

УДК 621.317.765.9

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ТИСКУ НА ВИХІДНУ ЧАСТОТУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА РЕЗОНАНСНОГО СЕНСОРА

Ї Байцар Роман, Рак Володимир, Зеліско Юлія, 2011

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Здійснено експериментальні дослідження впливу дестабілізуючих факторів на вихідну частоту вимірювального генератора. За експериментальними даними створено математичні моделі цього впливу та запропоновано методи його зменшення.

Проведены экспериментальные исследования влияния дестабилизирующих факторов на выходную частоту измерительного генератора. По экспериментальным данным созданы математические модели этого влияния и предложены методы его уменьшения.

Experimental researches of influencing of destabilizing factors are conducted on initial frequency of measuring generator. From experimental data the mathematical models of this influencing are created and the methods of his diminishing are offered.

Вступ. Науково-технічний прогрес, ефективність виробництва, створення енергоощадних та матеріалоощадних технологій значною мірою зумовлені розвитком сучасних засобів вимірювання, інформаційно-вимірювальних систем та їх сенсорного забезпечення. На покращення такого забезпечення спрямоване створення нових сенсорів з удосконаленими метрологічними характеристиками, завадостійкістю та надійністю. На сучасному етапі найперспективнішими є частотні сенсори з електромеханічними коливними системами, які широко застосовують у телеметричних системах [1]. Режим роботи, в якому найповніше використано переваги таких сенсорів, – це автоколивання, а схема, що забезпечує цей режим, – вимірювальний генератор (автогенератор). До частотних сенсорів з електромеханічною коливною системою з поперечними коливаннями належать сенсори на основі напівпровідникового струнного резонатора (НСР). Досконалість матеріалу чутливого елемента і надійність закріплення його у вузлах забезпечує їхню істотну механічну міцність, відсутність гістерезису, високу добротність і стабільність. Сенсори на основі НСР можуть застосовуватись для вимірювання ефективного значення струму, напруги, температури та низки механічних величин.

Для того, щоб забезпечити роботу частотних сенсорів такого типу, необхідно створити стійкий до впливу дестабілізуючих факторів автогенератор,

оснований на нових схемних рішеннях, які здатні забезпечити оптимальні умови збудження чутливого елемента у робочому діапазоні частот. Якщо оптимізувати розміри НСР та уніфікувати їх для сенсорів різних фізичних величин, то вплив на них дестабілізуючих факторів буде мінімальним. Розроблення методів зменшення впливу дасть змогу підвищити точність резонансних сенсорів та оцінити їх похибку. Сенсори різних фізичних величин на основі НСР працюють за єдиним принципом, тобто вимірювана величина змінює механічний стан нитчастого кристала (НК), в результаті чого змінюється його резонансна частота. Для збудження коливань та визначення частоти таких сенсорів можна застосувати уніфіковану електронну схему, вимоги до якої визначено в [2].

Мета. З огляду на сказане, метою статті є дослідження впливу дестабілізуючих факторів на вихідну частоту вимірювального генератора резонансного сенсора та розроблення методів зменшення цього впливу.

Схема конструкції та принцип роботи напівпровідникового струнного резонатора. Струнний резонатор (рис. 1) складається з НК 1, жорстко закріпленого двома кінцями у вузлах 2 на певній відстані від збуджувального електрода (підкладки) 3, що є одночасно і пружним елементом сенсора. Для

зчитування частоти коливань через НК пропускають струм, який підводиться платиновими дротинами 4. Коливання збуджуються електростатичною силою, що виникає між НК та збуджувальним електродом, від прикладених до них імпульсів напруги.

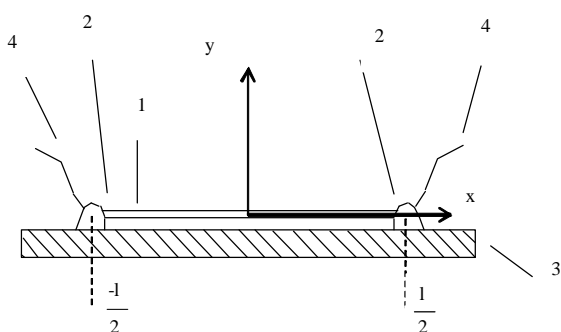


Рис. 1. Схема конструкції напівпровідникового струнного резонатора

У разі поперечних механічних коливань НК двічі за період буде максимально розтягнутий і відповідно двічі зміниться опір кристала внаслідок тензоефекту. Під час протікання через кристал струму на його кінцях виникне пульсуюча напруга з подвоєною частотою порівняно з частотою механічних коливань. Завдяки цьому не потрібен пристрій, що перетворює механічні коливання на електричний сигнал. Таке перетворення відбувається безпосередньо в кристалі за рахунок його тензорезистивних властивостей [3].

