

Державний університет інфраструктури та технологій
Міністерство освіти та науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Пліта Леонід Леонідович

УДК 789.605:278

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕЦІ
СУДНОВОДІННЯ НА ОСНОВИ ЛОКАЛЬНОЇ РАДІОНАВІГАЦІЙНОЇ
СИСТЕМИ З ГНУЧКОЮ СТРУКТУРОЮ**

Спеціальність 271 – Річковий та морський транспорт

Галузь знань 27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Л. Л. Пліта

Науковий керівник:
Богом'я Володимир Іванович,
заслужений винахідник України,
доктор технічних наук, професор

АНОТАЦІЯ

Пліта Л.Л. Моделі та методи підвищення безпеці судноводіння на основі локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 271 – Річковий та морський транспорт. – Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, 2021.

Морська доктрина України на період до 2035 року визначає пріоритетні напрямки розвитку річкового та морського транспорту, його роль в економіки держави та підкреслює те, що «...формування і реалізація ефективної державної морської політики сприятиме подальшому посиленню позицій України як морської держави, створенню сприятливих умов для досягнення цілей та розв’язання завдань з розвитку морської діяльності».

Дослідження, яке виконане в дисертації свідчить про те, що показники якості перевезень пасажирів та вантажів, рівень безаварійного судноводіння продовжують покращуватися. Особлива увага приділяється саме заходам забезпечення заданого рівня безаварійності. Значна роль в цьому напрямку – ефективне рішення завдань навігаційного забезпечення. Це ще більш підкреслює актуальність наукових досліджень з метою підвищення ефективності морських та річкових транспортних засобів за рахунок використання оперативної та достовірної навігаційної інформації.

На теперішній час для забезпечення гарантованого рівня достовірності, точності та оперативності навігації використовують прогресивні технологічні рішення на основі супутникової навігації. Аналіз закордонного та вітчизняного досвіду розробки та впровадження систем навігації, які використовують GNSS свідчить про можливість значного підвищення їх ефективності за рахунок розвитку математичного забезпечення та використання так званих локальних радіонавігаційних систем. Найбільш

актуальним в цьому напрямку є використання локальних (псевдосупутникових) радіонавігаційних систем які працюють в форматі GNSS-сигналів саме зі змінною або гнучкою структурою. В таких системах радіонавігаційні точки є мобільними, а це дає змогу оперативне забезпечити задану точність навігації в окремому районі судноводіння.

Таким чином, при вирішенні проблематики розвитку локальних (псевдосупутникових) радіонавігаційних систем які працюють в форматі GNSS-сигналів, актуальним є наукове завдання удосконалення існуючих та розробки нових моделей та методів підвищення безпеці судноводіння на основі локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою, вирішенню цього завдання і присвячена дана дисертаційна робота.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

удосконалено математичну модель локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою функціонуючою у форматі GNSS-сигналів, яка на відміну від існуючих враховує мобільність розташування радіонавігаційних точок (псевдолітів); це дозволяє значно покращити адекватність моделі та якість процедури синтезу структури системи;

вперше розроблено метод синтезу просторової структури локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою, який базується на комплексному врахованні геометричного чиннику та динаміки зміни координат мобільних радіонавігаційних точок (псевдолітів); застосування методу дозволяє забезпечити задану точність навігації та відповідний рівень безпеці судноводіння;

вперше розроблено метод програмного управління змінною структурою локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою, який ґрунтується на застосуванні комбінаторно-імовірнісної математичної моделі та алгоритму оптимізації за критерієм мінімуму вартості системи при визначеній імовірності її функціонування з заданою якістю надання навігаційних послуг, що дає змогу зменшити кількість системоутворюючих

елементів системи та значно покращує показники оперативності за рахунок зменшення кількості операцій та використання нових принципів обробки апріорної інформації.

Практичне значення одержаних результатів в тому, що їх реалізація доцільна в математичному та програмному забезпеченні, як складової локальної радіонавігаційної системи, яка працюють в форматі GNSS-сигналів зі змінною або гнучкою структурою. Застосування запропонованих моделей і методів дозволяє підвищити точність навігації в деяких випадках до 25 %. При цьому, за результатами математичного моделювання, можливе підвищення ймовірності виконання безаварійного судноводіння до 10 % за рахунок впровадження на практиці.

Результати дисертаційних досліджень реалізовані у ДП «Укрводшлях» при математичному моделюванні лоцманських проведень суден на р.Дніпро (акт від 07.06.2021 р. №07/06-23); а також в навчальному процесі Державного університету інфраструктури та технологій (акт від 27.11.2020 № 15/а) під час створення курсу лекцій з дисципліни «Радіонавігаційні прилади та системи».

Наведені нові науково-обґрунтовані практичні рекомендації щодо перспективної локальної радіонавігаційної системи зі гнучкою структурою дозволяють розглянути можливість використання даних підходів у інших системах транспортних засобів, а також значно покращити систему навігаційного забезпечення річкового та морського транспорту.

Ключові слова: безпека, судноводіння, навігація, структура, геометричний чинник.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Пліта Л.Л., Шевченко А.П., Дакі О.А. Особливості організації процесу експлуатації засобів річкового та морського транспорту. Новітні технології. 2019. Вип. 3(10). С. 6–12.

2. Пліта Л.Л., Богом'я В.І., Давидов В.С., Доронін В.В. Деякі питання підвищення безпеки мореплавства великотоннажних суден. Водний транспорт. 2020. Вип.3(31). С.67–73.

3. Пліта Л.Л., Шевченко А.П. Аналіз методів прогнозування технічного стану засобів водного транспорту. Водний транспорт. 2020. Вип.1(29). С.23–30.

4. Пліта Л.Л., Бойко С.М. Методи прогнозування довговічності обладнання засобів річкового та морського транспорту в умовах експлуатації за технічним станом. Slovak international scientific journal. 2020. Vol.2. No.45. pp.24-30.

5. Пліта Л.Л., Богом'я В.І., Писанко А.Г. Аналіз систем керування судном та особливостей їх експлуатації. Водний транспорт. 2021. Вип.1(32). С.37–41.

6. Пліта Л.Л., Бажак О.В. Методи підвищення безпеки судноводіння на основі локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою. Новітні технології. 2020. Вип. 1(11). С. 65–78.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Пліта Л.Л., Штрибець В.В., Богом'я В.І. Дослідження фільтрів для спектрального аналізу випадкових сигналів двигунів засобів водного транспорту. II Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Навчально-наукового інституту Морського флоту Одеського національного морського університету. Одеса, 2020. С.169–173.

8. Пліта Л.Л., Богом'я В.І. Перспективні шляхи побудови систем керування судна з використанням комплексної автоматизації Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції «Дніпровські читання 2020» – 23 грудня 2020 р, м.Київ. С.79–80. 8

9. Пліта Л.Л., Бажак О.В. Модель інтелектуальної системи керування судном Тези доповідей одинадцятої міжнародної науково-технічної

конференції 8 – 9 квітня 2021 року. Том 1: секції 1, 2. Баку – Харків – Київ – Жиліна – 2021. С.18.

10. Пліта Л.Л., Богом'я В. І., Зазірний А. А. Розроблення адаптивних систем керування судном в складних умовах. III Міжнародна науко-во-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Навчально-наукового інституту Морського флоту Одеського національного морського університету. Одеса. 2021. С.209–213.

ANOTATION

Plita L.L. Models and methods for improving navigation safety based on a local radio navigation system with a flexible structure. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 271 - River and sea transport. – State University of Infrastructure and Technology, Kyiv, 2021.

The Maritime Doctrine of Ukraine for the period up to 2035 identifies priority areas for the development of river and maritime transport, its role in the state's economy and emphasizes that "the formation and implementation of effective state maritime policy will further strengthen Ukraine's position as a maritime state. goals and solutions for the development of maritime activities. "

The research performed in her dissertation shows that the indicators of the quality of passenger and cargo transportation, the level of accident-free navigation continue to improve. Particular attention is paid to measures to ensure a given level of safety. A significant role in this direction is the effective solution of navigation tasks. This further emphasizes the relevance of research to improve the efficiency of sea and river vehicles through the use of operational and reliable navigational information.

At present, advanced technological solutions based on satellite navigation are used to ensure a guaranteed level of reliability, accuracy and efficiency of

navigation. Analysis of foreign and domestic experience in the development and implementation of navigation systems that use GNSS indicates the possibility of significantly increasing their efficiency through the development of mathematical software and the use of so-called local radio navigation systems. The most relevant in this direction is the use of local (pseudo-satellite) radio navigation systems that operate in the format of GNSS-signals with a variable or flexible structure. In such systems, radio navigation points are mobile, which allows you to quickly ensure the specified accuracy of navigation in a particular area of navigation.

Thus, in solving the problem of development of local (pseudo-satellite) radio navigation systems operating in the format of GNSS-signals, the scientific task of improving existing and developing new models and methods to improve safety of navigation on the basis of local radio navigation system with a flexible structure is dedicated to this problem. given dissertation work.

The scientific novelty of the obtained results is that:

improved mathematical model of the local radio navigation system with a flexible structure operating in the format of GNSS-signals, which, in contrast to the existing ones, takes into account the mobility of the location of radio navigation points (pleudolites); this significantly improves the adequacy of the model and the quality of the system structure synthesis procedure;

for the first time a method of synthesis of the spatial structure of a local radio navigation system with a flexible structure was developed, which is based on a complex consideration of the geometric factor and the dynamics of changes in the coordinates of mobile radio navigation points (pleudolites); application of the method allows to provide the set accuracy of navigation and the corresponding level of safety of navigation;

For the first time a method of software control of variable structure of local radionavigation system with flexible structure was developed, which is based on application of combinatorial-probabilistic mathematical model and algorithm of optimization by criterion of minimum cost of system at certain probability of its

functioning. systems and significantly improves efficiency by reducing the number of operations and the use of new principles of a priori information processing.

The practical significance of the obtained results is that their implementation is expedient in mathematical and software, as a component of the local radio navigation system, which work in the format of GNSS-signals with variable or flexible structure. The use of the proposed models and methods can increase the accuracy of navigation in some cases up to 25%. At the same time, according to the results of mathematical modeling, it is possible to increase the probability of accident-free navigation to 10% due to the implementation in practice.

The results of dissertation research were implemented in SE "Ukrvodshlyakh" in mathematical modeling of pilotage of ships on the Dnieper River (act of 07.06.2021 №07 / 06-23); as well as in the educational process of the State University of Infrastructure and Technology (act of 27.11.2020 № 15 / a) during the creation of a course of lectures on the disciplines "Radio navigation devices and systems".

The new scientifically substantiated practical recommendations for a promising local radio navigation system with a flexible structure allow us to consider the possibility of using these approaches in other vehicle systems, as well as significantly improve the navigation system of river and sea transport.

Key words: safety, navigation, navigation, structure, geometric factor.

LIST OF BUILDER PUBLICATIONS

Scientific papers, in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Plita L.L., Shevchenko A.P., Daki O.A. Osoblyvosti orhanizatsiyi protsesu ekspluatatsiyi zasobiv richkovoho ta mors'koho transportu. Novitni tekhnolohiyi. 2019. Vyp. 3(10). pp. 6–12.

2. Plita L.L., Bohom'ya V.I., Davydov V.S., Doronin V.V. Deyaki pytannya pidvyshchennya bezpeky moreplavstva velykotonnazhnykh suden. Vodnyy transport. 2020. Vyp.3(31). pp.67–73.

3. Plita L.L., Shevchenko A.P. Analiz metodiv prohnozuvannya tekhnichnoho stanu zasobiv vodnoho transportu. Vodnyy transport. 2020. Vyp.1(29). pp.23–30.

4. Plita L.L., Boyko S.M. Metody prohnozuvannya dovhovichnosti obladnannya zasobiv richkovoho ta mors'koho transportu v umovakh ekspluatatsiyi za tekhnichnym stanom. Slovak international scientific journal. 2020. Vol.2. No.45. pp.24-30.

5. Plita L.L., Bohom"ya V.I., Pysanko A.H. Analiz system keruvannya sudnom ta osoblyvostey Yikh ekspluatatsiyi. Vodnyy transport. 2021. Vyp.1(32). pp.37–41.

6. Plita L.L., Bazhak O.V. Metody pidvyshchennya bezpeky sudnovodinnya na osnovy lokal'noyi radionavihatsiyanoi systemy z hnuchkoyu strukturoyu. Novitni tekhnolohiyi. 2020. Vyp. 1(11). P. 65–78.

Scientific works certifying the approbation of the dissertation materials:

7. Plita L.L., Shtrybets' V.V., Bohom'ya V.I. Doslidzhennya fil'triv dlya spektral'noho analizu vypadkovykh syhnaliv dvyhuniv zasobiv vodnoho transportu. II Mizhnarodna naukovo-praktychna mors'ka konferentsiya kafedry SEU i TE Navchal'no-naukovoho instytutu Mors'koho flotu Odes'koho natsional'noho mors'koho universytetu. Odesa, 2020. P.169–173.

8. Plita L.L., Bohom"ya V.I. Perspektyvni shlyakhy pobudovy system keruvannya sudna z vykorystannyam kompleksnoyi avtomatyzatsiyi Zbirnyk materialiv mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Dniprovs'ki chytannya 2020» – 23 hrudnya 2020 r, m.Kyiv. P.79–80.

9. Plita L.L., Bazhak O.V. Model' intelektual'noyi systemy keruvannya sudnom Tezy dopovidey o dynadtsyatoyi mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi 8 – 9 kvitnya 2021 roku. Tom 1: sektsiyi 1, 2. Baku – Kharkiv – Kyiv – Zhylyna – 2021. P.18.

10. Plita L.L., Bohom"ya V. I., Zazirnyy A. A. Rozroblennya adaptyvnykh system keruvannya sudnom v skladnykh umovakh. III Mizhnarodna nauko-vo-praktychna mors'ka konferentsiya kafedry SEU i TE Navchal'no-naukovoho instytutu Mors'koho flotu Odes'koho natsional'noho mors'koho universytetu. Odesa. 2021. P.209–213.

ЗМІСТ

| | |
|--|-----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 13 |
| ВСТУП..... | 14 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДОСВІДУ ЗАСТОСУВАННЯ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕЦІ СУДНОВОДІННЯ | 20 |
| 1.1. Аналіз існуючих та перспективних багатопозиційних радіонавігаційних систем | 20 |
| 1.2. Визначення факторів, що впливають на ефективність функціонування локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою... .. | 37 |
| 1.3. Оцінка безпеки судноводіння від точності навігації | 41 |
| 1.4. Постановка наукового завдання..... | 44 |
| Висновки до 1 розділу | 48 |
| РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЛОКАЛЬНОЇ РАДІОНАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ З ГНУЧКОЮ СТРУКТУРОЮ..... | 50 |
| 2.1. Формалізація задачі синтезу локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою | 50 |
| 2.3. Модель локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою | 60 |
| Висновки до 2-го розділу..... | 69 |
| РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДУ СИНТЕЗУ ПРОСТОРОВОЇ СТРУКТУРИ ЛОКАЛЬНОЇ РАДІОНАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТА ПРОГРАМНОГО УПРАВЛІННЯ ЇЇ ГНУЧКОЮ СТРУКТУРОЮ..... | 71 |
| 3.1. Вибір методу синтезу радіонавігаційної системи з гнучкою структурою | 71 |
| 3.2. Розробка методу синтезу просторової структури локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою | 82 |
| 3.3. Метод програмного управління змінною структурою локальної радіонавігаційної системи | 108 |

| | |
|---|-----|
| Висновки до 3-го розділу | 116 |
| РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ..... | 119 |
| 4.1. Порівняльна оцінка варіантів структури радіонавігаційної системи..... | 119 |
| 4.2. Постановка задачі оцінки ефективності локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою | 122 |
| 4.3. Оцінка достовірності результатів статистичного моделювання . | 124 |
| Висновки до 4-го розділу | 131 |
| ВИСНОВКИ | 134 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 137 |
| Додаток А..... | 151 |
| Додаток Б | 153 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

РНТ – радіонавігаційна точка;

РНС – радіонавігаційна система;

ПСРНС – псевдосупутникова радіонавігаційна систем;

СРНС – супутникова радіонавігаційна систем;

ТО – технічне обслуговування;

ТС – технічний стан.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. В сучасних умовах річковий та морський транспорт, як інфраструктурна галузь, має розвиватися швидкими темпами. Морська доктрина України на період до 2035 року визначає пріоритетні напрямки розвитку річкового та морського транспорту, його роль в економіці держави та підкреслює те, що «...формування і реалізація ефективної державної морської політики сприятиме подальшому посиленню позицій України як морської держави, створенню сприятливих умов для досягнення цілей та розв'язання завдань з розвитку морської діяльності».

Проблеми розвитку водного транспорту України, зокрема забезпечення безпеки судноводіння розглядали та досліджували в своїх працях такі вчені: В.В. Панін, М.М. Цимбал, Б.В. Васильєв, Ю.Г. Дейнего, О.А. Оніщенко, С.І. Сербін, О.М. Тимошук, В.І. Богом'я, Д.І. Севастєєв, С.Р. Смирнов та інші.

Дослідження, яке виконане в дисертації свідчить про те, що показники якості перевезень пасажирів та вантажів, рівень безаварійного судноводіння продовжують покращуватися. Особлива увага приділяється саме заходам забезпечення заданого рівня безаварійності. Значна роль в цьому напрямку – ефективне рішення завдань навігаційного забезпечення. Це ще більш підкреслює актуальність наукових досліджень з метою підвищення ефективності морських та річкових транспортних засобів за рахунок використання оперативної та достовірної навігаційної інформації.

На теперішній час для забезпечення гарантованого рівня достовірності, точності та оперативності навігації використовують прогресивні технологічні рішення на основі супутникової навігації. Аналіз закордонного та вітчизняного досвіду розробки та впровадження систем навігації, які використовують GNSS свідчить про можливість значного підвищення їх

ефективності за рахунок розвитку математичного забезпечення та використання так званих локальних радіонавігаційних систем. Найбільш актуальним в цьому напрямку є використання локальних (псевдосупутникових) радіонавігаційних систем які працюють в форматі GNSS-сигналів саме зі змінною або гнучкою структурою. В таких системах радіонавігаційні точки є мобільними, а це дає змогу оперативне забезпечити задану точність навігації в окремому районі судноводіння.

Таким чином, при вирішенні проблематики розвитку локальних (псевдосупутникових) радіонавігаційних систем, які працюють в форматі GNSS-сигналів, актуальним є наукове завдання удосконалення існуючих та розробки нових моделей та методів підвищення безпеці судноводіння на основі локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою; вирішенню цього завдання і присвячена дана дисертаційна робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана відповідно до Морської доктрини України на період до 2035 року, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 7 жовтня 2009 р. № 13074 та її нової редакції, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 18 грудня 2018 р.; Програми економічних реформ з урахуванням основних напрямів розвитку, визначених у Транспортній стратегії України на період до 2020 р., затвердженій розпорядженням КМУ від 20.10.2010 р. № 2174-р. в інтересах науково-дослідної роботи «Розробка комплексного показника якості пасажирських круїзних суден змішаного плавання в системі безпересадкових круїзних перевезень між портами Дніпра, Чорного моря та Дунаю» (номер держреєстрації 0116U03946), яка виконувалася у Київській державній академії водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного, у якій автор приймала участь як виконавець. А також у відповідності до плану наукової роботи та науково-технічної діяльності Державного університету інфраструктури та технологій.

Мета і задачі дослідження.

Мета дослідження – підвищення безпеки судноводіння за рахунок впровадження запропонованих моделей та методів.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні **часткові завдання** дослідження:

- проаналізувати залежність безпеки судноводіння від ефективності навігації;
- дослідити сучасні та перспективні радіонавігаційні системи;
- розробити моделі та методи підвищення безпеці судноводіння на основі локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою;
- розробити рекомендації щодо застосування запропонованих наукових результатів. Перевірити достовірність розроблених моделей та методів.

Об'єкт дослідження – процес судноводіння з використанням інформації від локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою..

Предмет дослідження – моделі та методи синтезу структури локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою..

Методи досліджень. Для досягнення поставленої в роботі мети використано методи дослідження на основі системного підходу з застосуванням математичних моделей і методів дискретної математики, теорії ймовірностей та теорії супутникових радіонавігаційних систем. Для виявлення наукового завдання використано системний підхід. Методика проведення експерименту та перевірки достовірності розроблених наукових положень реалізована на основі методів комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що в дисертаційній роботі:

удосконалено математичну модель локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою функціонуючою у форматі GNSS-сигналів, яка на відміну від існуючих враховує мобільність розташування радіонавігаційних

точок (псевдолітів); це дозволяє значно покращити адекватність моделі та якість процедури синтезу структури системи;

вперше розроблено метод синтезу просторової структури локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою, який базується на комплексному врахованні геометричного чиннику та динаміки зміни координат мобільних радіонавігаційних точок (псевдолітів); застосування методу дозволяє забезпечити задану точність навігації та відповідний рівень безпеці судноводіння;

вперше розроблено метод програмного управління змінною структурою локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою, який ґрунтується на застосуванні комбінаторно-імовірнісної математичної моделі та алгоритму оптимізації за критерієм мінімуму вартості системи при визначеній імовірності її функціонування з заданою якістю надання навігаційних послуг, що дає змогу зменшити кількість системоутворюючих елементів системи та значно покращує показники оперативності за рахунок зменшення кількості операцій та використання нових принципів обробки апріорної інформації.

Практичне значення одержаних результатів.

Практичне значення одержаних результатів в тому, що їх реалізація доцільна в математичному та програмному забезпеченні, як складової локальної радіонавігаційної системи, яка працюють в форматі GNSS-сигналів зі змінною або гнучкою структурою. Застосування запропонованих моделей і методів дозволяє підвищити точність навігації в деяких випадках до 25 %. При цьому, за результатами математичного моделювання, можливе підвищення ймовірності виконання безаварійного судноводіння до 10 % за рахунок впровадження на практиці.

Результати дисертаційних досліджень реалізовані у ДП «Укрводшлях» при математичному моделюванні лоцманських проведень суден на р.Дніпро (акт від 07.06.2021 р. №07/06-23); а також в навчальному процесі Державного

університету інфраструктури та технологій (акт від 27.11.2020 № 15/а) під час створення курсу лекцій з дисципліни «Радіонавігаційні прилади та системи».

Наведені нові науково-обґрунтовані практичні рекомендації щодо перспективної локальної радіонавігаційної системи зі гнучкою структурою дозволяють розглянути можливість використання даних підходів у інших системах транспортних засобів, а також значно покращити систему навігаційного забезпечення річкового та морського транспорту.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційних досліджень отримані автором особисто. В роботах, опублікованих у співавторстві, автору належить: у [1] аналіз особливостей організації процесу експлуатації засобів річкового та морського транспорту; у [2] обґрунтування рекомендацій щодо підвищення безпеки мореплавства великотоннажних суден; у [3] аналіз методів прогнозування технічного стану засобів водного транспорту; у [4] аналіз методів прогнозування довговічності обладнання засобів річкового та морського транспорту в умовах експлуатації за технічним станом; у [5] аналіз фільтрів для спектрального аналізу випадкових сигналів двигунів.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, які отримані у ході виконання дисертаційної роботи, доповідалися на міжнародній та всеукраїнській науково-технічних конференціях, а також на засіданнях кафедри **судноводіння ДУІТ: II та III Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Навчально-наукового інституту Морського флоту Одеського національного морського університету. Одеса, 2020 рік, IX міжнародної науково-технічної конференції 8 – 9 квітня 2021 року, Баку – Харків – Київ – Жиліна.**

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи відображені у 6 наукових працях, серед них: 5 статей, опублікованих у співавторстві у збірниках наукових праць, що входять до переліку видань, дозволених МОН України для публікацій результатів досліджень з технічних наук (у тому

числі 1 у періодичному науковому виданні держави, яка входить до Європейського Союзу), 4 матеріалах науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація загальним обсягом 154 сторінок машинописного тексту складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел з 109 найменувань. Дисертація містить 34 рисунки. Ілюстрації, таблиці, перелік використаних джерел та додаток займають 18 сторінок тексту.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДОСВІДУ ЗАСТОСУВАННЯ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕЦІ СУДНОВОДІННЯ

1.1. Аналіз існуючих та перспективних багатопозиційних радіонавігаційних систем

Локальна радіонавігаційна система з гнучкою структурою, яка функціонує в форматі GNSS-сигналів (в літературі подібні системи мають назву псевдосупутникові радіонавігаційні системи) відносяться до класу багатопозиційних систем радіонавігації, тобто таких, які складаються з сукупності рознесених у просторі та функціонально пов'язаних між собою радіонавігаційних точок (РНТ). У зв'язку з тим, що псевдосупутникові системи отримали розвиток на основі та в результаті удосконалення багатопозиційних радіонавігаційних систем, проаналізуємо їх з метою дослідження особливостей побудови та функціонування. До зазначеного класу систем відносяться радіотехнічні системи дальньої навігації (РСДН), радіотехнічні системи ближньої навігації (РСБН) та супутникові радіонавігаційні системи (рис. 1.1) [10, 80–83].

Виконаємо аналіз характеристик сучасних багатопозиційних радіонавігаційних систем.

Радіотехнічні системи дальньої навігації призначені для визначення місцезнаходження споживачів на відстанях до 1500 км і більше та складаються з мережі опорних станцій, що розташовані у визначених точках на поверхні Землі, і бортового обладнання (апаратури споживача). Найбільш відомими та розповсюдженими є системи Loran-C, РСДН-20 “Маршрут”, РСДН-3 “Тропік”, РСДН-4 “Чайка”, РСДН-10 “Тропік-2”.

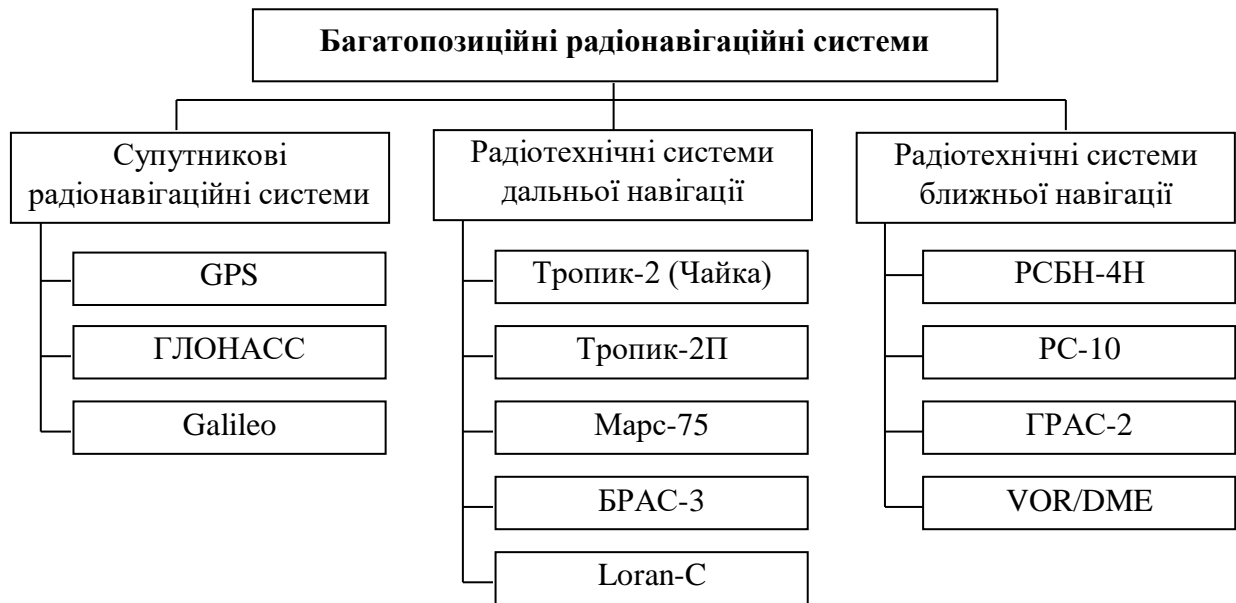
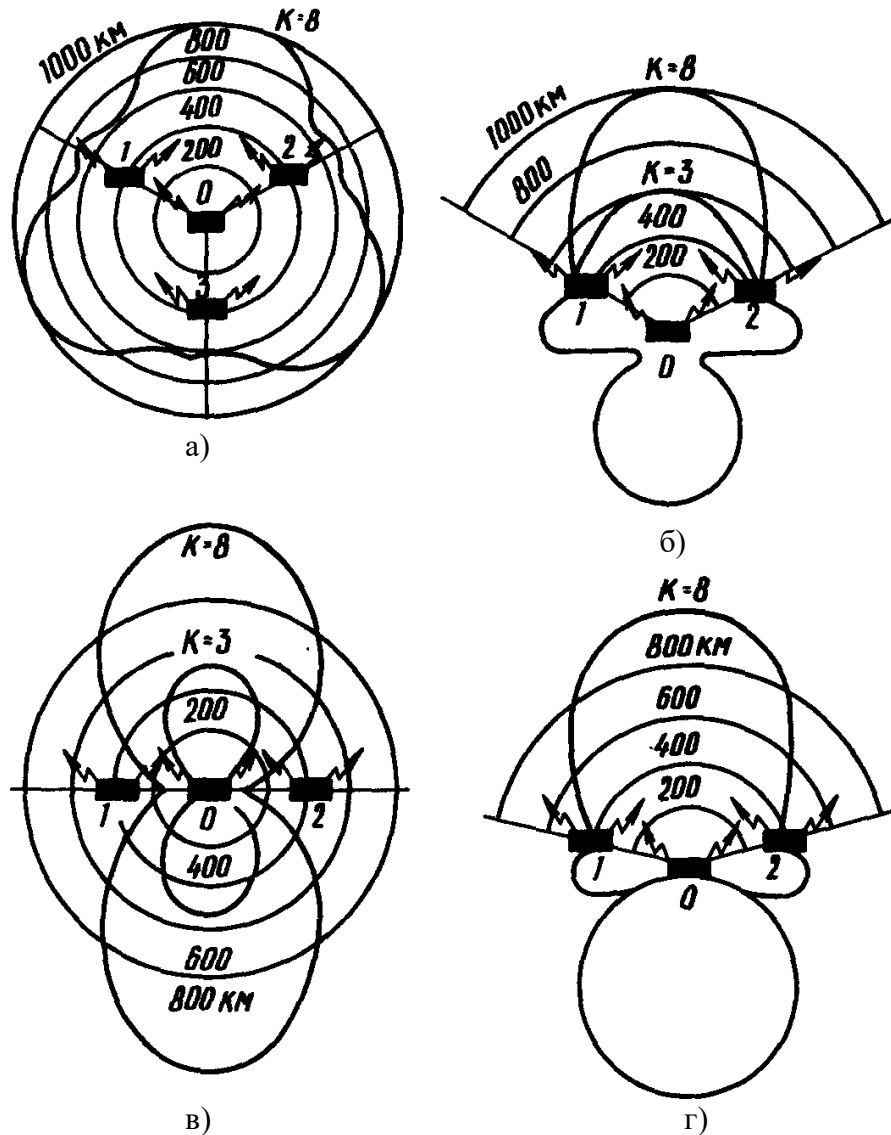


Рисунок 1.1 – Класифікація сучасних багатопозиційних РНС

Стационарні та мобільні РСДН являють собою великі за розмірами, потужні радіовипромінюючі комплекси зі значними площами антенних полів. Так, наприклад, РСДН-10 базується на 11 автомобілях, висота веж антенних систем сягає 50 м, а потужність випромінювання – 10 кВт. Комплекс Loran-C – стаціонарний, займає декілька будівель, висота антенного поля до 400 м, а потужність випромінювання – до 4 МВт. Ці системи використовують далекомірний та різницево-далекомірний (гіперболічний) метод визначення місцезнаходження на основі імпульсних, імпульсно-фазових та фазових вимірювань радіонавігаційних параметрів [14, 25, 81, 90, 103].

Найбільш перспективною з РСДН для використання вважається система РСДН-10 [18]. Для здійснення радіонавігаційного забезпечення розгортається одна ведуча та декілька ведених опорних наземних станцій. Навігація споживачів здійснюється за даними вимірювань відносно трьох опорних радіонавігаційних точок. Ведені станції розташовуються на відстані до 400–600 км від ведучої. Місця розташування опорних станцій РСДН-10 визначаються конфігурацією робочих зон, які обмежуються лінією заданої точності визначення координат споживача. Конфігурація робочих зон

залежить від базового кута та відстаней між станціями. Якщо до складу мережі входить більше трьох станцій, то робоча зона синтезується з робочих зон окремих трійок станцій. При здійсненні навігаційних визначень у таких зонах обирається та трійка станцій, яка забезпечує найвищу точність. Характерні просторові структури та відповідні їм конфігурації робочих зон РСДН зображені на рис. 1.2.



K – геометричний фактор

Рисунок 1.2 – Робочі зони РСДН при типовому розташуванні станцій:

- а) кількість станцій - 4, базові кути 120° ;
- б) кількість станцій - 3, базовий кут 120° ;
- в) кількість станцій - 3, базовий кут 180° ;
- г) кількість станцій - 3, базовий кут 150° .

З метою здійснення безперервного радіонавігаційного забезпечення у колишньому СРСР були розгорнуті мережі РСДН різних типів, які склалися з трійок опорних станцій. Зазначені трійки утворювали ланцюги (переважно вздовж кордонів) та сітки у середині території країни. На території України в даний час розташований мобільний комплекс РСДН-10, станції якого розгорнуті у населених пунктах Кіровоград (ведуча), Городня, Луганськ, Арциз (ведені). Дислокація зазначених станцій може змінюватись з метою більш ефективного навігаційного забезпечення конкретної операційної зони (району). Середньоквадратична похибка визначення координат споживачів за допомогою РСДН-10 на території України становить 200 м [18, 82].

До переваг РСДН можна віднести досить велику дальність дії, необмежену пропускну здатність та пасивний спосіб визначення координат споживачами. Характерними недоліками РСДН є відносно низька точність та її залежність від віддалення споживача від опорних точок системи, неможливість вимірювання висоти та складових його швидкості, громіздкість бортового обладнання споживачів, а також значна радіотехнічна, радіолокаційна та візуальна помітність [10, 80, 82].

Супутникові радіонавігаційні системи. Історія створення СРНС бере свій початок з 50–60-х років ХХ століття, коли вперше була обґрунтована можливість застосування радіоастрономічних методів для літаководіння. Перші навігаційні визначення були здійснені на основі вимірювання доплерівського зсуву частоти передавача першого штучного супутника Землі у 1957 р.

У 1964 р. була розгорнута СРНС першого покоління “Транзит”, розроблена на замовлення Військово-Морського флоту США для навігаційного забезпечення атомних підводних човнів, оснащених балістичними ракетами. Структура такої системи складалася з шести НКА, що обертаються на кругових орбітах висотою 1000 км, рівномірно

рознесених по екватору. За такої побудові системи до зони радіовидимості наземного споживача НКА потрапляють незалежно один від одного у середньому через 1,5 год (на екваторі), що допускає проведення лише дискретних навігаційних вимірювань. Через використання у сеансі лише одного НКА вимірювання могли тривати 10...16 хв. [86].

У СРСР в 1979 р. була прийнята в експлуатацію система “Цикада” у складі чотирьох НКА. Тривалість сеансу навігаційних визначень становила 5...6 хв., а точність (СКП) визначення морськими судами свого місцезнаходження становила 80...100 м [86].

Принципове значення мав проект Two in view (“Два у полі зору”), у відповідності з яким планувалось модернізувати систему “Транзит” таким чином, щоб вона з дискретної перетворилась у систему безперервної дії з практично миттєвими вимірюваннями. Для цього планувалось розгорнути 30 НКА, розташованих по п’ять супутників на п’яти полярних та одній екваторіальній орбіті висотою близько 2700 км. Передбачалось, що така структура зможе забезпечити у будь-якій точці земної кулі одночасну видимість не менше двох НКА.

Подальші проекти пов’язані з пошуком шляхів визначення повного вектора стану споживача, який включає три просторові координати та три складові вектора швидкості, а оскільки при використанні пасивного способу вимірювання дальності (зі збереженням початку відліку на борту споживача) необхідно у навігаційному сеансі додатково визначати також і зсув бортової шкали часу та опорної частоти, то число параметрів, які необхідно визначати, зросло з 6 до 8. Тому при вимірюванні відносно кожного НКА двох навігаційних параметрів необхідно було забезпечити видимість для споживача не менше чотирьох НКА.

Відомими також є декілька нереалізованих проектів побудови СРНС. Проект “Таймейшн” передбачав створення 4-кратного покриття за допомогою системи з 21...27 НКА, рівномірно розподілених у трьох

орбітальних площинах на висоті 14...18 тис. км. Проект 621В передбачав створення структури з центрального геостаціонарного ШСЗ та 4-х НКА, що обертаються на синхронних еліптичних орбітах з апогеєм 41000 км над Північною півкулею, та перигеєм 24000 км над Південною. Сузір'я постійно знаходяться у зоні видимості споживачів даного району. Глобальне покриття досягається за рахунок рівномірного розподілу по екватору чотирьох сузір'їв. У такій системі було застосовано принцип регіонального розташування сузір'їв НКА.

Відомими також є спроби поєднання супутникових систем з системами управління повітряним рухом ("Марсат", "Аеросат", ААТМС та ін.). Структура одного з варіантів системи ААТМС передбачала існування трьох сузір'їв по 6 НКА, які передбачалось використовувати для спостереження, навігації та контролю руху повітряних суден. Але усі зазначені проекти не були реалізовані внаслідок розробки та введення в експлуатацію систем другого покоління.

СРНС другого покоління GPS (США) та ГЛОНАСС (Росія) складаються з 24 НКА, що обертаються на кругових орбітах висотою близько 20000 км. У системі GPS НКА розташовані на шести орбітах по 4 НКА, а у системі ГЛОНАСС – на трьох орбітах по 8 НКА.

