



МІНІСТЕРСТВО ЕКОЛОГІЇ
ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ
УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНА ЕКОЛОГІЧНА
АКАДЕМІЯ ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ
ОСВІТИ ТА УПРАВЛІННЯ

03035, м. Київ-35, вул. Митрополита Василя
Липківського, 35, т./ф. (044) 206-31-87,
e-mail: dei2005@ukr.net

MINISTRY OF ECOLOGY
AND NATURAL RESOURCES OF
UKRAINE

STATE ECOLOGICAL ACADEMY OF
POST-GRADUATE EDUCATION AND
MANAGEMENT

35, Metropolitan Vasil Lypkivskyi str., Kyiv,
03035, Ukraine. tel./fax (044) 206-31-87,
e-mail: dei2005@ukr.net

Голові спеціалізованої вченої ради Д
26.062.03 у Національному
авіаційному університеті МОН
України

03058, м. Київ, просп. Космонавта
Комарова, 1, НАУ.

ВІДГУК

офіційного опонента,

проректора з наукової роботи

Державної академії післядипломної освіти та управління,

Міністерства екології та природних ресурсів України,

доктора технічних наук, професора *МАШКОВА Олега Альбертовича*

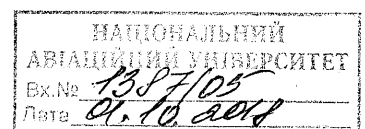
на дисертацію *ШИШКОВА Федора Олександровича*

за темою: “*Автономна навігація сервісних космічних апаратів за
сигналами глобальної навігаційної супутникової системи*”,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом

Актуальність теми дисертації.

Відомо, що сфера застосування супутникових систем розширюється кожен день. Сьогодні світ неможливо уявити без сучасних супутників зв'язку, спостереження та навігації. В особливості це стосується глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС). Окрім стандартного наземного сервісу, існує також космічний сервіс. Радіонавігаційне поле, яке формується



супутниковими системами, забезпечує гнотатне функціонування навігаційних приймачів на відстані до 2000 – 3000 км від поверхні Землі. Радіонавігаційне поле на відстанях 3000 – 36000 км і далі нестійке, оскільки утворюється, в основному, за рахунок випромінювання антенних систем супутників поза Землею.

У теперішній час супутникові технології знайшли своє застосування у сферах зв'язку, телекомунікацій, забезпечення навігації, спостереження за метеорологічною ситуацією, у роботі геодезистів, моряків, у сільському господарстві, логістиці, тощо. Так на кінець 2017 року навколоземні орбіти вміщували більше ніж 1,700 активних супутників, більша частина яких знаходиться на низьких навколоземних орбітах (ННО). Відомо, що будь-який технічний засіб має свій строк експлуатації, тому після розробки нового засобу людина паралельно шукає можливості для збільшення строку його активного використання, можливо шляхом їх ремонту або обслуговування. При цьому частина супутників, що витратили свої експлуатаційні можливості, так і залишаються на орбіті у формі зайвого сміття, становлячи небезпеку для інших супутників на цих же орбітах, або при їх виведенні на орбіту. Космічне сміття, що являє собою непрацюючі космічні апарати, або їх уламки, становить серйозну загрозу для майбутнього розвитку, та навіть існуванню космічної галузі. Класифікація космічного сміття може відрізнитись в залежності від прикладних задач та їх впливу на людину. Але, у найпростішому випадку, ці об'єкти можна відрізнити за парами ознак: шкідливий-корисний, природний-штучний. Як і в багатьох інших випадках значна кількість штучних корисних об'єктів стає шкідливими, практично стає сміттям. Лише 6 відсотків супутників на навколоземних орбітах перебувають у працездатному стані, тоді як приблизно 30 відсотків об'єктів на орбітах можна віднести до списаних супутників, відпрацьованих ступенів та пов'язаних з польотами об'єктів. З 1957 року зареєстровано понад 250 випадків фрагментації орбітальних об'єктів, при цьому менше 10 з цих випадків пов'язано з навмисними діями, а більшість пов'язана з вибухами космічних апаратів та верхніх ступенів. Як припускається ці випадки фрагментації породили близько 600000 об'єктів

розміром більше ніж один сантиметр. Головною причиною вибухів на орбіті є залишок палива, що залишається у баках супутників та відпрацьованих ступенях. Також з часом погіршується структурна порочність елементів конструкції з поступовою фрагментацією орбітальних об'єктів. Аналіз поточного стану наявності космічного сміття у навколосеземному просторі, що був проведений НАСА, показав, що навіть якщо людство припинить запуски на навколосеземну орбіту, кількість космічного сміття буде неконтрольовано зростати. Такий катастрофічний розвиток має назву Синдром Кесслера. На складність ситуації також вказують постійне маневрування та навіть підготовки евакуації персоналу на міжнародній космічній станції, що пов'язані з небезпекою зіткнення з космічним сміттям. Таким чином, для мінімізації ризику блокування орбіт та зменшення небезпеки зіткнення із космічним сміттям необхідно видаляти від п'ятох до десятих найбільших елементів із навколосеземного простору за рік, щоб уникнути можливості створення дрібних уламків під час зіткнення. Також, як захист від створення додаткового космічного сміття, керовані космічні апарати на ННО слід вводити в щільні шари атмосфери задля їх знищення, а космічні апарати (КА) на геостаціонарній орбіті слід виводити на так-звані орбіти «поховання», тобто на орбіти над геостаціонарною. Оскільки найбільш цінні супутники знаходяться на низьких та геостаціонарних/геосинхронних орбітах, то і найбільша кількість сміття знаходиться там. Надмірна кількість сміття на низьких орбітах зумовлена нераціональним використанням космічного простору на початку покорення космосу, а також зіткнення, умисне знищення супутників (наприклад, Китай знищив метеорологічний супутник FY-1C у рамках випробувань протисупутникових ракет), що створює багато небезпечних фрагментів. Таким чином, сучасна ГНСС повинна забезпечити можливість вирішення навігаційної задачі для КА у навколосеземному просторі на всіх видах навколосеземних орбіт для процесу ефективної утилізації космічного сміття, з огляду на сучасний стан його розподілу. Сфера застосування супутникових систем розширюється кожен день, з'являються нові супутники зв'язку, спостереження та навігації. В особливості це стосується глобальної

