған объектіге қатысты және оған бекітілген виброметр корпусының өзіне қатысты тербеледі. Бұл тербеліс зерттеліп отырған объектінің тербеліс амплитудасына тең, бірақ фазасы бойынша 180° -қа қалып отырады.

Зерттеліп отырған объектінің жиілігі төмен болған жағдайда, яғни $\eta \ll 1$ болғанда, амплитуда-жиілік және фаза-жиілік сипаттамалары келесі түрге ие болады:

$$A_x(\eta)|_{\eta \ll 1} \approx \eta^2; \quad \varphi(\eta)|_{\eta \ll 1} = \arctg 2\beta\eta, \quad (5.21)$$

ал инерциялық массаның орын ауыстыруы

$$y = x_{\max} \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \sin(\omega t - \varphi) = \frac{1}{\omega_0^2} a_{\max} \sin(\omega t - \varphi), \quad (5.22)$$

мұндағы $a_{\max} = x_{\max} \cdot \omega^2$ – зерттеліп отырған объектінің үдеудің амплитудасы.

$$\frac{\omega}{\omega_0} \ll 1$$

Демек, $\frac{\omega}{\omega_0}$ инерциялық масса зерттеліп отырған объектінің үдеуіне пропорционал A_a амплитудасымен, $1/\omega_0^2$ масштабында тербелетін болады (5.6-сурет, б).

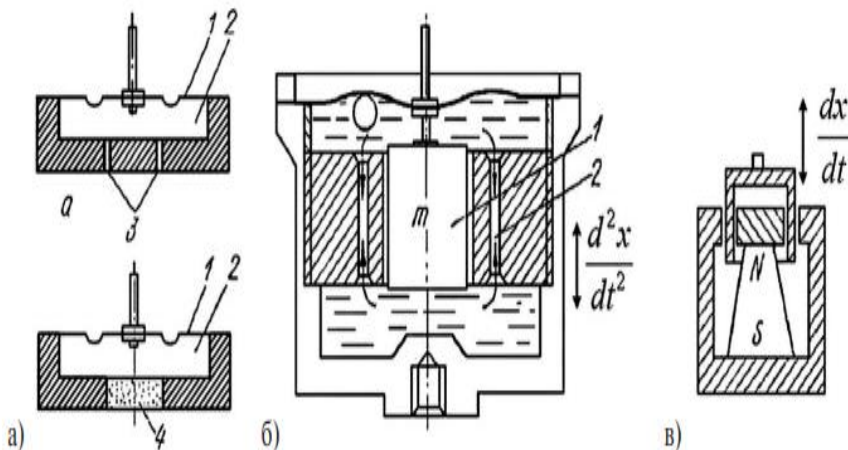
Бұл инерциялық жүйенің жұмыс режимі үдетуді түрлендіргіштерде қолданылады (13-тарауға қараңыз).

Жоғарыда қарастырылған теңдеулерден көрініп тұрғандай, механикалық серпімді түрлендіргіштердің динамикалық сипаттамалары оның жылжымалы бөлігінің массасына, қатаңдығына, меншікті тербеліс жиілігіне және баяулатқыш коэффициентіне, яғни түрлендіргіштің құрылымдық параметрлеріне толығымен тәуелді.

Механикалық серпімді түрлендіргіштердің баяулатылу дәрежесі, ішкі үйкеліс салдарынан, әдетте $\beta = 0,04 \dots 0,06$ мәнінен аспайды.

Жоғарырақ баяулатылу дәрежесіне қол жеткізу үшін баяулатқыштар қолданылады.

Кішкентай өлшемдер кезінде жетерлік үлкен баяулатушы күштер ауамен баяулататын құрылымдарда (5.7-сурет, а, б) алынуы мүмкін, мұнда



5.7-сурет. Баяулатқыштардың түрлері

Қозғалмалы бөлік қозғалған кезде баяулатқыштың 2-камерасындағы ауа түрлендіргіш корпусындағы 3-капиллярлық тесіктер немесе арнайы кеуекті керамикадан жасалған 4-ендірме кеуектері арқылы ығыстырылады.

Ауаның тұтқырлығы температураға аз тәуелді болғандықтан, мұндай түрлендіргіштің баяулатқыш коэффициентінің температуралық тұрақтылығы өте жоғары.