Вибір та обґрунтування структури мережі НКА здійснюється виходячи з заданої просторової зони обслуговування, розмірності вектора стану споживача та забезпечення безперервності навігаційних визначень при мінімальній кількості НКА у системі. Висоту орбіт обирають такою, щоб можна було вимірювати радіонавігаційні параметри з необхідною точністю та оперативністю. З іншого боку, висота орбіт повинна бути мінімальною для зменшення витрат на виведення НКА на орбіту та втрат енергії радіохвиль при розповсюдженні. Мережа НКА повинна володіти необхідною структурною стійкістю, щоб на період існування системи зберігались просторово-часові характеристики обслуговування. При цьому не

виключається активна корекція положення НКА на орбіті. Структура мережі повинна також забезпечувати управління НКА та проведення необхідних траєкторних вимірювань засобами командно-вимірювального комплексу [86].

Для забезпечення живучості СРНС передбачається застосування активних та пасивних заходів. Активні заходи полягають, у першу чергу, у знищенні антисупутників та балістичних ракет противника. Пасивні засоби, зокрема, передбачають оптимізацію просторової структури СРНС: розташування НКА на якомога більшій кількості орбіт на відстанях, які виключатимуть одночасне виведення з ладу більш як одного НКА одним антисупутником (більше 15 тис. км). Ураження одного чи декількох НКА у СРНС не викликає повного “виключення” системи, а призводить лише до деякого погіршення її характеристик точності та доступності.

Разом з тим, при існуючій конфігурації супутникові радіонавігаційні системи мають періоди “поганої геометрії” (декілька разів на добу протягом 20...30 хв.), коли точність навігації може бути суттєво знижена. Очевидним рішенням у такій ситуації є подальше збільшення кількості НКА з рівномірним розосередженням їх по орбітах навколо Землі. Так, зокрема Європейська СРНС нового покоління GALILEO передбачає створення угруповання з 30 НКА. Іншим напрямком забезпечення високої доступності навігації є комплексне поєднання навігаційних полів обох (а у подальшому трьох) СРНС – проект GNSS [143].

Аналіз можливих варіантів побудови структур РСДН та РСБН на основі ряду робіт [80–82, 84, 85] свідчить, що основним чинником, який визначає конфігурацію структури системи, є необхідність досягнення максимальної точності визначення місцеположення споживача у межах заданої робочої області. При цьому питанням стійкості навігаційного забезпечення споживачів на основі гнучності (зміни) її структури увага практично не приділялась.

Аналіз літератури, яка присвячена принципам та способам побудови супутникових РНС [14, 81, 86–91], дає змогу зробити висновок, що у якості основних критеріїв синтезу СРНС, як і в попередньому випадку, обрана максимальна точність визначення вектора стану споживача, а також забезпечення достатньої кратності покриття земної поверхні радіонавігаційним полем СРНС.

Таким чином, на основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що структури радіотехнічних систем дальньої та ближньої навігації створюються без урахування особливостей функціонування в умовах позаштатних ситуацій (наприклад, відмов), тобто без просторового резервування, що може призвести не лише до погіршення точності навігаційних визначень, зменшення робочих зон системи, порушення обслуговування в певних районах, але й до катастрофічних наслідків – порушення функціонування системи навігаційного забезпечення на значних територіях протягом тривалих періодів часу. Наявність надмірності в структурах СРНС пов'язана лише з необхідністю зменшення тривалості періодів недостатньої точності та кратності покриття і не враховує можливого виходу з ладу окремих космічних апаратів (КА). Також можливість оперативної зміни структури системи не досліджувалася.

Оскільки умови функціонування псевдосупутникових РНС значно відрізняються від умов застосування інших багатопозиційних РНС, очевидним є те, що зазначені способи побудови їх просторових структур для псевдосупутникової системи є неприйнятними.

Псевдосупутникові радіонавігаційні системи. Одним з можливих напрямків вирішення задачі навігації існуючими приймачами сигналів GNSS в умовах відсутності навігаційного поля глобальних СРНС є використання локальної псевдосупутникової радіонавігаційної системи.

Варте підкреслити те, що навігаційні визначення критично залежать від надійності навігаційної інформації, її точності та достовірності. На даний час

з метою підвищення точності навігаційних визначень у Європі розгорнута широкозонна підсистема EGNOS, яка передає на GPS-приймачі споживачів через геостаціонарні супутники поправки, що дозволяє на порядок підвищити точність місцевизначення. Разом з тим, у високих широтах та в умовах великої кількості перешкод стабільний прийом поправок EGNOS не завжди можливий. Для забезпечення високоточного та стабільного навігаційного поля Європейське космічне агентство (ESA) приступило до розгортання мереж, у яких в доповнення до сигналів супутників GPS (а в перспективі – і Galileo) використовуються сигнали стаціонарних випромінювачів (за термінологією ESA – псевдосупутників, pseudolite).

Фактично, псевдосупутники являють собою випромінювачі GPS-сигналів зі значно меншою потужністю та, відповідно, меншим радіусом дії. Прийом їх сигналів можливий на GPS-приймачі споживачів, що дозволяє використовувати їх при вирішенні навігаційної задачі. Неважко помітити, що подібна архітектура суттєво відрізняється від локальних, регіональних або широкозонних диференційних підсистем. Якщо використання останніх можливе лише за умови стабільного прийому GPS-сигналів, то за допомогою псевдосупутників можна забезпечити стабільну навігацію навіть у випадку відсутності сигналів від “справжніх” супутників взагалі. Застосування псевдосупутників у районі аеродрому (рис. 1.3) дозволяє майже на порядок підвищити точність вирішення завдань навігації літальних апаратів, а у деяких випадках досягти сантиметрової точності обчислення координат [10, 26].

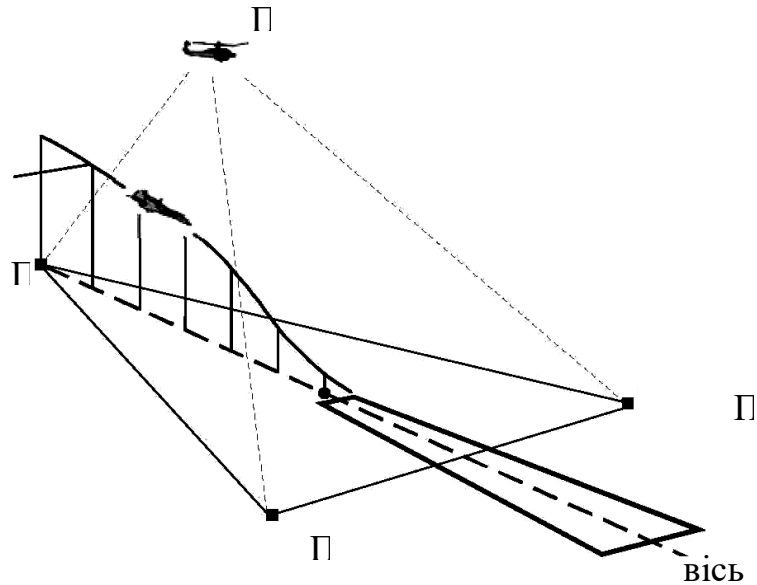


Рисунок 1.3 – Локальна система посадки з використанням псевдосупутників

Прикладом локальних диференційних систем посадки є системи D 920, D 930 фірми DASA (Німеччина) та SLS–1000, SLS–2000 фірм Honeywell та Pelorus (США), які працюють за даними СРНС GPS. Радіус дії таких систем складає 35 – 40 км [18, 90].

Другим напрямком впровадження псевдосупутників є їх застосування у системах геодезичного забезпечення, де вимагається високоточна обробка вимірів на основі реалізації алгоритмів стеження за фазою несучої частоти сигналу. У той же час вимоги щодо безперервності, доступності та цілісності для таких систем можуть бути суттєво послаблені. Геодезичні навігаційні системи вже розгорнуті на півдні Німеччини, у Нідерландах та у Фінляндії [16, 17, 26].

Третім напрямком розвитку псевдосупутникових технологій є їх використання у системах внутрішньої навігації. Необхідність розвитку саме таких систем пов'язана з технічною неможливістю застосування засобів супутникової навігації всередині закритих просторів (гірська місцевість, тунелі, шахти, печери, великі будівлі та ін.). Такі системи дозволяють споживачеві, використовуючи штатне обладнання (приймачі СРНС сигналів), якісно вирішувати завдання навігації у будь-який момент часу на обмеженій

(закритій) території. Лабораторні дослідження, проведені у Сеульському Національному університеті (Південна Корея) свідчать про перспективність таких систем. Так, СКП визначення координат у закритому просторі для статичного об'єкта склала 1 мм у плані та 2 мм по висоті; для рухомого об'єкта – 0,5 та 1,5 см відповідно [26].

Така висока точність вимірів за допомогою автономно працюючих псевдосупутників створює можливості для розширення області застосування псевдосупутникових РНС. Новими напрямками їх застосування є: забезпечення високоточних засобів ураження; розробка нових, повністю автоматизованих засобів збройної боротьби; внутрішня навігація у цехах, ангарах, великих будівлях, гаражах та паркінгах; навігація на інших планетах; контроль за пересуванням важливих об'єктів та ін. [23–25, 27].

Мережі псевдосупутників планується розгорнути як стаціонарно, так і на рухомих засобах, у тому числі і на ЛА. Зокрема, найбільш перспективним вважається встановлення псевдосупутників на безпілотних літальних апаратах та на аеростатах. У Росії активно досліджуються питання щодо спроможності БПЛА з псевдосупутниками на борту доповнити існуючу СРНС ГЛОНАСС, яка через фінансові проблеми функціонує не в повному складі [15]. У США в проводяться льотні випробування БПЛА, призначених для створення псевдосупутникових РНС [27].

Встановлення GPS-приймачів на існуючі “класичні” засоби ураження дозволяє перевести їх до класу високоточної зброї. У теперішній час засобами наведення за допомогою СРНС вже обладнані багато видів озброєння, в т.ч. крилаті ракети BGM-109 Tomahawk, AGM-84/86 SLAM; ракети повітря-земля AGM-154 JSOW, ATACMS, AGM-130/142; керовані авіаційні бомби GBU-27 JDAM; артилерійські снаряди XM982, LCGM та ін. [3, 12, 13, 18].

Стрімкий розвиток ВТЗ з застосуванням СРНС-навігації значно підвищив вимоги до стійкості навігаційного забезпечення таких засобів

ураження. З 1998 р. компанією “Rockwell Collins” (США) проводяться дослідження та випробування комбінованої супутниково-псевдосупутникової РНС, призначеної для створення локального радіонавігаційного поля з метою забезпечення тактичних та оперативно-тактичних ракет, обладнаних приймачами GPS [18, 23]. Передбачається наступна схема роботи системи (рис. 1.4). У районах розташування цілей (1), які прикриті полем радіоелектронних завад (2), розгортається мережа наземних (3) та повітряних (4) псевдосупутників. Наведення засобів ураження (5) та навігація інших споживачів (6), для яких інформація СРНС (7) є недоступною, здійснюється на основі інформації псевдосупутникової РНС (3, 4). Решта споживачів (8, 9), що знаходяться поза зоною радіоелектронного придушення, працюють у штатному режимі за інформацією СРНС (7). Позиціонування (навігація) ж самого БПЛА (4) може здійснюватись за допомогою СРНС (7), наземної мережі псевдосупутників (3), або комбіновано, за допомогою обох мереж.

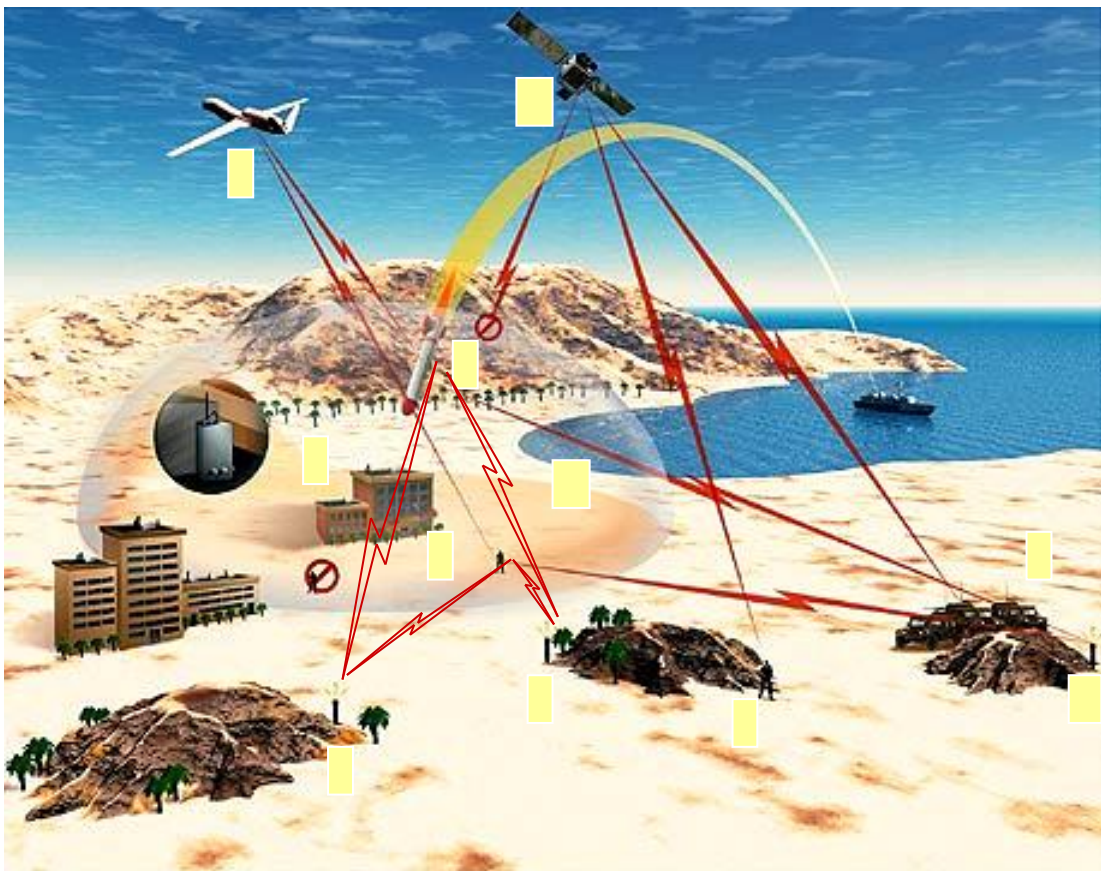


Рисунок 1.4 – Можлива схема застосування псевдо супутникової РНС

Потужність передавачів псевдосупутників обирається виходячи із знання можливостей противника щодо радіоелектронного прикриття цілі. Таким чином, створюється безперервне і стійке радіонавігаційне поле для забезпечення застосування ВТЗ, що сприяє розширенню ударних можливостей військ.

Розглянуті сфери застосування псевдосупутникових РНС дають змогу класифікувати їх за способом застосування на системи, які є підсистемами СРНС, та автономні. За місцем розташування складових елементів – на наземні та повітряні. За областю застосування – на авіаційні, морські, сухопутні, геодезичні, внутрішні та спеціальні (бойові). За масштабами – на регіональні (при охопленні території країни), локальні (район бойових дій), місцеві (район аеродрому, акваторія порту) та мікромасштабні (у межах одного приміщення).

Очевидними перевагами псевдосупутникових РНС є їх відносна простота та низька вартість (порівняно з СРНС), оскільки передбачається використання існуючих приймачів без їх додаткового переоснащення, а у якості носіїв ППС можуть використовуватись будь-які літальні апарати (літаки, вертольоти, аеростати, безпілотні літальні апарати та ін.). Система може працювати як автономно, так і у якості доповнення до СРНС, поліпшуючи таким чином їх характеристики.

Організаційно ПСРНС складається з мережі наземних псевдосупутників (НПС) та мережі повітряних псевдосупутників (ППС), що забезпечують споживачів необхідною навігаційною інформацією (рис. 1.5) [18, 20, 21].

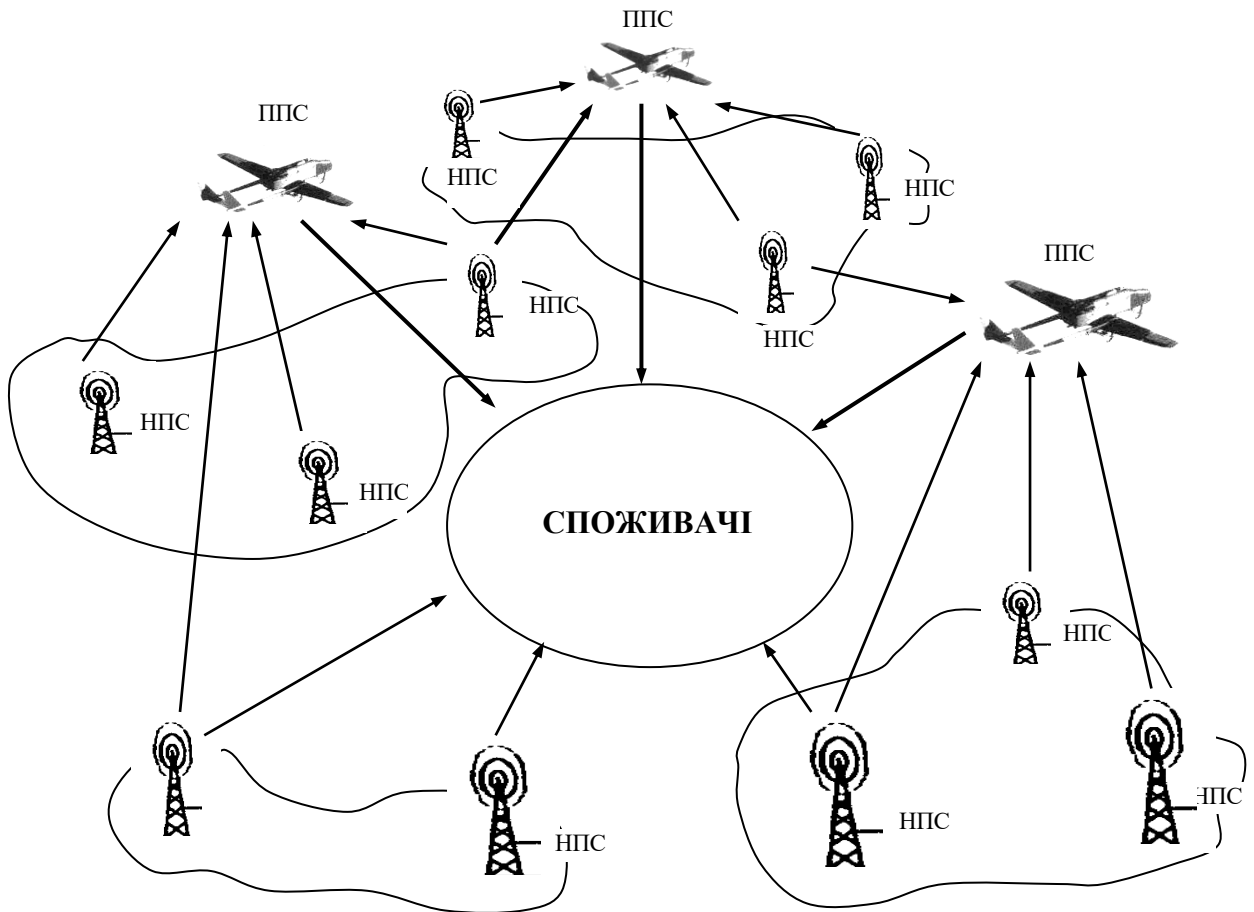


Рисунок 1.5 – Структура псевдосупутникової радіонавігаційної системи

Мережа НПС створює навігаційне поле для висотних споживачів (літаків, вертольотів, штучних супутників Землі) і для мережі ППС. Мережа ППС створює аналогічне поле для маловисотних і наземних споживачів. Система працює аналогічно СРНС з тією лише різницею, що випромінювачі радіонавігаційних сигналів встановлюються на поверхні землі (стаціонарно чи на рухомих засобах), або у повітрі (на будь-якому літальному апараті).

В даний час псевдоліти застосовуються в локальних диференційних системах посадки, системах геодезичного забезпечення, системах внутрішньої навігації, технічних системах навігаційного забезпечення бойових дій (наприклад, псевдосупутникова система компанії "Rockwell Collins" навігаційного забезпечення тактичних і оперативно-тактичних ракет, обладнаних приймачами GPS) [9, 18, 20]. Активні дослідження США і Росії в області створення ПСРНС обумовлені неможливістю використання СРНС як

технічного засобу навігаційного забезпечення бойових дій в умовах затінення супутникових сигналів будівлями і рельєфом, а також при веденні радіоелектронної боротьби. Рациональне розташування псевдосупутників, використання передавачів необхідної потужності дозволяє виключити вказані недоліки СРНС.

За топологічними ознаками структури псевдосупутникових радіонавігаційних систем класифікуються на мінімальні, тетраедрні і стільникові [18, 20, 21]. Мінімальна структура ПСРНС складається з мережі НПС і одного ППС та забезпечує споживачів в районі одиночної або групової цілі необхідною навігаційною інформацією. Тетраедрна структура ПСРНС складається з чотирьох повітряних ПС і мережі наземних ПС. Недоліками мінімальної і тетраедрної структур системи є те, що система може функціонувати на незначній території.

Стільникова структура ПСРНС (рис. 1.6) складається з мережі повітряних ПС, мережі наземних ПС і мережі наземних пунктів контролю.

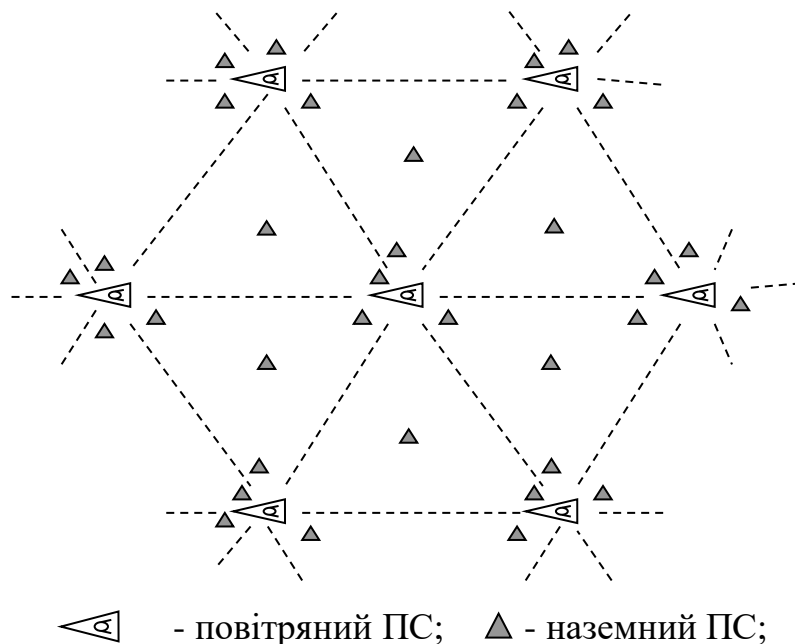


Рис. 1.6. Структура псевдосупутникової РНС стільникового типу

Опорні точки, в районі яких здійснюють політ повітряні ПС на висоті 4...8 км, розташовані в шестикутній стільниковій конфігурації з центральною точкою на відстані 200...300 км одна від одної. Відстань між опорними точками для ППС вибирається, виходячи з умови прямої видимості всіх ППС одного стільника і половини ППС сусідніх стільників. Наземні ПС розташовані на відстані 115...170 км один від одного в шестикутній стільниковій конфігурації так, що в центрі кожного з шести трикутних секторів деякого спроектованого на поверхню Землі стільника, утвореного опорними точками ППС, встановлений НПС. Перевагою вказаної структури є можливість створення значних площ навігаційних полів з багатократним покриттям, що, безумовно, підвищує надійність і точність навігації. Недоліками запропонованої конфігурації є те, що не враховується рельєф місцевості, як один з основних чинників для систем такого типу, а також значна потенційна уразливість елементів системи від дій противника через велику загальну кількість випромінюючих об'єктів. Можна помітити, що мінімальна і тетраедрна структури є елементами стільникової, оскільки стільникова структура складається з сукупності тетраедричних, кількість яких визначається площею навігаційного поля, що необхідна споживачам.

Таким чином, аналіз факторів, що впливають на функціонування ПСРНС і визначають конфігурацію її структури, дає можливість зробити висновок про те, що структура ПСРНС повинна формуватися з урахуванням наявної конкретної обстановки та з урахуванням очікуваних зовнішніх впливів. При цьому необхідно враховувати загальну геометрію взаємного розташування елементів структури, оскільки точність навігації безпосередньо залежить від відносного положення передавачів (РНТ) і приймача споживача. Найпоширенішим технічним рішенням наряду з підвищенням живучості і надійності окремих елементів системи є введення деякої надмірності в структуру системи, тобто використання більшої кількості РНТ. У такому випадку актуальним є визначення координат місць

розташування нових (резервних) ПС, оскільки в загальному випадку введення резервних точок покращує параметри точності і надійності всієї системи, але збільшує вартість і робить її помітнішою для засобів виявлення. При синтезі структури задача ускладнюється через необхідність урахування геометричного фактору і прогнозу його зміни протягом життєвого циклу залежно від живучості кожного окремого ПС під час використання системи.

Існуюча концепція синтезу структури псевдосупутникової радіонавігаційної системи, яка враховує можливість виведення з ладу окремих РНТ, заснована на забезпеченні властивості функціональної стійкості системи шляхом використання структурної надмірності [18]. Основна її ідея полягає в створенні обґрунтованої надмірності, яка дозволить забезпечити вирішення навігаційних завдань з заданою якістю протягом визначеного проміжку часу за умови можливого зменшення кількості наземних та повітряних псевдосупутників. Однак, при цьому не передбачається цілеспрямоване управління надмірністю для усунення наслідків нештатних ситуацій в процесі експлуатації системи, а випромінювання радіонавігаційної інформації (РНІ) здійснюється одночасно та безперервно всіма РНТ [22, 29].

Перспективним напрямком розвитку даної концепції синтезу псевдосупутникової радіонавігаційної системи є оптимізація просторово-часового випромінювання РНІ, тобто використання так званої «плаваючої» або гнучкої (змінної) структури шляхом введення програмного управління створеною на етапі проектування надмірністю. В дисертації така система отримала назву *локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою*. В даному випадку створюється така структура, в якій радіонавігаційні точки випромінюють радіонавігаційну інформацію незначний час, що необхідний, наприклад, для вирішення приймачами користувачів 1...2 циклів задачі навігації. Потім ці точки відключаються, а в роботу включаються інші. Це зменшує час безперервного випромінювання

радіонавігаційного сигналу окремими радіонавігаційними точками, що, в свою чергу, зменшує вартість та вплив на систему зовнішніх факторів.

Огляд ряду теоретичних робіт [25, 80–82, 86–91] щодо аналізу та синтезу просторових структур багатопозиційних РНС дає змогу зробити висновок, що усі розробники розглядають структуру багатопозиційної РНС, у першу чергу, з точки зору забезпечення нею достатньої точності навігації споживача. Проведений аналіз типів структур ПСРНС та їх конфігурацій вказує на те, що, в більшості випадків, проекти просторових структур псевдосупутникових РНС розроблені “за шаблоном”, за аналогією з існуючими типами структур багатопозиційних радіонавігаційних систем. В їх основі лежить прагнення розробників досягти максимальної точності та максимальної площі робочої зони системи, при цьому питанням прихованості, живучості та стійкості навігаційного забезпечення достатня увага не приділяється. Лише у деяких роботах враховуються особливості застосування псевдосупутникових РНС в умовах бойової обстановки шляхом введення певної структурної надмірності, однак, при цьому не передбачена можливість управління нею шляхом створення змінної просторово-часової структури, що не завжди забезпечує надійну навігацію користувачів.

1.2. Визначення факторів, що впливають на ефективність функціонування локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою

Псевдосупутникові радіонавігаційні системи є досить новим та недостатньо дослідженим об’єктом, що зумовлює необхідність їх детального вивчення. Ефективність та якість функціонування псевдосупутникових РНС, як і будь-яких інших РНС, оцінюється за наступними основними показниками: точність визначення вектора стану споживача та надійність його навігації (доступність). Визначальними

факторами, що впливають на формування структуру псевдосупутникової РНС є геометричний фактор та інші чинники.

Геометричний фактор. Геометричним фактором (ГФ) (в зарубіжній літературі використовується термін *geometric dilution of precision – GDOP*) називається коефіцієнт погіршення точності визначення місцеположення об'єкта відносно точності визначення навігаційних параметрів. Формально – це коефіцієнт K_G у співвідношенні [25, 81, 86, 89]

$$\sigma_{\text{нав}} = K_G \cdot \sigma_{\text{дал}}, \quad (1.1)$$

де $\sigma_{\text{нав}}$, $\sigma_{\text{дал}}$ – середньоквадратичні похибки визначення координат та псевдодальностей відповідно.

Питання дослідження геометричних факторів та їх впливу на точність визначення вектора стану споживача для РНС різних типів досить добре висвітлене у численній літературі [17, 82, 86, 89, 91]. Беручи до уваги (1.1), при синтезі просторової структури ПСРНС, а також при виборі оптимального робочого сузір'я РНТ, яке буде використовуватись для визначення місцеположення та швидкості споживача, ГФ буде основним критерієм.

Вплив відносного взаємного розташування мережі РНТ та споживача на точність навігаційних визначень у псевдосупутниковій РНС розглянемо на основі аналізу рівняння, яке пов'язує похибки визначення первинних (виміряні псевдодалекості) та вторинних (координати споживача) навігаційних параметрів. Таке рівняння входить до ітераційного алгоритму вторинної обробки навігаційної інформації [18, 86, 89] і має наступний вигляд:

$$\mathbf{u}^{(j+1)} = \mathbf{u}^{(j)} + \left(\left\| \frac{\partial \mathbf{h}^T(\mathbf{u}^{(j)})}{\partial \mathbf{u}} \right\|^T \right)^{-1} \mathbf{h}(\mathbf{u}^{(j)}), \quad (1.2)$$

де $\mathbf{u}^{(j+1)}$ – вектор параметрів, що визначаються на поточній ітерації;

$\mathbf{u}^{(j)}$ – вектор параметрів, що отримані на j -й ітерації;

$\left\| \frac{\partial \mathbf{h}^T(\mathbf{u}^{(j)})}{\partial \mathbf{u}} \right\|$ – матриця окремих похідних навігаційної функції $\mathbf{h}(\mathbf{u}^{(j)})$ за

навігаційними параметрами \mathbf{u} .

Конкретизуючи (1.2) відносно вирішення завдання визначення координат споживача, можна записати:

$\mathbf{x}^{(j+1)} - \mathbf{x}^{(j)} = \boldsymbol{\delta}_{\text{нав}} = \|\delta x \quad \delta y \quad \delta z \quad \delta D\|^T$ – вектор похибок визначення координат (навігації) споживача;

$\mathbf{h}(\mathbf{x}^{(j)}) = \boldsymbol{\delta}_{\text{дал}} = \|\delta D_{\text{вим1}} \quad \delta D_{\text{вим2}} \quad \delta D_{\text{вим3}} \quad \delta D_{\text{вим4}}\|^T$ – вектор похибок вимірювання відстаней до РНТ.

Лінійність (1.2) дозволяє записати

$$\boldsymbol{\delta}_{\text{нав}} = \mathbf{C}^{-1} \boldsymbol{\delta}_{\text{дал}}, \quad (1.3)$$

де $\mathbf{C} = \left\| \frac{\partial \mathbf{h}^T(\mathbf{x}^{(j)})}{\partial \mathbf{x}} \right\|^T$.

Тоді кореляційна матриця похибок вимірювання просторово-часових координат споживача може бути записана у вигляді

$$\mathbf{K}_{\text{нав}} = M \left[(\boldsymbol{\delta}_{\text{нав}} - \mathbf{m}_{\text{нав}})(\boldsymbol{\delta}_{\text{нав}} - \mathbf{m}_{\text{нав}})^T \right] = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{K}_{\text{дал}} \mathbf{C}^{-T} = (\mathbf{C}^T \mathbf{K}_{\text{дал}}^{-1} \mathbf{C})^{-1}, \quad (1.4)$$

де $\mathbf{K}_{\text{дал}} = M \left[(\boldsymbol{\delta}_{\text{дал}} - \mathbf{m}_{\text{дал}})(\boldsymbol{\delta}_{\text{дал}} - \mathbf{m}_{\text{дал}})^T \right]$ – кореляційна матриця похибок вимірювання псевдодальностей;

$\mathbf{m}_{\text{нав}}, \mathbf{m}_{\text{дал}}$ – вектори математичних очікувань похибок $\boldsymbol{\delta}_{\text{нав}}, \boldsymbol{\delta}_{\text{дал}}$ відповідно. У

подальшому будемо вважати $\mathbf{m}_{\text{нав}} = \mathbf{m}_{\text{дал}} = 0$ [86, 89];

$M[*]$ – знак математичного очікування.

Діагональними членами кореляційних матриць $\mathbf{K}_{\text{дал}}$ та $\mathbf{K}_{\text{нав}}$ є дисперсії визначення псевдодальностей $(\sigma_{\text{дал}(i)}^2, i = \overline{1,4})$ та координат $(\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2, \sigma_{D'}^2)$ відповідно.

З вигляду (1.4) можна зробити висновок, що співвідношення між похибками визначення первинних та вторинних навігаційних параметрів залежить тільки від вигляду матриці градієнтів \mathbf{C} . Сама ж матриця \mathbf{C} складається з елементів, які для просторово-часових координат мають наступний вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial D_{\text{вим}(i)}(x, y, z, D')}{\partial x} = -\frac{x_i - x}{D_i} = -\cos \alpha_i \\ \frac{\partial D_{\text{вим}(i)}(x, y, z, D')}{\partial y} = -\frac{y_i - y}{D_i} = -\cos \beta_i \\ \frac{\partial D_{\text{вим}(i)}(x, y, z, D')}{\partial z} = -\frac{z_i - z}{D_i} = -\cos \gamma_i \\ \frac{\partial D_{\text{вим}(i)}(x, y, z, D')}{\partial D'} = 1 \end{array} \right. , \quad (1.5)$$

де $\cos \alpha_i, \cos \beta_i, \cos \gamma_i$ – направляючі косинуси радіус-вектора, який сполучає споживача та 3-й псевдосупутник.

Зі співвідношень (1.5) очевидно є залежність точності визначення координат споживача від його просторового розташування відносно мережі РНТ, за якими здійснюються вимірювання. Важливою умовою досягнення високої точності навігаційних визначень у псевдосупутникових РНС є таке взаємне просторове розташування споживача та сузір'я псевдосупутників, за якого забезпечується необхідна точність визначення просторово-часових координат при заданому рівні похибок вимірювання псевдодальностей.

У випадку, коли похибки визначення псевдодальностей до РНТ є рівними та некорельованими, вводиться кількісна характеристика K_r . У даному випадку $\mathbf{K}_{\text{дал}}$ матиме вигляд одиничної діагональної матриці, і, з

урахуванням цього, співвідношення для розрахунку значення коефіцієнту геометрії $\hat{E}_{\bar{A}}$, отримане з (1.4), матиме вигляд:

$$K_r = \sqrt{\text{Tr} \left[\left(\mathbf{C}^T \mathbf{C} \right)^{-1} \right]}, \quad (1.6)$$

де $\text{Tr}[*]$ – слід матриці.

У ряді джерел, зокрема у [18, 20, 84, 86] вказується, що при вимірюваннях за чотирма РНТ мінімального значення геометричного фактора ($\hat{E}_{\bar{A}} = 1,41$) можна досягти у випадку розташування споживача у центрі правильного тетраедра, вершинами якого є опорні РНТ, а при знаходженні споживача у центрі його основи геометричний фактор прийме значення $K_r = 1,73$. За умови збільшення кількості та рівномірного розміщенні РНТ відносно споживача спостерігається зменшення значення геометричного фактору. Таким чином, при виборі сузір'я радіонавігаційних точок для навігаційних визначень за критерієм мінімуму дисперсії похибки визначення координат споживача, необхідно збільшувати загальну кількість РНТ з одночасним рівномірним розподілом їх навколо споживача у просторі.

1.3. Оцінка безпеки судноводіння від точності навігації

Забезпечення безпеки судноводіння, а саме безпеки руху та позиціонування є складним процесом [21,22,80,91], який полягає у створенні умов, які виключають аварійні події та передумови до них, а також загрозу життю пасажирів та екіпажу, втрату матеріальних цінностей. Безпека позиціонування пов'язується з уникненням небезпечних наслідків нештатних ситуацій, пов'язаних з критичними ситуаціями, які не передбачені умовами. В штурманському відношенні варто звернути увагу на те що множини задач позиціонування найбільш актуальними щодо автоматизації управління рухом є наступні:

визначення ширини смуги безпечної навігації та руху;

визначення мінімального віддалення лінії заданого шляху від межі зони небезпечної навігації та руху;

визначення ймовірності непопадання судна до смуги небезпечної навігації та руху та ін.

Безумовно безпека судноводіння залежить від якості вирішення цих задач тобто від ефективності навігації, показником якої є E_{HAB} (ступень відповідності за призначенням $E_{HAB} \in [0,1]$). Для оцінки впливу застосування запропонованих наукових результатів на вирішення завдань безпеки судноводіння розглянемо для прикладу задачу визначення ширини смуги безпечного позиціонування. У [106] наведено основні емпіричні залежності щодо визначення ширини смуги безпечного позиціонування з N ділянок значень курсу для заданої гарантованої ймовірності P_N знаходження судна у цієї області навігації (рис. 1.7).

$$Z = m_l - \sigma_l \{ \eta_1 + \eta_2 \ln[\ln N - \ln(\ln P_N + N)] \}, \quad (1.7)$$

де Z – половина ширини смуги безпечного позиціонування судна;

η_1, η_2 – емпіричні коефіцієнти,

m_l, σ_l – параметри розподілу бокового відхилення від заданої траєкторії l .