навігаційної супутникової системи (ГНСС). На сьогодні сервіс супутникової навігації є найзручнішим та найбільш перспективним засобом з визначення об'єктами свого просторового положення та складових вектору швидкості і часу. Згідно до звіту European GNSS Agency (GSA) по ринку ГНСС, сфера застосування супутникової навігації охоплює все більше напрямків разом з активним розширенням ринку. ГНСС використовують як для навігації на землі, на воді та повітрі, так і у геодезії та сільському господарстві, для забезпечення навігації дронів. Однак, окрім стандартного наземного сервісу, існує також космічний сервіс. Він передбачає створення радіонавігаційного поля, яке формується супутниковими системами, забезпечує штатне функціонування навігаційних приймачів на відстані до 2000 - 3000 км від поверхні Землі при висоті орбіт навігаційних супутників в межах 19000 - 22000 км. Цього достатньо для навігації низькоорбітальних КА. Радіонавігаційне поле на відстанях 3000 - 36000 км і далі нестійке, оскільки утворюється, в основному, за рахунок випромінювання антенних систем супутників поза Землею. Відомо, що одним з методів вирішення проблеми утилізації космічного сміття є створення сервісного космічного апарата (СКА), що здатний «захопити» об'єкт утилізації та перенести у заздалегідь визначене місце у широкому діапазоні висот орбіт. При цьому СКА має знати власне положення у космічному просторі. Одним із засобів визначення власного місцеположення є автономна навігація за рахунок ГНСС при проведенні операцій орбітального сервісного обслуговування та утилізації космічного сміття.

Аналіз літератури показав, що на сьогоднішній день напрацьовано різні методи, механізми, принципи і методики оцінювання характеристик автономної навігації сервісних космічних апаратів на геостаціонарній орбіті за сигналами ГНСС.

При вирішенні цієї проблеми автор у своїх дослідженнях спирався на праці вітчизняних і зарубіжних вчених, які зробили значний внесок у розвиток теорії навігації космічних апаратів у навколосемному просторі, забезпечення автономної навігації сервісних космічних апаратів по сигналам глобальної навігаційної супутникової системи у космічній області обслуговування: В.С.

Харченко, В.В. Конін, А.В. Горбенко, С.А. Засуха, В.И. Рубан, О.М. Тарасюк, В.К. Сердюк, Л.В. Рихлова, Н.С. Бахтигарасв, С.С. Вениаминов, А.А. Тучин, А.Н. Кирилин, Э. Аким, Е.С. Каравасва, М.М. Иванов, Л.М. Лисенко, В.П. Селезнев, М.Л. Кирст, В.В. Загоруйко, M. Wall, D.J. Kessler and C.-P. G. Burton, L. Hutchinson, B. Sullivan, M.G. Richard, N.B. Shah, D.E. Hastings, E. Martin, E. Dupuis, J.-C. Piedboeuf and M. Doyon, J. Kreisel, J.T. Collins, H.F. Meissinger, R. Bell, M.H. Kaplan, C. Jaramillo, E. Olmedo, N. Sánchez-Ortiz and M. Ramos-Lerate, M. Moreau, F.H. Bauer, M.C. Moreau, M.E. Dahle-Melsaether, W.P. Petrofski, B.J. Stanton, S. Thomason, G. A. Harris, R.P. Sena, J. Parker, J.D. Kronman, X. Zhan, S. Jing, V. Ashurkov; A. Tyulin, A. Roberts, D. Lawrence, F.H. Bauer, M. Moreau, E. Davis, J. Carpenter, G. Davis, L. Jackson, P. Axelrad, H. Liu, X. Cheng, G. Tang, J. Peng, O. Montenbruck, P.S. Laplace, T.S. Kelso, L. Winternitz, M. Moreau, G. Boegner, S. Sirotzky, B. Bamford, B. Naasz, M. Moreau, M.C. Moreau, та інші.

Усі ці напрями та чинники об'єднують загальне наукове завдання, – оцінювання характеристик автономної навігації у навколоземному космічному просторі по сигналам ГНСС для сервісних космічних апаратів, що має важливе значення при проведенні операцій орбітального сервісного обслуговування та утилізації космічного сміття.

Тому тема дисертаційної роботи Шишкова Федора Олександровича, яка присвячена рішення цього наукового завдання є актуальною.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Автор добре розуміє специфіку задачі, що розглядається у дисертації та коректно формулює її постанову. Аналіз процесів автономної супутникової навігації у навколоземному космічному просторі для сервісних космічних апаратів та прибирання космічного сміття, передумов до розробки орбітального сервісного обслуговування, задач, класифікація способів вирішення навігаційної задачі у космосі, які виконано досить кваліфіковано, склали основу удосконалення моделі для оцінювання характеристик

автономної навігації сервісних космічних апаратів на геостаціонарній орбіті за сигналами ГНСС.

Автономна навігація сервісних космічних апаратів за сигналами глобальної навігаційної супутникової системи науково визначається на єдиній методологічній основі математичного аналізу та синтезу складних технічних систем. Тому автор обґрунтовано використовує: методи статистичної радіотехніки, математичної статистики, матричне обчислення, методи обчислювальної математики та параметричного моделювання випадкових процесів.

Під час проведення досліджень автор спирається на відомі факти та наукові досягнення в обраній сфері, які отримані з використанням апробованого математичного апарату, який є адекватним моделі автономної навігації сервісних космічних апаратів за сигналами глобальної навігаційної супутникової системи

Розроблені автором практичні рекомендації ґрунтуються на розробленому ним науково-методичному апараті, який є достатньо чутливим для відповідних змін вихідних даних.

