

1. Автоматични системи за следене на спътници ATS (Automatic Tracking Systems)

Съвременните изисквания за информационно обезпечаване често пъти налагат превозните средства (влакове, автомобили) да бъдат снабдени със системи за спътникова комуникация [7, 8, 9]. Тези системи поддържат многообразие от комуникационни услуги, част от които са достъп до Интернет, сателитни телефони, сателитна телевизия и то от всяка точка на земята.

Съществуват два вида системи за спътникова комуникация. Първите са стационарни и могат да се свързват със спътници само от неподвижно положение, докато вторите са мобилни и могат да осъществяват връзка и от движение.

В настоящата работа ще бъде разгледана система за търсене и проследяване на спътници от движение. Направлението, в което излъчва (приема) антената на спътника се характеризира (определя) с два ъгъла-азимутен и елевационен. Първият ъгъл (азимутен) дава посоката, в която излъчва (приема) спътника спрямо неподвижна полярна координатна система на земята, докато втория (елевационен) е ъгълът, заключен между лъча на антената и проекцията му върху земята.

При проектирането на такава система главна задача е осигуряването на относително неподвижна координатна система, спрямо която да се извършва търсенето и проследяването на определен спътник. Решението е да се проектира подвижна платформа за закрепяне на антената с две степени на свобода, която да осигурява неподвижност на направлението на излъчване, независимо от движенията на превозното средство (тялото). На практика това означава да се проектира автоматична система, управляваща подвижна платформа. Тя компенсира смущения в направлението на излъчване (приемане), причинени както от движението на тялото, така и от съпротивителния момент, създаден от силата, която въздушния поток упражнява върху антената.

Самата платформа се характеризира с инерционните ѝ моменти около осите на въртене, както и със съпротивителните моменти от триене, които тя оказва на задвижващата система. Зададеното направление на излъчване спрямо земята се осигурява чрез отрицателна обратна връзка ООВ, в чийто контур се измерва всяко ъглово завъртане около осите на въртене на платформата, предизвикано от движението на тялото през произволен терен.

Положението на платформата определя пряко направлението на излъчване на антената. Отместването от зададения азимутен ъгъл на излъчване се дължи на ротацията на тялото, а това от елевационния ъгъл - на наклоняването му в равнини, различни от първоначалната.

Абсолютното отместване по ъгъл спрямо началната координатна система може да бъде измерено с помощта на сензори на ъглова скорост (жироскопи), монтирани спрямо осите на въртене на платформата.

Въртенето около степените на свобода се извършва с помощта на два постояннотокowi електродвигателя, управлявани от софтуер. Тяхното положение определя посоката, в която да излъчва (приема) антената съответно по азимутен и елевационен ъгъл.

За компютърното симулиране на такава система е необходимо да се състави математичен модел, описващ нейното действие. Поетапното изграждане на математичния модел включва съставянето на подмодел на компонентите на системата и свързването им в еквивалентен на нея затворен контур за управление.

Необходимо е съставянето на модели за следните компоненти:

- двигател за постоянен ток с постоянни магнити (ДПТ ПМ);
- двигател за постоянен ток с постоянни магнити (ДПТ ПМ) с включен към него товар (платформа с антена)
- сензор на ъглова скорост-жироскоп
- регулатор

Като цяло този тип системи са изградени на базата на две йерархични нива за управление. Първо ниво за управление осигурява компенсация на смущенията по ъгъл, поддържайки по този начин заданията, подавани от второ йерархично ниво.

За създаването на точен математичен модел на първо ниво на управление трябва подробно да се разгледат принципите на действие на постояннотокowите двигатели и на жироскопите. Трябва да се покаже още как сензорите на ъглова скорост могат да бъдат използвани за измерване на ъгъл на завъртане, посредством последователното им свързване с интегратор.

Управлението на системата на второ йерархично ниво представлява програма, работеща в реално време и имаща ООВ по амплитудата на сигнала, приеман от спътника. Програмата се състои от две подпрограми, определящи двата режима на работа на автоматичната система -“Сканиране” или “Scanning” и “Проследяване” или “Tracking”.

Главна задача на настоящата дипломна работа е създаването на математичен модел на ATS система на първо йерархично ниво на управление. Разглеждането на второ йерархично ниво не е цел на настоящата работа, но е необходимо системата да се представи като комплексна. По тази причина, а и за разясняване на цялостното действие на ATS системите, са дадени основните аспекти от действието и функциите, които изпълнява второто ниво на управление.

Режимът “Scanning” е началния етап от работата на системата и се активира след като е избран спътника, чийто сигнал трябва да се прихване. Сканирането се извършва с антена с насочена диаграма на действие по азимут и елевация, като се търси максимума на идентифициращ (кодиран) сигнал, който спътникът излъчва в дадено направление.

В режим “Scanning” затворената система от първо йерархично ниво се включва по следия начин:

- По азимутния канал работи като “автоматична система за регулиране на позиция”, но по същество се цели да се поддържа абсолютната скорост на въртене на антената (респективно на лъча спрямо земята). Това се постига чрез подаване на подходящ входен сигнал, който в случая е линейно изменящо се напрежение.
- По елевационния канал работи като “автоматична система за регулиране на позиция (респективно ъгъла на лъча спрямо земята)”.

Режим “Tracking” се задейства след като програмата “Scanning” е приключила и има за цел да не изгуби намерения сигнал.

Има няколко метода за прихващане на цели, които са известни от радиолокацията, между които - моноимпулсен и метод на коничното сканиране. Разгледан метода “Конично сканиране”.

В режим “Tracking” затворената система от първо йерархично ниво се включва както следва:

- По азимутния канал работи като “автоматична система за регулиране на позиция”.
- По елевационния канал работи като “автоматична система за регулиране на позиция”.

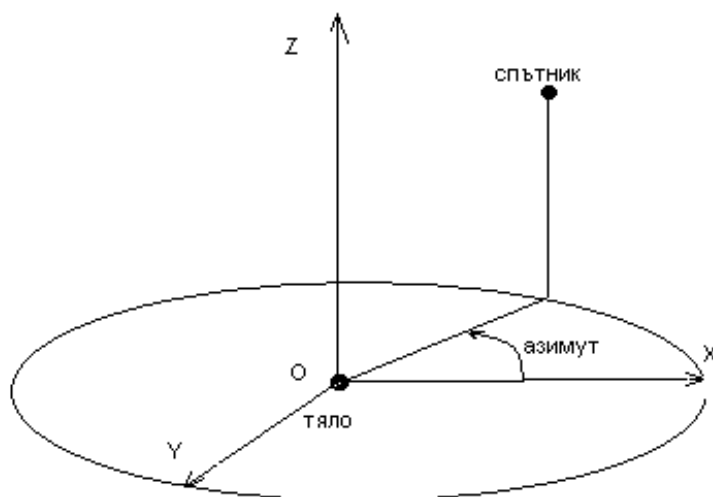
За регулирането на абсолютната скорост на въртене на лъча, както и на абсолютната му позиция спрямо земята, се използват стандартни аналогови или цифрови PID закони за управление.

При загубване на полезния сигнал, например когато превозното средство влезе в тунел за продължително време, трябва да се задейства отново режим “Scanning”, докато спътника не бъде открит повторно.

2. Параметри на целта. Графично изобразяване на действието на ATS система на първо йерархично ниво на управление

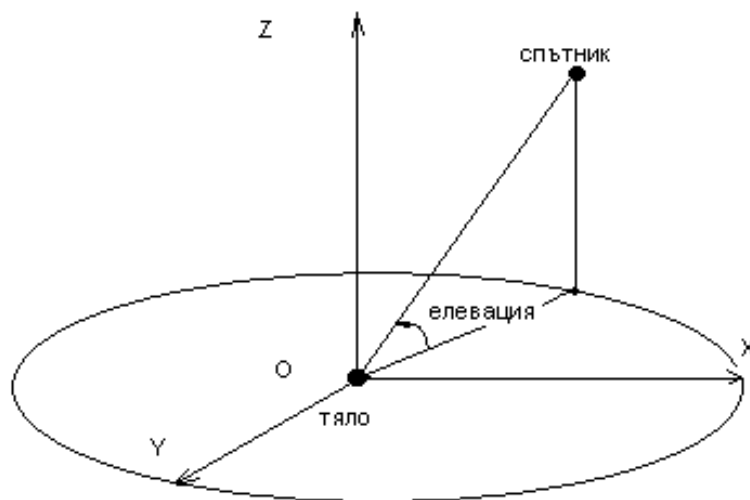
Точното направление на излъчване (приемане) на спътника се дефинира с два ъгъла - азимут и елевация:

- Азимут: Ъгъл, заключен между оста x на някаква начална координатна система $Oxyz$ (т.О е съпада с движещото се тяло) и вектора, свързващ т.О с проекцията на спътника в хоризонталната равнина xy . Графично азимутния ъгъл е показан на **фиг.2.1**



фиг.2.1 Азимутен ъгъл

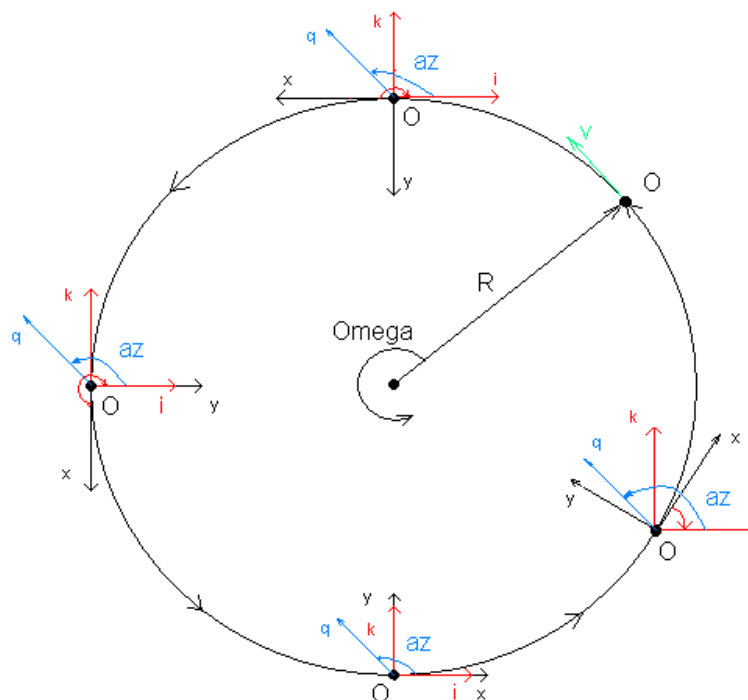
- Елевация: Ъгъл, заключен между вектора, свързващ т.О с проекцията на спътника в хоризонталната равнина xy и вектора, свързващ т.О със самия спътник. Равнината в която лежи елевационния ъгъл е перпендикулярна на равнината xy . Графично елевационния ъгъл е даден на **фиг.2.2**



фиг.2.2 Елевационен ъгъл

- Действие на автоматичната система на първо йерархично ниво по канала на азимута.

На **фиг.2.3** е показано действието на подвижна стабилизираща платформа (компенсираща азимутни отклонения), прикрепена към движещо се по окръжност тяло в хоризонталната равнина.



x, y - координатна система на движещото се тяло

i, k - координатна система на стабилизиращата платформа

Стабилизация на азимутния ъгъл на излъчване (приемане) на антената при движение на тялото в кръг

фиг.2.3 Реакция на подвижната стабилизираща платформа при движение на тялото в кръг

Нека Ox, y (черна) и Oi, k (червена) са координатни системи с едно и също начало, намиращи се в хоризонталната равнина. Техният център т.О се движи с ъглова скорост Ω по окръжност с радиус R . С Ox, y е отбелязана координатната система на движещото се тяло, като оста x съвпада с вектора на тангенциалната скорост \vec{v} т.е $x \perp R$. С Oi, k е отбелязана координатната система на стабилизиращата платформа, спрямо която се задава азимутния ъгъл на излъчване (ъгъл az , направление q). Координатната система Oi, k , е подвижна спрямо Ox, y и може да извършва ротация около оста, пресичаща перпендикулярно хоризонталната равнина в т.О.

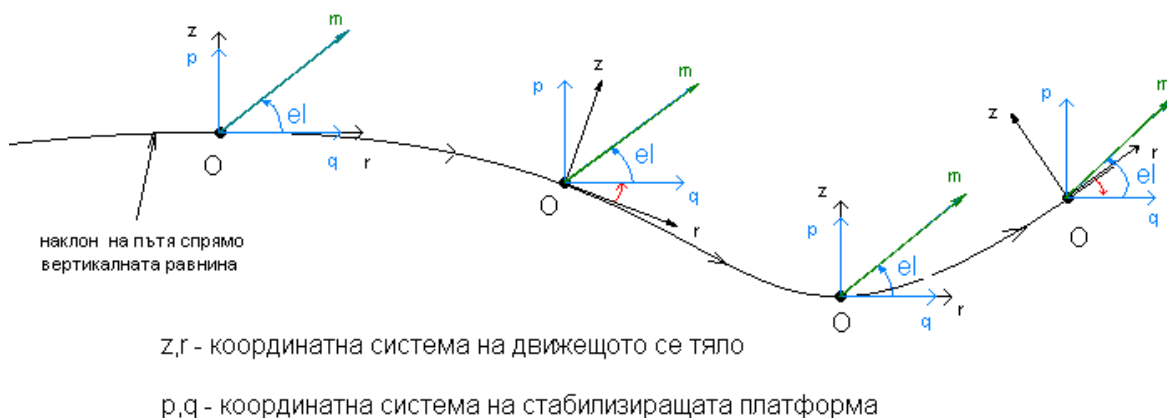
В началния момент от време (включване на системата) двете координатни системи се припокриват. Във всеки следващ момент, поради движението на т.О по окръжността, векторът на скоростта сменя посоката си. Тогава координатната система Ox, y се върти около центъра си със скорост равна на ъгловата скорост Ω на т.О спрямо оста на въртене на тялото.

Действието на автоматичната система трябва да бъде такова, че да запази първоначалното положение на координатната система O_i, k , така че ъгъла на излъчване да остане в зададеното му направление. За да се запази това направление при ротация на Ox, y със скорост Ω трябва двигателят, управляващ подвижната платформа да завърти O_i, k със скорост, равна по големина, но обратна по посока на скоростта на ротация. С червени дъги са отбелязани ъглите, които системата трябва да отработи, за да остане азимутния ъгъл постоянен.

- **Действие на автоматичната система на първо йерархично ниво по канала на елевацията**

На **фиг.2.4** е показано действието на подвижна стабилизираща платформа, компенсираща елевационни отклонения.

Стабилизация на елевационния ъгъл на излъчване (приемане) на антената



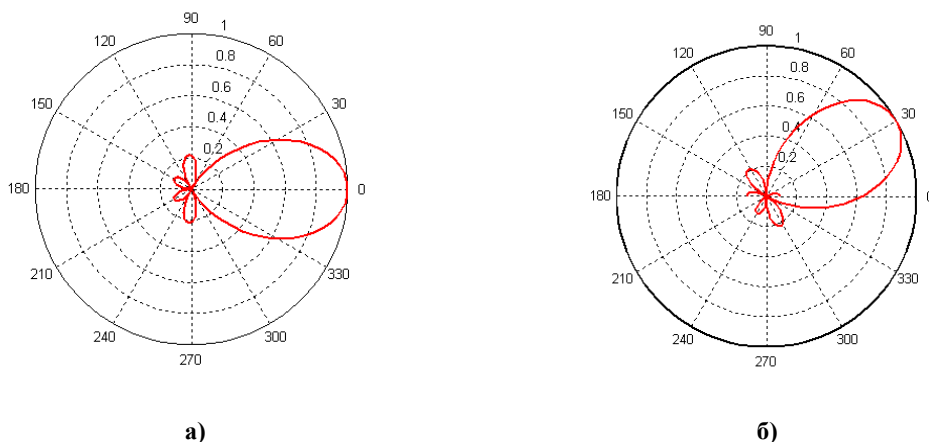
фиг.2.4 Действие на системата при изменение на елевационния ъгъл на излъчване на антената вследствие на променливия наклон на пътя

Тук отново се разглеждат две координатни системи с еднакво начало Or, z (за тялото) и Oq, p (за платформата), намиращи се във вертикалната равнина, образувана от рамената, даващи елевационния ъгъл на излъчване (q и m). Разглежда се ротацията на (Or, z) в различни моменти от време спрямо ос s , пресичаща перпендикулярно вертикалната равнина в т.О. И тук с q се означава азимутното направление, само че дадено във вертикалната равнина, а елевационния ъгъл el се дава спрямо правата q във вертикалната равнина. С червени дъги е даден наклонът на пътя в различни моменти от време, и съответно ъглите, които трябва да се отработят от автоматичната система. Зададеният елевационен ъгъл на излъчване остава постоянен, когато разликата между скоростите на ротация на тялото и на подвижната платформа около оста s е равна на нула. Това е и задачата на автоматичната система по канала на елевацията.

3. Насочено действие на антените. Диаграма на насоченост на излъчването

Антенa, която излъчва енергия равномерно във всички посоки, се нарича сферичен или изотропен излъчвател [1, 2]. Изразът “сферичен излъчвател” подсказва, че той няма насочено действие. При този тип излъчватели плътността на излъчване във всички направления е еднаква. Такъв сферичен излъчвател не може да бъде реализиран на практика, което означава, че всяка практически изпълнима антена не излъчва равномерно във всички направления и има специфична характеристика на насочено действие. За да се построи тази характеристика точно, би трябвало тя да се представи пространствено, но графично това не може да се изобрази в една равнина. По тази причина характеристиките на насоченото действие се дават само в хоризонталната и вертикалната равнина.

Излъчвателните характеристики на антените се описват с няколко почти еднакви по смисъл понятия. Когато се говори за диаграма на насоченост на излъчването или за характеристика на насоченост, става дума за представянето на излъчвателни характеристики на антената в пространствена координатна система. Въпреки това понякога се прави разлика между пространствена и равнинна диаграма на насоченост на излъчването. Последната се означава като диаграма на насочено действие **фиг3.1 (Приложение 1 – файл sinxx.m)**. Тя представлява сечението на хоризонталната или вертикалната равнина с пространствената диаграма на насоченост на излъчването.



3.1 Диаграма на насочено действие а) в хоризонталната и б) във вертикалната равнина

Диаграмата на насочено действие на антената се представя в полярна координатна система (съответно в част от нея) или в правоъгълна координатна система. Тук ще бъдат използвани полярни координати.

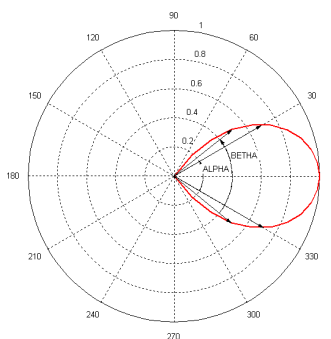
Полярните координати се състоят от мрежа от концентрични окръжности и вектори, започващи от центъра им. Концентричните окръжности съответствуват на различни стойности на напрежението, като центъра им отговаря на стойност на напрежението нула. Векторите определят ъглите и съответно-посоките. Максималната измерена напрежнатост на

полето, създадено от антената, т.е основното излъчване обикновено се нормира и приема за равно на 1 (100%) и се нанася с ъгъл 0° (прието е направлението на главния лъч да съвпада с ъгъл 0°). Отклонението от това правило се прави често при представяне на характеристиката на насочено действие във вертикалната равнина (вертикална диаграма на излъчване). Всички следващи напрежения, които се измерват в границите на един ъгъл на завъртане от 360° , се делят на максималното напрежение U/U_{\max} и се нанасят в съответствие с отклонението от главната посока на излъчване.

Широчината на лъча в направлението на главния лъч на една антена се нарича **ъгъл на разтвора** на диаграмата. За да се определи този ъгъл, се приема точката с най-голямо напрежение (главната посока на излъчване и приемане) за точка с напрежение 1 и след това се търсят двете точки от листа на диаграмата, в които напрежението спада до стойност 0.707 от максималната си стойност, което съответства на намаляване на мощността с 50% или затихване -3dB . След като двете точки бъдат намерени се свързват с центъра на координатната система. Ъгълът, заключен между рамената на новополучените вектори, е търсения **ъгъл на разтвора** **фиг.3.2**. Ъгълът на разтвора понякога се означава като **ъгъл на половината мощност**, тъй като плътността на излъчването (мощността) от двете страни на максимума е спаднала на половина (намаляването на напрежението до стойност 0.707 от максималното е еквивалентно на намаление на мощността с 50%).

Понятието **ъгъл на половината напрегнатост на полето** се отнася до точките от двете страни на главния максимум, в които напрежението спада до стойност 0.5 от максимума. Спадането на напрежението наполовина съответствува на намаление на мощността с 75%, т.е затихване -6dB . Ъгълът на половината напрегнатост на полето е показан също на **фиг.3.2**.

Приложение 1 - файл – antendiag.m



3.2 Ъгъл на половината мощност (α) и ъгъл на половината напрегнатост на полето (β)

Диаграмите на насоченост на излъчването на антените най-точно се апроксимират и задават посредством функцията $\frac{\sin kx}{kx}$.

4. Сензори на ъглова скорост - жирокопи.
Жирокопи изградени на базата на iMEMS технология
(integrated Micro Electro Mechanical System)

4.1 Общи сведения за сензорите на ъглова скорост - интегрални жирокопи

Сред разнообразните сензори, пускани на пазара от фирмата Analog Devices, особено място заемат микроелектромеханичните сензори iMEMS [3]

Преди повече от десет години компанията Analog Devices пристъпва към изготвянето на електромеханични устройства от силициев кристал с помощта на дадената технология. Първите образци на напълно интегрирани еднокристални сензори на ускорение (акселерометри) са пуснати през 1991г. Първоначално акселерометрите iMEMS са разработени специално за системата за безопасност на автомобилите, където са се прилагали за детектиране на сблъсъци и активиране на предпазните възглавници. Днес тези акселерометри се прилагат в качеството на инерционни сензори в най-различни области. Analog Devices е лидер в този отрасъл на промишлеността. До септември 2002г. фирмата е пуснала повече от 100 милиона акселерометри.

Днес Analog Devices е най-големият доставчик на сензори за ускорение за активиране на обезопасителни възглавници на автомобилите, тъй като производителите на автомобилни окомплектовки са много взискателни към качеството на компонентите и са избрали сензорите iMEMS за влагане в тези толкова отговорни устройства.

Компанията Analog Devices използва сертифицирана система за контрол на качеството на продукцията QS- 2000 и от 2000г. е поставила милиони сензори iMEMS в системите за безопасност на автомобилите, където се изисква висока надеждност: вероятността за отказ е от порядъка на 10^{-6} , срокът на годност е 15 години.

През 2002г. фирмата Analog Devices за пръв път в света пристъпва към производството на интегрални жирокопи на базата на технологията iMEMS. Това единствено засега търговски достъпно устройство е интегрирано в един силициев кристал - сензор на ъглова скорост заедно с електроника, осигуряваща формирането и предварителната обработка на сигнала.

Интегралните сензори за ъглова скорост iMEMS заемат особено място сред многобройното семейство на жирокопите от различни типове.

Жирокопите, както и всички промишлени прибори, може да се сравняват по различни характеристики: масо-габаритни показатели, енергопотребление, себестойност, надеждност, способност да работят в условия на вибрации и претоварване. Преди всичко конструкторът се интересува от показателите за точност на жирокопа.

Жироскопите се делят на два основни класа: свободни жироскопи (астатични, запазващи зададеното направление) и сензори за ъглова скорост, към които се отнасят и жироскопите iMEMS. За астатичните жироскопи основен показател се явява остатъчната скорост на изместване, докато точността на сензорите за ъглова скорост се характеризира с грешката от измерване на ъгловата скорост. За да се получи сигнал за ъгловото положение, е необходимо да се интегрира сигнала за ъгловата скорост, което довежда до бързо натрупване на грешки.

Скоростта на изместване на iMEMS жироскопите е голяма, но при добра калибровка изместването е в границите между 70-300°/час. За много добра калибровка на жироскопа се счита намаляването на дрейфа под 70°/час. Тези жироскопи са предназначени за приложение в устройства, за които интервалите на автономна работа са достатъчно малки, т.е. корекцията се прави достатъчно често или непрекъснато. Независимо от по-малката в сравнение с други жироскопи точност, микроелектромеханичните жироскопи iMEMS притежават цял ред уникални достоинства, което ги прави незаменими при много приложения.

