

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

Жүніс Нариман Арманбекұлы

«Дірілге және соққыға төзімді микромеханикалық гироскоптарды талдау»

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

5В071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация мамандығы

Алматы 2022 ж.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ

Кафедра меңгерушісі

 Е. Таштай

« 24 » 05 2022 ж.

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы: «Дірілге және соққыға төзімді микромеханикалық гироскоптарды талдау»

5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация мамандығы

Орындаған:

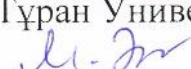
Жүніс Нариман Арманбекұлы

Пікір беруші

КЖПИ каф. меңгерушісі

PhD докторы

Тұран Университеті



М. Жасандықызы

« 24 » 05 2022 ж.

Ғылыми жетекші

ЭТЖҒТ каф. лекторы,

техн. ғыл. Магистры

ҚазҰТЗУ

 С. Марксұлы

« 24 » 05 2022 ж.

Алматы 2022 ж.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация

БЕКІТЕМІН

Кафедра меңгерушісі

 Е. Таштай

« 21 » XII 2021 ж.

**Дипломдық жұмыс орындауға
ТАПСЫРМА**

Білім алушы *Жүніс Нариман Арманбекұлы*
Тақырыбы *«Дірілге және соққыға төзімді микромеханикалық гироскоптарды талдау»*

Университет ректорының *«24» желтоқсан 2021 ж. №489-П бұйрығымен* бекітілген.

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі *«30» сәуір 2022 ж.*

Дипломдық жұмыстың бастапқы берілістері:

1) *Микромеханикалық гироскоптардың қазіргі жағдайы;* 2) *Екі компонентті микромеханикалық гироскоптың функционалдық схемасы;* 3) *Екі компонентті микромеханикалық гироскоптың динамикалық сипаттамалары;*

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

а) *Микромеханикалық гироскоптардың қазіргі жағдайы;* б) *Екі компонентті гироскоптың математикалық моделі;* в) *Микромеханикалық гироскоптың соққы әсеріне сезімталдығын талдау;* г) *Гироскопты MatLab Simulink бағдарламасы арқылы элементтік модельдеу.*




Сызбалық материалдар тізімі (міндетті сызбалар дәл көрсетілуі тиіс):

Ұсынылатын негізгі әдебиет 20 атау: 1) *Сысоева С. Автомобильные гироскопы / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2017. – №1. – С. 58 – 66.* 2. *Barbour N. Inertial MEMS System Applications / N. Barbour [et al.] // Advances in Navigation Sensors and Integration Technology. RTO LECTURE SERIES 232. – 2018. – pp.7-1–7-12.* 3. *Srikar V. T. The reliability of microelectromechanical systems (MEMS) in shock environments / V.T. Srikar, S.D. Senturia // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2012. – vol. 11 – pp. 206 – 214.*

дипломдық жұмысты (жобаны) дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерзімі	Ескерту
Диплом жұмысының тақырыбын талдау	04.01.2022 - 01.02.2022	орындалды
Теориялық ақпарат	01.02.2022 - 01.03.2022	орындалды
Жабдықтар жұмысының есебі және жұмысты рәсімдеу	01.03.2022 - 30.05.2022	орындалды

Дипломдық жұмыс (жоба) бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жұмысқа(жобаға) қойған
қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Диплом жұмысының тақырыбын талдау	Марксұлы С. ЭТЖҒТ каф.лекторы, т.ғ.м.	10.03.2022	
Теориялық ақпарат	Марксұлы С.ЭТЖҒТ каф.лекторы, т.ғ.м.	15.04.2022	
Норма бақылау	Смайлов Н.К., ЭТЖҒТ каф. қауым.профессоры, PhD	12.05.2022	

Ғылыми жетекшісі

Тапсырманы орындауға алған білім алушы




Марксұлы С.

Жүніс Н.А.

Күні «13» желтоқсан 2021 ж.

АҢДАТПА

Бұл дипломдық жұмыс «Дірілге және соққыға төзімді микромеханикалық гироскоптарды талдау» тақырыбына жазылды. Дипломдық жұмыс үш бөлімнен тұрады. Бірінші бөлімде, әдебиеттерді талдау көрсеткендей, нарықта көптеген ММГ арасында көптеген өндірушілер олардың діріл мен соққыға төзімділігін көрсетпейді, ал кейбір аудандардағы бұл көрсеткіштер негізгі болып саналады.

Екінші бөлімде, базалық прогрессивті діріл ММГ сенсорының тербелістерін ақпараттық тербелістерге сәйкес келетін діріл жиілігімен тудырады. ММГ антифазалық біріншілік тербелістерін қолдану шығыс ақпаратында діріл үдеулерінің әсерін азайтуға мүмкіндік береді. ММГ меншікті жиіліктері діріл әсерінің жиілік диапазонынан асып түседі, бұл резонанстардың туындау мүмкіндігін болдырмайды.

Үшінші бөлімде, ММГ сенсорының математикалық моделі әзірленді және Simulink бағдарламасында оны модельдеу жүргізілді.

Дипломдық жұмыста қойылған мақсаттарға қол жеткізілді.

АННОТАЦИЯ

Данная дипломная работа написана на тему «Анализ ударопрочных микромеханических гироскопов». Дипломная работа состоит из трех разделов. В первой части, как показывает анализ литературы, среди множества ММГ на рынке многие производители не указывают на их вибро - и ударопрочность, а в некоторых районах эти показатели считаются основными.

Во второй части базовая прогрессивная вибрация вызывает колебания датчика ММГ с частотой вибрации, соответствующей информационным колебаниям. Применение антифазных первичных колебаний ММГ позволяет уменьшить влияние вибрационных ускорений в выходной информации. Собственные частоты ММГ превышают частотный диапазон вибрационного воздействия, что исключает возможность возникновения резонансов.

В третьей части разработана математическая модель датчика ММГ и проведено его моделирование в программе Simulink.

Цели, поставленные в дипломной работе, достигнуты.

ANNOTATION

This thesis is written on the topic «Analysis of vibration and shock-resistant micromechanical gyroscopes». The thesis consists of three sections. In the first part, as the analysis of the literature shows, among the many MMGs on the market, many manufacturers do not indicate their vibration and impact resistance, and in some areas these indicators are considered the main ones.

In the second part, the basic progressive vibration causes vibrations of the MMG sensor with a vibration frequency corresponding to information fluctuations. The use of antiphase primary vibrations of MMG makes it possible to reduce the influence of vibration accelerations in the output information. The natural frequencies of MMG exceed the frequency range of vibration exposure, which eliminates the possibility of resonances.

In the third part, a mathematical model of the MMG sensor was developed and its simulation was carried out in the Simulink program.

The goals set in the thesis have been achieved.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	9
1 Микромеханикалық гироскоптардың діріл мен соққыға төзімділігін арттыру әдістеріне әдеби шолу	10
1.1 Механикалық әсерлер	10
1.2 Микромеханикалық гироскоптар әзірлемелерінің қазіргі жай-күйі	14
2 Екі компонентті микромеханикалық гироскопқа механикалық әсердің әсерін талдау	22
2.1 Екі компонентті микромеханикалық гироскоптың функционалдық схемасы	22
2.2 Екі компонентті гироскоптың математикалық моделі	24
2.3 Екі компонентті микромеханикалық гироскоптың динамикалық сипаттамалары	28
2.4 Микромеханикалық гироскоптың діріл әсеріне сезімталдығын талдау	38
2.5 Микромеханикалық гироскоптың соққы әсеріне сезімталдығын талдау	45
3 Діріл мен соққыларға төзімді бір компонентті микромеханикалық гироскопты талдау	54
3.1 Микромеханикалық гироскоптың функционалдық схемасы және математикалық моделі	54
3.2 Микромеханикалық гироскоп сенсорының конструкциясы және модальды талдауы	56
3.3 Гироскопты математикалық модельдеу	59
Қорытынды	68
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	69

КІРІСПЕ

Қазіргі уақытта микроэлектромеханикалық жүйелер (МЭМЖ) нарығы қарқынды дамып келеді және микроэлектрониканы дамытудың перспективалы бағыты болып табылады. Бүгінгі таңда осы нарықтың ең дамыған сегменті әлі де инерциялық сенсорлар (бұрыштық жылдамдық сенсорлары, инклинометрлер және акселерометрлер) болып табылады. Бұл объектінің қозғалысын анықтаудың жоғары тиімділігі көптеген салаларда қызығушылық тудыратындығына байланысты.

МЭМЖ сенсорларын қолдану ауқымы үнемі артып отырады, сондықтан мұндай өнімдердің сапасы мен миниатюралануын қамтамасыз ету өзекті және маңызды бола түсуде.

Микроэлектромеханикалық гироскоптың (ММГ) жұмысы кезінде оның дәлдігіне сыртқы және ішкі бұзушы әсерлер әсер етеді. Сыртқы әсерлерге микромеханикалық бөлікті өндірудің технологиялық қателіктері, қоршаған орта температурасының өзгеруі, сондай-ақ діріл мен соққы сияқты сыртқы механикалық әсерлер жатады. Ішкі бұзылуларға механикалық (айқаспалы демпфирлеу және айқаспалы қаттылық) немесе электрлік сипатқа (паразитті сыйымдылықтар, электростатикалық байланыстар) ие болуы мүмкін микрогироскоптағы паразиттік байланыстар жатады.

Микромеханикалық сенсорлар қатты жағдайда жұмыс істеген кезде, механикалық бұзылулардың әсерінен жылжымалы элементтердің қажетсіз қозғалыстары орын алуы мүмкін, бұл жалған шығыс сигналдарының пайда болуына әкеледі. Сонымен қатар, құрылымдық деформациялар пайда болады, кернеулер артады.

Микромеханикалық гироскоптар азаматтық және әскери техниканың әртүрлі жабдықтарында кеңінен қолданылады. МЭМЖ датчиктерінің сипаттамалары мен көрсеткіштеріне қойылатын қазіргі заманғы талаптар көбінесе сыртқы әсер ету факторларының неғұрлым жоғары деңгейімен, атап айтқанда діріл мен соққы параметрлерінің неғұрлым кең ауқымымен ерекшеленетін қолдану салаларының кеңеюіне байланысты үнемі артып келеді [1, 2, 3]. Әсер ету параметрлерінің кеңейтілген диапазондарында дәлдік көрсеткіштері мен басқа да пайдалану сипаттамаларын сақтайтын микромеханикалық құралдарға қажеттілік ұңғымаларды ұңғылау кезінде жер асты навигациясы, әскери техника, құрылыс, барлық көлік құралдары, теміржол және автожол шаруашылығы сияқты салаларда бар. [4, 5, 6, 7]. Бұл ретте аса қатаң жағдайларда МЭМЖ датчиктерінің тұрақтылығын қамтамасыз ету (сыртқы әсер ету кезінде жұмыс қабілеттілігі мен дәлдік көрсеткіштерін сақтау) талап етіледі [8].

1 МИКРОМЕХАНИКАЛЫҚ ГИРОСКОПТАРДЫҢ ДІРІЛ МЕН СОҚҚЫҒА ТӨЗІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ӘДІСТЕРІНЕ ӘДЕБИ ШОЛУ

Микромеханикалық гироскоптардың үлкен артықшылықтары -дизайнның қарапайымдылығы, шағын өлшемдері, салмағы аз, энергияны аз тұтыну, айналмалы бөліктердің болмауы, бұл олардың жұмысын жақсартады және техникалық қызмет көрсету талаптарын азайтады.

Микромеханикалық гироскоптардың қолдану аясы өте кең: медицинада хирургияда, интеллектуалды протездеу жүйелерінде микро құралдарды дәл орналастыруға арналған құрал ретінде; навигациялық жүйелерді құруға арналған автомобиль өнеркәсібінде; оқ-дәрілер мен жауынгерлік роботтарды басқару жүйелерінде, ұшқышсыз ұшу аппараттарында; ұялы телефондардағы, ойын консольдеріндегі және әртүрлі тренажерлердегі тұрмыстық техникада және т.б. [10, 11].

Жоғары жылдамдықты және жоғары қысымды объектілерде пайдалану кезінде ММГ кеңінен қолданылуына байланысты олар қарқынды соққы және діріл әсерінің болуы жағдайында жұмыс істейді, сондықтан механикалық әсерлер кезінде ММГ тұрақтылығын қамтамасыз ету өзекті болып табылады.

1.1 Механикалық әсерлер

Механикалық әсерлер соққы және діріл болып табылады.

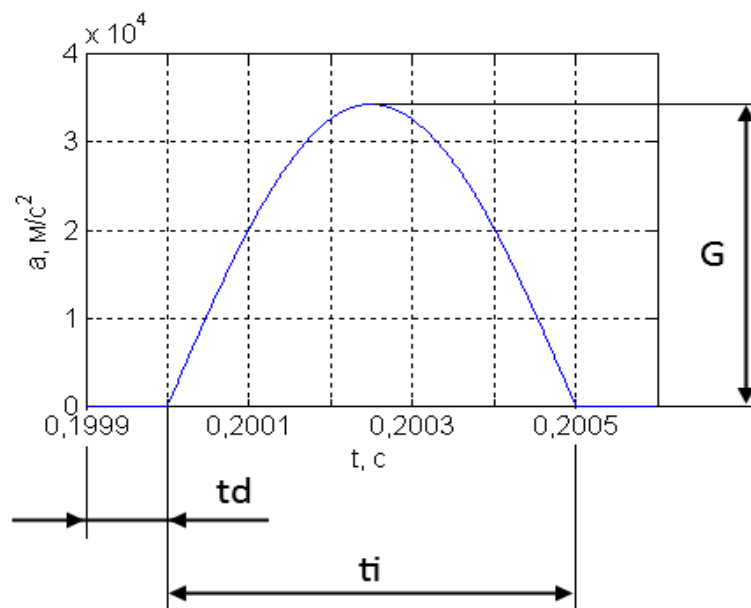
Соққы әсері күшті немесе кинематикалық болуы мүмкін. Күштің қозуы қоздырғыш күштің микромеханикалық жүйеге тікелей әсерімен сипатталады. Кинематикалық қозу кезінде микромеханикалық жүйенің жеке нүктелерінің қозғалыс заңдары берілген (мысалы, сенсор субстратының қозғалыс заңы).

Соққы - бұл үлкен соққы күштерінің пайда болуымен бірге жүретін қысқа уақыт ішінде қозғалыс мөлшерінің соңғы өзгеруімен байланысты жүктеме. Соққы өте күрделі физикалық құбылыс. Соққы әсерін талдау микромеханикалық элементтерде пайда болатын деформациялар мен механикалық кернеулерді анықтауға бағытталған. Соққы нәтижесінде тербелмелі қозғалыс пайда болады.

Соққы жүктемелері үдеу мөлшерімен, соққының ұзақтығымен және соққы импульсінің пішінімен сипатталады. Соққы импульсі өзара әрекеттесу өлшемін білдіреді және уақыт бойынша жүктеме қисығының астындағы ауданға тең [12].

$$S_{уд} = \int F \cdot dt$$

мұндағы $F(t)$ – соққы күші уақытының өзгеру заңы. Соққы импульсінің формасы - соққы үдеуінің $a(t)$ уақытқа тәуелділігі (1.1-сурет).

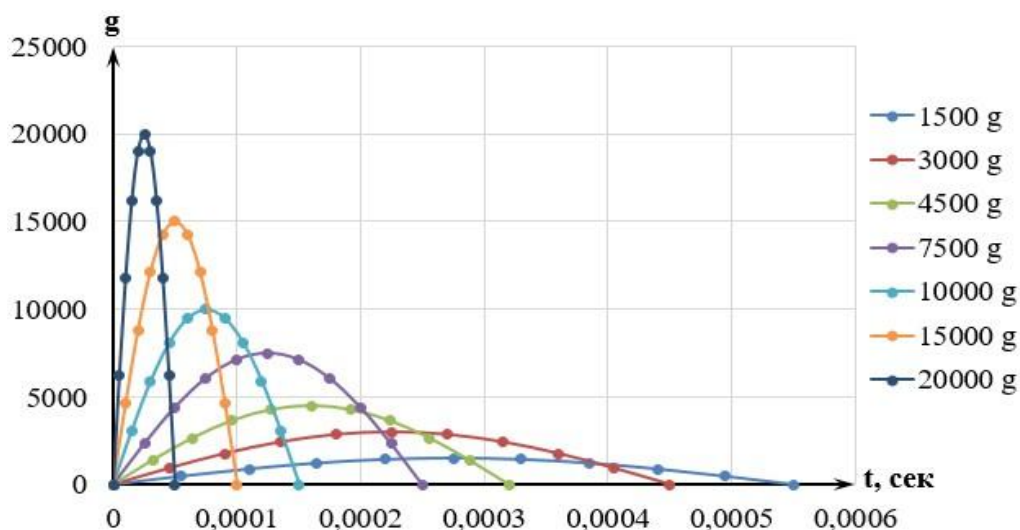


1.1 Сурет – Соққы импульсі

Соққы импульсінің амплитудасы соққы үдеуінің максималды мәні деп аталады. Соққы импульсінің ұзақтығы (t_i) импульстің әсер ету уақытының аралығы деп аталады. G - соққы импульсінің амплитудасы, t_d - соққы импульсін бастамас бұрын кідіріс.

Байланыс күшін қолдану жылдамдығына байланысты соққы жүктемесін квазистатикалық немесе соққы ретінде қарастыруға болады. Жүйенің реакциясы, яғни базадан соққы кинематикалық әсер ету кезінде массаның үдеуі үдеу импульсімен әр түрлі болуы мүмкін.

Соққы жүктемелерін амплитудалардың кең ауқымына (20g-ден 100000g-ге дейін және одан да көп) (1.2-сурет), кең уақыт диапазонына (50-ден 6000 мкс-ға дейін) [13], сондай-ақ олардың айтарлықтай дәрежеде болжанбайтын және өзгермелі формасына (импульс, жартылай толқын және т.б.) байланысты сандық сипаттау қиын [14].



1.2 Сурет – Соққы тапсырмасы

Қалыпты жағдайда, мысалы, еркін құлау, объект бетіне тигенге дейін 1g үдеуін сезінеді. Қатты бетке тиген кезде объект айтарлықтай әсер етуі мүмкін. 1 метрден қатты бетке құлаған кезде (~2000g), 25 метрден қатты бетке құлаған кезде (~7000g) [15]. Автокөліктің қауіпсіздік жастықшаларын іске қосу сенсорлары 20-дан 50g-ге дейін, ал жанармай қоспасының детонация сенсоры 1000g-ге дейін жұмыс істеуі керек [16, 17]. Басқа автомобиль қосымшалары Сенсорлардан 3000g дейін соққы әсеріне төтеп беруді талап етеді [18]. Мұнай мен газды барлау үшін қолданылатын датчиктер 20000g соққысына төтеп беруі керек [19]. Әскери қолдану кезінде оқ-дәрілерді іске қосу кезінде 10000-нан 100000g-ге дейін үлкен соққы амплитудасы пайда болады [20, 21], ал оқ-дәрілердің өзі ұшу кезінде (20 g-ге дейін) амплитудалық соққыларды едәуір төмендетеді [22]. 1.1-кестеде әртүрлі нысандардағы соққылардың параметрлері көрсетілген.

1.1 Кесте - Соққы әсерінің сипаттамалары

	Қолдану	Соққы амплитудасы
Ауырлық күшінің әсерінен еркін құлау	Бетімен жанасқанға дейін еркін құлау	1g
	1 метрден қатты бетке құлау	~ 2000g
	25 метрден қатты бетке құлау	~7000g
Автотранспорт	Қауіпсіздік жастықтарындағы акселерометрлердің жұмыс ауқымы	50g
	Отын қоспасының детонация датчигі	1000g
	Автомобильдерде пайдалануға арналған датчиктерге қойылатын талаптар	<3000g
Пайдалы қазбаларды өндіру	Мұнай және газоразведка	20000g
Әскери қолдану	Орудиялық от	23000g

Танктен, артиллериядан және минометтен оқ-дәрілердің жарылуы	10000-100000g
Танктерден, артиллериядан және минометтен ұшырылғаннан кейін оқ-дәрілердің ұшуы	0,5-20g

Механикалық діріл дегеніміз-бұл құрылғының өтпелі кезеңдерімен салыстырғанда жеткілікті ұзақ уақытқа созылатын тербелмелі қозғалыс.

Күнделікті өмірде жер үсті көлігінде, кәсіпорындарда және діріл сынақтарында шығарылатын діріл әдетте бірлік Гц-тен бірнеше кГц-ке дейінгі диапазонда болады [23, 24, 25, 26].

Ең үлкен амплитудалық тербелістер ауыр жағдайларда, әсіресе ғарыштық ұшуларда немесе әскери қолдануда пайда болады. Ғарыш кемесі ғарыштық орбитада тұрақты болған кезде, тербелістердің меншікті жиілігі 3 Гц-тен аспайды [27, 28], бірақ ұшыру кезінде 10 кГц-ке дейінгі жиіліктегі үлкен тербелістер пайда болады [29]. Әскери ұшақтар ұшу кезінде 2000 гц-тен аспайтын діріл жасайды [30], ал ұшу кезінде зымырандардағы діріл жиілігі 50 кГц-ке дейін жетуі мүмкін [31] (1.2-кесте).

1.2 Кесте - Түрлі ортада басым діріл жиілігі

Қолданылуы	Басым жиілік спектрі
Жер үсті көлігі	Қозғалу кезіндегі машина0-400 Гц
	Жедел жәрдем2-500 Гц
	Поезд1-1000 Гц
	Кейбір автомобиль сенсорларына қойылатын талаптар 100-2000 Гц
Кәсіпорындар	Айналмалы машиналар (қозғалтқыштар, желдеткіштер) <1000 Гц
Дірілді талдау	Діріл үстелі10-20000 Гц
Ғарыш	Орбитадағы ғарыш аппараты 0,1-3 Гц
	Ғарыш кемесі ұшыру кезіндеКездейсоқ діріл: 20-2000 Гц Өтпелі кезеңдер: <60 Гц Пиротехникалық соққы: 10-10000 Гц
Әскери қолдану	Ұшу кезіндегі әскери ұшақ 100-2000 Гц
	Ұшу кезіндегі ракета 0-50000 Гц

1.2 Микромеханикалық гироскоптар әзірлемелерінің қазіргі жай-күйі

МЭМЖ сенсорларын жасаушылар діріл мен соққыға төзімділікті қамтамасыз етудің әртүрлі әдістерін қолданады. Олар: амортизаторларға МЭМЖ датчиктерін орнату; бұрыштық қозғалыстары бар микрогироскоптардың схемаларын пайдалану; көп массалық жүйелерді қолдану; антифазалық қозғалысты пайдалану; конструктивтік тәсілдер (тіреулер мен шектегіштерді қолдану); өзіндік жиіліктерді арттыру; микроакселерометрлердің көрсеткіштері бойынша микрогироскоптарды түзету.

Өкінішке орай, нарықтағы көптеген ММГ арасында көптеген өндірушілер олардың діріл мен соққыға төзімділігін көрсетпейді, ал кейбір аудандардағы бұл көрсеткіштер негізгі болып саналады.

2002 жылдан бастап АҚШ-та HERMiT (Harsh Environment Robust Micromechanical Technology) бағдарламасы әзірленуде, ол бастапқыда қолайсыз пайдалану жағдайларында микромеханикалық аспаптардың ішкі ортасын корпустаудың және бақылаудың жаңа технологиясын жасауға бағытталған [32, 33].

Осы бағдарламаны орындау барысында оның маңызды бағыттарының бірі жоғары соққы және діріл мәндерінде ММГ жұмыс қабілеттілігін қамтамасыз ету болды.

Әр түрлі типтегі микромеханикалық гироскоптардың дизайнында ортақ белгілері бар. Бұл:

Үш өзара перпендикуляр осьтер бойымен сенсордың аудармалы қозғалысын қамтамасыз ететін серпімді аспалардың болуы; аспалар иілу үшін соңғы қаттылыққа және бұралу үшін шексіз болуы керек;

Монолитті құрылымды жасау үшін кремний гироскопының сенсорларын қолдану, ол аз диссипативті шығындарға ие, сондықтан вакуумдау кезінде кез-келген дизайн резонанстық қасиеттерге ие, ол гироскопта тербелістерді ондаған мың есе резонанстық күшейту үшін қолданылады;

Тарақ тәрізді электродты құрылымдарды атқарушы және басқарушы элементтер ретінде пайдалану;

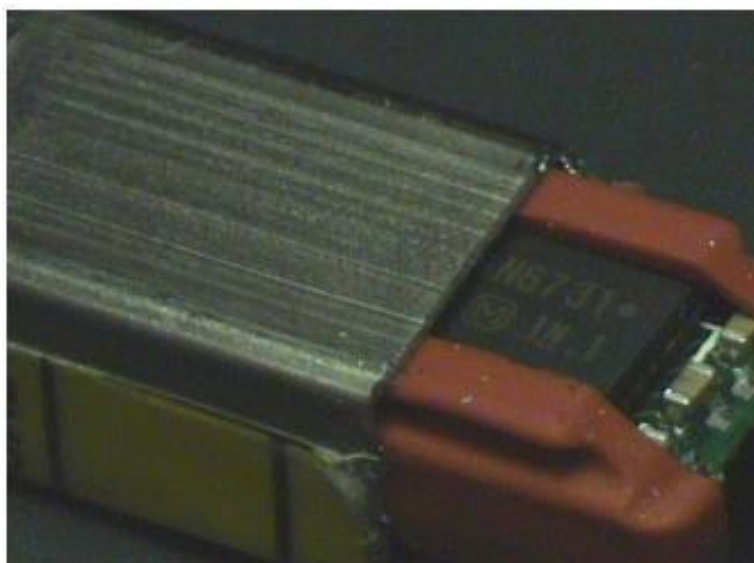
Жоғары аяқас қаттылықтың қажеттілігі және тербелістердің жиілік диапазонында резонанс болмауы;

Соққы кезіндегі инерция күштерінің әсерінен серпімді қозғалыстар елеусіз болуы керек және соққы кезінде контактілер болмауы керек;

Таңдалған қалыңдық кезінде аспаның серпімді элементтерінің ұзындығы мен енін негізделген таңдау арқылы, сондай-ақ олардың конфигурациясын өзгерту және құрылымын қиындату арқылы сенсор құрылымының табиғи жиіліктерінің қажетті мәндерін алу.

ММГ механикалық кернеуге төзімділігін арттырудың ең көп таралған стратегиясы механикалық дірілге қарсы қондырғы болып табылады. Бұл ММГ орналастырылған қарапайым резеңке немесе пластикалық төсемдер немесе қабықшалар болуы мүмкін [34] (1.3 - сурет) немесе «вафли» деңгейінде

орындалған діріл оқшаулағыштары бар арнайы микроплатформалар [35], немесе барлық инерциялық модульге арналған дірілден қорғайтын корпусстар [36].



1.3 Сурет - Резеңке дірілге қарсы қондырғысы бар Panasonic автомобиль гироскопы

Сонымен қатар, дірілге қарсы қондырғыларды жобалау өте қиын, өйткені олар кең жиілік диапазонында жұмыс істемейді (әсіресе төмен жиіліктерде нашар жұмыс істейді). Дірілге қарсы қондырғылар белгілі спектрдегі тар жолақты тербелістерді босату үшін сәтті жобалануы мүмкін және кең жолақты діріл болуы мүмкін кез-келген әмбебап қолдану үшін проблемалы.

Ең көп тарағаны - құрылымдық элементтер аудармалы қозғалыс жасайтын LL типті гироскоптар, құрылымдық элементтер бұрыштық қозғалыс жасайтын RR типті гироскоптар LR типті гироскоптар.

Трансляциялық дірілге ең сезімталы - LL типті гироскоптар, әсіресе табиғи жиілік диапазонында. Сондықтан, мұндай конструкцияларда діріл үдеуіне төзімділікті арттыру үшін жергілікті жиіліктер жұмыс жиіліктерінің деңгейінен жоғары көтеріледі, алайда бұл тәсіл гироскоптың Кориолис үдеуіне, демек, бұрыштық жылдамдыққа сезімталдығын төмендетеді.

Мінсіз күйде RR типті гироскоп аударма үдеуі мен діріліне сезімтал емес. Алайда, технологиялық қателіктер мен үдеудің осьтеріндегі бұралу аспаларының түпкілікті қаттылығын ескере отырып, гироскоптардың мұндай түрлерінде әр түрлі сызықтардың, ең алдымен аспаның болуына байланысты дірілдің Шығыс сигналына әсерін өтеу қиынырақ болады. LR типті гироскоптар алдыңғы екі схеманың артықшылықтары мен кемшіліктерін біріктіреді [37].

ММГ дірілге тұрақтылығын арттыру әдістерінің бірі біріншілік тербеліс арнасында инерциялық денелердің (ИД) антифазалық қозғалысын қолдану болып табылады, бұл инерциялық үдеулердің әрекеті өтелетін өлшеудің дифференциалды режимін пайдалануға мүмкіндік береді [38].

Екі ИД бар ММГ-ның жарқын мысалдары ADXRS150 (LL-тип, Analog Devices) [39], SAR 500 (RR-тип, Sensorog) [40] және Draper Laboratory (LR-тип) шанышқы гироскопы болып табылады [41].

Бұл ММГ-де инерциялық денелер бір жазықтықта орналасқан. Олар бір-бірінен жоғары орналасқан кезде және кері электр байланыстарын қолданған кезде ММГ сызықтық үдеулерге тұрақтылығы артады, мысалы, Robert Bosch GmbH [42].

Механикалық тұрақтылық көрсеткіштерін жақсарту үшін бұрыштық еркіндік дәрежесі бар бірнеше ИД [43, 44] бар ММГ схемалары қолданылады. 2011 жылы Analog Devices фирмасы ММГ ADXRS646 дамуын ұсынды, сызықтық үдеулер мен дірілге сезімталдығы төмендеді, бұл олардың арасындағы механикалық байланысы бар төрт ИД пайдалану арқылы қол жеткізілді [37, 45].

Алайда, ММГ көп массалық жүйелерін жасау кезінде ИД меншікті жиіліктерінің теңдігін жоғары дәлдікпен қамтамасыз ету қажет. Байланыссыз ИД үшін бұл шарттың орындалуы сенсор өндірісінде фотолитография және кремнийді өңдеу технологиясының дәлдігімен шектеледі. Қолданыстағы өндіріс дәлдігімен параметрлердің сәйкес келмеуі 1% құрайды; жоғары дәлдікке қол жеткізу үшін арнайы түзету құралдарын қолдану қажет [46]. Гироскопта инерциялық денелер арасында механикалық байланыс болған кезде діріл мен үдеуге сезімталдықты төмендету үшін серпімді аспадағы ИД антифазалы және фазалық тербелістерінің жиілігін бөлу әдісі ұсынылады [47].