Експериментально встановлені геометричні розміри НСР: довжина кристала $7 \pm 0,2$ мм, діаметр 40 ± 2 мкм та відстань від кристала до пружного елемента 60 ± 5 мкм. Такі розміри вважають оптимальними для зменшення впливу температури, напруги збудження та струму живлення кристала. Тому їх слід уніфікувати й дотримуватись під час конструювання сенсорів.

Визначення меж поля дестабілізуювальних факторів та математичні моделі їх впливу на частоту НСР. Електронна схема автогенератора на НСР може впливати через напругу імпульсів збудження та струм, що протікає через кристал. Крім того, на резонатор діятиме навколишнє середовище через зміну температури та тиску. Необхідно встановити, як змінюватиметься резонансна частота НСР у разі зміни вказаних факторів.

Значення струму вибирали таким, щоб рівень електричного сигналу, який виникає на кінцях НК, був

більшим за рівень шумів. Це досягається вже при $I_{кр} = 0,2$ мА. На перший погляд здається, що, чим більший струм кристала, тим краще, оскільки на вході отримаємо краще співвідношення сигнал/шум. Однак виникає обмеження, пов'язане з тим, що під час протікання струму через кристал він нагрівається і його довжина зростає, а це створює осьову силу, яка починає затискати його між вузлами кріплення, що негативно позначається на резонансній частоті. Крім того, для обмеження впливу температури бажано, щоб значення струму кристала не перевищувало 1,5 мА, при розміщенні кристала у повітрі та 1 мА – у вакуумі. Менше значення струму для кристала, розміщеного у вакуумі, пояснюється гіршими умовами охолодження.

Вибираючи величину напруги імпульсів збудження, виходили з умови, що струна повинна коливатися з утворенням першої півхвилі [4]. Ця умова виконується, коли напруга імпульсів збудження змінюється від 77 до 79 В, для резонатора, розміщеного у повітряному середовищі, і від 16 до 17 В для резонатора у вакуумі. Зменшення напруги імпульсів збудження приводить до того, що електростатична сила притягання є недостатньою, щоб забезпечити незагасні коливання кристала. У разі збільшення напруги імпульсів збудження кристал переходить на коливання з утворенням двох півхвиль (друга форма коливань). У такому разі амплітуда й частота коливань є нестійкими.

Поведінку резонатора досліджували також при змінах тиску та температури навколишнього середовища. Зміна температури з 17 °С до 57 °С охоплює межі зміни кімнатної температури та температуру в камері термостата. Зміну тиску вибирали на підставі значень, найхарактерніших для нашого регіону, що становили 970 – 1070 гПа. Крім того, досліджували роботу резонатора, розміщеного у вакуумі. За функціональною схемою, показаною на рис. 2, методами факторного експерименту [5, 6] вивчено НСР у вказаних межах факторного поля.

Пунктирними рамками автогенератор розділено на дві основні складові: електронну схему та резонатор. У рамки вписані дестабілізуювальні фактори, які діють на кожну зі складових.

На резонатор діє температура T , тиск P , струм кристала $I_{кр}$ та напруга збудження $U_{зб}$. На електронну частину – температура T .

За результатами експериментів побудовано математичні моделі частоти резонатора, наведені у табл. 1.