Преди всичко – това са малките габарити и маса, многократно по-малки от който и да било друг жироскоп. Сензорите за ъглова скорост от типа ADRXS 150 и ADRXS 300 се изработват в миниатюрни корпуси с размер 7x7x3 мм с изводи във вид на матрица топчета (BGA), и теглото на такъв прибор не превишава 0.5g. Рекордно ниските масо-габаритни показатели на чувствителните елементи, обезпечавани от технологията iMEMS, се съчетават с интеграцията на всички необходими електронни схеми за обработка на сигнала в една микросхема.

Най-важен за портативните автономни устройства параметър е енергопотреблението. Жироскопите ADRXS 150 и ADRXS 300 на фирмата Analog Devices потребяват ток от порядъка на 5 mA при номинално напрежение 5V. Този параметър на iMEMS жироскопите силно се отличава в посока на намаляване от всички други жироскопи.

Ниската себестойност на датчиците за ъглова скорост iMEMS (непревишаваща няколко десетки долара), също ги поставя в обособено положение сред другите жироскопи.

Освен това жироскопите iMEMS се отличават с висока надеждност. В дадени примери за повишение на надеждността (най-напред за търговски достъпните жироскопи от даден клас) е предвидена вградена система за пълно механично и електронно автотестване, което функционира без необходимост от изключване на датчиците. Патентованите решения, които са вложени в технологията на iMEMS, обезпечават изключителна устойчивост на датчиците на удари и вибрации.

Жироскопите ADRXS дават стабилен изходен сигнал в присъствие на механични шумови колебания с големина на ускорението до 2000g в широк диапазон от честоти. Това уникално свойство е важно, например за такива

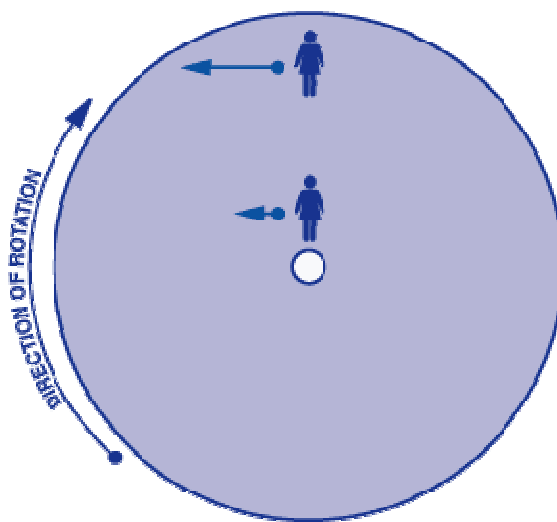
системи като автомобилния сензор за преобръщане, където преобръщането на транспортното средство трябва да бъде достоверно разпознато от електронните системи на автомоила в условията на шумове от удари и вибрации, в резултат на стълкновение или излизане от пътя.

Достигнатите характеристики постоянно се повишават в резултат на усвършенстването на технологията iMEMS. По този начин съчетаването на уникални показатели едновременно по много параметри, позволява на дадените прибори да служат като средство, както за подобряване характеристиките и възможностите на наличните разработки, така и за реализацията на нови, безпрецедентни конструкторски идеи.

Полученият от жироскопа сигнал може да бъде използван за увеличаване на точността и надеждността на системи за позициониране и навигация (GPS), за стабилизация на подвижните системи на автомобилите, самолетите, роботите, антените и промишленото оборудване.

4.2 Кориолисови ускорения. Принцип на действие на жироскопите от серия ADXRS, изградени на базата на iMEMS технология

Жироскопите, изградени на базата на iMEMS технология използват ефекта на Кориолисовото ускорение за измерване ъгловата скорост на въртене на телата [3,10]. Кориолисовият ефект може да бъде разяснен като се разгледа движението на тяло върху въртящ се диск **фиг.4.1**.



фиг.4.1 Пример за Кориолисово ускорение

Ако Ω е ъгловата скорост на въртене на диска, а r е разстоянието на което отстои тялото от оста на въртене, то тангенциалната му скорост ще бъде Ωr . Тангенциалната скорост на тялото от **фиг.4.1** близо до оста на въртене на диска е много по-малка, отколкото тангенциалната му скорост в края му, поради по-голямото разстояние, на което се намира от центъра на въртене. Ако се разгледа движението на тялото при преместването му от

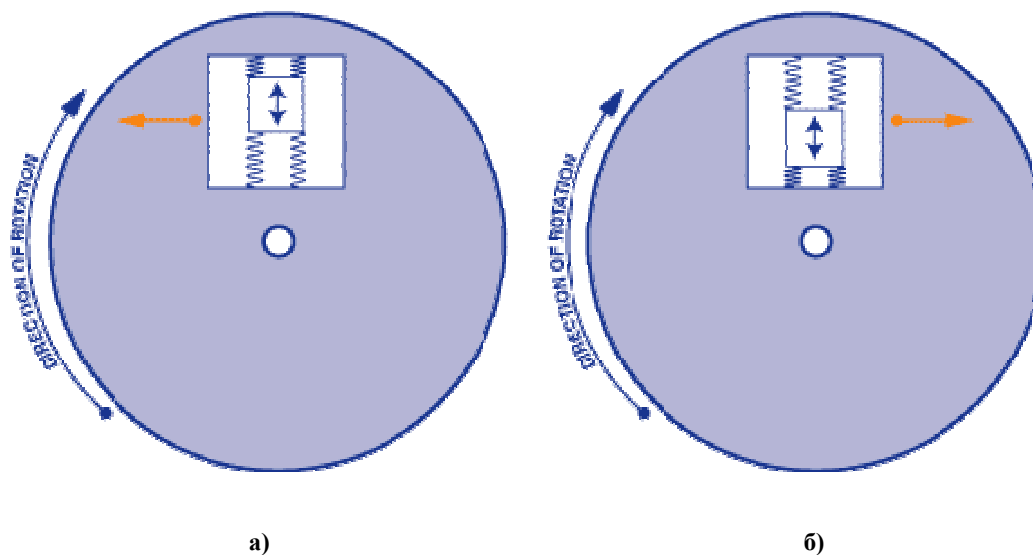
място с малка тангенциална скорост към място с по-голяма такава и обратно, може да се наблюдава и разбере действието на Кориолисовите ускорения. При радиално движение на тялото по въртящия се диск скоростта му има две компоненти – радиална и тангенциална. Когато тялото се придвижва с

радиална скорост $v = \frac{dr}{dt}$, от орбити на въртене с малка към орбити на

въртене с голяма тангенциална скорост, то няма как да компенсира своята малка тангенциалната скорост съответстваща на по-малкото r , с по-голямата тангенциална скорост на диска при по-голямото r . В резултат на тази разлика в тангенциалните скорости на въртене (на диска и тялото) възниква сила от Кориолисово ускорение (ускорение по тангенциалната компонента на скоростта), чието действие е винаги перпендикулярно на вектора на радиалната скорост. Кориолисовата сила измества тялото в посока, зависеща както от посоката на въртене на диска така и от посоката на вектора на радиалната скорост. На **фиг.4.1** при дадената посока на въртене на диска и преместване в северна посока, тялото ще се отмести наляво. Големината на Кориолисовото ускорение се дава чрез изрази $a_{\text{corr}}=2\Omega v$. Големината на Кориолисовата сила е $F_{\text{corr}}=2m\Omega v$, където m е масата на движещото се тяло.

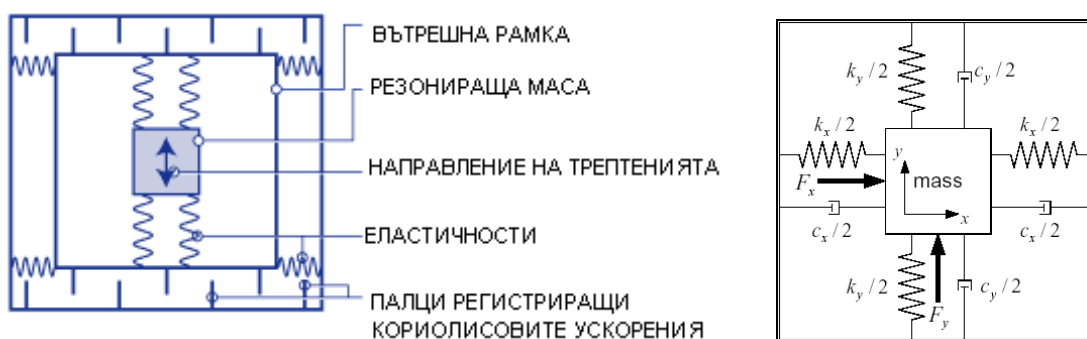
При движение на тялото от периферията на въртящия се диск към центъра му също възникват Кориолисови сили. Когато тялото се намира в периферията на диска, то има голяма тангенциална скорост. При преместването му в направление север-юг то пренася тази своя голяма тангенциална скорост към орбити на въртене на диска с по - малки тангенциални скорости. В резултат на това се появяват разлики в скоростите на тялото и на диска. Възниква Кориолисово ускорение по тангенциалното направление, което премества тялото в дясно (при дадената посока на въртене на диска от **фиг.4.1**).

Ефектът, предизвикан от Кориолисовото ускорение на телата, е намерил приложение в разработването на жirosкопи от серията ADXRS на базата на iMEMS технология. Устройството на този тип жirosкопи е такова, че да предизвика появата на Кориолисови сили при ъгловото им завъртане (подобно на движението на тяло по въртящ се диск). Това става чрез резонираща маса, трептенията на която са в точно зададено направление **фиг.4.2**. Когато възникне ъглово завъртане, поради непрекъснатото движение на масата приведена в резонанс, ще се създаде Кориолисова сила пропорционална на скоростта на завъртане. Както се показва по - горе и тук Кориолисовата сила е перпендикулярна на посоката на движение на резониращата маса.



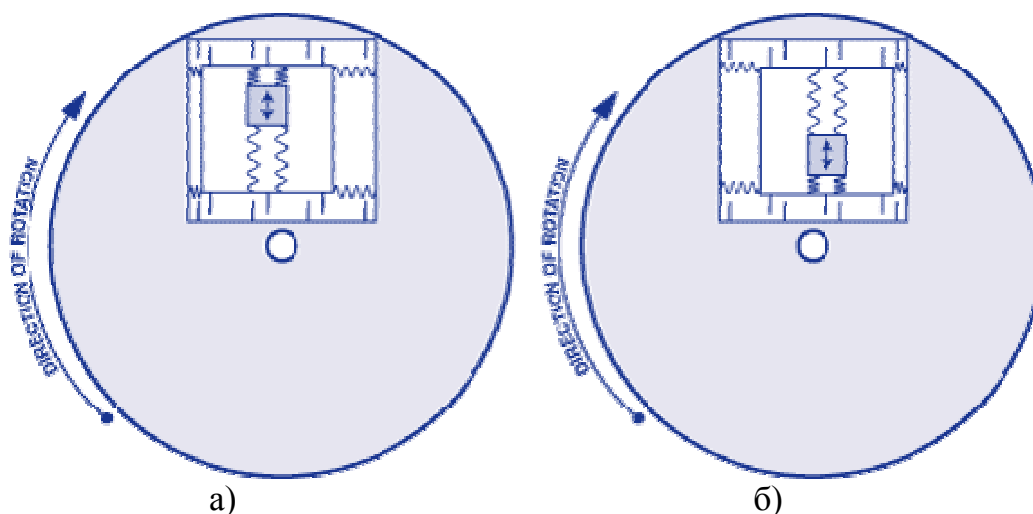
фиг.4.2 Показва посоката на Кориолисовите сили а) при движение на резониращата маса от вътре навън и б) при движение на резониращата маса от вън навътре

Механичната структура на жirosкопа и нейната еквивалентна схема е показана на **фиг.4.3**. Масата на подвижната структура се привежда в резонанс посредством електрически сигнал. Специалната конструкция на жirosкопа е направена така, че резониращата маса да трепти само в едно направление. Сензорите, регистриращи Кориолисовите сили представляват група от подвижни и неподвижни палци, играещи ролята на плочи на кондензатори, а величината, по която косвено се измерва големината на тези сили, е промяната на общия капацитет на контура от паралелно свързани елементарни кондензатори.



фиг.4.3 Механична структура на жirosкоп в изпълнение iMEMS

На **фиг.4.4** е показано движението на механичната система (съставена от вътрешна рамка и резонираща маса) под действието на силите на Кориолис, възникващи при прилагане на входно ъглово завъртане по посока на часовниковата стрелка. Както се вижда при посока на движение от центъра към периферията в направление юг-север рамката се измества наляво. При движение на резониращата маса от периферията към центъра в направление север-юг се наблюдава изместване на рамката надясно.



фиг.4.4 Отместване на рамката при подаване на входно ъглово завъртане а) наляво и б) надясно, в зависимост от посоката на движение на резониращата маса

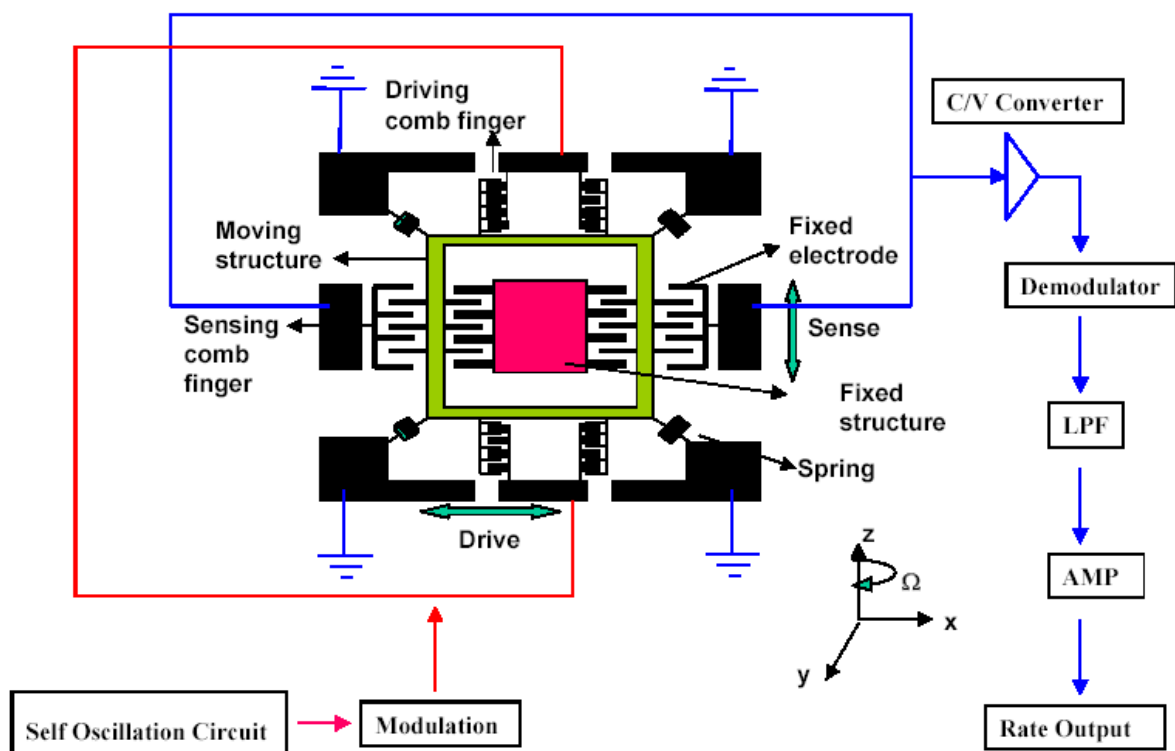
По-подробно принципът на действие и съставните части на iMEMS жиро스코пите са представени на принципната схема на **фиг.4.5 [4,13]**.

Сензорът за ъглова скорост – жироскопът ADRXS, представлява интегрална микросхема: той е изпълнен на един силициев кристал и включва всички необходими електронни схеми за формиране на сигнала. Сензорът има две еднакви микромеханични структури от поликристален силиций, снабдени със специални възбуждащи се рамки. Двете структури са разположени на 90 градуса една спрямо друга с цел да се подтиснат смущенията, предизвикани от механични вибрации. Ще бъде разгледано действието само на едната структура.

Външната част на подвижната рамка (**Moving structure**) е закрепена към неподвижната структура на жироскопа посредством четири еластичности (**Spring**) с коефициенти на еластичност k_x и k_y , съответно по двете направления на движение. Подвижното окачване на рамката на жироскопа позволява движението ѝ по две направления - x и y . По направление x рамката се привежда в движение (резонанс) посредством електростатичните сили, възникващи между подвижните и неподвижните палци (плочи на кондензатори), когато към тях се подаде напрежение. Задвижващите палци на системата са отбелязани като (**Driving comb finger**). Заедно с други външни електронни елементи (вътрешни за схемата), те образуват електрическия захранващ контур, отбелязан на схемата с червен цвят. Този контур включва в себе си приведен в резонанс електромеханичен осцилатор, чиято собствена честота на трептене се избира в интервала между 5 и 20kHz.

Трептенията на микромеханичната система имат достатъчно висока честота и амплитуда, така че при ъглово завъртане на жироскопа Кориолисовата сила, действаща на тези елементи, да достигне забележима стойност. Електрическият сигнал, възбуждащ механичната система може да бъде модулиран по подходящ начин с цел да се намали влиянието на външни

смущаващи въздействия и да се увеличи чувствителността на жирокопа. Еквивалентната схема на електромеханичен осцилатор е показана на **фиг.4.6**. Механичният осцилиращ елемент е представен със своя електрически еквивалент (последователна **RLC** верига). Коефициентът на усилване A_v на усилвателя се подбира така, че да се компенсират загубите от активното съпротивление в осцилиращата схема, така че тя да остане в режим на автоколебания.

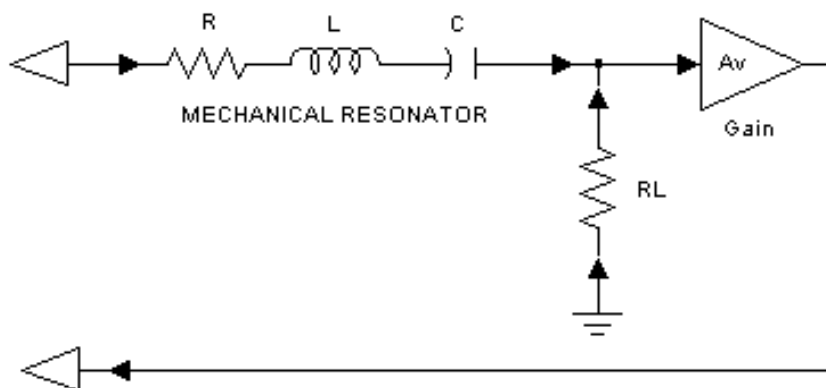


фиг.4.5 Принципна схема на действие на iMEMS резонаторен жирокоп

Кориолисовата сила възниква при ъгловото завъртане на жирокопа около оста z , в резултат на което резониращата маса започва да вибрира в направлението y с амплитуда $\pm \Delta y$, зависеща от големината на тази сила и пропорционална на ъгловата скорост Ω . В резултат на тези вибрации по y $\frac{dC_y}{dy}$ се променя, изменяйки общия капацитет на кондензатора, образуван от паралелно свързаните променливи елементарни капацитети, служещи за детектиране на движения по y направлението. На схемата тези палци, детектиращи изменения в капацитета на чувствителния контур, са отбелязани като (**Sensing comb finger**).

Чувствителността на жирокопа по отношение на преместванията по y в зависимост от броя на палците варира в границите m/y 50-100 fF/ μm ,

(където $f(\text{фемто}) = 1 \times 10^{-15}$). Броят на палците варира в границите м/у 30-60, при което може да бъде постигнат еквивалентен капацитет при паралелно свързване на елементарните капацитети от порядъка на 100-200 fF.



фиг. 4.6 Електромеханичен резонатор

Контурът, в който е включена структурата от кондензатори чувствителни към Кориолисовите сили, е отбелязан със син цвят. Изменението на капацитета в чувствителния контур вследствие на ъглово завъртане около оста **z** се преобразува в изменение на напрежение, посредством преобразувател “капацитет – напрежение” (**C/V Convertor**).

Следващата стъпка от обработката на сигнала е демодулирането му. По този начин се отстранява високочестотната съставка на сигнала. Полученият нискочестотен сигнал носи информация за големината на ъгловата скорост и се подава на нискочестотен филтър (**low-pass filter**) с цел филтриране на високочестотни смущения. НЧФ обикновено е от първи ред с лента на пропускане 0-40Hz или 0-100Hz.

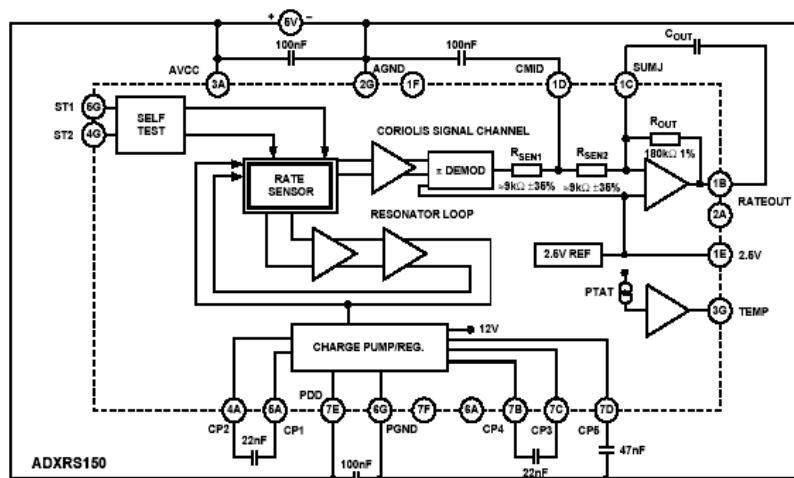
След НЧФ сигналът се усилва, ако това е необходимо. Усилването може да се извърши заедно с филтрирането, ако НЧФ е активен.

Крайният обработен сигнал, който е правопрпорционален на ъгловата скорост на въртене, се подава на изхода на схемата (**Rate output**).

Предавателният коефициент на жirosкопа, дава връзката между изходните и входните сигнали на схемата е константа наречена **Scale factor**, бележи се с K_{gyro} и е с дименсия [**mV/°/s**]. Изходното напрежение, изразено чрез **Scale factor**, е линейна функция на входа и се дава с израза : $V_{\text{out}} = K_{\text{gyro}} \Omega$.

4.3 Характеристики и особености на интегралния жирокоп ADXRS150

Структурна схема на жирокопа ADXRS150 е дадена на **фиг.4.7** [3].



фиг.4.7 Структурна схема на жирокоп от вида ADXRS150

Най-важните характеристики на жирокопа, необходими за съставянето на ООВ на моделираната следяща система са:

- Динамичен обхват на жирокопа (Dinamic Range) $\pm 150^\circ / \text{sec}$.
Този параметър характеризира обхвата на жирокопа за измерване на ъглови скорости.
- Коефициент на предаване на жирокопа (scale factor) - K_{gyro} , който дава връзката между приложеното към жирокопа входно въздействие (ъглова скорост) и изходния сигнал (напрежение).

$$K_{\text{gyro}} = 12.5 \text{ mV} / ^\circ / \text{sec}$$

Преобразуван в радиани е:

$$K_{\text{gyro}} = \frac{12.5 \times 180}{\pi} = 716.2 \text{ mV} / \text{rad} / \text{sec}$$

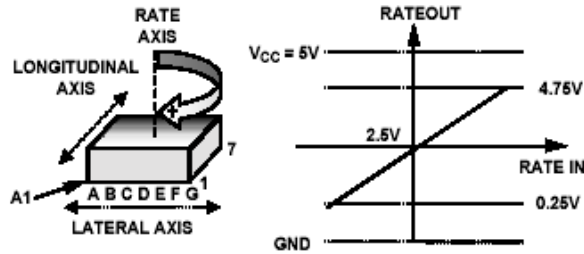
- Начална работна точка на жирокопа (initial null) - V_{out}
Това е напрежението на изхода на жирокопа при температура 25°C и ъглова скорост, приложена към него $\Omega=0^\circ/\text{sec}$.

$$V_{\text{out}} = 2.5 \text{ V}$$

Нулевата работна точка е повдигната спрямо нулата на захранващото напрежение, за да могат да се измерват ъглови скорости, действащи както в посока на часовниковата стрелка, така и обратни на нея.

$$\text{При } \Omega \neq 0, \text{ изходното напрежение е: } V_{\text{out}} = V_{\text{null}} + K_{\text{gyro}} \Omega$$

Горната зависимост е илюстрирана на **фиг.4.8**



фиг.4.8 Изхода на жирокопа изразен като функция на входа: $V_{out} = V_{null} + K_{gyro}\Omega$

- Дрейф на нулевата работна точка (в зависимост от температурата) (Null drift over temperature) - $\pm 300\text{mV}$.
Това са границите на отклонение на работната точка при промяна на температурата в целия работен температурен диапазон.
- Захранващо напрежение $V_{cc}=5\text{V}$
- Консумация на ток $I=6-8\text{mA}$
- Лента на пропускане на нискочестотния филтър. Лентата на пропускане на НЧФ, свързан преди изхода на жирокопа може да бъде променяна с добавянето на външни елементи в границите $0-40\text{Hz}$; $0-100\text{Hz}$.