ММГ жұмыс істеу принципіне сүйене отырып, ММГ-ның діріл мен соққыға төзімділігін арттырудың тиімді әдісі - оның жиілігін арттыру. 1.3-кестеде кейбір өндірушілердің ММГ-де ИД тербелістерінің бірінші (төменгі) меншікті жиіліктері бойынша деректер келтірілген. ИД табиғи жиілігінің артуы ММГ біріншілік және ақпараттық тербелістерінің амплитудасын төмендетеді [46, 48], бұл гироскоптың өлшенетін бұрыштық жылдамдыққа сезімталдығының төмендеуіне әкеледі [37, 49].

1.3 Кесте – Өртүрлі өндірушілердің ММГ-дағы ИД тербелістерінің төменгі меншікті жиіліктері

Өндіруші - фирма	ММГ моделі	ММГ төменгі меншікті жиілігі, кГц
InvenSense	ISZ-1215	30
Silicon Sensing	CRS09	28
STMicroelectronics	L2G2IS	20
Analog Devices	ADXRS646	17,5
	ADXRS150	14
Kionix	KGF01	10

Sensoror	SAR100 (ButterflyGyro™)	9,4
Melexis	MLX90609	8,2
ЦНИИ «Электроприбор»	ММГ-ЭПТРОН	8
	ММГ-2	3

Біріншілік бұрыштық тербелістері бар ММГ үшін тербеліс кедергісі аспаның сызықтық еместігінің төмендеуімен артады, бұл бұралу бұралу қаттылығының және олардың созылу - сығылу қаттылығының болуына байланысты, бұл сызықты емес қалпына келтіру күшін тудырады. Мұндай жүйелердің ерекшелігі - белгілі бір шектерде жиілік өзгерген кезде өздігінен тербелістердің немесе мәжбүрлі тербелістердің әртүрлі амплитудасы бар бірнеше тұрақты периодты режимдердің пайда болуы. Тербелістер мен соққылар кезінде ИД тербелістерінің амплитудасының бұзылуы мен секіруінің, сызықты емес резонанстың және нөлдік тербелістің орын ауыстыру мүмкіндігі едәуір артады [50]. Сызықты емес 200 есеге дейін азайту аспа элементтерінің конфигурациясын өзгерту арқылы мүмкін болады [51].

ММГ сезімталдығын арттыру үшін оның сапасын арттыруға тырысады. Бұл өз кезегінде ММГ-нің діріл мен соққылардың әсеріне сезімталдығының артуына әкеледі. Сапасын төмендету үшін ММГ ішкі қуысын инертті газбен толтыра отырып, демпферлеуді арттырады немесе кері электр байланысын енгізу есебінен тербелістерді демпфирлейтін арнаны қалыптастырады [52]. Мұндай әдістер соққы аяқталғаннан кейін ММГ жұмысын қалпына келтіру уақытын азайтады. Мысалы, демпфирлеу жүзеге асырылатын KGF01 аспабының 500 g соққысынан кейін қалпына келтіру уақыты 0,25 сек, ал «ММГ-2» аспабында қалпына келтіру уақыты 1200 g соққысынан кейін 5 сек дейін құрайды [37, 53].

[54] - жұмысында сызықтық, бұрыштық діріл, соққылардың болуы жағдайында ММГ тұрақтылығын қамтамасыз ету мәселелері қарастырылады. Тұрақты үдеу кезінде нөлдік ығысу және масштаб коэффициентінің өзгеруі орын алады. Сызықтық және бұрыштық тербелістерде резонанс болуы мүмкін. Жұмыста шетелдік фирмалардың ММГ механикалық төзімділік әдістері талданады, олар өтемақы үшін көп массалы сенсорларды, гироскоптарды және акселерометрлерді қолданады [55], дірілге қарсы және соққыға қарсы аспада гироскоптар мен акселерометрлер блогын орнатады. Colibrys компаниясы әзірлеген мұндай гироскоптар 20 000g дейін соққыға төтеп береді.

Дірілдің RR типті ММГ әсері [51] - жұмыста зерттелген. Гироскопта бұрыш пен моменттердегі сенсорлардың сыйымдылық сипаттамаларының сызықтық емес әсерлері мен теңсіздігі ескеріледі. Бұл негіз дірілдеген кезде субгармоникада резонанс тудырады. Діріл кезінде бос орындар өзгереді және сыйымдылық өзгереді. Дірілге төзімді ММГ жасау үшін құрастыру кезеңінде бұрыш датчиктері мен моменттерінің сипаттамаларын теңестіру қажет.

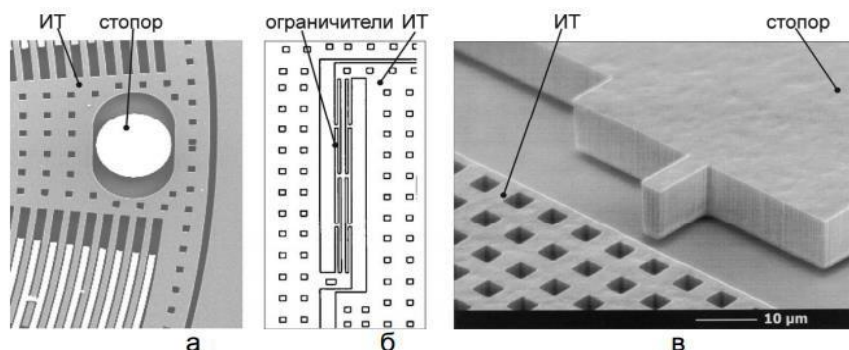
RR типті ММГ динамикасы негіздің ілгерілемелі және бұрыштық тербелістері кезінде [51] - жұмыста зерттелген. Гироскопта діріл әсерінің жиілігінде комбинациялық резонанстар пайда болуы мүмкін, бұл құрылғыны жұмыс істемейтін ететін біріншілік және екіншілік тербелістердің жиілік айырмашылығына тең. Бұл процесті түсіну ММГ діріліне төзімділікті арттырудың өзекті мәселесін шешуге көмектеседі.

[50] - жұмыста авторлар күрделі өлшемді ұсынады, оның негізінде әртүрлі ММГ конструкцияларын олардың механикалық төзімділігімен салыстыруға болады. Ұсынылған критерий ММГ геометриялық параметрлеріне байланысты және оның масштаб коэффициенті мен жүктеме қабілетін анықтайды.

[52] - жұмыста ММГ динамикалық қасиеттерін ескере отырып, механикалық сынақтарға қойылатын талаптар тұжырымдалған. Баламалы әсер ету параметрлері анықталды. ММГ механикалық сынау нәтижелері [40]-жұмыста көрсетілген. 200g соққы кезінде гироскоп жұмыс қабілеттілігін жоғалтады, діріл мен сызықтық үдеулер кезінде нөлдік ығысу мен масштаб коэффициенті өзгереді. Алынған нәтижелер соққылар мен дірілдің әсерін азайту жолдарын бағалауға мүмкіндік береді [51].

ММГ діріл мен соққыға төзімділігін арттырудың бір әдісі - ИД қозғалысын шектейтін аялдамаларды қолдану. Нәтижесінде діріл мен соққылардың әсерінен ИД тербелістерінің амплитудасы төмендейді, жылжымалы және қозғалмайтын электродтардың электрлік тұйықталуы болмайды, механикалық кернеулердің мәні төмендейді [46]. Бірнеше түрдегі аялдамалар қолданылады: қатты (аялдамалардың қаттылығы ИД серпімді аспаларының қаттылығынан едәуір жоғары); сызықты емес (қаттылық ИД-мен байланыста болған кезде жақындасу процесінде сызықты емес өседі) және сызықты жұмсақ (деформациясы күш - жігерге айтарлықтай әсер ететін серпімді жабыны бар аялдамалар) [47].

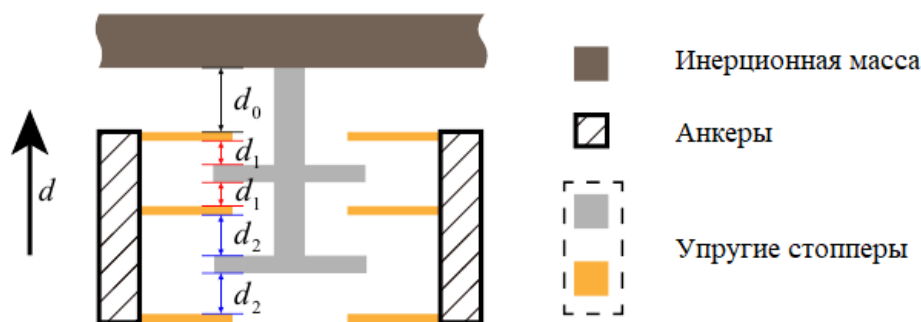
[41] - жұмыста соққылардың RR типті микрогироскоптарға әсері қарастырылған. Соққы жүктемелері құрылымдық элементтердің өзара әрекеттесуіне әкеледі. Электродтардың жабылуын болдырмау үшін жылжымалы массалардың қозғалысын шектеуге мүмкіндік беретін қозғалыс аялдамалары қарастырылады (1.4 - сурет).



1.4 Сурет - Орын ауыстыруды шектегіштер: а – бұрыштық орын ауыстыруды шектегіштер; б – серпімді элементтің бүгілуін шектегіштер; в – біріншілік тербелістердің амплитудасын шектегіштер.

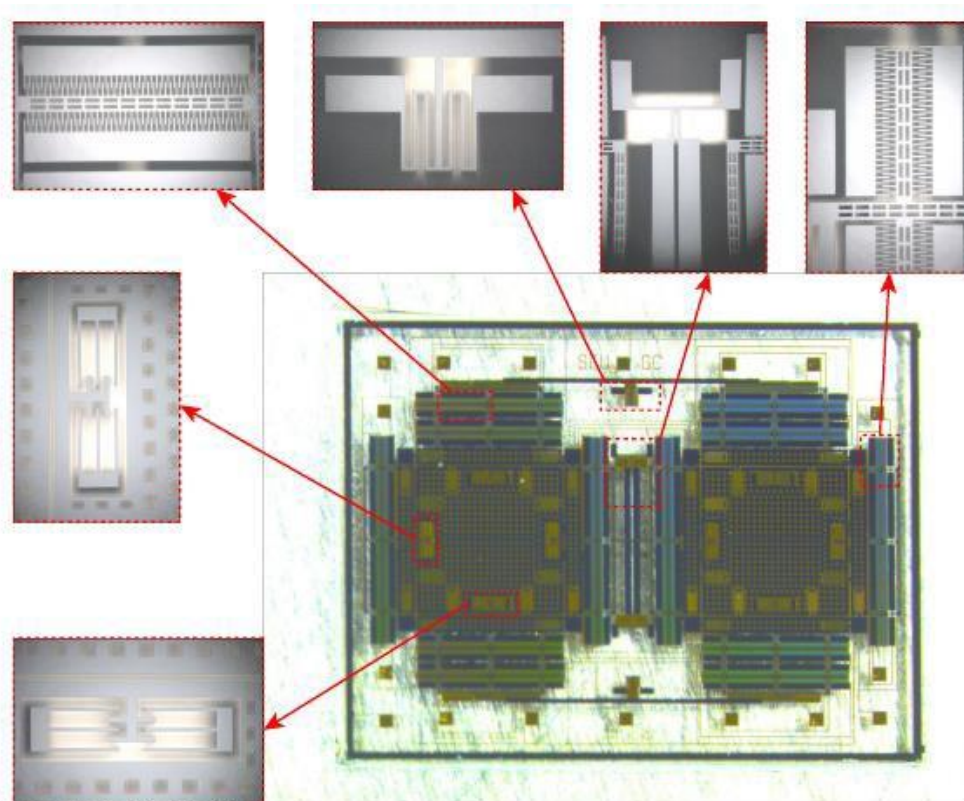
Мақалаларда сенсор жазықтығынан тыс амплитудасы 100 000 g әсер еткен кезде аспаның беріктігін қамтамасыз ету үшін аспаның тіректері мен серпімді элементтерінің орналасу конфигурациясы анықталған.

МЭМЖ конструкциясының соққыға төзімділігінің екі жоғарылауы жаңа, стандартты емес әдістерді қолдануды қажет етеді. [35] - жұмыста екі массалы гироскоп үшін екі позициялы серпімді стопперлерді (аялдамаларды) қолдану қарастырылады (1.5 - сурет).



1.5 Сурет - Екі позициялы стопперлер

10 000 g мәні бар соққы жүктемелеріне ұшыраған кезде құрылым қатты соққы әсерін сезінбейді және 2с ішінде жұмыс күйіне оралады, ММГ шығыс сипаттамаларына діріл әсерінің әсерін азайту біріншілік жақтаулардың антифазалық қозғалысы бар екі массалық жүйені пайдалануға мүмкіндік береді (1.6 - сурет).



1.6 Сурет - Антифазалы біріншілік жақтаулардың қозғалысы бар гироскоп

Схемалық шешімдер мен іске асырылған құрылымдардың алуан түрлілігі бар. Әр ұйым өз бағытын дамытады. ММГ дәлдігін тактикалық деңгейге дейін арттыру олардың діріл, соққы әсеріне сезімталдығын мұқият талдауды және нақты құрылымдар үшін оларды азайту шараларын әзірлеуді талап етеді.

Шетелдік МЭМЖ гироскоптарының әсер ету сипаттамалары 1.4 -кестеде келтірілген.

1.4 Кесте - МЭМЖ гироскоптар мен акселерометрлердің механикалық әсерлерге тұрақтылығы

	Өлшеу осі	Өлшеу диапазоны	Максималды соққы
STMicroelectronics			
AIS1120SX	X	120 g	2000 g
AIS1200PS	X	200 g	2000 g
AIS2120SX	X, Y	120 g	2000 g
AIS3624DQ	X, Y, Z	12-24 g	0,5 мс кезінде 3000 g 0,1 мс кезінде 10000 g

H3LIS331DL	X, Y, Z	100-400 g	0,5 мс кезінде 3000 g 0,1 мс кезінде 10000 g
IIS328DQ	X, Y, Z	2-8 g	0,5 мс кезінде 3000 g 0,1 мс кезінде 10000 g
A3G4250D	X, Y, Z	245 °/c	0,1 мс кезінде 10000 g
I3G4250D	X, Y, Z	2000 °/c	0,1 мс кезінде 10000 g
L20G20IS	X, Y	200 °/c	0,2 мс кезінде 10000 g
L2G2IS	X, Y	200 °/c	0,2 мс кезінде 10000 g
L3GD20H	X, Y, Z	2000 °/c	0,1 мс кезінде 10000 g
Invensense			
IAM-20381	X, Y, Z	2-16 g	10000 g
IAM-20380	X, Y, Z	250-2000 °/c	10000 g
ITG-1010	X, Y, Z	250-2000 °/c	10000 g
ICG-20330	X, Y, Z	31,25-250 °/c	10000 g
Bosch Sensortec			
BMG250	X, Y, Z	125-2000 °/c	0,2 мс кезінде 10000 g
BMA400	X, Y, Z	2-16 g	1 мс кезінде 2000 g 0,2 мс кезінде 10000 g
Analog Devices			
ADIS16209	X, Y	1,7 g	3500 g
ADIS16240	X	19 g	4000 g
ADXRS645	X	2000 °/c	10000 g
ADIS16137	X	1000 °/c	2000 g
ADIS16135	X	300 °/c	2000 g

Нарықтағы микромеханикалық гироскоптар мен акселерометрлердің әр өндірушісінде 10 000g амплитудасы бар соққы әсеріне төтеп бере алатын гироскоп немесе акселерометр бар, әсер ету ұзақтығы жұмыс істемейтін режимде 0,2 мс жетуі мүмкін. МЭМЖ түрлендіргіштерінің тағы бір түрі – пьезоэлектрлік, 20000g дейін соққы жүктемелеріне төтеп бере алады, атап айтқанда Colybris және Endvaco акселерометрлері [13].

2 ЕКІ КОМПОНЕНТТІ МИКРОМЕХАНИКАЛЫҚ ГИРОСКОПҚА МЕХАНИКАЛЫҚ ӘСЕРДІҢ ӘСЕРІН ТАЛДАУ

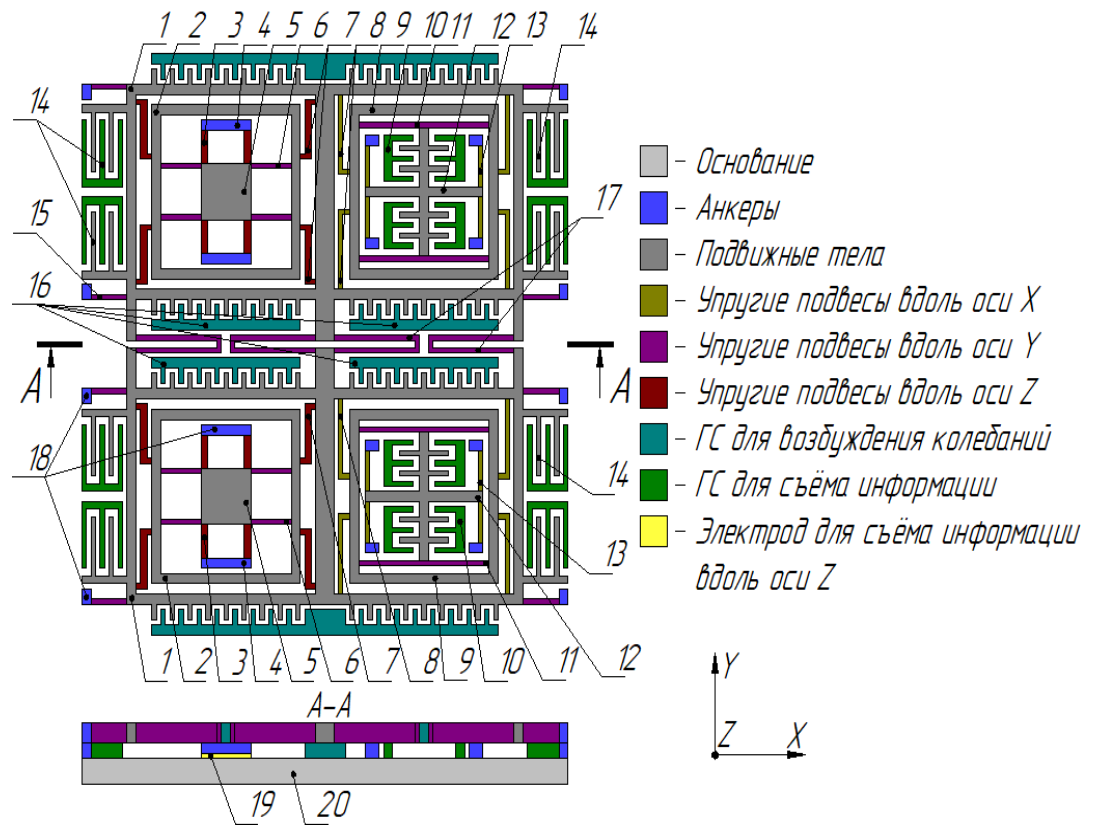
Микромеханикалық гироскоптарға жүргізілген әдеби шолу олардың діріл мен соққыға төзімділігі көбінесе элементтердің қозғалыс кинематикасымен анықталатынын көрсетті. Сондықтан, ММГ механикалық кернеуге тұрақтылығын арттырудың негізгі әдісі ретінде кинематикалық схеманы дұрыс таңдау деп атауға болады.

Қазіргі уақытта көптеген шетелдік фирмалар LL типті ММГ шығарады. Алайда, бұл гироскоптар әртүрлі шығу тегі [35] сыртқы инерциялық күштерге сезімтал (діріл мен соққыларды қосқанда). Бұл әсерді жою үшін ММГ біріншілік тербелістерінің арнасында антифазалық жүйелер қолданылады [41]. LL - гироскоптарда көп массалық жүйелерді қолдану да перспективалы шешім болып табылады [41]. Сонымен қатар, сезімталдықтың екі, үш осі бойынша бұрыштық жылдамдықты өлшейтін микромеханикалық сенсорлар үлкен сұранысқа ие.

Жоғарыда айтылғандардың негізінде ММГ механикалық тұрақтылығын арттыру үшін объектінің бұрыштық жылдамдығының екі компонентін өлшейтін LL типті көп массалы микромеханикалық гироскоптың схемасы жасалып, зерттелді.

2.1 Екі компонентті микромеханикалық гироскоптың функционалдық схемасы

Микромеханикалық гироскоп өлшенетін бұрыштық жылдамдықты оның элементтерінің қозғалысына түрлендіретін механикалық сенсордан және шығыс сигналын құрайтын электронды модульден тұрады. Екі компонентті ММГ сенсорының құрылымдық схемасы 2.1-суретімен түсіндіріледі [13]. Гироскоптың өлшеу осьтері - X және Z осьтері.



2.1 Сурет - Екі компонентті ММГ сенсорының схемасы

МГ сенсорында екі бірдей электромеханикалық модуль бар, олардың әрқайсысында серпімді аспалар 15 мен анкерлер 18 арқылы 20 негізіне бекітілген сыртқы жақтау бар. 1 – жақтауында 7 және 8 - серпімді тіректерде 2 және 9- аралық жақтаулар орнатылған. 2 - жақтауында 6 - серпімді тіректерінде 5 - инерциялық дене орнатылған, ол 3-серпімді аспасымен 4-анкерлермен байланысты. 9-жақтауында 11-серпімді тіректерінде 12- инерциялық денесі орнатылған, ол 13-серпімді аспасымен анкерлермен байланысты.

16 - тарақты құрылымдар (ТҚ) түріндегі діріл жетегі Y осі бойымен серпімді элементпен байланысқан 1- жақтауларының біріншілік фазаға қарсы гармоникалық тербелістерін қоздырады, бұл оларға бірдей жиіліктегі алғашқы фазалық тербелістерді жасауға мүмкіндік береді.

Y және Z осьтері бойымен 8 - серпімді аспаларының қаттылығы X осі бойымен қаттылықтан әлдеқайда үлкен және X және Y осьтері бойымен 7-серпімді аспалардың қаттылығы Z осі бойымен қаттылықтан әлдеқайда үлкен болғандықтан, 2 және 9 - аралық жақтаулар Y осі бойымен 1- жақтаулармен бірге қозғалады.

12-инерциялық денелер 9-аралық жақтауларға 11-серпімді аспалар арқылы қосылады, олардың қаттылығы X осі бойымен қаттылығынан әлдеқайда үлкен. Негізімен 12-инерциялық денелер 13- серпімді аспалар арқылы қосылады, олардың қаттылығы X осі бойымен қаттылығынан әлдеқайда аз.

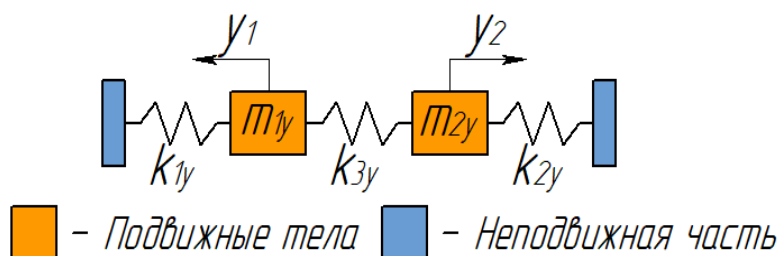
Бұрыштық жылдамдық Ω_x пайда болған кезде Z осі бойымен бағытталған Кориолис күштері пайда болады, олар 2 -аралық денелер мен 6- серпімді

элементтер арқылы Z осі бойымен 5- серпімді аспадағы 3- инерциялық денелердің екіншілік (ақпараттық) тербелістерін қоздырады. бұл тербелістер Ω_x жылдамдығына пропорционал және сыйымдылық-кернеу түрлендіргіштеріне кіретін 19 -электродтар түзетін сыйымдылықтың өзгеруін тудырады.

Ω_z бұрыштық жылдамдығы пайда болған кезде X осі бойымен бағытталған Кориолис күштері пайда болады, олар 9- аралық денелер мен 11 және 13- серпімді элементтер арқылы X осі бойымен 12- инерциялық денелердің екіншілік (ақпараттық) тербелістерін қоздырады, бұл 10- тарақ құрылымдарының сыйымдылықтарының өзгеруіне әкеледі. Осылайша, аралық жақтауды қолдану екіншілік ақпараттық қозғалысты біріншілік қозғалыстан оқшаулауға мүмкіндік береді. Сенсорлық тарақ құрылымдарының біріншілік тербелістер бағытында қозғалысы жойылады және сенсорлық тарақ құрылымдарының сыйымдылығының өзгеруі олардың ақпараттық тербелістердің осьтері бойымен қозғалысына ғана байланысты болады.

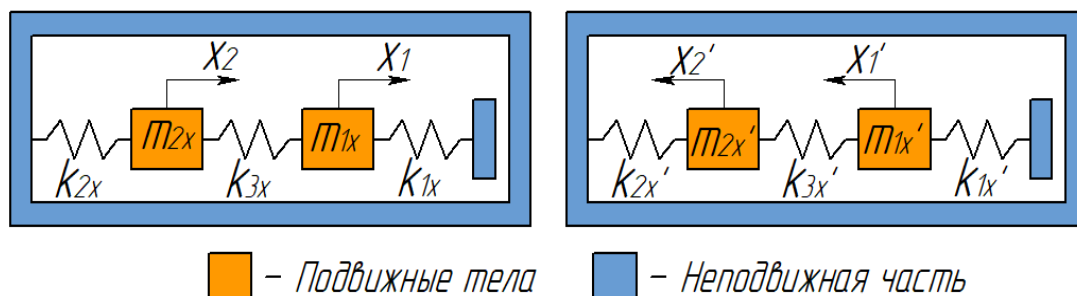
2.2 Екі компонентті гироскоптың математикалық моделі

Келтірілген функционалдық схемаға сәйкес (2.1-сурет) екі компонентті ММГ-ның эквивалентті схемасын бір-бірімен және негізімен серпімді байланысы бар шоғырланған массалар жүйесі түрінде ұсынуға болады (2.2, 2.3, 2.4-суреттер).



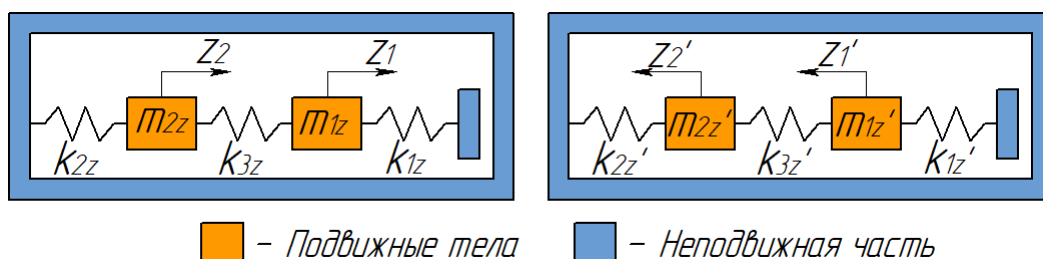
2.2 Сурет - Біріншілік тербеліс арнасының эквивалентті схемасы (Y осі)

m_{1y}, m_{2y} - біріншілік тербелістерді жасайтын денелер массасы (аралық жақтаулары бар 1 -жақтаулар); k_{1y}, k_{2y} - 1- жақтаулардың серпімді аспаларының қаттылығы; k_{3y} - 1- жақтаулар арасындағы серпімді байланыстың қаттылығы (2.1-сурет).



2.3 Сурет - Екінші тербеліс арналарының эквивалентті схемалары (X осі)

$m_{2x}, m'_{2x}, m_{1x}, m'_{1x}$ - X осі бойымен екіншілік тербелістер жасайтын аралық және инерциялық денелердің массалары; $k_{1x}, k'_{1x}, k_{2x}, k'_{2x}$ - X осі бойынша инерциялық және аралық денелердің серпімді аспаларының қаттылығы; k_{3x}, k'_{3x} - аралық және инерциялық денелер арасындағы серпімді байланыстың қаттылығы.



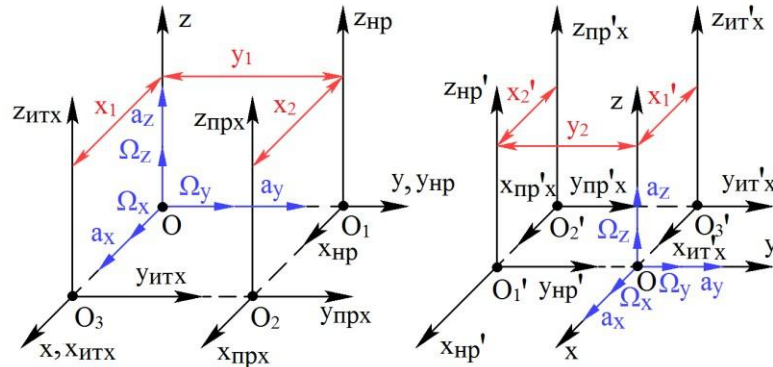
2.4 Сурет - Екінші тербеліс арналарының эквивалентті схемалары (Z осі)

$m_{2z}, m'_{2z}, m_{1z}, m'_{1z}$ - Z осі бойымен екіншілік тербелістер жасайтын аралық және инерциялық денелердің массалары; $k_{1z}, k'_{1z}, k_{2z}, k'_{2z}$ - Z осі бойынша инерциялық және аралық денелердің серпімді аспаларының қаттылығы; k_{3z}, k'_{3z} - аралық және инерциялық денелер арасындағы серпімді байланыстың қаттылығы.

Математикалық модельді шығару кезінде келесі болжамдар жасалады: гироскоптың корпусы қатты байланысқан негіз үдеумен біртіндеп қозғалады, оның проекциялары a_x, a_y, a_z ; үдемелі діріл жасайды және кеңістікте $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ жылдамдықтарымен айналады. Гироскоптың қозғалыс теңдеулері қарастырылып отырған жүйе үшін екінші типтегі Лагранж теңдеулерінің негізінде жасалады, олар:

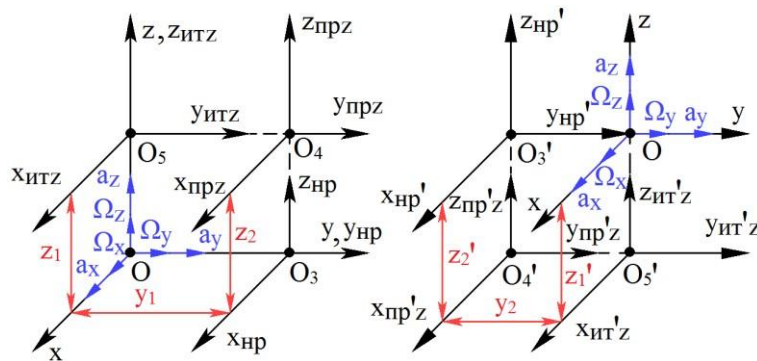
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} &= Q_x, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} &= Q_y, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial T}{\partial z} &= Q_z. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Гироскоп сенсорының жалпы кинетикалық энергиясы 2.2, 2.3, 2.4-суреттерде келтірілген барлық денелердің Т кинетикалық энергиясынан тұрады. Q_x, Q_y, Q_z - ММГ сенсорының аспа осьтері бойынша жалпыланған күштер аспа элементтерінің серпімді деформацияларымен, энергияның шашырауымен және гироскоп сенсорының конденсаторларының энергиясымен анықталады.