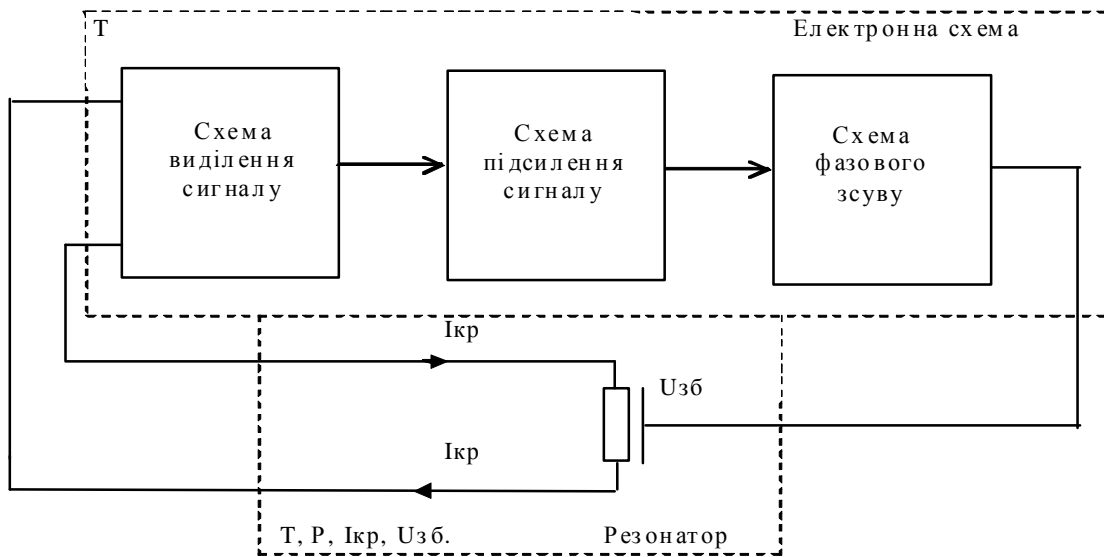


Рис. 2. Функціональна схема дослідження НСР під час дестабілізуючих факторів

Таблиця 1

Математичні моделі частоти резонатора, що працює у повітряному середовищі (за атмосферного тиску) та у вакуумі

Умови роботи резонатора	Математичні моделі	Межі факторного поля			
		Т, °С	I _{кр} , mA	U _{зб} , В	Р, гПа
За атмосферного тиску	$F=36671.9556-193.7156T-21085.9938I_{кр}-313.8044U_{зб}-27.6547P+127.2938TI_{кр}+$ $+2.5444TU_{зб}+0.1547TP+272.2363I_{кр}U_{зб}+$ $+18.653I_{кр}P+0.3501U_{зб}P-1.69625TI_{кр}U_{зб}-0.10313 TI_{кр}P-$ $0.24338I_{кр}U_{зб}P-0.00206TU_{зб}P+0.001375* TI_{кр}U_{зб}P$	від 17 до 57	від 0.5 до 1.5	від 77 до 79	від 970 до 1070
у вакуумі	$F=11692,063 - 1.3125T-30.0625I_{кр}+ +3.96875U_{зб} -$ $1.6875TI_{кр}+$ $+ 0.03125TU_{зб} + 0.90625 U_{зб} I_{кр}+$ $+0.09375TI_{кр}U_{зб}$	від 17 до 57	від 0.2 до 1	від 16 до 17	-

Математична модель частоти є функцією чотирьох змінних для резонатора, що працює за атмосферного тиску. Геометричною інтерпретацією такої моделі є гіперплощина в 4+1-вимірному просторі за наявності чотирьох факторів впливу. Резонатор працює у вакуумі, коли вплив тиску відсутній, гіперплощина математичної моделі розміщується у 3+1-вимірному просторі.

Перевірка отриманих математичних моделей у натуральних значеннях здійснювалась підстановкою

значень впливних факторів. За граничні та нульові умови приймали значення, що містяться у межах факторного поля, з подальшим порівнянням обчисленої та експериментальної частот. Абсолютна похибка математичних моделей від сукупного впливу всіх факторів не перевищувала 2,5 Гц, а відносна 0,02 %.

Характер зміни резонансної частоти НСР у разі зміни напруги імпульсів збудження та струму, що протікає через кристал, проілюстрована тривимірним

графіком (рис. 3), побудованим за математичною моделлю з табл. 1.