Интегралната схема има и вътрешен източник на опорно напрежение, както и изходен сигнал, пропорционален на температурата. Тези допълнителни вградени функции на интегралната схема се използват за температурната ѝ компенсация. Други характеристики на схемата могат да бъдат видяни в нейната спецификация (ADXRS150-SPECIFICATION) дадена в Приложение 2.

4.4 Представяне на жирокопа ADXRS150 като модел в Simulink ®

Предавателната функция на жирокопа се съставя от последователното свързване на коефициента на предаване на жирокопа K_{gyro} и предавателната функция на нискочестотния филтър. В спецификацията на схемата е даден полюса на НЧФ, който е $p_{LPF}=40\text{ Hz}$. Тогава за предавателната функция на жирокопа получаваме :

$$W_{GYRO}(p) = K_{gyro} W_{LPF}(p) = K_{gyro} \frac{1}{\frac{1}{p_{LPF}} p + 1} = \frac{K_{gyro}}{\frac{1}{40} p + 1}$$

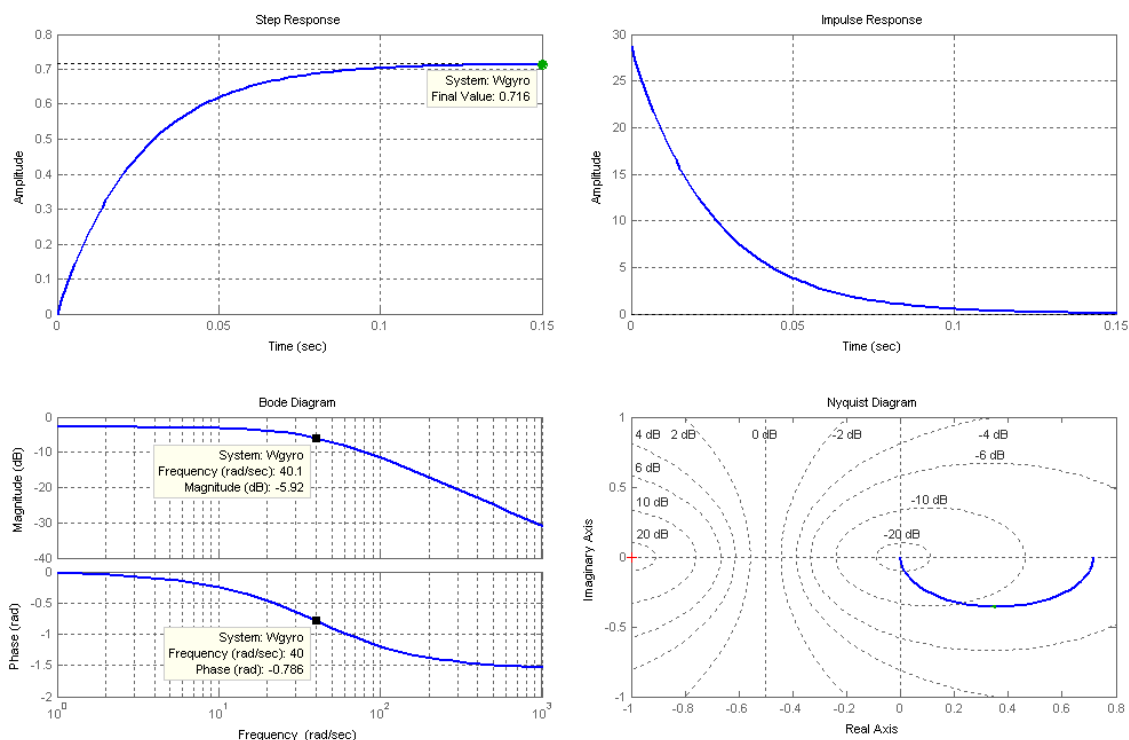
Ако K_{gyro} е с дименсия $\text{mV}/^\circ/\text{sec}$ предавателната функция е:

$$W_{GYRO}(p) = \frac{12.5 \times 10^{-3}}{0.025 p + 1}$$

Ако K_{gyro} е с дименсия $\text{V}/\text{rad}/\text{sec}$ предавателната функция е:

$$W_{GYRO}(p) = \frac{0.7162}{0.025 p + 1}$$

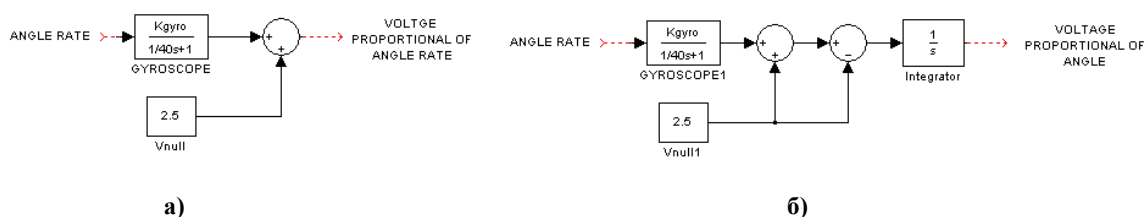
На фиг.4.9 са показани ПФ, ИПФ, ЛАЧХ, ФЧХ и АФХ на горния модел



фиг. 4.9 ПФ, ИПФ, ЛАЧХ, ФЧХ и АФХ на модел $W_{GYRO}(p) = \frac{0.7162}{0.025p + 1}$

Когато предавателната функция на жирокопа се представя като **Simulink**® модел трябва да се има предвид, че началната му работна точка е изместена на 2.5V спрямо нулата на захранването му. Схемата за измерване на скорост е дадена на **фиг.4.10.а**.

Ако трябва да се измери ъгловата позиция, на която се намира жирокопа спрямо началното му положение, се налага да се интегрира сигнала носещ информация за ъгловата му скорост. Преди интегрирането от сигнала трябва да се извадят 2.5V. По този начин интегратора започва да интегрира от нулата на захранването **4.10.б**.

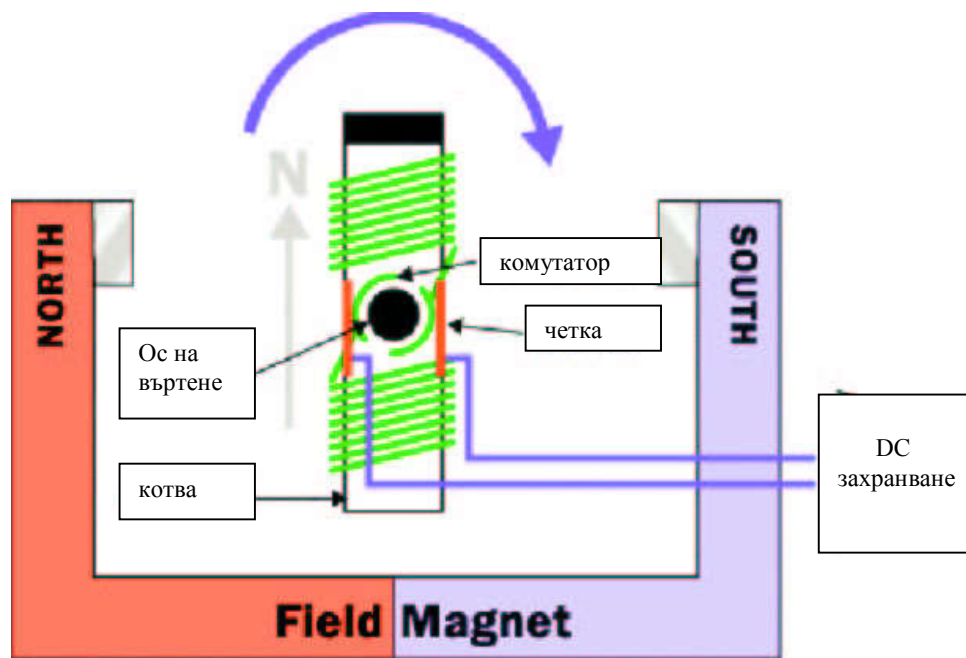


фиг.4.10 Simulink® модели на жирокопи свързани в схеми за измерване на а) ъглова скорост и б) ъглова позиция

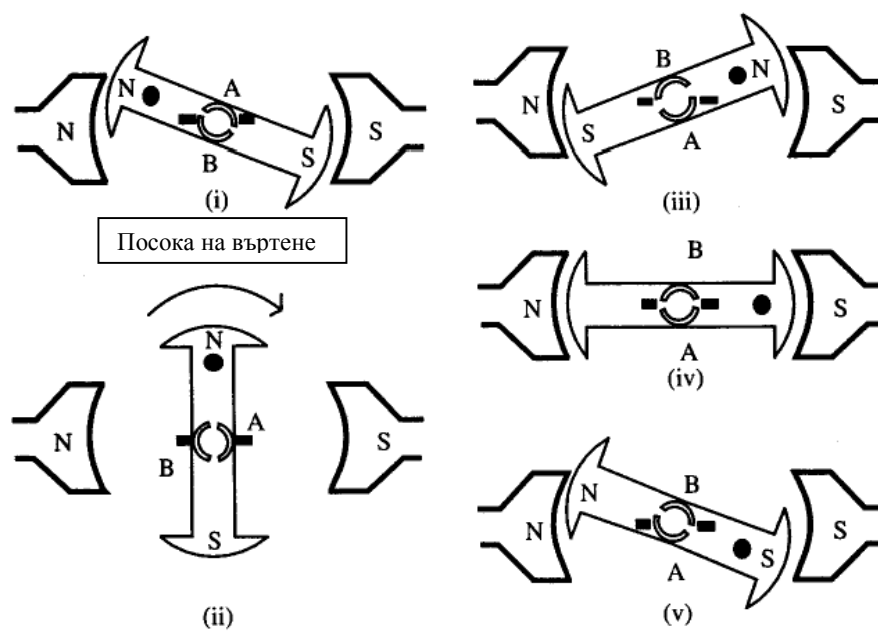
5. Принцип на действие на двигателите за постоянен ток с постоянен магнит. Съставяне на математичен модел

5.1 Принцип на действие на ДПТ ПМ:

- Двигателите за постоянен ток са преобразуватели на електрическата енергия в механична и са съставени от следните основни елементи: ротор, комутатор, електрически четки, въртяща се ос с лагери и статор с постоянен магнит [11]. На **Фиг.5.1** е илюстриран принципа на действие на двигател с прост двуполусен статор. Въртящият момент възниква поради това, че магнитното поле, създадено от тока протичащ през намотката в ротора на двигателя, си взаимодейства с магнитното поле, създадено от постоянния магнит в статора. Действието на двигателя за един полуоборот на завъртане е показан на **фиг.5.2**.
- Когато роторът се намира в позиция (i), дясната четка контактува с комутиращия сегмент А , а лявата четка контактува съответно със сегмента В. В резултат на това в роторната намотка на двигателя протича ток, който от своя страна създава магнитно поле, чиято посока е дадена на схемата. Създаденото магнитно поле в ротора взаимодейства с магнитното поле на статора, в резултат на което възниква въртящ момент, който завърта ротора (в посока на часовниковата стрелка).
- В позиция (ii), силите които действат на ротора се уравновесяват.
- Между позиции (iii) и (v), комутаторът сменя посоката на тока в ротора и оттам посоката на магнитното поле (посоката на тока се сменя на всеки полуоборот).
- В позиция (iv), двете четки губят контакт с комутиращите сегменти и електрическата верига на роторната намотка се прекъсва, но роторът продължава да се движи поради натрупаната в него кинетична енергия. Именно тя спомага за преодоляването на зоната на прекъсване, в която намотката на двигателя е изключена.
- В позиция (v) обърнатото вече магнитно поле на ротора отново си взаимодейства с магнитното поле на статора, в резултат на което се появява въртящ момент, който отново е с посока посоката на часовниковата стрелка.
- Когато роторът е в начална позиция (iv), той няма да се завърти. Този проблем може да бъде решен чрез проектиране на мотор с повече полюси и повече комутиращи сегменти.



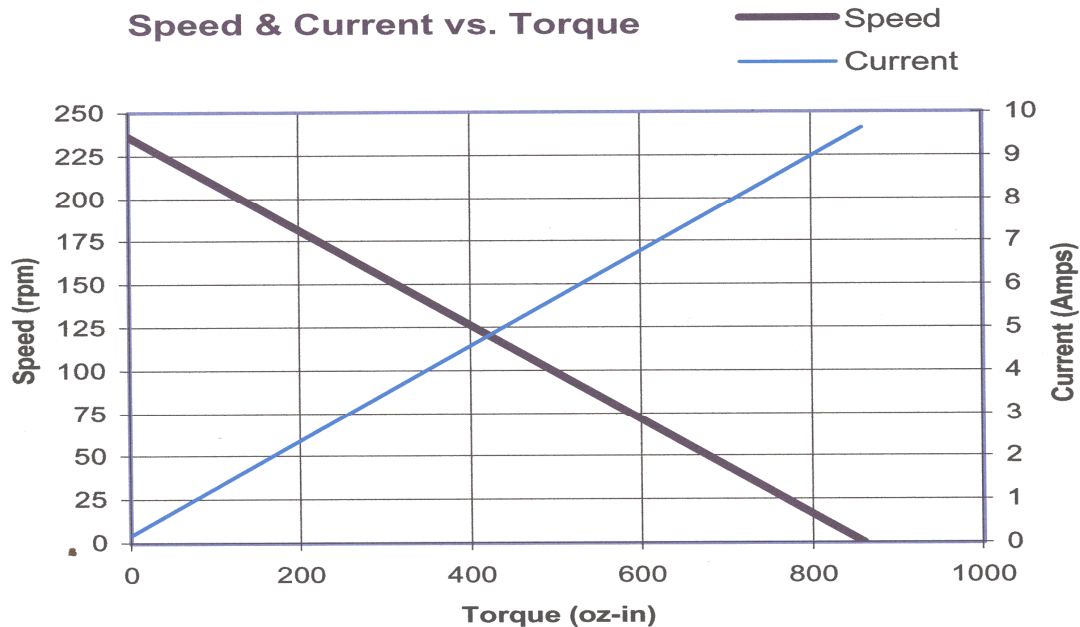
фиг. 5.1 Принципна схема на двигател за постоянен ток



фиг. 5.2 Принцип на действие на двигател за постоянен ток

5.2 Електрически и механични характеристики (Приложение 2).

- Номинално захранващо напрежение (**reference voltage**), V – [V].
- Пусков въртящ момент (**peak torque-‘stall’**), T_{pk} -[Nm] : максималният въртящ момент, който двигателят може да създаде при скорост равна на нула и номинално захранващо напрежение.
- Генериран въртящ момент T_m -[Nm]
- Скорост в режим на празен ход (**no-load speed**), S_{nl} -[rad/s]: максималната скорост, която двигателят може да развие при работа в режим на празен ход
- Константа на въртящия момент (**torque constant**), K_T -[Nm/A]
- Константа на генерираното ЕДН (**back-EMF constant**), K_E -[V/rad/sec]
- Електрическо съпротивление на роторната намотка (**resistance**), R_a -[Ω]
- Индуктивност на роторната намотка (**inductance**), L_a -[H]
- Ток в режим на празен ход (**no-load current**), I_{nl} -[A]: токът който протича през роторната намотка, когато двигателят работи в режим на празен ход при номинално захранващо напрежение.
- Пусков ток (**peak current-‘stall’**), I_p -[A]: максималният ток, който може да протече през роторната намотка на двигателя, при скорост равна на нула и номинално захранващо напрежение.
- Съпротивителен момент от триене (**friction torque**), T_f -[Nm]
- Съпротивителен момент T_l -[Nm]
- Инерционен момент на ротора (**rotor inertia**), J_m -[Kg-m²]
- Електрическа времеконстанта (**electrical time constant**), τ_e -[ms]
- Механична времеконстанта (**mechanical time constant**), τ_m -[ms]
- Коефициент на динамично триене (**viscous damping**), B_m -[Nms]
- Моментно-скоростна характеристика (механична характеристика): дава зависимостта между скоростта и въртящия момент - при двигателите за постоянен ток с постоянен магнит тази зависимост е линейна **фиг.5.3**
- Моментно-токова характеристика: дава зависимостта между въртящия момент и тока в роторната намотка **фиг.5.3** , която е права линия ($K_T=const$)



фиг. 5.3 Моментно-скоростна и Моментно-токова характеристика на двигател за постоянен ток тип GM9236S020 [12]

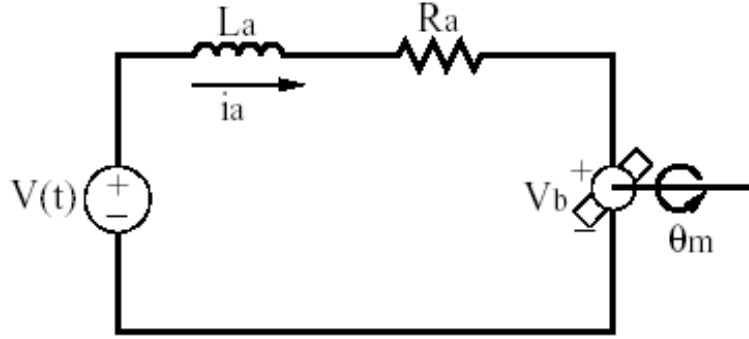
5.3 Динамика на двигателите за постоянен ток с постоянен магнит.

Съставянето на математичен модел на ДПТ се основава на принципа му на действие. На **фиг.5.4** е показана еквивалентната електрическа схема на ДПТ, за която може да се запише следното диференциално уравнение (5.1), описващо динамиката на електрическата част на двигателя:

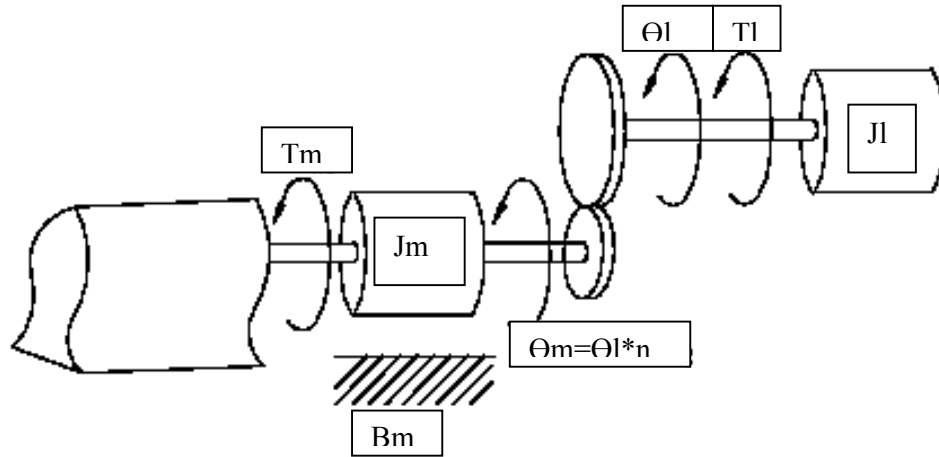
$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = V - V_b \quad (\text{уравнение на електрическата част}) \quad (5.1)$$

V_b е генерирано ЕДН, което се получава от въртенето на роторната намотка в магнитното поле на статора. Големината му зависи от броя на намотките в ротора, силата на магнитното поле и скоростта на въртене на ротора. За него може да се запише уравнение (5.2), където K_E е константа на генерираното ЕДН, ϕ е магнитният поток създаден от статора, ω_m е ъгловата скорост на ротора в [rad/sec], а θ_m е ъгловата позиция на ротора в [rad] или [deg]

$$V_b = K_1 \phi \omega_m = K_E \omega_m \quad (\text{уравнение на генерираното ЕДН от въртене}) \quad (5.2)$$



фиг.5.4 Електрическа схема на двигател за постоянен ток



фиг.5.5 Механична схема на двигател с редуктор

На **фиг.5.5** е показана схемата на двигател с редуктор, за която може да се запише диференциално уравнение (5.3), описващо движението на механичната система:

$$J_m \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m}{dt} = T_m - \frac{1}{n} T_l \quad (\text{уравнение на механичната част}) \quad (5.3)$$

J_m е инерционният момент на ротора, B_m е динамичен коефициент на триене. θ_m е ъгловата позиция на ротора, а генерираният въртящ момент се дава от уравнение (5.4). Неговата стойност зависи от силата на магнитния поток ϕ създаден от статора и от големината на тока i_a в ротора. K_T константа на въртящият момент.

$$T_m = K_2 \phi i_a = K_T i_a \quad (\text{уравнение на въртящия момент}) \quad (5.4)$$

Ако се положи в (5.1) уравнението за индуцираното ЕДН от въртене (5.2), а в (5.3) уравнението на въртящия момент (5.4), и същевременно се

приложи право Лапласово преобразуване на диференциалните уравнения се получават изразите, за електрическата част (5.5) и за механичната част (5.6):

$$(L_a p + R_a)I_a(p) = V(p) - K_e \omega_m(p) \quad (5.5)$$

$$(J_m p + B_m)\omega_m(p) = K_T I_a(p) - \frac{1}{n} T_l(p) \quad (5.6)$$

Ако се приеме, че съпротивителният момент от триене е $T_l(p)=0$ и се комбинират горните две уравнения, се получава предавателната функция по канала на управление, даваща връзката между входното напрежение $V(p)$ и изходната скорост на въртене на двигателя $\omega_m(p)$:

$$W_s(p) = \frac{\omega_m(p)}{V(p)} = \frac{K_T}{(L_a p + R_a)(J_m p + B_m) + K_E K_T} \quad (5.7)$$

или

$$W_s(p) = \frac{\omega_m(p)}{V(p)} = \frac{K_T}{(L_a J_m)p^2 + (B_m L_a + R_a J_m)p + (R_a B_m + K_E K_T)} \quad (5.8)$$

Предавателната функция на двигател за постоянен ток с постоянен магнит има два реални отрицателни корена, които могат да бъдат получени като се реши характеристичното уравнение (5.9) :

$$L_a J_m p^2 + (B_m L_a + R_a J_m)p + R_a B_m + K_E K_T = 0 \quad (5.9)$$

Предавателната функция (5.8) може още да бъде записана във времекопстантна форма чрез използване на времекопстантите τ_1 и τ_2 . Те са свързани с корените на характеристичното уравнение (полюсите на предавателна функция (5.8)) по следния начин:

$$\tau_1 = -\frac{1}{p_1}, \quad \tau_2 = -\frac{1}{p_2} \quad (5.10)$$

Корените на характеристичното уравнение са :

$$p_{1,2} = \frac{-(B_m L_a + R_a J_m) \pm \sqrt{(B_m L_a + R_a J_m)^2 - 4L_a J_m (R_a B_m + K_E K_T)}}{2L_a J_m} \quad (5.11)$$

В повечето двигатели за постоянен ток индуктивността L_a и динамичния коефициент на триене B_m са пренебрежимо малки и тяхното произведение е $B_m L_a \approx 0$. В резултат на тези опростявания и някои други допускания за корените на характеристичното уравнение са в сила изразите:

$$p_1 = -\frac{R_a}{L_a} \quad (5.12)$$

и

$$p_2 = -\frac{K_E K_T}{R_a J_m} \quad (5.13)$$

Използвайки формули (5.10) се записват опростените формули за механичната и електричната времеконстанта, които обикновено се дават в характеристиките на двигателите:

$$\tau_2 = \tau_m = -\frac{1}{p_2} = \frac{R_a J_m}{K_E K_T} \quad (\text{механична времеконстанта}) \quad (5.14)$$

$$\tau_1 = \tau_e = -\frac{1}{p_1} = \frac{L_a}{R_a} \quad (\text{електрическа времеконстанта}) \quad (5.15)$$

Предавателната функция (5.8) се записва във вида:

$$W_s(p) = \frac{K_T}{L_a J_m (p - p_1)(p - p_2)} \quad (5.16)$$

$$W_s(p) = \frac{K_T}{L_a J_m \left(p + \frac{K_E K_T}{R_a J_m}\right) \left(p + \frac{R_a}{L_a}\right)}$$

$$W_s(p) = \frac{K_T}{L_a J_m \frac{K_E K_T}{R_a J_m} \frac{R_a}{L_a} \left(p \frac{R_a J_m}{K_E K_T} + 1\right) \left(p \frac{L_a}{R_a} + 1\right)}$$

След съкращаване и полагане на времеконстантите в горния израз се получава:

$$W_s(p) = \frac{\omega_m(p)}{V(p)} = \frac{\frac{1}{K_E}}{(p\tau_m + 1)(p\tau_e + 1)} = \frac{\frac{1}{K_E}}{\tau_m\tau_e p^2 + (\tau_m + \tau_e)p + 1} \quad (5.17)$$

Диференциалното уравнение съответстващо на (5.17) е:

$$\tau_m\tau_e \frac{d^2\omega_m(t)}{dt^2} + (\tau_m + \tau_e) \frac{d\omega_m}{dt} + \omega_m(t) = \frac{1}{K_E} V(t) \quad (5.18)$$

полага се $a_0 = \tau_m\tau_e$; $a_1 = (\tau_m + \tau_e)$; $a_2 = 1$; $b_0 = \frac{1}{K_E}$ и се замества в (5.18):

$$a_0 \frac{d^2\omega_m(t)}{dt^2} + a_1 \frac{d\omega_m}{dt} + a_2\omega_m(t) = b_0 V(t)$$

горното уравнение се разделя на a_0 :

$$\frac{d^2\omega_m(t)}{dt^2} + \frac{a_1}{a_0} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{a_2}{a_0} \omega_m(t) = \frac{b_0}{a_0} V(t)$$

полагат се $\frac{a_1}{a_0} = 2\xi\omega_r$; $\frac{a_2}{a_0} = \omega_r^2$; $\frac{b_0}{a_0} = k\omega_r^2$

диференциалното уравнение добива вида:

$$\frac{d^2\omega_m(t)}{dt^2} + 2\xi\omega_r \frac{d\omega_m}{dt} + \omega_r^2 \omega_m(t) = k\omega_r^2 V(t); \quad (5.19)$$

Предавателната функция съответстваща на уравнение (5.19) е:

$$W_s(p) = \frac{\omega_m(p)}{V(p)} = \frac{k\omega_r^2}{p^2 + 2\xi\omega_r p + \omega_r^2}; \quad (5.20) \quad [5]$$

Означенията са следните:

- предавателен коефициент на модела

$$k = \frac{b_0}{a_2} = \frac{\frac{1}{K_E}}{1} = \frac{1}{K_E}; \quad (5.21)$$

- резонансна честота

$$\omega_r = \sqrt{\frac{a_2}{a_0}} = \sqrt{\frac{1}{\tau_m \tau_e}} ; (5.22)$$

- коефициент на затихване

$$\xi = \frac{a_1}{2a_0\omega_r} = \frac{a_1}{2\sqrt{\frac{a_2}{a_0}}a_0} = \frac{a_1}{2\sqrt{a_2a_0}} = \frac{\tau_m + \tau_e}{2\sqrt{\tau_m\tau_e}} ; (5.23)$$

всички те са изразени чрез константата на генерираното ЕДН и времеконстантите τ_m и τ_e .