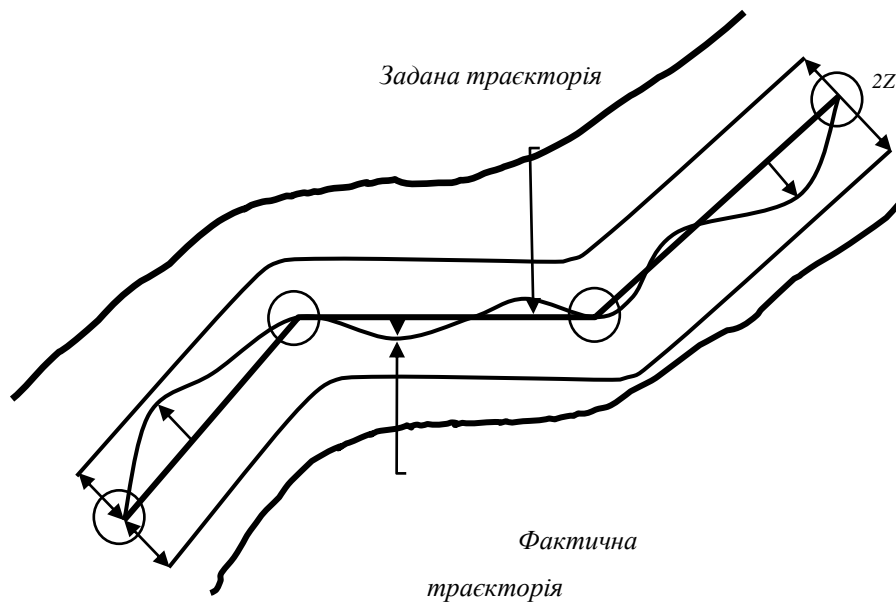


Рисунок 1.7 – Смуга безпечного позиціонування судна

Разом з тим, критичні умови експлуатації можуть поставити під сумнів ефективність прийнятих рішень в традиційних системах управління судном, що потребуватиме деякого уточнення параметра Z . Таким чином, визначення Z потребує врахування ефективності навігації, яка, в свою чергу, повинна збільшувати необхідну гарантовану ймовірність P_N на величину, пропорційну величині E_{HAB} . У такому випадку формула (1.7) приймає вигляд

$$Z = m_l - \sigma_l \left\{ \eta_1 + \eta_2 \ln \left[\ln N - \ln \left(\ln \left[1 - (1 - P_N) E_{ITS} \right] + N \right) \right] \right\}. \quad (1.8)$$

Моделювання залежності Z від точності навігації E_{HAB} при початкових параметрах $N = 3$, $m_l = 0,27$ км, $\sigma_l = 0,16$ км, $\eta_1 = 0,43$; $\eta_2 = 0,77$ та для різних значень $P_N = 0,4 \dots 0,99$ свідчить про звуження ширини безпечного позиціонування судна зі зростанням ефективності ITS (рис.1.8) приблизно на 12...28 % при $P_N = const$.

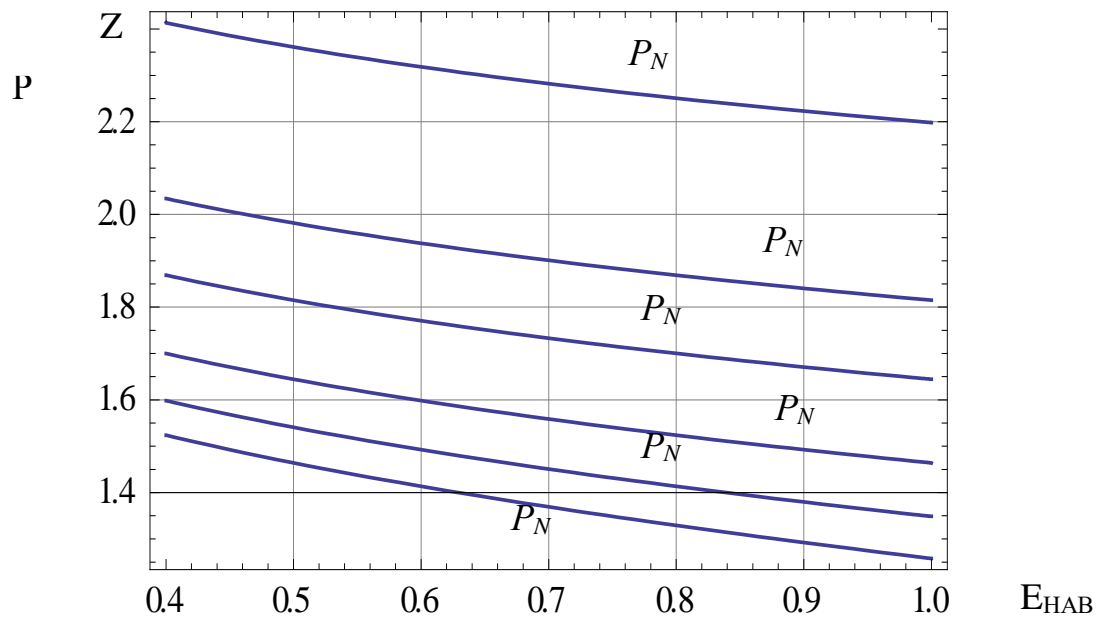


Рисунок 1.8 – Залежність ширини смуги безпечного позиціонування судна від точності навігації

Таким чином, впровадження запропонованих наукових результатів, а саме, моделей та методів підвищення безпеки судноводіння на основі локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою дозволить значено поліпшити безпеку позиціонування в критичних умовах.

1.4. Постановка наукового завдання

Публічний звіт Департаменту державного нагляду та контролю за безпекою на морському та річковому транспорті [73] дозволяє оцінити аварійність на морському та річковому транспорті за останній час. Цитуємо: «Протягом 2020 року на морському і річковому транспорті України, у тому числі з маломірними (малими) суднами, сталося 43 аварійних подій, в яких 6 осіб загинуло, 2 особи зникло безвісти та 4 особи отримали травм. За аналогічний період 2019 року відбулося 30 аварійних подій, в яких 10 осіб загинуло, 10 осіб зникло безвісти та 16 осіб отримали травм. Таким чином,

загальна кількість аварійних подій, що сталися протягом 2020 року, у порівнянні з 2019 роком збільшилась на 13 аварійних подій (+43%). При цьому слід зазначити, що кількість загиблих та зниклих безвісти зменшилось на 12 осіб (-60%), а кількість травмованих зменшилась також на 12 осіб (75%)». Це підкреслює актуальність проблематики безпеки судноводіння.

На основі викладеного у підрозд. 1.1–1.3 матеріалу можна зробити висновок, що на практиці не існує такої локальної (псевдосупутникової) багатопозиційної РНС, яка могла б достатньо ефективно функціонувати в умовах забезпечення суден високоточною навігацією. Більшість розглянутих типів структур побудовані з припущенням абсолютної надійності та живучості складових елементів і якщо для РСДН та РСБН цей підхід є виправданим з точки зору їх призначення через низьку мобільність та високу вартість елементів систем, то для псевдосупутникових РНС, призначених для функціонування в мобільності створення зони безпечного позиціонування, та з урахуванням значно нижчої вартості системоутворюючих елементів, вищезазначені підходи є недоцільними. Введення ж багатократної структурної надмірності без урахування можливості управління нею шляхом оптимізації просторово-часового випромінювання радіонавігаційної інформації з метою підвищення точності та надійності навігації призводить лише до зайвої перевитрати ресурсів.

Актуальність наукового завдання визначається невідповідністю існуючих способів побудови псевдосупутникових та багатопозиційних РНС вимогам до них. Основними факторами, які враховуються при синтезі просторових структур багатопозиційних РНС, є геометричний фактор та ефективність комплектуючих (радіонавігаційних точок).

Варте звернути увагу на те, що з точки зору теорії автоматичного управління (ТАУ) [118–122], системи управління застосовуються для вирішення трьох основних типів задач:

стабілізація, тобто підтримання заданого режиму роботи, який не

змінюється тривалий час;

програмне управління – управління за заздальгідь визначеною програмою;

слідкування за невідомим задаючим сигналом.

Виходячи з цього, для управління зміною просторово-часового випромінювання радіонавігаційної інформації обране програмне управління з застосуванням контролю цілісності системи та можливістю урахування і усунення наслідків нештатних ситуацій в процесі функціонування ПСРНС шляхом перерозподілу працездатних РНТ між сузір'ями.

Отже, актуальним є нове наукове завдання щодо розробки нових моделей та методів підвищення безпеці судноводіння на основи локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою.

Поставлене наукове завдання потребує вирішення наступних часткових завдань дослідження:

постановка завдання синтезу локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою;

визначення та обгрунтування показника та критерію ефективності локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою;

удосконалення математичної моделі локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою у;

розробка методу синтезу просторової структури локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою;

відшукання оптимального програмного управління просторово-часовою структури локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою на основи вирішення оптимізаційної задачі.

Для розгляду обраний варіант системи, що складається з мереж повітряних та наземних псевдосупутників, а також множини характерних точок простору, у яких необхідно забезпечити навігацію споживачів з заданою точністю (рис. 1.2).

У формалізованій постановці завдання синтезу програмного управління змінною структурою ПСРНС полягає у визначенні деякого оптимального вектора управління $U(t)$, за якого функція вартості $\tilde{N}(\Theta)$ набуває мінімуму, при умові, що показник ефективності системи знаходиться в області допустимих значень $P_{\sigma}(\Theta) \geq \beta$:

$$\forall \Theta \in Q^{\Theta}, U(t): C(\Theta) \rightarrow \min. \quad (1.9)$$

У якості обмежень прийняті обмеження щодо видимості мінімально необхідної кількості ПС у полі зору кожного споживача, кількості видимих наземних ПС у полі зору кожного повітряного ПС та обмеження щодо часу випромінювання РНІ визначеним сузір'ям РНТ.

До складу вектора параметрів системи Θ входять: координати радіонавігаційних точок (системоутворюючих елементів) та характерних точок споживачів, значення показників надійності, живучості, вартості елементів системи та точності прив'язки їх до системи координат, а також характеристики літальних апаратів, які застосовуються у якості носіїв повітряних елементів системи. Можливі відмови враховується через значення показників живучості радіонавігаційних точок, а геометричний фактор – через параметри відносного просторового розташування передавачів РНІ та приймачів споживача.

Вирішення наукового завдання потребує розв'язання ряду протиріч: щодо достатньої кількості і розташування системоутворюючих елементів (радіонавігаційних точок) та щодо необхідного складу випромінюючих сузір'їв і часу безперервного випромінювання ними радіонавігаційної інформації. Так, з одного боку, для забезпечення достатньої ефективності структура повинна мати якомога більшу кількість РНТ, а з іншого, з метою недопущення перевитрат ресурсів, – бути максимально обмеженою. З точки зору доцільного розташування елементів системи то, забезпечення високої точності навігації є можливим за умови розосередження мережі РНТ.

Стосовно часу безперервного випромінювання радіонавігаційної інформації визначеними сузір'ями РНТ, то, з одного боку, він має бути якомога більшим для забезпечення стійкості та безперервності навігаційних визначень, а з іншого боку – бути не більшим, ніж час, що необхідний для забезпечення безпечного позиціонування. Вирішення зазначених протиріч і складає суть вирішення наукового завдання.

Висновки до 1 розділу

1. Результати проведеного аналізу свідчать, що теорія і практика розробки та застосування локальних радіонавігаційної системи які працюють в форматі GNSS-сигналів (псевдосупутникових радіонавігаційних систем) знаходиться на початковому етапі розвитку. Більшість проектів існує поки що у вигляді ідей та пропозицій. Псевдосупутникова радіонавігаційна система являє собою якісно новий об'єкт і тому усі аспекти її розробки та застосування підлягають детальному дослідженню.

2. Аналіз існуючих наукових підходів до побудови структур багатопозиційних радіонавігаційних систем дає змогу зробити висновок про недоцільність їх використання для побудови просторових структур локальних радіонавігаційної системи які працюють в форматі GNSS-сигналів, оскільки вони дозволяють проектувати структури лише за критеріями максимальної точності навігації або максимуму площі робочої області системи без урахування особливостей функціонування в конкретних умовах. При цьому питанням стійкості навігаційного забезпечення та структурної живучості системи, які тісно пов'язані з питаннями надійності, живучості та мобільності опорних станцій, достатня увага не приділяється. Таким чином, актуальність теми дослідження визначається невідповідністю існуючих способів побудови псевдосупутникових РНС умовам функціонування, які визначаються певною специфікою.

3. Залежність імовірності виявлення радіонавігаційних точок псевдосупутникової РНС від співвідношення періодів випромінювання / невипромінювання ними радіонавігаційної інформації, а також геометричний чинник вказує на доцільність створення гнучкої (змінної) просторово-часової структури локальних радіонавігаційної системи які працюють в форматі GNSS-сигналів, що дозволить підвищити її ефективність та безпеку судноводіння в цілому.

4. Актуальність наукового завдання визначається невідповідністю існуючих способів побудови псевдосупутникових та багатопозиційних РНС вимогам до них. Основним фактором, який враховується при синтезі просторових структур багатопозиційних РНС, є геометричний фактор, тому точність навігації забезпечується шляхом створення певної структурної надмірності, при цьому основним недоліком є неврахування можливості управління наявною надмірністю шляхом створення гнучкої (змінної) структури з метою підвищення точності. Виходячи з цього, для управління зміною просторово-часового випромінювання радіонавігаційної інформації обране програмне управління з застосуванням контролю цілісності системи та можливістю урахування і усунення наслідків нештатних ситуацій в процесі функціонування псевдосупутникової РНС шляхом перерозподілу працездатних радіонавігаційних точок між сузір'ями.

5. Характер поставленого наукового завдання та необхідність пошуку оптимального рішення дає змогу віднести його до класу задач багатокритеріального оптимального синтезу систем, вирішення якої потребує розв'язання поставлених часткових завдань дослідження, серед яких основними є: вибір показників та критеріїв ефективності, розробка математичної моделі та вирішення оптимізаційної задачі синтезу структури системи та програмного управління її просторово-часовою зміною за обраними критеріями.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЛОКАЛЬНОЇ РАДІОНАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ З ГНУЧКОЮ СТРУКТУРОЮ

2.1. Формалізація задачі синтезу локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою

Нехай існує деякий простір E у межах якого необхідно створити радіонавігаційне поле. Необхідно спроектувати таку структуру мережі псевдосупутників S^E та визначити такий алгоритм управління зміною просторово-часового випромінювання радіонавігаційної інформації $U_S(t)$, щоб при функціонуванні псевдосупутникової РНС протягом визначеного часу T_ϕ з урахуванням можливої втрати окремих елементів структури точність навігації усіх споживачів була не гіршою деякого заздалегідь встановленого значення σ^{max} .

Для подальшої формалізації задачі введемо наступні припущення:

1. Для розгортання мережі НПС з урахуванням наявної інфраструктури завчасно визначається сукупність реперних точок, які точно прив'язані до геодезичної мережі країни. У якості позицій для наземних псевдосупутників (ПНПС) можуть використовуватись природні узвишся на місцевості, високі будівлі, вежі, башти та ін.

2. Мережа зон для баражування ППС визначається безпосередньо перед розгортанням псевдосупутникової РНС виходячи з обстановки, що склалася. Кожна зона характеризується опорною точкою повітряного псевдосупутника (ОТППС), що описується вектором параметрів, який відноситься до центру зони.

3. Усі літальні апарати, які використовуються у якості носіїв ППС, є однотипними.

4. Показники живучості ПНПС та ОТППС обчислюються на етапі

проектування системи на основі апіорної інформації. У роботі прийнято, що значення показників живучості є функцією часу та просторових координат ПНПС та ОТППС $P_{ij}^* = P(\phi_{i,j}, \lambda_{i,j}, h_{i,j}, t_{i,j})$, де i – тип псевдосупутника, j – номер псевдосупутника даного типу.

5. Результатом потоку технічних відмов є припинення роботи окремих елементів структури системи. Втрачені елементи не відновлюються та не замінюються.

6. Час функціонування системи є набагато меншим за ресурс обладнання псевдосупутників, тому показник надійності (імовірність безвідмовної роботи обладнання протягом часу Δt) вважається сталою величиною.

7. З метою спрощення моделі не враховуються деякі похибки вимірювання псевдодалекостей, що не впливають на визначення просторової структури системи, зокрема:

- похибки синхронізації шкал часу псевдосупутників;
- похибки, викликані розповсюдженням сигналів у тропосфері;
- похибки багатопроменевості;
- похибки, що зумовлені шумами приймача та завадами.

8. Синтез структури системи достатньо здійснювати лише на основі порівняння точностей визначення координат споживача, оскільки вплив конфігурації системи на точність визначення складових швидкості є аналогічним [86, 89].

З метою формалізації задачі структуру псевдосупутникової РНС доцільно представити у вигляді орієнтованого графа $G(Z, W)$ [18, 20, 65] (рис. 2.1), де Z – множина вершин графа, W – множина дуг графа G . Вершини графа розташовані у трьох рівнях: X, Y, E . Відповідно, множина вершин Z складається з підмножин $Z^X \cup Z^Y \cup Z^E = Z$.

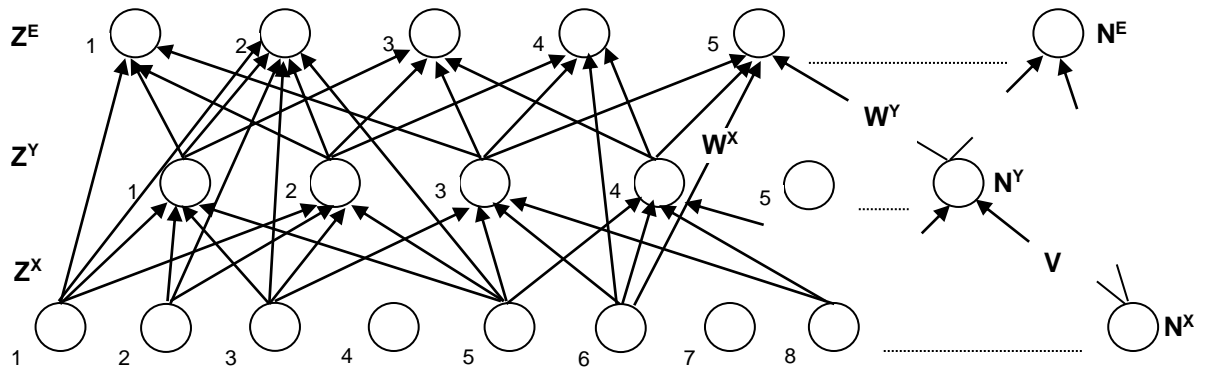


Рисунок 2.1 – Граф структури локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою

Навігаційний простір E визначається множиною характерних точок споживачів Z^E , параметри яких описуються матрицею $\mathbf{E} = \|\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_\rho, \dots, \mathbf{e}_{N^E}\|^T$, сукупність повітряних псевдосупутників утворює множину вершин графа Z^Y , елементи якої описуються матрицею $\mathbf{B} = \|\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_j, \dots, \mathbf{b}_{N^Y}\|^T$, а сукупність наземних псевдосупутників утворює множину вершин графа Z^X , елементи якої описуються матрицею $\mathbf{A} = \|\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_i, \dots, \mathbf{a}_{N^X}\|^T$.

Множина дуг W зображеного графа $G(Z, W)$ описує наявність прямої видимості між елементами структури і може бути представлена у вигляді

$$W = \{W^X, W^Y, V\}, \quad (2.1)$$

де W^X – матриця прямої видимості між споживачами та НПС;

W^Y – матриця прямої видимості між споживачами та ППС;

V – матриця прямої видимості між ППС та НПС.

Для опису стану мережі НПС додатково вводиться вектор $\mathbf{X}(U(t)) = (X_1, \dots, X_{N^X})$, $X_i \in \{0, 1\}$, $i = \overline{1, N^X}$, який визначає стан НПС: 1 –

випромінюючий, 0 – невипромінюючий. Аналогічно для мережі ППС вводиться вектор $Y(U(t)) = (Y_1, \dots, Y_{N^Y})$, $Y_j \in \{0, 1\}$, $j = \overline{1, N^Y}$, який визначає стан ППС.

Перевірка умови радіовидимості здійснюється за окремим алгоритмом [123] на основі даних про рельєф місцевості, який представлений матрицею

$$G = \| G_{i,j} \|, \quad i = \overline{1, M^G}, \quad j = \overline{1, N^G}.$$

Параметри ЛА-носіїв ППС задаються вектором $L = (\sigma^x, \sigma^y, \sigma^z, \sigma^t, c^L)$, складовими якого є середньоквадратичні похибки (СКП) $\sigma^x, \sigma^y, \sigma^z, \sigma^t$ витримування траєкторії у літаковій системі координат та вартість виконання завдання повітряним псевдосупутником c^L .

Матриці параметрів A, B, E , вектор параметрів літальних апаратів L та вектори стану мереж $X(U(t)), Y(U(t))$ визначають загальний стан системи і можуть бути зведені у вектор $\Theta = (X(U(t)), Y(U(t)), A, B, E, L)$.

З урахуванням цього, можна сформулювати основні вимоги та обмеження, які необхідно врахувати при синтезі просторової структури локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою та управління наявною надмірністю шляхом просторово-часової зміни структури системи:

1. Система вважається працездатною, коли у полі зору кожного ППС є не менше m^{vid} НПС, а у полі зору споживача не менше m^{min} псевдосупутників будь-якого типу

$$\sum_{i=1}^{N^X} W_{\rho,i}^X + \sum_{j=1}^{N^Y} W_{\rho,j}^Y \geq m^{min}, \quad \forall \rho = \overline{1, N^E}, \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^{N^x} V_{j_k, i} \geq m^{vid}, \forall k = \overline{1, N^L}. \quad (2.3)$$

2. Необхідною умовою забезпечення відмовостійкості системи є завчасно задана деяка структурна надмірність, тобто при проектуванні вимагається наявність у полі зору споживача не менше ніж $m_{i\ddot{a}i\ddot{a}o} = m^{min} + \Delta m$ (де Δm – деяка надмірність) псевдосупутників.

3. Час безперервного випромінювання РНІ визначеним сузір'ям радіонавігаційних точок має бути не меншим, ніж час, необхідний для здійснення хоча б одного циклу навігаційних визначень, але не більшим, ніж час, необхідний противнику для розвідки та ураження випромінюючих РНТ

$$t_{1\ddot{u}}^{HB} \leq t_{\text{випр.}S_\alpha} < (t_{\text{розв.}} + t_{\text{ураж.}}), \forall S_\alpha = \overline{1, N_{\text{ж}}}. \quad (2.4)$$

4. Точність визначення вектора стану 3 -го споживача σ_3 з урахуванням стохастичності просторової структури системи має бути з заданою імовірністю β не гіршою деякого заздалегідь встановленого значення σ^{max} :

$$P_\sigma(\Theta) \geq \beta. \quad (2.5)$$

5. Визначені параметри опорних точок для розташування ППС не повинні виходити за встановлені технічні обмеження для ЛА-носіїв.

Вектори стану мереж $X(U(t))$ та $Y(U(t))$ є змінними параметрами системи. Значеннями зазначених векторів є булеві змінні $\{0,1\}$, які визначають вибір тих чи інших радіонавігаційних точок для випромінювання РНІ. Розмірність векторів $X(U(t))$ та $Y(U(t))$ відповідає кількості обраних для оптимізації точок відповідних мереж.

Матриці A, B, E та вектор L задаються на етапі проектування і у процесі оптимізації не змінюються.

Отже, до початку вирішення задачі відомими є наступні вихідні дані, які водночас є вхідними параметрами математичної моделі системи:

1. Параметри та кількість характерних точок споживача S^E , у яких необхідно створити високоточне навігаційне поле (матриця E).
2. Параметри та кількість опорних точок ППС, визначених для польоту ЛА-носіїв ППС (матриця B).
3. Параметри та кількість репених точок у районі навігації, які можуть бути використані у якості позицій НПС (матриця A).
4. Параметри ЛА-носія ППС (вектор L) та кількість ЛА (N^L).
5. Параметри рельєфу місцевості у визначеному районі (матриця G).

Взаємозв'язок вихідних даних та їх зв'язок з кінцевими характеристиками зображений на рис. 2.2, який визначає функціональну схему системи.

З точки зору теорії автоматичного управління [118–122, 124] вхідні дані A, B, E, L, G характеризують деякий вхідний сигнал системи; σ_ρ ($\rho = 1..N^E$) є вихідним сигналом, що визначає точність навігації конкретного ρ -го споживача, а вектори $X(U(t))$ та $Y(U(t))$ – управляючим впливом. Саме вектори $X(U(t))$ та $Y(U(t))$ відображають стан та поведінку системи під час функціонування, оскільки вони, фактично, визначають управління просторово-часовою зміною її структури.

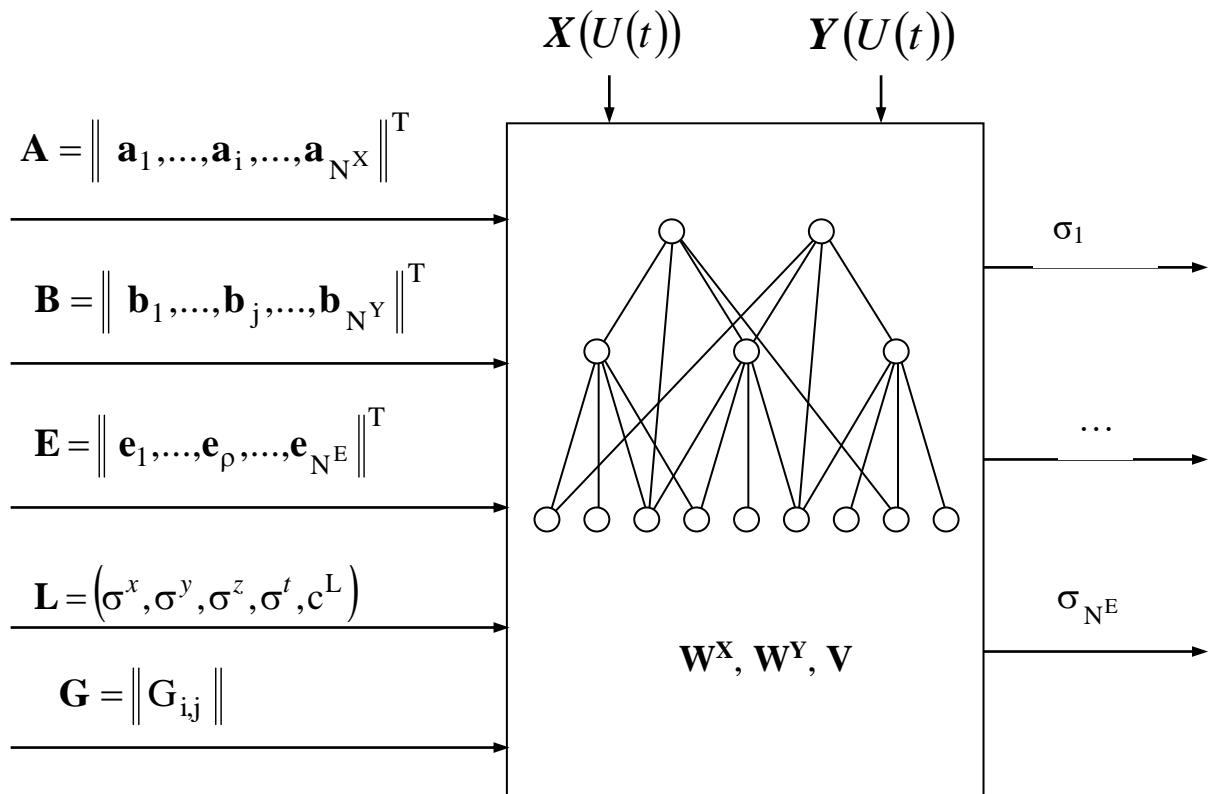


Рисунок 2.2 – Функціональна схема локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою

Таким чином, у формалізованій постановці (1.7) завдання визначення програмного управління змінною структурою псевдосупутникової радіонавігаційної системи є завданням вибору оптимального складу векторів $X(U(t))$ та $Y(U(t))$ на основі заданих параметрів $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{E}, \mathbf{L}, \mathbf{G}$ з урахуванням обмежень (2.2) – (2.5).

2.2. Обґрунтування показників та критеріїв ефективності локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою

Оскільки псевдосупутникова радіонавігаційна система є багатопозиційною РНС, принцип дії якої заснований на визначенні

місцеположення споживача за відомими координатами радіонавігаційних точок та відстанями до них, на точнісні характеристики системи суттєво впливає кількість РНТ в полі зору споживача та їх просторове розміщення, достовірність інформації про координати РНТ, відсутність перешкод. Ефективність функціонування ПСРНС кількісно можна оцінити за її точнісними характеристиками, наприклад, за середньоквадратичною похибкою визначення координат споживача σ_x , σ_y , σ_z та складових його швидкості $\sigma_{\dot{x}}$, $\sigma_{\dot{y}}$, $\sigma_{\dot{z}}$ [64]. Виходячи з умов завдання, для виконання якого функціонує ПСРНС, ставляться вимоги до точності навігаційного забезпечення:

$$\sigma_x < \sigma_x^{max}; \sigma_y < \sigma_y^{max}; \sigma_z < \sigma_z^{max}; \sigma_{\dot{x}} < \sigma_{\dot{x}}^{max}; \sigma_{\dot{y}} < \sigma_{\dot{y}}^{max}; \sigma_{\dot{z}} < \sigma_{\dot{z}}^{max}. \quad (2.6)$$

Виконання умови (2.6) – випадкова подія, імовірність якої P_H назвемо імовірністю вирішення завдання навігації з заданою точністю. До значення цього показника висуваються певні вимоги, які визначаються характером вирішуваних завдань та умовами обстановки

$$P_H(\sigma_x < \sigma_x^{max}; \sigma_y < \sigma_y^{max}; \sigma_z < \sigma_z^{max}; \sigma_{\dot{x}} < \sigma_{\dot{x}}^{max}; \sigma_{\dot{y}} < \sigma_{\dot{y}}^{max}; \sigma_{\dot{z}} < \sigma_{\dot{z}}^{max}) > P_H^{min}, \quad (2.7)$$

де P_H^{min} – мінімально допустима імовірність вирішення завдання навігації з заданою точністю.

Умова (2.7) є необхідною, але не достатньою для забезпечення стійкого функціонування ПСРНС в умовах відмов та нештатних ситуацій. Для кількісної оцінки стійкості та безперервності навігаційного забезпечення необхідно ввести додаткові показники, які будуть визначати здатність системи функціонувати в умовах відмов та нештатних ситуацій,

що, в свою чергу, визначається наявністю надмірності та можливості управління нею. Імовірність наявності надмірності в системі залежить від ряду факторів. Можна записати, що [20]

$$P_{надм} = P_{надм} \left(N_{vid(\rho)}^X, N_{vid(\rho)}^Y, P_i^X, P_j^Y, F_k \right), i = \overline{1, N_{vid(\rho)}^X}, j = \overline{1, N_{vid(\rho)}^Y}, \quad (2.8)$$

де $N_{vid(\rho)}^X, N_{vid(\rho)}^Y$ – кількість наземних (повітряних) ПС в полі зору споживача;

P_i^X, P_j^Y – імовірність перебування i -го наземного (j -го повітряного)

ПС у працездатному стані;

F_k – інші фактори, що впливають на надмірність.

У співвідношенні (2.8)

$$P_i^X = P_i^X \{P_i^I(t), P_i^{AE}(t)\},$$

$$P_j^Y = P_j^Y \{P_j^I(t), P_j^{AE}(t)\}.$$

де $P_i^H(t), P_j^H(t)$ – імовірність безвідмовної роботи i -го наземного (j -го повітряного) ПС протягом часу t ;

$P_i^{Ж}(t), P_j^{Ж}(t)$ – імовірність перебування i -го наземного (j -го повітряного) ПС в живучому стані на момент часу t .

В загальному випадку імовірність управління надмірністю можна записати у вигляді:

$$P_{уп} = P_{уп}(F_l), \quad (2.9)$$

де F_l – фактори, що впливають на управління надмірністю.

Отже, імовірність функціонування ПСРНС в умовах відмов та нештатних ситуацій можна подати у наступному вигляді

$$P_{\phi} = P_{\text{надм}} \cdot P_{\text{упр}} \geq P_{\phi}^{\min}, \quad (2.10)$$

де P_{ϕ}^{\min} – мінімально допустиме значення імовірності функціонування ПСРНС в умовах відмов та нештатних ситуацій.

Таким чином, одночасне виконання вимог (2.7) та (2.10) є необхідною та достатньою умовою вирішення завдання навігації з заданою точністю в умовах відмов та нештатних ситуацій, і тому приймемо імовірність даної події в якості показника ефективності ПСРНС D_{σ} , яка запишеться у вигляді [64]:

$$P_{\sigma} = P_H \cdot P_{\phi}, \quad (2.11)$$

Критерій мінімальної вартості. Вартість системи визначається на основі існуючих традиційних методик [18, 125, 126] з метою введення обмежень на етапі її проектування, оскільки, як правило, зі збільшенням вартості збільшується число елементів системи, а, відтак, покращуються і її характеристики.

Значення вартості НПС обчислюється як сума вартостей обладнання псевдосупутника ($C^{ПС}$), робіт щодо його встановлення і налаштування ($C^{уст}$) та обслуговування ($C^{обсл}$). Також до складу вартості входять і витрати на охорону мережі ($C^{обор}$).

Значення вартості виконання завдання за допомогою ППС (вектор L) у загальному вигляді включає вартості обладнання псевдосупутника ($C^{ПС}$), переобладнання ЛА ($C^{ЛА}$) а також їх обслуговування ($C^{обсл}$). У вартість

виконання завдання слід також включити вартість організації забезпечення літальних апаратів-носіїв ($C_{прикр}$).

Таким чином вартість системи є сумою зазначених складових:

$$C^S = \sum_{i=1}^{N^{НПС}} (C_i^{ПС} + C_i^{уст} + C_i^{обсл} + C_i^{обор}) + \sum_{j=1}^{N^{НПС}} (C_j^{ПС} + C_j^{ЛА} + C_j^{обсл} + C_j^{прикр}) \quad (2.12)$$

Отже, завдання оптимізації полягає у відшуканні структури з мінімальною вартістю ($C^S \rightarrow \min$), яка б, при цьому, забезпечувала достатню ефективність системи. Необхідність застосування саме вартості у вигляді (2.12), а не числа утворюючих елементів, у якості показника ефективності системи пов'язується з їх різнотипністю і є виправданою з технічної точки зору, оскільки передбачається, що усі елементи є суто технічними пристроями (функціонують автоматично, без безпосереднього втручання людини-оператору).

2.3. Модель локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою

Як зазначалось у підрозд. 2.2, складовою показника ефективності локальної РНС з гнучкою структурою є імовірність вирішення навігаційної задачі з заданою точністю. Теорія точності РНС на сьогоднішній день достатньо добре вивчена [17, 25, 81, 82, 86, 89, 91], а застосування однотипних алгоритмів навігаційних визначень та апаратури у псевдосупутникових та супутникових РНС дозволяє використовувати аналогічні методи дослідження точнісних характеристик обох систем.

У результаті вирішення навігаційної задачі у поточний момент часу t проводиться оцінка вектора стану $\mathbf{u}(t)$ споживача. Характеристикою

точності визначення координат споживача є величина радіуса кола (при визначеннях на площині) або радіуса сфери (при визначеннях у просторі) похибок місцезнаходження заданої ймовірності. У випадках визначення двох поверхневих координат геометричне місце точок рівноймовірної точності місцевизначення являє собою еліпс [90].

Визначення довжин півосей еліпса похибок та їх просторової орієнтації є доволі складним процесом і у випадку вектора стану споживача розміром більше трьох – надто важким для уяви, тому у [92] була обгрунтована можливість використання з цією метою середньоквадратичної похибки (СКП). Імовірність попадання у коло зазначеного радіуса складає 0,63 – 0,68 залежно від співвідношення довжини півосей відповідного еліпса похибок. Імовірність попадання у сферу відповідного радіуса при незалежних і рівних похибках визначення прямокутних координат складає 0,61. Вважається, що за даних умов вичерпну інформацію про точність навігаційних визначень дає кореляційна матриця похибок $\mathbf{K}_u(t)$. Знаючи її, можна визначити область простору, де апостеріорна щільність визначення ймовірностей $w(\mathbf{u}/\mathbf{R})$, яка характеризує ступінь знання вектора $\mathbf{u}(t)$ після обробки вимірювань $\mathbf{R}(t)$, не перевищує деякого наперед заданого значення [18, 86].

Оцінка точності навігаційних вимірювань здійснюється у лінійній постановці за припущення, що результати вимірювань оброблюються ітераційними алгоритмами за методом найменших квадратів. Навігаційна функція для квазідалекомірного режиму має вигляд

$$D_i = \sqrt{(x_i^c - x)^2 + (y_i^c - y)^2 + (z_i^c - z)^2} + w, \quad w = c\Delta T, \quad (2.13)$$

$$i = \overline{1, N^c}$$

де x_i^c, y_i^c, z_i^c – прямокутні координати РНТ (псевдосупутників);

x, y, z – прямокутні координати споживача;

ΔT – розходження шкал часу навігаційної системи та споживача;

N^c – кількість видимих РНТ (псевдосупутників).