2.5 Сурет - X осі бойымен ММГ сенсорының жалпыланған координаттары

ММГ сенсорының жалпыланған координаттары X, Y, Z осьтері бойымен денелердің аудармалы қозғалысы болып табылады (2.5, 2.6-суреттер).



2.6 Сурет - Z осі бойымен сенсордың жалпыланған координаттары

y_1, y_2 координаттары – діріл жетегі арқылы жасалған 1 жақтаудың қозғалысы. x_1, \dot{x}_1 координаттары X осі бойымен инерциялық денелердің қозғалысын анықтайды; x_2, \dot{x}_2 - X осі бойымен аралық денелердің қозғалысы.

z_1, \dot{z}_1 координаттары инерциялық денелердің Z осі бойымен қозғалуын анықтайды; z_2, \dot{z}_2 - аралық денелердің Z осі бойымен қозғалуы. Лагранж теңдеуін қолдана отырып, біз ММГ сенсорының теңдеулерін аламыз:

Y осі бойынша біріншілік тербелістер

$$\begin{aligned} \ddot{y}_1 + \frac{\omega_{y1}}{Q_{y1}} \dot{y}_1 + y_1 [\omega_{y1}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_x^2)] &= \frac{1}{m_{1y}} F_{\exists 1} + \frac{k_{3y}}{m_{1y}} (y_2 - y_1) - \ddot{y}_0 - a_y - \\ &- \dot{x}_0 \Omega_z + \dot{z}_0 \Omega_x - \frac{2m_{2x}}{m_{1y}} \dot{x}_2 \Omega_z - \frac{m_{2x}}{m_{1y}} x_2 \Omega_y \Omega_x, \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_2 + \frac{\omega_{y2}}{Q_{y2}} \dot{y}_2 + y_2 [\omega_{y2}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_x^2)] &= \frac{1}{m_{12}} F_{\exists 2} + \frac{k'_{3y}}{m_{2y}} (y_1 - y_2) - \ddot{y}_0 - a_y - \\ &- \dot{x}_0 \Omega_z + \dot{z}_0 \Omega_x - \frac{2m'_{2x}}{m_{2y}} \dot{x}'_2 \Omega_z - \frac{m'_{2x}}{m_{2y}} x'_2 \Omega_y \Omega_x. \end{aligned}$$

X осі бойынша екіншілік тербелістер

$$\begin{aligned} \ddot{x}_2 + \frac{\omega_{x2}}{Q_{x2}} \dot{x}_2 + x_2 [\omega_{x2}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_y^2)] &= 2\Omega_z \dot{y}_1 - \ddot{x}_0 - a_x - \dot{z}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_z + \\ &+ \frac{k_{3x}}{m_{2x}} (x_1 - x_2) - \Omega_x \Omega_y y_1 + \frac{k_{xy}}{m_{2x}} y_1, \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 + \frac{\omega_{x1}}{Q_{x1}} \dot{x}_1 + x_1 [\omega_{x1}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_y^2)] &= -\ddot{x}_0 - a_x - \dot{z}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_z + \\ &+ \frac{k_{3x}}{m_{1x}} (x_2 - x_1), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}'_2 + \frac{\omega'_{x2}}{Q_{x2}} \dot{x}'_2 + x_2 [(\omega'_{x2})^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_y^2)] &= -2\Omega_z \dot{y}_2 - \ddot{x}_0 - a_x - \dot{z}_0 \Omega_y + \\ &+ \dot{y}_0 \Omega_z + \frac{k'_{3x}}{m'_{2x}} (x'_1 - x'_2) - \Omega_x \Omega_y y_2 - \frac{k'_{xy}}{m'_{2x}} y_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}'_1 + \frac{\omega'_{x1}}{Q_{x1}} \dot{x}'_1 + x'_1 [(\omega'_{x1})^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_y^2)] &= -\ddot{x}_0 - a_x - \dot{z}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_z + \\ &+ \frac{k'_{3x}}{m'_{1x}} (x'_2 - x'_1). \end{aligned}$$

Z осі бойынша екіншілік тербелістер

$$\begin{aligned} \ddot{z}_2 + \frac{\omega_{z2}}{Q_{z2}} \dot{z}_2 + z_2 [\omega_{z2}^2 - (\Omega_x^2 + \Omega_y^2)] &= 2\Omega_x \dot{y}_1 - \ddot{z}_0 - a_z - \dot{x}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_x + \\ &+ \frac{k_{3z}}{m_{2z}} (z_1 - z_2) - \Omega_x \Omega_y y_1 + \frac{k_{yz}}{m_{2z}} y_1, \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \ddot{z}_1 + \frac{\omega_{z1}}{Q_{z1}} \dot{z}_1 + z_1 [\omega_{z1}^2 - (\Omega_x^2 + \Omega_y^2)] &= -\ddot{z}_0 - a_z - \dot{x}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_x + \\ &+ \frac{k_{3z}}{m_{1z}} (z_2 - z_1), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{z}'_2 + \frac{\omega'_{z2}}{Q_{z2}} \dot{z}'_2 + z_2 [(\omega'_{z2})^2 - (\Omega_x^2 + \Omega_y^2)] &= -2\Omega_x \dot{y}_2 - \ddot{z}_0 - a_z - \dot{x}_0 \Omega_y + \\ &+ \dot{y}_0 \Omega_x + \frac{k'_{3z}}{m'_{2z}} (z'_1 - z'_2) - \Omega_x \Omega_y y_2 - \frac{k'_{yz}}{m'_{2z}} y_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{z}'_1 + \frac{\omega'_{z1}}{Q_{z1}} \dot{z}'_1 + z'_1 [(\omega'_{z1})^2 - (\Omega_x^2 + \Omega_y^2)] &= -\ddot{z}_0 - a_z - \dot{x}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_x + \\ &+ \frac{k'_{3z}}{m'_{1z}} (z'_2 - z'_1). \end{aligned}$$

мұндағы Q - тиісті бағыт бойынша (x, y, z) ММГ сапасы; $\ddot{z}_0, \dot{y}_0, \ddot{x}_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0$ - үдемелі дірілдің үдеулері мен жылдамдықтары; F_{3i} - гироскоптың алғашқы тербелістерін қоздыратын күш; гироскоптың парциалды жиілігі:

$$\omega_{yi}^2 = \frac{k_{iy}}{m_{iy}}; \omega_{xi}^2 = \frac{k_{ix}}{m_{ix}}; \omega_{zi}^2 = \frac{k_{iz}}{m_{iz}}; (\omega'_{xi})^2 = \frac{k'_{ix}}{m'_{ix}}; (\omega'_{zi})^2 = \frac{k'_{iz}}{m'_{iz}}; i = 1, 2.$$

2.3 Екі компонентті микромеханикалық гироскоптың динамикалық сипаттамалары

Гироскоптың қасиеттері оның динамикалық сипаттамаларын анықтайды, олар мыналарды қамтиды:

- резонанстық жиіліктер;
- динамикалық қателер;
- өткізу жолағы.

Резонанстық жиіліктер кез-келген діріл жүйесінің маңызды сипаттамаларының бірі болып табылады, ол сонымен бірге ММГ болып табылады. ММГ-ге тербелістер мен соққылардың әсерін талдау үшін оның резонанстық жиілігін анықтау қажет. Сонымен қатар, гироскопта біріншілік және екіншілік тербелістердің жиілігі арасындағы тұрақты қатынасты сақтау қажет.

Микрогироскоптың біріншілік тербеліс арнасының табиғи жиілігін анықтау үшін теңдеулерді шешеміз:

$$\begin{aligned} \ddot{y}_1 + \frac{\omega_{y1}}{Q_{y1}} \dot{y}_1 + y_1 [\omega_{y1}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_x^2)] &= \frac{k_{3y}}{m_{1y}} (y_2 - y_1) - \frac{2m_{2x}}{m_{1y}} \dot{x}_2 \Omega_z - \\ &\quad \frac{m_{2x}}{m_{1y}} x_2 \Omega_y \Omega_x, \\ \ddot{y}_2 + \frac{\omega_{y2}}{Q_{y2}} \dot{y}_2 + y_2 [\omega_{y2}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_x^2)] &= \frac{k'_{3y}}{m_{2y}} (y_1 - y_2) + \frac{2m'_{2x}}{m_{2y}} \dot{x}'_2 \Omega_z + \\ &\quad \frac{m'_{2x}}{m_{2y}} x'_2 \Omega_y \Omega_x. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Берілген жиілік диапазонында және сенсорлық қозғалыстардың $x_2, x'_2, \dot{x}_2, \dot{x}'_2$ қол жетімді мәндерінде гироскоптың резонанстық жиілігіне негіздің бұрыштық жылдамдығының әсерін елемеуге болады, содан кейін біз гироскоптың біріншілік қозғалысының теңдеулерін аламыз:

$$\begin{aligned} \ddot{y}_1 + \frac{\omega_{y1}}{Q_{y1}} \dot{y}_1 + y_1 [\omega_{y1}^2] &= \frac{k_{3y}}{m_{1y}} (y_2 - y_1), \quad (2.6) \\ \ddot{y}_2 + \frac{\omega_{y2}}{Q_{y2}} \dot{y}_2 + y_2 [\omega_{y2}^2] &= \frac{k'_{3y}}{m_{2y}} (y_1 - y_2) \end{aligned}$$

(2.6) теңдеулердің шешімін келесі түрде іздейміз:

$$y_1(t) = A_1 e^{st}; y_2(t) = A_2 e^{st}. \quad (2.7)$$

(2.6) теңдеулерін (2.7) ауыстырсақ келесі теңдеуді береді:

$$\begin{cases} \left[s^2 + s \frac{\omega_{y1}}{Q_{y1}} + \omega_{m1}^2 \right] A_1 - \alpha_1 \cdot A_2 = 0, \\ \left[s^2 + s \frac{\omega_{y2}}{Q_{y2}} + \omega_{m2}^2 \right] A_2 - \beta_1 \cdot A_1 = 0, \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\text{мұндағы } \omega_{m1}^2 = \frac{k_{1y} + k_{3y}}{m_{1y}}; \omega_{m2}^2 = \frac{k_{2y} + k_{3y}}{m_{2y}}; \alpha_1 = \frac{k_{3y}}{m_{1y}}; \beta_1 = \frac{k_{3y}}{m_{2y}}.$$

(2.8) нөлдік емес теңдеулерді шешу үшін ($A_1 \neq 0, A_2 \neq 0$) келесі шарт орындалуы керек:

$$\begin{vmatrix} s^2 + s \frac{\omega_{y1}}{Q_{y1}} + \omega_{m1}^2 & -\alpha_1 \\ -\beta_1 & s^2 + s \frac{\omega_{y2}}{Q_{y2}} + \omega_{m2}^2 \end{vmatrix} = 0.$$

Нөлге тең демпфирлеу кезінде ММГ сенсорының өшпейтін тербелістерінің табиғи жиілігін анықтау үшін теңдеуді қайдан аламыз

$$\omega^4 - \omega^2(\omega_{m1}^2 + \omega_{m2}^2) + \omega_{m2}^2 \cdot \omega_{m1}^2 - \alpha_1 \cdot \beta_1 = 0. \quad (2.9)$$

(2.9) теңдеуінен біріншілік арнаның меншікті жиіліктерін келесі түрде аламыз

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\frac{\omega_{m1}^2 + \omega_{m2}^2}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\omega_{m1}^2 - \omega_{m2}^2)^2 + \alpha_1 \cdot \beta_1}} \quad (2.10)$$

Осылайша, ММГ біріншілік арнасында $f_2=10645,08$ Гц және $f_1=9723,7$ Гц екі резонанстық жиілік бар (2.7-сурет), бұл 2.1, 2.2 - кестелерде көрсетілген параметрлермен ММГ сәйкес келеді. Кестелердегі сандар 2.1- суретте сипатталған ММГ схемасына сәйкес келеді.

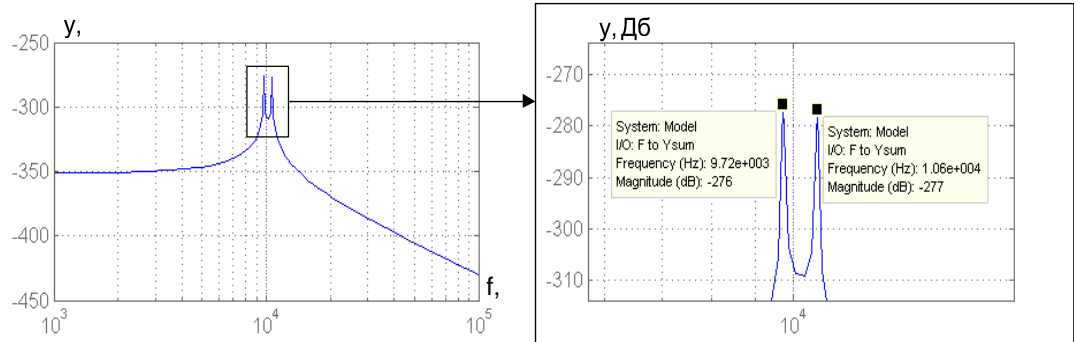
2.1 Кесте - Гироскоптың жылжымалы бөліктерінің массалары

Масса №	1	2	5	9	12
Масса, 10^{-8} кг	5,18944	1,58325	3,45258	1,37227	2,08562

2.2 Кесте - Гироскоптың серпімді аспаларының қаттылығы

№ УП	k_x , Н/м	k_y , Н/м	k_z , Н/м
3	1520	1,3	12

6	390	10	234
7	1536	1,4	12,8
8	6,4	410	138
11	293	7,5	122
13	13	493	241
15	1899	29,8	387
17	2152	4,9	119



2.7 Сурет - ММГ біріншілік арнасының амплитудалық-жиіліктік сипаттамасы

Біріншілік тербелістердің қозу тізбегінде f_2 жиілігінде болатын антифазалық тербелістер қолданылады. f_1 жиілігінде біріншілік тербелістер синфазалық болып табылады.

ММГ сенсорының меншікті екіншілік (ақпараттық) қозғалысын сипаттайтын теңдеулер келесі түрде болады:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_2 + \frac{\omega_{x2}}{Q_{x2}} \dot{x}_2 + x_2[\omega_{x2}^2] - \frac{k_{3x}}{m_{2x}}(x_1 - x_2) &= 0, \\ \ddot{x}_1 + \frac{\omega_{x1}}{Q_{x1}} \dot{x}_1 + x_1[\omega_{x1}^2] - \frac{k_{3x}}{m_{1x}}(x_2 - x_1) &= 0, \\ \ddot{z}_2 + \frac{\omega_{z2}}{Q_{z2}} \dot{z}_2 + z_2[\omega_{z2}^2] - \frac{k_{3z}}{m_{2z}}(z_1 - z_2) &= 0, \\ \ddot{z}_1 + \frac{\omega_{z1}}{Q_{z1}} \dot{z}_1 + z_1[\omega_{z1}^2] - \frac{k_{3z}}{m_{1z}}(z_2 - z_1) &= 0, \end{aligned}$$

оның ішінде екіншілік арналардың меншікті жиілігі анықталады:
Х осі бойынша

$$\omega_{3,4} = \sqrt{\frac{\omega_{m3}^2 + \omega_{m4}^2}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\omega_{m3}^2 - \omega_{m4}^2)^2 + \alpha_2 \cdot \beta_2}} \quad (2.11)$$

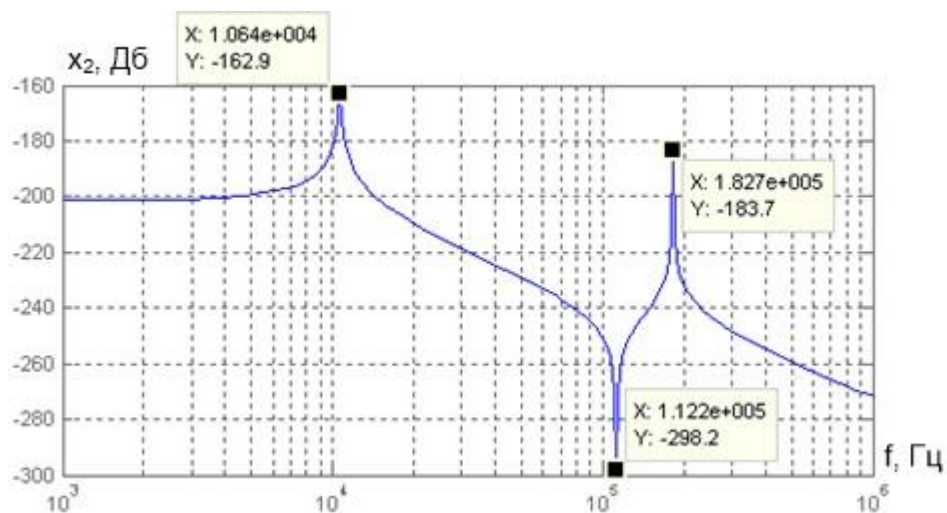
$$\text{мұндағы } \omega_{m3}^2 = \frac{k_{1x} + k_{3x}}{m_{x1}}; \omega_{m4}^2 = \frac{k_{2x} + k_{3x}}{m_{x2}}; \alpha_2 = \frac{k_{3x}}{m_{1x}}; \beta_2 = \frac{k_{3x}}{m_{2x}}.$$

Z осі бойынша

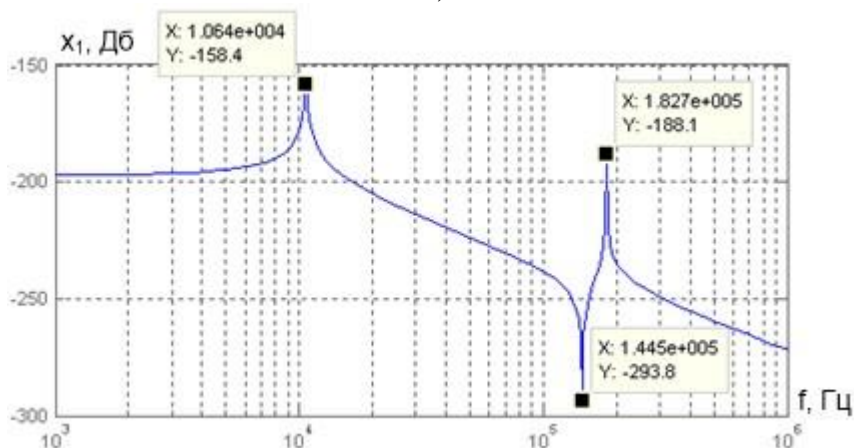
$$\omega_{5,6} = \sqrt{\frac{\omega_{m5}^2 + \omega_{m6}^2}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\omega_{m5}^2 - \omega_{m6}^2)^2 + \alpha_3 \cdot \beta_3}} \quad (2.12)$$

мұндағы $\omega_{m5}^2 = \frac{k_{1z} + k_{3z}}{m_{z1}}$; $\omega_{m6}^2 = \frac{k_{2z} + k_{3z}}{m_{z2}}$; $\alpha_3 = \frac{k_{3z}}{m_{1z}}$; $\beta_3 = \frac{k_{3z}}{m_{2z}}$.

X және Z осьтері бойынша екінші арнаның АЖС 2.8 және 2.9 -суреттерде ұсынылған.

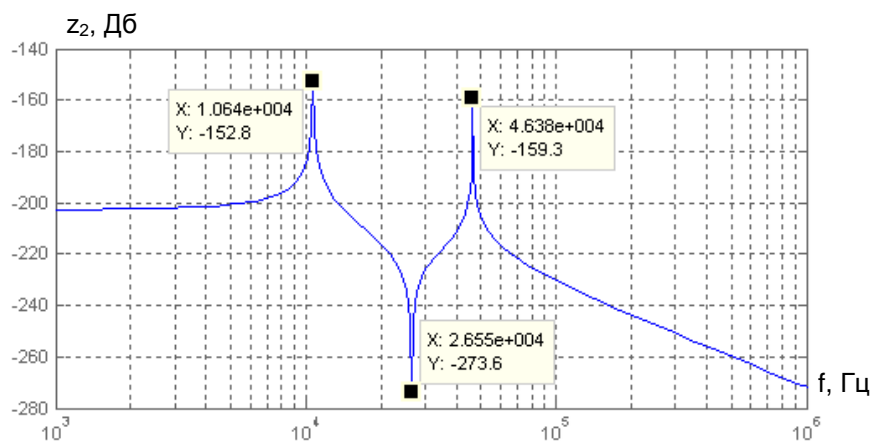


а)

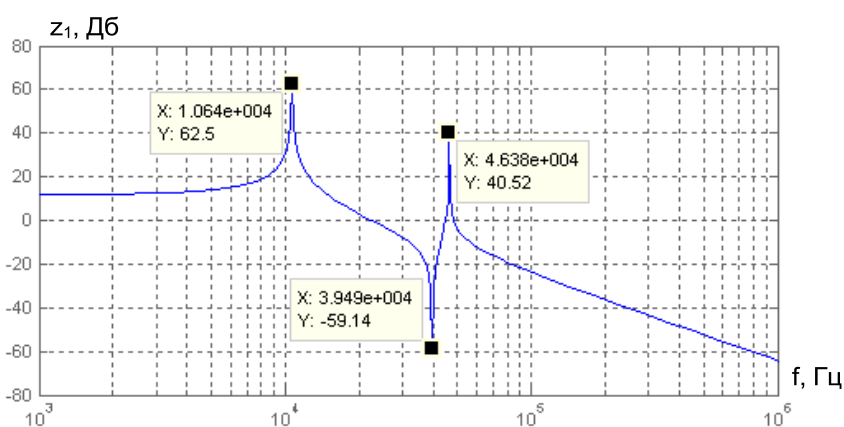


б)

2.8 Сурет - Екінші арнаның АЖС (X осі): а - аралық жақтаудың x_2 қозғалысы; б - инерциялық дененің x_1 қозғалысы



а)



б)

2.9 Сурет - Екінші арнаның АЖС (Z осі): а - аралық жақтаудың z_2 қозғалысы; б - инерциялық дененің z_1 қозғалысы

АЖС – дан f_1 жиілігінде аралық рамка инерциялық денемен бірге синфазалық тербелістерді, ал f_2 жиілігінде антифазалық тербелістерді жасайтындығын көруге болады. Екінші ММГ арнасы үшін жұмыс - бұл гироскоптың біріншілік тербелістерінің жиілігіне жақын жиілікте болатын инерциялық денемен бірге аралық жақтаудың фазалық тербеліс режимі. Антирезонанс және антифазалық қозғалыс жиілігі аралық жақтаулар мен инерциялық денелердің синфазалық екінші қозғалысының жұмыс жиілігінен әлдеқайда үлкен.

ММГ динамикалық дәлдігін өлшенетін жылдамдықтың гармоникалық заңында оның жиілік сипаттамаларын қолдана отырып анықтауға болады

$$\Omega_x = \Omega_{xm} \sin \delta t, \quad \Omega_y = \Omega_{ym} \sin \delta t, \quad \Omega_z = \Omega_{zm} \sin \delta t.$$

Тұрақты біріншілік қозғалыс үшін және оны тұрақтандыру кезінде тарақты электростатикалық діріл жетегі қоздыратын гироскоптың алғашқы тербелістері гармоникалық заңға сәйкес жүреді

$$\mathbf{y}_1(t) = -\mathbf{y}_2(t) = \mathbf{y}(t) = \mathbf{y}_m \sin vt ,$$

мұндағы ν - біріншілік тербелістердің жиілігі. Жоғарыда көрсетілгендей, кросс-қаттылықтың үлкен мәндерінде аралық денелер инерциялық денелермен бірге бір дене ретінде екіншілік тербелістер жасайды, сондықтан (2.3, 2.4) теңдеулер жүйесінен ММГ екінші тербеліс теңдеулерін аламыз

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 + 2\xi_1(\nu + \Delta_1)\dot{x}_1 + (\nu + \Delta_1)^2 x_1 &= h_1 \Omega_{zm} \cos vt \cdot \sin \delta t , \\ \ddot{x}_2 + 2\xi_2(\nu + \Delta_2)\dot{x}_2 + (\nu + \Delta_2)^2 x_2 &= -h_2 \Omega_{zm} \cos vt \cdot \sin \delta t , \\ \ddot{z}_1 + 2\xi_3(\nu + \Delta_3)\dot{z}_1 + (\nu + \Delta_3)^2 z_1 &= h_3 \Omega_{xm} \cos vt \cdot \sin \delta t , \\ \ddot{z}_2 + 2\xi_4(\nu + \Delta_4)\dot{z}_2 + (\nu + \Delta_4)^2 z_2 &= -h_4 \Omega_{xm} \cos vt \cdot \sin \delta t , \end{aligned} \quad (2.13)$$

мұндағы $\omega_i = \nu + \Delta_i$ - екіншілік контурлардың меншікті тербелістерінің жиілігі ($i = 1, 2, 3, 4$); Δ_i - ММГ екіншілік тербеліс жиілігінің бұзылу шамасы оның біріншілік тербеліс жиілігіне қатысты. Микрогироскоптың екіншілік тербелістерін тудыратын Кориолис күштерінің коэффициенттері өрнектермен анықталады:

$$h_1 = \frac{2m_{2x}\nu y_m}{m_{1x}+m_{2x}} ; \quad h_2 = \frac{2m'_{2x}\nu y_m}{m'_{1x}+m'_{2x}} ; \quad h_3 = \frac{2m_{2z}\nu y_m}{m_{1z}+m_{2z}} ; \quad h_4 = \frac{2m'_{2z}\nu y_m}{m'_{1z}+m'_{2z}} ,$$

мұндағы m_{2x} , m'_{2x} , m_{2z} , m'_{2z} - аралық денелер массасы; m_{1x} , m'_{1x} , m_{1z} , m'_{1z} - инерциялық денелер массасы.

(2.13) теңдеулерден көрініп тұрғандай, жасалған болжамдар кезінде әр ақпараттық ось бойынша екінші қозғалысты бөлек қарастыруға болады. Жүйенің бірінші теңдеуіне (2.13) сәйкес келетін екіншілік контурды қарастырыңыз – X осіндегі тербелістер

$$\ddot{x}_1 + 2\xi_1(\nu + \Delta_1)\dot{x}_1 + (\nu + \Delta_1)^2 x_1 = h_1 \Omega_{zm} \cos vt \cdot \sin \delta t$$

Осы теңдеудің оң жағын келесі түрге түрлендіреміз

$$\ddot{x}_1 + 2\xi_1(\nu + \Delta_1)\dot{x}_1 + (\nu + \Delta_1)^2 x_1 = h_1 \Omega_k(t), \quad (2.14)$$

$$\text{мұндағы } \Omega_k(t) = \frac{1}{2} \Omega_{zm} [-\sin(\nu - \delta)t + \sin(\nu + \delta)t] .$$

Кіріс әсерінің сол $(\nu - \delta)$ және оң $(\nu + \delta)$ бүйір жолақтарының базистеріндегі екіншілік контурдың жиілік сипаттамаларын талдау беру функциясы бар буынның жиілік сипаттамаларын талдауға сәйкес келеді

$$W_{x1}^{\Omega_k}(s) = \frac{h_1}{s^2 + 2\xi_1(\nu + \Delta_1)s + (\nu + \Delta_1)^2} , \quad (2.15)$$

$s = i(\omega + \nu)$ және $s = i(\omega - \nu)$ болғанда.

