

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем

Кафедра радіотехніки

# **МОДЕЛЬНО-ОРІЄНТОВАНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ КУТОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ АВІАЦІЙНОЇ ПОСАДКОВОЇ СИСТЕМИ**

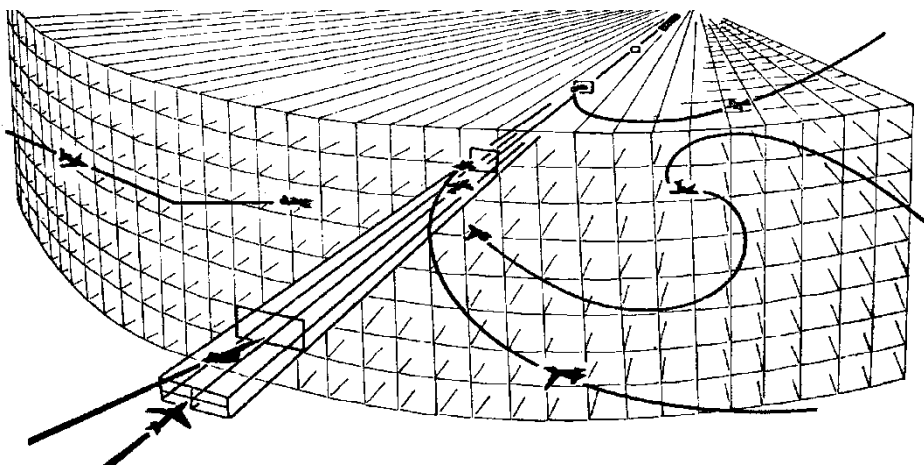
Магістерська кваліфікаційна робота  
за спеціальністю: 172 – Телекомунікація та радіотехніка  
Освітня програма: Радіотехніка

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ – 18м  
Мозговий В. С.

Керівник: к.т.н., доцент каф. РТ  
Воловик А. Ю.

ВНТУ Вінниця 2019 р.

# ТАКТИКО-ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СП ТА СТАНДАРТ Ї РОЗГОРТАННЯ НА МІСЦЕВОСТІ



Тактичні можливості СП



Стандарт розгортання СП на місцевості

## Параметри системи посадки

Зона дії :

- область з курсом посадки, обмежена у горизонтальній площині кутом відносно осі ЗПС, град. .... ±40
- у вертикальній площині, кутом, град ..... 15
- віддалю, км..... 37
- область, що включає ЗПС і обмежена у горизонтальній площині віддалю від осі ЗПС, м ..... ±45
- у вертикальній площині висотою над ЗПС, м ..... 600
- область зі зворотним курсом, обмежена у горизонтальній площині кутом, град ..... ±20
- у вертикальній площині висотою над ЗПС, м ..... 1500
- віддалю, км ..... 9

Похибки каналів системи (  $2\sigma$  ) :

- азимутального каналу, град ..... 0,05
- каналу кута місця при зниженні та вирівнюванні, град. 0,05
- далекомірного каналу, м ..... 30

Пропускна здатність (кількість одночасного обслуговування ПС) 200

Частота оновлення кутомірної інформації, Гц :

- азимутального каналу ..... 13,5
- каналу кута місця при зниженні ..... 40,5
- каналу кута місця при вирівнюванні ..... 40,5

Частотний діапазон, ГГц :

- основних радіомаяків та високоточної далекомірної системи ..... 5
- можливого ( у перспективі) каналу кута місця при вирівнюванні та далекомірної підсистеми ..... 1