Лінеаризація нелінійних навігаційних функцій (2.13), отриманих при псевдодалекомірному методі, здійснюється шляхом розкладання їх у ряд Тейлора за степенями поправок δ_j ($j = 1, 2, 3, 4$) з утриманням перших членів розкладу, в результаті чого отримуємо наступну систему рівнянь:

$$D_i - D_{0i} = \frac{\partial D_i}{\partial x_0} \delta_x + \frac{\partial D_i}{\partial y_0} \delta_y + \frac{\partial D_i}{\partial z_0} \delta_z + \frac{\partial D_i}{\partial w_0} \delta_w, \quad (2.14)$$

$$i = \overline{1, N^c},$$

де D_i – вимірне значення псевдодальності до i -го псевдосупутника;

D_{0i} – розрахункове значення псевдодальності;

$\frac{\partial D_i}{\partial u_0}$, ($u_0 = x_0, y_0, z_0, w_0$) – окремі похідні навігаційної функції по

параметрах навігації.

Окремі похідні, які входять до системи (2.14), складають матрицю окремих похідних розміром $N^c \times 4$, яка є основою для подальшого обчислення оцінок похибок визначення вектора стану споживача і носить назву градієнтної матриці:

$$C = \begin{pmatrix} \frac{\partial D_1}{\partial x} & \frac{\partial D_1}{\partial y} & \frac{\partial D_1}{\partial z} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial D_{N^c}}{\partial x} & \frac{\partial D_{N^c}}{\partial y} & \frac{\partial D_{N^c}}{\partial z} & 1 \end{pmatrix}^{N^c \times 4}. \quad (2.15)$$

Якщо ввести матрицю-стовпчик R різниць виміряного та розрахункового значень псевдодальностей $R = \|D_i - D_{0i}\|^{N^c \times 1} = \|r_i\|^{N^c \times 1}$, $i = \overline{1, N^c}$, а поправки δ_j ($j = 1, 2, 3, 4$) позначити у вигляді стовпчикової матриці $A = \|\delta_1 \ \delta_2 \ \delta_3 \ \delta_4\|^T$, то, з урахуванням (2.15) у матричній формі систему (2.14) можна записати у наступному вигляді

$$\mathbf{R} = \mathbf{C}\Delta. \quad (2.16)$$

Помноживши ліву та праву частини (2.16) зліва на діагональну матрицю

$$\mathbf{P}_0 = \begin{pmatrix} p_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{N^c} \end{pmatrix}$$

де $\delta_j = h_j / \sigma_{D_j}$, (σ_{D_j} – СКП вимірювання псевдодальностей; h_j – деякий коефіцієнт), отримаємо систему умовних рівнянь

$$\mathbf{P}_0 \mathbf{R} = \mathbf{P}_0 \mathbf{C}\Delta. \quad (2.17)$$

Ця система складається з N^c рівнянь з чотирма невідомими. У загальному випадку така система несумісна і тому деяка сукупність чотирьох поправок δ_j ($j = 1, 2, 3, 4$) не може задовольнити цій системі, а при підстановці δ_j у відповідні рівняння ліві і праві її частини виявляться нерівними, оскільки з'явиться їх нев'язка. Застосовуючи процедуру методу найменших квадратів та мінімізуючи таким чином квадрат нев'язки лівої і правої частин системи умовних рівнянь, отримаємо систему нормальних рівнянь у вигляді

$$\mathbf{C}^T \mathbf{P}_0^T \mathbf{P}_0 \mathbf{R} = \mathbf{C}^T \mathbf{P}_0^T \mathbf{P}_0 \mathbf{C}\Delta. \quad (2.18)$$

У (2.18) добуток $\mathbf{P}_0^T \mathbf{P}_0$ дає діагональну матрицю \mathbf{P} , елементи якої є квадратами елементів матриці \mathbf{P}_0 . Тому можна записати:

$$\mathbf{C}^T \mathbf{P} \mathbf{R} = \mathbf{C}^T \mathbf{P} \mathbf{C}\Delta. \quad (2.19)$$

У виразі (2.19) добуток $\mathbf{C}^T \mathbf{P} \mathbf{C} = \mathbf{A}_u$ являє собою матрицю

коефіцієнтів системи нормальних рівнянь. Матриця A_u має розмір 4×4 , що пов'язане з чотиривимірним характером задачі, що вирішується. Позначивши у (2.19) $C^T P R = B_u$, систему нормальних рівнянь можна записати у наступному вигляді

$$A_u \Delta = B_u. \quad (2.20)$$

З метою оцінки точності визначення вектора стану споживача необхідно вирішити систему (2.20) відносно Δ . Помноживши праву та ліву частини системи (2.20) на обернену матрицю A_u^{-1} , можна отримати рішення для поправок

$$\Delta = A_u^{-1} B_u. \quad (2.21)$$

Матриця P^{-1} , яка входить до складу матриці $A_u^{-1} = C^{-1} P^{-1} (C^{-1})^T$ в (2.21) з точністю до коефіцієнта являє собою матрицю дисперсій вимірювань псевдодальностей. Сама ж матриця A_u^{-1} за своєю сутністю є кореляційною матрицею похибок визначення шуканих параметрів K_u , на головній діагоналі якої розташовані дисперсії параметрів, що визначаються. Тобто, якщо прийняти дисперсії вимірювання псевдодальностей від усіх РНТ рівними одиниці, а результати вимірювань незалежними (некорельованими) між собою, то на головній діагоналі матриці $K_u = A_u^{-1}$ будуть розташовані коефіцієнти, які будуть зумовлені лише геометрією взаємного розташування РНТ та споживача. Результуюча похибка місцевизначення може бути виражена через слід кореляційної матриці $\sigma_u = \sqrt{\text{Tr}[K_u]}$. Як вже зазначалось у розд. 1, відношення $\frac{\sigma_u}{\sigma_D}$, де σ_u – СКП визначення вектора стану споживача, а σ_D – СКП визначення псевдодальностей до РНТ, є геометричним фактором, який визначає ступінь впливу геометричної

конфігурації системи на точність визначення вектора стану споживача $\mathbf{u}(t)$.

Таким чином, у загальному вигляді кореляційна матриця похибок пов'язує характеристики точності вимірювання псевдодальностей з параметрами точності визначення місцезнаходження споживача і має вигляд

$$\mathbf{K}_u = (\mathbf{C}^T \mathbf{K}_R^{-1} \mathbf{C})^{-1}. \quad (2.22)$$

Проте, на практиці споживачів цікавить ступінь погіршення точності місцевизначення окремо у горизонтальній та вертикальній площинах відносно поверхні Землі, а також ступінь погіршення точності визначення поправок часу. Для переходу від грінвічської системи координат (ГСК) до топоцентричної системи координат (ТСК) застосовується наступна матриця (афіннор) переходу [86, 127]

$$\mathbf{A}_K = \begin{vmatrix} \cos \lambda \sin \varphi & \sin \lambda \sin \varphi & -\cos \varphi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ \cos \lambda \cos \varphi & \sin \lambda \cos \varphi & \sin \varphi \end{vmatrix}, \quad (2.23)$$

де φ та λ – географічні координати споживача.

Кореляційна матриця \mathbf{K}_u перераховується у ТСК за допомогою формули

$$\mathbf{K}_{u_{ТСК}} = \mathbf{A}_K \mathbf{\Gamma}_{KK} \mathbf{A}_K^T, \quad (2.24)$$

де $\mathbf{\Gamma}_{KK}$ – блок матриці \mathbf{K}_u , який відповідає похибкам координат,

$$\mathbf{K}_u = \begin{vmatrix} \mathbf{\Gamma}_{KK} & \mathbf{\Gamma}_{Kt} \\ \mathbf{\Gamma}_{Kt} & \mathbf{\Gamma}_{tt} \end{vmatrix}.$$

На головній діагоналі матриці \mathbf{K}_R розташовані дисперсії похибок псевдодальностей від різних РНТ. У свою чергу, вони залежать від багатьох факторів і цю залежність можна представити у вигляді

$$\sigma_{\dot{I}\dot{A}}^2 = \sigma_{\dot{a}}^2 + \sigma_{\dot{n}}^2 + \sigma_{\dot{\delta}\dot{\delta}}^2 + \sigma_{\dot{a}\dot{i}}^2 + \sigma_{\dot{\phi}}^2, \quad (2.25)$$

де $\sigma_{\dot{a}}^2, \sigma_{\dot{n}}^2, \sigma_{\dot{\delta}\dot{\delta}}^2, \sigma_{\dot{a}\dot{i}}^2, \sigma_{\dot{\phi}}^2$ – дисперсії визначення псевдодальностей за рахунок ефемеридної інформації, синхронізації бортових шкал часу псевдосупутників, знання швидкості розповсюдження радіохвиль у тропосфері, багатопроменевості, внутрішніх шумів приймача та завад відповідно [87, 89].

З урахуванням прийнятих у підрозд. 2.1 припущень, формула (2.25) для псевдосупутникової РНС трансформується до вигляду $\sigma_{\dot{I}\dot{A}}^2 = \sigma_{\dot{a}}^2$, тобто похибки визначення псевдодальностей будуть зумовлюватися лише точністю прив'язки до системи координат наземних та точністю витримування траєкторії повітряними псевдосупутниками.

Припустимо, що параметри точності прив'язки 3 -го НПС у топоцентричній системі координат характеризуються СКП прив'язки $\sigma_{\varphi(i)}, \sigma_{\lambda(i)}, \sigma_{h(i)}$ і вони є некорельованими. Тоді кореляційна матриця похибок ефемерид наземного псевдосупутника матиме вигляд

$$\mathbf{K}_{en(i)} = \begin{vmatrix} \sigma_{\varphi(i)}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\lambda(i)}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{h(i)}^2 \end{vmatrix}, \quad i = \overline{1, N^c}, \quad (2.26)$$

де $\sigma_{\varphi(i)}^2, \sigma_{\lambda(i)}^2, \sigma_{h(i)}^2$ – дисперсії похибок прив'язки НПС у ТСК.

Дещо складнішим у порівнянні з (2.26) є визначення σ_e^2 для ППС. Складність у даному випадку полягає в тому, що, на відміну від НПС, повітряний псевдосупутник знаходиться у русі, часто у неспокійній атмосфері, тому похибки витримування траєкторії руху такого псевдосупутника будуть залежати від значної кількості факторів, причому деякі з них будуть знаходитись у певних залежностях одна від одної. У загальному вигляді кореляційна матриця похибок ефемерид ППС $\mathbf{K}_{en(i)}$ буде

утворена дисперсіями та кореляційними моментами похибок витримування траєкторії ППС у траєкторній системі координат, наприклад [18]:

$$\mathbf{K}_{en(i)} = \begin{pmatrix} \sigma_{x(i)}^2 & K_{xy(i)} & K_{xz(i)} & K_{ty(i)} \\ K_{yx(i)} & \sigma_{y(i)}^2 & K_{yz(i)} & K_{ty(i)} \\ K_{zx(i)} & K_{zy(i)} & \sigma_{z(i)}^2 & K_{ty(i)} \\ K_{ty(i)} & K_{ty(i)} & K_{ty(i)} & \sigma_{t(i)}^2 \end{pmatrix}, \quad i = \overline{1, M^c}, \quad (2.27)$$

де M^c – кількість одночасно видимих споживачем ППС.

З точки зору динаміки польоту, політ ППС є вирішенням задачі траєкторного управління ЛА. Елементами матриці (2.27) є кореляційні моменти відхилення істинного місця ППС від його прогнозованого значення, які зумовлені впливом різних факторів. У більшості випадків неможливо отримати аналітичні залежності для визначення елементів матриці (2.27) через досить складні залежності, які лежать у їх природі. Крім того, вони значною мірою залежать від типу ЛА-носія ППС (БПЛА, вертоліт, аеростат та ін.), тому на практиці більш доцільно скористатися існуючими статистичними даними.

Зв'язок множини матриць $\mathbf{K}_{en(i)}$ та $\mathbf{K}_{en(i)}$ з величиною $\sigma_{\hat{a}(i)}^2$ здійснюється за допомогою матриць переходу від ГСК до вимірювальної системи координат

$$\mathbf{C}_{P(i)} = \|\cos \alpha_i \quad \cos \beta_i \quad \cos \gamma_i\|, \quad i = \overline{1, N^c}, \quad (2.28)$$

елементами яких є направляючі косинуси векторів, спрямованих від споживача на 3-й псевдосупутник у ГСК. Однак, для того, щоб скористатися матрицею $\mathbf{K}_{e(i)}$, елементи якої представлені у ТСК, необхідно спочатку перерахувати їх у ГСК за допомогою афіннорів типу (2.23) [18, 87].

Дисперсія похибок визначення псевдодальностей від споживача до 3-го

псевдосупутника, що обумовлена неточністю ефемеридної інформації, для споживача, який визначає своє місцеположення за мережею псевдосупутників, буде визначатися за наступними формулами:

$$\sigma_{en(i)}^2 = \mathbf{C}_{pn(i)} \mathbf{A}_{kn(i)}^T \mathbf{K}_{en(i)} \mathbf{A}_{kn(i)} \mathbf{C}_{pn(i)}^T, \quad i = \overline{1, N^c}, \quad (2.29)$$

$$\sigma_{en(i)}^2 = \mathbf{C}_{pn(i)} \mathbf{A}_{kn(i)}^T \mathbf{K}_{en(i)} \mathbf{A}_{kn(i)} \mathbf{C}_{pn(i)}^T, \quad i = \overline{1, M^c} \quad (2.30)$$

Таким чином, обчисливши за (2.26) – (2.30) дисперсії похибок вимірювання псевдодальностей та припустивши, що зазначені похибки є некорельованими, можна скласти діагональну матрицю похибок \mathbf{K}_R , на головній діагоналі якої стоятимуть дисперсії $\sigma_{pd(i)}^2$ похибок псевдодальностей до різних РНТ. Далі, за формулою (2.22) знаходиться кореляційна матриця похибок визначення місцезнаходження споживача. Як бачимо, вона залежатиме від уже розглянутої матриці \mathbf{K}_R та від взаємного розташування споживача і мережі псевдосупутників.

Оцінка різних варіантів побудови багатопозиційних РНС за точністю визначення вектора стану споживача здійснюється на основі співвідношення (2.24) за формулами:

– для просторових координат:

$$\sigma_{\vec{r}}^2 = \gamma_{11} + \gamma_{22} + \gamma_{33}, \quad (2.31)$$

– для планових (горизонтальних) координат:

$$\sigma_{\vec{a}}^2 = \gamma_{11} + \gamma_{22}, \quad (2.32)$$

де γ_{ij} – елементи матриці (2.24).

Співвідношення (2.31) та (2.32) є критеріальними функціями для оцінки ефективності псевдосупутникової РНС з точки зору точності визначення вектора стану споживача.

Таким чином, вирази (2.13-2.32) формують математичну модель локальної РНС з гнучкою структурою.

Висновки до 2-го розділу

1. У формалізованій постановці завдання необхідно спроектувати таку структуру системи та визначити програмне управління зміною просторово-часового випромінювання радіонавігаційної інформації, за якого при функціонуванні системи протягом визначеного часу з урахуванням можливої втрати окремих елементів структури точність навігації усіх споживачів буде не гіршою деякого заздалегідь встановленого значення.

2. У визначеній постановці наукового завдання найбільш доцільним є ймовірнісний показник ефективності системи. Складовими зазначеного показника є живучість та надійність елементів системи, а також точність визначення вектора стану споживача. Таким чином, показник ефективності локальної радіонавігаційної системи з гнучкої структурою – це ймовірність того, що у кожній визначеній точці простору протягом заданого часу існує можливість здійснення навігації споживачів з точністю, не гіршою деякої заздалегідь заданої величини.

3. Використання у якості критерію мінімуму вартості якнайбільш повно відповідає сучасним тенденціям в області розробки складних технічних систем, оскільки досить часто вартість є суттєвим обмеженням, яке формує технічний обрис системи. Саме економічний чинник (через неможливість розробки та розгортання супутникової навігаційної системи) лежить в основі розробки псевдосупутникових радіонавігаційних систем.

4. Функціонування локальної радіонавігаційної системи з гнучкої структурою в умовах можливої втрати системою окремих елементів у процесі експлуатації визначає необхідність розгляду структури такої системи на основі стохастичної теорії. Залежність точності навігації від кількості та

взаємного розташування елементів системи, а відтак – і випадкових комбінацій елементів вимагає застосування методів комбінаторного аналізу і обумовлює доцільність побудови структури системи саме на основі комбінаторно-стохастичної математичної моделі.

5. Накладання обмеження (введення граничного значення) на імовірнісний показник ефективності системи формує критерій ефективності як критерій допустимої гарантії. Граничні значення цього показника, а також обмеження щодо точності системи (максимальне значення середньоквадратичної похибки), які входять до складу показника ефективності, задаються розробником на основі знання тактико-технічних характеристик засобів, для забезпечення функціонування яких розгортається псевдосупутникова РНС, та досвіду їх застосування у конкретних умовах обстановки.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДУ СИНТЕЗУ ПРОСТОРОВОЇ СТРУКТУРИ ЛОКАЛЬНОЇ РАДІОНАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТА ПРОГРАМНОГО УПРАВЛІННЯ ЇЇ ГНУЧКОЮ СТРУКТУРОЮ

3.1. Вибір методу синтезу радіонавігаційної системи з гнучкою структурою

Синтез локальної радіонавігаційної системи як великої технічної системи (ВТС) передбачає вирішення наступних оптимізаційних задач:

- визначення структури системи, тобто оптимальних принципів її побудови – завдання оптимізації структури;
- вибір значень основних характеристик системи, в тому числі параметрів управління – завдання оптимізації параметрів.

Необхідно відмітити, що при дослідженні питань управління змінною структурою ПСРНС одним із завдань системи управління є розробка такого закону управління $U(t)$, який забезпечить необхідну зміну вектора стану системи $\Theta(t)$ таким чином, щоб якомога краще задовільнити поставлену мету.

При формуванні можливих варіантів побудови системи множина альтернатив її побудови задається [36, 64, 87]:

- за допомогою неявного опису (наприклад, системи обмежень, зокрема, на основі відомих умов оптимальності);
- у вигляді явного перерахунку;
- з використанням методів морфологічного аналізу.

У перших двох випадках множина варіантів побудови системи розглядається як задана, тому очевидно, що надалі основним завданням є побудова області ефективних варіантів.

Однак, найширше використання отримала методологія формування

варіантів побудови системи, яка ґрунтується на морфологічному аналізі. Під морфологією системи розуміють перелік підсистем (функцій), що необхідні для виконання поставлених перед нею завдань. За результатами опису морфології необхідно провести подальшу підготовку вихідних даних для продовження системних досліджень. Результати таких досліджень, як правило, представляються у вигляді:

- переліку можливих варіантів побудови системи у випадку, якщо їх небагато;
- морфологічних блоків системи, які формуються на основі вивчення можливих варіантів побудови її підсистем та елементів.

З урахуванням вищезазначеного, формування варіантів локальної РНС з гнучкою структурою доцільно здійснити на основі її морфологічного аналізу. Перелік можливих варіантів системи можна подати у вигляді наступних блоків [18, 20, 64]:

1. Морфологічний блок системи по принципово можливих варіантах мережі НПС, яка може бути представлена у вигляді множини $M[X]$ векторів стану ПНПС X :

$$M[X] = \{X_1, \dots, X_\zeta, \dots, X_{N^{MX}}\}. \quad (3.1)$$

2. Морфологічний блок системи за принципово можливими варіантами мережі ППС по кожному з варіантів мережі НПС $X_\zeta, \zeta = \overline{1, N^{MX}}$ за векторами стану ОТППС Y :

$$M[XY] = \left\{ \left\{ Y_{1,1}, \dots, Y_{1,k}, \dots, Y_{1,N_1^{MY}} \right\}, \dots, \left\{ Y_{\zeta,1}, \dots, Y_{\zeta,k}, \dots, Y_{\zeta,N_\zeta^{MY}} \right\}, \dots, \left\{ Y_{N^{MX},1}, \dots, Y_{N^{MX},k}, \dots, Y_{N^{MX},N_{N^{MX}}^{MY}} \right\} \right\} \quad (3.2)$$

2. Морфологічний блок системи по принципово можливих комбінаціях випромінюючих/невипромінюючих елементів структури псевдосупутникової РНС для кожного варіанту сполучення векторів $X_\zeta Y_{\zeta k}$:

$$\begin{aligned}
M[XYH] = & \left\{ \left\{ \left\{ \overline{(X_I Y_{1,1})}_I, \dots, \overline{(X_I Y_{1,1})}_\zeta, \dots, \overline{(X_I Y_{1,1})}_{N_{1,1}^{XYH}} \right\}, \dots \right. \right. \\
& \dots, \left. \left\{ \overline{(X_I Y_{1,k})}_I, \dots, \overline{(X_I Y_{1,k})}_\zeta, \dots, \overline{(X_I Y_{1,k})}_{N_{1,k}^{XYH}} \right\}, \dots \right. \\
& \left. \dots, \left\{ \overline{(X_I Y_{1,N_1^{MY}})}_I, \dots, \overline{(X_I Y_{1,N_1^{MY}})}_\zeta, \dots, \overline{(X_I Y_{1,N_1^{MY}})}_{N_{1,N_1^{MY}}^{XYH}} \right\}, \dots \right. \\
& \dots, \left\{ \overline{(X_\zeta Y_{\zeta,1})}_I, \dots, \overline{(X_\zeta Y_{\zeta,1})}_\zeta, \dots, \overline{(X_\zeta Y_{\zeta,1})}_{N_{\zeta,1}^{XYH}} \right\} \\
& \dots, \left\{ \overline{(X_\zeta Y_{\zeta,k})}_I, \dots, \overline{(X_\zeta Y_{\zeta,k})}_\zeta, \dots, \overline{(X_\zeta Y_{\zeta,k})}_{N_{\zeta,k}^{XYH}} \right\}, \dots \\
& \dots, \left. \left. \left\{ \overline{(X_\zeta Y_{\zeta,N_\zeta^{MY}})}_I, \dots, \overline{(X_\zeta Y_{\zeta,N_\zeta^{MY}})}_\zeta, \dots, \overline{(X_\zeta Y_{\zeta,N_\zeta^{MY}})}_{N_{\zeta,N_\zeta^{MY}}^{XYH}} \right\}, \dots \right. \right. \\
& \dots, \left. \left\{ \overline{(X_{N^{MX}} Y_{N^{MX},1})}_I, \dots, \overline{(X_{N^{MX}} Y_{N^{MX},1})}_\zeta, \dots, \overline{(X_{N^{MX}} Y_{N^{MX},1})}_{N_{N^{MX},1}^{XYH}} \right\}, \dots \right. \\
& \dots, \left. \left\{ \overline{(X_{N^{MX}} Y_{N^{MX},k})}_I, \dots, \overline{(X_{N^{MX}} Y_{N^{MX},k})}_\zeta, \dots, \overline{(X_{N^{MX}} Y_{N^{MX},k})}_{N_{N^{MX},k}^{XYH}} \right\}, \dots \right. \\
& \dots, \left. \left. \left\{ \overline{(X_{N^{MX}} Y_{N^{MX},N_{N^{MX}}^{MY}})}_I, \dots, \overline{(X_{N^{MX}} Y_{N^{MX},N_{N^{MX}}^{MY}})}_\zeta, \dots \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left. \dots, \overline{(X_{N^{MX}} Y_{N^{MX},N_{N^{MX}}^{MY}})}_{N_{N^{MX},N_{N^{MX}}^{MY}}^{XYH}} \right\} \right\} \right\}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Складовими множин (3.1) – (3.3) є:

N^{MX} – кількість можливих варіантів структури мережі НПС;

$N_\zeta^{MY}, (\zeta = \overline{1, N^{MX}})$ – кількість можливих варіантів побудови мережі

НПС для ζ -го варіанту мережі НПС;

$N_{\zeta,k}^{XYH}, (k = \overline{1, N_\zeta^{MY}}, \zeta = \overline{1, N^{MX}})$ – кількість можливих комбінацій

випромінюючих/невипромінюючих псевдосупутників для k -го варіанту мережі ППС ζ -го варіанту мережі НПС;

$$\left(\overline{X_{\zeta} Y_{\zeta,k}} \right)_{\zeta}, (\zeta = \overline{1, N_{\zeta,k}^{XYH}}, k = \overline{1, N_{\zeta}^{MY}}, \zeta = \overline{1, N^{MX}}) - \zeta\text{-та комбінація}$$

випромінюючих/невипромінюючих псевдосупутників для k -го варіанту мережі ППС ζ -го варіанту мережі НПС.

Зазначені множини можна представити графічно у вигляді ієрархії варіантів та комбінацій (рис. 3.1), де p_i, q_j – відповідно імовірності того, що i -й псевдосупутник ($i \in \mathbf{I}_{\zeta}^{\hat{A}}$) у ζ -й комбінації може випромінювати радіонавігаційну інформацію (знаходиться у живому стані), а j -й ($j \in \mathbf{J}_{\zeta}^{\hat{I}}$) не може випромінювати РНІ (знаходиться у неживому стані або може бути знищений протягом наступного циклу випромінювання ним РНІ).

Максимальна кількість принципово можливих варіантів системи визначається як число перестановок булевих координат векторів стану \mathbf{X} та \mathbf{Y} :

$$N_{\hat{a}\hat{a}\hat{d}} = 2^{N^X} \cdot 2^{N^Y} = 2^{N^X + N^Y}. \quad (3.4)$$

де $N^X + N^Y$ – загальна кількість ПНПС та ОТППС, які залучаються.

Для оцінки ефективності кожного варіанту розглядається сукупність сузір'їв радіонавігаційних точок, що складаються з комбінацій його елементів, які формують пари векторів $(\mathbf{X}, \mathbf{Y})_j, (j = \overline{1, N_{\text{вар}}})$. З урахуванням (3.4) число таких комбінацій становить $2^{N_j^U}, (j = \overline{1, N_{\text{вар}}})$, де N_j^U – кількість можливих комбінацій у межах обраного j -го варіанту.

Таким чином, загальна кількість можливих комбінацій сузір'їв РНТ системи за усіма варіантами складає

$$N_{\text{комб}} = \sum_{j=1}^{N_{\text{вар}}} 2^{\left(\sum_{i=1}^{N^X} X_{j,i} + \sum_{r=1}^{N^Y} Y_{j,r} \right)}. \quad (3.5)$$

де $X_{j,i}$ та $Y_{j,r}$ – координати векторів X_j та Y_j , сформованих у j -му варіанті.

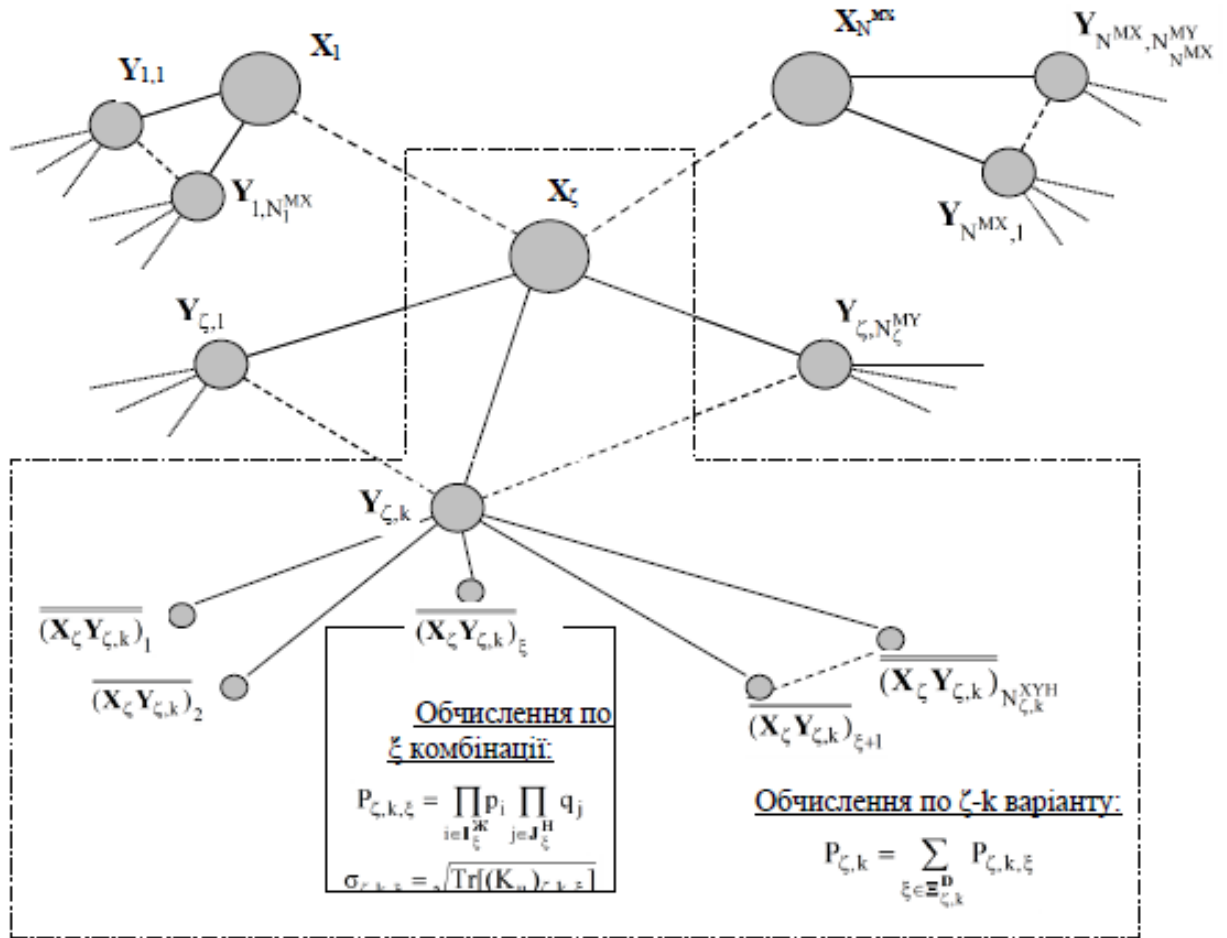


Рисунок 3.1 – Множина варіантів структури локальної РНС

Наприклад, при $N^X + N^Y = 10$ загальна кількість можливих комбінацій випромінюючих/невипромінюючих псевдосупутників за усіма варіантами системи складатиме 59049, а при $N^X + N^Y = 15$ кількість таких комбінацій становитиме 14348907. Таким чином, обсяг обчислень при збільшенні кількості системоутворюючих елементів зростає досить швидко.

Вигляд співвідношення (3.5) дозволяє віднести сформульовану комбінаторну задачу до задач перебору, що дає змогу стверджувати про існування розв'язання такої задачі [40, 42]. Неполіноміальна залежність кількості обчислень від довжини вектора вхідних параметрів (X, Y) та потужності утворюючого алфавіту $\{0,1\}$ визначає її належність до класу NP-повних задач [18, 40, 42, 47].

Найбільш значною складністю при вирішенні будь-яких комбінаторних задач є проблема їх багатомірності, тобто необхідності проведення великої кількості обчислень. Найефективнішим шляхом вирішення проблеми багатомірності є максимальне скорочення кількості варіантів та комбінацій на основі урахування специфіки задачі [40].

З цією метою з загальної кількості варіантів (3.5) необхідно відкинути ті, які не дають припустимого рішення задачі. При цьому значну роль відіграє формування та формалізація обмежень, які накладаються на вектори X та Y . Як уже зазначалось, однозначні навігаційні визначення можливі лише за умови, якщо у полі зору споживачів знаходиться одночасно не менше m^{min} псевдосупутників (РНТ), а у полі зору ППС – не менше m^{vid} наземних. Таке обмеження дає змогу визначати максимальну кількість варіантів мережі НПС, як

$$N_{\max}^{\text{НПС}} = \sum_{r=m^{vid}}^{N^X} C_r^{N^X}, \quad (3.6)$$

де $C_r^{N^X}$ – кількість комбінацій НПС з усієї множини N^X по мінімально необхідній кількості m^{vid} для забезпечення функціонування ППС.

Максимальна кількість варіантів мережі ППС може бути визначена на основі відомостей про кількість ОТППС (N^Y) та кількість ЛА (N^L), що можуть одночасно знаходитись у повітрі, як кількість комбінацій

$$N_{\max}^{\text{ППС}} = C_{N^L}^{N^Y}, \quad (3.7)$$

Таким чином, за (3.6) та (3.7) максимальне загальне число варіантів

системи складатиме $N_{\max} = N_{\max}^{\text{НПС}} N_{\max}^{\text{ППС}}$. Даний вираз визначає лише кількість можливих варіантів побудови структури системи. При цьому кожен з варіантів породжує множину комбінацій випромінюючих/невипромінюючих видимих псевдосупутників. Якщо припустити, що у полі зору споживачів (загальною кількістю N^E) одночасно може знаходитись у середньому m псевдосупутників різного типу при необхідних m^{\min} , то аналізу підлягатиме $N^k = \sum_{i=m^{\min}}^m C_i^m$ комбінацій випромінюючих/невипромінюючих псевдосупутників. Решта комбінацій ($2^m - N^k$) відносяться до неприйнятних для даного варіанту і тому окремо не аналізуються.

Так, якщо прийняти $N^X = 10$, $N^Y = 5$, $N^L = 2$, $m^{\min} = 5$, $m^{\text{vid}} = 4$, $m = 7$, то загальна максимальна кількість варіантів побудови псевдосупутникової РНС з урахуванням обмежень становитиме $N_{\max} = 6380$, замість $N_{\text{ааа}} = 2^{15} = 32768$, тобто досягається п'ятикратне скорочення кількості варіантів аналізу. При цьому середня кількість комбінацій, які підлягатимуть аналізу, становитиме $N^e = 64$. Помноживши кількість варіантів на середню кількість комбінацій, отримуємо загальну кількість комбінацій з урахуванням встановлених обмежень, які підлягають розгляду (обсяг обчислень). Для наведеного прикладу вона складе 408320, що у порівнянні з загальною можливою кількістю комбінацій без урахування обмежень $N_{\text{сaa}} = 14348907$ дозволяє вести мову про 35-кратне скорочення обсягу обчислень за рахунок встановлення обмежень та урахування специфіки задачі.

Отже, задача відшукування оптимальної структури псевдосупутникової РНС відноситься до класу NP-повних задач комбінаторного типу. Множини (3.1) – (3.2) визначають можливі варіанти побудови псевдосупутникової РНС, а множина (3.3) визначає усі можливі комбінації сузір'їв РНТ, які будуть використовуватись для обчислення ефективності варіантів (3.1) –

(3.2). Розв'язання таких задач вимагає застосування методів дискретної оптимізації [38, 41, 42, 47, 109].

Загальна схема вирішення оптимізаційної задачі являє собою послідовність пошуку умовно-оптимальних варіантів зміни просторової структури за критерієм максимуму ефективності для деяких фіксованих значень її вартості, починаючи з мінімально можливого значення вартості системи, яка визначатиметься мінімально необхідною кількістю системоутворюючих елементів (наземних та повітряних псевдосупутників) (рис. 3.2). При цьому очевидним є те, що збільшення кількості елементів призводить лише до покращення характеристик системи (з точки зору її ефективності).

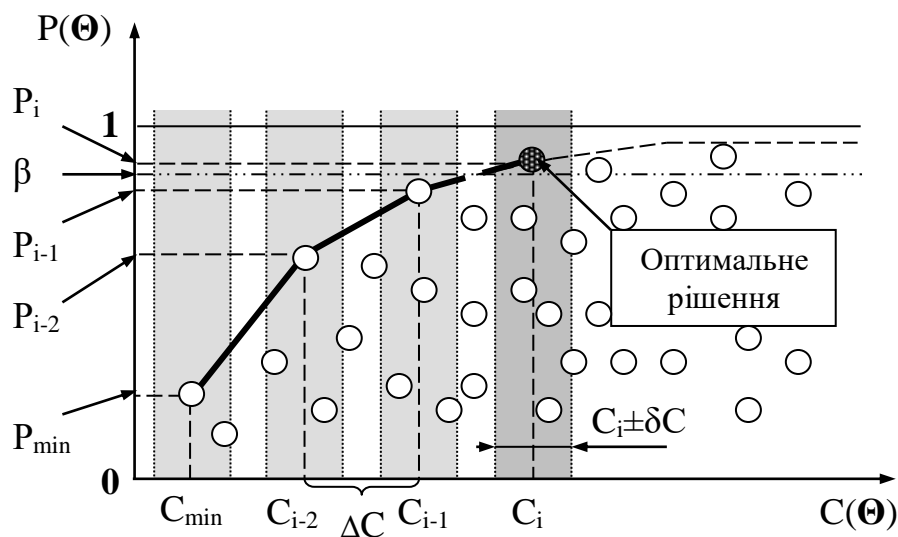


Рисунок 3.2 – Загальна схема пошуку оптимального варіанту за $C(\Theta) \rightarrow \min$ та $P(\Theta) \geq \beta$

Таким чином, кожен умовно-оптимальний варіант системи зі збільшенням значення $C(\Theta)$ буде характеризуватись також і більшим значенням показника ефективності $P(\Theta)$. У загальному випадку пошук умовно-оптимального варіанту здійснюється шляхом поступового обчислення значень $\max\{P(\Theta)\}$ для фіксованих значень $C(\Theta) \pm \delta C$, тобто для

фіксованого кількісного складу НПС та ППС, на множині можливих варіантів вектора стану Θ (рис. 3.2). Перше рішення, яке задовольнятиме умову $\max\{P(\Theta)\} \geq \beta$ (i -й крок на рис. 3.2) і буде оптимальним варіантом просторової структури системи [18].

Очевидно, що точність отриманого рішення буде вимірюватись одиницями вартості і залежатиме від кроку сканування δC , який визначатиметься різницею $C_i - C_{i-1}$.

Вигляд цільової функції системи (1.23) та характер обмежень (розд. 2.1), загальна схема пошуку оптимального варіанту, а також комбінаторний характер вирішуваної задачі та належність її до класу NP-повних вказують на доцільність застосування комбінаторних методів дискретної оптимізації, які засновані на упорядкованому переборі найбільш перспективних варіантів [40–42, 47, 64, 129, 131]. Найбільш вивченими та розповсюдженими з них є метод гілок та меж, метод динамічного програмування та метод послідовного аналізу варіантів, який, фактично, є узагальненням ідей теорії послідовних статистичних рішень та динамічного програмування [40, 53, 54, 105, 107].