Біріншілік тербелістермен (синустық жиіліктік сипаттамалар) фазада

сәйкес келетін және $\frac{\pi}{2}$ фазада (косинустық жиіліктік сипаттамалар) ауысатын гироскоптың екіншілік тербелістерінің жиіліктік сипаттамалары өрнектермен анықталады:

$$W_k(i\omega) = i \frac{[W_{x1}^{\Omega k}[i(\omega+\nu)] - W_{x1}^{\Omega k}[i(\omega-\nu)]]}{2}, \quad (2.16)$$

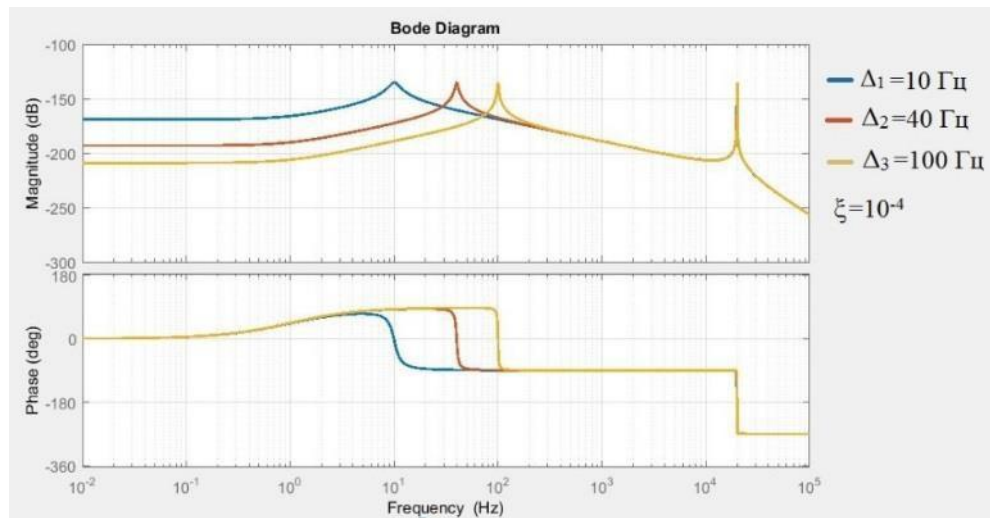
$$W_k(i\omega) = \frac{[W_{x1}^{\Omega k}[i(\omega+\nu)] + W_{x1}^{\Omega k}[i(\omega-\nu)]]}{2}.$$

Екіншілік контурлардың конвергентті синусы мен косинус компоненттері үшін ММГ динамикалық сипаттамаларын сипаттайтын беріліс функцияларын қайдан аламыз:

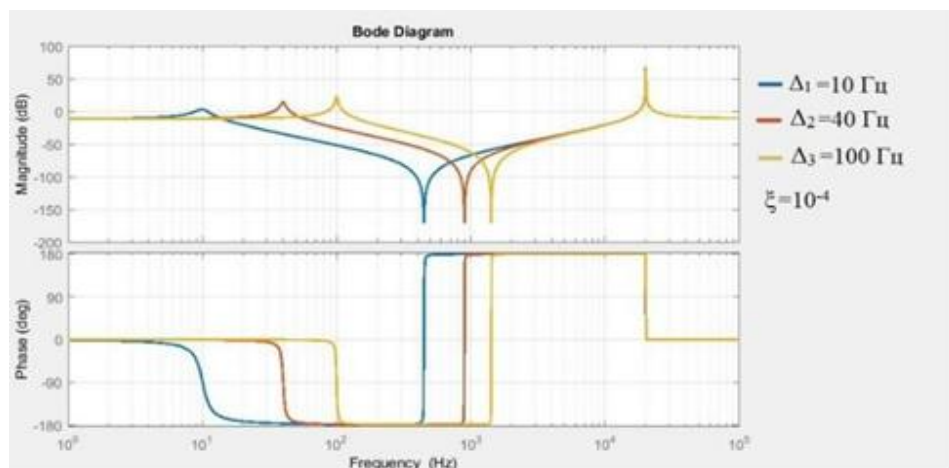
$$W_c(s) = \frac{x_{1c}}{\Omega_{zm}} = h_1 \frac{2\nu[s+\xi_1(\nu+\Delta_1)]}{[s^2+2\xi_1(\nu+\Delta_1)s+(\nu+\Delta_1)^2-\nu^2]^2+4\nu^2[s+\xi_1(\nu+\Delta_1)]^2}. \quad (2.17)$$

$$W_k(s) = \frac{x_{1k}}{\Omega_{zm}} = h_1 \frac{[s^2+2\xi_1(\nu+\Delta_1)s+(\nu+\Delta_1)^2-\nu^2]^2}{[s^2+2\xi_1(\nu+\Delta_1)s+(\nu+\Delta_1)^2-\nu^2]^2+4\nu^2[s+\xi_1(\nu+\Delta_1)]^2}.$$

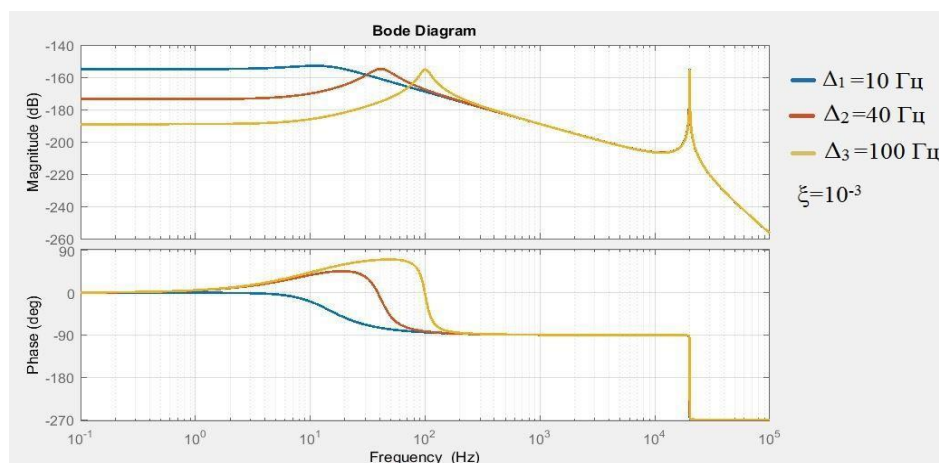
2.10 – 2.17 -суреттерінде әртүрлі сапалылық пен жиіліктегі конверттер бойынша микрогироскоптың екіншілік арнасының АЖС көрсетілген.



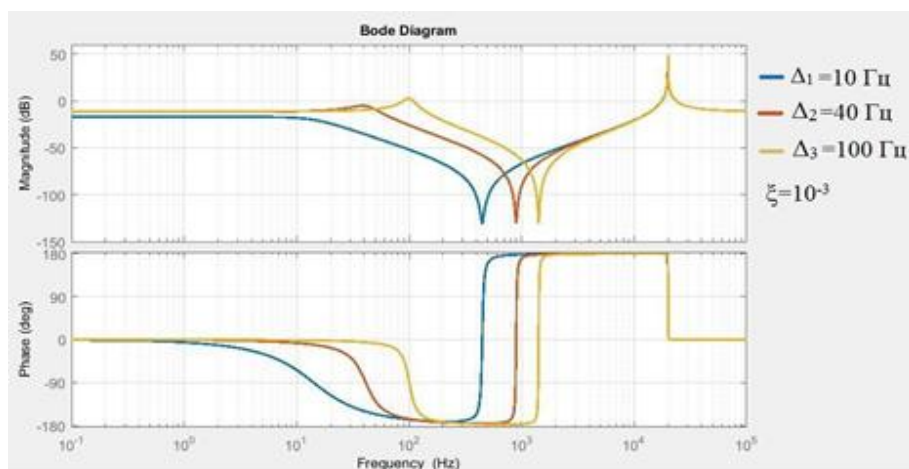
2.10 Сурет - ММГ екіншілік арнасының айналмалары бойынша АЖС ($Q_1 = 5000$ кезіндегі синустық құрауыш)



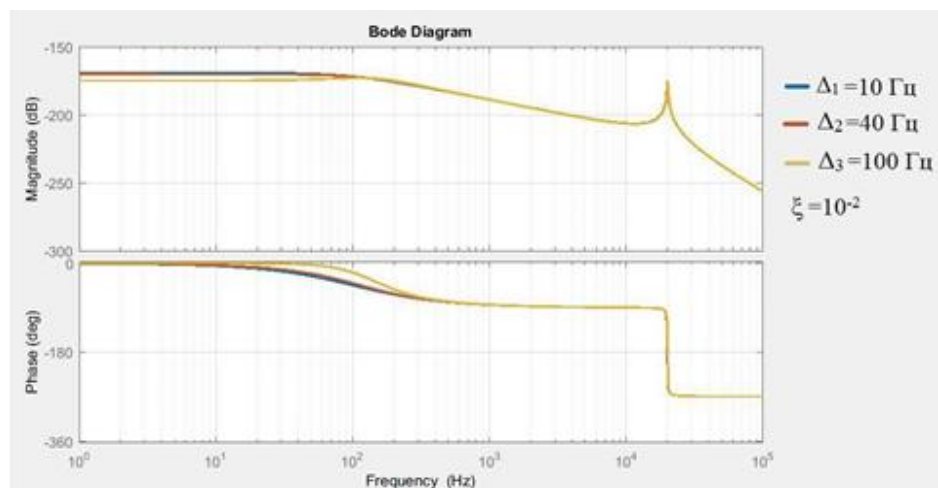
2.11 Сурет - ММГ екіншілік арнасының айналмалары бойынша АЖС ($Q_1 = 5000$ кезіндегі косинустық құрауыш)



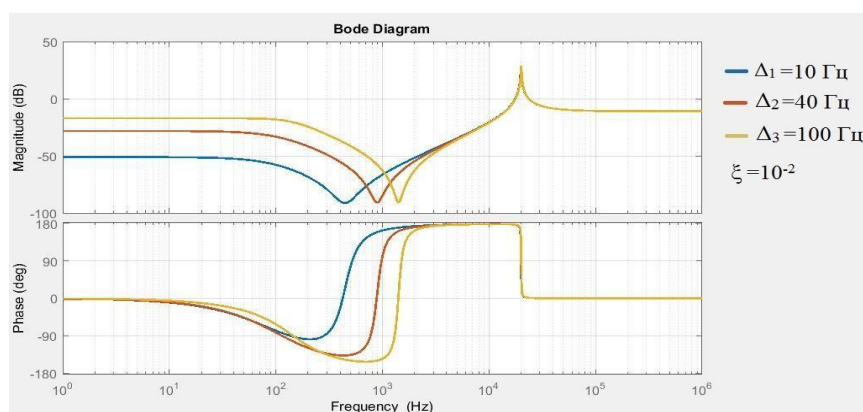
2.12 Сурет - Микрогироскоптың екіншілік арнасының айналмалары бойынша АЖС ($Q_1 = 500$ кезіндегі синустық құрауыш)



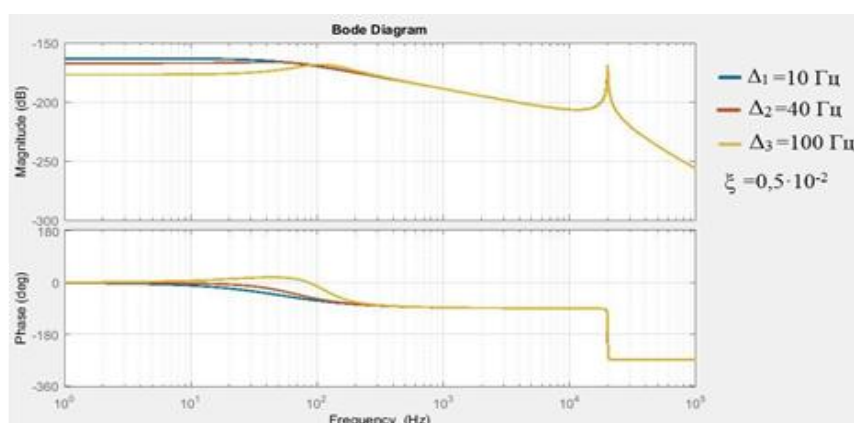
2.13 Сурет - ММГ екіншілік арнасының айналмалары бойынша АЖС ($Q_1 = 500$ кезіндегі косинустық құрауыш)



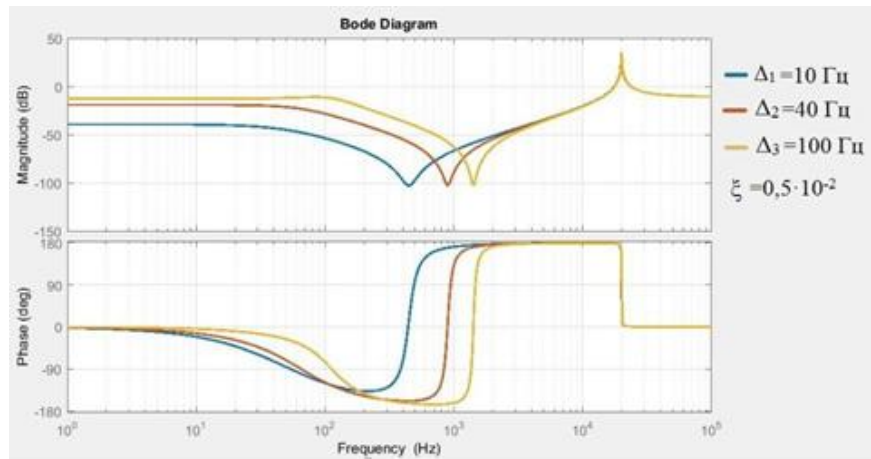
2.14 Сурет - ММГ екіншілік арнасының айналмалары бойынша АЖС ($Q_1 = 50$ кезіндегі синустық құрауыш)



2.15 Сурет - ММГ екіншілік арнасының айналмалары бойынша АЖС ($Q_1 = 50$ кезіндегі косинустық құрауыш)



2.16 Сурет - ММГ екіншілік арнасының айналмалары бойынша АЖС ($Q_1 = 100$ кезіндегі синустық құрауыш)



2.16 Сурет - ММГ екіншілік арнасының айналмалары бойынша АЖС ($Q_1 = 100$ кезіндегі косинустық құрауыш)

Ұсынылған суреттер келесі қорытындыларды жасауға мүмкіндік береді:

1. Резонанстық шыңдар Δ_i және 2ν жиіліктерінде болады. Косинус құраушысының жиілік сипаттамасы $\sqrt{2\nu\Delta}$ жиілігінде анти-резонанстық шыңға ие.

2. Егер өлшенген бұрыштық жылдамдықтың жиілігі біріншілік тербелістердің жиілігіне қатысты екіншілік тербелістердің жиілігін бұзудың Δ_i жиілігінен аз болса, ММГ динамикалық қателіктері минималды болады. Сапа деңгейінің жоғарылауымен динамикалық қателер минималды болатын жиілік аймағы тарылады. $Q < 100$ сапа жылдамдығымен минималды динамикалық қателіктердің жиілік аймағы 40 Гц-тен асады.

3. Өткізу жолағы біріншілік және екіншілік тербелістердің Δ_i жиіліктерінің бұзылу шамасымен анықталады.

4. Косинус құраушысы үшін гироскоптың АЖС синус құраушысындағы оның жиілігінен асып түседі. Осылайша, гироскоптың шығыс сигналының негізгі құраушысы синус құраушысынан асатын конверт бойымен екіншілік тербелістердің косинустық құраушысы болады.

ММГ минималды динамикалық қателіктерін қамтамасыз етудің маңызды талабы - өлшенетін жылдамдықтың жиілік аймағында оның АЖС тұрақтылығын қамтамасыз ету.

Қателікке негізгі үлес қосылады:

- біріншілік тербелістердің амплитудасы мен жиілігінің қателігі;
- біріншілік және екіншілік тербелістердің бұзылуының берілген жиілігінің қателігі.

Бұл қателіктердің төмендеуіне біріншілік тербелістерді тұрақтандыру жүйесін (амплитуда мен жиілікті тұрақтандыру) және атқарушы және басқару электродтары арқылы «электростатикалық қаттылықты» енгізу арқылы бұзылу жиілігін тұрақтандыру жүйесін қолдану арқылы қол жеткізіледі [14].

2.4 Микромеханикалық гироскоптың діріл әсеріне сезімталдығын талдау

Нақты діріл әсерлері уақыттың кездейсоқ функциялары болып табылады, сондықтан кездейсоқ кең жолақты діріл (ККЖД) бұл құрылғыдағы нақты процестерді толық сипаттайды. ККЖД кезінде зерттелетін құрылғыға айнымалы үдеу әсер етеді, оның амплитудасы мен жиілігі берілген спектрлік тығыздығы бар кездейсоқ шамалар болып табылады, бұл белгілі бір жиілік диапазонында құрылғының барлық резонанстық жиіліктерін бір уақытта қоздыруға мүмкіндік береді.

Синусоидалы діріл кезінде құрылғыға ауыспалы үдеу де әсер етеді. Гироскоптың резонанстық жиіліктері дірілдің жиілік диапазонының шегінен жоғары болғандықтан, гироскоптағы резонанстар пайда болмайды және аналитикалық есептеулер үшін синусоидалы дірілдің әсерін қарастыруға болады.

Екіншілік тербелістерді сипаттайтын теңдеулер жүйесіне келесі белгілерді енгіземіз:

$$h = 2\Omega_z y_m \nu; \quad h_1 = \Omega_x \Omega_y y_m; \quad h_2 = k_{yx} y_m; \quad h_3 = \dot{x}_0 q; \quad h_4 = -\dot{z}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_z; \quad \xi_2 = \frac{\omega_{x2}}{Q_{x2}}; \quad \xi_1 = \frac{\omega_{x1}}{Q_{x1}};$$

содан кейін X осі бойынша теңдеулерді келесі түрде аламыз:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_2 + \xi_2 \dot{x}_2 + x_2 \omega_{m4}^2 - \beta_3 x_1 &= h \cos vt - (h_1 - h_2) \sin \omega_y t - h_3 \cos qt + \\ & \quad h_4 \sin qt, \\ \ddot{x}_1 + \xi_1 \dot{x}_1 + x_1 \omega_{m3}^2 - \alpha_3 x_2 &= h_4 \sin qt, \\ \ddot{x}'_2 + \xi'_2 \dot{x}'_2 + x'_2 (\omega'_{m4})^2 - \beta'_3 x'_1 &= -h \cos vt + (h_1 - h_2) \sin \omega_y t - \\ & \quad h_3 \cos qt + h_4 \sin qt, \\ \ddot{x}'_1 + \xi'_1 \dot{x}'_1 + x'_1 (\omega'_{m3})^2 - \alpha'_3 x_2 &= h_4 \sin qt, \end{aligned} \quad (2.18)$$

мұндағы ν - біріншілік тербелістердің жиілігі; q - діріл жиілігі. Теңдеулерден аралық жақтаулар мен инерциялық денелер біріншілік тербелістердің жиілігімен және заң бойынша діріл жиілігімен тербелістер жасайтындығын көруге болады:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= x_1^{\text{инф}} \cos(vt + \varepsilon_{11}) + x_1^{\text{КВ}} \sin(vt + \varepsilon_{12}) + x_{11}^{\text{вибр}} \cos(qt + \varepsilon_{13}) + \\ & \quad x_{12}^{\text{вибр}} \sin(qt + \varepsilon_{14}), \\ x_2(t) &= x_2^{\text{инф}} \cos(vt + \varepsilon_{21}) + x_2^{\text{КВ}} \sin(vt + \varepsilon_{22}) + x_{21}^{\text{вибр}} \cos(qt + \varepsilon_{23}) + \\ & \quad x_{22}^{\text{вибр}} \sin(qt + \varepsilon_{24}), \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned}
x'_1(t) &= x_1^{\text{инф}} \cos(vt + 180 + \varepsilon'_{11}) + x_1^{\text{KB}} \sin(vt + 180 + \varepsilon'_{12}) + \\
&\quad x_{11}^{\text{вибр}} \cos(qt + \varepsilon'_{13}) + x_{12}^{\text{вибр}} \sin(qt + \varepsilon'_{14}), \\
x'_2(t) &= x_2^{\text{инф}} \cos(vt + 180 + \varepsilon'_{21}) + x_2^{\text{KB}} \sin(vt + 180 + \varepsilon'_{22}) + \\
&\quad x_{21}^{\text{вибр}} \cos(qt + \varepsilon'_{23}) + x_{22}^{\text{вибр}} \sin(qt + \varepsilon_{24}),
\end{aligned}$$

мұндағы ε_{ij} – өлшенген бұрыштық жылдамдықтар мен ММГ сенсор элементтерінің қозғалысы арасындағы фазалық ығысу.

(2.19) формулалардағы алғашқы құраушылар амплитудасы өлшенетін бұрыштық жылдамдыққа байланысты болатын ақпараттық тербелістер болып табылады. Біріншілік тербелістердің жиілігімен пайда болатын тербелістердің екіншілік құраушылары біріншілік және екіншілік арналар арасындағы крест байланысына байланысты. q жиілігімен тербелістердің үшінші құраушылары базаның діріліне байланысты. Объектінің өлшенетін бұрыштық жылдамдығы туралы ақпарат инерциялық денелердің тербелістерінің амплитудасында болады, олар анықталады:

$$\begin{aligned}
x_1^{\text{инф}} &= \frac{\sqrt{(\Delta L_1)^2 + (\Delta N_1)^2}}{\Delta_1}, \quad x_1^{\text{KB}} = \frac{\sqrt{(\Delta L_2)^2 + (\Delta N_2)^2}}{\Delta_1}, \quad x_1^{\text{вибр}} = \frac{\sqrt{(\Delta L_3)^2 + (\Delta N_3)^2}}{\Delta_2}, \quad \text{мұндағы} \\
\Delta_1 &= (v^2 - \omega_{m4}^2)^2 [(v^2 - \omega_{m3}^2)^2 + v^2 \xi_2^2] + v^2 \xi_2^2 [(v^2 - \omega_{m3}^2)^2 + v^2 \xi_1^2] + \\
&\quad \alpha_2 \beta_2 [\alpha_2 \beta_2 + 2\omega_y^2 \xi_1 \xi_2]; \\
\Delta L_1 &= h \alpha_2 [(v^2 - \omega_{m3}^2)(v^2 - \omega_{m4}^2) + \alpha_2 \beta_2 + v^2 \xi_1 \xi_2]; \\
\Delta N_1 &= -h \alpha_2 v [\xi_1 (v^2 - \omega_{m4}^2) + \xi_2 (v^2 - \omega_{m3}^2)]; \\
\Delta N_2 &= (h_1 - h_2) \alpha_2 [\alpha_2 \beta_2 + v^2 \xi_1 \xi_2 - (v^2 - \omega_{m4}^2)(v^2 - \omega_{m3}^2)]; \\
\Delta L_2 &= (h_1 - h_2) \alpha_2 v [\xi_1 (v^2 - \omega_{m4}^2) - \xi_2 (v^2 - \omega_{m3}^2)], \\
\Delta_2 &= (q^2 - \omega_{m4}^2)^2 [(q^2 - \omega_{m3}^2)^2 + q^2 \xi_2^2] + q^2 \xi_2^2 [(q^2 - \omega_{m3}^2)^2 + q^2 \xi_1^2] \\
&\quad + \alpha_2 \beta_2 [\alpha_2 \beta_2 + 2q^2 \xi_1 \xi_2]; \\
\Delta L_3 &= h_3 \{ (q^2 - \omega_{m3}^2) [(q^2 - \omega_{m4}^2)^2 + q^2 \xi_1 \xi_2] \\
&\quad + \alpha_2 [(\alpha_2 \beta_2 + q^2 \xi_1 \xi_2) - (q^2 - \omega_{m4}^2)(q^2 - \omega_{m4}^2 + \beta_2)] \} \\
&\quad + q h_4 \{ \alpha_2 [\xi_2 (q^2 - \omega_{m3}^2) + \xi_1 (q^2 - \omega_{m4}^2)] \\
&\quad + [\xi_1 (q^2 - \omega_{m4}^2)^2 + \alpha_2 \beta_2 \xi_2 - q^2 \xi_1 \xi_2] \}; \\
\Delta N_3 &= h_3 q \{ \alpha_2 [\xi_2 (q^2 - \omega_{m3}^2) + \xi_1 (q^2 - \omega_{m4}^2)] \\
&\quad - \xi_1 (q^2 - \omega_{m3}^2)(q^2 - \omega_{m4}^2) - \xi_2 (\alpha_2 \beta_2 + q^2 \xi_1 \xi_2) \} \\
&\quad + h_4 \alpha_2 [-(\alpha_2 \beta_2 + q^2 \xi_1 \xi_2) + (q^2 - \omega_{m4}^2)(q^2 - \omega_{m3}^2 + \beta_2)].
\end{aligned} \tag{2.20}$$

Инерциялық денелердің тербелісі сенсорлық контейнерлердің өзгеруіне, содан кейін шығыс сигналдарына айналады. Z осі бойымен инерциялық денелердің тербелісі ұқсас, бірақ осы арнаның параметрлерімен.

(2.19), (2.20) - шешімдерден көріп отырғанымыздай, біріншілік тербелістердің жиілігімен болатын инерциялық денелердің ақпараттық тербелістеріне тербелістер және біріншілік тербелістердің жиілігімен тербелістер әсер етеді, бірақ ақпараттық тербелістерге қатысты 900-ге ауысады.

Бұл тербелістер ақпаратты өңдеу жүйесімен жойылуы мүмкін кедергі болып табылады [16].

Гироскоптың сенсоры (2.1-сурет) жалпы нүктесі бар алты сенсорлық электродты құрылымға ие, олардың сыйымдылығы өлшенетін бұрыштық жылдамдыққа байланысты өзгереді (2.3-кесте).

2.3 Кесте - Сенсорлық электродтардың сыйымдылығы

	$C_{1x} = C_{01} - \Delta C_{\Omega z} - \Delta C_{ax};$ $C_{1x}^* = C_{01} + \Delta C_{\Omega z} - \Delta C_{ax};$ $C_{2x} = C_{01} + \Delta C_{\Omega z} + \Delta C_{ax};$ $C_{2x}^* = C_{01} - \Delta C_{\Omega z} + \Delta C_{ax};$ $C_{1z} = C_{02} + \Delta C_{\Omega x} - \Delta C_{az};$ $C_{1z}^* = C_{02} - \Delta C_{\Omega x} - \Delta C_{az}.$
--	---

C_{01}, C_{02} – сыйымдылықтардың біріншілік мәндері; $\Delta C_{\Omega x}, \Delta C_{\Omega z}$ – бұрыштық жылдамдықтарға байланысты сыйымдылықтардың өзгеруі; $\Delta C_{ax}, \Delta C_{az}$ – базаның үдеуіне байланысты сыйымдылықтардың өзгеруі (соның ішінде діріл үдеуі). Сигналдарды өңдеу жүйесін өлшеу объектісі физикалық шамалар жиынтығы болып табылады: екі бұрыштық жылдамдық және декарттық координаттар жүйесінің осьтері бойымен үдеулер (2.4-кесте).

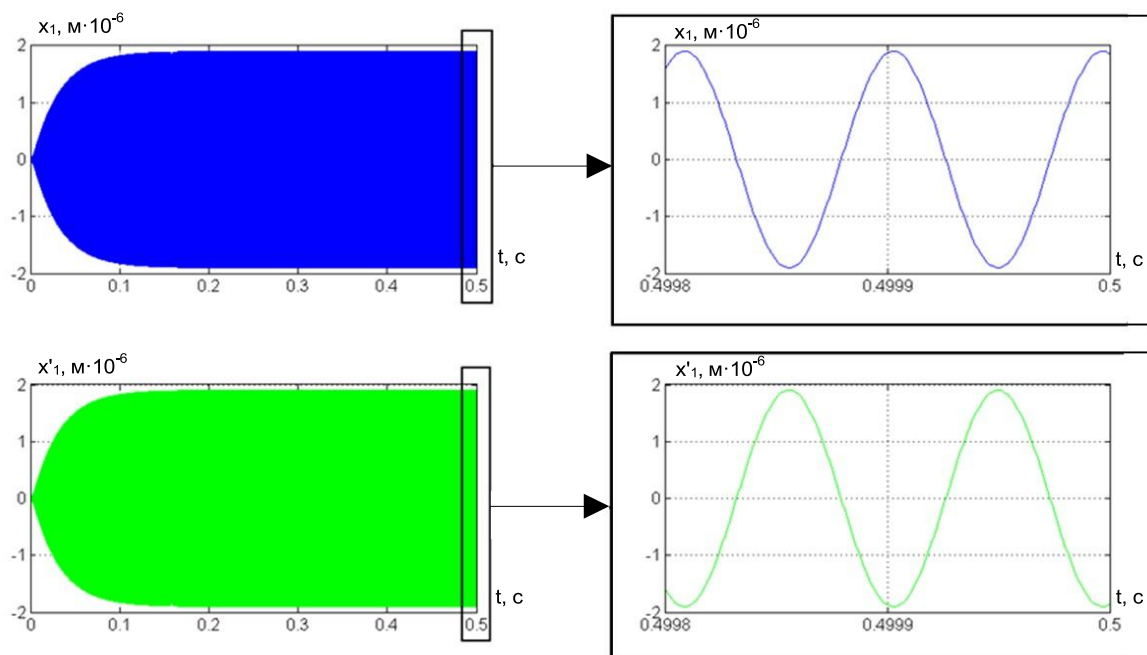
2.4 Кесте - Жылдамдықты анықтау үшін пайдаланылатын сыйымдылықтар

№	Физикалық шама	Пайдаланылатын сыйымдылықтар	Операция	Нәтиже
1	бұрыштық жылдамдық Ω_x	C_{1z} және C_{1z}^*	$C_{1z}^* - C_{1z}$	$2\Delta C_{\Omega x}$
2	бұрыштық жылдамдық Ω_z	C_{1x} және C_{1x}^*	$C_{1x}^* - C_{1x}$	$2\Delta C_{\Omega z}$

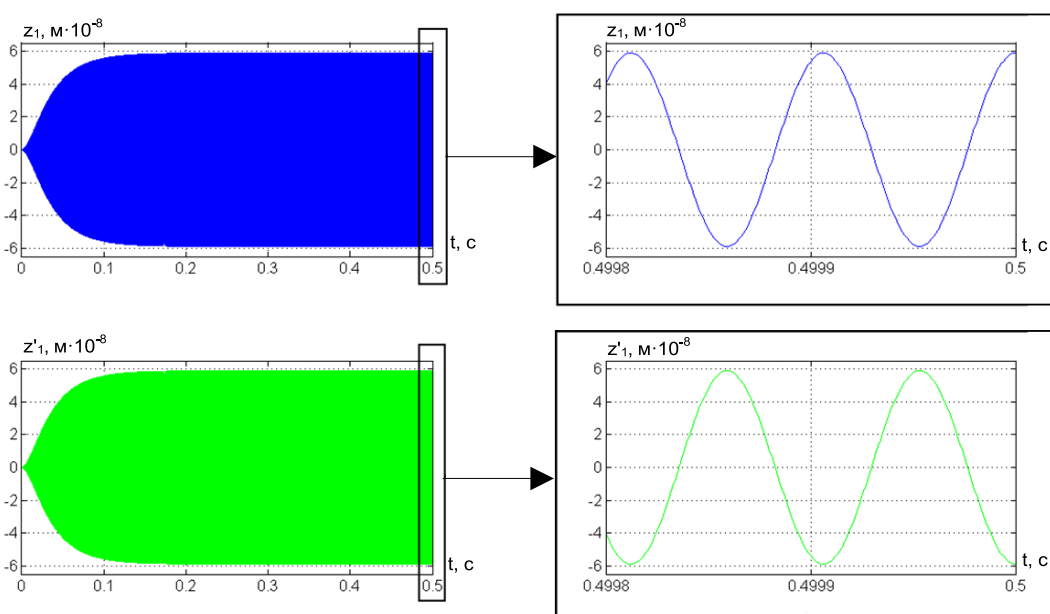
Гироскоптың бұрыштық жылдамдықтарды анықтау алгоритмі (2.1, 2.2-кестелер) діріл кедергісін өтеуге мүмкіндік береді, өйткені антифазалық біріншілік қозғалысты қолдану арқылы олардың қарама-қарсы белгілері бар.

Математикалық модельдеу Matlab/Simulink көмегімен жүзеге асырылады, оның нәтижелері келесі суреттерде келтірілген.

Діріл болмаған кезде (2.19, 2.20 - суреттер) аралық жақтаулар мен инерциялық денелер бір дене ретінде бірдей амплитудамен тербелістер жасайды.