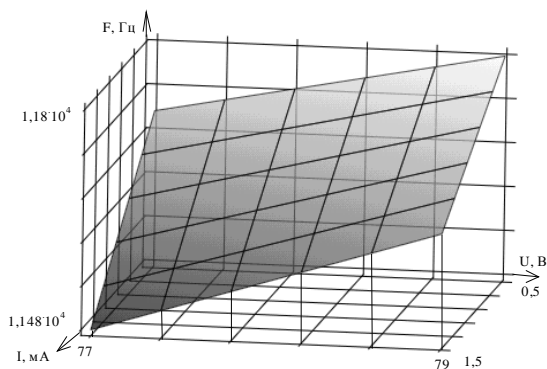


Рис. 3. Залежність зміни резонансної частоти НСР від струму НК та напруги збудження: $U_{зб}=77 - 79 \text{ В}$; $I_{кр}=0,5 - 1,5 \text{ мА}$; $P=970 \text{ гПа}$; $T=17^\circ\text{C}$

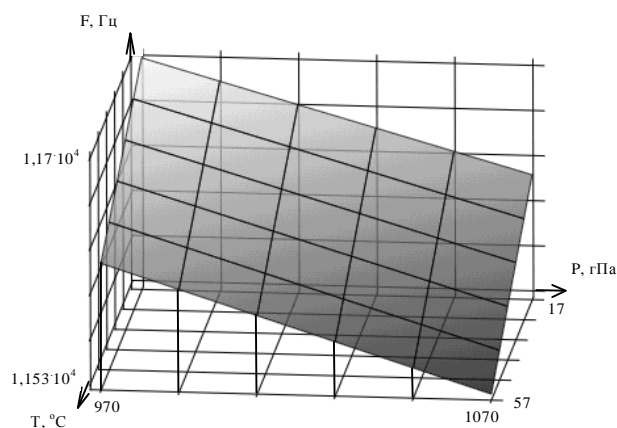


Рис. 4. Залежність зміни резонансної частоти НСР від зміни тиску та температури: $U_{зб}=78 \text{ В}$; $I_{кр}=0,5 \text{ мА}$; $P=970 - 1070 \text{ гПа}$; $T=17 - 57^\circ\text{C}$

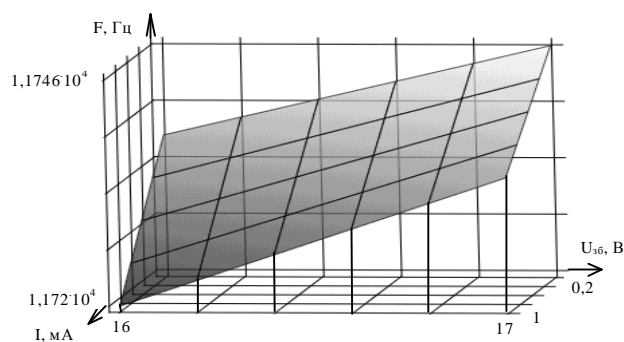


Рис. 5. Залежність зміни частоти НСР від струму НК та напруги збудження, якщо резонатор розміщений у вакуумі: $T=20^\circ\text{C}$; $U_{зб}=16 - 17 \text{ В}$; $I_{кр}=0,2 - 1 \text{ мА}$

Якщо зростає струм НК, резонансна частота зменшується, а в разі зростання напруги імпульсів збудження збільшується. За тиску 970 гПа та 17 °С максимальна абсолютна похибка, спричинена змінами напруги імпульсів збудження та струму кристала, становить 320 Гц. Відносна похибка не перевищує 2,8 %.

Залежність зміни частоти НСР від тиску та температури показано на рис. 4.

Якщо зростає тиск та температура, резонансна частота зменшується. Максимальна абсолютна похибка від впливу навколишнього середовища на резонатор становить 170 Гц, а відносна похибка 1,5 %.

Поведінка резонатора у вакуумі у разі зміни напруги імпульсів збудження та струму НК проілюстрована тривимірним графіком, наведеним на рис. 5.

Аналогічно, як для резонатора у повітрі, частота резонатора у вакуумі зростає із збільшенням напруги імпульсів збудження та спадає зі збільшенням струму кристала. Якщо резонатор розміщений у вакуумі, зміна напруги імпульсів збудження та струму кристала спричиняє абсолютну похибку 26 Гц та відносну 0,2 %.