З точки зору формальної логіки схема послідовного аналізу варіантів зводиться до повторення наступної послідовності перетворень:

- розбиття множини варіантів вирішень задачі на декілька підмножин, кожній з яких притаманні додаткові специфічні властивості;
- використання специфічних властивостей підмножин вирішення задач для пошуку логічних протиріч у описі окремих підмножин;
- виключення з подальшого розгляду тих підмножин варіантів рішення, у описі яких є логічні протиріччя.

При цьому методика послідовного розвитку, аналізу та відбору варіантів являє собою такі способи їх розвитку та побудови операторів їх аналізу, які дозволяють відсіювати невігідні (безперспективні) початкові частини варіантів до повної побудови останніх (в міру того, як ця безперспективність виявляється). Оскільки при відсіюванні безперспективних початкових частин

варіантів відсіюється і множина їх продовжень, то відбувається значна економія в обчислювальній процедурі. Остання обставина досить ефективно використовується при вирішенні широкого кола практичних задач. Так, у [53, 132] пропонується ідея фіксації довжини початкових відрізків рішення, тобто частини змінних, з одночасним застосуванням визначених правил відсіву по усій множині окремих рішень, що аналізуються на даному кроці. Рішення конструюється тільки після звуження множини вихідних варіантів до достатньо малої, на якій можливим є перебір з одночасною перевіркою знайденого рішення на оптимальність. На основі такого підходу побудовані алгоритми вирішення задач дискретного сепарабельного програмування.

Можливість і доцільність застосування методу послідовного аналізу варіантів для вирішення задачі проектування структури псевдосупутникової РНС обумовлюється існуючою структурою вектора рішення, який складається з двох частин (X та Y), при цьому кожен варіант мережі НПС (вектор X) формує множину варіантів мережі ППС (вектор Y). Тому, застосувавши процедуру обмеження варіантів на X -рівні (рис. 2.1) можна досягти суттєвого скорочення кількості подальших обчислень, оскільки внаслідок такого скорочення відпадають цілі сукупності множин на рівні Y та на наступних рівнях. Основним завданням при такому підході є формування ефективних процедур відсіювання безперспективних варіантів та комбінацій. При цьому найбільш вагомим та доцільним є обмеження, яке враховує наявність радіовидимості кожним споживачем достатньої загальної кількості псевдосупутників, а кожним діючим ППС – достатньої кількості НПС. Однак, число варіантів, що залишилися, може виявитись також досить значним, і тому на етапі відбору варіантів рівня X доцільним є введення додаткового “примусового” обмеження кількості варіантів вектора X на основі введення додаткової вимоги щодо відповідності вартості системи встановленим обмеженням ($\tilde{N}_{min} \leq C^S \leq C_{max}$). При цьому діапазон обмежень $\delta = C_{max} - \tilde{N}_{min}$ є “плаваючим”, тобто таким, що залежить від

початкової кількості можливих варіантів на рівні X .

Передбачається наступний порядок роботи зазначеного обмеження [17]: оцінюється кількість варіантів N^{MX} на рівні X і, якщо варіантів занадто багато (максимально-припустиме число варіантів N^{max} визначається експериментально, виходячи з наявних обчислювальних ресурсів), то застосовується фільтрація, яка полягає у зменшенні діапазону вартості системи до величини, за якої до даного діапазону буде входити лише припустима кількість варіантів N^{MX} , що не більша за N^{max} . Таким чином, шляхом послідовних ітерацій, на основі існуючого значення діапазону вартостей системи δ та початкового значення $\delta^{поч}$ визначається нове значення δ' і здійснюється повернення до початку обчислень кількості варіантів на рівні X

$$\delta' = \delta - \delta^{поч} (1 - e^{-\varepsilon(N^Y - N^{max})}), \quad (3.8)$$

де ε – деякий коефіцієнт у проміжку від 0 до 1 (визначається експериментально).

Обмеження (3.8) здатне адаптуватися до поточних умов. Так, якщо отримана кількість варіантів на рівні X незначно перевищує встановлене обмеження N^{max} , то діапазон вартості на черговій ітерації буде звужено на досить малу величину. Але, якщо $N^{MX} \gg N^{max}$, то з кожною наступною ітерацією значення δ стрімко зменшується, доки не досягне припустимої межі, після чого (коли $N^{MX} < N^{max}$) обчислення продовжуються на обмеженому числі варіантів. На основі експериментальних досліджень можна стверджувати, що за будь-якої різниці $N^{MX} - N^{max}$ кількість ітерацій, необхідних для досягнення вартості системи, за якої кількість варіантів на рівні X буде не більшою N^{max} , становить не більше 6.

Застосування фільтрації (3.8) дає змогу розширити область застосування методу послідовного аналізу варіантів та значно зменшити

кількість необхідних обчислень.

3.2. Розробка методу синтезу просторової структури локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою

У відповідності з загальною схемою методу послідовного аналізу варіантів та на основі обраної структури вектора рішення, для вирішення задачі системного проектування псевдосупутникової РНС з гнучкою структурою розроблено метод синтезу, яка базується на основі методів комбінаторного аналізу [18, 107], комп'ютерної алгебри [109] та лексикографії [36, 108].

Для спрощення подальших викладень застосовані наступні скорочення та позначення:

A^B – множина, матриця або вектор (позначається напівжирним шрифтом): A – ім'я об'єкта (множини), B – розширення імені;

A_i^B – i -й елемент множини (координата вектора) A^B , який є числом.

Якщо елемент сам є множиною, вектором або матрицею – то позначається напівжирним шрифтом;

A'^B – нове значення змінної A^B ;

$|A|$ – число елементів (потужність) множини A .

З метою спрощення вирішення поставленої задачі на комп'ютері при застосуванні сучасних пакетів символічних та чисельних обчислень (Mathcad, Matlab, Mathematica та ін.), алгоритм оптимізації було розроблено з застосуванням операторів (функцій), отриманих на основі сигнатури алгебри спискових структур. Необхідність використання спискових структур пояснюється кращою їх адаптованістю до представлення у пам'яті ПЕОМ, простішою логікою операцій та можливістю задання множин, матриць та векторів у вигляді списків. Основні теоретичні відомості, оператори та

функції алгебри спискових структур наведені у [18, 107].

Зокрема, застосовуються наступні оператори комп'ютерної алгебри:

$dim A$ – визначає довжину списку A ;

$dim_1 B$ – визначає кількість елементів 1-го рівня у списку B ;

$Int[G, \{A_i, A_j\}]$ – здійснює інтерполяцію, тобто обчислює значення функції, визначеної на масиві G , у точці поля з координатами $\{A_i, A_j\}$;

$Del[B, A]$ – видаляє зі списку B , елементи, порядкові номери яких задано множиною (списком) A ;

$Pal[A, N]$ – розширює список A нулями зліва до загальної розмірності N ;

$Per[A]$ – визначає множину перестановок елементів списку A ;

$Ins[A, B, C]$ – доповнює список A елементами B на позиціях, порядкові номери яких визначені множиною (списком) C . Вставка елементів здійснюється по черзі у порядку збільшення позицій, відлік позицій – зліва направо;

$Max A$ – визначає максимальний елемент у списку A ;

$Min B$ – визначає мінімальний елемент у списку B ;

$Join[A, B]$ – об'єднує списки A та B ;

$Abs[X]$ – визначає модуль (абсолютне значення) змінної X .

Метод синтезу локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою.

1. Введення вихідних даних.

1.1. Мінімумально необхідна кількість псевдосупутників для навігації m^{min}

;

- 1.2. Мінімально необхідна кількість НПС m^{vid} у полі зору ППС;
- 1.3. Значення критерію ефективності β ;
- 1.4. Максимальна СКП визначення координат споживача σ^{max} ;
- 1.5. Величина діапазону варіювання вартості системи δ (у.о.);
- 1.6. Максимально допустима кількість варіантів побудови мережі НПС N^{max} ;
- 1.7. Задаємо матрицю рельєфу місцевості:

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} G_{1,1} & \dots & G_{1,N^G} \\ \dots & \dots & \dots \\ G_{M^G,1} & \dots & G_{M^G,N^G} \end{pmatrix}, \quad (3.9)$$

де $G_{i,j}$ – значення висоти рельєфу місцевості у регулярних точках мережі, розташованих у межах району, що розглядається;

N^G та M^G – кількість стовпчиків та рядків матриці (3.9) відповідно.

1.8. Задаємо межі району, рельєф якого заданий матрицею \mathbf{G} : φ^{GN} – з півночі; φ^{GS} – з півдня; λ^{GW} – з заходу; λ^{GE} – зі сходу.

1.9. Задаємо матрицю параметрів ПНПС:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} A_{1,1} & \dots & A_{1,8} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{N^x,1} & \dots & A_{N^x,8} \end{pmatrix}, \quad (3.10)$$

де $A_{i,1}$, $A_{i,2}$ – геодезичні широта та довгота позиції розташування НПС (град.);

$A_{i,3}$ – висота ПНПС над рельєфом місцевості (м);

$A_{i,4}$ – надійність НПС, розташованого на даній позиції;

$A_{i,5}$, $A_{i,6}$, $A_{i,7}$ – СКП прив'язки НПС до системи координат по широті, довготі та висоті відповідно (м);

$A_{i,8}$ – вартість розгортання НПС на даній позиції (у.о.);

N^X – кількість ПНПС.

1.10. Задаємо матрицю параметрів ОТППС:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} B_{1,1} & \dots & B_{1,3} \\ \dots & \dots & \dots \\ B_{N^Y,1} & \dots & B_{N^Y,3} \end{pmatrix}, \quad (3.11)$$

де $B_{i,1}$, $B_{i,2}$ – геодезичні широта та довгота опорної точки ППС (град.);

$B_{i,3}$ – висота ОТППС над рівнем моря (м);

N^Y – кількість ОТППС.

1.11. Задаємо матрицю параметрів характерних точок споживача:

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_{1,1} & \dots & E_{1,3} \\ \dots & \dots & \dots \\ E_{N^E,1} & \dots & E_{N^E,3} \end{pmatrix}, \quad (3.12)$$

де $E_{i,1}$, $E_{i,2}$ – геодезичні широта та довгота точки споживача (град.);

$E_{i,3}$ – висота характерної точки над рельєфом місцевості (м);

N^E – кількість характерних точок споживача.

1.12. Задаємо вектор параметрів ППС:

$$\mathbf{L} = (L_1, \dots, L_6), \quad (3.13)$$

де L_1 , L_2 , L_3 – СКП витримування траєкторії літальним апаратом – носієм ППС у ГСК, яка обумовлена конструкцією ЛА та збуреннями атмосфери (м);

L_4 – СКП витримування траєкторії літальним апаратом у ГСК, що обумовлена нестабільністю бортового хронометра ЛА (м);

L_5 – надійність ЛА;

L_6 – вартість виконання завдання ЛА даного типу (у.о.).

1.13. Задаємо N^L – кількість ЛА.

1.14. Введення параметрів земного еліпсоїда: наприклад, за WGS-84: велика піввісь ($a = 6378137$ м), стиснення ($\alpha = 1/298.257563$).

2. Проведення попередніх розрахунків.

2.1. За співвідношеннями (3.10) – (3.12) визначаємо розміри системи:

$$N^X = \dim_l \mathbf{A}, \quad N^Y = \dim_l \mathbf{B}, \quad N^E = \dim_l \mathbf{E}. \quad (3.14)$$

2.2. Задаємо початкове значення діапазону вартості:

$$\delta^{dop} = \delta. \quad (3.15)$$

2.3. Визначаємо абсолютну висоту НПС, (відносно центру Землі):

$$A'_{i,3} = \text{Int}[\mathbf{G}, \{A_{i,1}, A_{i,2}\}] + A_{i,3}, \quad i = \overline{1, N^X}. \quad (3.16)$$

При цьому матриця \mathbf{A} параметрів ПНПС набуде наступного вигляду:

$$\mathbf{A}' = \begin{pmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & A'_{1,3} & A_{1,4} & \dots & A_{1,8} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{N^X,1} & A_{N^X,2} & A'_{N^X,3} & A_{N^X,4} & \dots & A_{N^X,8} \end{pmatrix}. \quad (3.17)$$

2.4. Визначаємо абсолютну висоту характерних точок споживача:

$$E'_{i,3} = \text{Int}[\mathbf{G}, \{E_{i,1}, E_{i,2}\}] + E_{i,3}, \quad i = \overline{1, N^E}. \quad (3.18)$$

При цьому матриця \mathbf{E} параметрів характерних точок споживача набуде вигляду:

$$\mathbf{E}' = \begin{pmatrix} E_{1,1} & E_{1,2} & E'_{1,3} \\ \dots & \dots & \dots \\ E_{N^E,1} & E_{N^E,2} & E'_{N^E,3} \end{pmatrix}. \quad (3.19)$$

3. Задаємо вектори стану ПНПС \mathbf{X} та ОТППС \mathbf{Y} у вигляді одиничних

векторів розмірністю N^X та N^Y відповідно

$$\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_{N^X}) = (1, 1, \dots, 1). \quad (3.20)$$

$$\mathbf{Y} = (Y_1, \dots, Y_{N^Y}) = (1, 1, \dots, 1). \quad (3.21)$$

4. Визначаємо матриці геоцентричних (прямокутних) координат.

4.1. Для ПНПС:

$$\mathbf{A}^{(g)} = \begin{vmatrix} A_{1,1}^{(g)} & A_{1,2}^{(g)} & A_{1,3}^{(g)} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{N^X,1}^{(g)} & A_{N^X,2}^{(g)} & A_{N^X,3}^{(g)} \end{vmatrix}. \quad (3.22)$$

4.2. Для ОТППС:

$$\mathbf{B}^{(g)} = \begin{vmatrix} B_{1,1}^{(g)} & B_{1,2}^{(g)} & B_{1,3}^{(g)} \\ \dots & \dots & \dots \\ B_{N^Y,1}^{(g)} & B_{N^Y,2}^{(g)} & B_{N^Y,3}^{(g)} \end{vmatrix}. \quad (3.23)$$

4.3. Для характерних точок споживачів:

$$\mathbf{E}^{(g)} = \begin{vmatrix} E_{1,1}^{(g)} & E_{1,2}^{(g)} & E_{1,3}^{(g)} \\ \dots & \dots & \dots \\ E_{N^E,1}^{(g)} & E_{N^E,2}^{(g)} & E_{N^E,3}^{(g)} \end{vmatrix}. \quad (3.24)$$

У співвідношеннях (3.22) – (3.24):

$$F_{i,1}^{(g)} = \left(\frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 F_{i,1}}} + F_{i,3} \right) \cos F_{i,1} \cos F_{i,2},$$

$$F_{i,2}^{(g)} = \left(\frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 F_{i,1}}} + F_{i,3} \right) \cos F_{i,1} \sin F_{i,2},$$

$$F_{i,3}^{(g)} = \left(\frac{a(1 - e^2)}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 F_{i,1}}} + F_{i,3} \right) \sin F_{i,1},$$

де $F = A$, $i = \overline{1, N^X}$ для ПНПС;

$F = B$, $i = \overline{1, N^Y}$ для ОТППС;

$F = E$, $i = \overline{1, N^E}$ для характерних точок споживачів.

5. Обчислюємо матриці прямої видимості:

5.1. Матриця прямої видимості ПНПС для кожної ОТППС:

$$V = \begin{pmatrix} V_{1,1} & \dots & V_{1,N^X} \\ \dots & \dots & \dots \\ V_{N^Y,1} & \dots & V_{N^Y,N^X} \end{pmatrix}, \quad (3.25)$$

де $V_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при наявності прямої радіовидимості;} \\ 0, & \text{при відсутності радіовидимості.} \end{cases}$
 $j = \overline{1, N^X}$, $i = \overline{1, N^Y}$.

5.2. Матриця прямої видимості ПНПС для кожної характерної точки споживача:

$$W^X = \begin{pmatrix} W_{1,1}^X & \dots & W_{1,N^X}^X \\ \dots & \dots & \dots \\ W_{N^E,1}^X & \dots & W_{N^E,N^X}^X \end{pmatrix}, \quad (3.26)$$

де $W_{ij}^X = \begin{cases} 1, & \text{при наявності прямої радіовидимості;} \\ 0, & \text{при відсутності радіовидимості.} \end{cases}$
 $j = \overline{1, N^X}$, $i = \overline{1, N^E}$.

5.3. Матриця прямої видимості ОТППС для кожної характерної точки споживача:

$$W^Y = \begin{pmatrix} W_{1,1}^Y & \dots & W_{1,N^Y}^Y \\ \dots & \dots & \dots \\ W_{N^E,1}^Y & \dots & W_{N^E,N^Y}^Y \end{pmatrix}, \quad (3.27)$$

$$\text{де } W_{i,j}^Y = \begin{cases} 1, & \text{при наявності прямої радіовидимості;} \\ 0, & \text{при відсутності радіовидимості;} \\ \overline{j=1, N^Y}, & i = \overline{1, N^E}. \end{cases}$$

Елементи матриць (3.25) – (3.27) обчислюються за відомими алгоритмами розрахунку, розробленими на основі відповідних методик, наприклад [123].

6. Проводимо вибір ОТППС шляхом видалення “невидимих” точок.

6.1. Для кожної ОТППС перевіряємо виконання умови радіовидимості достатньої кількості ПНПС та видимості самої ОТППС хоча б для однієї характерної точки споживача, після чого змінюємо значення координат вектора (3.21):

$$Y_i = 0, \text{ як } \left(\sum_{j=1}^{N^X} V_{i,j} < m^{\text{vid}} \right) \vee \left(\sum_{j=1}^{N^E} W_{j,i}^Y = 0 \right), i = \overline{1, N^Y}, \quad (3.28)$$

де $V_{i,j}$ – i,j -й елемент матриці (3.25);

$W_{j,i}^Y$ – j,i -й елемент матриці (3.27).

6.2. Видаляємо з матриці (3.11) ті вектори-рядки, які відповідають “невидимим” для споживачів ОТППС, та тим ОТППС, які не мають у полі зору достатньої кількості ПНПС:

$$\mathbf{B}' = \text{Del} \left[\mathbf{B}, \left\{ i \mid Y_i = 0, i = \overline{1, N^Y} \right\} \right]. \quad (3.29)$$

6.3. З матриці (3.27) видаляємо ті стовпчики, які відповідають “невидимим” ОТППС:

$$W'^Y = \left(\text{Del} \left[(W^Y)^T, \left\{ i \mid Y_i = 0, i = \overline{1, N^Y} \right\} \right] \right)^T. \quad (3.30)$$

6.4. З матриці (3.25) видаляються рядки:

$$\mathbf{V}' = Del\left[\mathbf{V}, \left\{i \mid Y_i = 0, i = \overline{1, N^Y}\right\}\right]. \quad (3.31)$$

6.5. З вектора (3.28) видаляються нульові координати:

$$\mathbf{Y}' = Del\left[\mathbf{Y}, \left\{i \mid Y_i = 0, i = \overline{1, N^Y}\right\}\right]. \quad (3.32)$$

6.6. Визначаємо нове значення

$$N'^Y = dim_1 \mathbf{B}. \quad (3.33)$$

7. Перевіряємо доцільність вибору ПНПС та видаляємо “зайві” ПНПС.

7.1. Змінюємо значення координат вектора стану ПНПС (3.20) шляхом присвоєння значення “0” тим ПНПС, які є “невидимими” для жодної ОТППС та жодної характерної точки споживача:

$$X'_j = 0, \text{ я як } \sum_{i=1}^{N^Y} V_{i,j} = 0 \wedge \sum_{i=1}^{N^E} U_{i,j}^X = 0, j = \overline{1, N^X}. \quad (3.34)$$

7.2. Видаляємо з матриці (3.27) ті вектори-рядки, для яких відповідна координата вектора (3.34) дорівнює 0:

$$\mathbf{A}' = Del\left[\mathbf{A}, \left\{i \mid X_i = 0, i = \overline{1, N^X}\right\}\right]. \quad (3.35)$$

7.3. Видаляємо відповідні стовпчики з матриць (3.31) та (3.26):

$$\mathbf{V}' = \left(Del\left[(\mathbf{V})^T, \left\{i \mid X_i = 0, i = \overline{1, N^X}\right\}\right] \right)^T. \quad (3.36)$$

$$\mathbf{W}'^X = \left(Del\left[(\mathbf{W}^X)^T, \left\{i \mid X_i = 0, i = \overline{1, N^X}\right\}\right] \right)^T. \quad (3.37)$$

7.4. Зменшуємо розмірність вектора (3.34) шляхом видалення нульових координат:

$$\mathbf{X}' = Del\left[\mathbf{X}, \left\{i \mid X_i = 0, i = \overline{1, N^X}\right\}\right]. \quad (3.38)$$

7.5. Обчислюємо нове значення кількості ПНПС:

$$N'^X = \dim_1 A. \quad (3.39)$$

8. Обчислюємо матриці векторів окремих похідних навігаційної функції по навігаційних параметрах:

8.1. З кожної ПНПС на ОТППС:

$$C^L = \begin{vmatrix} C_{I,1}^L & \dots & C_{I,N^X}^L \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{N^Y,I}^L & \dots & C_{N^Y,N^X}^L \end{vmatrix}, \quad (3.40)$$

$$\text{де } C_{i,j}^L = \begin{cases} (C_{i,j,1}^L, C_{i,j,2}^L, C_{i,j,3}^L), & \text{якщо } V_{i,j} = 1, \\ (0, 0, 0), & \text{якщо } V_{i,j} = 0, \quad i = \overline{I, N^Y}, j = \overline{I, N^X}. \end{cases} \quad (3.41)$$

У виразі (3.41):

$$C_{i,j,1}^L = \frac{A_{j,1}^{(g)} - B_{i,1}^{(g)}}{\sqrt{(A_{j,1}^{(g)} - B_{i,1}^{(g)})^2 + (A_{j,2}^{(g)} - B_{i,2}^{(g)})^2 + (A_{j,3}^{(g)} - B_{i,3}^{(g)})^2}}, \quad (3.42)$$

$$C_{i,j,2}^L = \frac{A_{j,2}^{(g)} - B_{i,2}^{(g)}}{\sqrt{(A_{j,1}^{(g)} - B_{i,1}^{(g)})^2 + (A_{j,2}^{(g)} - B_{i,2}^{(g)})^2 + (A_{j,3}^{(g)} - B_{i,3}^{(g)})^2}}, \quad (3.43)$$

$$C_{i,j,3}^L = \frac{A_{j,3}^{(g)} - B_{i,3}^{(g)}}{\sqrt{(A_{j,1}^{(g)} - B_{i,1}^{(g)})^2 + (A_{j,2}^{(g)} - B_{i,2}^{(g)})^2 + (A_{j,3}^{(g)} - B_{i,3}^{(g)})^2}}, \quad (3.44)$$

де $A_{j,k}^{(g)}, B_{i,k}^{(g)}, (k = \overline{1,3})$ – елементи матриць (3.22) та (3.23) відповідно.

Також обчислюємо матрицю векторів окремих похідних навігаційної функції по навігаційних параметрах для квазідалекомірного режиму:

$$C^{LI} = \left\| \begin{array}{ccc} C_{1,1}^{LI} & \dots & C_{1,N^X}^{LI} \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{N^Y,1}^{LI} & \dots & C_{N^Y,N^X}^{LI} \end{array} \right\|, \quad (3.45)$$

$$\text{де } C_{i,j}^{LI} = \begin{cases} (C_{i,j,1}^L, C_{i,j,2}^L, C_{i,j,3}^L, 1), & \text{я як } V_{i,j} = 1, \\ (0,0,0,0), & \text{я що } V_{i,j} = 0, \end{cases}$$

$$i = \overline{1, N^Y}, j = \overline{1, N^X}.$$

Елементи $C_{i,j,1}^L, C_{i,j,2}^L, C_{i,j,3}^L$ ($i = \overline{1, N^Y}, j = \overline{1, N^X}$), обчислюються за формулами (3.42) – (3.44) відповідно.

8.2. З характерних точок споживача на ПНПС:

$$C^{EX} = \left\| \begin{array}{ccc} C_{1,1}^{EX} & \dots & C_{1,N^X}^{EX} \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{N^E,1}^{EX} & \dots & C_{N^E,N^X}^{EX} \end{array} \right\|, \quad (3.46)$$

$$\text{де } C_{i,j}^{EX} = \begin{cases} (C_{i,j,1}^{EX}, C_{i,j,2}^{EX}, C_{i,j,3}^{EX}), & \text{я як } U_{i,j}^X = 1, \\ (0,0,0), & \text{я що } U_{i,j}^X = 0, \end{cases}$$

$$i = \overline{1, N^E}, j = \overline{1, N^X}.$$

При цьому

$$C_{i,j,1}^{EX} = \frac{A_{j,1}^{(g)} - E_{i,1}^{(g)}}{\sqrt{(A_{j,1}^{(g)} - E_{i,1}^{(g)})^2 + (A_{j,2}^{(g)} - E_{i,2}^{(g)})^2 + (A_{j,3}^{(g)} - E_{i,3}^{(g)})^2}}, \quad (3.46)$$

$$C_{i,j,2}^{EX} = \frac{A_{j,2}^{(g)} - E_{i,2}^{(g)}}{\sqrt{(A_{j,1}^{(g)} - E_{i,1}^{(g)})^2 + (A_{j,2}^{(g)} - E_{i,2}^{(g)})^2 + (A_{j,3}^{(g)} - E_{i,3}^{(g)})^2}}, \quad (3.47)$$

$$C_{i,j,3}^{EX} = \frac{A_{j,3}^{(g)} - E_{i,3}^{(g)}}{\sqrt{(A_{j,1}^{(g)} - E_{i,1}^{(g)})^2 + (A_{j,2}^{(g)} - E_{i,2}^{(g)})^2 + (A_{j,3}^{(g)} - E_{i,3}^{(g)})^2}}, \quad (3.48)$$

де $A_{j,k}^{(g)}, E_{i,k}^{(g)}, (k = \overline{1,3})$ – елементи матриць (3.22) та (3.24) відповідно.

Також обчислюємо матрицю векторів окремих похідних для квазідалекомірного режиму:

$$C^{EXI} = \begin{pmatrix} C_{1,1}^{EXI} & \dots & C_{1,N^X}^{EXI} \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{N^E,1}^{EXI} & \dots & C_{N^E,N^X}^{EXI} \end{pmatrix}, \quad (3.49)$$

$$\text{де } C_{i,j}^{EXI} = \begin{cases} (C_{i,j,1}^{EX}, C_{i,j,2}^{EX}, C_{i,j,3}^{EX}, 1), & \text{якщо } U_{i,j}^{EX} = 1, \\ (0,0,0,0), & \text{якщо } U_{i,j}^{EX} = 0, \end{cases}$$

$$i = \overline{1, N^E}, j = \overline{1, N^X}.$$

Елементи $C_{i,j,1}^{EX}, C_{i,j,2}^{EX}, C_{i,j,3}^{EX}$ де $i = \overline{1, N^E}, j = \overline{1, N^X}$, обчислюються за формулами (3.46) – (3.48).

8.3. З характерних точок споживача на ОТППС:

$$C^{EY} = \begin{pmatrix} C_{1,1}^{EY} & \dots & C_{1,N^Y}^{EY} \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{N^E,1}^{EY} & \dots & C_{N^E,N^Y}^{EY} \end{pmatrix}, \quad (3.50)$$

$$\text{де } C_{i,j}^{EY} = \begin{cases} (C_{i,j,1}^{EY}, C_{i,j,2}^{EY}, C_{i,j,3}^{EY}), & \text{якщо } U_{i,j}^Y = 1, \\ (0,0,0), & \text{якщо } U_{i,j}^Y = 0, \end{cases} \quad i = \overline{1, N^E}, j = \overline{1, N^Y}.$$

При цьому

$$C_{i,j,1}^{EY} = \frac{B_{j,1}^{(g)} - E_{i,1}^{(g)}}{\sqrt{(B_{j,1}^{(g)} - E_{i,1}^{(g)})^2 + (B_{j,2}^{(g)} - E_{i,2}^{(g)})^2 + (B_{j,3}^{(g)} - E_{i,3}^{(g)})^2}}, \quad (3.51)$$

$$C_{i,j,2}^{EY} = \frac{B_{j,2}^{(g)} - E_{i,2}^{(g)}}{\sqrt{(B_{j,1}^{(g)} - E_{i,1}^{(g)})^2 + (B_{j,2}^{(g)} - E_{i,2}^{(g)})^2 + (B_{j,3}^{(g)} - E_{i,3}^{(g)})^2}}, \quad (3.52)$$

$$C_{i,j,3}^{EY} = \frac{B_{j,3}^{(g)} - E_{i,3}^{(g)}}{\sqrt{(B_{j,1}^{(g)} - E_{i,1}^{(g)})^2 + (B_{j,2}^{(g)} - E_{i,2}^{(g)})^2 + (B_{j,3}^{(g)} - E_{i,3}^{(g)})^2}}, \quad (3.53)$$

$B_{j,k}^{(g)}, E_{i,k}^{(g)}, (k = \overline{1,3})$ – елементи матриць (3.23) та (3.24) відповідно.

Також обчислюємо матрицю векторів окремих похідних для квазідалекомірного режиму, яка має вигляд

$$C^{EYI} = \left\| \begin{array}{ccc} C_{1,1}^{EYI} & \dots & C_{1,N^Y}^{EYI} \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{N^E,1}^{EYI} & \dots & C_{N^E,N^Y}^{EYI} \end{array} \right\|, \quad (3.54)$$

$$C_{i,j}^{EYI} = \begin{cases} (C_{i,j,1}^{EY}, C_{i,j,2}^{EY}, C_{i,j,3}^{EY}, 1), & \text{як } U_{i,j}^{EY} = 1, \\ (0,0,0,0), & \text{якщо } U_{i,j}^{EY} = 0, \end{cases}$$

$$i = \overline{1, N^E}, j = \overline{1, N^Y}.$$

Елементи $C_{i,j,1}^{EY}, C_{i,j,2}^{EY}, C_{i,j,3}^{EY}$ для $i = \overline{1, N^E}, j = \overline{1, N^Y}$, обчислюються за формулами (3.51) – (3.53).

9. Обчислюємо афітори переходу від ТСК до ГСК.

9.1. Для ПНПС:

$$A^X = \{A_1^X, \dots, A_i^X, \dots, A_{N^X}^X\}, \quad (3.55)$$

$$\text{де } A_i^X = \left\| \begin{array}{ccc} \sin A_{i,1} \cos A_{i,2} & \sin A_{i,1} \sin A_{i,2} & -\cos A_{i,1} \\ -\sin A_{i,2} & \cos A_{i,2} & 0 \\ \cos A_{i,1} \cos A_{i,2} & \cos A_{i,1} \sin A_{i,2} & \sin A_{i,1} \end{array} \right\|, \quad i = \overline{1, N^X},$$

$A_{i,k}, (k = \overline{1,2})$ – елемент матриці (3.35).

9.2. Для характерних точок споживачів:

$$A^E = \{A_1^E, \dots, A_i^E, \dots, A_{N^E}^E\}, \quad (3.56)$$

$$\text{де } \mathbf{A}_i^E = \begin{vmatrix} \sin E_{i,1} \cos E_{i,2} & \sin E_{i,1} \sin E_{i,2} & -\cos E_{i,1} \\ -\sin E_{i,2} & \cos E_{i,2} & 0 \\ \cos E_{i,1} \cos E_{i,2} & \cos E_{i,1} \sin E_{i,2} & \sin E_{i,1} \end{vmatrix}, \quad i = \overline{1, N^E},$$

$E_{i,k}$, ($k = \overline{1, 2}$) – елемент матриці (3.19).

10. На основі виразів (3.30), (3.33), (3.37) та (3.39) перевіряємо достатність видимих точок у полі зору споживачів: якщо

$$\exists i = \overline{1, N^E} \left| \sum_{j=1}^{N^X} W_{i,j}^X + \sum_{j=1}^{N^Y} W_{i,j}^Y < m^{\min} \right., \text{ то задача не має рішення. Необхідно}$$

збільшити кількість ПНПС та/або ОТПС і повернутись до п. 2.4. У протилежному випадку переходимо до наступного пункту.

11. Задаємо початкове значення допустимої вартості системи $C_\mu^X (\mu = 1)$

12. Визначаємо множину \mathbf{M}^X таких векторів стану мережі НПС, за яких система задовольняє встановлені обмеження щодо мінімального числа видимих НПС та допустимої вартості.

12.1. Встановлюємо початкове значення множини $\mathbf{M}^X = \emptyset$.

12.2. Встановлюємо початкове значення змінної $j = m^{\text{vid}}$;

12.3. Задаємо одиничний вектор $\mathbf{X}^{PI} = (1, 1, \dots, 1)$ розмірністю $\dim \mathbf{X}^{PI} = j$.

12.4. Розширюємо вектор \mathbf{X}^{PI} нулями зліва до загальної розмірності N^X і отримуємо вектор $\mathbf{X}^P = \text{Pal}[\mathbf{X}^{PI}, N^X]$, у якому кількість одиниць дорівнює j , а кількість нулів (зліва від одиниць) становить $N^X - j$.

12.5. Визначаємо множину усіх можливих перестановок координат вектора \mathbf{X}^P :

$$\mathbf{X}^{PXP} = \text{Per}[\mathbf{X}^P]. \quad (3.57)$$

12.6. На основі (3.13), (3.35), (3.57) обчислюємо множину вартостей системи по кожній перестановці з множини \mathbf{X}^{PXP} :

$$C^S = \left\{ C_k^S = \sum_{i=1}^{N^x} A_{i,9} X_{k,i}^{PXP} + L_6 N^L \mid k = \overline{1, |\mathbf{X}^{PXP}|} \right\}. \quad (3.58)$$

12.7. Використавши (3.58) з множини \mathbf{X}^{PXP} відбираємо ті вектори-елементи, які проходять за встановленими обмеженнями по вартості системи:

$$\mathbf{X}^{PA} = \left\{ \mathbf{X}_k^{PXP} \mid k \in \left\{ k \mid \tilde{N}_\mu^\chi - \delta \leq C_k^S \leq \tilde{N}_\mu^\chi + \delta, k = \overline{1, |\mathbf{X}^{PXP}|} \right\} \right\}. \quad (3.59)$$

12.8. Об'єднуємо отриману множину (3.59) з уже існуючою множиною \mathbf{M}^X і отримуємо нову множину

$$\mathbf{M}'^X = \mathbf{X}^{PA} \cup \mathbf{M}^X. \quad (3.60)$$

12.9. Перевіряємо значення змінної j (кількості НПС в системі): якщо $j < N^X$, то задаємо нове значення $j' = j + 1$ і повертаємось до п. 12.3, у протилежному випадку переходимо далі.

12.10. Перевіряємо наявність допустимих варіантів системи: якщо множина $\mathbf{M}^X = \emptyset$, то це означає, що жоден з варіантів мережі НПС не задовольняє умову щодо вартості системи ($\tilde{N}_\mu^\chi - \delta \leq C_k^S \leq \tilde{N}_\mu^\chi + \delta$). Необхідно збільшити вартість системи (кількість НПС) та повернутись до п. 2.4. У протилежному випадку, коли $\mathbf{M}^X \neq \emptyset$, переходимо далі.

13. Для кожного вектора-варіанту $\mathbf{M}_\zeta^X \in \mathbf{M}^X, \zeta = \overline{1, |\mathbf{M}^X|}$ перевіряємо умову радіовидимості достатньої кількості псевдосупутників споживачами.

13.1. Обчислюємо множину \mathbf{M}^{XX} діагональних матриць, елементами яких є координати відповідних векторів з множини (3.60):

$$\mathbf{M}^{XX} = \left\{ \mathbf{M}_{\zeta}^{XX} = \left\| \mathbf{M}_{i,j}^{XX} \right\|_{\zeta} \mid \zeta = \overline{1, |\mathbf{M}^X|} \right\}, \quad (3.61)$$

$$\text{де } M_{\zeta,i,j}^{XX} = \begin{cases} M_{\zeta,i}^X, & \text{якщо } i = j, \\ 0, & \text{якщо } i \neq j, \end{cases}$$

$$i = \overline{1, N^X}, j = \overline{1, N^X}.$$

13.2. На основі (3.36) та (3.38) обчислюємо множину матриць видимості НПС варіанта $\mathbf{M}_{\zeta}^X \in \mathbf{M}^X, \zeta = \overline{1, |\mathbf{M}^X|}$ для ОТППС:

$$\mathbf{V}^{\gamma} = \left\{ \mathbf{V}_{\zeta}^{\gamma} = \left(\mathbf{M}_{\zeta}^{XX} (\mathbf{V})^T \right)^T \mid \zeta = \overline{1, |\mathbf{M}^X|} \right\}, \quad (3.62)$$

де \mathbf{M}_{ζ}^{XX} – ζ -й варіант матриці стану мережі НПС.

13.3. Визначаємо множину діагональних матриць, які характеризують опорні точки ППС, для яких кількість видимих НПС достатня для навігаційних визначень:

$$\mathbf{Y}^{\gamma} = \left\{ \mathbf{Y}_{\zeta}^{\gamma} = \left\| \mathbf{Y}_{\zeta,i,j}^{\gamma} \right\| \mid \zeta = \overline{1, |\mathbf{M}^X|} \right\}, \quad (3.63)$$

$$\text{де } Y_{\zeta,i,j}^{\gamma} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } (i = j) \wedge \left(\sum_{t=1}^{N^X} V_{\zeta,i,t}^{\gamma} \geq m^{vid} \right), \\ 0, & \text{у протилежному випадку,} \end{cases} \quad i = \overline{1, N^Y}, j = \overline{1, N^Y},$$

$\sum_{t=1}^{N^X} V_{\zeta,i,t}^{\gamma}$ – сума елементів i -го рядка матриці $\mathbf{V}_{\zeta}^{\gamma}$ (3.62).