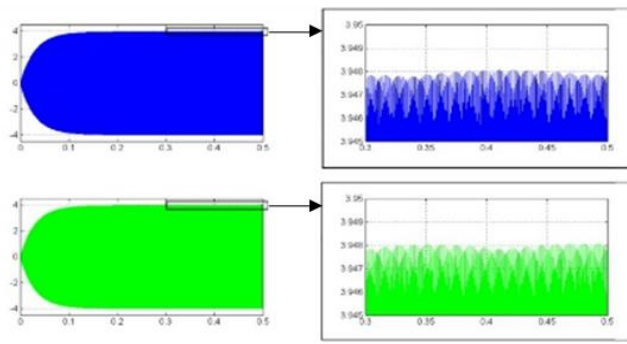


2.19 Сурет - Діріл болмаған кездегі ММГ сенсорының тербелісі (X осі)

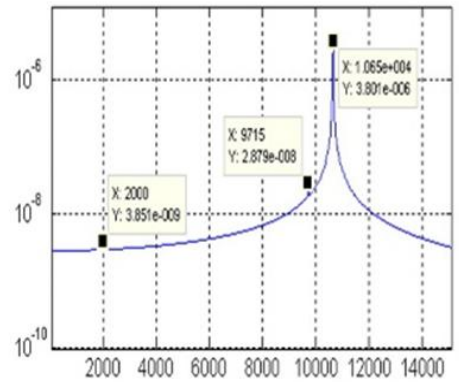


2.20 Сурет - Діріл болмаған кездегі ММГ сенсорының тербелісі (Z осі)

Базаның дірілдеуі біріншілік (2.21-сурет) және екіншілік ақпараттық тербелістерге (2.22, 2.23 - суреттер) сәйкес келетін діріл жиілігі бар сенсордың тербелістерінің пайда болуын тудырады.



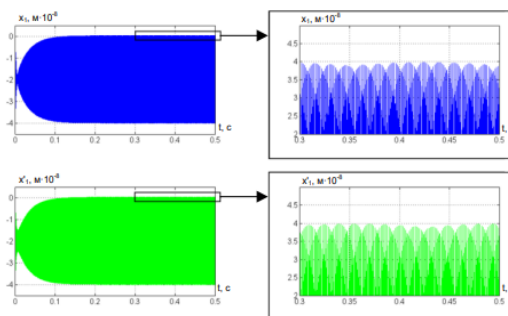
а)



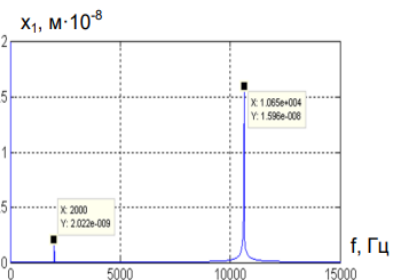
б)

2.21 Сурет - Діріл болған кездегі ММГ сенсорының біріншілік тербелісі (Y осі): а - уақытша сипаттамалар; б - сигнал спектрі

Біріншілік тербелістердің амплитудасы тербеліс тербелістерінің амплитудасынан екі ретті артық (2.20,б - сурет). Дірілдің біріншілік арнаға әсерін елеуге болады.

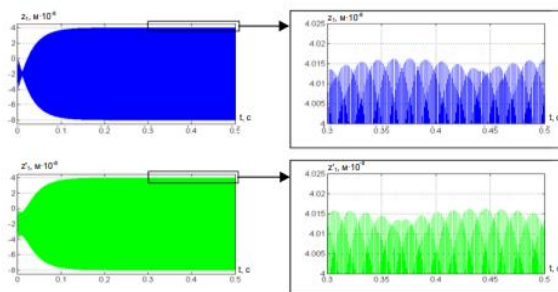


а)

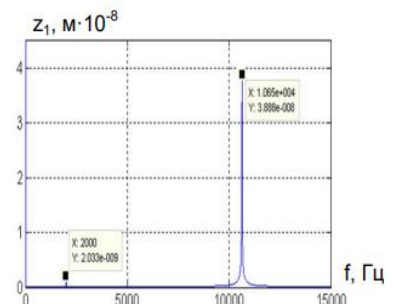


б)

2.22 Сурет – Діріл болған кезде ММГ сенсорының екіншілік тербелісі (X осі): а - уақытша сипаттамалар; б - сигнал спектрі



а)



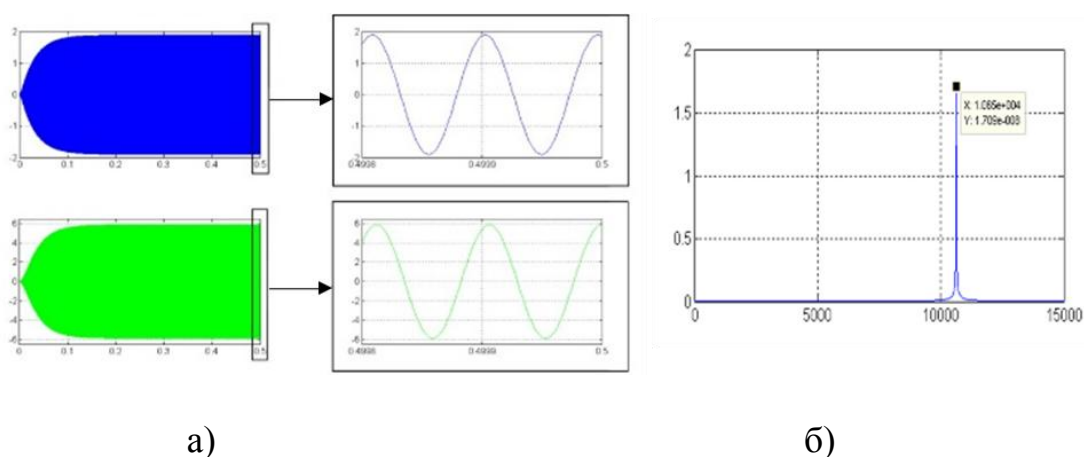
б)

2.23 Сурет– Діріл болған кездегі Z осі бойынша ММГ сенсорының екіншілік тербелісі^ а - уақыт сипаттамалары; б - сигнал спектрі

Барлық екіншілік тербелістердің спектрінде екі гармоника бар – біріншілік тербелістердің қозу жиілігі бар негізгі және $f=2$ кГц діріл жиілігі бар қосымша (2.22,б; 2.23,б - суреттері).

ММГ ақпараттық тербелістерінің жиілігі дірілдің максималды жиілігінен шамамен бес есе көп, сондықтан шығыс сигналдарын өңдеу кезінде діріл жиілігімен діріл кедергісін азайтуға болады. Гироскоптың меншікті жиіліктері діріл жиіліктерінің диапазонынан тыс орналасқандықтан, гироскопта діріл әсерінің резонанстық күшеюі болмайды [17].

Әрекет етуші күштерге пропорционал гироскоп сенсорының шығыс сигналдары бір-бірінен алынады ($x_1 - x'_1$) және ($z_1 - z'_1$), Сондықтан сызықтық үдеудің, аударылатын дірілдің әрекеті жойылады және шығуда өлшенетін бұрыштық жылдамдыққа пропорционалды сигнал пайда болады (2.24 - сурет).



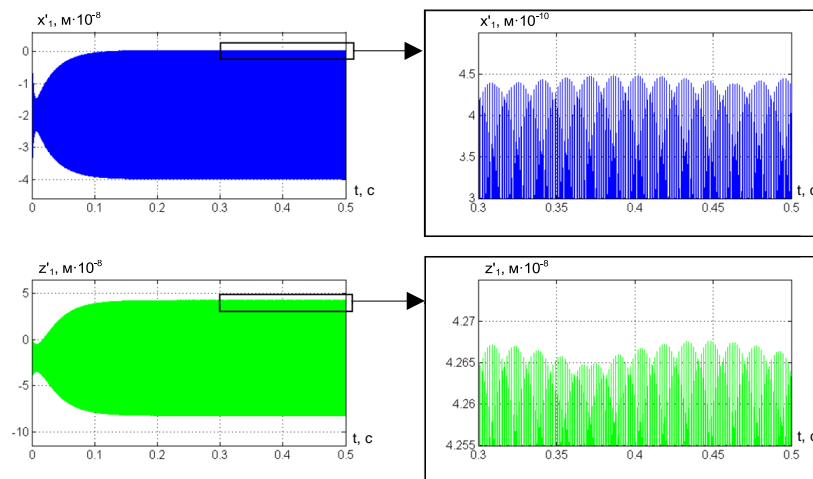
2.24 Сурет - Діріл кезіндегі бұрыштық жылдамдықты анықтау алгоритмі:
а - уақыт сипаттамалары; б - сигнал спектрі

Бұрыштық жылдамдықты анықтау алгоритмі ағымдағы дірілдің гармоникалық компонентін керемет түрде сүзеді, шығыс сигналының спектрінде өлшенетін бұрыштық жылдамдықты анықтайтын біріншілік тербеліс жиілігі бар ақпараттық құрауышты ғана қалдырады.

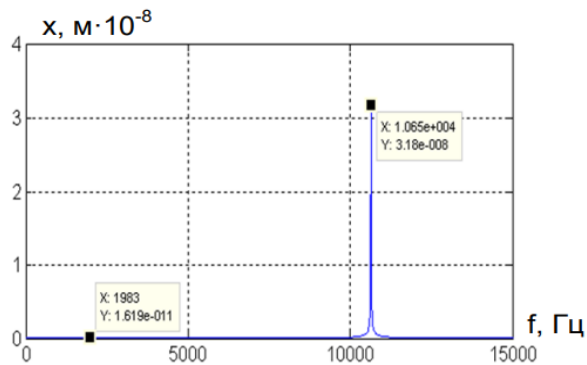
Барлық осы модельдеу нәтижелері екіншілік параметрлердің сәйкестігі жағдайында алынады. Алайда, дайындау технологиялық процесінің және температураның өзгеруінің есебінен екіншілік арналардың сипаттамаларында айырмашылық орын алады (атап айтқанда, оның өз жиілігі өзгереді) [18].

Екіншілік тербелістердің меншікті жиіліктерінің параметрлері 0,05% - ға өзгерген кезде бұрыштық жылдамдықты анықтау алгоритмдерінің жұмысын қарастырыңыз.

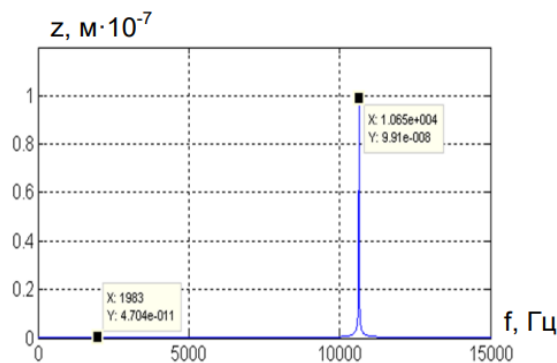
ММГ екіншілік тербелістерінің спектрінде мыналар бар: діріл жиілігі мен біріншілік арнаның қозу жиілігі бар гармоникалық тербелістер (ақпараттық ақпарат) (2.25 - сурет).



2.25 Сурет - Өз жиіліктерінің 0,05%-ке айырмашылығы кезіндегі ММГ екіншілік тербелісі



а)



б)

2.26 Сурет - Діріл кезіндегі бұрыштық жылдамдықты анықтау алгоритмі:
а - X осі, б - Z осі

Алгоритм екіншілік арналардың жиілігі сәйкес келгендей жұмыс істейді. Тұрақты үдеуге байланысты құраушылар өтеледі. Гироскоптың екіншілік тербелістерінің жалпы сигналының спектрінде (2.26, б – сурет) тербеліс әсерінің

гармоникасы қалды, оның амплитудасы ақпараттық тербелістердің амплитудасымен салыстырғанда аз және оны шығыс сигналында сүзуге болады.

2.5 Микромеханикалық гироскоптың соққы әсеріне сезімталдығын талдау

Соққы жүктемелерінде жүктеме мөлшерін ғана емес, сонымен қатар оның әрекет ету уақытын да ескеру қажет.

Әсер ету сипаты жүйенің тербелісінің T_0 кезеңіне байланысты [19]. ММГ сенсорының соққы кезіндегі және одан кейінгі салыстырмалы қозғалысы $\omega_0\tau$ көбейтіндісімен анықталады, мұндағы ω_0 - сенсордың соққы бағытындағы ең аз табиғи тербеліс жиілігі; τ - соққы импульсінің ұзақтығы. $\omega_0\tau$ кезінде соққы қысқа болады, үдеу импульсінің формасы маңызды емес, салыстырмалы қозғалыс импульс аяқталғаннан кейін максимумға жетеді. Соққы аяқталғаннан кейін ММГ сенсорының еркін тербелісі пайда болады. Әзірленген ММГ үшін барлық осьтер бойынша $\omega_0\tau \approx 33,4$, бұл > 1 құрайды, сондықтан соққы ұзақ және соққы үдеулерінің әсерінен қозғалыстарды квазистатикалық деп санауға болады. Соққы импульсінің τ ұзақтығы сенсордың табиғи тербелістерінің T_0 кезеңінен бірнеше есе көп. Осылайша, соққы кезінде ММГ сенсорының максималды салыстырмалы қозғалыстарын үдеу әсерінен статикалық ауытқулар ретінде қарастыруға болады

$$\Delta x_i = \frac{W_x}{W_{3,4}^2}; \Delta y_i = \frac{W_y}{W_{1,2}^2}; \Delta z_i = \frac{W_z}{W_{5,6}^2}; i = 1,2, \quad (2.21)$$

мұндағы W_x, W_y, W_z - x, y, z бағыттары бойынша соққы үдеулері. Соққы үдеуі келесідей анықталады:

$$W = a \cdot k,$$

мұндағы a - соққы импульсінің үдеуінің амплитудасы; k жартылай синусоидальды импульс үшін соққы кезіндегі берілу коэффициенті:

$$k = \frac{2v}{\mu^2 - 1} \cos\left(\frac{\pi}{2\mu}\right),$$

мұндағы $\mu = \frac{\omega}{\omega_0}$; $\omega = \pi/\tau$ - соққы импульсінің шартты жиілігі; ω_0 - құрылымның меншікті жиілігі. Содан кейін гироскоп сенсорының жылжымалы және қозғалмайтын элементтеріне тиетін максималды үдеуді өрнек арқылы анықтауға болады:

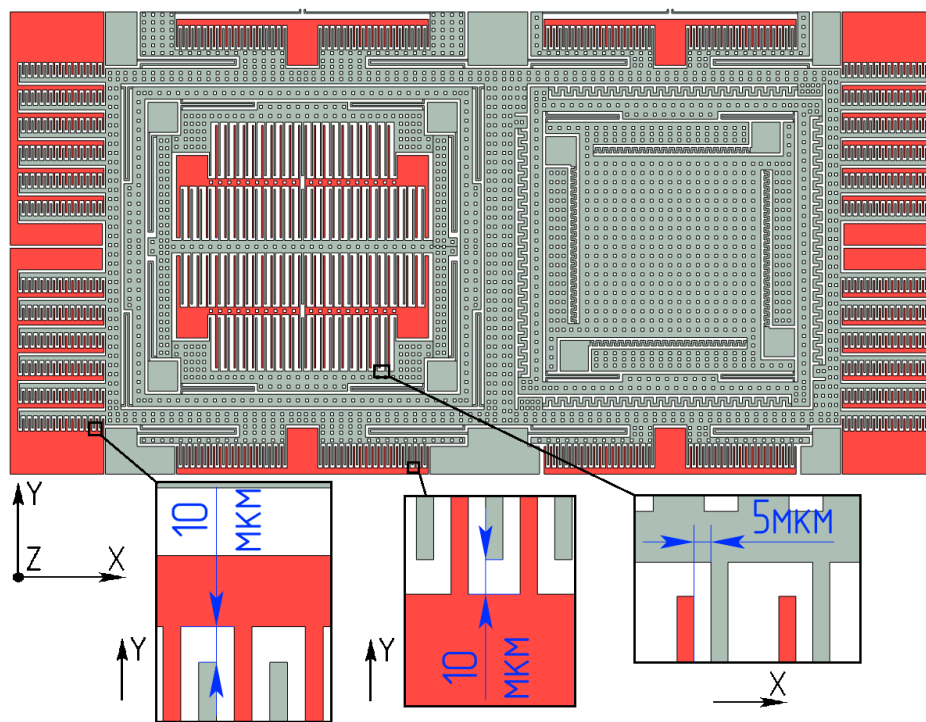
$$W_{max} = \Delta \cdot \omega_0^2,$$

мұндағы Δ - ММГ сенсорының жылжымалы және бекітілген құрылымдық элементтері арасындағы алшақтық. 2.3-кестеде ММГ сенсорының жылжымалы бөліктерінің қозғалмайтын бөлшектермен жанасуына әкелетін ең жоғары соққы үдеулерінің мәндері келтірілген.

2.3 Кесте - Жанасуға әкелетін максималды үдеулер

Δ , мкм	1	2	3	4	5	6	7	8	8,9	10
W_{max} , g	394	788	1182	1576	1970	2364	2758	3152	3500	3940

Ұзақтығы 500 мкс болатын 3500 g жартылай толқын түрінде соғылған кезде және гироскоп конструкциясында пайдаланылатын саңылауларда түйіспелі өзара әрекеттесулер болады (2.3 - кесте). Y осі бойымен қозғалу кезінде біріншілік тербелістерді қоздыру электростатикалық жетегінің электродтары арасындағы минималды алшақтық 10 мкм құрайды (2.27 - сурет). Егер гироскоп жұмыс істемейтін күйде болса, онда осы бағытта максималды үдеу әрекеті кезінде байланыс өзара әрекеттесуі болмайды. Ең қауіптісі - X және Z осьтерінің бағыттары, онда электродтар арасындағы ең аз алшақтық 5 мкм құрайды.



2.27 Сурет - Гироскоптағы саңылаулардың максималды шамасы

Электродты құрылымдардың тістерін X және Z осьтеріне тигізу 1970 g соққы үдеуімен жүреді. Байланыс өзара әрекеттесуі электродтардың тұйықталуына және құрылғының уақытша істен шығуына әкеледі, басқару жүйесінде электрлік сынуға кедергі келтіретін элементтерді енгізу қажет.

Сенімділік тұрғысынан ММГ-нің ең осал элементі серпімді аспа болып табылады, сондықтан онда пайда болатын кернеулерді білу қажет, олар ММГ механикалық сенсор жасалған кремний үшін рұқсат етілген кернеулерден аспауы керек ($\sigma_{\text{доп}} = 800 \text{ Мпа}$).

Бұл жағдайда беріктік критерийі ретінде деформацияланған элемент жинақтаған форманың өзгеруінің нақты потенциалдық энергиясының мөлшері алынады. Бұл теорияға сәйкес, қауіпті күй форманың өзгеруінің нақты потенциалдық энергиясы оның шекті мәніне жеткенде пайда болады, бұл қарапайым созылу - сығылу тәжірибесінен анықталады. Демек, қалыпты кернеулер арқылы жазылған беріктік жағдайы пайда болады.

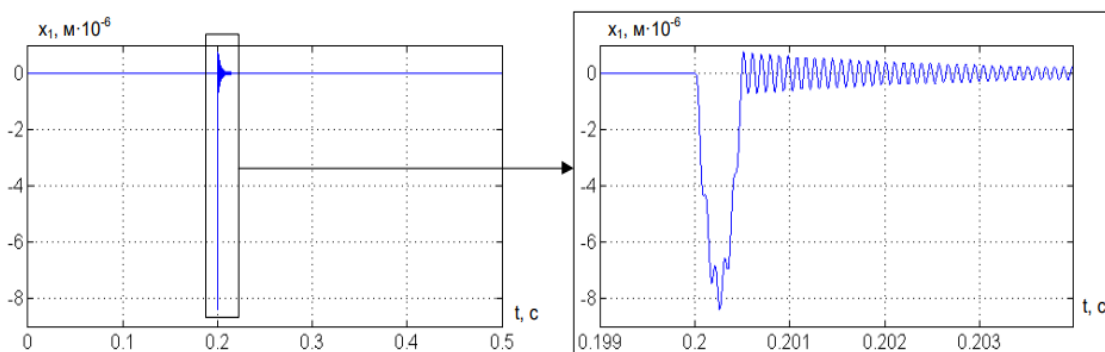
$$\sigma_{\text{э}} \leq [\sigma_{\text{доп}}].$$

Серпімді аспалардың деформациясынан басқа, электродтардың жанасу жылдамдығы қауіпті. Соққы кезінде материалдың бұзылуы, егер соққы жылдамдығы мәнінен асып кетсе, орын алуы мүмкін [12].

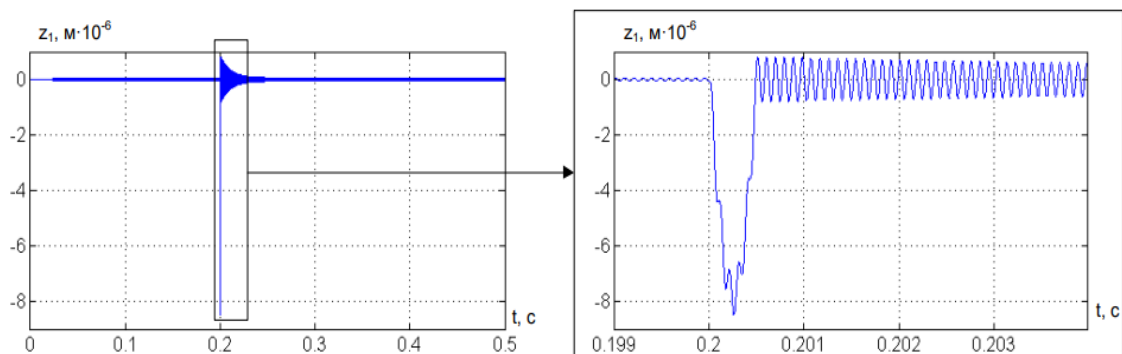
$$V_{\text{уд}} = \frac{\sigma_{\text{доп}}}{\sqrt{E\rho}}, \quad (2.22)$$

мұндағы ρ -кремнийдің тығыздығы, E -серпімділік модулі. $\langle 110 \rangle$ бағытындағы монокристалды кремний үшін рұқсат етілген соққы жылдамдығы 25 м/сек құрайды. Қарастырылып отырған ұзақ соққы үшін соққы жылдамдығы $V_0 = \frac{W}{\omega_0}$. ММГ сенсорының дамыған дизайнының алғашқы үш меншікті жиілігі 10 кГц жиілігіне жақын, сондықтан гироскоп үшін соққы жылдамдығы 0,51 м/с құрайды және байланыс кезінде материалдың бұзылуы болмайды.

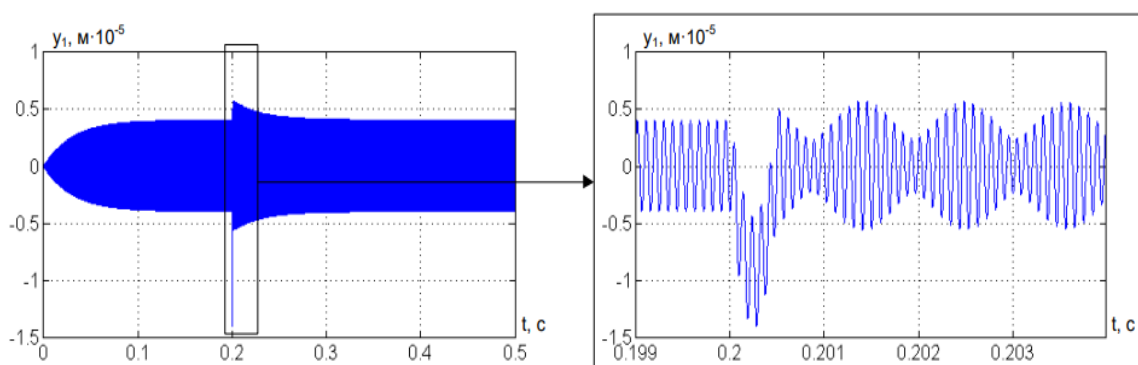
2.28, 2.29, 2.30-суреттерде жұмыс істеп тұрған, бірақ контактілі әсерлесусіз гироскопқа соққы әсерін компьютерлік модельдеудің нәтижелері келтірілген.



2.28 Сурет - Соққы кезіндегі ММГ сенсорының Х осі бойымен орын ауыстыруы



2.29 Сурет – Соққы кезіндегі ММГ сенсорының Z осі бойымен орын ауыстыруы



2.30 Сурет - Соққы кезіндегі ММГ сенсорының Y осі бойымен орын ауыстыруы

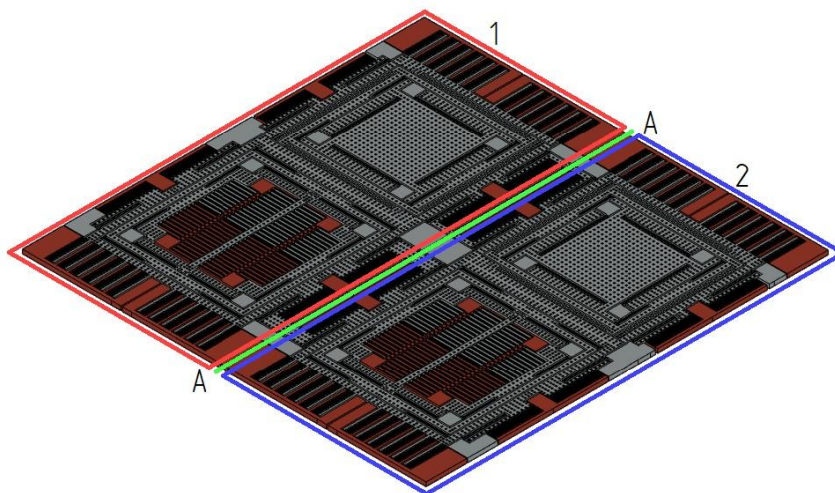
Барлық осьтер бойымен қозғалыстар бар саңылаулардан асып түседі, сондықтан ММГ дизайнында жылжымалы бөліктердің байланысы мен серпілісі болады. Біріншілік тербелістердің осі бойымен жанасу да жүреді, өйткені максималды қозғалыс осы ось бойымен 10 мкм аралықтан асады. Бұл жұмыс режиміндегі соққылардың әсерінен қозғалысқа 4 мкм біріншілік тербелістердің амплитудасы қосылатындығына байланысты. Сондықтан соққы кезінде механикалық байланыс болған жағдайда құрылымды есептеу қажет.

Дірілге төзімділік пен соққыны сынау үшін ANSYS Workbench бағдарламалық кешені қолданылады. Пайдаланылған модульдер:

- Harmonic response analysis - Гармоникалық талдау. Гармоникалық талдау нәтижелері уақыт өте келе синусоидалы (гармоникалық) өзгеретін жүктемелерге сызықтық құрылымның стационарлық реакциясын анықтау үшін қолданылады, бұл құрылымның белгілі бір жиілік диапазонындағы резонансқа тұрақтылығын анықтауға, сонымен қатар қандай кернеулер пайда болатындығын және олардың сыни еместігін анықтауға мүмкіндік береді.
- Transient structural analysis - Өтпелі құрылымдық талдау. Талдаудың

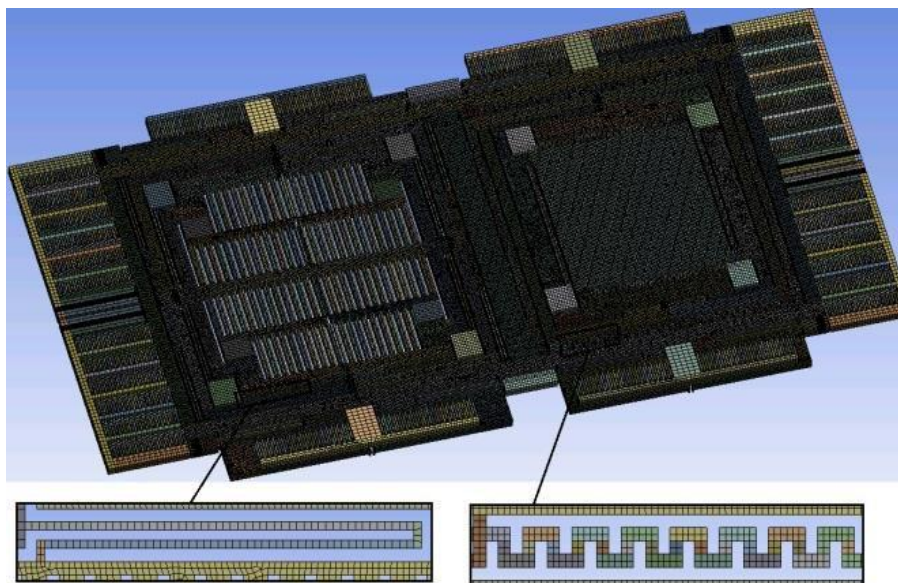
бұл түрі кез-келген стационарлық емес жүктемелердің әсерінен құрылымның динамикалық сипаттамаларын анықтау үшін қолданылады. Талдау барысында уақыттың өзгеруі, деформация және кернеу құрылымдары анықталады.

Діріл және соққы жүктемелері үш ортогональды бағытта орнатылады. ММГ конструкциясы (2.31-сурет) А-А осіне қатысты симметриялы, бұл оның тек бір жартысын ақырлы -элементтік модельдеумен шектеуге мүмкіндік береді.



2.31 Сурет – ММГ сенсорының 3D моделі

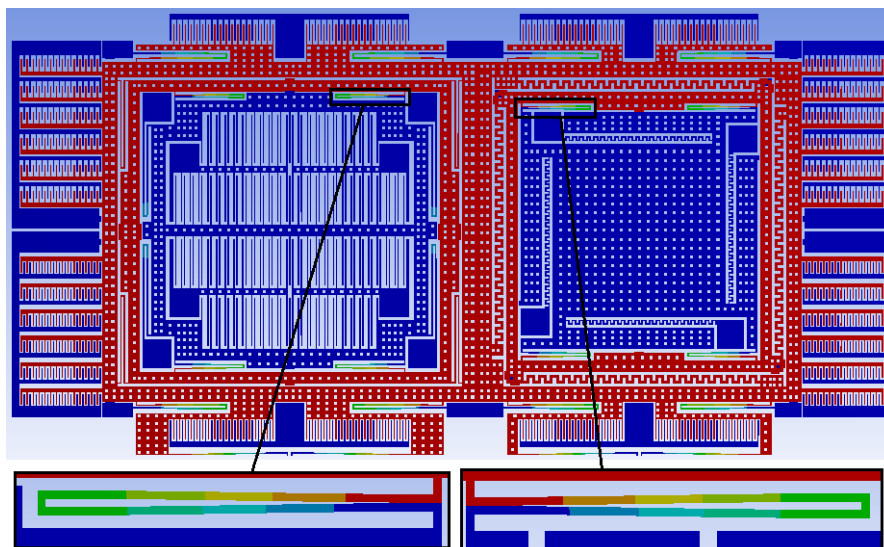
ММГ сенсорының конструкциясы T-Flex бағдарламасынан Parasolid форматы арқылы ANSYS Workbench-ке импортталады (2.32-сурет).