Корените на характеристичното уравнение (5.24) са същите както получените по - горе от уравнение (5.9), но с тази разлика, че са изразени чрез коефициента на затихване ξ и резонансната честота ω_r .

$$p^2 + 2\xi\omega_r p + \omega_r^2 = 0 ; (24)$$

$$p_{1,2} = \frac{-2\xi\omega_r \pm \sqrt{(2\xi\omega_r)^2 - 4\omega_r^2}}{2} = \frac{-2\xi\omega_r \pm 2\omega_r\sqrt{\xi^2 - 1}}{2} = \omega_r \left(-\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1} \right) \quad (25)$$

Съществуват три възможни решения на диференциалното уравнение (5.19). Въпреки, че предавателната функция на двигател за постоянен ток има два реални отрицателни корена т.е $\xi > 1$ тук ще разгледаме и трите възможни решения на уравнението:

- Случай 1: Апериодичен характер на преходната ф-я $\xi > 1$; $p_1 \neq p_2$:

$$p_{1,2} = \omega_r \left(-\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1} \right)$$

Когато $\xi > 1$ няма честота , за която АЧХ да има нарастващ характер, (няма резонанс). В такива случаи резонансната честота се нарича спрягаща ω_c . Това е и честотата, за която фазовата характеристика става равна на $-\pi$ и се бележи с индекса ω_π

Преходната функция $h(t)$ се дава с израза:

$$h(t) = L^{-1} \left\{ W_s(p) \frac{1}{p} \right\} = L^{-1} \left\{ \frac{k\omega_r^2}{p^2 + 2\xi\omega_r p + \omega_r^2} \frac{1}{p} \right\}$$

Използвайки формулите за обратно лапласово преобразуване се получава:

$$h(t) = k \left[1 - e^{-\omega_r \xi t} \left(A_1 e^{-\omega_r t \sqrt{\xi^2 - 1}} + A_2 e^{\omega_r t \sqrt{\xi^2 - 1}} \right) \right] \quad (5.26)$$

където :

$$A_{1,2} = \frac{1}{2} \left(1 \mp \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + 1}} \right)$$

- Случай 2: Критично апериодичен характер на преходната функция $\xi = 1$, $p_1 = p_2$:

$$p_1 = p_2 = -\omega_r \xi$$

Преходната функция $h(t)$ се дава с израза:

$$h(t) = k(1 - e^{-\omega_r t}) \quad (5.27)$$

- Случай 3: Колебателен характер на преходната функция $\xi < 1$, p_1 и p_2 са комплексно спрегнати числа:

$$p_{1,2} = \omega_r \left(-\xi \pm j\sqrt{1 - \xi^2} \right)$$

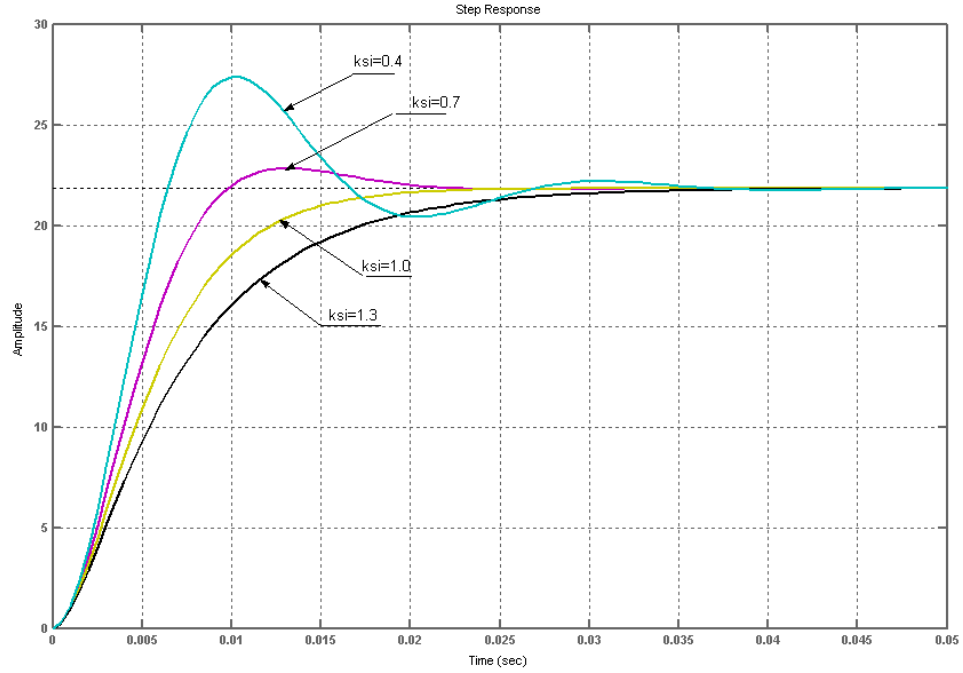
Преходната функция $h(t)$ се дава с израза:

$$h(t) = k \left\{ 1 - e^{-\omega_r \xi t} \left[\cos \omega_r t \sqrt{1 - \xi^2} + \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin \omega_r t \sqrt{1 - \xi^2} \right] \right\} \quad (5.28)$$

Лесно може да се види за кои стойности на механичната и електрическата времеконстанта моделът има колебателен характер. Това става като се реши неравенството $\xi^2 - 1 < 0$. Замествайки и решавайки неравенството с времеконстанти се получава:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\tau_m + \tau_e}{2\sqrt{\tau_m \tau_e}} \right)^2 < 1 &\Rightarrow \frac{\tau_m^2 + 2\tau_e \tau_m + \tau_e^2}{4\tau_m \tau_e} < 1 \Rightarrow \tau_m^2 - 2\tau_e \tau_m + \tau_e^2 < 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow (\tau_m - \tau_e)^2 < 0 \Rightarrow \tau_m - \tau_e < 0 \Rightarrow \tau_m < \tau_e \end{aligned}$$

На **фиг.5.6** графично е показан вида на преходната функция $h(t)$ в зависимост от коефициента на затихване ξ .



фиг.5.6 Преходна функция на модел от втори ред в зависимост от коефициента на затихване ξ . (програмата за изчертаване на преходната функция е записана като m-file под името A4X.m в Приложение 1)

Амплитудно-фазовата характеристика (АФХ) има вида:

$$W_s(j\omega) = \frac{k\omega_r^2}{(j\omega)^2 + j\omega 2\xi\omega_r + \omega_r^2} = \frac{k\omega_r^2}{(\omega_r^2 - \omega^2) + j2\xi\omega\omega_r} \quad (5.29)$$

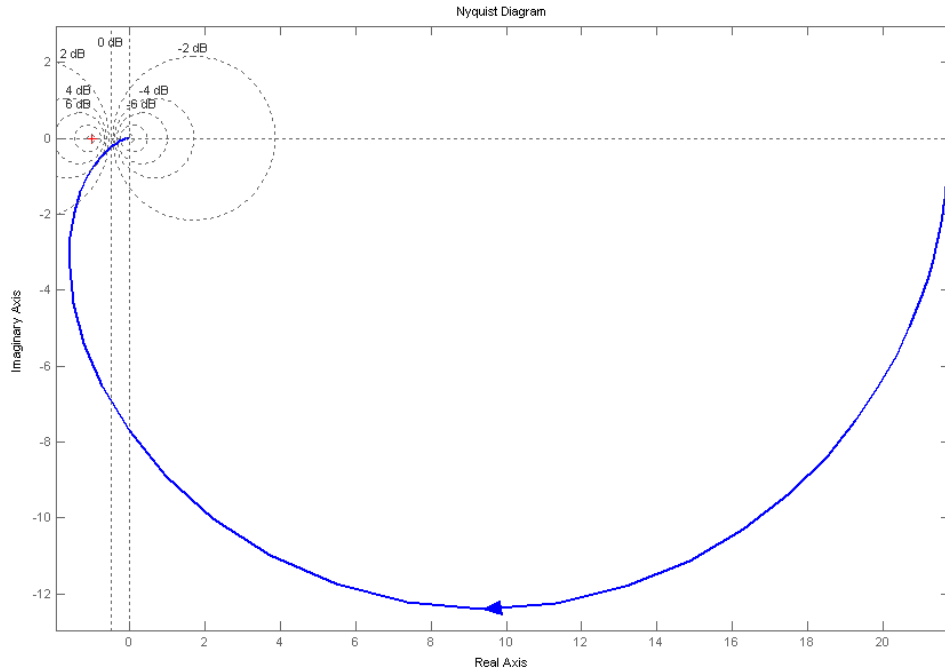
АФХ се преобразува по следния начин:

$$W_s(j\omega) = \frac{k\omega_r^2}{(\omega_r^2 - \omega^2) + j2\xi\omega\omega_r} * \frac{((\omega_r^2 - \omega) - j2\xi\omega\omega_r)}{((\omega_r^2 - \omega) - j2\xi\omega\omega_r)}$$

$$W_s(j\omega) = \frac{k\omega_r^2(\omega_r^2 - \omega^2)}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2\omega^2\omega_r^2} - j \frac{2k\xi\omega\omega_r^3}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2\omega^2\omega_r^2}$$

$$\text{Re}(\omega) = \frac{k\omega_r^2(\omega_r^2 - \omega^2)}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2\omega^2\omega_r^2} ; \quad \text{Im}(\omega) = \frac{-2k\xi\omega\omega_r^3}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2\omega^2\omega_r^2}$$

$$W_s(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j \text{Im}(\omega)$$



фиг.5.7 АФХ на модел от втори ред (виж АФХ на $W_s(p)$)

Амплитудно-честотната характеристика АЧХ се дава с израз:

$$A(\omega) = \text{mod } W(j\omega) = \sqrt{\text{Re}(\omega)^2 + \text{Im}(\omega)^2} \quad (\text{АЧХ})$$

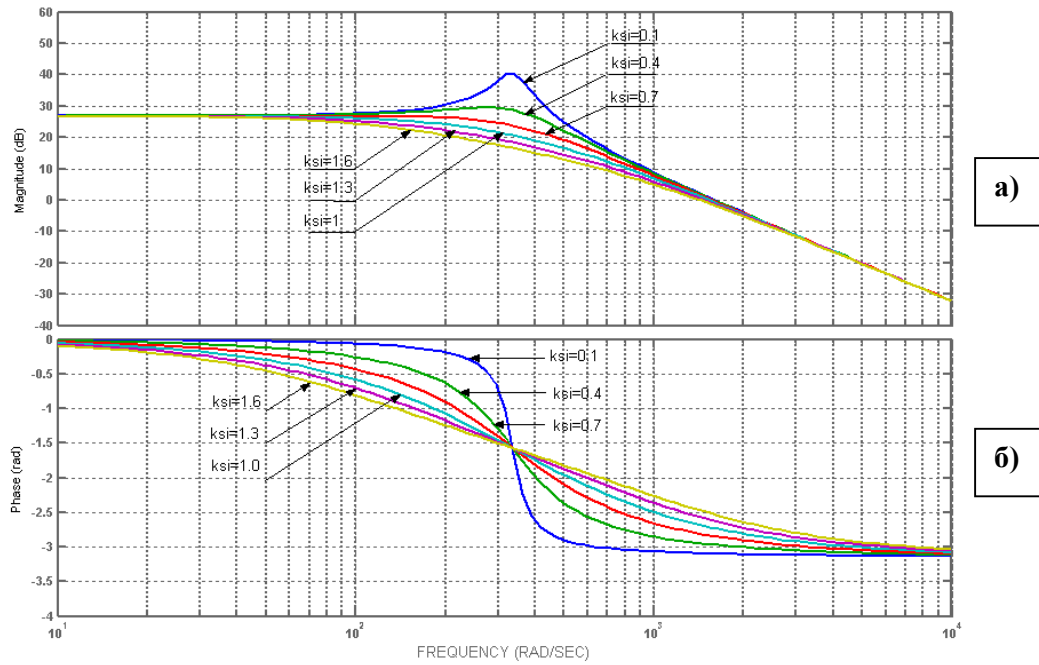
$$A(\omega) = \sqrt{\left(\frac{k\omega_r^2(\omega_r^2 - \omega^2)}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2\omega^2\omega_r^2} \right)^2 + \frac{4k^2\xi^2\omega^2\omega_r^6}{\left((\omega_r^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2\omega^2\omega_r^2 \right)^2}}$$

$$A(\omega) = \sqrt{\frac{k^2\omega_r^2(\omega_r^2 - \omega^2) + 4k^2\xi^2\omega^2\omega_r^2}{\left((\omega_r^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2\omega^2\omega_r^2 \right)^2}}$$

$k\omega_r^2$ се извежда пред корен и получаваме:

$$A(\omega) = \frac{k\omega_r^2}{\sqrt{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2\omega^2\omega_r^2}} \quad (\text{АЧХ}) \quad (5.30)$$

На **фиг.5.8.а** е показан вида на ЛАЧХ за различни стойности на коефициента на затихване ξ .



фиг.5.8 ЛАЧХ а) и ФЧХ б) на модел от втори ред с резонансна честота $\omega_r=335.9$ rad/s за различни стойности на коефициента на затихване ζ . (програмата за изчертаване на ЛАЧХ и ФЧХ е записана в Приложение 1 като m-file под името A4X.m)

Фазово-честотна характеристика (ФЧХ) се дава с израза:

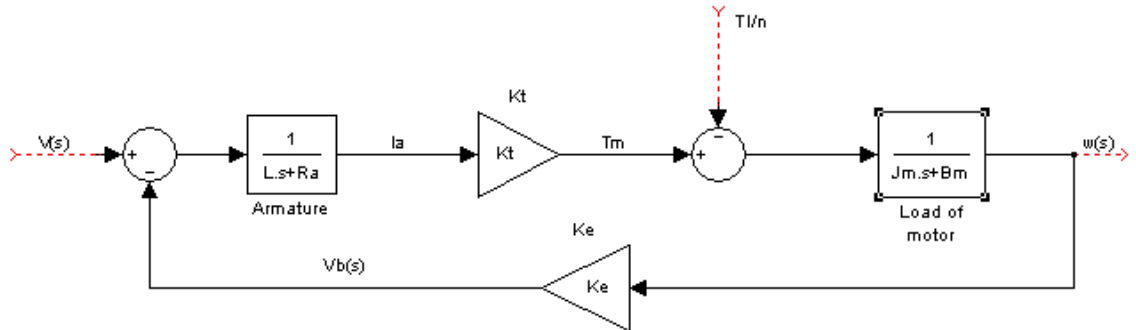
$$\theta(\omega) = \arg W(j\omega) = \arctg \frac{\text{Im}(\omega)}{\text{Re}(\omega)} = \arctg \frac{\frac{-2k\xi\omega\omega_r^3}{(\omega_r^2 - \omega)^2 + 4\xi^2\omega^2\omega_r^2}}{\frac{k\omega_r^2(\omega_r^2 - \omega^2)}{(\omega_r^2 - \omega^2) + 4\xi^2\omega^2\omega_r^2}}$$

$$\theta(\omega) = -\arctg \frac{2\xi\omega\omega_r}{\omega_r^2 - \omega^2} \quad (\text{ФЧХ}) \quad (5.31)$$

На **фиг.5.8.б** е даден вида на ФЧХ за различни стойности на коефициента на затихване ξ .

Simulink® моделът, съответстващ на предавателни функции (5.7) и (5.8) е даден на **фиг.5.9**. Първият блок “**armature**” реализира електрическата част на двигателя, негов вход се явява приложеното към роторната намотка напрежение $V(p)$, а изходът му е тока $i_a(p)$ в същата. Следва блока K_T , който реализира уравнениението на въртящия момент (5.4). Този момент се подава като входен сигнал към блока “**load of motor**”, реализиращ механичната част на двигателя. От изхода на този блок получаваме ъгловата скорост на

двигателя $\omega_m(p)$. В отрицателната обратна връзка (ООВ) се намира блока K_E , негов вход е ъгловата скорост на ротора, а той реализира уравнението на генерираното ЕДН от въртене (5.2).



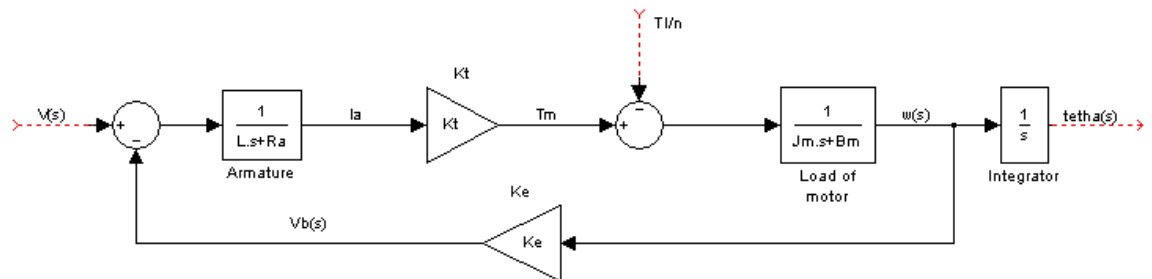
фиг.5.9 Simulink модел “напрежение-ъглова скорост” на двигател за постоянен ток

Предавателната функция, даваща връзката между входното напрежение и ъгловата позиция на ротора, може да се получи чрез умножение на лявата и дясна част на предавателната функция (5.8) с оператора за интегриране $1/p$, в резултат на което се получава (5.32) :

$$W_{\theta}(p) = \frac{\omega_m(p)}{pV(p)} = \frac{\theta_m(p)}{V(p)} = \frac{K_T}{p((L_a J_m)p^2 + (B_m L_a + R_a J_m)p + (R_a B_m + K_E K_T))}$$

Еквивалентният **Simulink®** модел на предавателната функция (5.32) е даден на **фиг.5.10**. В него след блока, реализиращ механичната част “**Load of motor**”, чийто изход е скоростта на въртене, е добавен блок за интегриране, в резултат на което се получава ъгловата позиция на ротора:

$$\theta_m(p) = \frac{1}{p} \omega_m(p) \quad (5.33)$$



фиг.5.10 Simulink модел “напрежение-ъглова позиция” на двигател за постоянен ток

До този момент беше разгледан математичния модел на двигател за постоянен ток с допускането, че $T_l(p) = 0$, но на практика това не е така. T_l

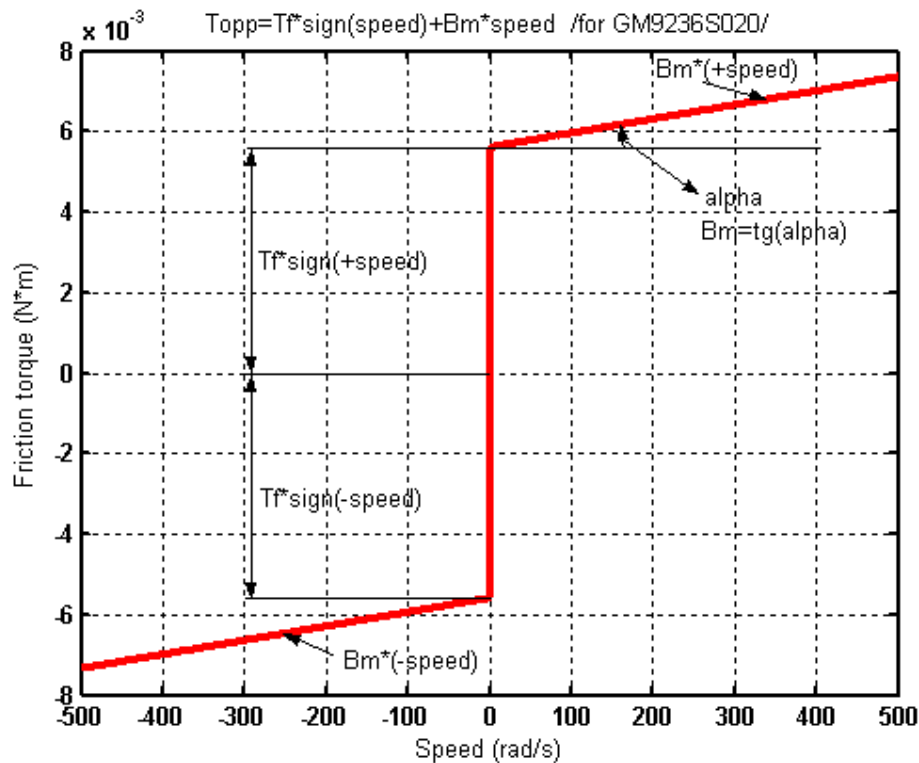
се нарича съпротивителен момент от триене, той не зависи от скоростта, а само от посоката на въртене на двигателя:

$$T_l = T_f \text{sign}(\omega_m) \quad (5.34)$$

Общият съпротивителен момент, който динамичният коефициент на триене и съпротивителният момент от триене оказват на генерирания от двигателя момент T_m е:

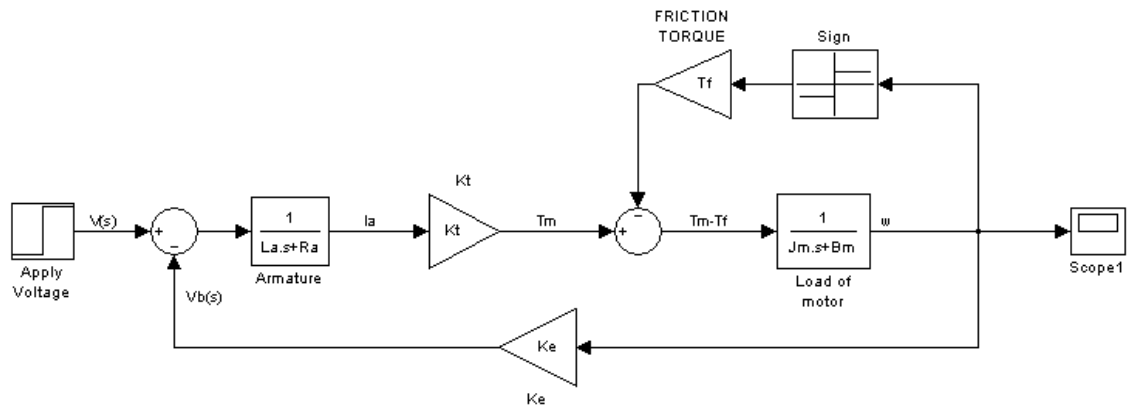
$$T_{opp} = T_l + B_m \omega_m = T_f \text{sign}(\omega_m) + B_m \omega_m \quad (5.35)$$

На **фиг.5.11** е показана графично зависимостта (5.35)



фиг.5.11 Съпротивителен момент от триене във функция от скоростта на въртене
(програмата за изчертаване се намира в Приложение 1като A4X.m)

Пълният математичен модел на двигателя, с включен в него нелинеен съпротивителен момент от триене T_l , е даден на **фиг.5.12**



фиг.5.12 Пълен Simulink модел “напрежение-ъглова позиция” на двигател за постоянен ток

5.4 Статика на двигател за постоянен ток

Статичните характеристики на двигател за постоянен ток могат да бъдат получени от диференциалните уравнения (5.1) и (5.3) чрез полагане на производните им на нула. Ако се положи в у-е (5.1) $\frac{di_a}{dt} = 0$ се получава:

$V_b = V - R_a i_a$, замества се $V_b = K_1 \phi \omega_m = K_E \omega_m$ и спрямо ω_m се получава:

$$\omega_m = \frac{V}{K_E} - \frac{R_a i_a}{K_E} \text{ (електромеханична характеристика) } (5.36)$$

Механичната характеристика на двигателя може да бъде получена лесно от уравнение (5.36) чрез заместването на i_a с $\frac{T_m}{K_T}$ от уравнението на въртящия момент (5.4):

$$\omega_m = \frac{V}{K_E} - \frac{R_a T_m}{K_E K_T} \text{ (механична характеристика) } (5.37)$$

Механичната характеристика (моментно-скоростна диаграма) е дадена графично на **фиг.5.3**.