13.4. Визначаємо множини матриць $\mathbf{W}^{X\gamma}$ та $\mathbf{W}^{Y\gamma}$ видимості НПС та ППС споживачами для варіанту мережі НПС $\mathbf{M}_{\zeta}^X \in \mathbf{M}^X, \zeta = \overline{1, |\mathbf{M}^X|}$:

$$\mathbf{W}^{X\gamma} = \left\{ \mathbf{W}_{\zeta}^{X\gamma} = \left(\mathbf{M}_{\zeta}^{XX} (\mathbf{U}^X)^T \right)^T \mid \zeta = \overline{1, |\mathbf{M}^X|} \right\}, \quad (3.64)$$

$$W^{Y\gamma} = \left\{ W_{\zeta}^{Y\gamma} = \left(Y_{\zeta}^{\gamma} (U^Y)^T \right)^T \mid \zeta = \overline{1, |M^X|} \right\}, \quad (3.65)$$

де $M_{\zeta}^{XX} \in M^{XX}$ – діагональна матриця стану ζ -го варіанту мережі НПС (3.61);

$Y_{\zeta}^{\gamma} \in Y^{\gamma}$ – діагональна матриця стану мережі ППС для ζ -го варіанту мережі НПС (3.63);

W^X, W^Y – матриці видимості (3.30) та (3.37) відповідно.

13.5. Визначаємо множину порядкових номерів варіантів, які не відповідають встановленим обмеженням по кількості видимих псевдосупутників для споживача:

$$V^{D\gamma} = \left\{ \zeta \mid \sum_{j=1}^{N^X} W_{\zeta,i,j}^{X\gamma} + \sum_{j=1}^{N^Y} W_{\zeta,i,j}^{Y\gamma} < m^{min}, i = \overline{1, N^E}, \zeta = \overline{1, |M^X|} \right\}, \quad (3.66)$$

де $\sum_{j=1}^{N^X} W_{\zeta,i,j}^{X\gamma}$ – сума рядків матриці $W_{\zeta}^{X\gamma} \in W^{X\gamma}$ у формулі (3.64);

$\sum_{j=1}^{N^Y} W_{\zeta,i,j}^{Y\gamma}$ – сума рядків матриці $W_{\zeta}^{Y\gamma} \in W^{Y\gamma}$ у формулі (3.65).

13.6. За (3.66) з множин (3.60) – (3.65) видаляємо елементи, що відповідають варіантам, за яких для споживача недостатньо видимих псевдосупутників:

$$M'^X = M^X \setminus \overline{M}^X, \quad (3.67)$$

де $\overline{M}^X = \left\{ M_j^X \mid j \in V^{D\gamma}, M_j^X \in M^X \right\}$;

$$M'^{XX} = M^{XX} \setminus \overline{M}^{XX}, \quad (3.68)$$

де $\overline{M}^{XX} = \left\{ M_j^{XX} \mid j \in V^{D\gamma}, M_j^{XX} \in M^{XX} \right\}$;

$$W'^{X\gamma} = W^{X\gamma} \setminus \overline{W}^{X\gamma}, \quad (3.69)$$

де $\overline{U}^{X\gamma} = \{U_j^{X\gamma} \mid j \in V^{D\gamma}, U_j^{X\gamma} \in U^{X\gamma}\}$;

$$W'^{Y\gamma} = W^{Y\gamma} \setminus \overline{W}^{Y\gamma}, \quad (3.70)$$

де $\overline{W}^{Y\gamma} = \{W_j^{Y\gamma} \mid j \in V^{D\gamma}, W_j^{Y\gamma} \in W^{Y\gamma}\}$;

$$Y'^{\gamma} = Y^{\gamma} \setminus \overline{Y}^{\gamma}, \quad (3.71)$$

де $\overline{Y}^{\gamma} = \{Y_j^{\gamma} \mid j \in V^{D\gamma}, Y_j^{\gamma} \in Y^{\gamma}\}$;

$$V'^{\gamma} = V^{\gamma} \setminus \overline{V}^{\gamma}, \quad (3.72)$$

де $\overline{V}^{\gamma} = \{V_j^{\gamma} \mid j \in V^{D\gamma}, V_j^{\gamma} \in V^{\gamma}\}$.

13.7. Визначаємо загальну кількість варіантів мережі НПС, що залишилися, як потужність множини (3.68)

$$N^{\gamma} = |\mathbf{M}^{XX}|. \quad (3.73)$$

14. З урахуванням (3.73) визначаємо кількість ППС, яких не вистачає споживачам для навігаційних визначень за мережею НПС, та споживачів, які їх потребують, як множину:

$$\mathbf{D}^{EF} = \left\{ \left\{ D_i^{EF} \right\}_{\zeta} \mid \zeta = \overline{I, N^{\gamma}} \right\} \quad (3.74)$$

$$\text{де } D_i^{EF} = \begin{cases} m^{\min} - \sum_{j=1}^{N^X} W_{\zeta, i, j}^{X\gamma}, & \text{як } \sum_{j=1}^{N^X} W_{\zeta, i, j}^{X\gamma} < m^{\min}, \\ 0, & \text{у решті випадків,} \end{cases} \quad i = \overline{I, N^E};$$

$\sum_{j=1}^{N^X} W_{\zeta, i, j}^{X\gamma}$ – кількість видимих НПС для i -го споживача (3.69).

15. Порівнюємо існуючий дефіцит ППС з наявною кількістю ЛА. Видаляємо усі варіанти мережі НПС, за яких дефіцит ЛА більший за наявну кількість:

15.1. Визначаємо множину порядкових номерів безперспективних варіантів:

$$D^{FI} = \left\{ \zeta \mid \text{Max } D_{\zeta}^{EF} > N^L, \zeta = \overline{1, N^{\gamma}} \right\}. \quad (3.75)$$

15.2. Після визначення множини (3.75), з множин матриць (3.67) – (3.72) видаляємо варіанти, за яких наявної кількості ЛА не вистачає для створення повноцінного РНП:

$$M'^X = M^X \setminus \overline{M}^X, \quad (3.76)$$

де $\overline{M}^X = \{M_j^X \mid j \in D^{FI}, M_j^X \in M^X\}$;

$$M'^{XX} = M^{XX} \setminus \overline{M}^{XX}, \quad (3.77)$$

де $\overline{M}^{XX} = \{M_j^{XX} \mid j \in D^{FI}, M_j^{XX} \in M^{XX}\}$;

$$W'^{X\gamma} = W^{X\gamma} \setminus \overline{W}^{X\gamma}, \quad (3.78)$$

де $\overline{W}^{X\gamma} = \{W_j^{X\gamma} \mid j \in D^{FI}, W_j^{X\gamma} \in W^{X\gamma}\}$;

$$W'^{Y\gamma} = W^{Y\gamma} \setminus \overline{W}^{Y\gamma}, \quad (3.79)$$

де $\overline{W}^{Y\gamma} = \{W_j^{Y\gamma} \mid j \in D^{FI}, W_j^{Y\gamma} \in W^{Y\gamma}\}$;

$$Y'^{\gamma} = Y^{\gamma} \setminus \overline{Y}^{\gamma}, \quad (3.80)$$

де $\overline{Y}^{\gamma} = \{Y_j^{\gamma} \mid j \in D^{FI}, Y_j^{\gamma} \in Y^{\gamma}\}$;

$$V'^{\gamma} = V^{\gamma} \setminus \overline{V}^{\gamma}, \quad (3.81)$$

де $\overline{V}^{\gamma} = \{V_j^{\gamma} \mid j \in D^{FI}, V_j^{\gamma} \in V^{\gamma}\}$.

15.3. Визначаємо нове значення загальної кількості варіантів:

$$N^{\gamma} = |M^{XX}|. \quad (3.82)$$

16. За (3.82) перевіряємо наявність варіантів у множині M^{XX} : якщо $N^{\gamma} = 0$ – не існує жодного з варіантів, які б задовольняли заданим обмеженням щодо видимості споживачем достатньої кількості псевдосупутників. Тому необхідно збільшити кількість ЛА і повернутись до п. 1.12. У протилежному випадку переходимо далі.

17. Перевіряємо кількість варіантів у множині M^{XX} : якщо $N^{\gamma} > N^{max}$, то розраховуємо нове значення діапазону вартості системи δ' :

$$\delta' = \delta - \delta^{dop} (1 - e^{-\varepsilon(N^{\gamma} - N^{max})}), \quad (3.83)$$

і повертаємось до п. 12.1. У протилежному випадку переходимо далі.

18. Задаємо початкове значення змінної $\zeta = 1$ (обираємо для розгляду першу комбінацію мережі НПС, яка описується вектором стану мережі НПС M_{ζ}^X).

19. Для ζ -го варіанту мережі НПС, що описується діагональною матрицею M_{ζ}^{XX} , визначаємо множину $Y_{\zeta}^{K\gamma}$ векторів можливих комбінацій діагональних елементів матриць Y_{ζ}^{γ} за кількістю ЛА у повітрі N^L :

19.1. Задаємо початкове значення $Y^{PYP} = \emptyset$.

19.2. Задаємо вектор:

$$Y_{\zeta}^{PI} = (Y_{\zeta,1}^{PI}, \dots, Y_{\zeta,j}^{PI}, \dots, Y_{\zeta,N^{\gamma}}^{PI}), \quad (3.84)$$

де $Y_{\zeta,j}^{PI} = Y_{\zeta,j,j}^{\gamma}$, $j = \overline{1, N^{\gamma}}$

координатами якого є діагональні елементи матриці (3.80).

19.3. Оцінюємо число видимих ОТППС і порівнюємо з наявним числом ЛА: якщо $\sum_{i=1}^{N^{\gamma}} Y_{\zeta,i}^{PI} < N^L$, то вектор Y_{ζ}^{PI} заносимо до множини $Y^{PYP} = \{Y_{\zeta}^{PI}\}$ і

переходимо до п. 19.7; у протилежному випадку переходимо до п. 19.4.

19.4. Задаємо одиничний вектор $Y^P = (1, 1, \dots, 1)$ розмірністю

$$\dim Y^P = N^L.$$

19.5. Розширюємо вектор Y^P нулями зліва до величини, яка дорівнює розмірності вектора Y_{ζ}^{PI} з відкинутими нулями, тобто:

$$Y^P = Pal \left[Y^P, \sum_{i=1}^{\dim Y_{\zeta}^{PI}} Y_{\zeta,i}^{PI} \right]. \quad (3.85)$$

19.6. Визначаємо множину перестановок координат вектора Y^P з (3.85):

$$Y^{PYP} = Per[Y^P]. \quad (3.86)$$

19.7. Доповнюємо вектори-елементи множини перестановок Y^{PYP} з (3.86) нулями на позиціях, які вони займають у векторі (3.84):

$$Y^{PYP} = \left\{ Y_i'^{PYP} = Ins[Y_i^{PYP}, 0, J] \mid i = \overline{1, |Y^{PYP}|} \right\}, \quad (3.87)$$

$$\text{де } J = \left\{ j \mid Y_{\zeta,j}^{PI} = 0, j = \overline{1, \dim Y_{\zeta}^{PI}} \right\}.$$

19.8. Визначену множину (3.87) запам'ятовуємо як ζ -й елемент множини $Y^{K\gamma}$:

$$Y_{\zeta}^{K\gamma} = Y^{PYP}. \quad (3.88)$$

Елемент (3.88) є множиною векторів стану варіантів вектора Y стану мережі ППС для ζ -го варіанту мережі НПС.

20. Обчислюємо елементи множини діагональних матриць:

$$Y_{\zeta}^{K2\gamma} = \left\{ Y_{\zeta,k}^{K2\gamma} = \| Y_{\zeta,k,i,j}^{K2\gamma} \| \mid k = \overline{1, |Y_{\zeta}^{K\gamma}|} \right\}, \quad (3.89)$$

$$\text{де } Y_{\zeta,k,i,j}^{K2\gamma} = \begin{cases} Y_{\zeta,k,i}^{K\gamma}, & \text{якщо } i = j, \\ 0, & \text{якщо } i \neq j, \end{cases}$$

$$i = \overline{1, N^{\bar{O}}}, j = \overline{1, N^Y}.$$

21. Задаємо початкове значення змінної $k = 1$, тобто обираємо для розгляду першу з комбінацій мережі ППС, яка описується вектором стану мережі ОТПС $Y_{\zeta, k}^{K\gamma}$.

22. Визначаємо НПС, які задіяні для створення радіонавігаційного поля при обраному варіанті $\{M_{\zeta}^X, Y_{\zeta, k}^{K\gamma}\}$:

22.1. На основі (3.78), (3.79), (3.81), (3.89) обчислюємо матрицю:

$$A^A = W_{\zeta}^{X\gamma} + W_{\zeta}^{Y\gamma} Y_{\zeta, k}^{K2\gamma} V_{\zeta}^{\gamma}. \quad (3.90)$$

22.2. Обчислюємо суми стовпчиків матриці (3.90):

$$A^{AR} = \sum_{i=1}^{dim_i A^A} A_i^A, \quad (3.91)$$

де A_i^A – i -й рядок матриці A^A .

22.3. З урахуванням (3.91) визначаємо вектор:

$$A^{\Phi} = (A_I^{\Phi}, \dots, A_j^{\Phi}, \dots, A_{N^X}^{\Phi}), \quad (3.92)$$

де $A_j^{\Phi} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \Lambda_j^{AR} > 0, \\ 0, & \text{якщо } \Lambda_j^{AR} = 0, \end{cases} (j = \overline{1, N^X}).$

23. Задаємо множину всіх можливих комбінацій випромінюючих/невипромінюючих псевдосупутників:

23.1. Розширюємо вектор (3.92) справа вектором $Y_{\zeta, k}^{K\gamma}$, тобто:

$$\Phi^{\Phi} = Join[A^{\Phi}, Y_{\zeta, k}^{K\gamma}]. \quad (3.93)$$

23.2. Задаємо початкове значення множини $\Phi^{\Phi P} = \emptyset$.

23.3. Задаємо початкове значення змінної $\varphi = m^{min}$.

23.4. Визначаємо одиничний вектор $\Phi^{PI} = (1, 1, \dots, 1)$, довжиною

$$\dim \Phi^{PI} = \varphi.$$

23.5. Розширюємо вектор Φ^{PI} зліва нулями:

$$\Phi^P = Pal \left[\Phi^{PI}, \sum_{j=1}^{N^X + N^Y} \Phi_j^\Phi \right]. \quad (3.94)$$

23.6. Визначаємо множину векторів усіх можливих перестановок координат вектора (3.94):

$$\Phi^{P\Phi\Phi} = Per[\Phi^\Phi]. \quad (3.95)$$

23.7. Доповнюємо кожен вектор-елемент множини (3.95) нулями на позиціях, які вони займають у векторі (3.93):

$$\Phi'^{P\Phi\Phi} = \left\{ \Phi_p'^{P\Phi\Phi} = Ins[\Phi_p^{P\Phi\Phi}, 0, \mathbf{J}^\Phi] \mid p = 1, \overline{|\Phi^{P\Phi\Phi}|} \right\}, \quad (3.96)$$

де $\mathbf{J}^\Phi = \left\{ j \mid \Phi_j^\Phi = 0, j = 1, \overline{N^X + N^Y} \right\}$.

23.8. Об'єднуємо множини $\Phi^{\Phi P}$ та $\Phi'^{P\Phi\Phi}$:

$$\Phi'^{\Phi P} = \Phi^{\Phi P} \cup \Phi'^{P\Phi\Phi}. \quad (3.97)$$

23.9. Оцінюємо значення змінної φ : якщо $\varphi = \sum_{j=1}^{N^X + N^Y} \Phi_j^\Phi$, то

переходимо далі, у протилежному випадку задаємо нове значення

$\varphi' = \varphi + 1$ і повертаємось до п. 23.4.

24. Розділяємо множину (3.97) на дві множини векторів:

$$\Phi^{\Phi P X} = \left\{ \Phi_p^{\Phi P X} = (\Phi_{p,j}^{\Phi P}) \mid j = 1, \overline{N^X}, p = 1, \overline{|\Phi^{\Phi P}|} \right\}. \quad (3.98)$$

$$\Phi^{\Phi P Y} = \left\{ \Phi_p^{\Phi P Y} = (\Phi_{p,j}^{\Phi P}) \mid j = \overline{N^X + 1}, \overline{N^X + N^Y}, p = 1, \overline{|\Phi^{\Phi P}|} \right\}. \quad (3.99)$$

25. Визначаємо множину номерів безперспективних комбінацій з точки зору видимості мінімальної кількості псевдосупутників для споживачів та

НПС для ППС:

25.1. На основі (3.78), (3.79), (3.98), (3.99) обчислюємо значення елементів множини допустимих рішень:

$$\Xi^D = \left\{ \Xi_p^D \mid p = 1, \overline{|\Phi^{\Phi P}|} \right\}. \quad (3.100)$$

$$\text{де } \Xi_p^D = \begin{cases} p, \text{ } \forall \hat{e} \in \hat{e} \exists j \left| \left(\sum_{i=1}^{N^X} \Phi_{p,i}^{\Phi PX} W_{\zeta,j,i}^{X\gamma} + \sum_{i=1}^{N^Y} \Phi_{p,i}^{\Phi PY} W_{\zeta,j,i}^{Y\gamma} \right) - m^{\min} < 0, j = 1, \overline{N^E}, \right. \\ p, \text{ } \forall \hat{e} \in \hat{e} \exists j \left| \sum_{i=1}^{N^X} \Phi_{p,i}^{\Phi PX} W_{\zeta, H_{p,j}, i}^{X\gamma} - m^{\min} < 0, j = 1, \overline{\sum_{i=1}^{N^Y} \Phi_{p,i}^{\Phi PY}}, \right. \\ 0, \text{ } \text{ó } \delta \text{á } \phi \text{ò }^3 \text{ á } \text{è } \text{ì } \text{ä } \text{ê }^3 \text{ â} \end{cases}$$

$$\text{де } \hat{I}_p = \left\{ r \mid \Phi_{p,r}^{\Phi PY} = 1, r = 1, \overline{N^Y} \right\}.$$

25.2. Видаляємо з множини (3.100) нульові елементи:

$$\Xi'^D = Del[\Xi^D, \mathbf{J}^E], \quad (3.101)$$

$$\text{де } \mathbf{J}^E = \left\{ j \mid \Xi_j^D = 0, j = 1, \overline{|\Phi^{\Phi P}|} \right\}.$$

26. На основі (3.101) видаляємо безперспективні комбінації у множинах (3.97) – (3.99):

$$\Phi'^{\Phi P} = Del[\Phi^{\Phi P}, \Xi^D]. \quad (3.102)$$

$$\Phi'^{\Phi PX} = Del[\Phi^{\Phi PX}, \Xi^D]. \quad (3.103)$$

$$\Phi'^{\Phi PY} = Del[\Phi^{\Phi PY}, \Xi^D]. \quad (3.104)$$

27. Визначаємо кількість комбінацій, що залишилися:

$$N^E = |\Phi^{\Phi P}|. \quad (3.105)$$

28. На основі (3.105) задаємо початкові значення елементів множин:

$$\mathbf{K}^{POI} = \left\{ \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{N^{\varepsilon}} \right\}. \quad (3.106)$$

$$\mathbf{P}^{ROB} = \left\{ \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{N^{\varepsilon}} \right\}. \quad (3.107)$$

29. За допомогою (3.93) визначаємо кількість псевдосупутників, що застосовуються у варіанті:

усього:

$$N^{PLS} = \sum_{j=1}^{N^X + N^Y} \Phi_j^{\Phi}, \quad (3.108)$$

з них наземних:

$$N^{GRO} = \sum_{j=1}^{N^X} \Phi_j^{\Phi}. \quad (3.109)$$

30. Визначаємо номери задіяних псевдосупутників для системи:

$$\mathbf{\Omega}^Z = \left\{ j \mid \Phi_j^{\Phi} = 1, j = \overline{1, N^X + N^Y} \right\}. \quad (3.110)$$

$$\mathbf{\Omega}^Y = \left\{ j \mid \Phi_j^{\Phi} = 1, j = \overline{N^X + 1, N^X + N^Y} \right\}. \quad (3.111)$$

31. Призначаємо програмне управління змінною структурою ПСРНС для задіяних псевдосупутників системи за допомогою методики програмного управління змінною структурою ПСРНС (підрозд. 3.3).

32. Порівнюємо ефективність варіантів системи, з урахуванням програмного управління її змінною структурою, між собою:

32.1. Присвоюємо початкове (рекордне) значення показника ефективності системи:

$$P^{\sigma^*} = P_{1,1}^{\sigma}. \quad (3.112)$$

32.2. Значення показника ефективності ζ - k -го варіанту системи $P_{\zeta,k}^{\sigma}$ порівнюємо з існуючим рекордом $P^{\sigma*}$:

якщо $P_{\zeta,k}^{\sigma} > P^{\sigma*}$, то:

а) значення $P_{\zeta,k}^{\sigma}$ запам'ятовуємо як новий рекорд $P'^{\sigma*} = P_{\zeta,k}^{\sigma}$;

б) запам'ятовуємо параметри рекордної комбінації:

$$X^* = M_{\zeta}^X, Y^* = Y_{\zeta,k}^{K\gamma}, \quad (3.113)$$

у протилежному випадку, коли $P_{\zeta,k}^{\sigma} < P^{\sigma*}$, переходимо до наступного пункту методики.

33. Оцінюємо значення змінної k : якщо $k = |Y_{\zeta}^{K\gamma}|$, то переходимо далі; у протилежному випадку – присвоюємо $k' = k + 1$ і повертаємось до п. 22.

34. Оцінюємо значення змінної ζ : якщо $\zeta = |M^{XX}|$, то переходимо далі; у протилежному випадку – присвоюємо $\zeta' = \zeta + 1$ і повертаємось до п. 19.

35. Значення $P^{\sigma*}$ порівнюємо з пороговим значенням β :

– якщо $P^{\sigma*} < \beta$, то визначаємо нове значення допустимої вартості системи $C_{\mu}^{\chi} = C_{\mu-1}^{\chi} + \Delta C$ і повертаємось до п. 12;

– якщо $P^{\sigma*} > \beta$, то даний варіант структури задовольняє встановлений критерій ефективності, а рішення задачі є субоптимальним, тоді:

запам'ятовуємо координати вектора стану оптимальної системи X^* , Y^* , C^* , $P^{\sigma*}$, отримані з (3.113), а також:

$$A^* = A, B^* = B, E^* = E, L^* = L. \quad (3.114)$$

Рішення задачі закінчене. Вивід результатів:

$$P^{\sigma*}, \tilde{N}^*, A^*, B^*, E^*, L^*, X^*, Y^*.$$

Блок-схема удосконаленого методу синтезу зображена на рис. 3.3.

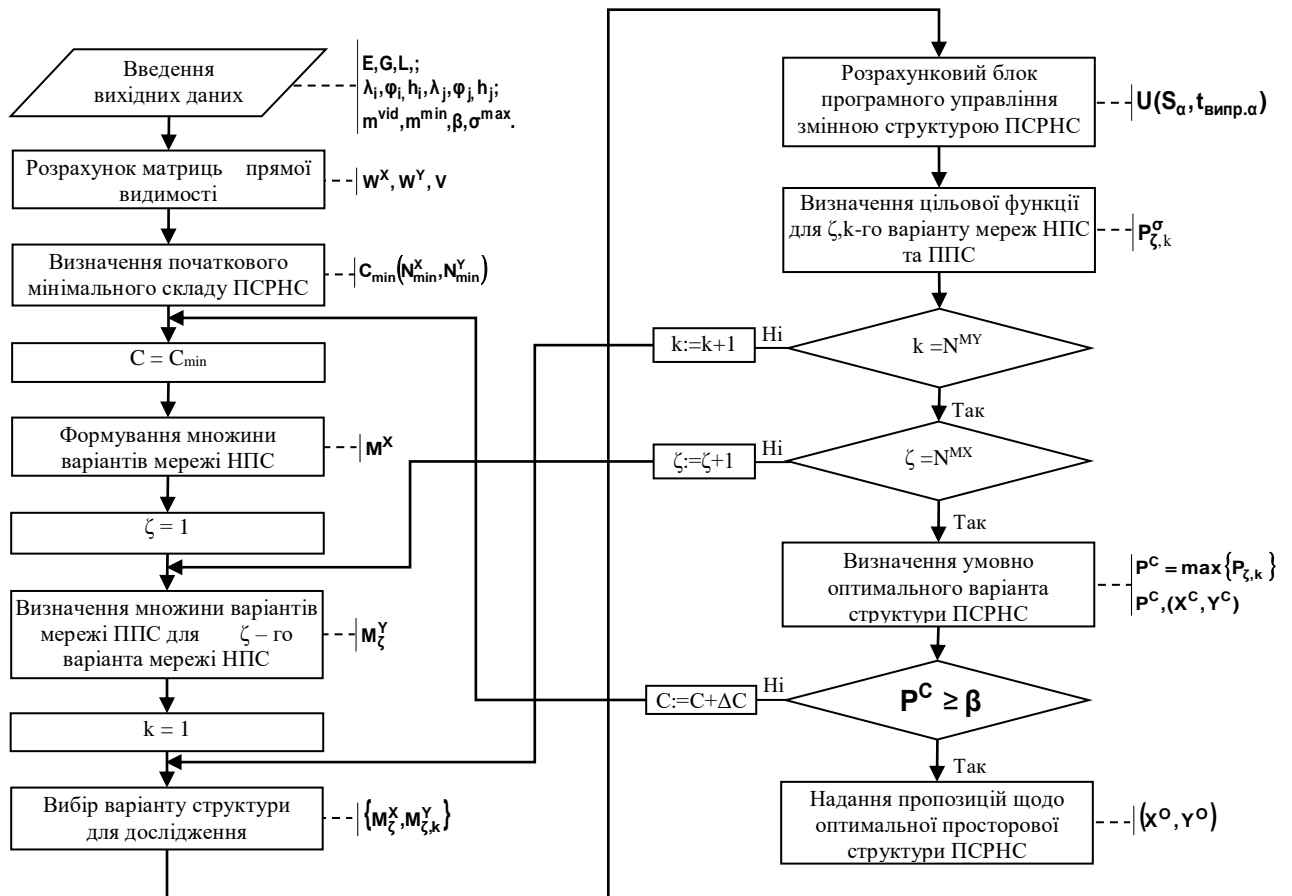


Рисунок 3.3 – Блок-схема методу синтезу локальної РНС з гнучкою структурою

3.3. Метод програмного управління змінною структурою локальної радіонавігаційної системи

Однією із складових частин методу синтезу просторової структури ПСРНС є розрахунковий блок програмного управління її змінною структурою, для визначення якого пропонується наступний метод, який розроблене з використанням теорії графів [45, 65] та теорії марковських випадкових процесів [38, 55, 56], а також комбінаторних методів аналізу [103]. Він полягає у визначенні для кожного циклу випромінювання (для

кожної зміни структури ПСРНС) оптимального сузір'я РНТ та часу випромінювання ним РНІ за принципом максимальної ефективності для обраної комбінації сузір'їв РНТ [29, 63, 64].

Метод програмного управління змінною структурою

1. Формуємо множину варіантів комбінацій сузір'їв радіонавігаційних точок для ζ - k -го варіанту системи:

$$M^S = Comb \left[M^{S_i}, \left\{ \forall S_i \mid m^{vid} \leq S < N_{\zeta,k}, i = \overline{1, |N_{\zeta,k}|} \right\} \right]. \quad (3.115)$$

2. Задаємо початкове значення змінної $\alpha = 1$ циклу випромінювання радіонавігаційної інформації у визначеному періоді функціонування T_ϕ ПСРНС.

3. Обираємо множини комбінацій сузір'їв РНТ для дослідження:

$$M^{S'} = dim_{S'} M^S \mid S' = m^{vid}. \quad (3.116)$$

4. Задаємо початкове значення змінної $V_{S'} = 1$, тобто обираємо для розгляду перше з сузір'їв множини $M^{S'}$, яке описується вектором стану $M_{V_{S'}}^{S'}$.

5. Розраховуємо максимально можливий час безперервного випромінювання РНІ $V_{S'}$ -м сузір'ям радіонавігаційних точок у α -му циклі випромінювання:

$$t_{\hat{a}\hat{e}\hat{i}\hat{d}.\alpha}^{max} = t_{\hat{o}\hat{d}\hat{a}\hat{e}.\alpha}^{(S'-m^{vid}+1)}. \quad (3.117)$$

6. Визначаємо час безперервного випромінювання РНІ в α -му циклі:

- якщо $t_{\hat{a}\hat{e}\hat{i}\hat{d}.\alpha}^{max} > t_{\hat{a}\hat{e}\hat{i}\hat{d}.\alpha}^{min \hat{I}\hat{A}}$, то $t_{\hat{a}\hat{e}\hat{i}\hat{d}.\alpha} = t_{\hat{a}\hat{e}\hat{i}\hat{d}.\alpha}^{max} - \Delta t$, далі переходимо

наступного пункту;

- у протилежному випадку – $S' := S' + 1$ і повертаємось до п. 4.

7. Розраховуємо живучості ПС у α -му циклі випромінювання РНІ:

7.1. Для наземних ПС:

$$P_{\alpha}^{ж.А} = \left\| P_{\alpha}^{ж.А_1}, P_{\alpha}^{ж.А_2}, \dots, P_{\alpha}^{ж.А_{N^X}} \right\|^T. \quad (3.118)$$

7.2. Для повітряних ПС:

$$P_{\alpha}^{ж.В} = \left\| P_{\alpha}^{ж.В_1}, P_{\alpha}^{ж.В_2}, \dots, P_{\alpha}^{ж.В_{N^Y}} \right\|^T. \quad (3.119)$$

8. Задаємо початкове значення комбінації живих/неживих (діючий/недіючий) РНТ $\zeta = 1$.

9. На основі (3.13), (3.29), (3.35), (3.102), (3.110), (3.111) визначаємо ймовірність ζ -ї комбінації системи:

$$P^{RBI} = \prod_{j=1}^{N^{PLS}} Abs \left[1 - \Phi_{\zeta, \Omega_j^Z}^{\Phi P} \begin{cases} P_{\Omega_j^Z}^{ж.А} \cdot A_{\Omega_j^Z, 5}, \text{ при } j \leq N^{GRO} \\ P_{\Omega_{j-N^{GRO}}^Y}^{ж.В} \cdot L_5, \text{ при } j > N^{GRO} \end{cases} \right]. \quad (3.120)$$

10. За (3.104) визначаємо номери та кількість задіяних живих ППС:

$$\Omega^{YLI} = \left\{ j \mid \Phi_{\zeta, j}^{\Phi PY} = 1, j = \overline{1, N^Y} \right\}. \quad (3.121)$$

$$N^{YLI} = |\Omega^{YLI}|. \quad (3.122)$$

11. Для кожного живого ППС на основі (3.81), (3.103), (3.122) визначаємо номери задіяних живих ППС:

$$R^{LIV} = \left\{ R_{\tau, j}^{LIV} = V_{\zeta, \Omega_{\tau}^{YLI}, j}^{\gamma} \Phi_{\zeta, j}^{\Phi PX} \mid j = \overline{1, N^X}, \eta = \overline{1, N^{YLI}} \right\}. \quad (3.123)$$

$$\Phi^{RLI} = \left\{ j \mid R_{\tau, j}^{LIV} = 1, j = \overline{1, N^X}, \eta = \overline{1, N^{YLI}} \right\}. \quad (3.124)$$

12. Застосувавши (3.78), (3.103), (3.79) та (3.104) визначаємо номери

задіяних живих псевдосупутників для кожного споживача окремо:

12.1. Для НПС:

$$\mathbf{Z}^{XLI} = \left\{ Z_{\rho,j}^{XLI} = W_{\zeta,\rho,j}^{X\gamma} \Phi_{\zeta,j}^{\Phi PX} \mid j = \overline{1, N^X}, \rho = \overline{1, N^E} \right\},$$

$$\Phi^{PXL} = \left\{ j \mid Z_{\rho,j}^{XLI} = 1, j = \overline{1, N^X}, \rho = \overline{1, N^E} \right\}. \quad (3.125)$$

12.2. Для ППС:

$$\mathbf{Z}^{YLI} = \left\{ Z_{\rho,j}^{YLI} = U_{\zeta,\rho,j}^{Y\gamma} \Phi_{\zeta,j}^{\Phi PY} \mid j = \overline{1, N^Y}, \rho = \overline{1, N^E} \right\},$$

$$\Phi^{PYL} = \left\{ j \mid Z_{\rho,j}^{YLI} = 1, j = \overline{1, N^Y}, \rho = \overline{1, N^E} \right\}. \quad (3.126)$$

13. Для структури НПС–ППС обчислюємо кореляційні матриці похибок визначення вектора стану ППС:

13.1. Визначаємо множину окремих похідних навігаційної функції по навігаційних параметрах на основі (3.40), (3.41), (3.45), (3.46):

$$\mathbf{C}^{KOM} = \left\{ \mathbf{C}_{\tau}^{KOM} = \mathbf{C}_{\Omega_{\tau}^{YLI}, \Phi_{\tau}^{WLI}}^{LI} \mid = 1, |\Phi_{\tau}^{WLI}|, \tau = \overline{1, N^{YLI}} \right\}. \quad (3.127)$$

$$\mathbf{C}^{SK} = \left\{ \mathbf{C}_{\tau}^{SK} = \mathbf{C}_{\Omega_{\tau}^{YLI}, \Phi_{\tau}^{WLI}}^L \mid = 1, |\Phi_{\tau}^{WLI}|, \tau = \overline{1, N^{YLI}} \right\}. \quad (3.128)$$

13.2. Складаємо матриці дисперсій вимірювань псевдодальностей за даними матриць (3.35) та (3.124):

$$\mathbf{K}^{EF} = \left\{ \mathbf{K}_{\tau}^{EF} = \left\| \begin{array}{ccc} A_{\Phi_{\tau}^{WLI}, 6} & 0 & 0 \\ 0 & A_{\Phi_{\tau}^{WLI}, 7} & 0 \\ 0 & 0 & A_{\Phi_{\tau}^{WLI}, 8} \end{array} \right\| \mid \varphi = 1, |\Phi_{\tau}^{WLI}|, \tau = \overline{1, N^{YLI}} \right\} \quad (3.129)$$

$$\mathbf{D}^{ISP} = \left\{ \mathbf{D}_{\tau}^{ISP} = \mathbf{C}_{\tau}^{SK} \left(\mathbf{A}_{\Phi_{\tau}^{WLI}}^X \right)^T \mathbf{K}_{\tau}^{EF} \mathbf{A}_{\Phi_{\tau}^{WLI}}^X \left(\mathbf{C}_{\tau}^{SK} \right)^T \mid \varphi = 1, |\Phi_{\tau}^{WLI}|, \tau = \overline{1, N^{YLI}} \right\}, \quad (3.130)$$

$$\mathbf{D}'^{ISP} = \left\{ \mathbf{D}'_{\tau,ij}{}^{ISP} = \begin{cases} D_{\tau,i}^{ISP}, & \text{іđè } i = j \\ 0, & \text{іđè } i \neq j \end{cases} \mid i, j = \overline{1, |\Phi_{\tau}^{WLI}|}, \tau = \overline{1, N^{YLI}} \right\}, \quad (3.131)$$

де складові множини (3.130) обчислені за формулами (3.55), (3.128), (3.129).

13.3. На основі отриманих матриць (3.127) та (3.131) обчислюємо кореляційні матриці похибок визначення вектора стану ППС:

$$\mathbf{K}^{ORR} = \left\{ \mathbf{K}_{\tau}^{ORR} = \left((\mathbf{C}_{\tau}^{KOM})^T (\mathbf{D}_{\tau}^{ISP})^{-1} \mathbf{C}_{\tau}^{KOM} \right)^{-1} \mid \tau = \overline{1, N^{YLI}} \right\}. \quad (3.132)$$

14. За (3.46), (3.49), (3.50), (3.54), (3.126) визначаємо множину окремих похідних навігаційної функції для споживачів:

$$\mathbf{C}^{KBE} = \left\{ \mathbf{C}_{\rho,\varphi}^{KBE} = \begin{cases} \mathbf{C}_{\rho, \Phi_{\rho}^{PXL}}^{EXI}, & \text{іđè } \varphi \leq |\Phi_{\rho}^{PXL}| \\ \mathbf{C}_{\rho, \Phi_{\rho, |\Phi_{\rho}^{PXL}|}}^{EYI}, & \text{іđè } \varphi > |\Phi_{\rho}^{PXL}| \end{cases} \mid \varphi = \overline{1, |\Phi_{\rho}^{PXL}| + |\Phi_{\rho}^{PYL}|}, \rho = \overline{1, N^E} \right\} \quad (3.133)$$

$$\mathbf{C}^{KEE} = \left\{ \mathbf{C}_{\rho,\varphi}^{KEE} = \begin{cases} \mathbf{C}_{\rho, \Phi_{\rho, \varphi}}^{EX}, & \text{іđè } \varphi \leq |\Phi_{\rho}^{PXL}| \\ \mathbf{C}_{\rho, \Phi_{\rho, |\Phi_{\rho}^{PXL}|}}^{EY}, & \text{іđè } \varphi > |\Phi_{\rho}^{PXL}| \end{cases} \mid \varphi = \overline{1, |\Phi_{\rho}^{PXL}| + |\Phi_{\rho}^{PYL}|}, \rho = \overline{1, N^E} \right\} \quad (3.134)$$

15. Складаємо матриці дисперсій вимірювань псевдодалекостей.