Відмічаю, що наукові положення та рекомендації, які сформульовані у висновках зроблено науково обґрунтовано і логічно по результатам моделювання параметрів навігації супутників на геостаціонарній орбіті за допомогою програмно-апаратного комплексу.

Достовірність одержаних результатів.

Достовірність наукових положень, які захищаються здобувачем, висновків і рекомендацій підтверджується їх відповідністю методології дослідження поставленого наукового завдання; повнотою розгляду на теоретичному і експериментальному рівнях об'єкту дослідження, що охоплюють його змістовні і процесуальні характеристики; застосуванням комплексу методів, адекватних предмету дослідження і можливістю відтворення результатів дослідження.

Достовірність і обґрунтованість результатів дисертації ґрунтуються на:

- використанні результатів аналізу сучасного стану супутникових систем навігації;
- коректності застосування автономної навігації сервісних космічних апаратів по сигналам глобальної навігаційної супутникової системи у космічній області обслуговування;
- узгодженістю із наявними результатами інших авторів, які надруковано у вітчизняній та зарубіжній літературі;
- даних про їх успішне практичне застосування при комп'ютерному моделювання, та порівняння отриманих результатів з відомими даними незалежних дослідників та результатами вимірювань.

Новизна одержаних результатів.

У дисертації вирішено актуальну науково-практичну задачу оцінювання характеристик автономної навігації у навколосемному космічному просторі по сигналам ГНСС для сервісних космічних апаратів, що має важливе значення при проведенні операцій орбітального сервісного обслуговування та утилізації космічного сміття.

Завдання утилізації космічного сміття комплексне і багатопланове. Одним з проблемних питань є навігація сервісного космічного апарату, розрахунок його точних координат та планове прибуття в задану точку. Проблематика дослідження супутникового навігаційного забезпечення безпілотного сервісного космічного апарату полягає в наступному: радіонавігаційне поле, яке формується супутниковими навігаційними системами GPS, ГЛОНАСС, в перспективі GALILEO, COMPASS, забезпечує штатне функціонування навігаційних приймачів на відстані до 2000 — 3000 км від поверхні Землі при висоті орбіт навігаційних супутників в межах 19000 — 22000 км. Цього достатньо для навігації низькоорбітальних космічних апаратів (висота орбіт до 3000 км). Радіонавігаційне поле на відстанях 3000-22000 км і далі до висоти геостационарної орбіти нестійке, оскільки утворюється за рахунок бічного випромінювання антенних систем супутників. Зазначене доводить актуальність дослідження комплексу питань що відносяться до навігації в нестійкому навігаційному полі, розподіленому в межах 3000-36000 км від поверхні Землі,

та вирішенні цієї фундаментальної проблеми. Значимість роботи полягає у створенні нової теорії, методів та способів забезпечення навігації космічних апаратів в нестійкому радіонавігаційному полі з орієнтацією на отримання Україною пріоритету у вирішенні проблеми утилізації космічного сміття.

В роботі удосконалено модель радіонавігаційного поля для автономної супутникової навігації сервісних космічних апаратів на геостаціонарній орбіті у області космічного обслуговування. Модель представлена як сукупність наступних компонентів:

- оцінка орбіт навігаційних супутників;
- фіксація часового параметру;
- визначення ефемерид супутників;
- визначення кутів закриття;
- характеристики діаграми спрямованості (ДС) антени навігаційних супутників з урахуванням кутів закриття;
- прийом сигналів у космічній області обслуговування;
- використання різних частот при передачі сигналів з навігаційних супутників;
- оцінка наявності радіонавігаційного поля у космічній області обслуговування.

Такий підхід відповідає стандартним компонентам моделі радіонавігаційного поля та враховує відмінності запропонованої моделі від стандартної. Розглянуті компоненти дозволяють перемістити фокус моделі від наземної області обслуговування до космічної, при цьому навігаційні супутники у космічній області обслуговування не мають впливу від атмосфери Землі, і, зокрема, іоносфери. Ключовою особливістю моделі є використання сигналів основних та бокових пелюсток діаграми спрямованості антен загоризонтних супутників, тим більше на різних частотах, що дозволило синтезувати алгоритм на основі запропонованої моделі. Цей алгоритм описано у розділі 3 даної дисертаційної роботи.

В роботі враховано особливості впровадження моделі радіонавігаційного поля в алгоритмі оцінювання якості автономної навігації у космічній області

обслуговування, в особливості на геостаціонарній орбіті. Автором встановлено питання систем координат, статистичної обробки інформації, сутність характеристик точності та доступності для супутникової навігації на геостаціонарній орбіті. Визначено, що навігаційні похибки користувача розподіляються за нормальним законом з відповідними значеннями середньо квадратичного відхилення з врахуванням значення похибок контрольного та космічного сегментів ГНСС при наявності актуальних ефемерид; номінального значення похибок контрольного та космічного сегментів ГНСС при роботі на проміжку чинності даних ефемерид; врахуванні значення похибок контрольного та космічного сегментів ГНСС при наближенні ефемерид до кінця строку актуальності. Для позначення доступності запропоновано різні типові операції:

- рух у просторі – значення похибки вимірювання по трьом координатам не має перевищувати 556 м;

- операції автономної навігації - значення похибки вимірювання по трьом координатам не має перевищувати 100 м, для забезпечення умов автономної супутникової навігації необхідне високе значення доступності, тобто 99.9% і вище;

- наближення до цілі - значення похибки вимірювань у горизонтальній площині до 40 м, та 20 м у вертикальній площині.

Для відтворення результатів моделювання наведених вище навігаційних характеристик була запропонована графоаналітична модель інтегрального оцінювання якості навігації на геостаціонарній орбіті.