5.5 Привеждане на инерционни моменти

При механични въртящи се системи, при които оста на въртене на задвижващата част на системата, не съвпада с оста на въртене на задвижваната част на същата система, се налага така нареченото привеждане на инерционни моменти. То се прави с цел опростяване на изчисленията и пример за него е даден на **фиг.5.5**, където с J_l е отбелязан инерционния момент на задвижваната система (платформата и антената), а с J_m е

отбелязан инерционния момент на задвижващата система (инерционния момент на ротора около оста му на въртене) . Нека също така с J_{lp} се означаи приведения инерционен момент към оста на въртене на двигателя, за него важи равенството:

$$J_{lp} = \frac{J_l}{n^2}, \quad (5.38)$$

където n е общото преводно число между двигателя и задвижваната система:

$$n = \frac{\omega_m}{\omega_l} = \frac{\theta_m}{\theta_l} \quad (5.39)$$

тогава за сумарния приведен инерционен момент около оста на въртене на двигателя се получава:

$$J_{\Sigma} = J_m + J_{lp} \quad (5.40)$$

5.6 Привеждане на съпротивителни моменти

Нека T_l е съпротивителният момент на задвижваната система **фиг.5.5** . Тогава приведения към двигателя съпротивителен момент T_{lpr} се извежда от равенството:

$$\frac{T_l \omega_l}{\eta_{np}} = T_{lpr} \omega_m \quad (\text{равенството на мощностите}) \quad (5.41)$$

тогава за T_{lpr} важи уравнението:

$$T_{lpr} = \frac{T_l}{\eta_{np} \frac{\omega_m}{\omega_l}} = \frac{T_l}{\eta_{np} n} \quad (5.42)$$

където η_{np} е коефициент на полезно действие на предавката и зависи от нейния тип (ремъчна, червячна, твърда и.т.н), а n е общото преводно отношение между двигателя и задвижваната система **(5.39)**

6. Управление на подвижна платформа, компенсираща ъгловите отмествания по азимутен и елевационен ъгъл

6.1 Математично моделиране на двигател тип GM9236S020

Тук ще бъдат изведени предавателните функции, описващи работата на двигателя по скорост и позиция за двата канала.

6.1.1 Предавателна функция “напрежение-скорост” на модел на двигател за постоянен ток тип GM9236S020

Входните параметри необходими за създаването на математичен модел на двигателя **GM9236S020** са дадени в характеристиките му **Приложение 2**.

Създава се m-file с име **indata.m** **Приложение 1**, съдържащ конкретните стойности на тези характеристики (за стартирането на всички **Simulink®** схеми е необходимо първо да се стартира **indata.m**).

Предавателната функция по отношение на скоростта, без да се отчитат съпротивителните моменти от триене, е:

$$W_s(p) = \frac{\omega_m(p)}{V(p)} = \frac{K_T}{(L_a J_m) p^2 + (B_m L_a + R_a J_m) p + (R_a B_m + K_E K_T)}$$

Заместена с конкретните си стойности предавателната функция на двигателя по отношение скоростта на въртене е:

$$W_s(p) = \frac{\omega_m(p)}{V(p)} = \frac{0.0458}{1.867 \times 10^{-8} p^2 + 1.769 \times 10^{-5} p + 2.106 \times 10^{-3}}$$

Електрическата и механичната времеконстанти, изразени чрез корените на характеристичното уравнение (5.9) са:

$$\tau_e = -\frac{1}{p_1} = 0.001238s, \quad \tau_m = -\frac{1}{p_2} = 0.007159s$$

Времеконстантите, изчислени с **MATLAB®** се различават малко от тези изчислени по формули (5.14) и (5.15) ($\tau_e=1.06ms$, $\tau_m=8.5ms$), защото последните са изведени с някои допускания и опростявания. Въпреки това производителите дават времеконстантите, изчислявайки ги по съкратените формули. Тук ще се използват времеконстантите изчислени с **MATLAB®** поради по-голямата им точност.

Коефициентът на затихване на модела, изразен с времеконстантите от уравнение (5.23) е:

$$\xi = \frac{\tau_m + \tau_e}{2\sqrt{\tau_m \tau_e}} = 1.41$$

Коефициентът на затихване ξ е по-голям от единица ($\xi > 1$), което определя апериодичния характер на преходната функция.

Спрягащата честота на модела, изразена с времеконстантите (5.22) е:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{1}{\tau_m \tau_e}} = 335.86 rad / s$$

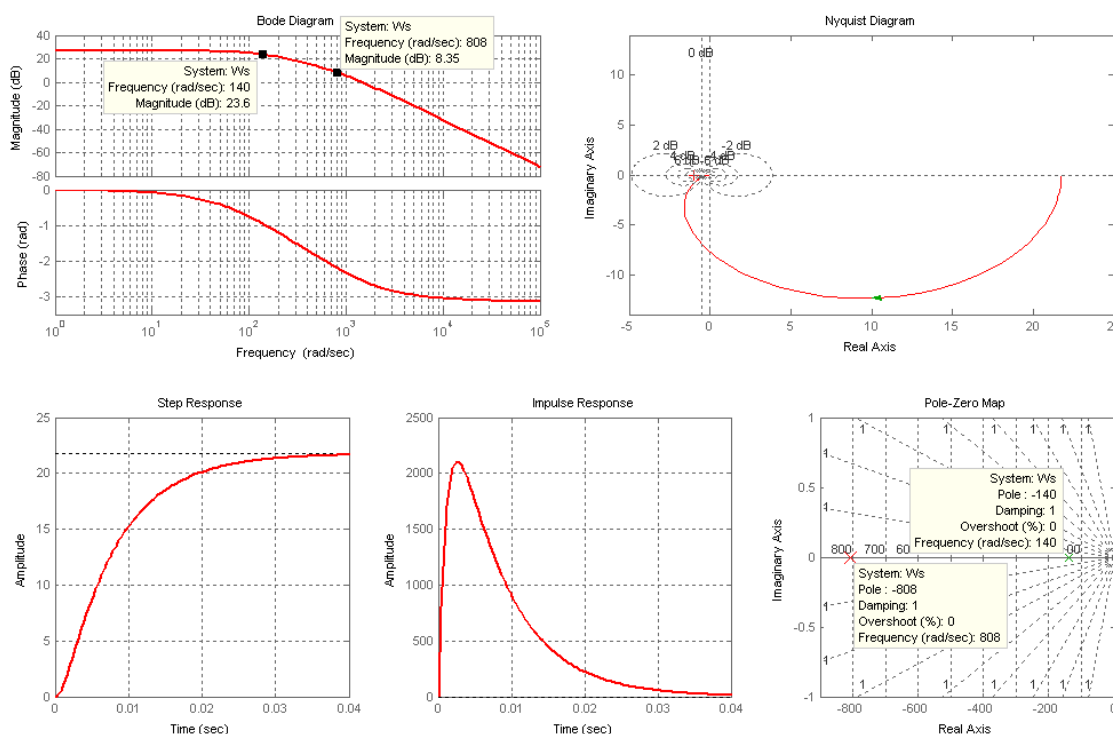
Предавателната функция на модела, изразена чрез спрягащата честота ω_c и коефициента на затихване ξ , има вида 5.20 :

$$W_s(p) = \frac{k\omega_c^2}{p^2 + 2\xi\omega_c p + \omega_c^2} = \frac{2.463 \times 10^6}{p^2 + 947.3p + 1.128 \times 10^5}$$

Изразена чрез времеконстанти предавателната функция е:

$$W_s(p) = \frac{\frac{1}{K_E}}{(p\tau_m + 1)(p\tau_e + 1)} = \frac{21.8341}{(7.159 \times 10^{-3}p + 1)(1.238 \times 10^{-3}p + 1)}$$

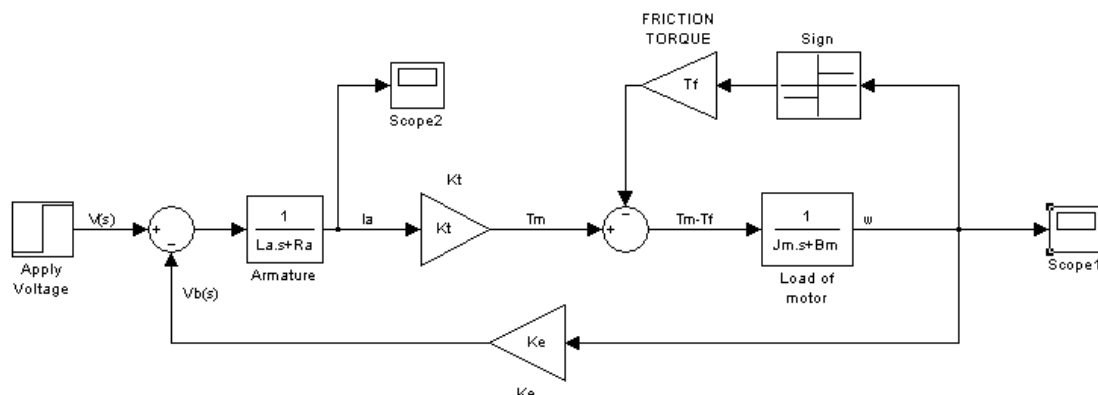
Всички характеристики на модела на двигателя по отношение на скоростта са показани на **фиг.6.1**. Там са дадени ЛАЧХ, ФЧХ, АФХ, ПФ, ИПФ и полюсно-нулевата диаграма на **$W_s(p)$** . За получаването на характеристиките е използван Control system toolbox-LTI Viewer, но могат да се ползват и командите дадени в indata.m



фиг.6.1 ЛАЧХ, ФЧХ, АФХ, ПФ, ИПФ и полюсно-нулевата диаграма на $W_s(p)$

Дотук беше разгледан модела на двигателя /GM9236S020/, без да се отчита влиянието на съпротивителния момент от триене. За да се покаже влиянието на този нелинеен за системата елемент, ще бъде създаден **Simulink®** модел на двигателя с име **gm9236s020.mdl**, в който той ще бъде включен.

Simulink® модела е даден на **фиг.6.2**, а на **фиг.6.3** се виждат разликите в преходната функция, предизвикани от нелинейния съпротивителен момент от триене. При симулацията информацията за изчертаване на преходната функция се записва в двумерен вектор - ред с име 'h' и размерност $(n \times 2)$. Първият ред на вектора съдържа информация за времето, а втория за стойностите на функцията.

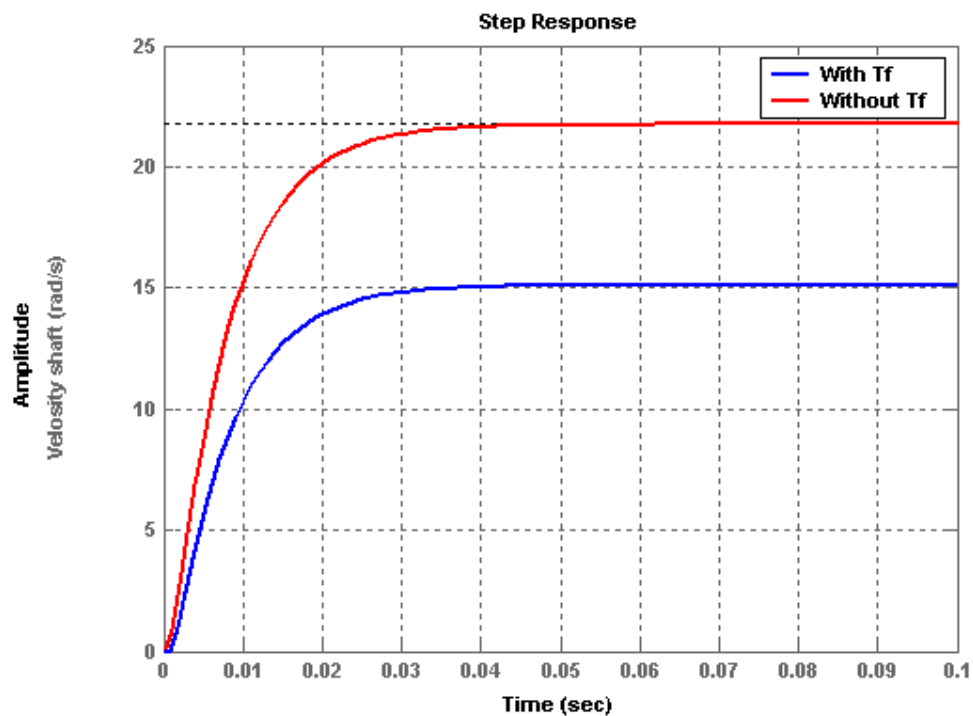


фиг.6.2 Нелинеен Simulink модел на двигател GM9236S020

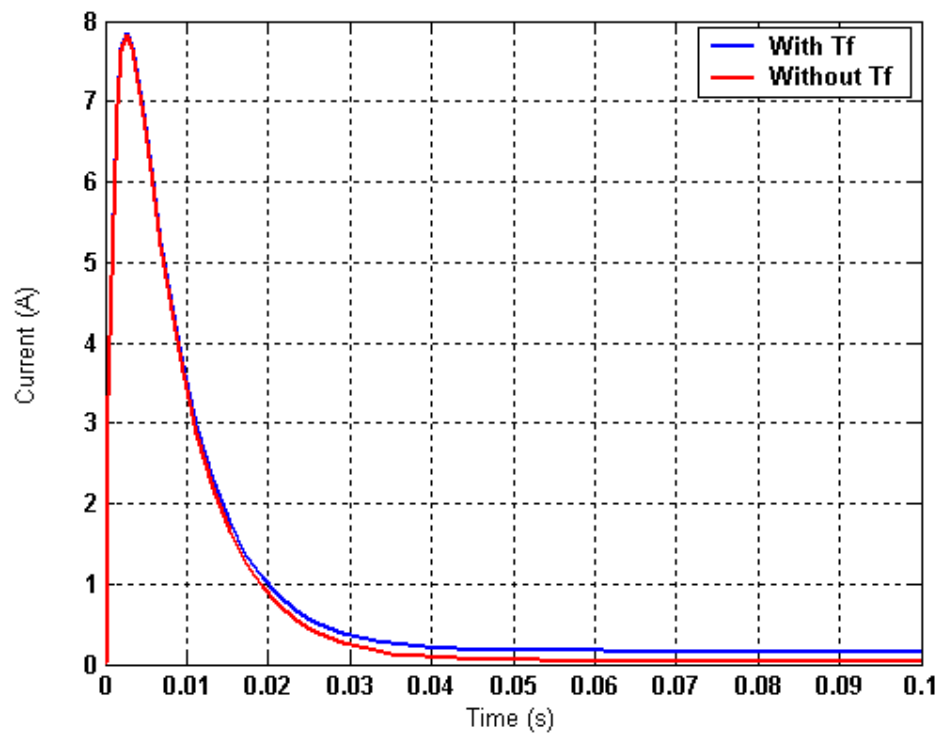
Командите за наслагване и сравнение на две ПФ, едната от които е снета от **Simulink®** модел са дадени във файл с име **sravnenie.m** Приложение 1:

Друг пример за влиянието, което оказва съпротивителния момент от триене, е даден на **фиг.6.4**. Там са снети диаграмите на тока в роторната намотка при подаване на номиналното захранващо напрежение на входа на двигателя, със и без отчитане на съпротивителния момент от триене.

Вижда се, че тук разликата се появява след приключване на преходния процес и се изразява главно в токовете на празен ток, които са съответно 0.1617A (от характеристиките на двигателя токът на празен ход е 0.16A) за модел с включен съпротивителен момент, и 0.0399A за модел, който не отчита този момент. Както се вижда от графиката, съпротивителният момент оказва голямо влияние върху модела и не може да бъде пренебрегнат.



фиг.6.3 Сравнение между преходните функции на модела със и без отчитане на T_f



фиг.6.4 Диаграми на тока в роторната намотка при подаване на номинално захранващо напрежение към модела със и без отчитане на T_f

Скоростта, която развива **Simulink®** модела на двигателя при номинално захранващо напрежение 24V преди редуктора е:

$$\omega_m = 515.2 \text{ rad/s}$$

и след редуктора:

$$\omega_{\text{Вала}} = \frac{\omega_m}{n} = \frac{515.2}{19.7} = 26.1523 \text{ rad/s}$$

От характеристиките на двигателя скоростта на празен ход е дадена като S_{nl} и при номинално захранващо напрежение 24V е 24.7rad/s.

6.1.2 Предавателна функция “напрежение-ъглова позиция” на модел на двигател за постоянен ток тип GM9236S020

Както беше показано в (5.32) предавателната функция на модела по отношение на ъгловата позиция на вала може да се получи лесно чрез умножаване на лявата и дясната част на предавателната функция по отношение на скоростта със оператора за интегриране 1/p. Новополучената предавателна функция е от трети ред:

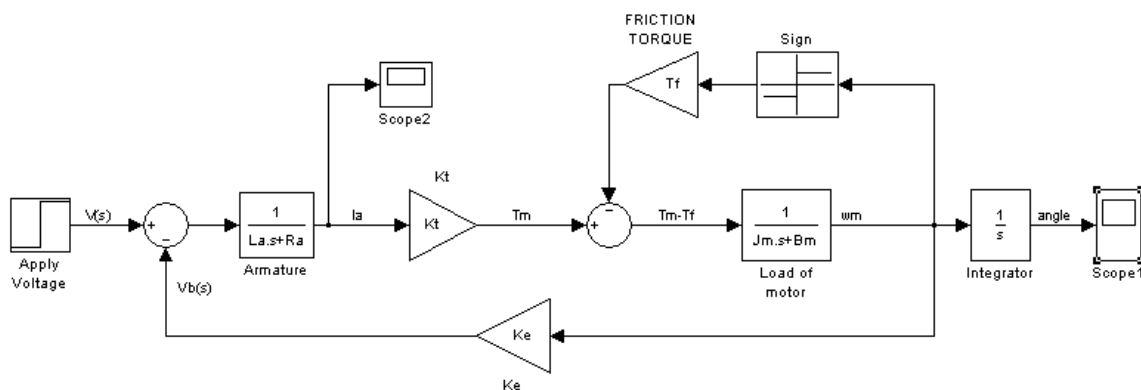
$$W_{\theta}(p) = \frac{\theta_m(p)}{V(p)} = \frac{K_T}{p((L_a J_m)p^2 + (B_m L_a + R_a J_m)p + (R_a B_m + K_E K_T))}$$

или заместена с реалните стойности на параметрите:

$$W_{\theta}(p) = \frac{\theta(p)}{V(p)} = \frac{0.0458}{1.867 \times 10^{-8} p^3 + 1.769 \times 10^{-5} p^2 + 2.106 \times 10^{-3} p}$$

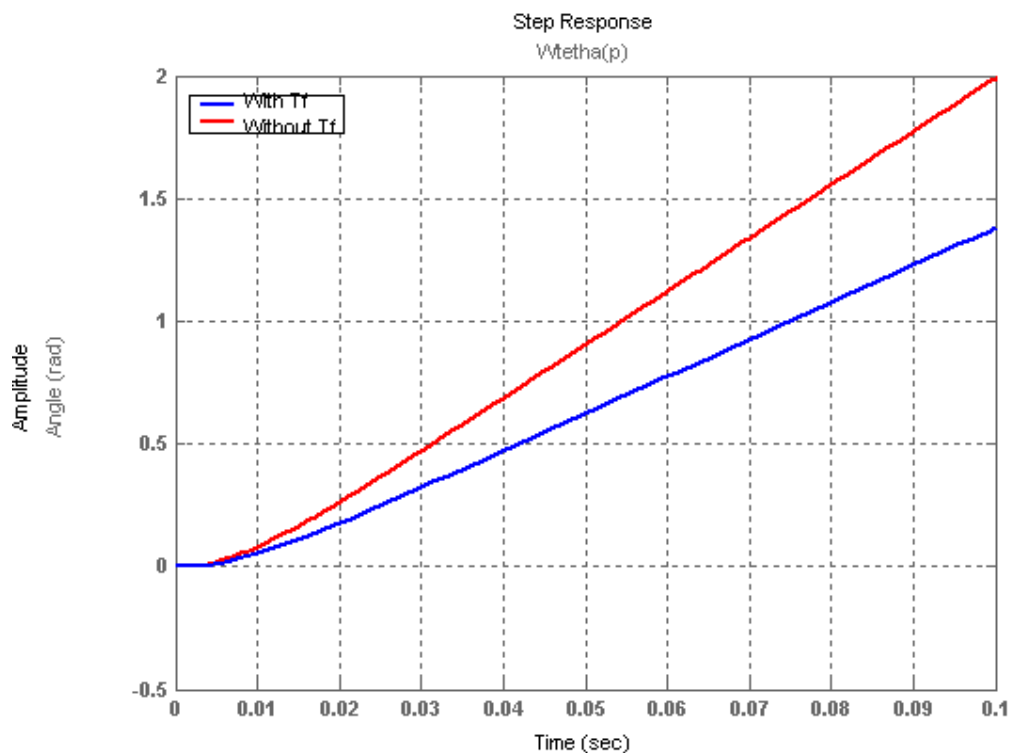
Спрягащата честота на модела “напрежение-ъглова позиция” е същата, като на модела “напрежение-ъглова скорост”

Simulink® модела с включен нелинеен съпротивителен момент от триене T_f е даден на **фиг.6.5**



фиг.6.5 Simulink модел “напрежение- ъглова позиция” на двигател тип GM9236S020

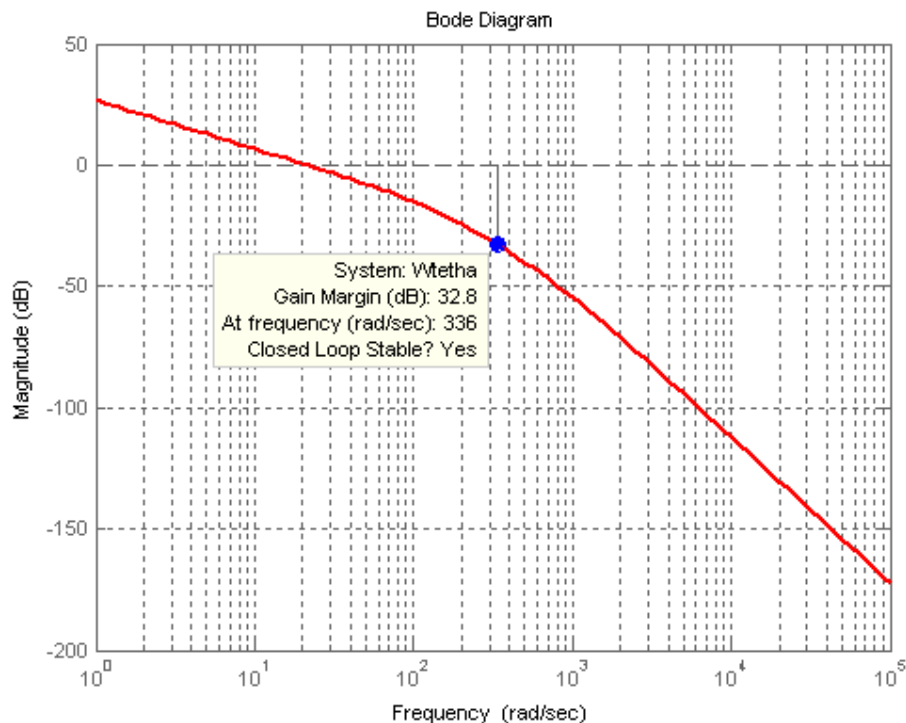
На **фиг.6.6** са дадени преходните функции на модели “напрежение-ъглова позиция”, отчитащи и неотчитащи влиянието на T_f .