Сонымен қатар, ауаның серпімді элементтің тығыздығымен салыстырғанда тығыздығы өте аз болғандықтан, ауамен баяулатуда түрлендіргіштің қозғалмалы бөлігінің тиімді массасына ауаның массасы әсер етпейді [7].

Сұйықтықпен баяулатқыштардың басты артықшылығы – баяулатқыштың көлемі өте аз болған кезде де кез келген баяулатушы күштерді іс жүзінде шектеусіз алу мүмкіндігі.

5.7-сурет, в – сұйықтықпен баяулатқышы бар акселерометрдің құрылымы сызбалық түрде көрсетілген.

Қозғалмалы бөлік 1 тербелген кезде жоғарғы және төменгі камералар арасында 2-тар арналар арқылы сұйықтық қайта таралады.

Бұл арналардың қимасының ауданына байланысты (қалған жағдайлар бірдей болғанда), баяулатудың әртүрлі дәрежесіне қол жеткізуге болады.

Механикалық серпімді элементтері бар құрылғыларда сондай-ақ магнитоиндукциялық баяулатқыштар (5.7-сурет, г) қолданыла алады. Олар баяулатқыш коэффициенті R_u -дың жеткілікті жоғары тұрақтылығымен ерекшеленеді, әрі оның мәні құрылымдық параметрлерге сүйене отырып оңай есептеледі [7].

Әдебиеттер тізімі

1. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. – М.: Машиностроение, 1981. – С. 392.
2. Водяник В.И. Эластичные мембраны. – М.: Машиностроение, 1974. – С. 136.
3. Заплетохин В.А. Конструирование деталей механических устройств: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1990. – С. 669.
4. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – С. 320.
5. Осадчий Е.П., Тихонов В.И. и др. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. – С. 480.
6. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи. – Киев: Вища школа, 1981. – С. 96.
7. Полищук Е.С., Дорожовец М.М., Яцук В.О., Ванько В.М., Бойко Т.Г. Метрология и измерительная техника / Под ред. проф. Е.С. Полищука. – «Бескид-Біт», 2003. – 544.
8. Пономарев С.Л., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. – М.: Машиностроение, 1980. – С. 208.
9. Андреева Л.Е., Беседа А.И. и др. Сильфоны. Расчет и проектирование. – М.: Машиностроение, 1975. – С. 156.

МАЗМҰНЫ

Алғы сөз	3
I ТАРАУ НЕГІЗГІ ҰҒЫМДАР МЕН АНЫҚТАМАЛАР. ДАТЧИКТЕРДІҢ ЖІКТЕЛУІ	5
1.1. Терминдер мен анықтамалар	6
1.2. Датчиктердің жіктелуі	11
1.3. Физикалық шамалар датчиктерінде қолданылатын кейбір физикалық эффектілер	21
Әдебиеттер тізімі	27
2 ТАРАУ ӨЛШЕУІШІ ТҮРЛЕНДІРГІШТЕРДІҢ ДАТЧИКТЕРДІҢ) ЖАЛПЫ ТЕОРИЯСЫНЫҢ ЭЛЕМЕНТТЕРІ	
2.1. Жалпы мәліметтер	32
2.2. Жалпыланған генераторлық түрлендіргіш	35
2.3. Электромеханикалық ұқсастық әдісі	38
Әдебиеттер тізімі	49
3 ТАРАУ СЕНСОРЛЕРДІҢ СИПАТТАМАЛАРЫ	
3.1. Жалпы мәліметтер	50
3.2. Статикалық сипаттамалар	51
3.3. Метрологиялық сипаттамалар	59
3.4. Динамикалық сипаттамалар	66
3.5. Типтік динамикалық буындар	75
Әдебиеттер тізімі	76

4-ТАРАУ СЕНСОРЛЫҚ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ҚҰРЫЛЫСТАР

4.1. Жалпы мәліметтер	78
4.2. Операциялық күшейткіш	79
4.3. Заряд күшейткіштері	97
4.4. Аналогты-сандық түрлендіргіштер	109
4.5. Сигнал генераторлары	121
Әдебиеттер тізімі	130

5-ТАРАУ СЕЗІМДІ ДАТЧИК ЭЛЕМЕНТТЕРІ

5.1. Негізгі түрлері және есептеу қатынастары	132
5.2. Серпімді элементтердің материалдары	142
5.3. Серпімді элементтердің статикалық және динамикалық сипаттамалары	146
Әдебиеттер тізімі	156

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 4,2
Таралымы 100