В роботі проведено оцінювання точності та доступності автономної навігації для масиву позицій на геостаціонарній орбіті. Автором розглянуто як окреме використання сигналів, що проходять крізь основну пелюстку діаграм спрямованості супутників різних комбінацій навігаційних сузір'їв ГНСС, так і спільне використання сигналів, що проходять як крізь основний так і бокові пелюстки діаграм спрямованості супутників. Отримано загальні результати вимірювань з використанням основного пелюстка діаграми спрямованості.

Зроблено висновок, що використання більшої кількості сузір'їв дозволяє отримати кращі результати, у випадку використання одного сузір'я порівняно з

використанням двох маємо покращення результатів більше ніж у 2 рази. У випадку спільного використання ГНСС результати цікавіші – незважаючи на підвищення загальної доступності, насправді значні покращення маємо лише у зонах, де видно геосинхронній та геостаціонарні навігаційні супутники, за умови прийняття їх сигналів та використання у якості навігаційних. При цьому значне покращення точності та доступності спостерігається лише у деякому секторі.

Проведено вимірювання по точності та доступності з використанням основного та бокових пелюсток діаграми спрямованості. Встановлено, що використання двох сузір'їв значно покращує точність результатів за рахунок більшої кількості доступних супутників, що дозволяє забезпечити кращу точності результатів визначення навігаційної похибки користувача.

Зроблено висновок, що використання двох супутникових сузір'їв по основному та боковим пелюсткам дозволяє забезпечити автономну супутникову навігацію на всьому часовому проміжку, а також покращує значення вертикальної доступності для операцій наближення до цілі.

Автором досліджено вплив геометричного розташування навігаційних супутників при використанні ГНСС у локальній точці на геостаціонарній орбіті. Визначено, що при окремому використанні сузір'я ГНСС для сигналів у межах основної пелюстки діаграми спрямованості антен навігаційних супутників значення доступності склали 8.125 % – 2.153 % при найкращому та найгіршому сценаріях відповідно. При цьому жодне значення не задовольняє умови для інших операцій. А, отже, використання даної конфігурації не доцільне для забезпечення операцій автономної супутникової навігації. Встановлено, що при використанні двох сузір'їв ГНСС для сигналів у межах основної пелюстки діаграми спрямованості антен навігаційних супутників значення доступності склали 23.47 % – 10 % для операції ТО1 при найкращому та найгіршому сценаріях відповідно. Жодне значення не задовольняє умови для інших операцій. Порівняно з використанням лише одного сузір'я результати кращі, але також не відповідають умовам забезпечення автономної супутникової навігації. При окремому використанні сузір'я ГНСС для сигналів

у межах основної та бокових пелюсток діаграми спрямованості антен навігаційних супутників значення доступності склали 100 % – 99.93 % при найкращому та найгіршому сценаріях відповідно на денному. Це дозволяє забезпечити автономну супутникову навігацію при використанні основного та бокових пелюсток навіть одного сузір'я ГНСС. Використання двох сузір'їв ГНСС дозволяє покращити результати навіть при найбільших значеннях похибок.

В роботі розроблено метод моделювання навігаційних характеристик при використанні сигналів ГНСС на геостаціонарній орбіті за допомогою апаратно-програмного комплексу на поверхні Землі, що дозволяє оцінювати навігаційні характеристики у лабораторних умовах. За рахунок даного методу було проведено експеримент для перевірки впливу геометричних конфігурацій супутникових сузір'їв на фактори погіршення точності.

Новизна одержаних в дисертаційній роботі результатів визначається наступним.

У дисертації вирішено актуальну науково-практичну задачу оцінювання характеристик автономної навігації у навколосемному космічному просторі по сигналам ГНСС для сервісних космічних апаратів, що має важливе значення при проведенні операцій орбітального сервісного обслуговування та утилізації космічного сміття і отримано наступні нові наукові результати, а саме:

ВПЕРШЕ:

розроблено графоаналітичну модель інтегрального оцінювання ефективності навігаційного забезпечення на геостаціонарній орбіті при використанні сигналів ГНСС, що дозволяє відобразити значення точності та доступності для різних типових операцій, для масиву положень сервісних космічних апаратів на орбіті;

розроблено метод моделювання навігаційних характеристик при використанні сигналів ГНСС на геостаціонарній орбіті за допомогою наземного апаратно-програмного комплексу, що дозволяє оцінювати навігаційні характеристики у лабораторних умовах для напівнатурного моделювання супутникової навігації на геостаціонарній орбіті.

УДОСКОНАЛЕНО:

модель радіонавігаційного поля, зокрема додано можливість використання загоризонтних супутників, для оцінювання навігаційних характеристик точності та доступності у космічній області обслуговування.

Таким чином, запропоновані моделі, методи, методики і алгоритми забезпечують удосконалення моделі для оцінювання характеристик автономної навігації сервісних космічних апаратів на геостаціонарній орбіті за сигналами ГНСС.

Аргументування та критичне оцінювання порівняно з відомими рішеннями запропонованих автором нових рішень.

Сьогодні можливо визначити, що розробка та впровадження систем автономної навігація за рахунок ГНСС при проведенні операцій орбітального сервісного обслуговування та утилізації космічного сміття є новим перспективним науковим напрямом дослідження. Зараз працюють або готуються до розгортання різні системи супутникової навігації.

Відома система GPS під попередньою назвою «NAVSTAR». Ця система належить міністерству оборони США. Цей факт, на думку більшості держав, є її головним недоліком. Пристрої, що підтримують навігацію через GPS, є найпоширенішими в світі.

Сучасна система ГЛОНАСС належить міністерству оборони РФ. Система, за заявами розробників наземного обладнання, буде мати декілька технічних переваг порівняно з GPS. Після 1996 року супутникове угруповання зменшувалося, і до 2002 року система практично повністю занепала. Була повністю поновлена лише в кінці 2011 року. Відзначається малою розповсюдженістю клієнтського обладнання. До 2025 року передбачена глибока її модернізація.