фиг.6.6 Преходни функции на модели “напрежение-ъглова позиция” на двигател тип GM9236S020, отчитащи и неотчитащи влиянието на T_f

Както се вижда от **фиг.6.6** моделът на двигателя по отношение на позицията на вала работи като интегратор. Това е така, защото след приключване на преходните процеси, времетраенето на които е много малко, двигателят започва да “натрупва” ъгъл с постоянна скорост, т.е интегрира скоростта на въртене. Съпротивителният момент от триене T_f оказва влияние върху скоростта на въртене на вала на двигателя, а оттам и върху времеконстантата на интегриране на модела, който го описва.

ЛАЧХ на модел $W_\theta(p)$ “напрежение-ъглова позиция” са показани на **фиг.6.7**:



фиг.6.7 ЛАЧХ на модел “напрежение-ъглова позиция” на двигател тип GM9236S020

6.2 Предавателни функции на обекта за управление, включващи в себе си задвижваните и задвижващите системи

За да се изведат двете предавателни функции необходими за управлението на платформата по двата канала (азимут и елевация), е нужно да се знаят параметрите, с които тя се характеризира. Това са инерционните моменти около осите ѝ на въртене, съпротивителните ѝ моменти от триене и динамичните ѝ коефициенти на триене.

Параметрите на платформата по двата канала на управление са дадени в **Таблица 1**.

Режимите - “Scanning” и ”Tracking” са различни по същество. Схемите на свързване на управлението на платформата при двата режима са еднакви, но управляващите сигнали са различни.

Както се спомена в началото в режим “Scanning” азимутният канал трябва да се управлява по скорост. Това става чрез подаване на линейно изменящо се напрежение на входа на система за регулиране на позиция. В същия режим елевационният канал регулира позиция, но по канала на управляващото въздействие се подават константни стойности на напрежението, отговарящи на точно определени ъгли.

В режим "Tracking" и двата канала се управляват по позиция. На входа им се подават синусоидални напрежения с еднаква честота, но дефазирани един спрямо друг на 90 градуса.

Предавателните функции, които ще характеризират работата на системата по двата канала са:

- $W_{\theta_{az}}(p) = \frac{\theta_{az}(p)}{V(p)}$ - "напрежение-ъглова позиция на лъча по азимут"
- $W_{\theta_{el}}(p) = \frac{\theta_{el}(p)}{V(p)}$ - "напрежение-ъглова позиция на лъча по елевация"

Таблица 1

	Дименсия	По азимутен канал	По елевационен канал
Предавателно число* м/у ремъчната предавка и двигателя	-	$n_{az}=9$	$n_{el}=9$
Динамични коефициенти на триене на платформата около осите ѝ на въртене	$N \cdot m \cdot s$	$B_{az} \approx 0$	$B_{el} \approx 0$
Инерционни моменти* около осите на въртене на платформата	$Kg \cdot m^2$	$J_{az}=0.16$	$J_{el}=0.02$
Съпротивителни моменти които платформата оказва на задвижващата система	$N \cdot m$	$T_{az}=0.1$	$T_{el}=0.07$

*Инерционните моменти около осите на въртене на платформата включват и масата на антената

*Предавателните числа n_{az} и n_{el} се изчисляват, като се вземат предвид скоростите, които може да измерва жирокопа и скоростта която може да развие двигателя.

Двете предавателни числа се избират така, че скоростта на въртене след двигателя да бъде равна или малко по - голяма от обхвата на жирокопа.

За определянето на предавателните числа за намаляване оборотите на двигател тип GM9236S020 се получава:

$$n_{az} = n_{el} = \frac{\omega_{вала\max}}{\omega_{gyro\max}} = \frac{1416 \text{ deg/sec}}{150 \text{ deg/sec}} = 9.44 \approx 9, \quad \text{където } \omega_{вала\max} \text{ и}$$

$\omega_{gyro\max}$ са съответно максималната скорост на въртене на вала и максималната скорост, която може да измери жирокопа.

От характеристиките на двигателя

$$\omega_{вала\max} = 236 \text{ rpm} = 1416 \text{ deg/sec}$$

6.2.1 Предвателна функция на обекта по отношение азимутната позиция на лъча $W_{\theta_{az}}(p) = \frac{\theta_{az}(p)}{V(p)}$

Преди да се изведе предавателната функция на обекта за управление $W_{\theta_{az}}(p) = \frac{\theta_{az}(p)}{V(p)}$, е добре да се покаже и разгледа предавателната функция

по отношение на скоростта $W_{s_{az}}(p) = \frac{\omega_{az}(p)}{V(p)}$. Както беше показано в (5.32) преминаването от едната към другата предавателна функция е лесно.

За да се получат предавателните функции е необходимо да се приведат към оста на въртене на двигателя както инерционния момент J_{az} (инерционен момент на платформата около азимутната ос на въртене), така и съпротивителния момент от триене T_{az} (около същата ос). Тези привеждания стават по начина показан в (5.5) и (5.6), съответно за инерционните и съпротивителните моменти.

- Привеждане на инерционния момент на платформата към инерционния момент на двигателя

Общото предавателно число между двигателя и задвижваната система е:

$n = n_{az} \times n_g = 9 \times 19.7 = 177.3$, където n_g е предавателното число на редуктора на двигателя и се взима от характеристиките му, а n_{az} се взима от **Таблица 1**.

Ако J_{az} е инерционния момент на платформата, то приведения към двигателя момент се получава от (5.38):

$$J_{az\text{приведено}} = \frac{J_{az}}{n^2} = \frac{0.16}{177.3^2} = 5.09 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

За общия инерционен момент около оста на двигателя важи (5.40) :

$J_{az\ sum} = J_m + J_{az\ \text{прижедено}} = 1.219 \times 10^{-5} \text{ kgm}^2$, където J_m е инерционния момент на ротора.

- Привеждане на съпротивителните моменти на платформата към тези, действащи на оста на двигателя

Записва се общия коефициент на полезно действие на предавките:

$\eta_{np} = \eta_m \eta_{rem} = 0.9 \times 0.95 = 0.855$, където η_m е КПД на редуктора на мотора, а η_{rem} е КПД на ремъчната предавка. Тогава от (5.42) за приведения съпротивителен момент по азимутния канал се записва:

$$T_{azpr} = \frac{T_{az}}{\eta_{np} \frac{\omega_m}{\omega_{az}}} = \frac{T_{az}}{\eta_{np} n} = 6.597 \times 10^{-4} \text{ Nm}$$

Предавателната функция на системата по отношение на скоростта е:

$$W_{saz}(p) = \frac{\omega_{az}(p)}{V(p)} = \frac{K_T \frac{1}{n}}{(L_a J_{azsum}) p^2 + (B_m L_a + R_a J_{azsum}) p + (R_a B_m + K_E K_T)}$$

$$W_{saz}(p) = \frac{\omega_{az}(p)}{V(p)} = \frac{2.5832 \times 10^{-4}}{3.206 \times 10^{-8} p^2 + 3.036 \times 10^{-5} p + 0.002106}$$

Времеконстантите на системата (платформата) са:

$$\tau_{eaz} = \frac{-1}{p_{1az}} = 1.147 \text{ ms}; \tau_{maz} = \frac{-1}{p_{2az}} = 13.27 \text{ ms}, \text{ където } p_{1az}, p_{2az} \text{ са}$$

корените на характеристичното уравнение.

Коефициентът на затихване на системата е:

$$\xi_{az} = \frac{\tau_{maz} + \tau_{eaz}}{2\sqrt{\tau_{maz}\tau_{eaz}}} = 1.847$$

ξ е по-голям от единица ($\xi > 1$), което определя аperiодичния характер на преходната функция.

Спрягащата честота на системата е:

$$\omega_{caz} = \sqrt{\frac{1}{\tau_{maz}\tau_{eaz}}} = 256.32 \text{ rad/s}$$

По отношение на азимутната позиция предавателната функция е:

$$W_{\theta_{az}}(p) = \frac{\theta_{az}(p)}{V(p)} = \frac{2.5832 \times 10^{-4}}{3.206 \times 10^{-8} p^3 + 3.036 \times 10^{-5} p^2 + 0.002106 p}$$

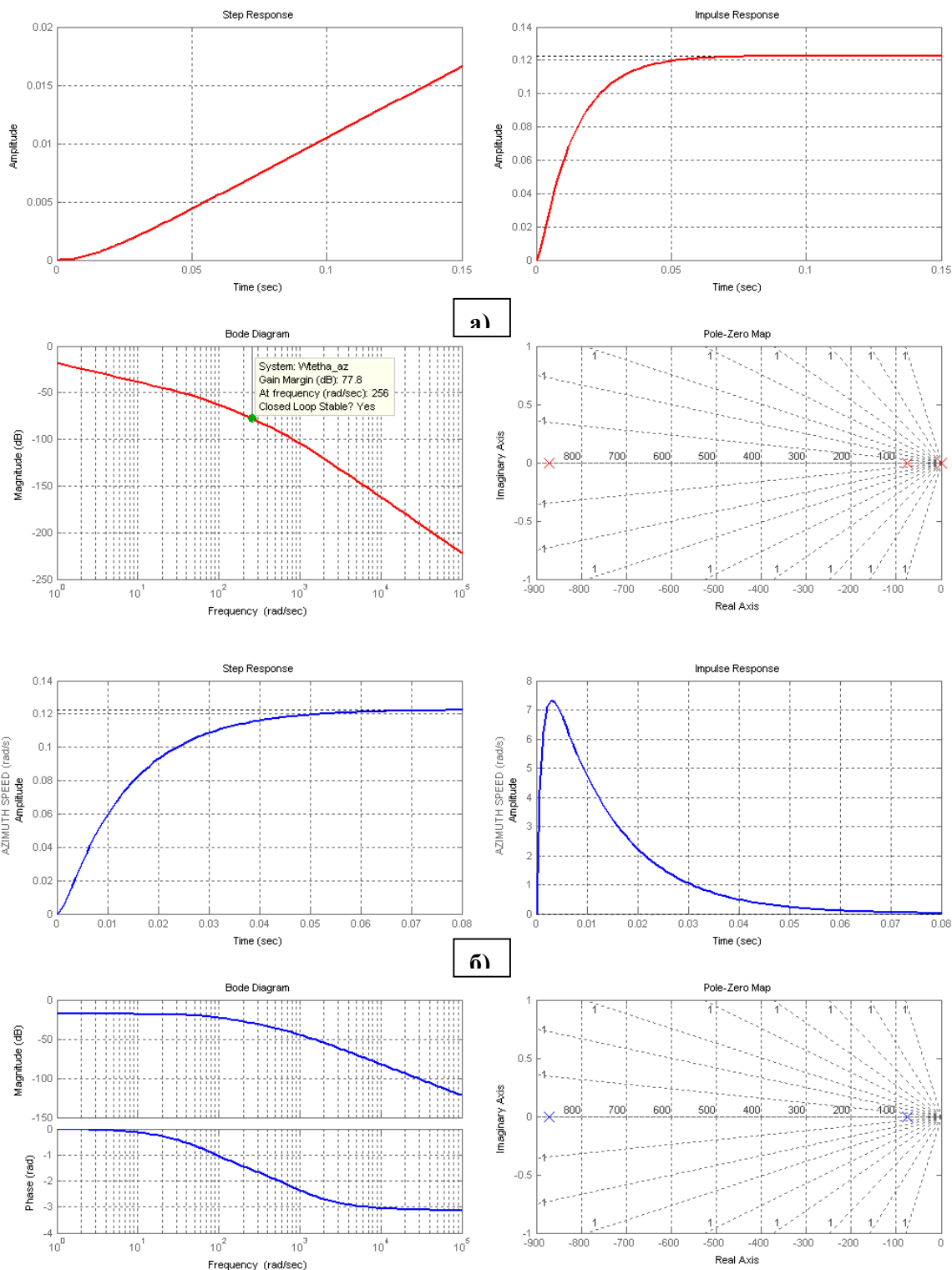
Допълнителният корен на характеристичното уравнение за предавателната функция по азимутна позиция е $p_{3_{az}} = 0$

Записана във времеконстантна форма предавателната функция на системата по отношение на азимутния ъгъл е:

$$W_{\theta_{az}}(p) = \frac{\frac{1}{K_E} \frac{1}{n}}{p(p\tau_{mol} + 1)(p\tau_{eol} + 1)} = \frac{0.1231}{p(13.27 \times 10^{-3} p + 1)(1.147 \times 10^{-3} p + 1)}$$

На **фиг 6.8** са показани характеристиките на двете системи **$W_{\theta_{az}}(p)$** и **$W_{saz}(p)$** .

За изчертаването им е използван **Control system toolbox-LTI Viewer [6]**

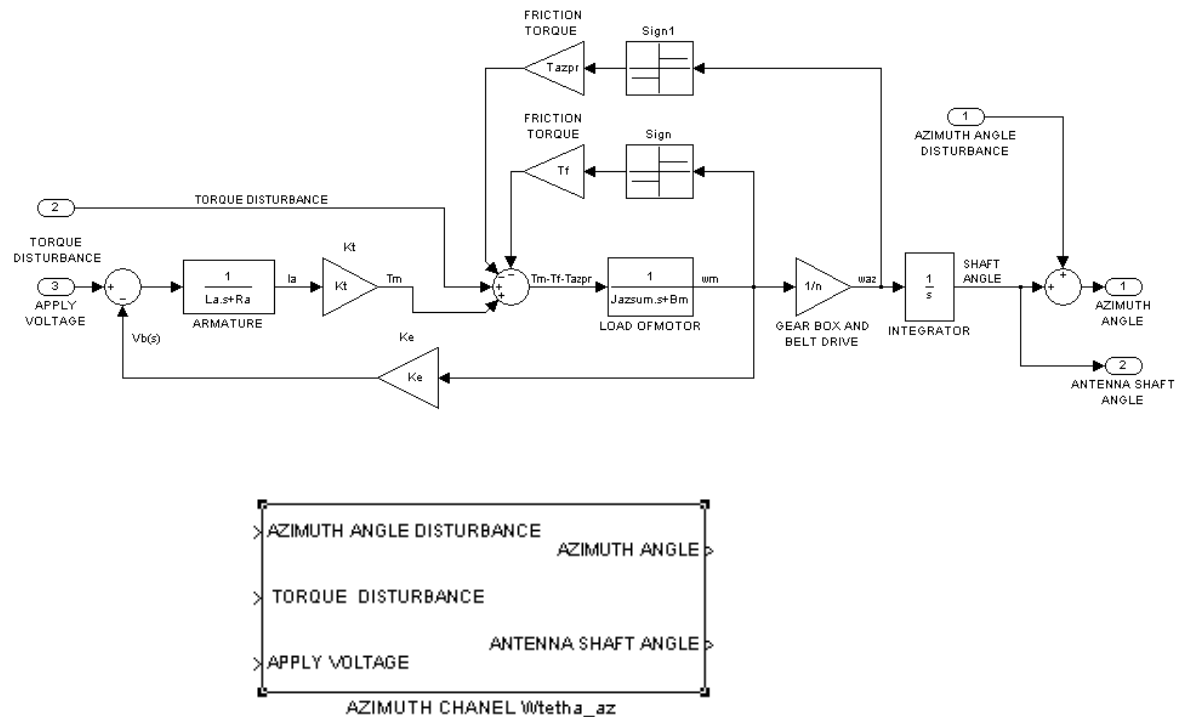


фиг.6.8 ПФ, ИПФ, ЛАЧХ, ФЧХ и полюсно-нулева диаграма на $W_{\theta az}(p)$ а) и $W_{saz}(p)$ б)

За включването на съпротивителните моменти от триене е необходимо да се създаде **Simulink®** модел на $W_{\theta az}(p)$. Той включва в себе си

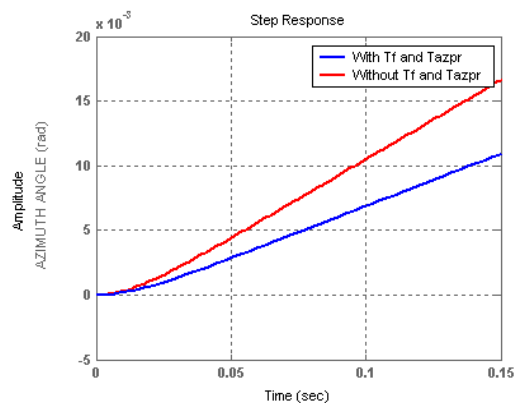
платформата със задвижването и отразява влиянието на съпротивителните моменти от триене.

Създават се два файла с имена **Wtetha_az.mdl** и **Wtetha_az_ss.mdl** , като във втория системата е изпълнена като **Subsystem** (подсистема) **фиг.6.9**



фиг.6.9 Subsystem модел Wtetha_az_ss.mdl на платформата със задвижването по азимутния канал $W_{\theta az}(p)$

Резултатите от симулацията на системата отчитаща T_f и T_{azpr} при единично стъпаловидно въздействие $u=1(t)$ са дадени на **фиг.6.10**



фиг.6.10 ПФ на моделите отчитащи и неотчитащи влиянието на съпротивителните моменти

6.2.2 Предавателна функция на обекта по отношение елевационната

позиция на лъча $W_{\theta_{el}}(p) = \frac{\theta_{el}(p)}{V(p)}$

Операциите по извеждането на предавателната функция по отношение елевационната позиция на лъча $W_{\theta_{el}}(p)$ са аналогични на показаните в (6.2.1)

Тук отново се правят същите изчисления необходими за привеждането на инерционните и съпротивителните моменти към оста на въртене на двигателя, задвижващ платформата с антената, само че отнасящи се за елевационния канал.

- Привеждане на инерционния момент на платформата към инерционния момент на двигателя

Общото предавателно число между двигателя и задвижваната система е същото като това по азимутния канал:

$n = n_{el} \times n_g = 9 \times 19.7 = 177.3$, където n_g е предавателното число на редуктора на двигателя и се взима от характеристиките му, а n_{el} се взима от **Таблица 1**.

За приведения към двигателя момент от (5.38) следва :

$$J_{el_{\text{приведено}}} = \frac{J_{el}}{n^2} = \frac{0.02}{177.3^2} = 6.3623 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2$$

За общия инерционен момент около оста на двигателя важи 5.40 :

$J_{el_{\text{sum}}} = J_m + J_{el_{\text{приведено}}} = 7.7362 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$, където J_m е инерционния момент на ротора.

- Привеждане на съпротивителните моменти на платформата към тези действащи на оста на двигателя

Общият коефициент на полезно действие на предавките е същия, като изведения в раздел (6.2.1):

Тогава за приведения съпротивителен момент по елевационния канал важи формула (5.42):

$$T_{elpr} = \frac{T_{el}}{\eta_{np} \frac{\omega_m}{\omega_{el}}} = \frac{T_{el}}{\eta_{np} n} = 4.6177 \times 10^{-4} \text{ Nm}$$

Предавателната функция по отношение на елевационната скорост на платформата

$$W_{sel}(p) = \frac{\omega_{el}(p)}{V(p)} = \frac{K_T \frac{1}{n}}{(L_a J_{elsum}) p^2 + (B_m L_a + R_a J_{elsum}) p + (R_a B_m + K_E K_T)}$$

заместена с конкретни стойности:

$$W_{sel}(p) = \frac{\omega_{el}(p)}{V(p)} = \frac{2.5832 \times 10^{-4}}{2.035 \times 10^{-8} p^2 + 1.927 \times 10^{-5} p + 0.002106}$$

Корените на характеристичното уравнение са:

$$p_{el_1} = -821.1463; p_{el_2} = -126.074$$

Коефициента на затихване на системата по канала на елевацията е:

$$\xi_{el} = \frac{\tau_{mel} + \tau_{eel}}{2\sqrt{\tau_{mel}\tau_{eel}}} = 1.472$$

ξ е по-голям от единица ($\xi > 1$) и определя апериодичния характер на преходната функция:

Спрягащата честота на системата по канала на елевацията е:

$$\omega_{cel} = \sqrt{\frac{1}{\tau_{mel}\tau_{eel}}} = 321.75 \text{ rad/s}$$

За електрическата и механична времеконстанта на платформата по елевационен канал получаваме:

$$\tau_{eel} = \frac{-1}{p_{1el}} = 1.2 \text{ ms}; \tau_{mel} = \frac{-1}{p_{2el}} = 7.9 \text{ ms}$$

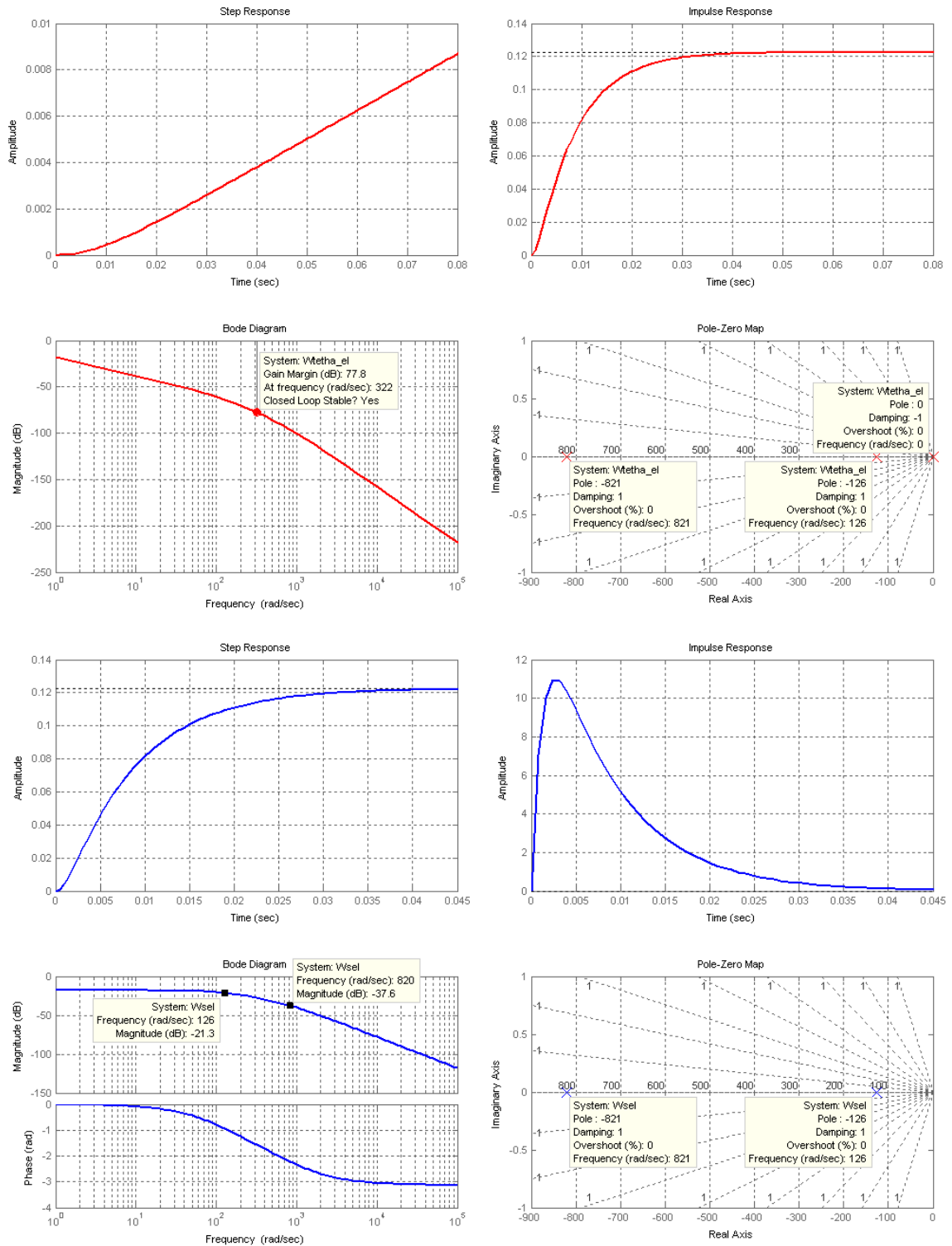
По отношение на позицията предавателната функция е:

$$W_{\theta_{el}}(p) = \frac{\theta_{el}(p)}{V(p)} = \frac{2.5832 \times 10^{-4}}{2.035 \times 10^{-8} p^3 + 1.927 \times 10^{-5} p^2 + 0.002106 p}$$

Предавателната й функция във времеконстантна форма е:

$$W_{\theta_{el}}(p) = \frac{\frac{1}{K_E} \frac{1}{n}}{p(p\tau_{mel} + 1)(p\tau_{eel} + 1)} = \frac{0.1231}{p(7.931 \times 10^{-3} p + 1)(1.218 \times 10^{-3} p + 1)}$$

Характеристиките на двете предавателни функции са снети на **фиг.6.11**



фиг.6.11 ПФ, ИПФ, ЛАЧХ, ФЧХ и полюсно-нулева диаграма на $W_{\theta el}(p)$ а) и $W_{sel}(p)$ б)

6.3 Определяне на предавателните функции на затворените системи по отношение на азимутната и елевационната позиция на лъча .