2.32 Сурет – АЭ тормен салынған ММГ сенсоры

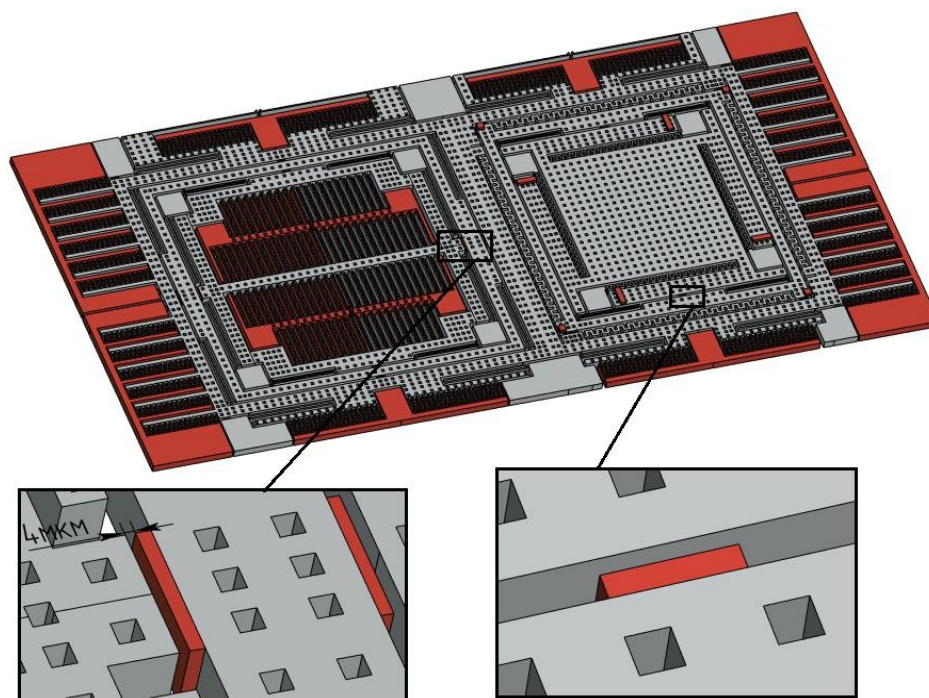
Ақырлы-элементтік моделі механикалық кернеулердің жоғары концентрациясы аймақтарында қажетті торлы тығыздағышы бар соңғы элементтерден тұрады.

500 мкс ішінде 3500g үдеуімен соққы кезінде гироскоп элементтерінің қозғалысы: X осі бойынша – $9,5 \cdot 10^{-6}$ м, Y осі бойынша – $9,2 \cdot 10^{-6}$ м, Z осі бойынша – $9,2 \cdot 10^{-6}$ м, егер қозғалысқа шектеулер болмаса. Құрылымның жылжымалы және бекітілген бөліктері арасындағы минималды бос орындар бірнеше есе аз, сондықтан байланыс өзара әрекеттесуі орын алады және серпімді аспада жанасу пайда болады (2.33-сурет).



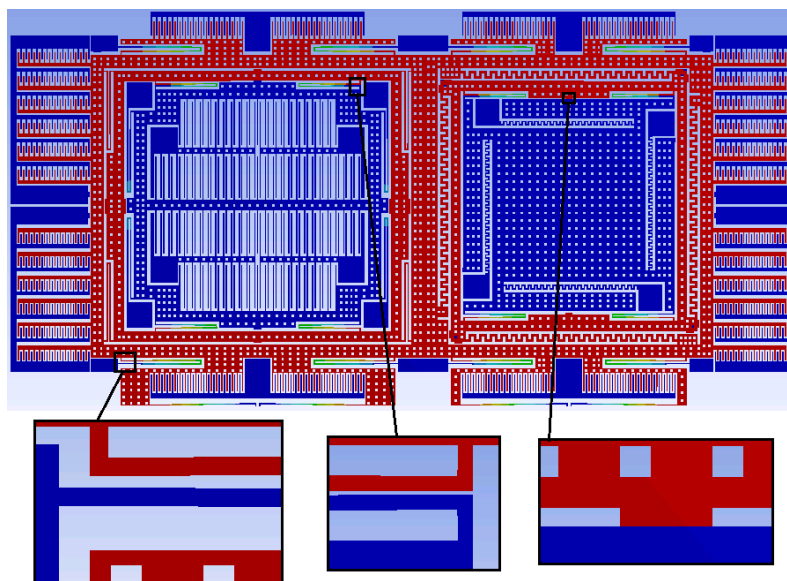
2.33 Сурет - Шектегіштерсіз гироскоптың соққы сәті

Серпімді аспалардың жанасуын болдырмау үшін гироскоптың қозғалысын 4 мкм-ге дейін шектейтін аялдамаларды орнатамыз (2.34-сурет).



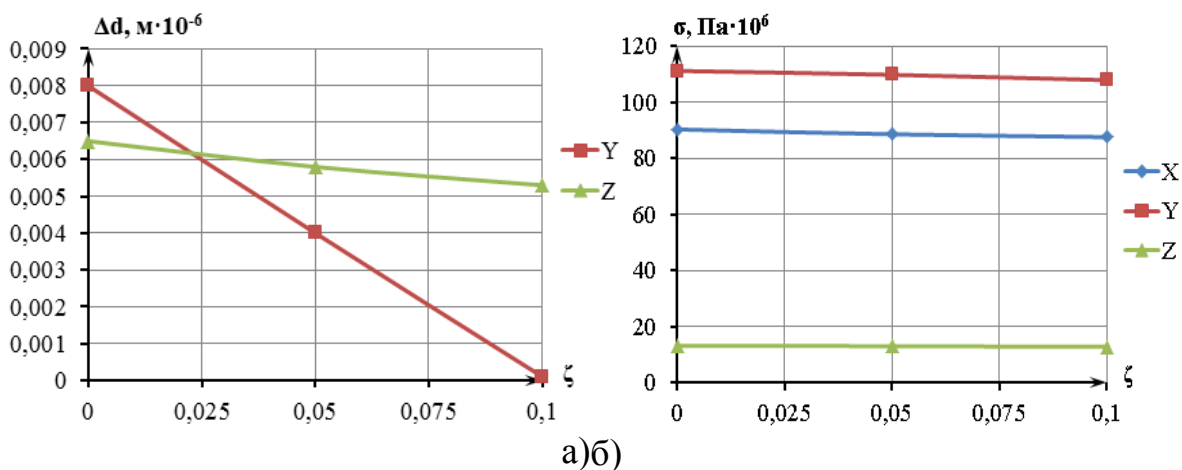
2.34 Сурет - Шектегіштері бар ММГ конструкциясы

Тарақ электродтарындағы және серпімді аспалардағы саңылаулардың 5 мкм құрайтынын ескерсек, онда оларда жанасу болмайды, тіреулер орналасқан жерлерде жанасу орын алады (2.35-сурет).

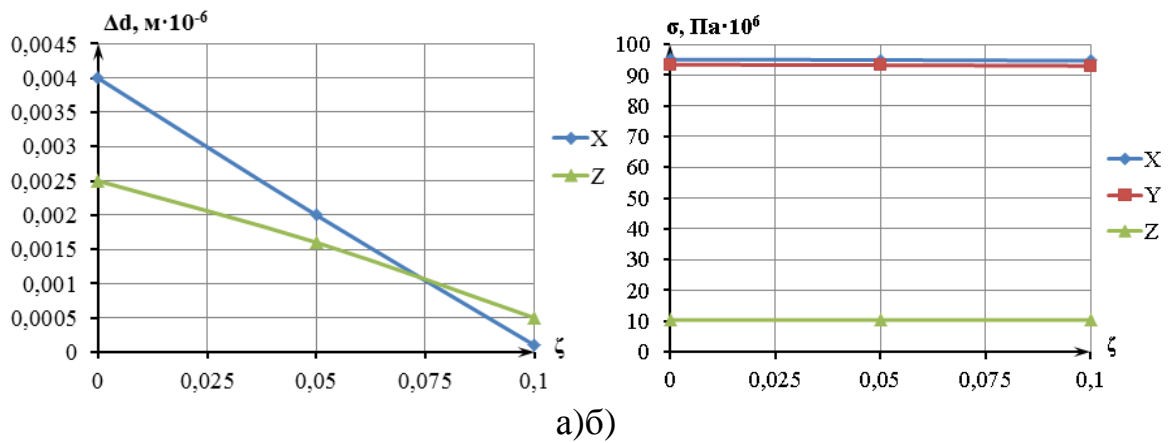


2.35 Сурет - Сенсордың шектегішпен жанасу сәті

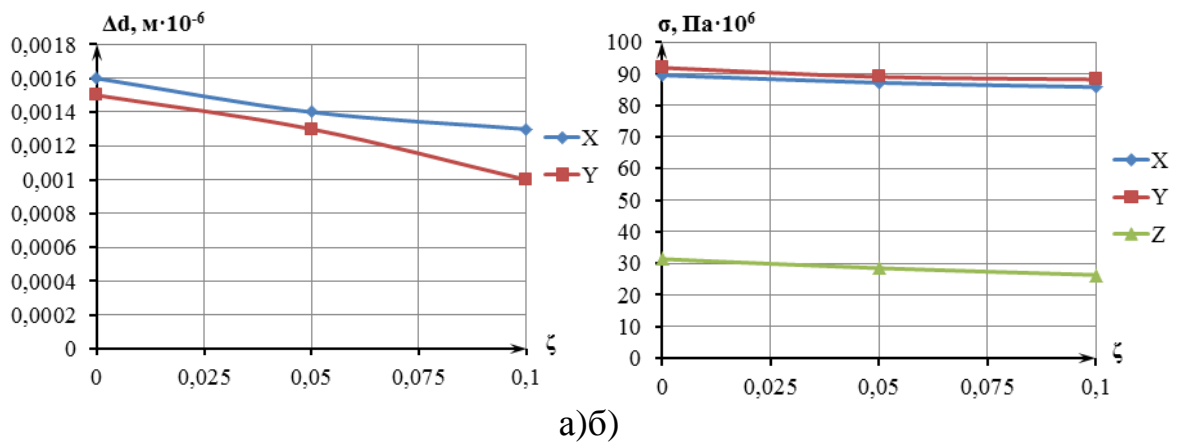
Айқас осьтер бойынша орын ауыстырулар аз, туындайтын кернеулер рұқсат етілген кернеуден аз (2.36, 2.37, 2.38-суреттер).



2.36 Сурет - X осі бойынша соққы кезінде конструкцияның орын ауыстырулары мен кернеулері: а) конструкция элементтерінің орын ауыстырулары; б) конструкциядағы кернеулер.

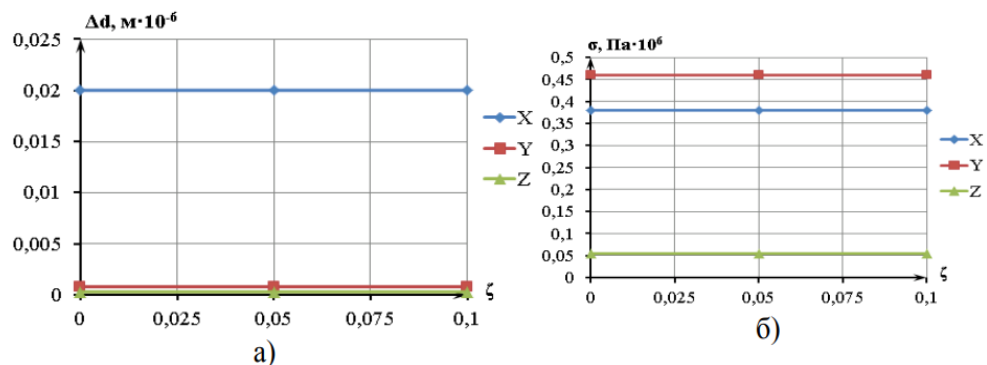


2.37 Сурет - Y осі бойынша соққы кезінде конструкцияның орын ауыстырулары мен кернеулері: а) конструкция элементтерінің орын ауыстырулары; б) конструкциядағы кернеулер.

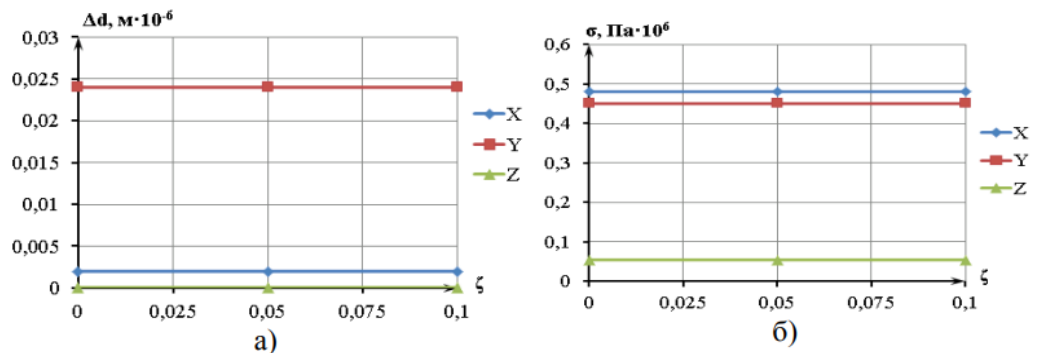


2.38 Сурет - Z осі бойынша соққы кезінде конструкцияның орын ауыстырулары мен кернеулері: а) конструкция элементтерінің орын ауыстырулары; б) конструкциядағы кернеулер.

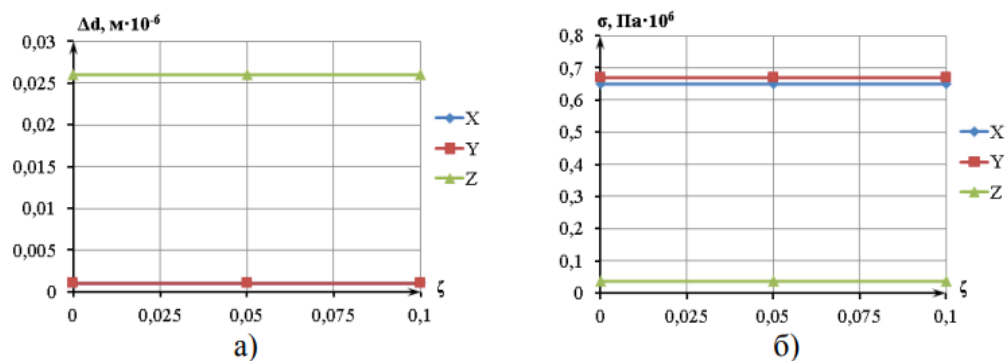
Тұрақсыздандыратын механикалық әсер - бұл прогрессивті діріл. Антифазалық бастапқы қозғалыс және бұрыштық жылдамдықтар туралы сигнал алудың алгоритміне байланысты қателіктердің діріл құраушылары өтеледі. Сондықтан дірілдің ММГ беріктігіне әсері қарастырылады (2.39, 2.40, 2.41-суреттер).



2.39 Сурет - X осі бойынша діріл кезінде конструкцияның орын ауыстырулары мен кернеулері (діріл жиілігі 2 кГц): а) конструкция элементтерінің орын ауыстырулары; б) конструкциядағы кернеулер



2.40 Сурет - Y осі бойынша діріл кезінде конструкцияның орын ауыстырулары мен кернеулері (діріл жиілігі 2 кГц): а) конструкция элементтерінің орын ауыстырулары; б) конструкциядағы кернеулер



2.41 Сурет - Z осі бойынша діріл кезінде конструкцияның орын ауыстырулары мен кернеулері (діріл жиілігі 2 кГц): а) конструкция элементтерінің орын ауыстырулары; б) конструкциядағы кернеулер

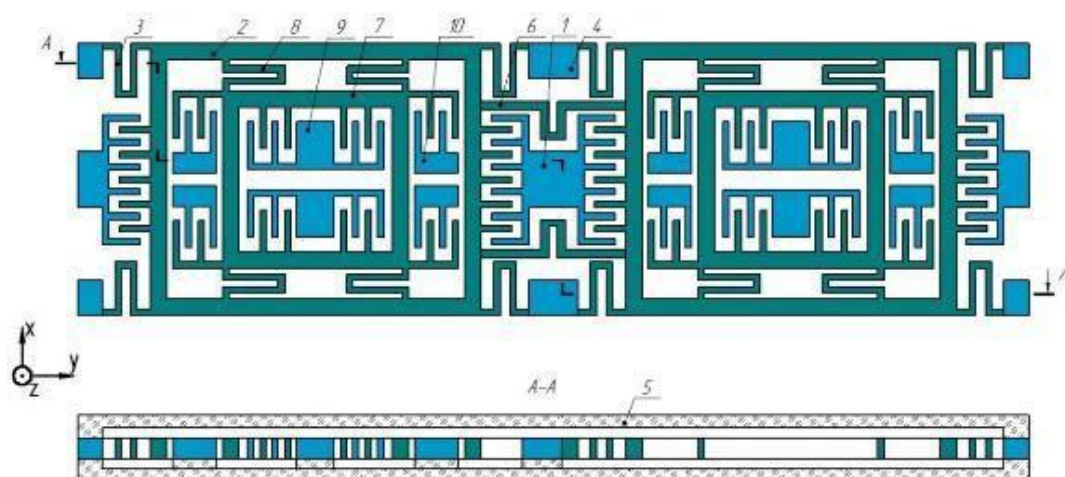
ММГ діріл тербелістерінің амплитудасы мкм фракцияларын құрайды, байланыс жоқ, пайда болатын кернеу рұқсат етілген кернеудің мәнінен аз.

3 ДІРІЛ МЕН СОҚҚЫЛАРҒА ТӨЗІМДІ БІР КОМПОНЕНТТІ МИКРОМЕХАНИКАЛЫҚ ГИРОСКОПТЫ ТАЛДАУ

Аспаптардың механикалық есептеуіне мыналар кіреді: меншікті жиіліктерді және тербелістердің меншікті нысандарын анықтауға арналған модальды есептеу, 10g дірілді үдету амплитудасы бар 20-2000 Гц жиіліктер диапазонындағы гармониялық дірілдің әсеріне, сондай-ақ ұзақтығы 550 мкс, 450 мкс, 320 мкс, 250 мкс, 150 мкс, 100 мкс және 50 мкс импульстің жартылай синусоидальды формасымен сәйкесінше 1500g, 3000g, 4500g, 7500g, 10000g, 15000g және 20000g үдеу амплитудасы бар соққыларға талдау.

3.1 Микромеханикалық гироскоптың функционалдық схемасы және математикалық моделі

Гироскоп Z осінің айналасындағы бұрыштық жылдамдықты өлшеу үшін қолданылады (3.1-сурет).



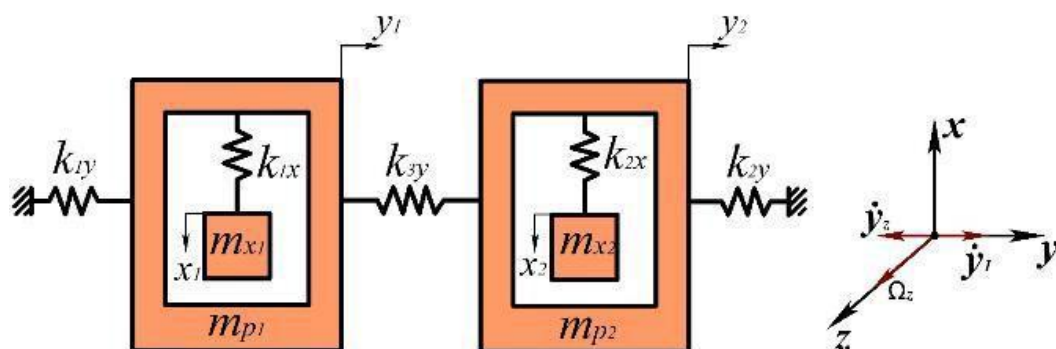
3.1 Сурет - ММГ сенсорының функционалдық схемасы

1 тарақ жетегі Y осі бойымен 3 серпімді аспаларға орнатылған 2-сыртқы жақтаулардың антифазалық гармоникалық бастапқы тербелістерін қоздырады және 5 негізіндегі 4 анкер арқылы бекітіледі. Сыртқы жақтаулар 6 серпімді элементтермен өзара байланысты, бұл олардың қарама-қарсы жақтардағы біріншілік тербелістерін бірдей жиілікпен қамтамасыз етеді. 7 инерциялық денелері Y осі бойымен 2-жақтаумен бірге бастапқы тербелістерді жасайды, өйткені Y, Z осьтері бойымен 8 серпімді аспаның қаттылығы X осі бойымен қаттылықтан әлдеқайда үлкен.

Ω_z бұрыштық жылдамдығы болған кезде Кориолис күштері пайда болады, олар X осі бойымен 7 инерциялық денелердің ақпараттық тербелістерін

қоздырады. Бұл денелердің, Ω_z пропорционалды жылдамдықтарының қозғалысы 9 электродтық құрылымдардың сыйымдылығын өзгертеді, олар сыйымдылық - кернеу түрлендіргіштеріне (СКТ) енеді.

Гироскоптың эквивалентті схемасы 3.2-суретте көрсетілген, мұнда m_{p1}, m_{p2} - біріншілік қозғалысты жасайтын 2-жақтаудың массасы; m_{x1}, m_{x2} - екіншілік ақпараттық қозғалысты жасайтын 8 -жақтаудың массасы;



3.2 Сурет - ММГ сенсорының эквивалентті схемасы

Лагранж теңдеуін қолдана отырып, гироскоп теңдеулерін келесі түрде аламыз:

– Y осі бойынша біріншілік тербелістер

$$\ddot{y}_1 + \frac{\omega_{y1}}{Q_{y1}} \dot{y}_1 + y_1 [\omega_{y1}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_x^2)] = \frac{1}{m_{y1}} F_{\varepsilon 1} + \frac{k_{3y}}{m_{y1}} (y_2 - y_1) - \ddot{y}_0 - a_y - \dot{x}_0 \Omega_z + \dot{z}_0 \Omega_x, \quad (3.1)$$

$$\ddot{y}_2 + \frac{\omega_{y2}}{Q_{y2}} \dot{y}_2 + y_2 [\omega_{y2}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_x^2)] = -\frac{1}{m_{y2}} F_{\varepsilon 2} + \frac{k_{3y}}{m_{y2}} (y_1 - y_2) - \ddot{y}_0 - a_y - \dot{x}_0 \Omega_z + \dot{z}_0 \Omega_x.$$

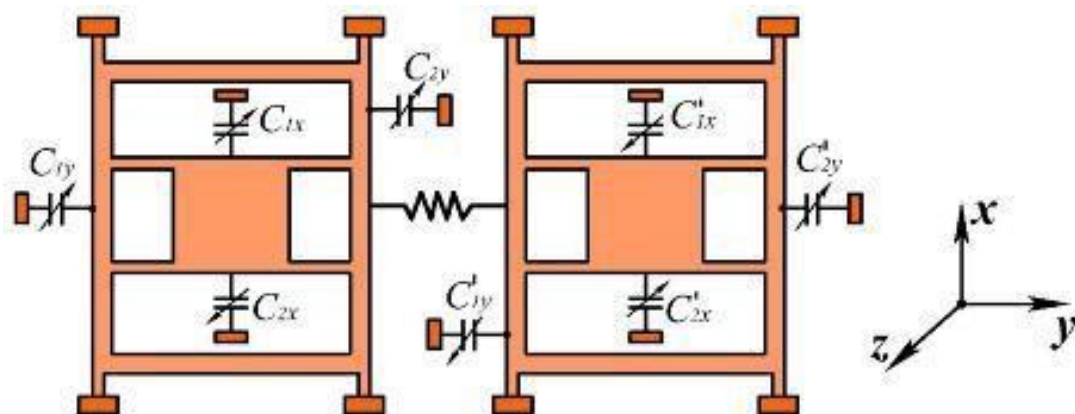
– X осі бойынша екіншілік тербелістер

$$\ddot{x}_1 + \frac{\omega_{x1}}{Q_{x1}} \dot{x}_1 + x_1 [\omega_{x1}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_y^2)] = 2\Omega_z \dot{y}_1 - \ddot{x}_0 - a_x - \dot{z}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_z - \Omega_x \Omega_y y_1 + \frac{k_{xy}}{m_{x1}} y_1, \quad (3.2)$$

$$\ddot{x}_2 + \frac{\omega_{x2}}{Q_{x2}} \dot{x}_2 + x_2 [\omega_{x2}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_y^2)] = -2\Omega_z \dot{y}_2 - \ddot{x}_0 - a_x - \dot{z}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_z + \Omega_x \Omega_y y_2 - \frac{k_{xy}}{m_{x2}} y_2,$$

мұндағы Ω_{yi}, Ω_{xi} -гироскоптың тиісті (y, x) бағыты бойынша сапалылығы; $\ddot{z}_0, \ddot{y}_0, \ddot{x}_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0$ - үдемелі дірілдің үдеуі мен жылдамдығы; a_y, a_x -үдеу негіздері, $F_{\varepsilon i}$ - гироскоптың біріншілік тербелістерін қоздыратын күші; гироскоптың парциалды жиілігі: $\omega_{yi}^2 = \frac{k_{iy}}{m_{yi}}$; $\omega_{xi}^2 = \frac{k_{ix}}{m_{xi}}$; $i=1,2$; m_{yi} -Y осі

бойымен қозғалатын массалар (7 инерциялық денесі бар 2-жақтау). ММГ сенсорының электродтық құрылымы 3.3-суретте көрсетілген.



3.3 Сурет - ММГ сенсорының электродты құрылымы

Біріншілік тербеліс арнасындағы сыйымдылықтар

$$C_{1y} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 a(b+y)}{d}, C_{2y} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 a(b-y)}{d},$$

$$C'_{1y} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 a(b-y)}{d}, C'_{2y} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 a(b+y)}{d}.$$

Екіншілік арнаның СКТ электродтары олардың сыйымдылығы бастапқы тербелістердің қозғалысына тәуелді болмайтындай етіп орналастырылған.

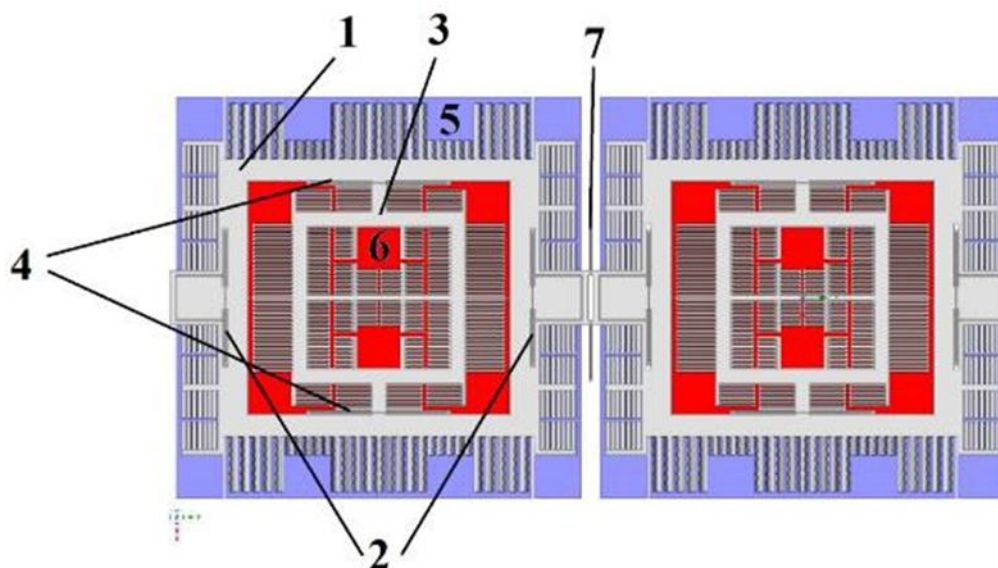
$$C_{1x} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 ab}{d+x}, C_{2x} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 ab}{d-x}, C'_{1x} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 ab}{d-x}, C'_{2x} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 ab}{d+x}.$$

Механикалық масштабты сенсор коэффициенттері келесідей түрге ие:

$$K_{m1x} = \frac{2y_m\omega_y}{\sqrt{(\omega_{x1}^2 - \omega_y^2)^2 + \frac{\omega_y^2\omega_{x1}^2}{Q_{x1}^2}}}, K_{m2x} = \frac{2y_m\omega_y}{\sqrt{(\omega_{x2}^2 - \omega_y^2)^2 + \frac{\omega_y^2\omega_{x2}^2}{Q_{x2}^2}}}. \quad (3.3)$$

3.2 Микромеханикалық гироскоп сенсорының конструкциясы және модальды талдауы

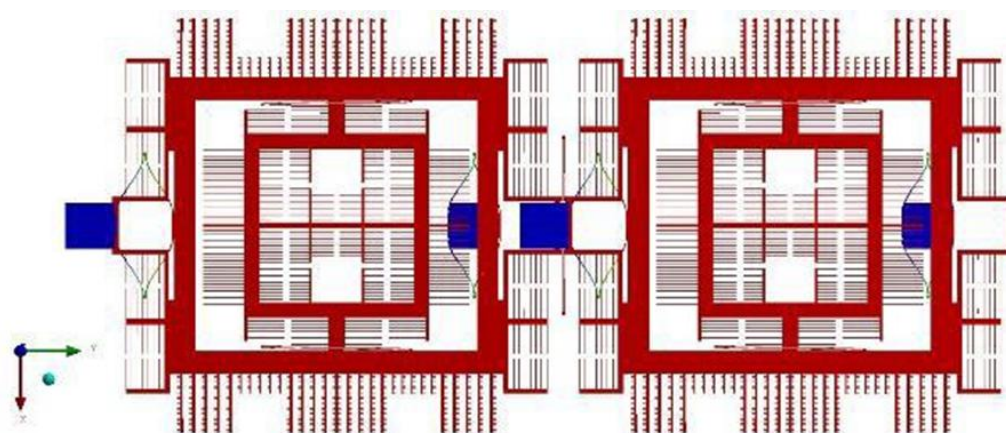
Функционалдық схемасына (3.1-сурет) сәйкес келетін ММГ сенсорының конструкциясы 3.4-суретте көрсетілген.