Європейська система Galileo, ще знаходиться на етапі створення супутникового угруповання, планується повністю її розгорнути до 2020 року (з 15 грудня 2016 року система Galileo працює у експериментальному режимі).

Існує система Бейдоу. Вона розгорнута Китаєм (сузір'я GNSS), призначена для використання, у першу чергу, у цій країні, а також надавати відкритий сервіс у глобальному масштабі. Її особливість - невелика кількість супутників, що знаходяться на геостаціонарній орбіті. Перший супутник вийшов на орбіту в 2007 р. На даний момент (вересень 2018) система має 15 робочих супутників, 5 супутників на стадії тестування та 15 на стадії підготовки до експлуатації.

Індійська навігаційна супутникова система IRNSS знаходиться в стані розробки. Пропонується для використання лише в цій країні. Її перший супутник був запущений в 2008 році.

Японська QZSS була задумана у 2002 р. як комерційна система з набором послуг для мобільного зв'язку, мовлення й широкого використання для навігації в Японії та сусідніх районах Південно-Східної Азії. Перший запуск супутника для QZSS був запланований на 2008 р. В березні 2006 японський уряд оголосив, що перший супутник не буде призначений для комерційного використання й буде запущений цілком за бюджетні кошти для відпрацювання прийнятих рішень в інтересах забезпечення навігаційних завдань. Тільки після успішного закінчення іспитів першого супутника почнеться черговий етап і наступні супутники будуть повністю забезпечувати запланований раніше обсяг послуг.

В березні 2012 року мережа референтних станцій, що складає наземний компонент навігаційної системи GNSS, запрацювала і в Україні.

Принцип роботи супутникових систем навігації заснований на вимірюванні відстані від антени на об'єкті (координати якого необхідно отримати) до супутників, положення яких відоме з великою точністю. Таблиця положень всіх супутників називається "альманахом", який має в своєму розпорядженні кожен супутниковий приймач до початку вимірювань. Приймач зберігає "альманах" в своїй пам'яті з часу свого останнього виключення і якщо "альманах" не застарів, то миттєво використовує його. Кожен супутник передає в своєму сигналі весь "альманах". Таким чином, знаючи відстані до декількох супутників системи, за допомогою звичайних геометричних побудов, на основі "альманаху", можна обчислити положення об'єкту в просторі.

Метод вимірювання відстані від супутника до антени приймача заснований на визначенні швидкості розповсюдження радіохвиль. Для здійснення можливості вимірювання часу поширюваного радіосигналу кожен супутник навігаційної системи випромінює сигнали точного часу, використовуючи точно синхронізований з системним часом атомний годинник.

При роботі супутникового приймача його годинник синхронізується з системним часом, і при подальшому прийомі сигналів обчислюється затримка між часом випромінювання, що міститься в самому сигналі, і часом прийому сигналу. Маючи в своєму розпорядженні цю інформацію, навігаційний приймач обчислює координати антени. Решта всіх параметрів руху (швидкість, курс, пройдена відстань) обчислюється на основі вимірювання часу, який об'єкт витратив на переміщення між двома або більше точками з певними координатами.

Робота системи навігації в реальності відбувається значно складніше, оскільки існують деякі проблеми, що вимагають спеціальних технічних прийомів по їх вирішенню. Основними проблемами є:

- неоднорідність гравітаційного поля Землі, що впливає на орбіти супутників;
- неоднорідність атмосфери, із-за якої швидкість і напрям розповсюдження радіохвиль може змінюватися в деяких межах;
- віддзеркалення сигналів від наземних об'єктів, що особливо помітно в місті;
- неможливість розмістити на супутниках передавачі великої потужності, із-за чого прийом їх сигналів можливий тільки в прямій видимості на відкритому просторі;
- відсутність атомного годинника в більшості навігаційних приймачів, що зазвичай усувається отриманням інформації не менше чим з трьох (2-х мірна навігація при відомій висоті) або з чотирьох (3-х мірна навігація) супутників (за наявності сигналу хоч би з одного супутника можна визначити поточний час з хорошою точністю).

У космічній області обслуговування найбільш актуальними питаннями з вищезгаданих є неоднорідність гравітаційного поля та неможливість розмістити на супутниках передавачі великої потужності, що вимагає чутливіших приймачів на борту космічних апаратів.

Аналіз багатьох джерел інформації щодо подальшого розвитку радіонавігаційного забезпечення свідкує про те, що по-перше проводяться дослідження щодо визначення загальних вимог користувачів до радіонавігаційного забезпечення, формулюються вимоги конкретних користувачів, розглядаються проблемні питання досягнення даних вимог, визначаються загальні напрями підвищення якості радіонавігаційного забезпечення України. На сьогодні сформована класифікація користувачів радіонавігаційного забезпечення: повітряні, морські, річні, наземні та космічні. Це дало можливість сформулювати загальні вимоги у відповідності з особливостями користувачів, а саме вимоги до: робочих смуг радіонавігаційних систем (РНС), точності місцезнаходження, доступності та цілісності. При цьому точність місцезнаходження визначається, як середньоквадратична похибка (СКП). Під «доступністю» розуміється ймовірність обслуговування, «цілісність» – це ймовірність виявлення порушення та/або інтервал часу виявлення порушення. При цьому враховуються міжнародні вимоги до навігаційного забезпечення, які визначено у документах Міжнародної організації цивільної авіації ІКАО. Проведений аналіз тенденцій розвитку навігаційної апаратури (НА) користувачів радіонавігаційних систем дозволів визначити наступні напрями розвитку (НА):

- удосконалення характеристик апаратури (підвищення характеристик точності; підвищення надійності, завадостійкості та електромагнітної сумісності; забезпечення автономних методів контролю цілісності системи; поширення переліку сервісних завдань; зменшення габаритних характеристик; зменшення вартісні апаратури);

- поширення функціональних можливостей апаратури (забезпечення можливості взаємодії апаратури з автоматизованими інформаційними системами та системами управління рухом; забезпечення можливості

комплексування апаратури з автономними навігаційними системами об'єкта; знаходження кутів орієнтації в просторі, поправок системи курсу та інші);

- спеціалізація апаратури за наступними типами (військова; загального призначення; спеціальна);

- створення уніфікованих функціональних елементів, вузлів, блоків.