15.1. За даними (3.13) визначаємо матрицю СКП витримування траєкторії літальним апаратом:

$$\sigma^L = \left\| \begin{array}{cccc} L_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_4 \end{array} \right\|. \quad (3.135)$$

15.2. На основі (3.35), (3.132) та (3.135) визначаємо кореляційні матриці похибок навігації споживача:

$$\mathbf{K}^{FEE} = \left\{ \mathbf{K}_{\rho}^{FEE} = \left\| \begin{array}{ccc} A_{\Phi_{\tau}^{PXL},6} & 0 & 0 \\ 0 & A_{\Phi_{\tau}^{PXL},7} & 0 \\ 0 & 0 & A_{\Phi_{\tau}^{PXL},8} \end{array} \right\|, \right. \quad (3.136)$$

$$\left. \left[\mathbf{K}_{-\left| \Phi_{\rho}^{PXL} \right|}^{ORR} + (\sigma^L)^2 \right] \right\}$$

де $\varphi = 1, \overline{|\Phi_{\rho}^{PXL}| + |\Phi_{\rho}^{PYL}|}$, $\rho = 1, N^E$.

15.3. За отриманими матрицями (3.134), (3.136) та афіннорами (3.55) обчислюємо матриці дисперсій вимірювання псевдодалекостей у вимірювальній системі координат:

$$\mathbf{D}^{SPE} = \left\{ \mathbf{D}_{\rho,\varphi}^{SPE} = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{C}_{\rho,\varphi}^{KEE} \left(A_{\Phi_{\rho,\varphi}^{PXL}}^X \right)^T \mathbf{K}_{\rho,\varphi}^{FEE} A_{\Phi_{\rho,\varphi}^{PXL}}^X \left(\mathbf{C}_{\rho,\varphi}^{KEE} \right)^T, \quad \text{іде } \dim_1 \mathbf{K}_{\rho,\varphi}^{FEE} = 3 \\ \mathbf{C}_{\rho,\varphi-\left| \Phi_{\rho}^{PXL} \right|}^{KEE} \mathbf{K}_{\varphi-\left| \Phi_{\rho}^{PXL} \right|}^{ORR} \left(\mathbf{C}_{\rho,\varphi-\left| \Phi_{\rho}^{PXL} \right|}^{KEE} \right)^T, \quad \text{іде } \dim_1 \mathbf{K}_{\rho,\varphi}^{FEE} \neq 3 \end{array} \right. \right\}, \quad (3.137)$$

де $\varphi = 1, \overline{|\Phi_{\rho}^{PXL}| + |\Phi_{\rho}^{PYL}|}$, $\rho = 1, N^E$.

$$\mathbf{D}'^{SPE} = \left\{ \mathbf{D}'_{\rho}^{SPE} = \left\| \mathbf{D}'_{\rho,i,j}^{SPE} \right\| \mid \rho = 1, N^E \right\}, \quad (3.138)$$

де $\mathbf{D}'_{\rho,i,j}^{SPE} = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{D}_{\rho,i,1}^{SPE}, \quad \text{іде } i = j, \\ 0, \quad \text{іде } i \neq j, \end{array} \mid i, j = 1, \overline{|\Phi_{\rho}^{PXL}| + |\Phi_{\rho}^{PYL}|}, \rho = 1, N^E \right.$

16. На основі (3.133), (3.137) та (3.138) обчислюємо кореляційні матриці похибок визначення вектора стану споживача:

$$\mathbf{K}^{ORE} = \left\{ \mathbf{K}'_{\rho}^{ORE} = \left(\left(\mathbf{C}_{\rho}^{KBE} \right)^T \left(\mathbf{D}_{\rho}^{SPE} \right)^{-1} \mathbf{C}_{\rho}^{KBE} \right)^{-1} \mid \rho = 1, N^E \right\}. \quad (3.139)$$

17. Переводимо кореляційні матриці (3.139) у топоцентричну систему координат з застосуванням афіннору (3.56):

$$\mathbf{K}^{RE3} = \left\{ \mathbf{K}_\rho^{RE3} = \left(\text{Del} \left[\left(\text{Del} \left[\mathbf{K}_\rho^{ORE}, \mathbf{A} \right]^T, \mathbf{A} \right)^T \right] \mid \rho = \overline{1, N^E} \right\},$$

$$\mathbf{K}^{USE} = \left\{ \mathbf{K}_\rho^{USE} = \mathbf{A}_\rho^E \mathbf{K}_\rho^{RE3} \left(\mathbf{A}_\rho^E \right)^T \mid \rho = \overline{1, N^E} \right\}. \quad (3.140)$$

18. Отримані результати (3.120), (3.140) запам'ятовуємо як нові значення елементів множин (3.106) та (3.107):

$$\mathbf{K}_\zeta^{POT} = \mathbf{K}^{USE}. \quad (3.141)$$

$$P_\zeta^{ROB} = P^{RBI}. \quad (3.142)$$

19. Оцінюємо значення змінної ζ : якщо $\zeta = N^E$, то переходимо до наступного пункту методики, у протилежному випадку – визначаємо нове значення $\zeta' = \zeta + 1$ і повертаємось до п. 9.

20. За (3.107), (3.141) та (3.142) розраховуємо суму ймовірностей перебування $V_{S'}$ -го сузір'я радіонавігаційних точок системи в "живучому" стані, за яких СКП визначення вектора стану споживача не більша максимально допустимої:

$$P_{V_{S'}}^\sigma = \sum_{\zeta=1}^{N^E} P_\zeta^{RR}, \quad (3.143)$$

$$\text{де } P_\zeta^{RR} = \begin{cases} P_\zeta^{ROB}, \text{ якщо } \text{Max} \left[\sqrt{\text{Tr} \left[\mathbf{K}_{\zeta, \rho}^{POT} \right]} \mid \rho = \overline{1, N^E} \right] \leq \sigma^{\text{max}}; \\ 0, \text{ у протилежному випадку.} \end{cases}$$

21. Оцінюємо значення змінної $V_{S'}$: якщо $V_{S'} \leq |M_{S'}|$, то переходимо до наступного пункту методики, у протилежному випадку – визначаємо нове значення $V_{S'} := V_{S'} + 1$ і повертаємось до п. 5.

22. Порівнюємо ефективності сузір'їв S' -ї множини та обираємо для випромінювання в α -му циклі сузір'я з максимальною ефективністю

$$P_{S_\alpha}^\sigma = \max\{P_{V_{S'}}^\sigma\}.$$

23. Значення $P_{S_\alpha}^\sigma$ порівнюємо з прийнятим критерієм ефективності системи:

- якщо $P_{S_\alpha}^\sigma \geq \beta$, то запам'ятовуємо параметри сузір'я S_α та час випромінювання ним РНІ $t_{\text{випр.}\alpha}$ та формуємо вектор програмного управління змінною структурою ПСРНС $U(S_\alpha, t_{\text{випр.}\alpha})$, далі переходимо до п. 22;

- якщо $P_{S_\alpha}^\sigma < \beta$, то:

а) якщо $S' < N_{\zeta, k}$, то $S' := S' + I$ і повертаємось до п. 4;

б) якщо $S' \geq N_{\zeta, k}$, то переходимо до п. 33 методики синтезу просторової структури ПСРНС (розділ 3.2).

24. Перевіряємо умову закінчення розрахунків:

- якщо $\sum t_{\text{випр.}\alpha} \geq T_\phi$, то переходимо до наступного пункту методики;

- у протилежному випадку – $\alpha := \alpha + I$ і переходимо до п. 3.

25. Надаємо пропозиції щодо програмного управління змінною структурою ПСРНС:

$$U(S_\alpha, t_{\text{випр.}\alpha}). \quad (3.144)$$

Рішення задачі закінчене.

Узагальнена блок-схема методу програмного управління змінною структурою локальної РНС зображена на рис. 3.4.

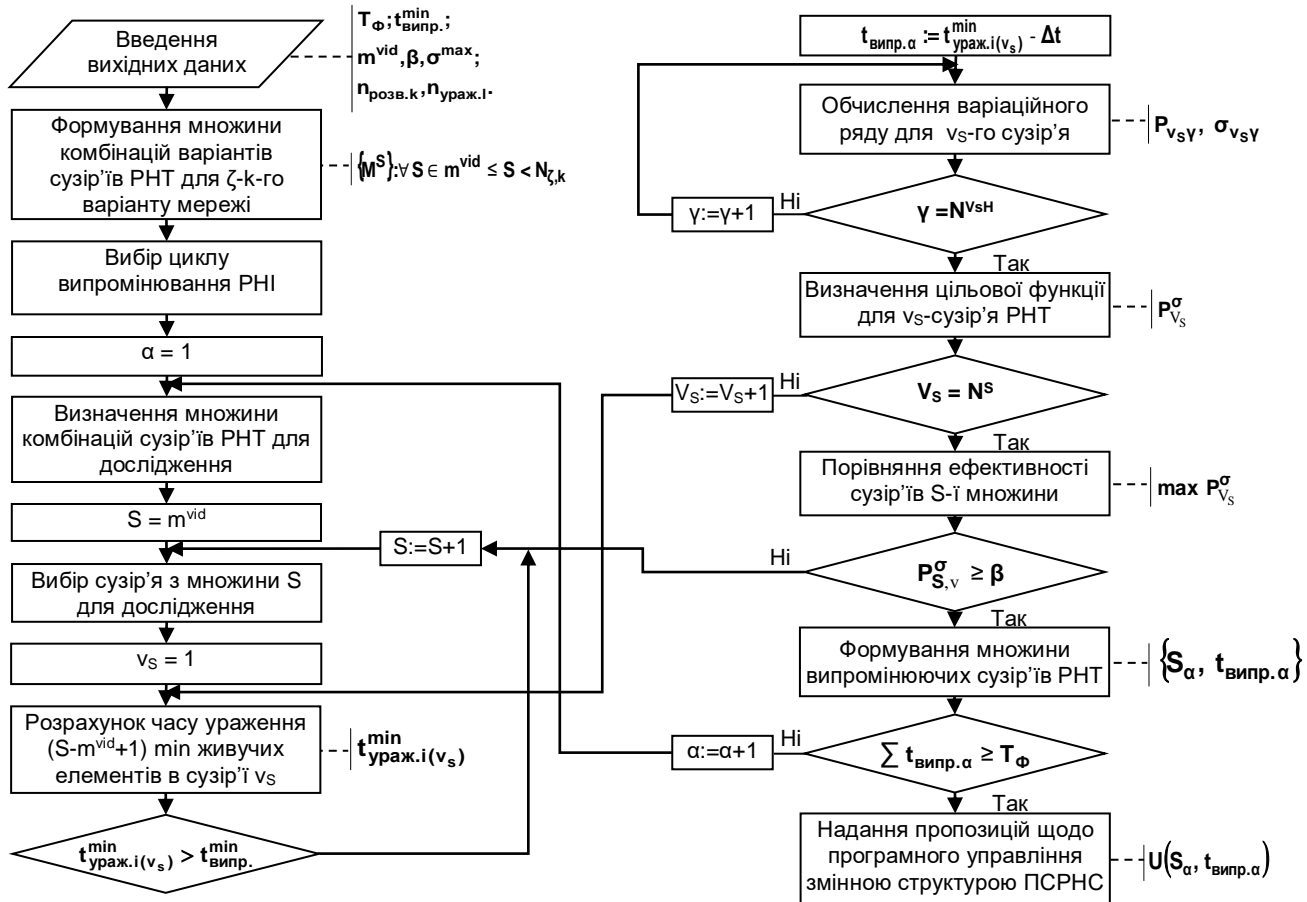


Рисунок 3.4 – Блок-схема методу програмного управління змінною структурою локальної РНС

Висновки до 3-го розділу

1. Синтез локальної радіонавігаційної системи як великої технічної системи передбачає вирішення наступних оптимізаційних задач:

визначення структури системи, тобто оптимальних принципів її побудови (завдання оптимізації структури);

вибір значень основних характеристик системи, в тому числі параметрів управління (завдання оптимізації параметрів).

2. Вигляд цільової функції системи та характер обмежень, загальна схема пошуку оптимального варіанту, а також комбінаторний характер вирішуваної

задачі та належність її до класу NP-повних вказують на доцільність застосування комбінаторних методів дискретної оптимізації, які засновані на упорядкованому переборі найбільш перспективних варіантів. Можливість поділу елементів структури системи на групи (наземну та повітряну), а також можливість створення ланцюгів варіантів між окремими групами визначає доцільність використання для оптимізації загальної схеми методу послідовного аналізу варіантів. Перевагами обраного методу є можливість використання нелінійної цільової функції та застосованих обмежень, а також максимальне урахування специфіки вирішуваної задачі. Застосування зазначеного методу дозволяє скоротити число комбінацій в середньому на 1...2 порядки у порівнянні з повним перебором можливих рішень. Ефективність застосування методу залежить від застосовуваних алгоритмів відсіювання на початкових етапах аналізу.

3. Метод синтезу просторової структури локальної радіонавігаційної системи базується на запропонованій математичній моделі та, на відміну від існуючих, комплексно враховує просторову топологію системи на точність і безперервність навігаційного забезпечення визначених споживачів, що дає змогу визначити раціональний склад системи та просторове розміщення її елементів.

4. Однією із складових частин методу синтезу просторової структури локальної РНС є розрахунковий блок програмного управління її змінною структурою, для визначення якого пропонується метод, що розроблене з використанням теорії графів та теорії марковських випадкових процесів, а також комбінаторних методів аналізу. Метод полягає у визначенні для кожного циклу випромінювання (для кожної зміни структури ПСРНС) оптимального сузір'я РНТ та часу випромінювання ним РНІ за принципом максимальної ефективності для обраної комбінації сузір'їв РНТ. Перевагами запропонованого підходу є охоплення усіх найбільш впливових чинників, які визначають конфігурацію структури псевдосупутникової радіонавігаційної

системи та їх комплексне поєднання, застосування мінімального числа припущень та обмежень, застосування апробованого математичного та обчислювального апарату.

РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1. Порівняльна оцінка варіантів структури радіонавігаційної системи

Синтез псевдосупутникової радіонавігаційної системи зі змінною структурою. З метою перевірки ефективності запропоновано наукових результатів здійснимо синтез просторової структури псевдосупутникової РНС зі змінною структурою при наступних вихідних даних для моделювання:

- висота польоту ППС – 8000 м;
- висота встановлення наземних псевдосупутників – 10 м;
- СКП прив'язки НПС до геодезичної мережі – 0,5 м;
- СКП витримування траєкторії ЛА-носієм ППС – 5 м;
- надійність обладнання псевдосупутників – 0,9999;
- надійність ЛА-носія – 0,999;
- вартість НПС – 10 тис. у.о.; вартість ППС – 50 тис. у.о.;
- граничне значення показника ефективності $\beta = 0,95$;
- СКП визначення координат споживача $\sigma^{\max} = 20$ м.

При моделюванні було прийнято, що потужність сигналів є достатньою для їх гарантованого прийому у зоні радіовидимості.

Для синтезу просторової структури обрана територія у межах 46° – 50° пн.ш., та 29° – 35° сх.д. Оптимізація здійснюється за критеріями достатньої ефективності та мінімуму вартості системи за зазначених вище умов. Застосування запропонованих методик дозволило отримати оптимальні варіанти для декількох характерних значень періоду функціонування системи (рис. 4.1 – 4.3).

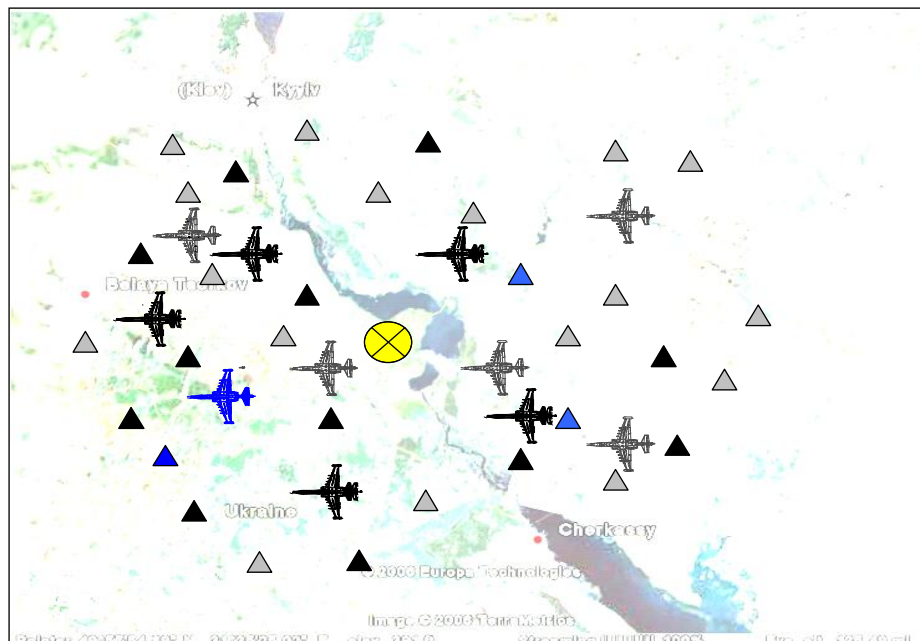


Рисунок 4.1 – ПСРНС зі змінною структурою для періоду функціонування T_1

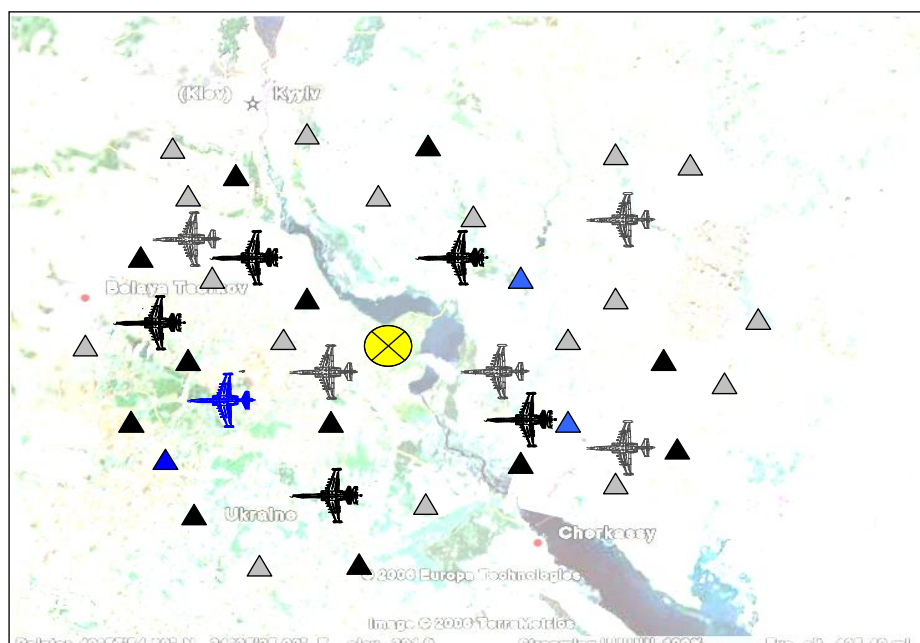


Рисунок 4.2 – ПСРНС зі змінною структурою для періоду функціонування T_2

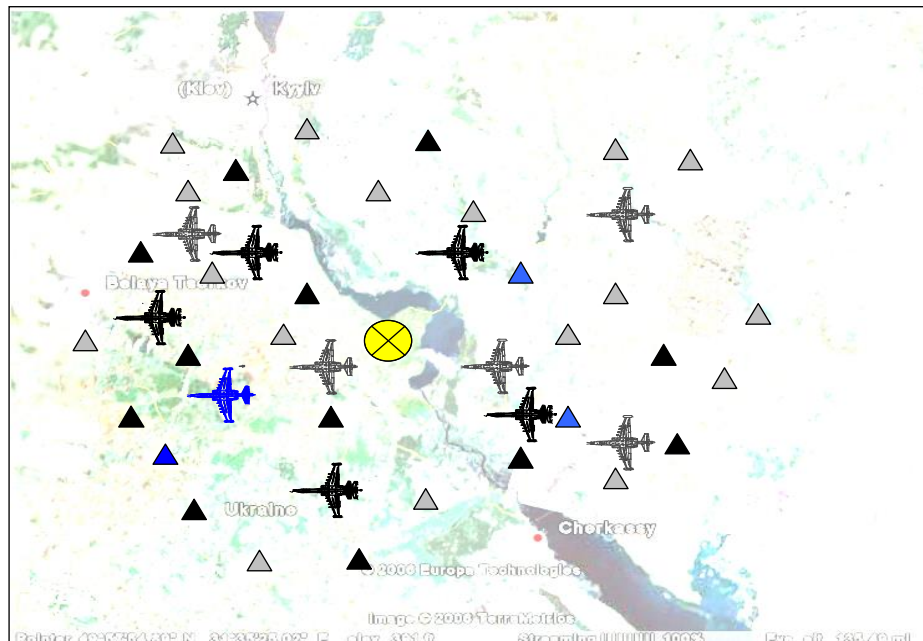


Рисунок 4.3 – ПСРНС зі змінною структурою для періоду функціонування T_3

На рис. 4.1 – 4.3 чорним кольором показана просторова структура псевдосупутникової РНС зі змінною структурою, синім кольором показані ті позиції, на яких можна не встановлювати псевдосупутники у порівнянні з системою, в якій не використовується управління просторово-часовою зміною структури.

Вартісні показники синтезованих структур, представлені на рис. 4.4, свідчать про те, що застосування змінної просторово-часової структури ПСРНС дає змогу зменшити необхідну кількість системоутворюючих елементів для різних періодів функціонування на 6 – 19 % у порівнянні з системою, в якій випромінювання РНІ здійснюється безперервно.

Зона ефективності структур, синтезованих за запропонованими науковими результатами, формується відповідним вибором характерних точок споживачів (матриця E). При цьому максимальна відстань від псевдосупутника до краю зони, в якій забезпечується задана ефективність

навігації, обмежується лише розмірами зони прямої видимості достатньої кількості псевдосупутників.

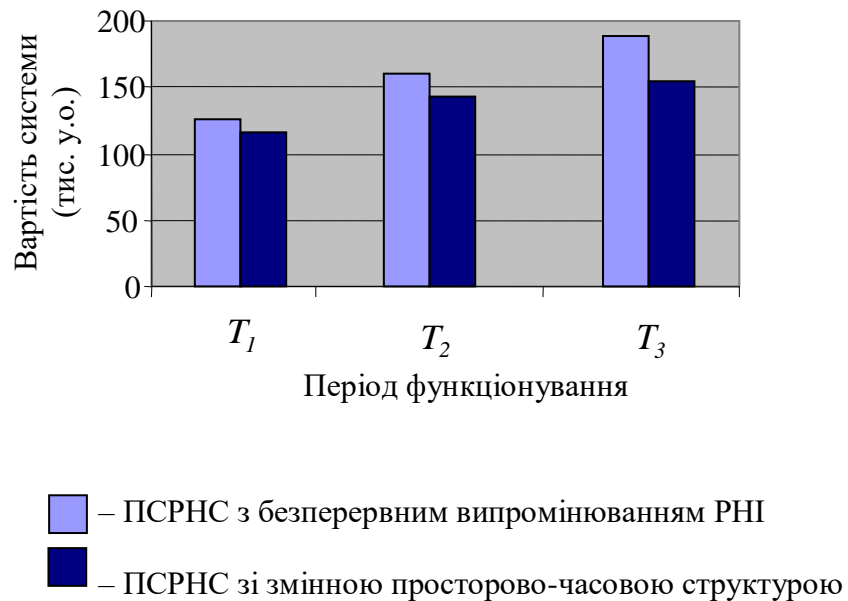


Рисунок 4.4 – Порівняльна оцінка вартості типів структур

Застосування для цих же ситуацій методики оцінки ефективності псевдосупутникової РНС дасть змогу наглядно оцінити результати синтезу.

4.2. Постановка задачі оцінки ефективності локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою

Синтез структур багатопозиційних радіонавігаційних систем водночас вимагає створення ефективних методик по їх оцінці з метою порівняння різних варіантів структури однотипних систем та структур систем різних типів.

Вирішення завдання оцінки ефективності РНС за визначеним показником ефективності полягає в отриманні таких числових характеристик, які б свідчили про ступінь збережаності основних

параметрів системи у встановлених межах при дії на неї визначеного класу випадкових факторів. Наявність випадкових факторів визначає стохастичний характер поведінки системи і дозволяє застосувати методи математичної статистики для оцінки відповідних характеристик. Для цього необхідно отримати сукупність реалізацій (оцінок) вихідних характеристик системи за різних випадкових значень вхідних параметрів. Такі оцінки можна отримати на основі статистичного моделювання.

Методи математичної статистики дозволяють оцінювати систему на основі вибірок значень її вихідних характеристик. У результаті проведення серії випробувань математичної моделі псевдосупутникової РНС для кожного ρ -го з N^E споживачів отримується варіаційний ряд розподілу станів системи (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

| | | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|-----|-------------------|-----|-------------------|
| Номер випробування | 1 | 2 | ... | i | ... | n |
| Стан системи | $r_{\rho,1}$ | $r_{\rho,2}$ | ... | $r_{\rho,i}$ | ... | $r_{\rho,n}$ |
| СКП місцевизначення ρ -го споживача | $\sigma_{\rho,1}$ | $\sigma_{\rho,2}$ | ... | $\sigma_{\rho,i}$ | ... | $\sigma_{\rho,n}$ |

Стан системи при кожному з n випробувань характеризується значенням $r_{\rho,i} \in \{0,1\}$, ($\rho = \overline{1, N^E}$, $i = \overline{1, n}$), які свідчать про спроможність ($r_{\rho,i} = 1$) чи неспроможність ($r_{\rho,i} = 0$) системи здійснювати навігацію споживача. При цьому навігація буде здійснюватись з СКП місцевизначення $\sigma_{\rho,i}$, ($\rho = \overline{1, N^E}$, $i = \overline{1, n}$).

Для оцінки ефективності локальної РНС за результатами статистичного моделювання у якості показника доцільно обрати частоту випробувань, за яких система спроможна забезпечити навігацію ρ -го споживача з заданою точністю $\sigma_{\rho} \leq \sigma^{max}$:

$$P_{\rho}^* = \frac{\sum_{i=1}^n r_{\rho,i}^s}{n}, \quad r_{\rho,i}^s \in \begin{cases} r_{\rho,i}, & \text{якщо } \sigma_{\rho,i} \leq \sigma^{\max}; \\ 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\rho = \overline{1, N^E}, \quad i = \overline{1, n}$$

Система вважатиметься такою, що задовольняє встановлений критерій ефективності у точці ρ , якщо значення обчисленого показника (4.1) задовольнятиме умову $P_{\rho}^* \geq \beta^*$, де β^* – порогове значення частоти. Це означає, що при проведенні n випробувань щодо моделювання впливу випадкових факторів на систему вона у визначеній кількості випадків P_{ρ}^* здатна забезпечити навігацію ρ -го споживача з точністю $\sigma_{\rho} \leq \sigma^{\max}$.

З урахуванням вищезгаданого, оцінку ступеню ефективності просторово-часової структури ПСРНС доцільно здійснити на основі методу статистичних випробувань (Монте-Карло) [55, 56]. Випадковим фактором, який підлягає урахуванню при статистичному моделюванні поведінки РНС буде “загибель” під час кожної реалізації випадкового числа окремих її елементів відповідно до розрахованих показників їх живучості та надійності.

Для оцінки ефективності ПСРНС на основі методу статистичних випробувань з урахуванням запропонованої математичної моделі (розд. 2) застосуємо методику, яка детально викладена в [18, 20].

4.3. Оцінка достовірності результатів статистичного моделювання

Метод Монте-Карло ґрунтується на граничних теоремах теорії ймовірностей, які стверджують, що при великій кількості дослідів N частота події наближається до її ймовірності, а середнє арифметичне спостережених

значень випадкової величини – до її математичного очікування. У таких умовах виникає питання щодо оцінки достовірності характеристик випадкового явища отриманих даним методом, а також визначення необхідного числа дослідів (реалізацій) для того, щоб із заданою ймовірністю P^D можна було очікувати, що частота Q^* події, яка досліджується, відхилиться від її ймовірності Q менше ніж на деяку величину ε .

З [38, 55, 56] відомо, що кількість випробувань N^N , які необхідно провести для досягнення заданої довірчої імовірності, можна визначити на основі співвідношення:

$$N^N = \frac{Q(1-Q)}{\varepsilon^2} \left[\Phi^{-1} \left(\frac{1}{2} P^D \right) \right]^2, \quad (4.2)$$

де Q – ймовірність досліджуваної події;

ε – задане допустиме відхилення ймовірності;

Φ^{-1} – функція, обернена функції Лапласа;

P^D – довірча імовірність.

Так, наприклад, при $Q = 0,05$, $\varepsilon = 0,02$, $P^D = 0,95$ необхідна кількість реалізацій, визначених за (4.2), складатиме $N^N = 456$.

Оцінка ефективності варіантів структури локальної РНС.
Результати теоретичних досліджень підтверджуються даними статистичного моделювання. Оцінку ефективності запропонованих наукових результатів здійснено шляхом проведення обчислювального експерименту щодо вже розглянутих та синтезованих просторових структур локальних РНС.

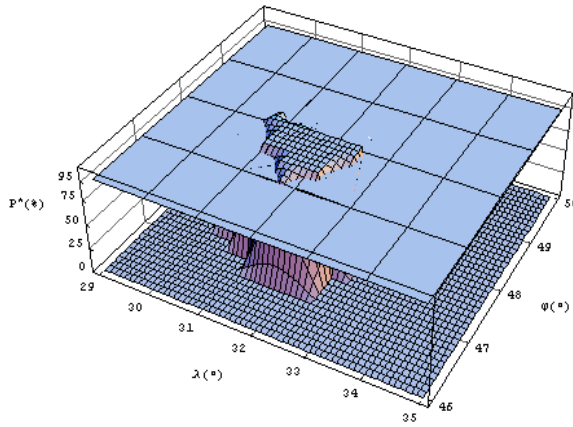
Суть експерименту полягає у дослідженні варіантів структури РНС, обчисленні за допомогою методу статистичного моделювання значень показника ефективності системи та визначенні зон, у межах яких задовольняється встановлений критерій ефективності визначених типів структур системи, а також порівнянні їх з відповідними зонами варіантів

структури, синтезованої з використанням запропонованих в дисертації методів. Вихідні дані та обмеження для оцінки були обрані такими ж, як і при синтезі локальної РНС.

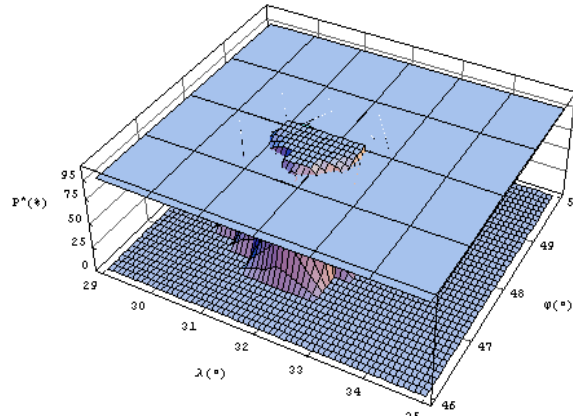
Для дослідження структур псевдосупутникових РНС була обрана територія, що знаходиться в межах 46° - 51° пн.ш. та 29° - 37° сх.д. Структура досліджується шляхом обчислення значень показника ефективності у характерних точках мережі з кроком $0,1^{\circ}$. У відповідності з формулою (4.2) для кожної структури було проведено по 500 випробувань, що дозволяє оцінити імовірність навігаційного забезпечення споживачів з встановленими критеріями за допомогою частоти виникнення події, яка полягає у тому, що за даного стохастичного розподілу живих/неживих елементів система забезпечує необхідну точність місцевизначення споживачів, з розходженням не більше 0,02 при довірчій імовірності 0,95.

Результати моделювання наведені на рис. 4.5.

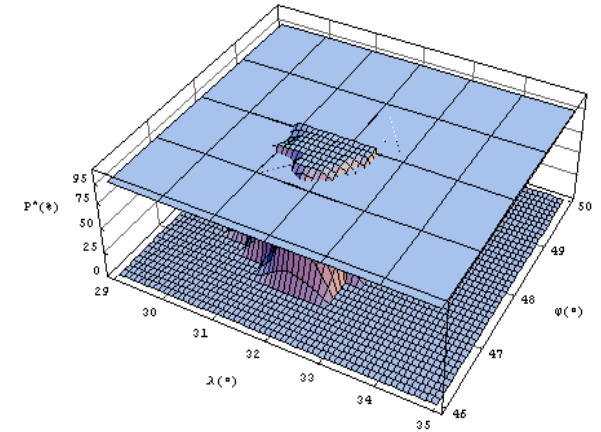
З застосуванням управління змінною структурою



а) на момент часу t_1

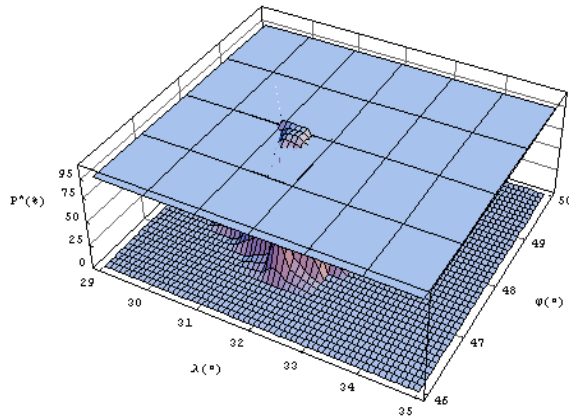


б) на момент часу t_2

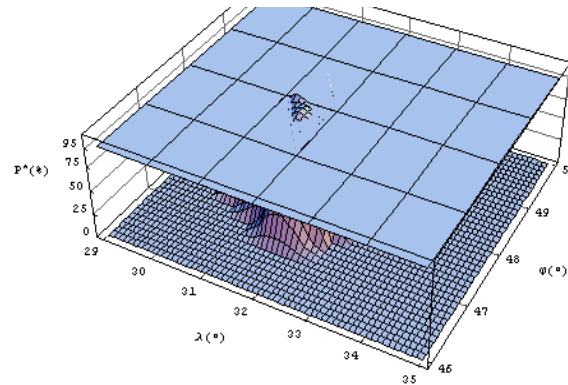


в) на момент часу t_3

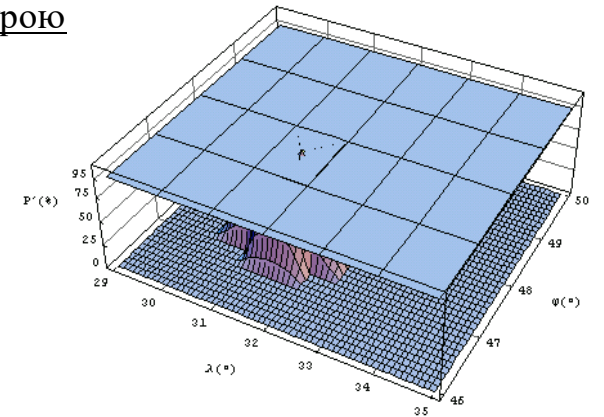
Без застосування управління змінною структурою



г) на момент часу t_1



д) на момент часу t_2



е) на момент часу t_3

Рисунок 4.5 – Показники ефективності структур псевдосупутникових РНС

Отримані значення показника ефективності у регулярних точках мережі для заданої висоти над поверхнею Землі утворюють своєрідний “рельєф” (рис. 4.5). Перетин цього “рельєфу” з поверхнею рівня критичних значень показника (P^{min}) дає змогу виділити райони, в яких задовольняється встановлений критерій ефективності.

Отже, з аналізу рис. 4.5 видно, що при використанні ПСРНС зі змінною структурою зона ефективності системи, що відповідає заданому критерію, значно більша, ніж при використанні статичної просторово-часової структури за однакової кількості системоутворюючих елементів. Також можна помітити, що при використанні управління змінною структурою зона ефективності системи, що відповідає заданому критерію, не так критично залежить від часу її функціонування.

Оцінка точності отриманих результатів. Урахування в математичній моделі факторів, які мають найсуттєвіший вплив на функціонування ПСРНС (геометричний фактор, імовірний вплив противника, тривалість функціонування, рельєф місцевості, вартість складових елементів), дозволяє гарантувати отримання результатів моделювання з заданою достовірністю.

Оптимізація структури системи здійснюється на основі методу послідовного аналізу варіантів, який відноситься до класу точних методів, що дозволяє не проводити оцінку точності рішення відносно точності методу [40].

При розробці моделі були зроблені певні припущення та спрощення, основним з яких є дискретизація простору (як наземного, так і повітряного). Дискретизація наземного простору дозволяє максимально використовувати наявну інфраструктуру та рельєф місцевості з метою зниження загальної вартості системи. Дискретизація повітряного простору здійснюється з метою урахування розподілу повітряних зон для ЛА-носіїв ППС. Очевидно, що вплив дискретизації буде тим меншим, чим меншим буде її крок. Для зменшення

впливу похибок дискретизації опорні точки ППС необхідно обирати якомога ближче до характерних точок споживача (цілей), так щоб фігура, утворена з наземних та повітряних ППС мала форму правильного поліедра.

Ще одним подібним спрощенням є проведення розрахунків точнісних характеристик системи відносно опорних точок повітряних псевдосупутників, хоча насправді ППС на ЛА-носіях здійснюють політ по певній траєкторії навколо опорної точки. Оцінку ступеня впливу зазначеного спрощення можна здійснити на основі обчислення значень геометричного фактору для елементарної просторової моделі псевдосупутникової РНС (рис. 4.6).