За да се управлява позицията на лъча на антената от електродвигатели е необходимо те да са обхванати от отрицателна обратна връзка (ООВ) по позиция. За реализирането на тази ООВ тук ще се използват интегрални сензори на ъглова скорост iMEMS тип ADXRS150, принципът на действие на които бе разгледан в раздел (4).

Тук ще бъдат разгледани някои важни за изграждането на затворената система аспекти.

- Особености свързани с изграждането на ООВ.

При изграждането на ООВ трябва да се уточни, че точката, от която тя се взима трябва да е ъгловата позиция на лъча (азимутен или елевационен). Проблемът, който възниква е, че този тип датчици отчитат ъглова скорост, а не ъглова позиция.

Акуратното построяване на модела налага да се постави диференциращо звено между точката от която се взима ООВ и входа на жироскопа. По този начин диференцирайки ъгловата позиция на антената се получава ъгловата ѝ скорост, която жирокопът вече може да измери. След като ъгловата скорост на тялото бъде измерена се налага сигналът, носещ информацията за тази скорост да бъде интегриран. В резултат от интегрирането на сигнала, носещ информацията за ъгловата скорост, се получава напрежение пропорционално на актуалната ъглова позиция на лъча.

Другата особеност, която трябва да се вземе под внимание при изграждането на ООВ е отново свързана с жироскопа. Неговото захранващо напрежение от +5V налага началната му работна точка (нулата) да е изместена в средата на работния му обхват, т.е на 2.5V. По този начин жирокопът може да измерва скорости, както по посока на часовниковата стрелка, така ѝ обратни на нея. Началната работна точка на сензора налага преди интегратора да се извади същото напрежение, но с обратен знак. По този начин интегратора започва да интегрира сигналите от нулата на захранващото напрежение, съответно в положителна или отрицателна посока. Прибавянето и изваждането на 2.5V не се отразява върху предавателната функция на модела, затова и не е необходимо да се включва при симулацията на системата. Казаното по горе има за цел да се представят по точно характерните особености на жироскопа.

Не бива да се забравя, че коефициента на предаване на жироскопа е даден в $\text{mV}/^\circ/\text{sec}$, а схемата направена дотук изчислява стойностите в радиани. Това налага коефициента на предаване на жироскопа да се преобразува в $\text{mV}/\text{rad}/\text{sec}$.

- Особенности на отворената система

Отворената система се състои от предавателна функция реализираща PID закон за управление, усилвател на мощност захранващ двигателя за постоянен ток и предавателната функция на обекта (по азимут или по елевация).

Захранващото напрежение на двигателя е 0-24V а това на PID регулатора се приема за $\pm 5V$. Ограниченията в нивата на захранващите напрежения налагат поставянето на блок за насищане в **Simulink®** модела, който се поставя непосредствено след регулатора.

Следващото ограничение идва по елевационния канал и се състои в това, че движението на платформата (по този канал) е в определени граници, идващи от конструктивните особености на платформата. Тези граници ограничават движението на лъча на антената в интервала 15-75 градуса .

6.3.1 Структура на затворената система по азимутния канал

Преди затворената система да бъде разгледана като нелинейна структура за управление ще бъде даден вида на предавателните функции на отворената и затворената система с допускането, че нелинейностите се пренебрегват:

- Предавателната функция на отворената система с вход напрежение и изход азимутна позиция на лъча е:

$$W_{OLU_AZ}(p) = W_{PIDaz}(p) * K_{amp} * W_{\theta_{az}}(p)$$

- Предавателната функция на затворената система с вход напрежение и изход азимутна позиция на лъча е:

$$W_{CLU_AZ}(p) = \frac{W_{PIDaz}(p) * K_{amp} * W_{\theta_{az}}(p)}{1 + W_{OOB}(p) * W_{PIDaz}(p) * K_{amp} * W_{\theta_{az}}(p)}$$

- Предавателната функция на отворената система с вход ъглово задание и изход азимутна позиция на лъча е:

$$W_{OLAZ_AZ}(p) = K_{gyro} * W_{OLU_AZ}(p)$$

- Предавателната функция на затворената система с вход ъглово задание и изход азимутна позиция на лъча е:

$$W_{CLAZ_AZ}(p) = K_{gyro} * W_{CLU_AZ}(p)$$

Използваните означения са:

- $W_{oob}(p)$ е предавателната функция в ООВ на системата:

$$W_{OOb}(p) = p \frac{1}{p} W_{GYRO}(p) = W_{GYRO}(p) = \frac{0.7162}{0.025p + 1}$$

- предавателна функция $W_{PIDaz}(p)$, реализира реален PID регулатор с независима настройка :

$$W_{PIDaz}(p) = k_{paz} + \frac{1}{T_{iaz}p} + \frac{T_{daz}}{0.05T_{daz}p + 1}$$

$$W_{PIDaz}(p) = \frac{T_{iaz}T_{daz}(0.05k_{paz} + 1)p^2 + (k_{paz}T_{iaz} + 0.05T_{daz})p + 1}{0.05T_{iaz}T_{daz}p^2 + T_{iaz}p}$$

- коефициентът на усилване по напрежение на усилвателя на мощност захранващ ДПТ е:

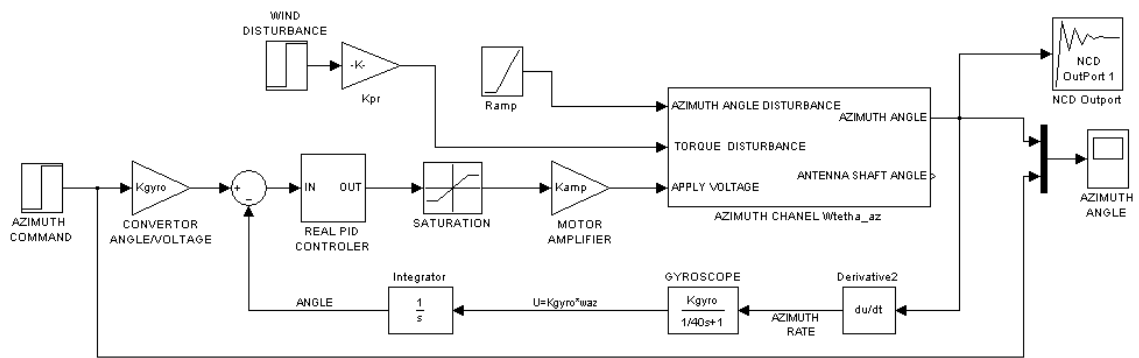
$$K_{amp} = \frac{24}{5} = 4.8$$

Този коефициент се изчислява, като се вземат предвид ограниченията в захранването на PID регулатора, които са $\pm 5V$ и номиналното захранващо напрежение на ДПТ 24V. По такъв начин когато сигнала от PID регулатора достигне своето ограничение на ДПТ се подава номиналното захранващо напрежение, което е +24V или -24V в зависимост от посоката в която се трябва да се завърти.

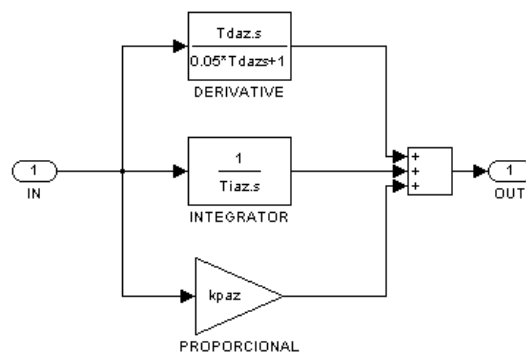
Наличието на нелинейности от тип насищане, както и сигнум (sign) функциите включени в обратните връзки на двигателите правят системата силно нелинейна.

Структурата на затворената система с включени в нея нелинейности е показана на **Simulink®** модела от **фиг.6.12**. За създаването на затворената система е използван създадения по рано **Subsystem** (подсистема) модел **Wtetha_az_ss.mdl**.

В **Приложение 3** е дадена разгънатата схема на системата записана като файл с име **Wtetha_az.mdl**



а)



б)

фиг.6.12 Simulink модел на затворената система по канала на азимута Wtetha_az_ss.mdl а) и модела реализиращ блока реалния PID регулатор б).

Нелинейностите в системата налагат настройките на PID регулатора да се извършват с помощта на множество симулации в **Simulink®**, до постигането на приемлив преходен процес.

След като се намерят приблизителните настройки може да се извърши оптимизация на коефициентите на регулатора. Това се прави в специална подпрограма на **Simulink®**, която е предназначена за настройка на системи с функционални ограничения **NCD(Nonlinear Control Design)** [6]. Този блок за настройка се намира в **Simulink library\NCD Blockset\NCD Outport**.

Като входни параметри за оптимизация се задават коефициентите за настройка на регулаторите. Останалите задания се отнасят за качеството на преходния процес при единично стъпаловидно въздействие (време за установяване, пререгулиране, време за нарастване на ПФ и др). В **NCD Outport** има възможност, в системата да бъдат отчетени и коефициенти с известна неопределеност, която е зададени чрез ограничения.

Задачата е да се определят следните параметри на регулатора:

- коефициента на усилване на регулатора k_{paz}
- времеконстантата на интегриране T_{iaz}
- времеконстантата на диференциране T_{daz}

Стойностите на параметрите за които се получава приемлив преходен процес на затворената система са:

$$k_{paz}=25; \quad T_{iaz}=3; \quad T_{daz}=0.3;$$

След оптимизационната процедура извършена в **NCD Output** получаваме крайните стойности на параметрите на регулатора:

$$k_{paz}=39; \quad T_{iaz}=6; \quad T_{daz}=0.515;$$

Предавателната функция на реалният PID регулатор включен в азимутния канал, заместен с крайните настройки е:

$$W_{PIDaz}(p) = \frac{9.116p^2 + 234p + 1}{0.1545p^2 + 6p}$$

На **фиг.6.13** са сравнени преходните функции на затворената нелинейна система получени съответно за двете настройки на регулатора. Вижда се, че макар и с малко, времето за установяване на системата с оптимизирани параметри на регулатора намалява в сравнение с началните му настройки.

Линейните предавателни функции, които се получават при заместването:

$$k_{paz}=39; T_{iaz}=6; T_{daz}=0.515 \text{ са:}$$

Предавателна функция на линейната отворена система $W_{OLU_AZ}(p)$

$$W_{OLU_AZ}(p) = \frac{11.3 \times 10^{-3} p^2 + 0.2902p + 12.4 \times 10^{-4}}{p^2(4.953 \times 10^{-9} p^3 + 4.883 \times 10^{-6} p^2 + 5.076 \times 10^{-4} p + 0.01264)}$$

Предавателна функция на линейната затворена система $W_{CLU_AZ}(p)$

$$W_{CLU_AZ} = \frac{2.826 \times 10^{-4} p^3 + 0.01856p^2 + 0.2902p + 0.00124}{1.24 \times 10^{-10} p^6 + 1.27 \times 10^{-7} p^5 + 1.76 \times 10^{-5} p^4 + 8.24 \times 10^{-4} p^3 + 0.021p^2 + 0.21p + 8.9 \times 10^{-4}}$$

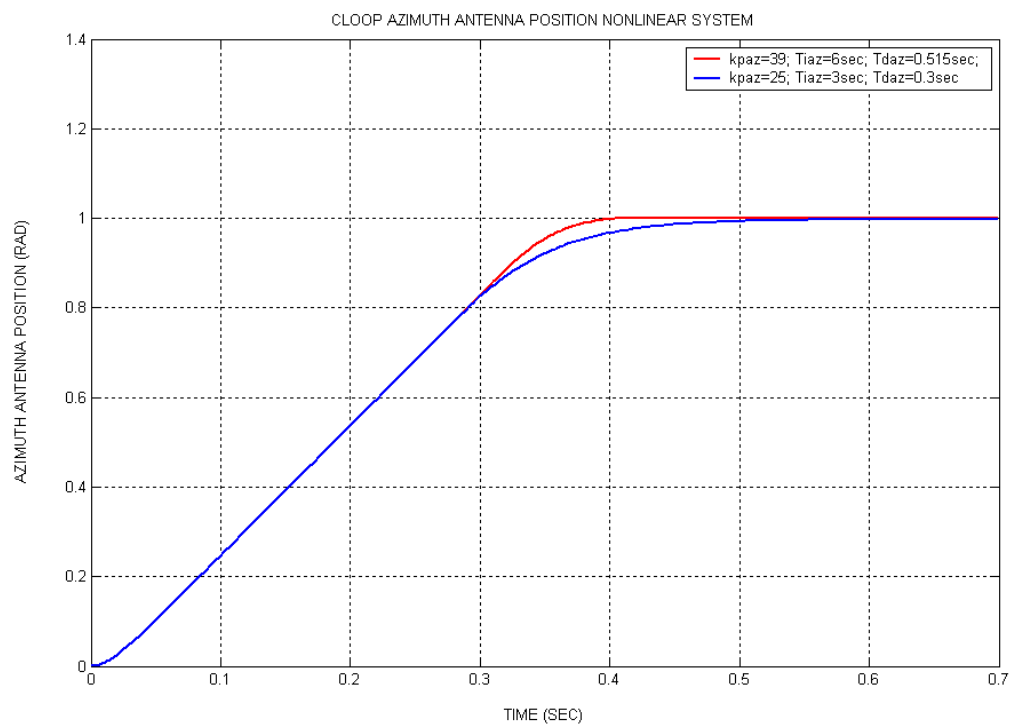
Предавателна функция на линейната отворена система $W_{OLAZ_AZ}(p)$

$$W_{OLAZ_AZ}(p) = \frac{8.095 \times 10^{-3} p^2 + 0.2078p + 8.88 \times 10^{-4}}{p^2(4.953 \times 10^{-9} p^3 + 4.883 \times 10^{-6} p^2 + 5.076 \times 10^{-4} p + 0.01264)}$$

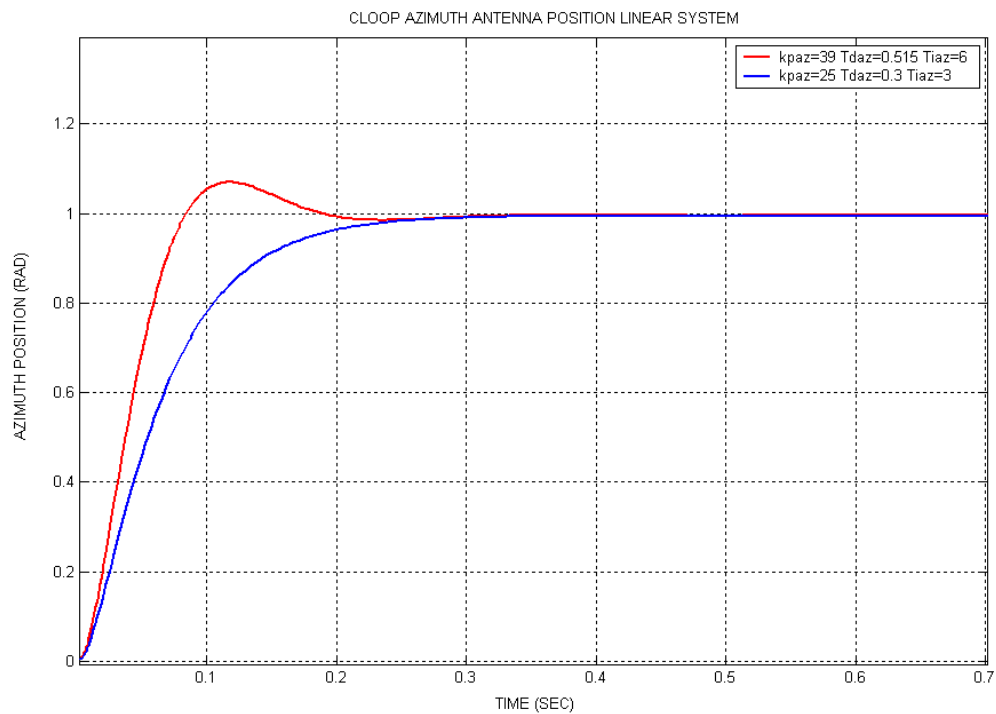
Предавателна функция на линейната затворена система $W_{CLAZ_AZ}(p)$

$$W_{CLAZ_AZ} = \frac{2.024 \times 10^{-4} p^3 + 0.01329p^2 + 0.2078p + 0.000888}{1.24 \times 10^{-10} p^6 + 1.27 \times 10^{-7} p^5 + 1.76 \times 10^{-5} p^4 + 8.24 \times 10^{-4} p^3 + 0.021p^2 + 0.21p + 8.9 \times 10^{-4}}$$

На **фиг.6.14** са показани ПФ на линейната затворена система $W_{CLAZ_AZ}(p)$ за двете настройки на PID регулатора. От **фиг.6.13** и **фиг.6.14** могат да се видят разликите в ПФ-ии на линейна и нелинейна система за едни и същи настройки на регулатора.



6.13 ПФ на затворената нелинейна система по азимутния канал в зависимост от настройките на PID регулатора



6.14 ПФ на затворената линейна система по азимутния канал в зависимост от настройките на PID регулатора получени за нелинейната система.

На затворената система по канала на азимута действат два вида смущаващи въздействия. Основното смущение, което внася грешка в зададения азимутен ъгъл на излъчване, е свързано с ротацията на движещото се тяло.

Второто смущение внася по косвен път грешка в ъгъла на излъчване. Нарича се смущение от съпротивителен момент. Причинява се от въртящия момент, възникващ от силата (натиска), която вятърът упражнява върху повърхността на антената и действа през преводното число K_{pr} върху оста на въртене на двигателя. Преводното число K_{pr} служи за привеждане на съпротивителния момент, действащ върху оста на въртене на антената, към този, действащ към оста на въртене на двигателя. Изчисляването на K_{pr} се основа на формула (5.42):

$$K_{pr} = \frac{1}{\eta_{np} n} = 0.0066 \quad , \text{ тогава за приведения към оста на двигателя}$$

вятъщ момент (причинен от вятър) се получава:

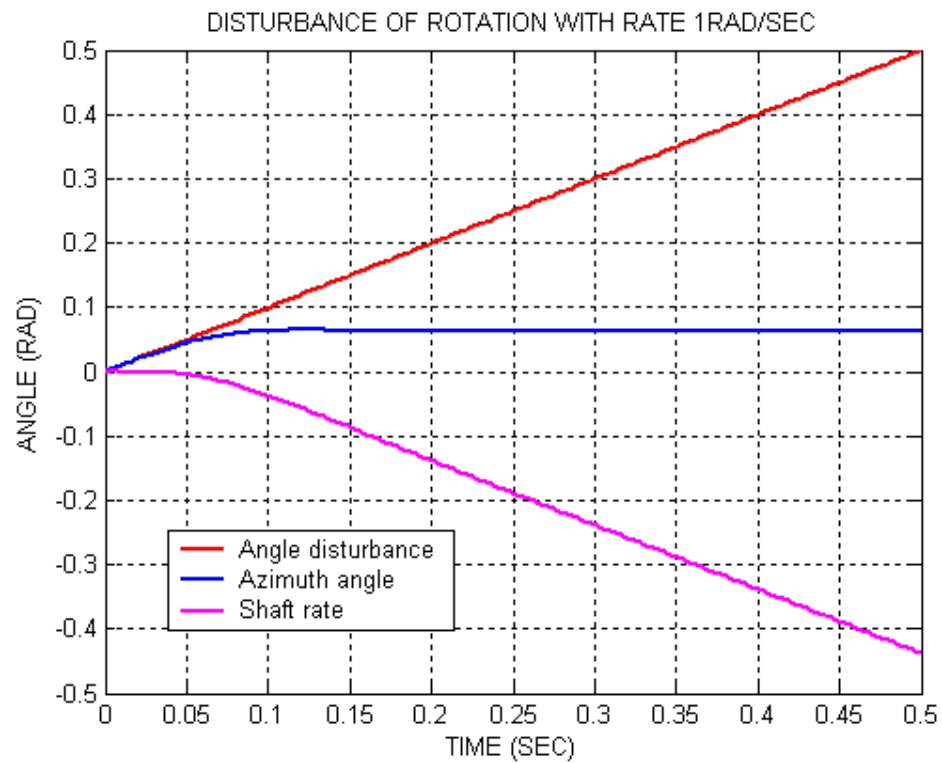
$$T_{WIND_{pr}} = T_{WIND} \times K_{pr}$$

Реакцията на системата при прилагане на входно смущение в резултат на ротация на тялото със скорост **1rad/sec** е дадена на **фиг.6.15** . Смущението е генерирано с помощта на блок **Ramp** в **Simulink®** и имитира въртене в кръг.