Зростаюча привабливість супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) обумовлена їх універсальністю. У рамках лише однієї системи можливе розв'язання великої кількості різноманітних задач. Окрім чисто навігаційних задач обслуговування надводних, наземних, повітряних та космічних об'єктів, СРНС дозволяє вирішувати завдання зв'язку, управління повітряним та морським рухом, здійснювати прив'язку систем єдиного часу (СЄЧ) до системного часу СРНС тощо. Можливе створення комплексів, до складу яких входять СРНС та вже існуючі наземні системи навігації, зв'язку та управління.

Глобальний характер навігаційного забезпечення визначив ряд технічних та організаційних вимог, які викладені в документах міжнародних організацій ІМО та ІАЛА. Тому глобальна СРНС повинна відповідати міжнародним вимогам та мати можливість їх забезпечити. Сертифікація системи повинна здійснюватися з узгодженням держави, яка володіє такою СРНС та готова взяти на себе такі обов'язки по забезпеченню: гарантії можливості довгострокового користування СРНС; низьку собівартість користування системою; публікацію усіх необхідних для споживачів даних системи; здійснення допомоги зацікавленим міжнародним організаціям у підготовці експлуатаційних стандартів. Аналіз основних характеристик нині існуючих СРНС показує, що в повній мірі жодна з них не відповідає усім вимогам. Найбільш близькі до них по своїм характеристикам середньоорбітальні супутникові радіонавігаційні системи ГЛОНАСС та GPS. Ці системи спроможні глобально й безперервно забезпечувати навігацію найбільшого числа об'єктів. Для реалізації вимог до навігаційного забезпечення у повному об'ємі, включаючи вимоги ІМО та рекомендацій ІАЛА, необхідно створити спеціальні системи, які б функціонально доповнювали існуючі СРНС, у тому числі диференційними підсистемами СРНС та засобами контролю цілісності

СРНС. Так, в Україні на цей час відсутні об'єднані національні вимоги до навігаційної апаратури, що використовує СРНС ГЛОНАСС чи СРНС ГЛОНАСС/GPS. Інтереси споживачів потребують, щоб на державному рівні були зафіксовані вимоги до апаратури у вигляді стандартів, які б зобов'язували підприємства, що розробляють навігаційну апаратуру, гарантувати відповідні її характеристики.

Загальними проблемами використання супутникових технологій на борту транспортного засобу є: впровадження в контур управління транспортним засобом; перевірка процедур управління; наявність апаратури, яка спроможна адаптуватися к змінам умов роботи; наявність необхідної геодезичної, гідрографічної та картографічної основи; впровадження наземної навігаційної апаратури на борт іноземних транспортних засобів, які працюють на/над територією України; наявність планування та організації процесу радіонавігаційного забезпечення. У випадку використання у космічній області обслуговування додаються проблеми низької потужності сигналів та значних конструкторських обмежень на вагу елементів та положення антен.

Метою дисертації є розробка математичної моделі для оцінювання характеристик автономної навігації сервісних космічних апаратів на геостаціонарній орбіті за сигналами ГНСС. Об'єктом виступає глобальна навігаційна супутникова система, а предметом є процес забезпечення автономної навігації сервісних космічних апаратів у космічній області обслуговування.

Для досягнення поставленої мети автором виконано наступне:

- удосконалена математична модель радіонавігаційного поля для автономної навігації сервісних космічних апаратів на геостаціонарній орбіті з використанням ГНСС;
- розроблено алгоритм оцінювання доступності та точності автономної супутникової навігації на геостаціонарній орбіті;
- досліджено точність та доступність автономної навігації для масиву позицій на геостаціонарній орбіті за рахунок однієї або спільного

використання декількох ГНСС по сигналам, що проходять крізь основні та бокові пелюстки діаграми спрямованості;

- досліджено вплив геометричного розташування навігаційних супутників на фактори погіршення точності та навігаційні характеристики при використанні ГНСС у локальній точці на геостаціонарній орбіті;

- розроблено та застосовано апаратно-програмний комплекс для напівнатурного дослідження точності та доступності супутників на геостаціонарній орбіті за допомогою приймача на Землі.

Усі вище визначені чинники визначають аргументування та критичне оцінювання запропонованих автором нових рішень порівняно з відомими рішеннями.

Практична значимість та важливість для галузі полягає в створенні теоретико-прикладних основ аналізу та проектування системи автономної навігації сервісних космічних апаратів за сигналами глобальної навігаційної супутникової системи.

Автором обґрунтована принципова та технічна можливість автономної навігації у космічному просторі по сигналам ГНСС, що дозволяє використання супутникових приймачів для сервісних космічних апаратів на геостаціонарній орбіті. При цьому теоретично можливо забезпечити повну доступність навігації з точністю до 100 м при використанні двох сузір'їв ГНСС.

Удосконалена модель радіонавігаційного поля дозволяє оцінювати характеристики точності та доступності для сервісних космічних апаратів у навколосемному просторі. На відміну від стандартної моделі, область використання удосконаленої моделі розширена до космічної області обслуговування.