3.4 Сурет - ММГ сенсорының конструкциясы

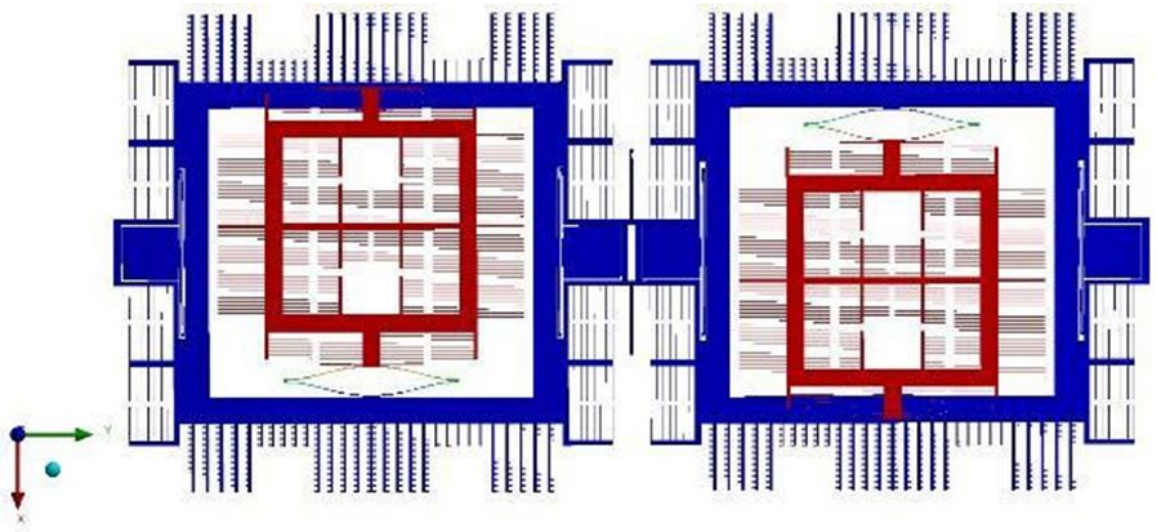
ММГ сенсорының 1-сыртқы жақтаулары серпімді аспаға ілініп, Y осі бойымен біріншілік тербелістер жасайды, 5-сыртқы жақтаудың тарақ тәрізді құрылымдары біріншілік тербелістерді қоздыру және тұрақтандыру үшін қолданылады. 3- инерциялық денелері 4-серпімді аспаға ілініп, X осі бойымен Кориолис күштерінің әсерінен қозғалады. Екіншілік тербелістердің амплитудасы 6 тарақ құрылымдары арқылы өлшенеді. Сыртқы жақтаулар 7-серпімді байланыспен өзара байланысты.

ММГ жұмыс принципіне сүйене отырып, оларды жобалау кезінде біріншілік және екіншілік тербелістердің осьтері бойымен меншікті жиіліктердің жақындығын орындау өте маңызды. 0-ден 2000 Гц-ке дейінгі діріл әсерінен микромеханикалық гироскоптың жұмыс істеу мүмкіндігі қарастырылатындықтан, меншікті жиіліктер паразиттік дірілдерден жоғары болуы керек. Модальды талдау нәтижелері 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 - суреттерде келтірілген.

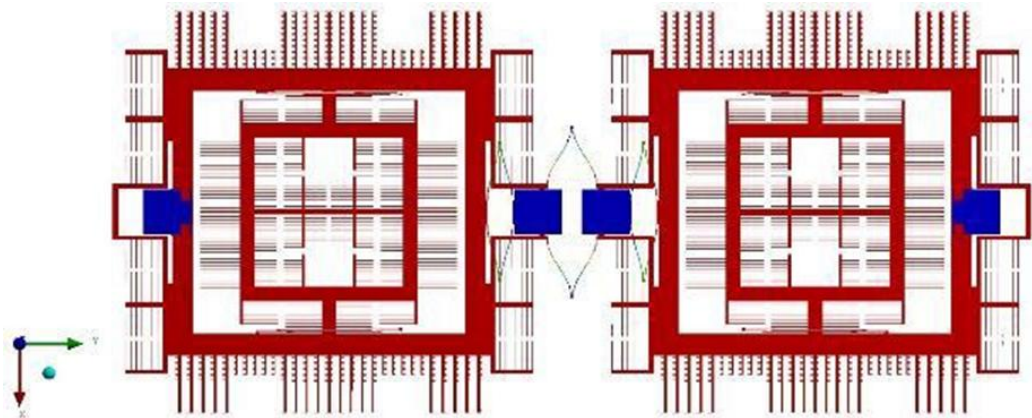


3.5 Сурет -1 ММГ сенсорының меншікті тербелістерінің 1 модасы

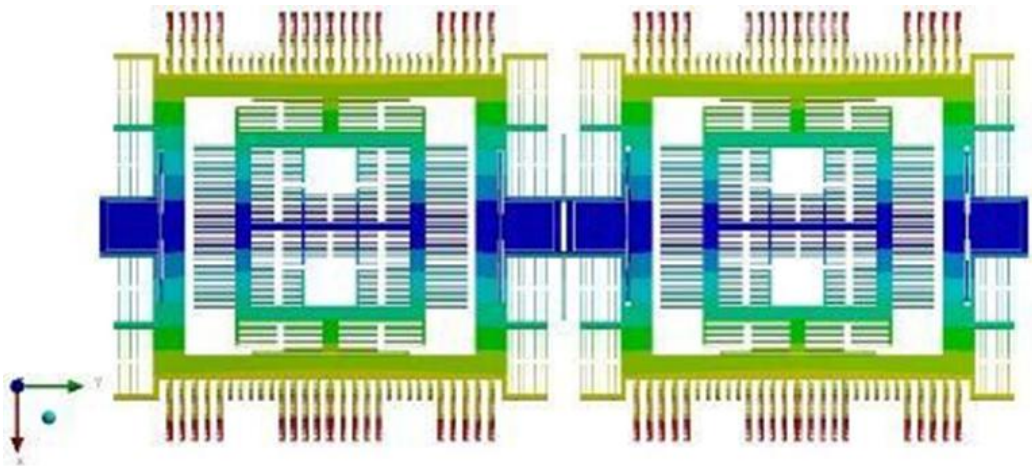
$$(f_{y\phi} = 3122 \text{ Гц})$$



3.6 Сурет - ММГ сенсорының меншікті тербелістерінің 2 модасы
($f_x = 3390 \text{ Гц}$)



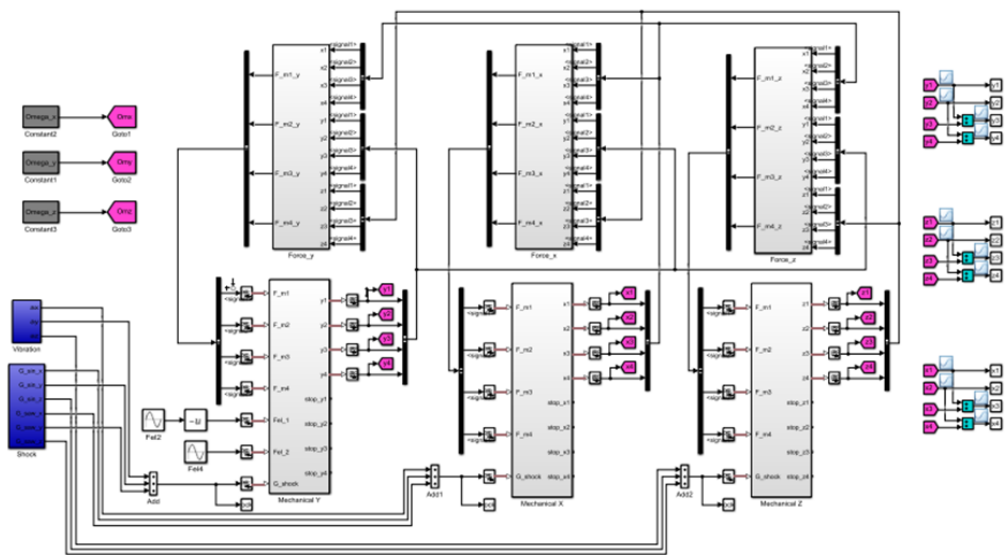
3.7 Сурет - ММГ сенсорының меншікті тербелістерінің 3 модасы
($f_{y\phi} = 3397 \text{ Гц}$)



3.8 Сурет - ММГ сенсорының меншікті тербелістерінің 4 модасы ($f_4=5253$ Гц)

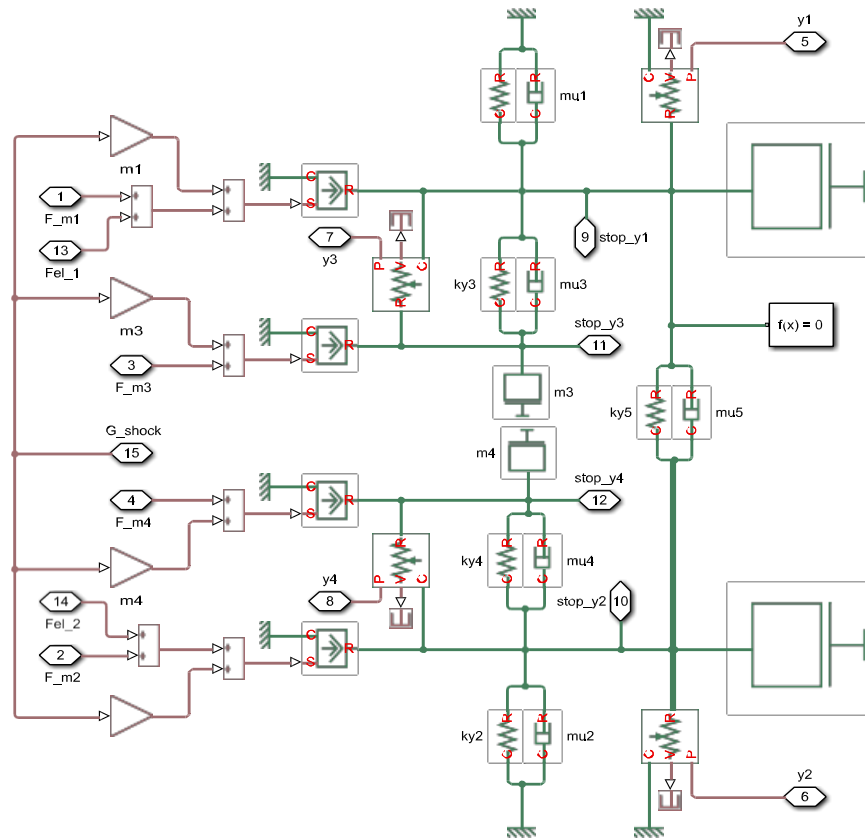
$f_{усф}$ бірінші модасында (3.5-сурет) жақтаудың біріншілік тербелістері бір бағытта жүреді. Сондықтан, біріншілік тербелістерді қоздыру үшін $f_{уаф}$ үшінші модасы қолданылады (3.7-сурет), онда жақтаулар антифазалық қозғалыс жасайды. f_x екінші мода (3.6-сурет) ақпараттық қозғалыс үшін жұмыс істейді. f_4 жиілігі (3.8-сурет) жұмыс жиілігінен жоғары жатыр.

3.3 Гироскопты математикалық модельдеу



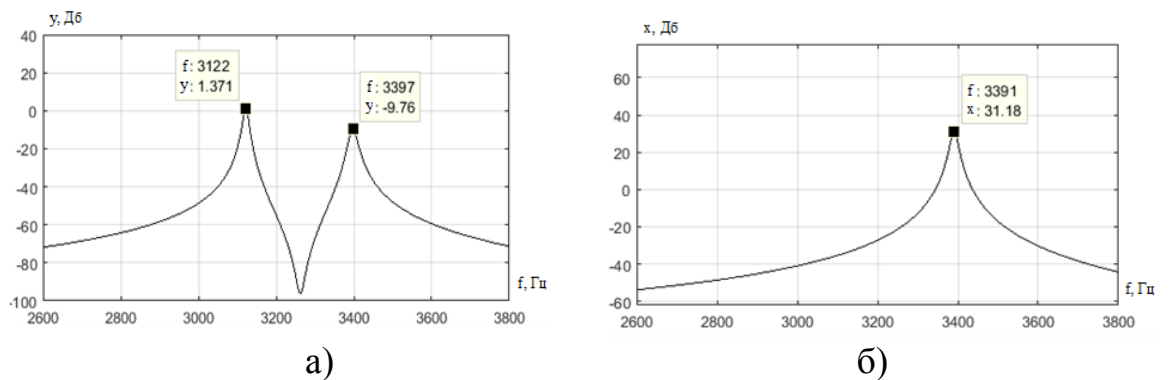
3.9 Сурет – Simulink – ММГ сенсорының моделі

3.9-суретте Simulink-ММГ сенсорының моделі көрсетілген. Mechanical блоктарында инерциялық денелер, серпімді және демпферлік элементтер блоктары бар. Vibration блогы синусоидалы діріл әсерінің генераторы болып табылады, Shock блогы - соққы әсерінің генераторы. Force блоктарында Ω_x , Ω_y және Ω_z тізбегінің бұрыштық жылдамдықтарына байланысты инерциялық күштердің компоненттері бар.



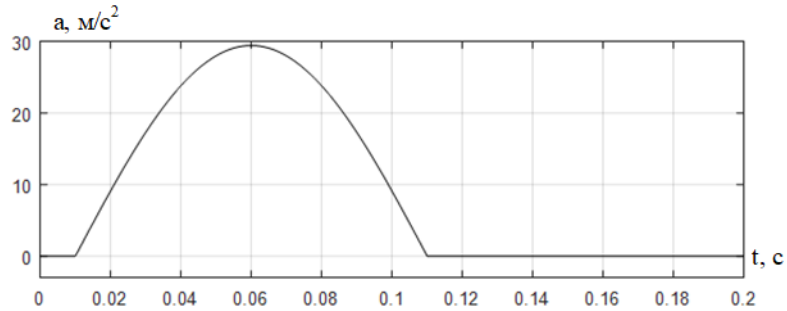
3.10 Сурет - Mechanical Y блогының құрамы

АЖС модельдеу кезінде алынған ММГ сенсоры 3.11-суретте көрсетілген.



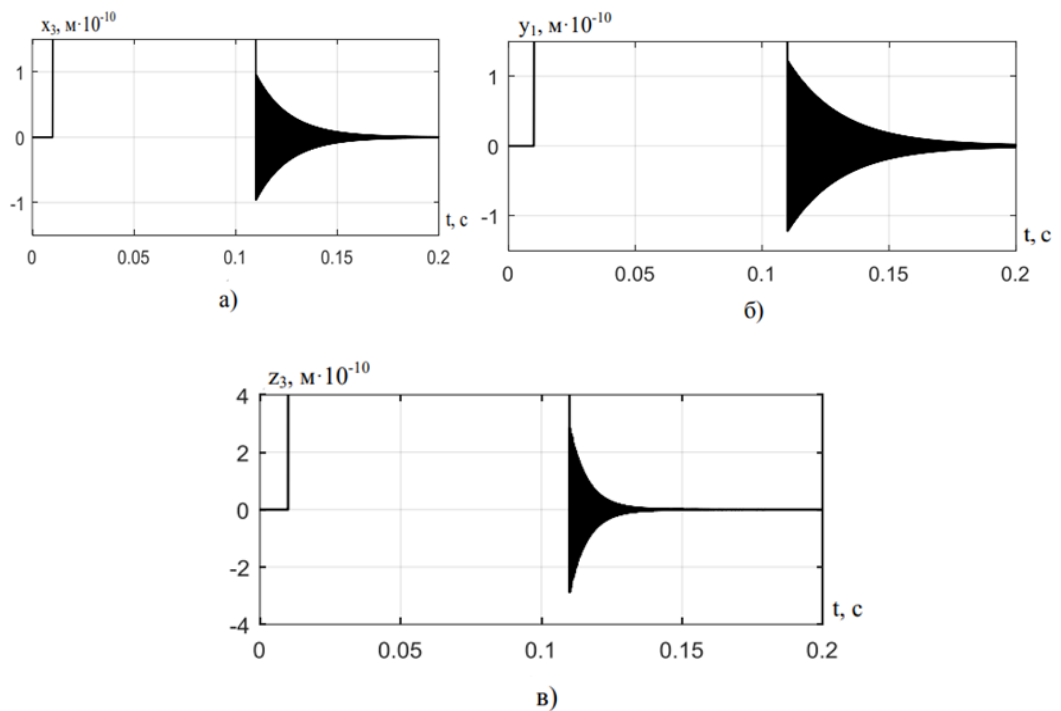
3.11 Сурет - ММГ сенсорының АЖС:
 а) Y арнасының АЖС, б) X арнасының АЖС

Y арнасының бірінші шыңы 3122 Гц жиілігі бар m1 және m2 массалары бар жақтаулардың фазалық тербелістеріне сәйкес келеді, екіншісі – 3397 Гц жиілігі бар антифазалық. X екінші арнасы әр жақтауда 2 массадан 1 массаға ие. m3 және m4-де тербеліс жиілігі 3391 Гц. Жиіліктер модальді талдауға сәйкес реттеледі. Конструкциядағы минималды олқылықтар: X осі бойынша – 4 мкм, Z осі бойынша – 4 мкм, Y осі бойынша – 7,5 мкм. 3g амплитудасы бар жартылай синус пішінінің соққысы, импульстің ұзақтығы 100 мс (3.12-сурет) қарастырылады.



3.12 Сурет - Соққы әсерінің формасы

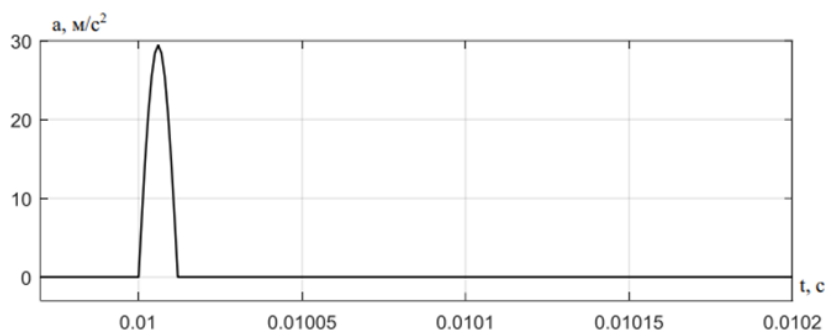
ММГ сенсорының жылжымалы элементтерінің орын ауыстырулары 3.13-суретте көрсетілген.



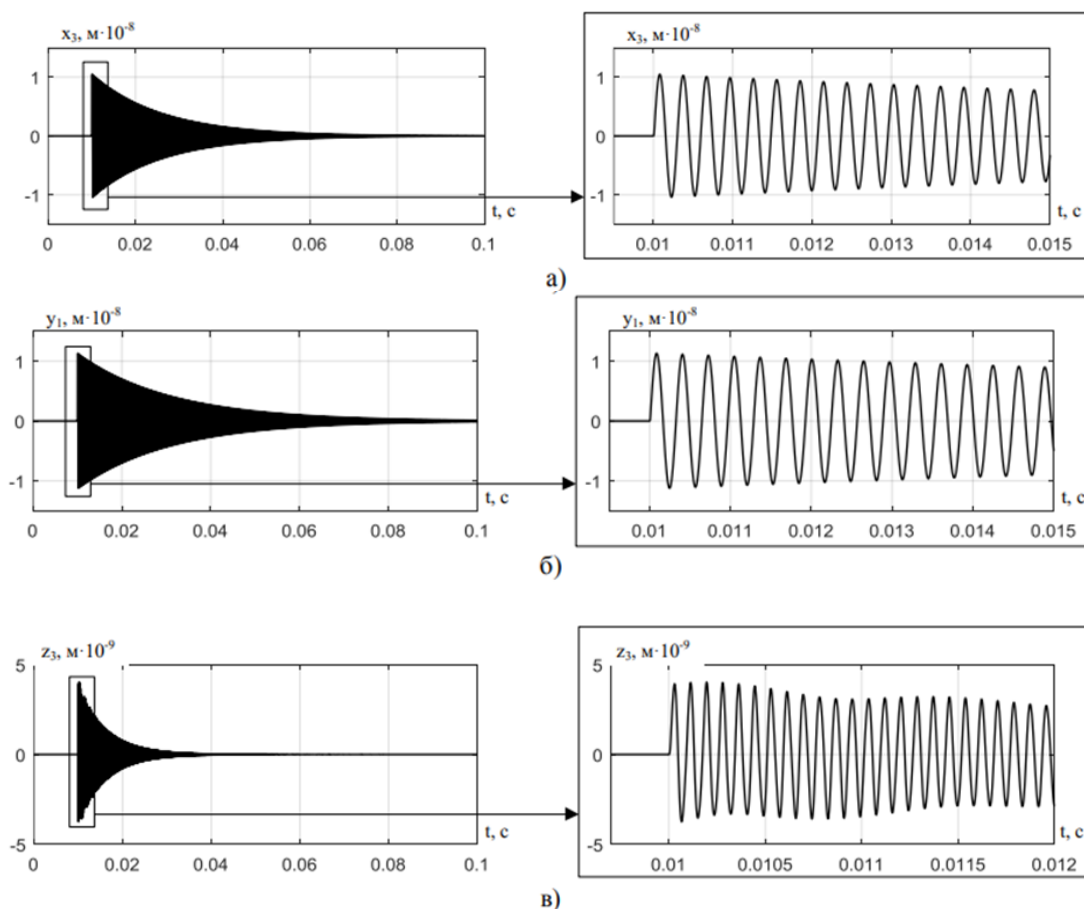
3.13 Сурет - Соққы әсері кезінде ММГ сенсорының конструкциясындағы орын ауыстырулар: а) X осі бойымен соққы; б) Y осі бойымен соққы; в) Z осі бойымен соққы

3g амплитудасы бар соққы әсерінің минималды мәні кезінде жанасу болмайды. Максималды орын ауыстырулар минималды алшақтықтан аспайды.

3g амплитудасы бар жартылай синус пішінінің соққысы, импульстің ұзақтығы-12 мкс (3.14-сурет).



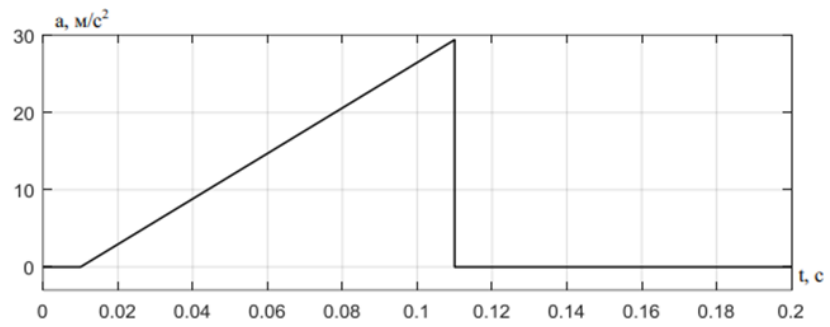
3.14 Сурет - Соққы әсерінің формасы



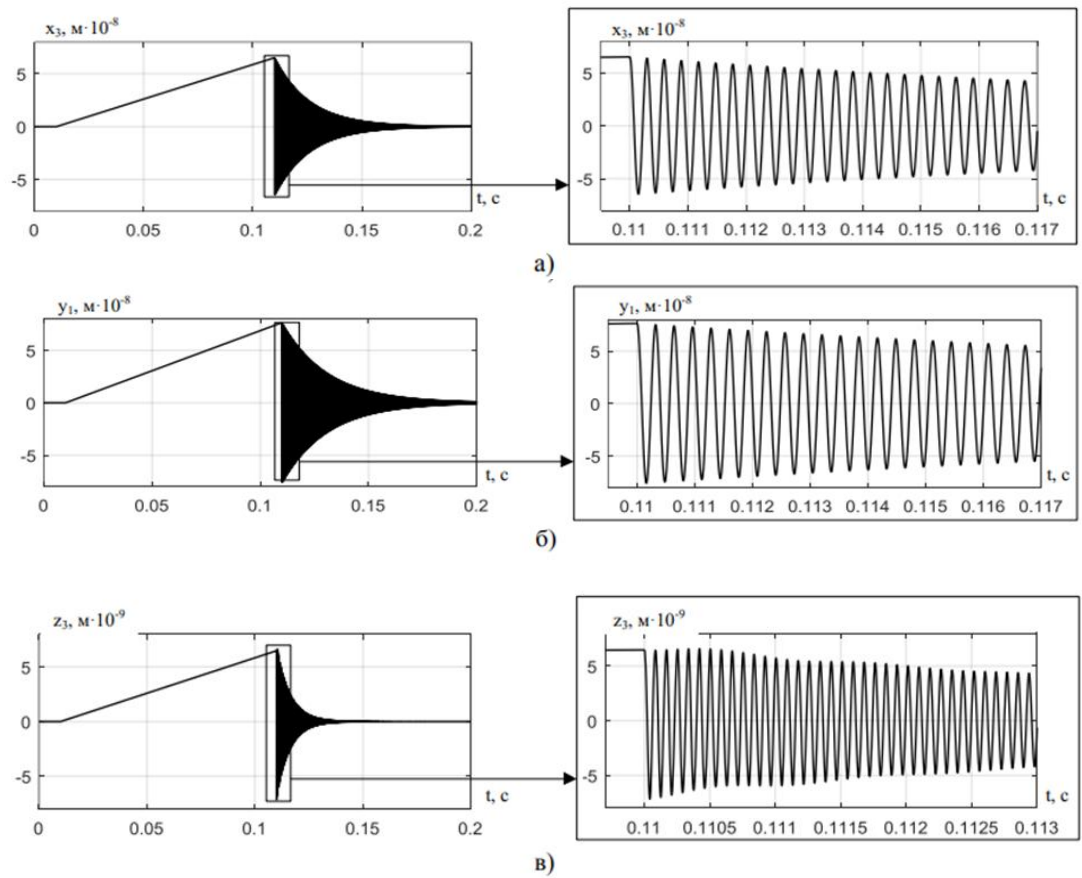
3.15 Сурет - Соққы әсері кезінде ММГ сенсорының конструкциясындағы орын ауыстырулар: а) X осі бойымен соққы; б) Y осі бойымен соққы; в) Z осі бойымен соққы

3g амплитудасы бар соққы әсерінің минималды мәні кезінде жанасу болмайды. Максималды орын ауыстырулар минималды алшақтықтан аспайды.

3g амплитудасы бар ара пішінінің соққысы, импульстің ұзақтығы-100мс (3.16-сурет).



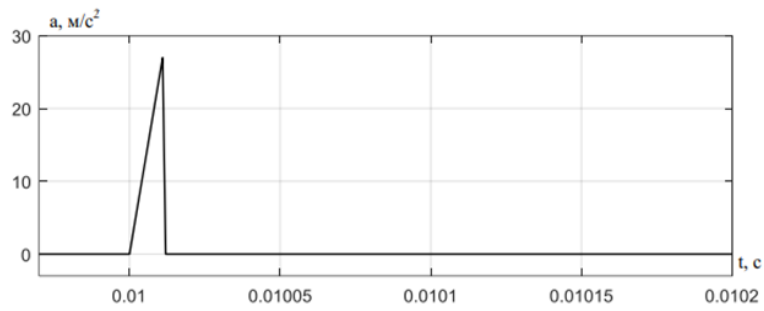
3.16 Сурет - Соққы әсерінің формасы



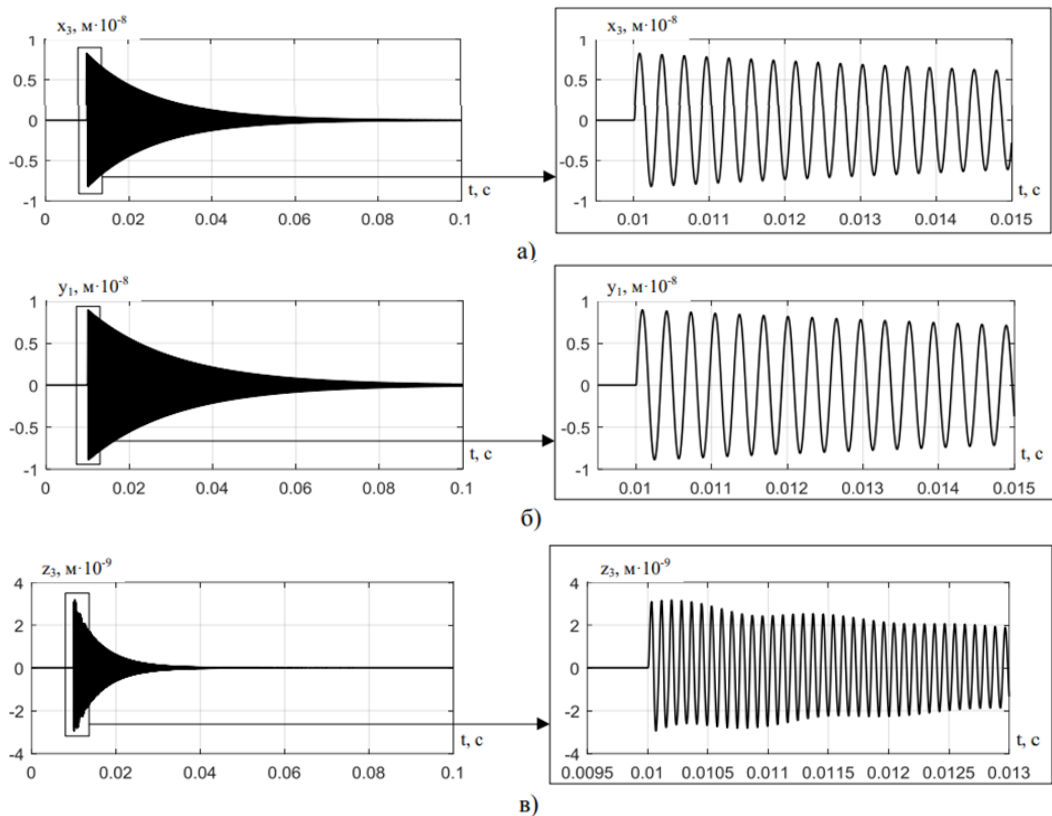
3.17 Сурет - Соққы әсері кезінде ММГ сенсорының конструкциясындағы орын ауыстырулар: а) X осі бойымен соққы; б) Y осі бойымен соққы; в) Z осі бойымен соққы

Орын ауыстырулар ең аз аралықтан аспайды.

3g параметрлері бар ара пішінінің соққысы, импульстің ұзақтығы 12 мкс, 3.18-сурет.