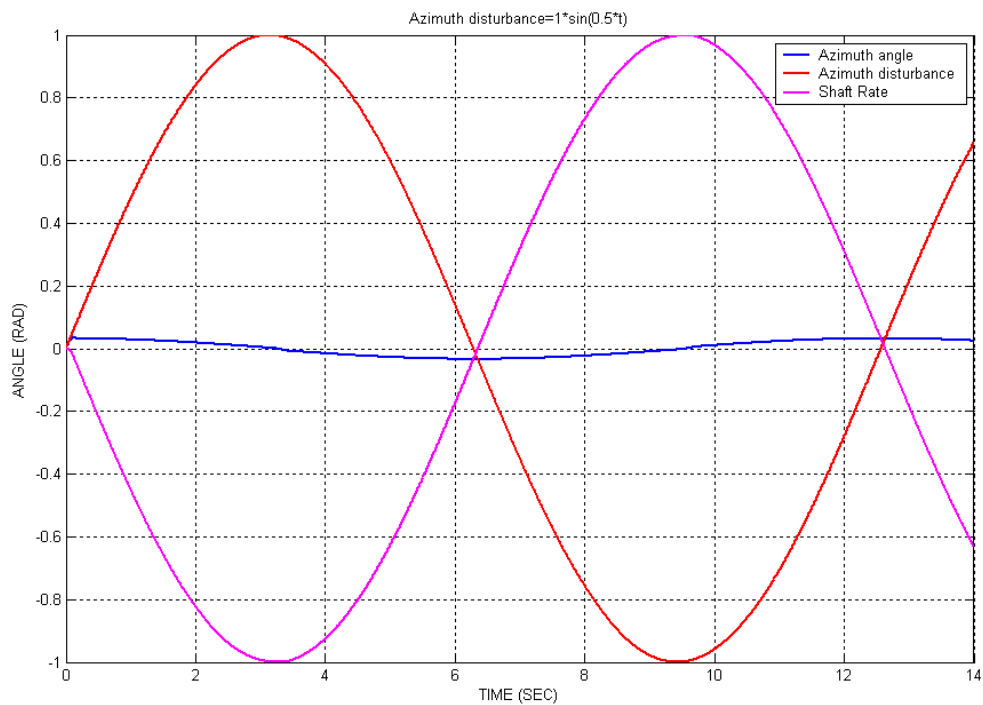
На фигурата с червен цвят е отбелязано ъгловото смущение от ротация със скорост **1rad/sec**. С лилаво е отбелязана ъгловата позиция на вала на антената, а със син цвят е отбелязан актуалния азимутен ъгъл на излъчване. Ясно се вижда как системата компенсира завъртането на тялото, задвижвайки двигателя в посока обратна на посоката на ротация.

Реакцията на системата при подаване на синусоидален сигнал с честота на повторение **0.5rad/sec** и ъглова амплитуда **1rad** по канала на азимутното смущение е показана на **фиг.6.16**.

Както се вижда от **фиг.6.16** системата генерира компенсиращ сигнал по ъгъл, който е дефазиран спрямо смущаващото въздействие приблизително на **180°**. Изоставането по фаза се дължи на инерционността на двигателя. Амплитудата, с която изходният сигнал (азимутната позиция на лъча) се колебае около заданието, е пропорционална на фазовата разлика между сигнала на смущението и компенсиращия сигнал.

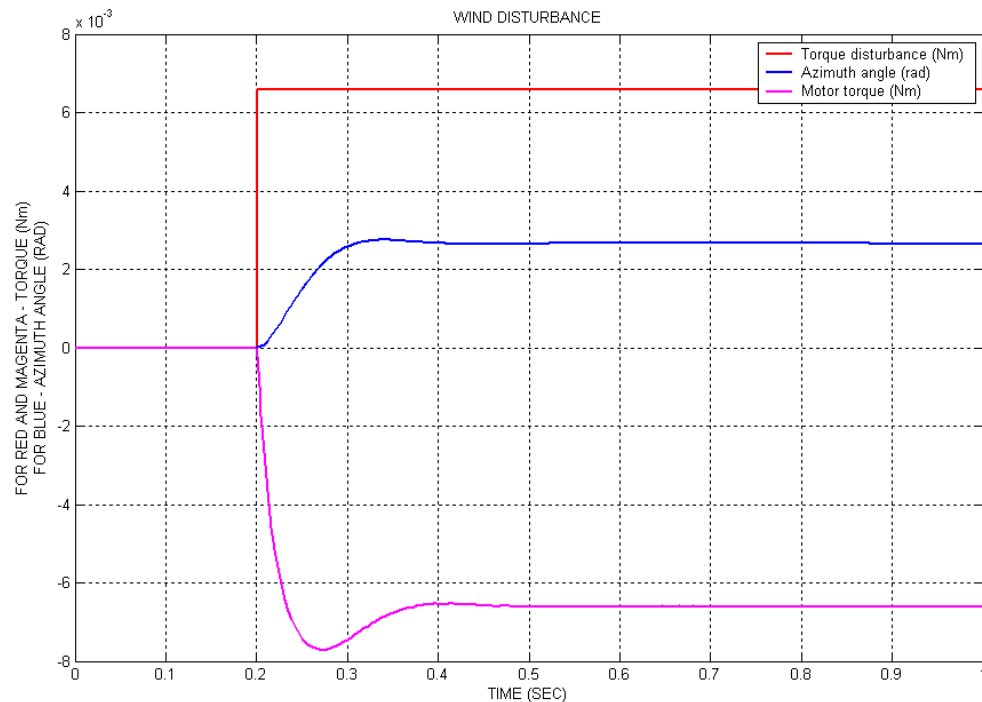


фиг.6.15 Реакция на системата при прилагане на смущение в резултат от ротация със скорост 1/rad/sec



фиг.6.16 Реакция на системата при синусоидално смущение с честота 0.5rad/sec и амплитуда 1rad

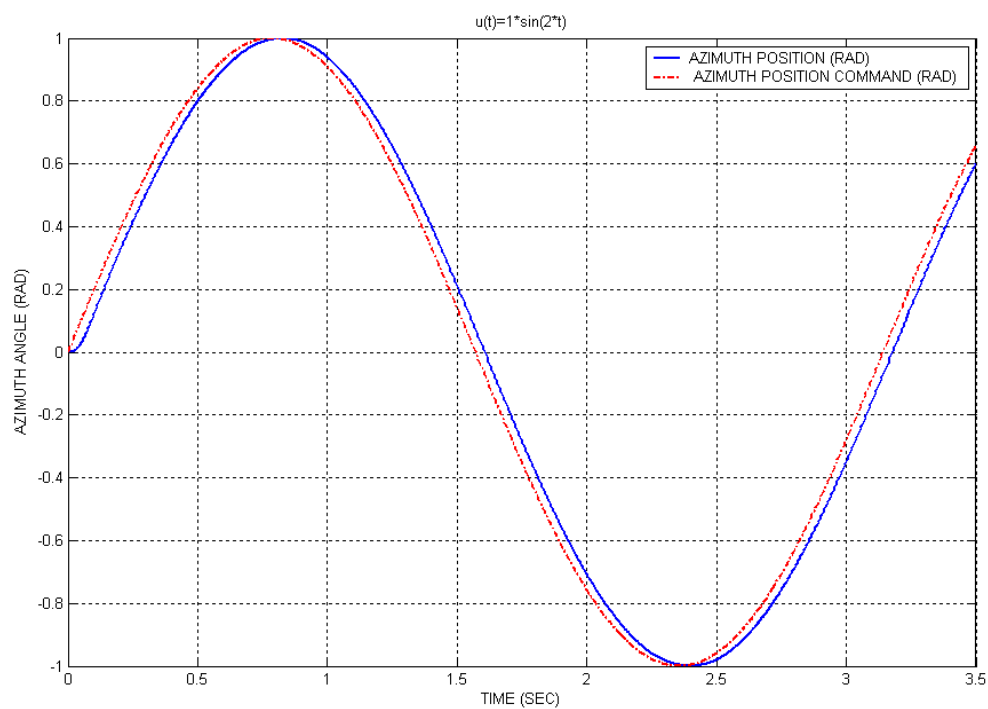
Реакцията на системата при смущение по канала на съпротивителните моменти (ъглово смущение причинено от вятър) е показана на **фиг.6.17** . Големината на смущението приложено към оста на въртене на антената е **1Nm**. Сравнението се прави между смущаващия момент, приведен към оста на двигателя и генерирания от двигателя момент. Показано е и изместването от зададения азимутен ъгъл на излъчване вследствие от натиска на вятъра.



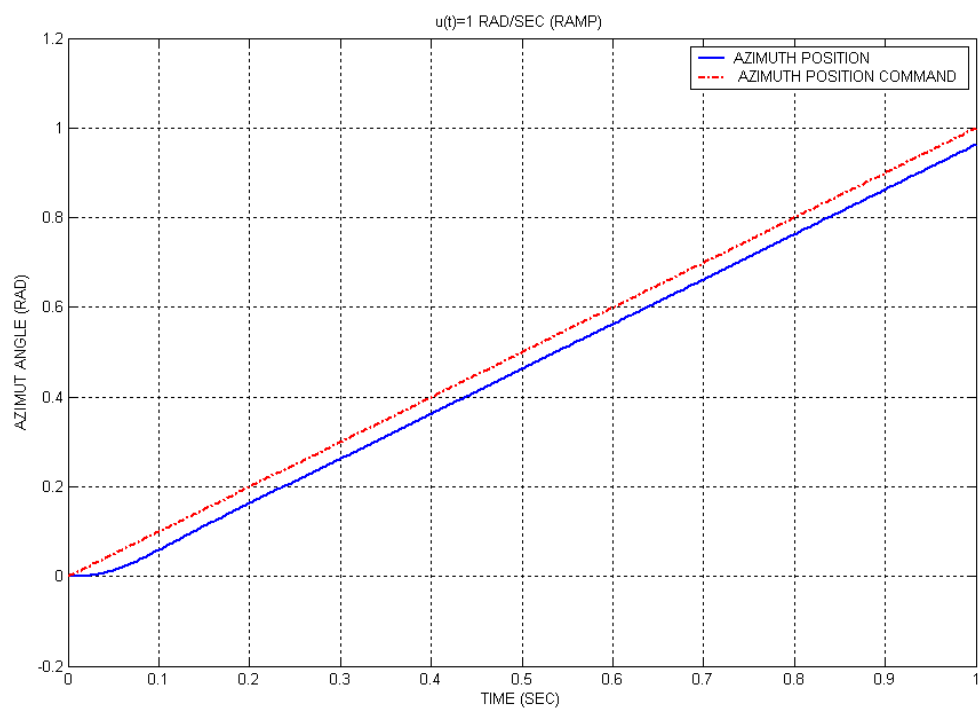
фиг.6.17 Смущение от съпротивителен момент с големина 1Nm, действащ спрямо оста на въртене на антената

По канала на заданието ще се покаже реакцията на системата при синусоидално и линейно изменящо се входно задание. На **фиг.6.18** е показана реакцията на системата при синусоидално входно въздействие с амплитуда **1rad** и честота на повторение **2rad/sec**. Вижда се изоставането на изхода спрямо входа, дължащо се на инерционността на системата.

При подаване на линейно изменящ се сигнал на входа на системата, изходът се променя със същата скорост, но с известно времезакъснение. Това свойство се използва за регулиране скоростта на въртене на лъча, когато системата работи в режим “Scanning”. Наклона на линейното напрежение определя скоростта на въртене на платформата. На **фиг.6.19** е даден изхода на системата при линейно изменящо се входно въздействие със скорост на изменение **1rad/sec**.



фиг.6.18 Реакция на системата при синусодално входно въздействие с амплитуда 1rad и честота 2rad/sec

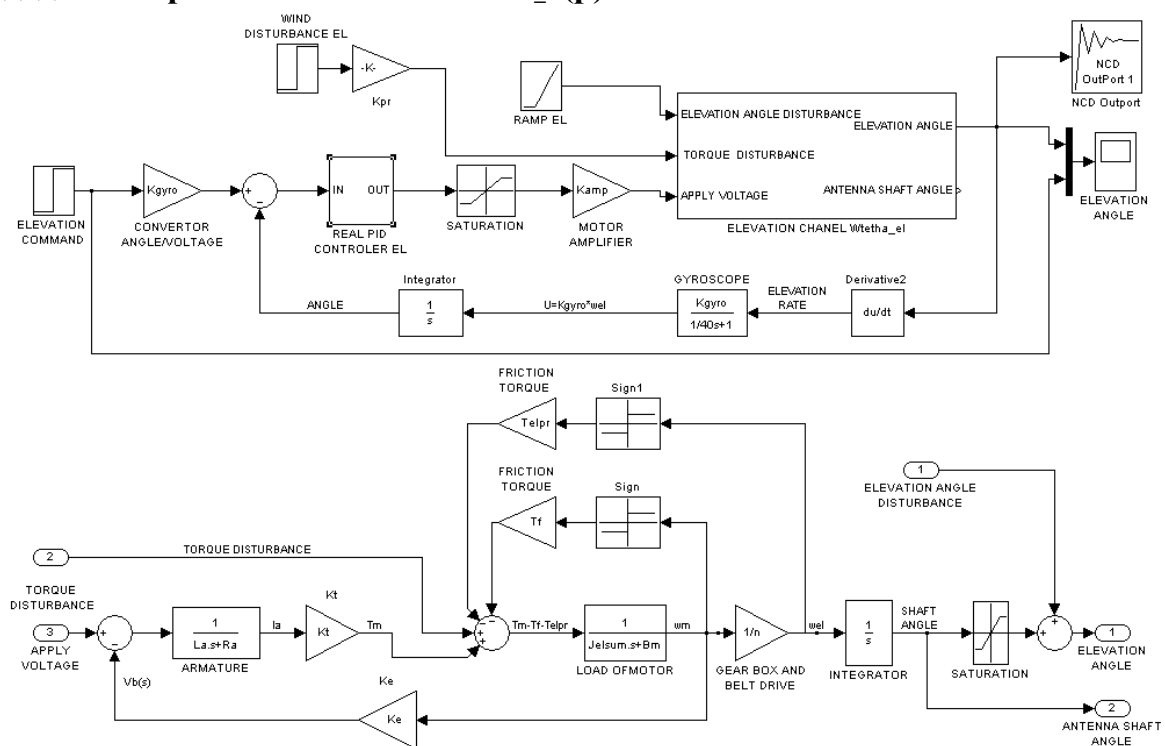


фиг.6.19 Реакция на системата при линейноизменящо се входно въздействие със скорост на изменение 1rad/sec

6.3.2 Структура на затворената система по елевационния канал

Структурата на затворената система по канала на елевацията не се различава съществено от тази по канала на азимута. Тя също има нелинеен характер и единствената разлика между двете системи е, че елевационният канал има конструктивно ограничение, стесняващо границите на излъчване (приемане) в интервала $15\text{-}75^\circ$. Реакциите на затворената система по всички канали (по управление и смущение), получени при симулация, чрез прилагане на различни по форма изпитателни сигнали не се различават много от тези, получени при изследването на (6.3.1). Реакциите на системата по канала на елевацията се отличават с малко по-голямо бързодействие от тези по азимутния канал. Това се дължи на по-малката инерционност на платформата по този канал. По тази причина е излишно да се повтарят всички типове графики от (6.3.1) и ще бъдат дадени само най-основните от тях.

На **фиг.6.20** е даден нелинейния **Simulink®** модел на затворения канал по отношение на елевацията. Развитата **Simulink®** схема (не като подмодел) е дадена в **Приложение 3** като **W_{tetha_el}(p)**



фиг.6.20 Simulink® модел на нелинейната затворената система по канала на елевацията **W_{tetha_el}(p)**

Настройките на регулатора се правят по отношение на елевационния динамичен канал $W_{\theta_{el}}(p) = \frac{\theta_{el}(p)}{V(p)}$, даващ връзката между подадената елевационна команда във вид на напрежение, пропорционално на ъгъл.

Получените коефициенти за PID регулатора при настройката на нелинейната система са:

$$k_{pel}=40; \quad T_{iel}=5 \text{ s}; \quad T_{del}=0.38 \text{ s};$$

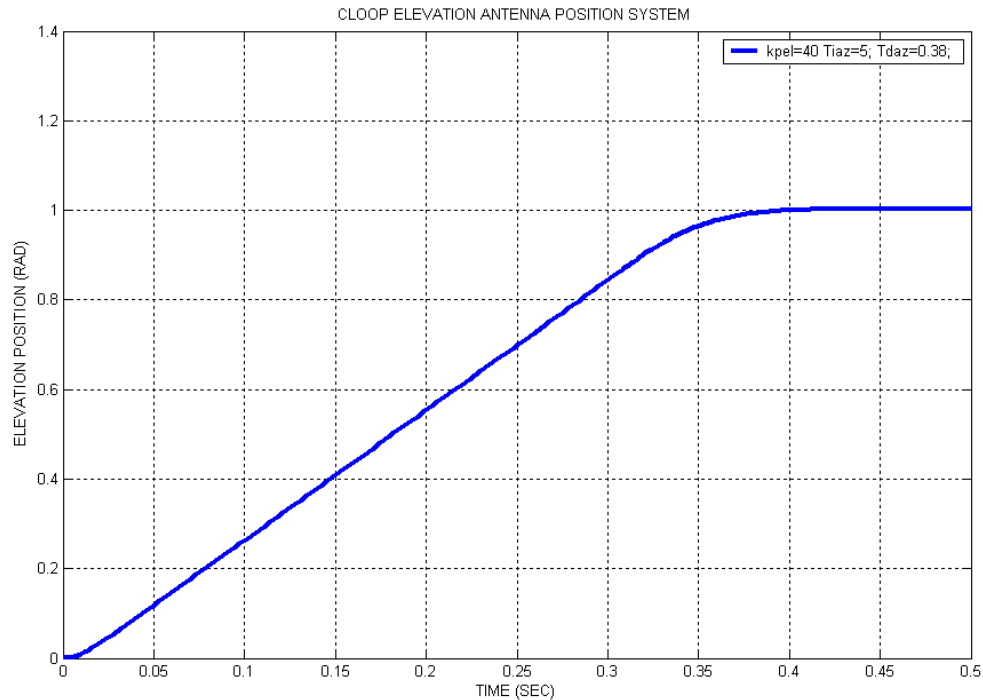
Предавателната функция $W_{PID_{EL}}(p)$, реализираща реален PID регулатор с независима настройка включен в елевационния канал:

$$W_{PID_{EL}}(p) = k_{pel} + \frac{1}{T_{iel}p} + \frac{T_{del}}{0.05T_{del}p + 1}$$

$$W_{PID_{EL}}(p) = \frac{T_{iel}T_{del}(0.05k_{pel} + 1)p^2 + (k_{pel}T_{iel} + 0.05T_{del})p + 1}{0.05T_{iel}T_{del}p^2 + T_{iel}p}$$

$$W_{PID_{EL}}(p) = \frac{5.7p^2 + 200p + 1}{0.095p^2 + 5p}$$

ПФ на затворената нелинейна система по елевационния канал е дадена на **фиг.6.21**



фиг.6.21 ПФ на затворената нелинейна система по елевационния канал

Предавателните функции на отворената и затворената система получени за горните настройки на регулатора, и с допускането, че нелинейностите в системата се пренебрегват са:

- Предавателната функция на отворената система с вход напрежение и изход елевационна позиция на лъча е:

$$W_{OL_U_EL}(p) = W_{PID_{el}}(p) * K_{amp} * W_{\theta_{EL}}(p)$$

$$W_{OL_U_EL}(p) = \frac{0.007068p^2 + 0.248p + 0.00124}{1.933 \times 10^{-9} p^5 + 1.933 \times 10^{-6} p^4 + 2.965 \times 10^{-4} p^3 + 0.01p^2}$$

- Предавателната функция на затворената система с вход напрежение и изход елевационна позиция на лъча е:

$$W_{CL_U_EL}(p) = \frac{W_{PID_{EL}}(p) * K_{amp} * W_{\theta_{EL}}(p)}{1 + W_{OOB}(p) * W_{PID_{EL}}(p) * K_{amp} * W_{\theta_{EL}}(p)}$$

$$W_{CL_U_EL} = \frac{1.767 \times 10^{-4} p^3 + 0.01327p^2 + 0.248p + 0.00124}{4.83 \times 10^{-11} p^6 + 5.03 \times 10^{-8} p^5 + 9.344 \times 10^{-6} p^4 + 5.6 \times 10^{-4} p^3 + 0.016p^2 + 0.18p + 8.9 \times 10^{-4}}$$

- Предавателната функция на отворената система с вход ъглово задание и изход елевационна позиция на лъча е:

$$W_{OL_{EL_EL}}(p) = K_{gyro} * W_{OL_U_EL}(p)$$

$$W_{OL_{EL_EL}}(p) = \frac{0.00506p^2 + 0.178p + 0.000888}{1.933 \times 10^{-9} p^5 + 1.933 \times 10^{-6} p^4 + 2.965 \times 10^{-4} p^3 + 0.01p^2}$$

- Предавателната функция на затворената система с вход ъглово задание и изход елевационна позиция на лъча е:

$$W_{CL_{EL_EL}}(p) = K_{gyro} * W_{CL_U_EL}(p)$$

$$W_{CL_{EL_EL}} = \frac{1.265 \times 10^{-4} p^3 + 0.0095 p^2 + 0.1776 p + 0.000888}{4.83 \times 10^{-11} p^6 + 5.03 \times 10^{-8} p^5 + 9.344 \times 10^{-6} p^4 + 5.6 \times 10^{-4} p^3 + 0.016 p^2 + 0.18 p + 8.9 \times 10^{-4}}$$

7. Заключение

Дипломната работа е посветена на съставянето на математичен модел на реално действаща подвижна следяща система на спътници, разработка на фирма Skygate – България <http://www.skygate.bg/>

В дипломната работата е разгледан принципа на действие на следящите системи. Разгледани са принципите на работа на главните съставни части на системата (ДПТ ПМ, интегрални жirosкопи, подвижна платформа и др.).

За съставянето на модела на системата са разгледани поотделно всички компоненти от които тя е изградена. За целта са съставени следните подмодели на компонентите :

- Интегрален жirosкоп **ADXRS150**:
 - контур за измерване на абсолютната скорост на въртене на телата
 - контур за измерване на абсолютна позиция на телата
- Двигател за постоянен ток тип **GM9236S020** :
 - линеен и нелинеен модел по отношение на скоростта
 - линеен и нелинеен модел по отношение на позицията
- Платформа с две степени на свобода, управлявана от два двигателя тип **GM9236S020** :
 - линеен и нелинеен модел на азимутния и елевационния канал по отношение на скоростта
 - линеен и нелинеен модел на азимутния и елевационния канал по отношение на позицията
- Затворена позиционираща система с PID регулатор, управляваща направлението на излъчване по азимутен и елевационен ъгъл:
 - линеен и нелинеен модел на азимутния и елевационния канал по отношение на позицията

Чрез компютърно симулиране е направена съпоставка между получените линейни и нелинейни модели на системата. Резултатите от сравненията показват, че влиянието на нелинейностите (съпротивителни моменти от триене и насищане) върху действието на системата е голямо и те не бива да се пренебрегват. В противен случай се рискува създадения математичен модел да не бъде достатъчно точен.

Извършено е и компютърно симулиране, чрез подаване на различни изпитателни сигнали. Симулациите дават полезна информация за това как би реагирала системата при разнообразни реални физически въздействия.

Отразяването на всички особености на следящата система е твърде обширна тема, за да се побере в обема на дипломната работа. Поради това тук е разгледано действието на автоматичната система на първо ниво на управление. То включва в себе си управлението на лъча, и компенсирането на всякакви ъглови отмествания от зададеното му направление.

Продължението на темата включва следните елементи:

- Дискретизация на получения модел:
 - z – трансформация
- Цифрови PID закони за управление
- Програмно осигуряване. Включва програма за управление на системата на второ йерархично ниво, работеща в реално време:
 - алгоритъм за управление в режим - “Scanning”. Формиране на управляващи сигнали
 - алгоритъм за управление в режим - “Tracking”. Формиране на управляващи сигнали
- Температурна компенсация на жироскопа с цел намаляване на температурният дрейф. Прави се чрез апроксимация на температурната зависимост на нулевата работна точка на жироскопа.

Литература

- 1) Ротхамел К. (1977), “Наръчник по антени”, ДИ “Техника”, София
- 2) Сколник М. (1978), “Справочник по радиолокации”, т.2 “Радиолокационные антенные устройства”, изд. “Советское радио”, Москва
- 3) www.analog.com
- 4) Cadou C. (2001), “Wafer – Bonded Gyroscopes”
- 5) Данев С. (1993), “Основи на автоматичното управление”, изд. “Мартилен”, София
- 6) Дьяконов В. В. Круглов (2002) “Matlab анализ, идентификация и моделирование систем – Специальный справочник”, изд. “Питер”, Санкт Петербург
- 7) Сколник М. (1978), “Справочник по радиолокации”, т.1 “Основы радиолокации”, изд. “Советское радио”, Москва
- 8) Сколник М. (1978), “Справочник по радиолокации”, т.3 “Радиолокационные устройства и системы”, изд. “Советское радио” Москва
- 9) Сколник М. (1978), “Справочник по радиолокации”, т.4 “Радиолокационные станции и системы”, изд. “Советское радио”, Москва
- 10) Джанколи Д. (1989), “Физика”, т.1, изд.”Мир”, Москва
- 11) Джанколи Д. (1989), “Физика”, т.2, изд.”Мир”, Москва
- 12) www.pittmannet.com
- 13) Boser B. (2001), “Electronics Micromashined Inertial Sensors”