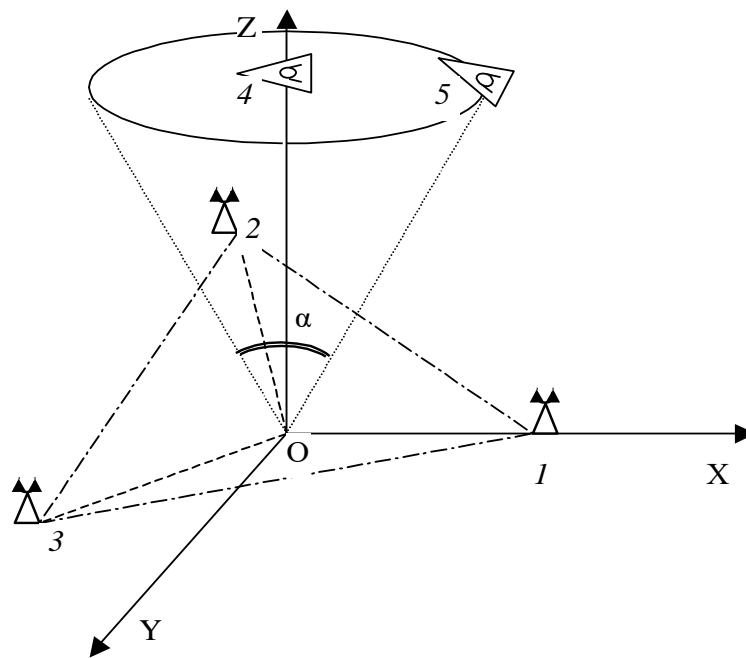


Рисунок 4.6 – Елементарна просторова модель псевдосупутникової РНС

У точках 1, 2, 3 розташовані наземні псевдосупутники, повітряний псевдосупутник 5 здійснює політ по колу навколо опорної точки ППС 4. Споживач знаходиться у точці O. Між точкою O та максимальною віддаллю траєкторії польоту ППС від його опорної точки утворюється тілесний кут зору

α . Цей кут у загальному випадку залежить (рис. 4.7) від висоти опорної точки H_{Π} , максимальної віддалі траєкторії польоту ЛА R та віддалі від споживача до проекції опорної точки ППС на земну поверхню D . У табл. 4.2, як приклад, наведені результати обчислень кута зору α для $H_{\Pi} = 3$ км та $R = 1$ км.

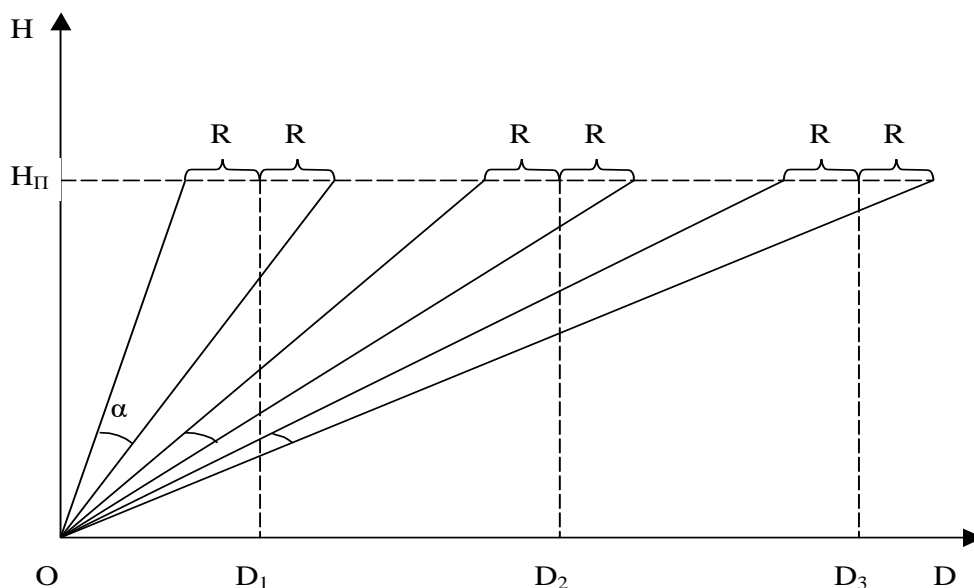


Рисунок 4.7 – Залежність кута зору α від віддалі споживача від ОТППС

Оскільки за опорну точку обирається центр кола, описаного навколо траєкторії польоту ЛА-носія ППС, то, на основі формули (1.6), визначаємо залежність точності навігації (геометричного фактору) від величини половинного кута зору $\alpha/2$ (табл. 4.3).

Таблиця 4.2

| | Відстань, км | | | | | | | | |
|-----------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| α , град | 36,86 | 4,17 | 0,84 | 0,37 | 0,21 | 0,13 | 0,09 | 0,07 | 0,05 |

Таблиця 4.3

| | Половинний кут зору $\alpha/2$ (град) | | | | |
|-------|---------------------------------------|------|------|------|------|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 |
| K_r | 1.73 | 1.74 | 1.80 | 1.91 | 2.09 |

З табл. 4.3 видно, що, навіть при знаходженні ППС у зеніті відносно споживача та максимальній віддалі траєкторії польоту ЛА, яка складає половину її висоти, похибка оцінки точності місцевизначення споживача буде не більшою 10 – 15 %. При пригоризонтному розташуванні ППС зазначені похибки лежатимуть у межах 1 – 2 %.

Проведений аналіз достовірності та точності запропонованих наукових результатів дає змогу зробити висновок про правомірність вирішення завдання запропонованими методами на основі розробленої математичної моделі.

Висновки до 4-го розділу

1. Порівняльна оцінка вартісних показників варіантів структур локальних РНС свідчить про те, що застосування змінної просторово-часової структури системи дає змогу зменшити необхідну кількість системоутворюючих елементів для різних періодів функціонування на 6 – 19 % у порівнянні з системою, в якій випромінювання радіонавігаційної інформації здійснюється безперервно.

2. Синтез структур багатопозиційних радіонавігаційних систем водночас вимагає створення ефективних методик по їх оцінці з метою порівняння різних варіантів структури однотипних систем та структур систем різних типів. Для цього необхідно отримати сукупність реалізацій (оцінок) вихідних характеристик системи за різних випадкових значень вхідних

параметрів. Такі оцінки можна отримати на основі статистичного моделювання. З урахуванням цього, для оцінки ступеню ефективності просторово-часової структури локальної РНС обрано метод статистичних випробувань (Монте-Карло). Випадковим фактором, який підлягає урахуванню при статистичному моделюванні поведінки РНС буде “загибель” під час кожної реалізації випадкового числа окремих її елементів відповідно до розрахованих показників їх живучості та надійності. Достовірність результатів оцінки ефективності може бути задана завчасно. Проведення для кожного типу по 500 випробувань дозволяє забезпечити відхилення статистичних результатів від теоретичних у межах 0,02 при довірчій ймовірності 0,95.

3. Оцінка ефективності варіантів структур локальних РНС, дає змогу зробити висновок, що при використанні РНС зі змінною структурою зона ефективності системи, яка відповідає встановленому критерію, значно більша, ніж при використанні статичної просторово-часової структури за однакової кількості системоутворюючих елементів. Також можна помітити, що при використанні управління змінною структурою зона ефективності системи, яка відповідає заданому критерію, не так критично залежить від часу її функціонування.

4. Через необхідність врахування великої кількості чинників синтез структури системи евристичними методами неможливий. Резервування елементів на “загрозливих” напрямках також не забезпечує достатньої ефективності системи, а призводить лише до збільшення її вартості. Лише застосування запропонованих моделі та методів дозволяє оптимально проектувати просторово-часову структуру системи за обраними критеріями.

5. Введення оптимальної управління змінною структурою дозволяє створювати локальні радіонавігаційні системи з необхідними значеннями ефективності навігаційного забезпечення у визначених точках простору, при

цьому необхідна кількість засобів, що витрачаються на побудову такої системи, зменшується за рахунок системного ефекту, який отримується внаслідок управління зміною просторово-часового випромінювання радіонавігаційної інформації.

6. Отримані результати підкреслюють перспективність обраного напряму досліджень для теорії та практики багатопозиційних радіонавігаційних систем, а також при розробці та удосконаленні інших видів складних технічних систем, оскільки такі системи синтезуються з введенням управління визначеною на етапі проектування та наявною в системі структурною надмірністю, перерозподілом параметрів системи між елементами, адаптованістю до конкретних умов обстановки.

ВИСНОВКИ

В результаті дисертаційних досліджень, виконаних автором, вирішено нове актуальне наукове завдання удосконалення існуючих та розробки нових моделей та методів підвищення безпеці судноводіння на основі локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою. Дане наукове завдання має важливе значення для теорії і практики підвищення ефективності та безпеки судноводіння. Відсутність аналогічних рішень в нашій країні і за кордоном робить результати досліджень пріоритетними.

На підставі проведених досліджень зроблені наступні висновки:

1. На основі проведеного аналізу існуючих типів структур локальних (псевдосупутникових) радіонавігаційних систем зроблено висновок про їх недостатню ефективність при функціонуванні в умовах оперативного створення зони безпечної навігації. Існуючі способи побудови багатопозиційних радіонавігаційних систем не забезпечують синтез достатньо ефективної локальної радіонавігаційної системи з змінною структурою (мобільними радіонавігаційними точками), що підтверджує актуальність поставленого наукового завдання.

2. Математична модель локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою враховує функціонування у форматі GNSS-сигналів та мобільність розташування радіонавігаційних точок (псевдолітів); це дозволяє значно покращити адекватність моделі та якість процедури синтезу структури системи.

3. Метод синтезу просторової структури локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою базується на комплексному врахованні геометричного чиннику та динаміки зміни координат мобільних радіонавігаційних точок

(псевдолитів). Застосування методу дозволяє забезпечити задану точність навігації та відповідний рівень безпеці судноводіння.

4. Метод програмного управління змінною структурою локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою ґрунтується на застосуванні комбінаторно-імовірнісної математичної моделі та алгоритму оптимізації за критерієм мінімуму вартості системи при визначеній імовірності її функціонування з заданою якістю надання навігаційних послуг, що дає змогу зменшити кількість системоутворюючих елементів системи та значно покращує показники оперативності за рахунок зменшення кількості операцій та використання нових принципів обробки апріорної інформації. За результатами моделювання метод дає змогу зменшити кількість системоутворюючих елементів системи на 6 – 19 % у порівнянні з іншими підходами.

5. Основні результати досліджень доведені до практичної реалізації у вигляді розрахункових програм, що дало змогу розробити практичні рекомендації щодо забезпечення заданого рівня ефективності функціонування локальної радіонавігаційної системи в умовах оперативного створення зони безпечної навігації. Результати проведених досліджень можуть бути покладені в основу подальших досліджень зі створення інформаційно-управляючих систем річкового та морського транспорту.

6. Обґрунтованість результатів досліджень забезпечується глибоким аналізом сутності функціонування псевдосупутникової радіонавігаційної системи, а також факторів, що визначають особливості її застосування в умовах оперативного створення зони безпечної навігації.. Достовірність отриманих у дисертації наукових результатів підтверджується збіжністю теоретичних результатів з результатами статистичного моделювання, використанням апробованого математичного апарату, адекватністю удосконаленої та розробленої моделі та методів. Достовірність результатів статистичного

моделювання забезпечується достатньою кількістю випробувань: при проведенні 500 випробувань похибка статистичного показника складає 0,02 за гарантованої ймовірності 0,95.

7. Мета щодо підвищення безпеки судноводіння за рахунок впровадження запропонованих моделей та методів досягнута, поставлені часткові наукові завдання виконані. Наукові результати досліджень є внеском у розвиток моделей і методів підвищення ефективності навігаційного забезпечення річкового та морського транспорту та безпеки судноводіння.

8. Напрямами подальших досліджень доцільно визначити питання параметричного синтезу елементів псевдосупутникової радіонавігаційної системи, обґрунтування тактико-технічних вимог до передавачів, антен та інших технічних засобів системи, а також розробка тактичних прийомів застосування систем такого типу на основі впровадження геоінформаційних технологій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамов О.В., Розенбаум, А.Н. Прогнозирование состояния технических систем. Москва: Наука, 1990. 126 с.
2. Абрамов О.В. Контроль и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения. *Надежность и качество сложных систем*. 2018. № 4 (24). С. 108–115.
3. Аналіз стану безпеки руху, польотів, судноплавства та аварійності на транспорті в Україні за I півріччя 2017 р. URL: http://dsbt.gov.ua/sites/default/files/imce/Bezpeka_DTP/analiz_2017/analiz_a_variynosti_i_pivrichchya_2017.pdf (дата звернення 12.06.2019).
4. Анучин О. Н. Емельянцев Т.Н. Интегрированное навигационные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. Санкт-Петербург: Государственный Научный Центр Российской Федерации. 1999. 357 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/126419/> (дата звернення 12.12.2019).
5. Баранов Г. Л., Носовський А. М., Тихонов І. В. Функціональна стійкість навігаційного обслуговування безпеки судноплавства на внутрішніх водних шляхах: монографія. Київ: КДАВТ, 2012. 149 с.
6. Баранов Г.Л., Тихонов І.В. Концепція побудови функціонально стійкого навігаційного обслуговування об'єктів водного транспорту в зонах підвищеного ризику плавання. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2009. Вип.2(10). С. 17-21.
7. Баранов Г.Л., Тихонов І.В. Ефективність інтелектуалізації інтегрованих систем навігації і управління рухомими транспортними засобами. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2010. Вип. 1 С. 13-20.

8. Беллман Р. Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях: сборник переводов. Москва: Мир, 1976. С. 172-215.
9. Белов П. Г. Запорожченко Ю. Ф. Сущность и методы прогнозирования техногенного риска. *Вісник КМУЦА*. 1999. №1. С. 260–264.
10. Бень А.П. Методы оценки опасности траектории движения судов в системах поддержки принятия решений. *Вестник ХНТУ: сб. науч. трудов Херсонского национального технического университета*. 2009. Вып. 1 (34). С. 429-433.
11. Бенькович Е. С. Колесов Ю. Б., Сениченков Ю. Б. Практическое моделирование динамических систем: учебное пособие. Петербург, 2002. 464 с.
12. Боглаев Ю. П. Вычислительная математика и программирование: учебное издание. Москва: Высшая Школа, 1990. 546 с.
13. Богом'я В. І., Коломієць О. М. Методи підвищення ефективності процесу експлуатації судових комплексів. *Новітні технології*. 2017. Вип. 1(3). С. 42–48.
14. Вагущенко Л. Л. Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судна: учебное пособие. Одесса: Латстар, 2002. 310 с.
15. Вагущенко Л. Л., Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судна: учебное пособие. 3-е издание перераб.и доп. Одесса: Феникс, 2007. 376 с.
16. Вентцель Е.С. Исследование операций. Москва: Советское радио, 1972. 552 с.
17. Вычужанин В.В., Рудниченко Н.Д. Технические риски сложных комплексов функционально взаимосвязанных структурных компонентов судовых энергетических установок. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2014. № 2. С. 68–77.

18. Гаранов М. Ю., Шепета Ю. Н., Лебедев А. Е. Технология интегрирования оборудования рулевой рубки скоростных судов. *Морские информационно-управляющие системы*. 2014, № 1 (4). С. 112 – 115.
19. Гаскаров Д. В. Истомин Е. П., Кутузов О. И. Сетевые модели распределенных автоматизированных систем. Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 1998. 353 с.
20. Горбань І. І. Теорія ймовірностей і математична статистика для наукових працівників та інженерів . Київ : НАНУ. ІПММС. 2003. 244 с.
21. Горошко К. О. Оцінка сучасного стану та перспективні шляхи розвитку внутрішнього водного транспорту України: збірник наукових праць ДЕТУТ. Сер. «Економіка і управління». Вип 26. Київ: ДЕТУТ, 2013. С. 169 – 173.
22. Груверман А. Технология создания мостиковых систем с применением интеграторов информации от разнородных датчиков. Алгоритмы распределенной обработки и регистрации полученных данных. *Управление и диагностика технических средств для судов различной класса автоматизации ЗАО «Транзас»*. URL: <https://docplayer.ru/31427735-Tehnologiya-sozdaniya-mostikovyih-sistem-s-primeneniem-integratorov-informacii-ot-raznorodnyh-datchikov.html> (дата звернення: 19.02.2019).
23. Довідник кваліфікаційних характеристик професій працівників. «Водний транспорт». Розділ «Морський транспорт». Міністерство транспорту України. 2002. Вип.67. 128 с.
24. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. URL: <https://www.twirpx.com/file/2414014/> (дата звернення: 03.07.2019).

25. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. URL: https://dnaop.com/html/2273/doc_2860-94 (дата звернення: 03.07.2019).
26. Закон України «Про транспорт» від 28.12.2015 р. №233/94-ВР. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/232/94-вр> (дата звернення 12.12.2019).
27. Захаров И. Г. Проблемы комплексирования и интеграции боевых систем и технических средств при создании кораблей нового поколения. *Морская радиоэлектроника*. 2006. №3(17).
28. Інструкція з проведення технічного нагляду за суднами рибної промисловості України, що не підлягають нагляду класифікаційного товариства. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0749-17> (дата звернення 04.07.2019).
29. Качинский А. Б. Засады системного анализа безопасности сложных систем. Киев: ДП «НВЦ» Євроатлантикінформ, 2006. 336 с.
30. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. Москва: *Радио и связь*, 1990. 544 с.
31. Колесников А. В. Кириков И. А. Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. Москва: ИПИ РАН, 2007. 387 с.
32. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы: построение и анализ. Москва: МЦМНО, 1999. 960 с.
33. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. Москва: Мир, 1978. 402 с.
34. Критерій оптимальності процесу технічного обслуговування суднових комплексів/ Тимощук О.М., Коломієць О. М., Дакі О.А., Трофименко І.В. *Наука і техніка Повітряних сил Збройних сил України*. 2017.№4(29). С.132–136.

35. Крыжановский Г. А., Купин В. В., Плясовских А. П. Теория транспортных систем: учебное пособие / под ред. Г. А. Крыжановского. С. Петербург, 2008. 208 с.
36. Кудрицька Н. В. Транспортнодорожній комплекс України: сучасний стан, проблеми та шляхи розвитку: монографія. Київ: НТУ, 2010. 338 с.
37. Кузнецов О. П., Адельсон-Вельский Г. М. Дискретная математика для инженера. Москва, 1988. 480 с.
38. Кунцевич В. М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. Киев: Наукова думка, 2006. 264с.
39. Майстренко О., Гурченков О. Стан виробничого потенціалу суднобудування та перспективи його розвитку URL: http://www.nbu.gov.ua/portal/Soc_Gum/Ecan/2011_9_2/pdf (дата звернення 12.12.2019).
40. Максимей И. В. Имитационное моделирование на ЭВМ. Москва: Радио и связь, 1988. 232 с.
41. Маринов М. Л., Клименко В. Д. Учет человеческого фактора в аварийных ситуациях на море. Эксплуатация морского транспорта. 2008. № 2. С. 25-29.
42. Моделювання та оптимізація інформаційних систем в судноводінні: підручник / Кравченко Ю.В. та ін., за ред. О.М. Тимошук. Київ :ДУІТ, 2019, 312 с.
43. Мусорін О. О. Методи підвищення ефективності засобів й систем навігаційного обслуговування вантажних суден необмеженого району судноплавання: дис... к-та техніч. наук : 05.22.13/ ДП «УНДНЦ ПССЯ». Київ, 2017. 187 с.

44. Навігаційне забезпечення управління рухом суден : навчальний посібник/ Богом'я В.І. та ін. Київ :ДВВП «Компас», 2012, 336 с.
45. Національної доповіді про стан техногенної природної безпеки в Україні у 2013 році. URL:http://www.mns.gov.ua/files/prognoz/report/2013/2_5.pdf (дата звернення 12.12 2018).
46. Небылов А.В. Гарантирование точности управления. Москва: *Наука. Физматлит*, 1998. 304 с.
47. Нечаев Ю. И., Сизов В. Г. Принятие решений при управлении судном в экстремальных ситуациях на основе современной теории катастроф / Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА. Одесса: «ИздатИнформ», 2010. Вып. 20. С. 130–142.
48. Основи технічної експлуатації автоматизованої системи управління судном: підручник для студентів вищих навчальних закладів. / Богом'я В.І. та ін. ; за ред. О. М. Тимошук. Київ. ДУІТ. 2018. 305 с.
49. Особливості системного підходу до вирішення наукових завдань експлуатації судового обладнання./ Богом'я В.І. та ін. ; за ред. О. М. Тимошук. Київ, ДУІТ, 2018, 305 с.
50. Письменна К. С. Стан і тенденції розвитку суднобудівної промисловості в Україні: господарсько-правовий аспект URL: <http://vuzlib.com/content/view/2516/27/> (дата звернення 12.04.2019).
51. Прогнозирование и оценка технического состояния корпуса судна по замерам остаточных толщин /Баева Л.С. та ін. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 7-1. С. 7-10. URL: <http://www.applied-research.ru/ru/article/view?id=9746> (дата звернення: 30.06.2019).
52. Проект Закону України «Про внутрішній водний транспорт» від 09.07.2018 № 2475а-д URL:

- http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=64397 (дата звернення 12.12.2018).
53. Публічний звіт Голови Державної служби України з безпеки на транспорті М. Ноняка за 2017 рік. Державна служба України з безпеки на транспорті : веб сайт. URL: <http://dsbt.gov.ua/storinka/publichnyy-zvit-golovy-derzhavnoyi-sluzhby-ukrayiny-z-bezpeky-na-transporti-myhayla-0> (дата звернення: 09.12.2018).
54. Публічний звіт В.о. Голови Морської адміністрації за 2019 рік URL: <https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/gromadska-rada/Zvit/Publichnyi%20Zvit.pdf> (дата звернення: 21.03.2020).
55. Пятаков Э. Н. Требование к процедуре формирования второго уровня иерархической системы управления взаимодействием судов. Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, Одесса: *ИздатИнформ*, Вып.13. 2007. С. 145 – 148.
56. Пліта Л.Л., Шевченко А.П., Дакі О.А. Особливості організації процесу експлуатації засобів річкового та морського транспорту. Новітні технології. 2019. Вип. 3(10). С. 6–12.
57. Пліта Л.Л., Богом'я В.І., Давидов В.С., Доронін В.В. Деякі питання підвищення безпеки мореплавства великотоннажних суден. Водний транспорт. 2020. Вип.3(31). С.67–73.
58. Пліта Л.Л., Шевченко А.П. Аналіз методів прогнозування технічного стану засобів водного транспорту. Водний транспорт. 2020. Вип.1(29). С.23–30.
59. Пліта Л.Л., Бойко С.М. Методи прогнозування довговічності обладнання засобів річкового та морського транспорту в умовах експлуатації за технічним станом. Slovak international scientific journal. 2020. Vol.2. No.45. pp.24-30.

60. Пліта Л.Л., Штрибець В.В., Богом'я В.І. Дослідження фільтрів для спектрального аналізу випадкових сигналів двигунів засобів водного транспорту. II Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Навчально-наукового інституту Морського флоту Одеського національного морського університету. Одеса, 2020. С.169–173.
61. Равин А.А. Диагностическое обеспечение судового энергетического оборудования. PRoATOM: веб-сайт. URL: <http://proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=4403> (дата звернення: 09.12.2018).
62. Равин А.А. Диагностическое обеспечение судового энергетического оборудования: проблемы и решения : дис.... д-ра техн. наук : 05.08.05. URL: <http://docplayer.ru/44925881-Ravin-aleksandr-aleksandrovich-diagnosticheskoe-obespechenie-sudovogo-energeticheskogo-oborudovaniya-problemy-i-resheniya.html> (дата звернення: 30.11.2018).
63. Разработка метода оценки и прогнозирования технического состояния судовых сложных систем / В. В. Вычужанин та ін. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2016. №6/9 (84). URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/download/85605/87615> (дата звернення: 06.01.2020).
64. Розвиток транспорту з метою відновлення і зростання української економіки: наукова доповідь / за ред. О.І. Никифороук. Київ: Ін-т екон. та прогнозув. НАН України. 2018. 200 с.
65. Садловська І.П. Аналіз сучасних вантажопотоків в Україні та напрями їх розвитку / І.П. Садловська // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

- Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2012. Вип. 42. С. 242 – 250.
66. Сидоренко В. Ф. Кораблекрушения на море. Ленинград: Издательство Ленинградского университета, 1990. 296 с.
67. Структурное моделирование та символні перетворення для управління рухом транспортних засобів/ Баранов Г. Л. та ін. Київ, 2014. 310 с.
68. Тимощук О. М., Коломієць О. М., Дакі О. А. Обґрунтування застосування сигналів з нормованим спектром для контролю технічного стану радіонавігаційних приладів засобів водного транспорту. *Новітні технології*. 2018. Вип. 2(6). С. 39–45.
69. Тимощук О. М., Коломієць О. М., Данік О. В. Вибір критерію оптимальності системи відновлення суднових комплексів. *Економіка та держава*. 2017. № 4. С. 102–104.
70. Управління технічною експлуатацією флоту : конспект лекцій. URL: http://www.kma.ks.ua/ua/images/2_library/methodical/sud_energ/department/avtomatyka/utef/u1.pdf (дата звернення: 09.12.2018).
71. Шапиро Д. И. Принятие решений в системах организационного управления. Использование расплывчатых категорий. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 185 с.
72. Шевченко А. П., Герасимов С. В., Тимочко О. І., Тимощук О. М., Трішин В. В. Оптимальний алгоритм обробки навігаційної інформації у системах управління засобами водного транспорту. *Наукоємні технології*. 2018, №4(40). С.450-457.
73. Шевченко А.П., Воробьёв Е.С., Мазур А.М., Коломиец О.М., Демьяненко С.К. Разработка методов сжатия сообщений о воздушных объектах и управления дискретностью их выдачи от источников

- радиолокаційної інформації. *Новітні технології*. 2018. Вип.3(7). С.217-230.
74. Шевченко А.П., Трофименко І.В., Мазур А.М. Підвищення точності вимірювань в суднових радіолокаційних системах з врахуванням тропосферного впливу в умовах неоднорідності морського середовища. *Новітні технології*. 2018, Вип.2(6). С.61-68.
75. Шевченко А.П., Михайлова Т.І, Бойко С.О. Спосіб прогнозування відмов агрегатів суднових комплексів за даними експлуатаційних спостережень. *Новітні технології*. 2019. Вип. 1(8). С.52-58.
76. Шевченко А.П., Штрибець В.В., Трофіменко А.О. Розроблення фільтрових методів спектрального аналізу випадкових сигналів для контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту. *Slovak international scientific journal*. 2019. Vol.1. No.34. pp.30-38.
77. Шевченко А.П., Богом'я В.І. Обґрунтування моделі функціонування автоматизованої системи управління засобів водного транспорту. Міжнародна науково-практична конференція «Водний транспорт: сучасний стан та перспективи розвитку»: тези доповідей, 16-17 травня 2019 року. Київ : ДУІТ, 2019. С.379-380.
78. Bootstrap. URL: <http://twbs.docs.org.ua/> (дата звернення 08.01.2019)
79. De Marco T. *Structured Analysis and System Specification* N.Y.: Yourdon Press, 1988. 236p.
80. Goldberg D.E. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison Wesley, 1989. 196 p.
81. Holland J.H. *Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence*. London: Bradford book edition, 1994. 211 p.

82. Hollstein R.B. Artificial genetic adaptation in computer control systems. PhD Thesis: University of Michigan, 1971. 213 p.
83. Lisowski J. Game control methods in navigator decision support system / The Archives of Transport. 2005. No 3-4, Vol. XVII. P. 133 –147.
84. Recommendation of the European Parliament and of the Council of 23 April 2008 on the establishment of the European Qualifications Framework for lifelong learning. Text with EEA relevance. 2008. C 111/01.
85. Reform in the inland water transport: China's experience URL: <https://www.unescap.org/our-work/transport> (дата звернення 12.12.2018).
86. Sustainable development of inland waterway transport in China (2009). Theme I of a World Bank Project: Comprehensive Transport System Analysis in China URL: <http://siteresources.worldbank.org/EXTPRAL/Resources/china.pdf> (дата звернення 12.12.2018).
87. The work plans of the 11 European Coordinators for the TENT have been finalised, establishing the basis for action until 2030. / Carlo Secchi, Karla Peijs, Laurens Jan Brinkhorst and others. Brussel, Belgium: European Commission, Directorate General for Mobility and Transport, May 2015 URL: http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/news/20150528_coordinatorworkplans_en.htm (дата звернення 12.12.2018).
88. Zadeh L. A. Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing. Communications of the ACM, March 1994, Vol. 37 No. 3, pp. 77-84.
89. Glenn E. Krasner and Stephen T. Pope. A cookbook for using the model-view controller user interface paradigm in Smalltalk-80. Journal of Object-Oriented Programming, 1(3), 1988. pp. 26-49.
90. Пятаков Э. Н. Требование к процедуре формирования второго уровня иерархической системы управления взаимодействием судов.

- Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, Одесса: *ИздатИнформ*, Вып.13. 2007. С. 145 – 148.
91. Равин А.А. Диагностическое обеспечение судового энергетического оборудования: проблемы и решения : дис.... д-ра техн. наук : 05.08.05. URL: <http://docplayer.ru/44925881-Ravin-aleksandr-aleksandrovich-diagnosticheskoe-obespechenie-sudovogo-energeticheskogo-oborudovaniya-problemy-i-resheniya.html> (дата звернення: 30.11.2018).
92. Разработка метода оценки и прогнозирования технического состояния судовых сложных систем / В. В. Вычужанин та ін. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2016. №6/9 (84). URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/download/85605/87615> (дата звернення: 06.01.2020).
93. Розвиток транспорту з метою відновлення і зростання української економіки: наукова доповідь / за ред. О.І. Никифороук. Київ: Ін-т екон. та прогнозув. НАН України. 2018. 200 с.
94. Садловська І.П. Аналіз сучасних вантажопотоків в Україні та напрями їх розвитку / І.П. Садловська // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Дніпропетровськ: *Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*, 2012. Вип. 42. С. 242 – 250.
95. Структурное моделирование та символні перетворення для управління рухом транспортних засобів/ Баранов Г. Л. та ін. Київ, 2014. 310 с.
96. Управління технічною експлуатацією флоту : конспект лекцій. URL: http://www.kma.ks.ua/ua/images/2_library/methodical/sud_energ/department/avtomatyka/utef/u1.pdf (дата звернення: 09.12.2018).

97. Шапиро Д. И. Принятие решений в системах организационного управления. Использование расплывчатых категорий. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 185 с.
98. Шевченко А. П., Герасимов С. В., Тимочко О. І., Тимощук О. М., Трішин В. В. Оптимальний алгоритм обробки навігаційної інформації у системах управління засобами водного транспорту. *Наукоємні технології*. 2018, №4(40). С.450-457.
99. Шевченко А.П., Пліта Л.Л., Дакі О.А. Особливості організації процесу експлуатації засобів річкового та морського транспорту. *Новітні технології*. 2019. Вип. 3(10). С. 6-12.
100. Шевченко А.П., Штрибець В.В., Трофіменко А.О. Розроблення фільтрових методів спектрального аналізу випадкових сигналів для контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту. *Slovak international scientific journal*. 2019. Vol.1. No.34. pp.30-38.
101. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надёжности / Яков Борисович Шор. – М.: Советское Радио, 1962. – 552 с.
102. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. Москва: Горячая линия: Телеком, 2007. 228 с.
103. Amemiya, T. *Advanced Econometrics*, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1985. – 507 p.
104. Lisowski J. Game control methods in navigator decision support system / *The Archives of Transport*. 2005. No 3-4, Vol. XVII. P. 133 –147.
105. Mallows C.L. Some comments on Cp // *Technometrics*. –1973. – v.15. –P.661 – 667.
106. Reform in the inland water transport: China’s experience URL: <https://www.unescap.org/our-work/transport> (дата звернення 12.12.2018).

107. Sustainable development of inland waterway transport in China (2009).
Theme I of a World Bank Project: Comprehensive Transport System Analysis
in China URL: <http://siteresources.worldbank.org/EXTPRAL/Resources/china.pdf> (дата звернення 12.12.2018).
108. The work plans of the 11 European Coordinators for the TENT have been finalised, establishing the basis for action until 2030. / Carlo Secchi, Karla Peijs, Laurens Jan Brinkhorst and others. Brussel, Belgium: European Commission, Directorate General for Mobility and Transport, May 2015
URL: http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/news/20150528_coordinatorworkplans_en.htm (дата звернення 12.12.2019).
109. Young P.S. Data-Based Mechanistic Modeling of Engineering Systems // Journal of Vibration and Control. – 1998. – v. 4, No. 1. – P.5 – 28.

Додаток А

ЗАТВЕРДЖУЮ
 В. о. першого заступника
 директора ДП «Укрводшлях»
 Ідентифікаційний
 код 03150102
 О.В. Ванніков
 « 07 » червня 2021 року

АКТ № 07/06-23
 впровадження результатів дисертаційних досліджень
 Пліти Леоніда Леонідовича

Комісія у складі голови: заступника директора ДП «Укрводшлях» з безпеки судноплавства, кандидата технічних наук, доцента Дороніна В.В., та членів комісії: начальника служби безпеки судноплавства, капітана далекого плавання Безносенка Д.П., головного штурмана річкової лоцманської служби, капітана далекого плавання, доктора філософії за спеціальністю «річковий та морський транспорт» Алейнікова М.В., інженера служби безпеки судноплавства Чорнокапської С.М. встановила, що результати наукових досліджень автора:

математична модель локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою, функціонуючою у форматі GNSS-сигналів, яка на відміну від існуючих враховує мобільність розташування опорних передаючих станцій, впроваджена на підприємстві.

Заслуговує на увагу те, що такий метод базується на комплексному врахуванні геометричного фактора та динаміки зміни координат мобільних опорних передаючих станцій. Це дозволяє значно покращити процедуру лоцманських проведень суден на р. Дніпро та забезпечити задану точність позиціонування суден і відповідний рівень безпеки судноводіння в умовах часової і позиційної невизначеності.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що їх реалізація доцільна в математичному та програмному забезпеченні у якості складової математичного моделювання лоцманських проведень суден на р. Дніпро.

Проведена експериментальна лоцманська провідка судна «Прут-2» за маршрутом п. Херсон – п. Київ підтвердила, що застосування запропонованої моделі дозволяє підвищити точність позиціонування суден у місцях тінювих зон прийому сигналів у деяких випадках до 25%. При цьому, з огляду на результати математичного моделювання, при впровадженні зазначеної моделі на практиці можливе підвищення ймовірності безпечного плавання до 0,97.

Акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова:
 заступник директора ДП «Укрводшлях» з безпеки судноплавства, кандидат технічних наук, доцент

В.В. Доронін

Члени комісії:
 начальник служби безпеки судноплавства,
 капітан далекого плавання

Д.П. Безносенко

головний штурман річкової лоцманської служби,
 капітан далекого плавання, доктор філософії за
 спеціальністю «річковий та морський транспорт»

М.В. Алейніков

провідний інженер служби безпеки судноплавства

С.М. Чорнокапська

ЗАТВЕРДЖУЮ:

проректор з наукової

роботи ДУІТ

к. держ. упр., доцент

П.Ю. Скок

2020 року



АКТ № 15/a

впровадження результатів дисертаційного дослідження
Пліти Леоніда Леонідовича на тему: «Моделі та методи підвищення безпеки
судноводіння на основі локальної радіонавігаційної системи»

Комісія у складі голови – доцента кафедри технічних систем і процесів управління в судноводінні, к.п.н., І.Ю. Скляренко та членів – декана факультету судноводіння, к.ю.н., О.П. Єлезарова, к.т.н., професора кафедри Вороб'я В.І. встановила, що результати наукових досліджень автора, а саме:

математична модель локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою функціонуючою у форматі GNSS-сигналів, яка на відміну від існуючих враховує мобільність розташування радіонавігаційних точок;

метод синтезу просторової структури локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою, який базується на комплексному врахуванні геометричного чиннику та динаміки зміни координат мобільних радіонавігаційних точок

використовувались при створенні курсу лекцій з дисциплін «Радіонавігаційні прилади та системи», «Навігаційні інформаційні системи», а також при підготовці бакалаврів та магістрів із судноводіння.

Акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова:
к.п.н., доц.

І.Ю.Скляренко

Члени:
к.ю.н., доц.

О.П. Єлезаров

к.т.н., професор

В.І.Воробей

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Пліта Л.Л., Шевченко А.П., Дакі О.А. Особливості організації процесу експлуатації засобів річкового та морського транспорту. Новітні технології. 2019. Вип. 3(10). С. 6–12.
2. Пліта Л.Л., Богом'я В.І., Давидов В.С., Доронін В.В. Деякі питання підвищення безпеки мореплавства великотоннажних суден. Водний транспорт. 2020. Вип.3(31). С.67–73.
3. Пліта Л.Л., Шевченко А.П. Аналіз методів прогнозування технічного стану засобів водного транспорту. Водний транспорт. 2020. Вип.1(29). С.23–30.
4. Пліта Л.Л., Бойко С.М. Методи прогнозування довговічності обладнання засобів річкового та морського транспорту в умовах експлуатації за технічним станом. Slovak international scientific journal. 2020. Vol.2. No.45. pp.24-30.
5. Пліта Л.Л., Богом'я В.І., Писанко А.Г. Аналіз систем керування судном та особливостей їх експлуатації. Водний транспорт. 2021. Вип.1(32). С.37–41.
6. Пліта Л.Л., Бажак О.В. Методи підвищення безпеки судноводіння на основі локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою. Новітні технології. 2020. Вип. 1(11). С. 65–78.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Пліта Л.Л., Штрибець В.В., Богом'я В.І. Дослідження фільтрів для спектрального аналізу випадкових сигналів двигунів засобів водного транспорту. II Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Навчально-наукового інституту Морського флоту Одеського національного морського університету. Одеса, 2020. С.169–173.

8. Пліта Л.Л., Богом'я В.І. Перспективні шляхи побудови систем керування судна з використанням комплексної автоматизації Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції «Дніпровські читання 2020» – 23 грудня 2020 р, м.Київ. С.79–80. 8

9. Пліта Л.Л., Бажак О.В. Модель інтелектуальної системи керування судном Тези доповідей одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції 8 – 9 квітня 2021 року. Том 1: секції 1, 2. Баку – Харків – Київ – Жиліна – 2021. С.18.

10. Пліта Л.Л., Богом'я В. І., Зазірний А. А. Розроблення адаптивних систем керування судном в складних умовах. III Міжнародна науко-во-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Навчально-наукового інституту Морського флоту Одеського національного морського університету. Одеса. 2021. С.209–213.