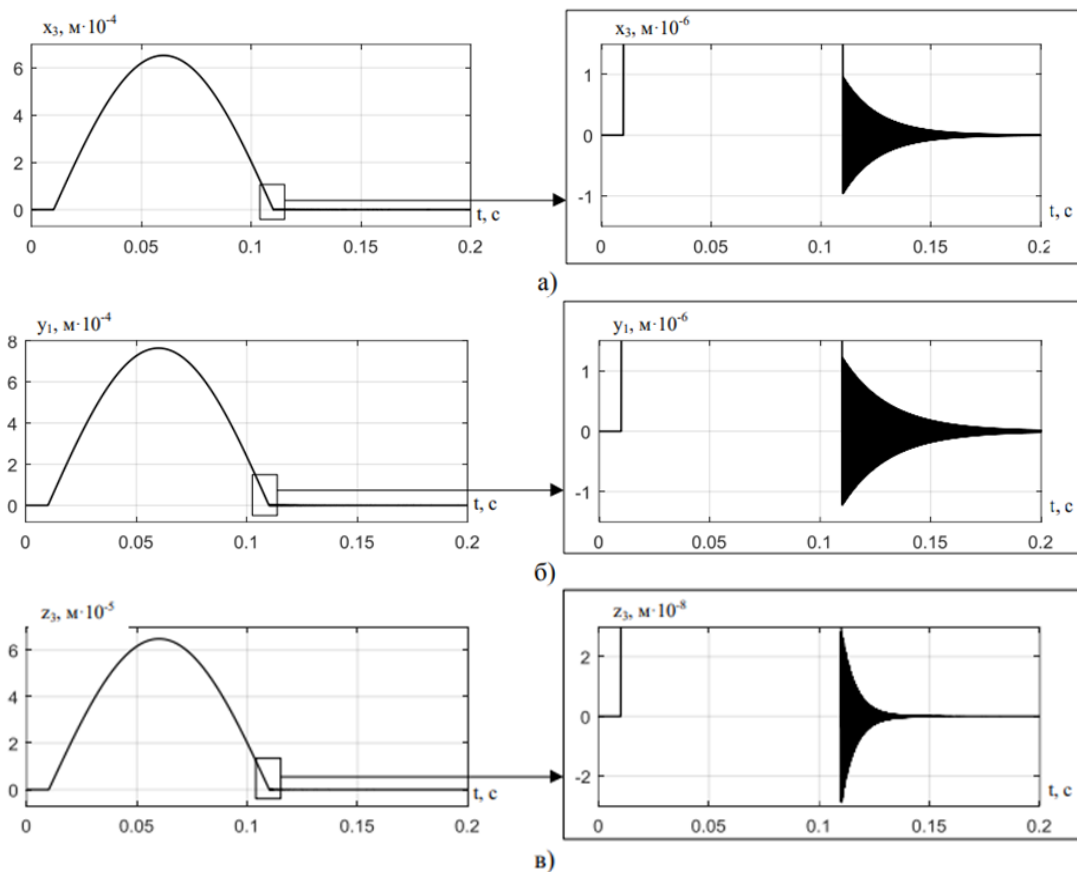
3.18 Сурет - Соққы әсерінің формасы



3.19 Сурет - Соққы әсері кезінде ММГ сенсорының конструкциясындағы орын ауыстырулар: а) X осі бойымен соққы; б) Y осі бойымен соққы; в) Z осі бойымен соққы

Орын ауыстырулар ең аз аралықтан аспайды.

Параметрлері 30000g болатын жартылай синус пішінінің соққысы, импульстің ұзақтығы 100 мс (3.20-сурет).

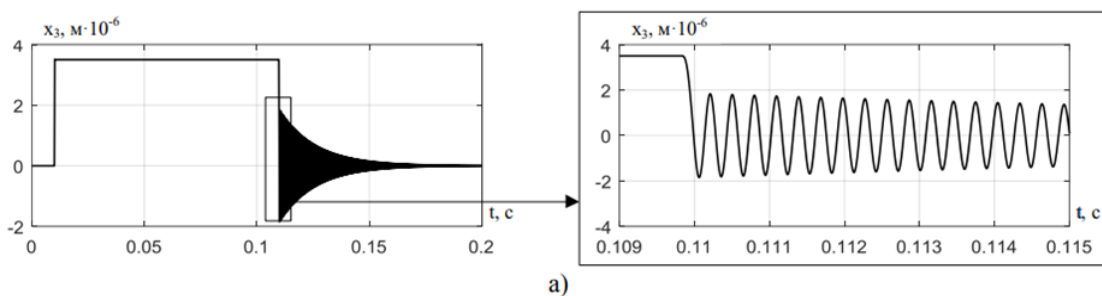


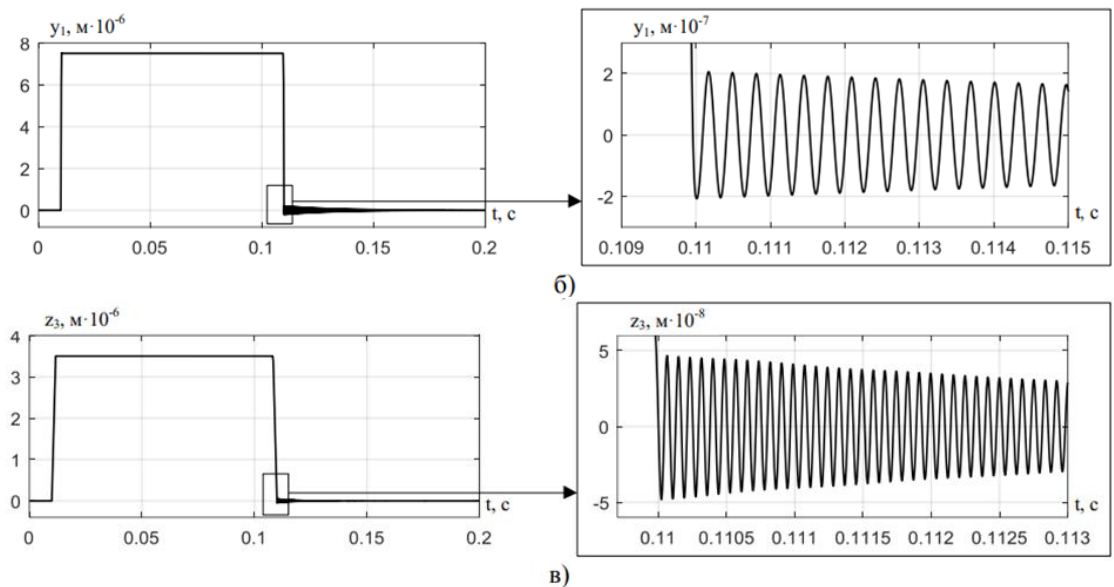
3.20 Сурет - Соққы әсері кезінде ММГ сенсорының конструкциясындағы орын ауыстырулар: а) X осі бойымен соққы; б) Y осі бойымен соққы; в) Z осі бойымен соққы.

30000g амплитудасының соққысы X осі бойымен 4 мкм, Y осі бойымен 7 мкм және Z осі бойымен 5 мкм болатын құрылымдағы минималды алшақтықтан асатын инерциялық денелердің орын ауыстыруларына әкеледі.

Соққы кезінде гироскоптың әрекетін бағалау үшін Simulink моделіне X, Y және Z осьтері бойымен орын ауыстыру шектегіштері енгізіледі.

Параметрлері 30000g болатын жартылай синус пішінінің соққысы, импульстің ұзақтығы 100мс тіректерімен (3.21-сурет).



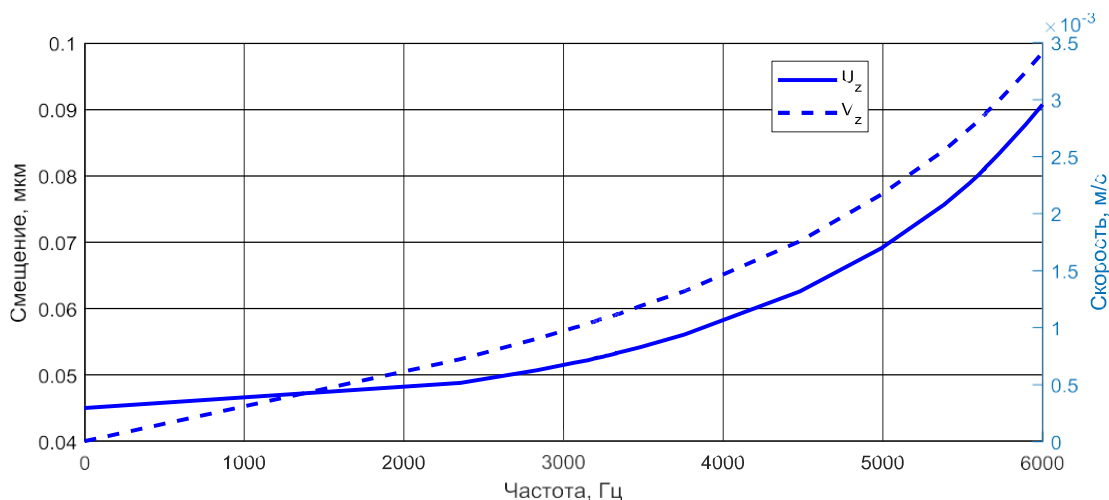


3.21 Сурет - Соққы әсері кезінде ММГ сенсорының конструкциясындағы орын ауыстырулар: А) X осі бойымен соққы; б) Y осі бойымен соққы; в) Z осі бойымен соққы.

Сезімталдықтың екі осі бойынша соққының әсерін байқауға болады. Соққы қорғаныс тіректерінің жанасуына әкеледі, ал соққы импульсі аяқталғаннан кейін инерциялық денелердің өшетін гармоникалық тербелістері байқалады. Тек Simulink модельдеу нәтижелерін қолдана отырып, соққы кезінде гироскоптың конструкциясында пайда болатын кернеулер туралы айту мүмкін емес. Ол үшін ANSYS бағдарламасында АЭ (ақырлы элемент) модельдеу қолданылады.

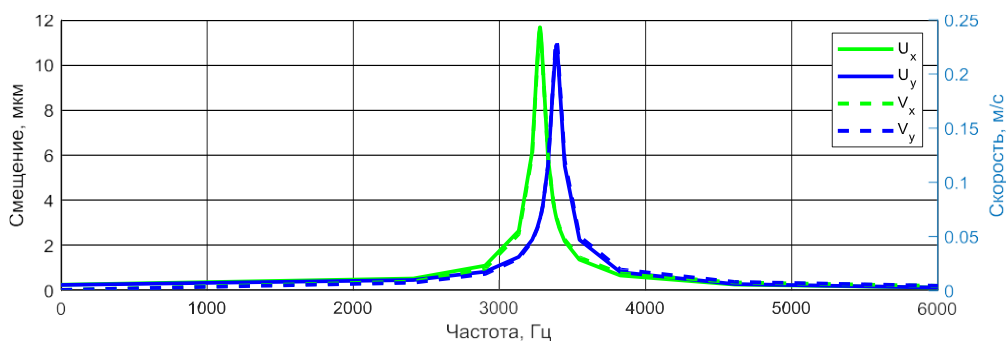
Төмендегі суретте 10g діріл үдеуінің амплитудасы бар 20-дан 2000 Гц дейінгі жиілік диапазонындағы синусоидалы дірілдің әсеріне ММГ есептеу нәтижелері келтірілген. Есептеулерде гироскоптың беріктігі 50-ге тең деп болжалды.

Гироскоптың Z осі бойымен тербелістерге байланысты қарастырылған диапазонда меншікті жиілігі болмағандықтан, осы ось бойымен діріл үдеуінің әсері 0,05 мкм-ден аспайтын максималды қозғалыстарды тудырады (3.22-сурет).



3.22 Сурет - Z осі бойындағы синусоидальды діріл: тұтас сызық – ығысулар, мкм; пунктирлі сызық - жылдамдықтар, м/с.

Діріл жиілігінің үлкен диапазонында гироскоптың жұмыс жиілігінде резонанс пайда болады. Құрылымдық элементтердің максималды ығысуы 10 мкм-ден асады, бұл физикалық мүмкін емес, өйткені X осі бойымен 4 мкм және Y осі бойымен 6 мкм ығысу кезінде жақтаулардың соқтығысуы пайда болады, 3.23-сурет.



3.23 Сурет – X және Y осьтері бойындағы синусоидальды дірілге есептеу: тұтас сызық – ығысулар, мкм; пунктирлі сызық - жылдамдықтар, м/с.

ММГ-ның дірілге төзімділігін қамтамасыз ету үшін оның резонанстық жиіліктері әзірленген конструкцияда орындалған діріл жиіліктерінің диапазонынан тыс жатуы қажет.

ҚОРЫТЫНДЫ

Дипломдық жұмыстың нәтижесі - соққылар мен дірілге төзімді ММГ сипаттамаларын талдау принциптері болып табылады.

Микромеханикалық гироскоптарды, олардың функционалдығын және діріл мен соққы жағдайында жұмыс істейтін сенсорларды жобалау кезінде қолданылатын конструкциялық шешімдерді сипаттайтын қолданыстағы әдеби көздерге шолу жасалды.

Тұрақты және діріл үдеулерінің әсерін ескере отырып, екі компонентті ММГ математикалық моделі жасалды. Математикалық модельге сүйене отырып, діріл әсерінен ММГ механикалық құрылымының динамикалық сипаттамаларына талдау жасалды.

Екі компонентті ММГ математикалық моделін қолдана отырып, MATLAB/Simulink бағдарламасында компьютерлік модельдеу жүргізілді, бұл біріншілік тербеліс арнасындағы анти-фазалық қозғалыстарды қолдана отырып, $f_1 = 10645,08$ кГц және $f_2 = 10637,4$ кГц меншікті резонанстық жиіліктерде 2 кГц-ке дейінгі діріл әсерінің әсер етуін жоюға болатындығын көрсетті.

Жасалған екі компонентті ММГ АЭ моделі 3500g амплитудасы мен ұзақтығы 500 мкс әсер ету кезінде пайда болатын конструкциядағы кернеулер максималды рұқсат етілгеннен аспайтындығын анықтауға мүмкіндік берді, бірақ тарақ құрылымдарының бір-бірімен жанасуы бар, бұл құрылғының жұмыс қабілеттілігін жоғалтуға әкелуі мүмкін.

Жүргізілген сынақтар барлық зерттелген LL типті екі компонентті микромеханикалық гироскоптар минус 40-тан плюс 105°C-қа дейінгі температура диапазонында жұмыс қабілеттілігін сақтайтындығын көрсетті. Сенсордың дайындық уақыты 3с-тан аспайды. сондай-ақ, жақтаулардың анти-фазалық қозғалысын пайдалану кезінде 20 Гц-тен 2000 Гц-ке дейінгі жиілік диапазонындағы амплитудасы 9g діріл резонанстық құбылыстарды тудырмайды және құрылғының жұмысына әсер етпейді. 3500g амплитудасы мен ұзақтығы 500 мкс соққыны сынау кезінде конструкцияның жылжымалы бөліктері жылжымайтын бөліктерімен жанасуы болады және құрылғының жұмыс қабілеттілігі бұзылатыны анықталды. Жұмыс қабілеттілігін қалпына келтіру 2,1с арқылы жүреді, осылайша ММГ бұрыштық жылдамдықты минус 300 град/с-тан +300 град/С-қа дейінгі диапазонда өлшейді, минус 300 град/с-тан 300 град/с-қа дейінгі диапазондағы ең жоғары динамикалық қателік $\pm 10\%$ -дан аспайды, ең жоғары салыстырмалы сызықтық емес $\pm 1\%$ -дан аспайды.

Екі компонентті ММГ зерттеулерінің негізінде амплитудасы 30000g және ұзақтығы 150 мкс соққы әсерінен жұмыс қабілеттілігін арттыру мақсатында бір компонентті гироскоптың математикалық моделі жасалды, оның негізінде MATLAB/Simulink бағдарламасында компьютерлік модель жасалды. Компьютерлік модельді зерттеу конструкцияның жылжымалы бөліктерінің орын ауыстыру диапазоны рұқсат етілген аралықтан 4 мкм-ге асатындығын көрсетті.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1) Сысоева С. Автомобильные гироскопы / С. Сысоева//Компоненты и технологии. – 2007. – №1. – С. 58 – 66.
- 2) Тимошенко С. П. Применение МЭМС-сенсоров в системах навигации и ориентации подвижных объектов / С.П. Тимошенко, А.П. Кульчицкий // Известия вузов. Электроника. – 2012. – №6. - С.51 – 56.
- 3) Распопов В. Я. Микромеханические приборы: учебное пособие / В.Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
- 4) Боронахин А. М. Исследование микромеханических чувствительных элементов в задачах диагностики рельсового пути / А. М. Боронахин [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2012. – № 1. – С. 57 – 66.
- 5) Биндер Я. И. Мобильная инклинометрическая станция на основе микромеханических чувствительных элементов для съемки траекторий стволов группы скважин подземной выработки / Я. И. Биндер [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 1. – С. 95 – 106.
- 6) Коновалов С. Ф. Инерциальный метод измерения перемещений строительных свай в процессе забивки / С. Ф. Коновалов, В. П. Подчерзцев // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 4. – С. 14 – 23.
- 7) Пешехонов В. Г. Микромеханические инерциальные преобразователи. Современное состояние и применение в военной технике / В. Г. Пешехонов, Л. П. Несенюк, Д. Г. Грязин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 3. – С. 28 – 32.
- 8) Lutwak, R. Precise Robust Inertial Guidance for Munitions: Advanced Inertial Micro Sensors (PRIGM: AIMS) Proposers' Day / R. Lutwak // DARPA Microsystems Technology Office. – 2015. – 17 p.
- 9) Лестев, А. М. Современное состояние теории и практических разработок микромеханических гироскопов / А. М. Лестев, И. В. Попова // Гироскопия и навигация. – 1998. – № 3. – С. 81 – 94.
- 10) Евстифеев М. И. Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях / М. И. Евстифеев, И. Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 1. – С. 119 – 133.
- 11) Barbour N. Inertial MEMS System Applications / N. Barbour [et al.] // Advances in Navigation Sensors and Integration Technology. RTO LECTURE SERIES 232. – 2004. – pp.7-1–7-12.
- 12) Феодосьев В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. – М. Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 1999. т.2.
- 13) Srikar V. T. The reliability of microelectromechanical systems (MEMS) in shock environments / V.T. Srikar, S.D. Senturia // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2002. – vol. 11 – pp. 206 – 214.
- 14) Inman D.J. Engineering Vibration / D.J. Inman // Prentice Hall. – 2000. – 2 ed.

- 15) Yee J.K. Shock resistance of ferromagnetic micromechanical magnetometers / J.K. Yee, H.H. Yang, J.W. Judy // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2003. – vol. 103 – pp. 242 – 252.
- 16) Turner J.D. Sensors for automotive telematics / J.D. Turner, A.L. Austin // *Measurement Science and Technology*. – 2000. – vol. 11 – pp. 58 – 79.
- 17) Yazdi N. Micromachined inertial sensors / N. Yazdi, F. Ayazi, K. Najafi // *Proceedings of the IEEE*. – 1998. – vol. 86 – pp. 1640 – 1659.
- 18) Sparks D.R. Application of MEMS technology in automotive sensors and actuators / D.R. Sparks // *Proceeding of Micromechatronics and Human Science*. – 1998. – pp. 9 – 15.
- 19) Jean-Michel S. Current Capabilities of MEMS Capacitive Accelerometers in a Harsh Environment / S. Jean-Michel // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. – 2006. – vol. 21 – pp. 29 – 32.
- 20) Brown T.G. Strap-down microelectromechanical (MEMS) sensors for high-g munition applications / T.G. Brown [et al.] // *IEEE Transactions Magnetics*. – 2001. – vol. 37 – pp. 336 – 342.
- 21) Scaysbrook I.W. A miniature, gun-hard MEMS IMU for guided projectiles, rockets and missiles / I.W. Scaysbrook, S.J. Cooper, E. T. Whitley // *Position Location and Navigation Symposium*. – 2004. – pp. 26 – 34.
- 22) Brown T.G. Harsh military environments and microelectromechanical (MEMS) devices / T.G. Brown // *IEEE Sensors*. – 2003. – vol. 2 – pp. 753 – 760.
- 23) Sievers L.A. Linear control design for active vibration isolation of narrow band disturbances / L.A. Sievers, A.H. von Flotow // *IEEE Decision and Control*. – 1988. – vol. 2 – pp. 1032 – 1037.
- 24) Wong J.Y. *Theory of ground vehicles* / J.Y. Wong // John Wiley & Sons. – 1993. – 2 ed.
- 25) Wu J. Stevens Environmental vibration assessment and its applications in accelerated tests for medical devices / J. Wu, R.R. Zhang, Q. Wu, K.K. Stevens // *Journal of Sound and Vibration*. – 2003. – vol. 267 – pp. 371 – 383.
- 26) VIBRATION EXCITER Type 4809 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bksv.com/en/products/shakers-and-exciters/measurement-exciters/vibration-exciter-type-4809>.
- 27) Woodard S.E. Measured spacecraft dynamic effects on atmospheric science instruments / S.E. Woodard, D.A. Gell, R.R. Lay // *IEEE Geoscience and Remote Sensing*. – 1998. – vol. 36 – pp. 359 – 367.
- 28) Zhao Y. Effects of G-jitter on Experiments Conducted in Low-Earth Orbit: A Review / Y. Zhao and J. Alexander // *Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA*. – 2003.
- 29) Wilke P. Whole-spacecraft vibration isolation for broadband attenuation / P. Wilke, C. Johnson, P. Grosserode, D. Sciulli // *IEEE Aerospace*. – 2000. – vol. 4 – pp. 315 – 321.
- 30) Veilleux E. Vibration Control of Printed-Circuit Boards in a Dynamic Environment / E. Veilleux // *IEEE Parts, Materials and Packaging*. – 1970. – vol. 6 – pp. 100 – 105.

31) Weglein R.D. The Vibration Sensitivity of VHF Quartz Crystals for Missile Applications / R.D. Weglein // Annual Symposium on Frequency Control. – 1984. – vol. 38 – pp. 73 – 79.

32) Nguyen, C. The Harsh Environment Robust Micromechanical Technology (HERMiT) Program: Success and Some Unfinished Business // Microwave Symposium Digest (MTT), 2012 IEEE MTT-S International. – 2012. – pp. 1 – 3.

33) Евстифеев М.И. Методы повышения стойкости микромеханических гироскопов к механическим воздействиям / М. И. Евстифеев, Д. П. Елисеев, И. Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2014. № 4. – С. 56 – 68.

34) Weinberg H. Gyro Mechanical Performance: The Most Important Parameter / H. Weinberg // Technical Article MS-2158. Analog Devices, Inc. – 2011.– pp.1 – 5.

35) Sang Won Yoon Analysis and wafer-level design of a high-order silicon vibration isolator for resonating MEMS devices / Sang Won Yoon [et al.] // J. Micromech. Microeng. – No. 21. – 2011. – pp. 1 – 12.

36) Habibi S. Gun Hard Inertial Measurement Unit based on MEMS capacitive accelerometer and rate sensor / S. Habibi [et al.] // Proceedings of IEEE/ION PLANS. – 2008. – pp. 232 – 237.

37) Елисеев Д.А. Повышение виброустойчивости микромеханического гироскопа RR-типа: Диссертация канд. техн. наук: 16.12.15/Елисеев Даниил Павлович. – Санкт-Петербург., 2015. – 142 с.

38) Евстифеев М.И. Анализ прочности упругих подвесов микромеханических гироскопов / М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2009. – № 3. – С. 22 – 34.

39) ADXRS150. Single Chip Yaw Rate Gyro with Signal Conditioning / Data Sheet. Analog Devices. – 2010. – 12 p.

40) Lapadatu D. SAR500 – A High-Precision High-Stability Butterfly Gyroscope with North Seeking Capability / D. Lapadatu [et al.] // Proceedings of IEEE/ION PLANS. – 2010. – pp. 6 – 13.

41) Barbour N. Micro-Electromechanical Instrument and Systems Development at Draper Laboratory / N. Barbour [et al.] // 3rd Saint Petersburg International Conference of Integrated Navigation Systems. – 1996. – Part 1. – pp. 3 – 10.

42) Patent 6443008 United States, Int. Cl. G01P 9/04. Decoupled Multi-Disk Gyroscope / K. Funk, M. Lutz, W. Frey; assignee Robert Bosch GmbH, – Appl. No. 09/507583; filed 19.02.2000; published 03.09.2002. – 11 p.

43) Patent 5635640 United States, Int. Cl. G01P 15/08. Micromachined Device With Rotationally Vibrated Masses / J. A. Geen; assignee Analog Devices, Inc. – Appl. No. 471023; filed 06.06.1995; published 03.06.1997. – 8 p.

44) Patent 8266961 United States, Int. Cl. G01C 19/56. Inertial Sensors With Reduced Sensitivity To Quadrature Errors And Micromachining Inaccuracies / J. Kuang, J. A. Geen ; assignee Analog Devices, Inc. – Appl. No. 12/535477; filed 04.08.2009; published 18.09.2012. – 17 p.

45) ADXRS646. High Stability, Low Noise Vibration Rejecting Yaw Rate Gyroscope / Data Sheet. Analog Devices. – 2012. – 1 p.

46) Некрасов, Я. А. Улучшение эксплуатационных характеристик отечественного микромеханического гироскопа RR-типа / Я. А. Некрасов [и др.] // Материалы XXI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – 2014. – С. 226 – 235.

47) Geen, J. A. Progress in Integrated Gyroscopes / J. A. Geen // IEEE A&E Systems magazine. – 2004. – pp. 12 – 17.

48) Евстифеев, М. И. Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях / М. И. Евстифеев, И. Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 1. – С. 119 – 133.

49) Евстифеев М.И. Исследование электромеханической модели микромеханического гироскопа R-R типа с учетом вибраций основания / М. И. Евстифеев, А. С. Ковалев, Д. П. Елисеев // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 3. – С. 24 – 32.

50) Lestev M.A. The influence of nonlinear factors on dynamics and accuracy of micromechanical gyroscopes // Proceedings of 14th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – 2007. – pp. 24 – 25.

51) Евстифеев, М. И. Упругие подвесы инерционных тел в точном приборостроении / М. И. Евстифеев // Гироскопия и навигация. – 2007. – № 2. – С. 63 – 76.

52) Патент 2447403 Российская Федерация, МПК G01C 19/56. Микромеханический гироскоп / Я. А. Некрасов. – 2010150706/28; заявл. 07.12.2010; опубл. 10.04.2012; Бюл. № 10. – 10 с.

53) Евстифеев М.И. Результаты испытаний микромеханических гироскопов при механических воздействиях / М. И. Евстифеев, Д. П. Елисеев, А. С. Ковалев, Д. В. Розенцвейн // Гироскопия и навигация – 2011. – № 1. – С. 49 – 59.

54) Челпанов И.Б. Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях / И.Б. Челпанов, М.И. Евстифеев // Гироскопия и навигация. – 2011. – №1. – С. 37 – 48.

55) Патент 2693010 Российская федерация, МПК G01P 15/135. Трёхосевой микромеханический акселерометр / Т.Г. Нестеренко. – 2018143342; заявл. 07.12.2018; опубл. 01.07.2019; Бюл. №19.

ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ПІКІРІ

Дипломдық жұмыс

Жүніс Нариман Арманбекұлы

5B071900 - Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар

Тақырыбы: «Дірілге және соққыға төзімді микромеханикалық гироскоптарды талдау»

Бұл дипломдық жұмыста дірілге және соққыға төзімді микромеханикалық гироскоптар жайлы жазылды. Дипломдық жұмыс үш бөлімнен тұрады. Бірінші бөлімде, әдебиеттерді талдау көрсеткендей, нарықта көптеген ММГ арасында көптеген өндірушілер олардың діріл мен соққыға төзімділігін көрсетпейді, ал кейбір аудандардағы бұл көрсеткіштер негізгі болып саналады.

Екінші бөлімде, базалық прогрессивті діріл ММГ сенсорының тербелістерін акпараттық тербелістерге сәйкес келетін діріл жиілігімен тудырады. ММГ антифазалық біріншілік тербелістерін қолдану шығыс акпаратында діріл үдеулерінің әсерін азайтуға мүмкіндік береді. ММГ меншікті жиіліктері діріл әсерінің жиілік диапазонынан асып түседі, бұл резонанстардың туындау мүмкіндігін болдырмайды.

Үшінші бөлімде, ММГ сенсорының математикалық моделі әзірленді және Simulink бағдарламасында оны модельдеу жүргізілді.

Жұмыс бағасы

Жалпы, дипломдық жобаға «90 А- өте жақсы» деген баға, ал студент Жүніс Нариман Арманбекұлы 5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация мамандығы бойынша техника және технологиялар «бакалавры» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Ғылыми жетекші

т.ғ.м., ЭТЖҒТ каф. лекторы
С.Марксұлы
(қолы)

«20» мамыр 2022 ж.

РЕЦЕНЗИЯ

Дипломдық жұмыс

Жүніс Нариман Арманбекұлы

5B071900 - Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар

Тақырыбы: «Дірілге және соққыға төзімді микромеханикалық гироскоптарды талдау»

Орындалды:

- а) графикалық бөлім 9 бет;
- б) түсініктеме 59 бет.

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ

Бұл дипломдық жұмыста дірілге және соққыға төзімді микромеханикалық гироскоптар жайлы жазылды. Дипломдық жұмыс үш бөлімнен тұрады. Бірінші бөлімде, әдебиеттерді талдау көрсеткендей, нарықта көптеген ММГ арасында көптеген өндірушілер олардың діріл мен соққыға төзімділігін көрсетпейді, ал кейбір аудандардағы бұл көрсеткіштер негізгі болып саналады.

Екінші бөлімде, базалық прогрессивті діріл ММГ сенсорының тербелістерін ақпараттық тербелістерге сәйкес келетін діріл жиілігімен тудырады. ММГ антифазалық біріншілік тербелістерін қолдану шығыс ақпаратында діріл үдеулерінің әсерін азайтуға мүмкіндік береді. ММГ меншікті жиіліктері діріл әсерінің жиілік диапазонынан асып түседі, бұл резонанстардың туындау мүмкіндігін болдырмайды.

Үшінші бөлімде, ММГ сенсорының математикалық моделі әзірленді және Simulink бағдарламасында оны модельдеу жүргізілді.

ЖҰМЫСТЫҢ БАҒАСЫ

Дипломдық жобада бүкіл мәселелер толықтай қарастырылған дей келе, «90 А- өте жақсы» және толық деп бағалап, оны орындаушы Жүніс Нариман 5B071900 – РЭТ мамандығы бойынша бакалавр лауазымына лайықты деп санаймын.

Рецензия беруші

Тұран университеті,

PhD доктор.

М. Жасандықызы М

«24» 05



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Жүніс Нариман Арманбекұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Дірілге және сокқыға төзімді микромеханикалық гироскоптарды талдау

Научный руководитель: Сұңғат Марксұлы

Коэффициент Подобия 1: 2.3

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 3

Знаки из других алфавитов: 38

Интервалы: 1

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

19.05.2022
Дата

Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Жүніс Нариман Арманбекұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Дірілге және соққыға төзімді микромеханикалық гироскоптарды талдау

Научный руководитель: Сұңғат Марксұлы

Коэффициент Подобия 1: 2.3

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 3

Знаки из здругих алфавитов: 38

Интервалы: 1


Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

Дата

19.05.2022

Марсұев С. 

проверяющий эксперт