Метод стабілізації частоти НСР зміною струму кристала. Розроблено та випробувано декілька методів підвищення температурної стабільності частоти резонатора. Основною причиною температурної нестабільності НСР є те, що в режимі автоколивань НК має більшу температуру, ніж кремнієвий пружний елемент. Різниця температур виникає внаслідок теплової дії струму, що протікає через НК, та внутрішнього тертя в матеріалі під час коливань. Поки НК не коливається, початкове напруження, за якого він закріплений, є сталим. Якщо вмикають живлення, через НК потече струм і він почне коливатись. Температура кристала зростає, сила його натягу зменшиться, відповідно зменшиться і його механічне напруження.

Температурні коефіцієнти лінійного розширення (ТКЛР) кремнію за різних температур мають різні значення. ТКЛР кремнію [7] у нижній частині температурного діапазону 233÷333 °К менші, ніж у верхній, і нелінійно зростають у межах цих значень. Це спричинює зміну сили натягу кристала та зміну його резонансної частоти.

Ідея температурної стабілізації полягає у підтриманні сталої сили натягу кристала при зміні температури. Якщо зростає температура, струм, що протікає через кристал, зменшується, тим самим компенсуючи збільшення відносного видовження кристала за

рахунок зростання ТКЛР. Так забезпечується сталість робочого механічного напруження резонатора та покращується температурна стабільність частоти АГ.

Ефективність роботи запропонованої схеми ілюструється графічною залежністю дрейфу частоти резонатора в кліматичному діапазоні температур (рис. 6).

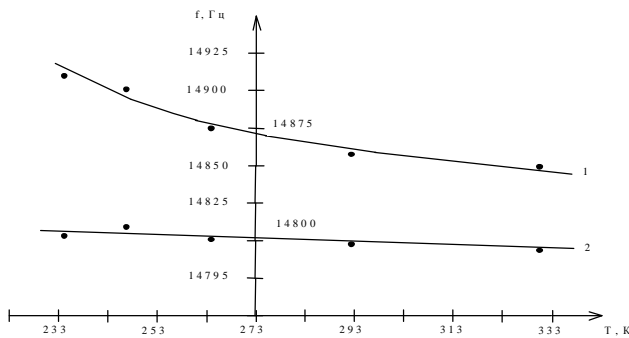


Рис. 6. Залежність зміни частоти вихідного сигналу автогенератора від температури:

1 – нетермокомпенсованого; 2 – термокомпенсованого

Результати випробування показали, що за такого способу термокомпенсації дрейф частоти резонатора зменшується в 3,5 – 4 рази.

Початкове значення струму $I_{крn}$ кристала та зміну його значення у разі зміни температури $\left(\frac{dI_{крn}}{dT}\right)$ знаходили експериментально. Вибір оптимальних значень $I_{крn}$ та $\left(\frac{dI_{крn}}{dT}\right)$, їхня перевірка у широкому

діапазоні температур є достатньо тривалими. І хоч такий метод істотно зменшує вплив температури на частоту НСР, за технологічністю він не є найкращим.

Тому розглядали інші методи зменшення впливу дестабілізуювальних факторів. Контролювати тиск та температуру можна двома способами. Перший – це вимірювання тиску й температури з подальшим внесенням поправки, вирахованої за допомогою математичних моделей з табл. 1; другий – герметизувати резонатор і розмістити його разом з електронною схемою у термостаті. Дослідженнями встановлено, що ефективнішим є другий спосіб.

Для цього розроблено та виготовлено макет термостата з температурою стабілізації 55 °С при відхиленні температури $\pm 0,2$ °С. У термостаті розміщена електронна схема автогенератора, схема регулювання температури та резонатор. Резонатор герметизований за температури 55 °С та атмосферному тиску. Зміна температури у термостаті на $\pm 0,2$ °С приведе до зміни тиску на $\pm 0,62$ гПа.