В роботі досліджено точність та доступність автономної навігації для масиву позицій на геостаціонарній орбіті за рахунок однієї або спільного використання декількох ГНСС по сигналам, що проходять крізь основні та бокові пелюстки діаграми спрямованості. Має практичне значення дослідження впливу геометричного розташування навігаційних супутників на фактори погіршення точності та навігаційні характеристики при використанні

ГНСС у локальній точці на геостаціонарній орбіті. Практичні результати роботи підтверджено актом впровадження у конструкторському бюро акціонерного товариства «НВК «КУРС».

Оцінка змісту дисертації, її завершеність у цілому, відповідність оформлення дисертації вимогам, затвердженим МОН України.

У *вступі* наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовано мету та задачі досліджень, визначено об'єкт, предмет, розкрито зв'язок роботи з науковими планами та програмами, показано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, відзначено особистий внесок автора, наведено дані про апробацію та практичне впровадження, публікації та структуру роботи.

У *першому* розділі на основі опрацьованих літературних джерел проведено аналіз застосування автономної супутникової навігації у навколоземному космічному просторі для сервісних космічних апаратів та прибирання космічного сміття. Розглядаються передмови до розробки орбітального сервісного обслуговування. Здійснено аналіз задач орбітального сервісного обслуговування. При цьому розглядаються як великі космічні об'єкти на орбіті, так й космічні апарати на навколоземних орбітах. Надано класифікацію способів вирішення навігаційної задачі у космосі, а також розподіл навколоземного простору на зони обслуговування. Автором розглянуто радіонавігаційне поле у навколоземному просторі, геосинхронна та геостаціонарна орбіти, а також перспективи розвитку супутникової навігації у космосі. Вирішення зазначених питань є суттю подальшого проведення досліджень, що визначають мету та задачі які вирішуються в дисертаційній роботі.

У *другому* розділі розробляється модель радіонавігаційного поля у зоні знаходження сервісного космічного апарату. В розділі розглянуто особливості побудови складної моделі радіонавігаційного поля у навколоземному просторі та оцінювання орбіт навігаційних супутників. Приділяється увага фіксації часового параметру, визначенню ефемерид супутника, визначенню кутів закриття. Аналіз діаграми спрямованості супутників ГНСС дозволив

сформувані вимоги до прийому сигналу у космічній області обслуговування з використанням різних частот та визначити принципи формування радіонавігаційного поля у космічній області обслуговування.

Третій розділ присвячений розробці алгоритму та графоаналітичної моделі для оцінювання доступності та точності автономної супутникової навігації на геостаціонарній орбіті. Послідовно розглянуто побудова алгоритму, структура алгоритму, функціональні особливості алгоритму, вхідні дані алгоритму. Визначено задіяні системи координат та розглянуто питання оцінювання координат сервісних космічних апаратів та похибок оцінювання псевдодальності. Статистична обробка результатів дозволила сформувані вимоги до використання мульти-ГНСС та оцінити доступність та точність, результати роботи алгоритму. Запропоновано графоаналітичну модель інтегрального оцінювання якості навігації на геостаціонарній орбіті.

У *четвертому* розділі вирішуються задачі по дослідженню якості автономної навігації для масиву позицій на геостаціонарній орбіті. Здійснено аналіз вхідних даних для оцінювання характеристик автономної навігації на геостаціонарній орбіті. Розглянуто питання: використання сигналів основного пелюстка ДС сузір'я GPS для знаходження місцеположення користувача; використання сигналів основного пелюстка ДС сузір'я GPS та ГЛОНАСС для знаходження місцеположення користувача; використання сигналів бокових та основного пелюсток сузір'я GPS для знаходження місцеположення користувача; використання сигналів бокових та основного пелюсток сузір'їв GPS та ГЛОНАСС для знаходження місцеположення користувача. Також здійснено аналіз спільного використання сузір'їв у межах основних пелюсток ДС.

У *п'ятому* розділі вирішується задача дослідження впливу геометричного розташування навігаційних супутників при використанні ГНСС у локальній точці на геостаціонарній орбіті. Здійснено аналіз симуляції даних GPS у різних межах: симуляція даних GPS у межах основної пелюстки діаграми спрямованості супутника для конкретної точки; симуляція даних GPS та ГЛОНАСС у межах основної пелюстки діаграми спрямованості супутника для

конкретної точки; симуляція даних GPS у межах основної та бокових пелюсток діаграми спрямованості супутника для конкретної точки; симуляція даних GPS та ГЛОНАСС у межах основної та бокових пелюсток діаграми спрямованості супутника для конкретної точки. Запропоновано апаратно-програмний комплекс для перевірки можливостей системи для моделювання параметрів навігації супутників на геостаціонарній орбіті за допомогою програмно-апаратного комплексу.

В роботі розроблено моделі, методи, методики і алгоритми аналізу та управління процесом прийняття рішення про стан елементів телекомунікаційної мережі, що дозволяє удосконалити моделі для оцінювання характеристик автономної навігації сервісних космічних апаратів на геостаціонарній орбіті за сигналами ГНСС.

Оцінка мови та стилю викладення дисертації і автореферату. Мова та стиль дисертації та автореферату свідчать про вміння автора аргументовано викладати свої думки та, у цілому, відповідають вимогам МОН України. Сформульовані у дисертаційній роботі основні положення, висновки та рекомендації викладені у логічній послідовності та доказовій формі, що значно сприяє усвідомленню думок автора. Всі розділи дисертації мають внутрішню єдність і завершеність. Змістовне наповнення підрозділів роботи відповідає змісту визначених розділів.

Отримані підсумкові результати дисертації співпадають із загальною метою і конкретними науковими завданнями, сформульованими у вступі. В цілому, дисертаційна робота сприймається як закінчена наукова праця, що містить нові наукові результати.