Випадкові похибки частоти, спричинені зміною температури й тиску, обчислимо, використавши математичні моделі частоти вимірювального генератора (табл. 1) [6], який працює у повітряному середовищі та у вакуумі. Повний приріст функції знайдемо як різницю між крайніми та середнім значеннями частоти за вказаних умов роботи резонатора та відхилень температури й тиску. Результати розрахунків наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Вплив температури й тиску на частоту герметизованого та термостатованого резонатора

Умови роботи резонатора			Крайні та середні значення			Похибки	
Навк. серед.	Узб, В	Ікр, мА	Р, гПа	Т, °С	F, Гц	Абс., Гц	Відн., %
Атм. тиск	79	0.5	1012.63 1013.25 1013.87	54.8 55 55.2	11712.02 11711.33 11710.6	± 0.7	± 0.006
Вакуум	17	0.2	-	54.8 55 55.2	11710.76 11710.6 11710.44	± 0.16	± 0.001

Висновки. За допомогою математичних моделей впливу дестабілізуючих факторів можна прогнозувати їхній вплив на вихідну частоту резонансного сенсора.

Метод стабілізації частоти НСР струмом зменшує вплив температури на вихідну частоту резонатора у 3,5 – 4 рази, однак він не є технологічним.

Компенсація впливу навколишнього середовища струмом резонатора ускладнює конструкцію і технологію сенсора, оскільки потребує дорогого і складного обладнання для імітації дії дестабілізуючих факторів та ретельного тривалого налаштування.

Найдоцільнішим з погляду технологічності та зменшення похибок є термостатування та герметизація резонансного сенсора.

1. Столярчук П. Г., Байцар Р. І., Гінгін М. П. Резонансні вимірювальні перетворювачі для систем контролю і управління // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2000. – Вип. 56. – С. 100–104 2. Байцар Р. І.,

Рак В. С., Гінгін М. П. Автогенераторні схеми напівпровідникових резонансних сенсорів // Вісн. Держ. ун-ту «Львівська політехніка». – 2000. – № 389: Автоматика, вимірювання та керування. – С. 166 – 171. 3. Столярчук П. Г., Байцар Р. І., Рак В. С., Гінгін М. П. Струнний варіант тензорезистивного методу вимірювання // Вісн. Держ. ун-ту «Львівська політехніка». – 1998. – № 324: Автоматика, вимірювання та керування. – С. 65–69. 4. Осадчий Е. П. Проектирование датчиков для измерения механических величин. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с. 5. Засименко В. М. Основы теории планирования эксперимента: навч. посібник. – Львів: Держ. ун-т «Львівська політехніка», 2000. – 205 с. 6. Рак В. С., Засименко В. М., Байцар Р. І. Математичні моделі систематичних похибок частоти вимірювального генератора для напівпровідникового резонансного сенсора // Методи та прилади контролю якості. – 2002. – № 8. – С. 73–76. 7. Новиков С. И. Тепловое расширение твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 448 с.

УДК 681.782.2

МОДЕРНІЗАЦІЯ ГІДУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ

© Благодир Ярослав¹, Білінський Андрій¹, Мартинюк-Лотоцький Костянтин¹, Вірун Наталія¹, Вовчик Єва¹, Дейнека Ростислав², 2011

¹Львівський національний університет імені Івана Франка, астрономічна обсерваторія, вул. Кирила і Мефодія, 12, 7905, м. Львів, Україна

²Національний університет «Львівська політехніка», кафедра приладів точної механіки, вул. С. Бандери, 12, 79013, м. Львів, Україна

Описано вдосконалення пристрою для відслідкування руху штучних супутників Землі. Як базовий прилад використано лазерний віддалемір ЛД-2, в який внесено конструкційні зміни. Використання в системі привода крокових двигунів уможливило комп'ютерне керування. Наведено елементи аналізу статичної і динамічної похибок позиціонування.

Рассмотрено усовершенствование устройства для отслеживания движения искусственных спутников Земли. Как базовый прибор использован лазерный дальномер ЛД-2, в который внесены конструкционные изменения. Использование в системе привода шаговых двигателей обеспечивает возможность компьютерного управления. Приведены элементы анализа статической и динамической погрешностей позиционирования.

This article is devoted to improve of instrument for artificial satellites of Earth following. As base construction used the laser distance-controller ЛД-2 which receive of modifications. Using in this drive-system of stepping-motors give possibility of computer control. The elements of static and dynamic position errors analysis was bringing.

Вступ. Спостереження ШСЗ є дуже складним технічним завданням, тому що зображення супутників, розташовані на порівняно близькій віддалі, дуже швидко переміщуються по небесній сфері. Тому з

моменту запуску першого супутника сконструйовано багато різноманітних установок з гідунням за супутником під час спостереження.