Підтвердження повноти викладу основних результатів дисертації в наукових фахових виданнях. Наукова новизна безсумнівна та достатня для кандидатської дисертації. Основні наукові і практичні результати, що отримані в ході дисертаційного дослідження, опубліковано з необхідною повнотою в 20 наукових працях, з яких 6 статей у фахових виданнях (всі включено до міжнародних науко метричних баз Web of Science, Index Copernicus

International, DOAJ, РИНЦ) та 15 публікацій у матеріалах доповідей науково-технічних конференцій у період 2014-2017р. Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Основний зміст дисертації викладений на 160 сторінках друкованого тексту. Робота містить 94 рисунка та 13 таблиць. Додатки розміщені на 4 сторінках.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації. Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертації і дає повне уявлення про отримані результати дослідження та їх наукову новизну та практичну значимість.

Відмічаю в цілому науково-коректний стиль викладення матеріалів дисертації. Назва роботи відповідає самій роботі, яка відповідає паспорту спеціальності 05.22.13 – навігація та управління рухом.

Недоліки

У якості недоліків у роботі потрібно відмітити наступне.

1. У якості мети досліджень автором визначено удосконалення моделі для оцінювання характеристик автономної навігації сервісних космічних апаратів на геостаціонарній орбіті за сигналами ГНСС. При цьому в підрозділі “1.10 Постановка задачі дослідження” (стор.36) визначається, що об'єктом виступає глобальна навігаційна супутникова система, а предметом є процес забезпечення автономної навігації сервісних космічних апаратів у космічній області обслуговування (стор.37). При цьому математичної формалізації задачі досліджень не наведено.

2. В розділі 2 модель радіонавігаційного поля для автономної супутникової навігації сервісних космічних апаратів на геостаціонарній орбіті у області космічного обслуговування представлена як сукупність наступних компонентів: оцінка орбіт навігаційних супутників; фіксація часового параметру; визначення ефемерид супутників; визначення кутів закриття; характеристики діаграми спрямованості антени навігаційних супутників з урахуванням кутів закриття; прийом сигналів у космічній області

обслуговування; використання різних частот при передачі сигналів з навігаційних супутників; оцінка наявності радіонавігаційного поля у космічній області обслуговування. Ці процедури представлено досить науково коректно, однак, вважаю, було доцільне саме модель формалізувати математично у вигляді відповідних множин.

3. При розгляді принципів формування радіонавігаційного поля у космічній області обслуговування (підрозділ 2.9, стор.54) вплив сонячної радіації також не було досліджено, хоча, як відомо сонячна радіація може мати значний вплив на електронне обладнання у певні проміжки часу.

4. При формуванні алгоритму оцінювання доступності та точності автономної супутникової навігації на геостаціонарній орбіті (розділ 3, стор. 57, рис. 3.1) представлена блок-схема алгоритму не передбачає зворотних зв'язків, корекцій, уточнень, врахувань додаткових факторів, наприклад у випадку коли точність не задовольняє вимогам.

5. В підрозділі 3.9 (стор.70) “Використання мульти-ГНСС” наведено зайвий матеріал для підтвердження актуальності досліджень, - інформація про Дев'яте засідання Міжнародного комітету з глобальних навігаційних супутникових систем (ICG - 9), відбулось у Празі з 10 по 14 листопада 2014 року.

6. При розгляді дослідження впливу геометричного розташування навігаційних супутників при використанні ГНСС у локальній точці на геостаціонарній орбіті (Розділ 5) розглянуто процедури: симуляція даних GPS у межах основної пелюстки діаграми спрямованості супутника для конкретної точки; симуляція даних GPS та ГЛОНАСС у межах основної пелюстки діаграми спрямованості супутника для конкретної точки; симуляція даних GPS у межах основної та бокових пелюсток діаграми спрямованості супутника для конкретної точки; симуляція даних GPS та ГЛОНАСС у межах основної та бокових пелюсток діаграми спрямованості супутника для конкретної точки. Однак загальних системних узагальнювальних висновків, на жаль, не зроблено.

7. В роботі присутні окремі стилістичні помилки, наприклад:

- будь-який технічний засіб має свій строк експлуатації,... важко собі уявити сучасні прилади без можливості їх ремонту або обслуговування. (стор.20);

- підрозділи можливих задач (стор.23);

- одним із пріоритетних методів автономної навігації може бути технологія (стор.24);

- засмічення космосу прогресує (стор.25);

- Дуже важливо виводити відпрацьовані КА та ракети-носії за гравітаційне поле Землі задля зменшення небезпеки їх зіткнення (стор.28);

- фільтрації видимих супутників (стор.82);

- нарисовано доступність (стор.121);

- значне покращення точності, ...досить низьку доступність (стор.123)

Відсутні висновки до розділу 1, висновки до розділу 4 (стор. 124) містять таблиці, а бажано було надати тільки змістовний аналіз, тобто результати.

У підрозділі 3.12 “Графоаналітична модель інтегрального оцінювання якості навігації на геостаціонарній орбіті” (стор 85) саму модель представлено на рис 3.11, але аналітику цього представлення не надано.

Вказані недоліки не знижують науковий рівень дисертації “Автономна навігація сервісних космічних апаратів за сигналами глобальної навігаційної супутникової системи” та не впливають на позитивне враження від дисертації, як кваліфікаційну роботу, в цілому, завершеність якої не викликає сумніву. Робота містить висунуті автором науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, наукові положення, особистий внесок здобувача в науку.

Висновок.

Вивчення дисертаційної роботи, автореферату та опублікованих здобувачем наукових праць дозволяє стверджувати, що дисертаційна робота виконана на актуальну тему, представляє собою логічно завершене наукове дослідження, що містить нові обґрунтовані наукові результати, які в сукупності є розв'язанням наукового завдання, що має істотне значення для певної галузі

науки, та відповідає вимогам п. 9, 11, 12-14 «Порядку присудження наукових ступенів» до кандидатських дисертацій, а здобувач **Шишков Федір Олександрович** заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом.

Офіційний опонент
проректор з наукової роботи
доктор технічних наук, професор,
Заслужений діяч науки і техніки України,



О.А.Машков

О.А.Машков
21 вересня 2018р