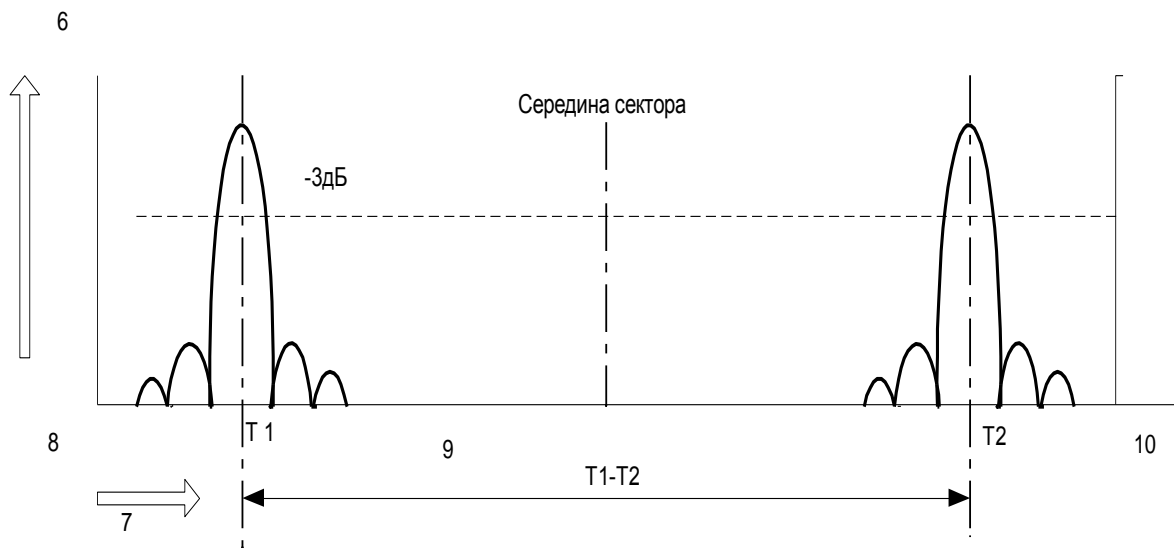
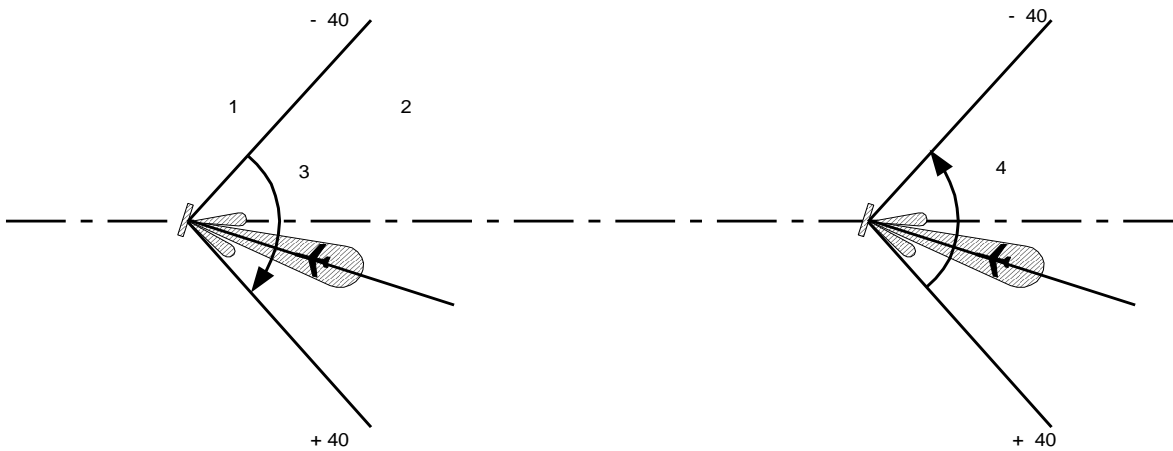
## МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

**Мета роботи** спрямована на створення системи оперативного контролю поточної точності та достовірності бортових вимірювань кутових координат повітряного судна за номінальних умов шляхом застосування методів оптимальної фільтрації за Калманом, що поєднують простоту технічної реалізації з гарантованою точністю та ефективністю.

**Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:**

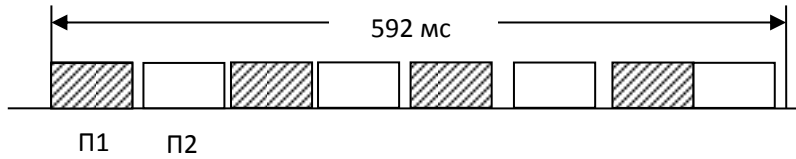
- провести аналіз архітектури системи посадки сантиметрового діапазону та надмірності формату радіосигналу для пошуку додаткових резервів підвищення точності та достовірності первинних вимірювань кутових координат повітряного судна у широкому діапазоні співвідношень сигнал/шум;
- розробити уточнену математичну модель процесу, який описує динаміку зміни у часі кутових координат повітряного судна при виконанні ним посадкового маневру;
- запропонувати варіанти практичної реалізації оптимального фільтра Калмана підвищеної швидкодії та спрощеної структури, а також оцінити їх ефективність за критерієм «точність – об'єм обчислювальних ресурсів»

# ПРИНЦИП ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ КООРДИНАТ ПОВІТРЯНОГО СУДНА

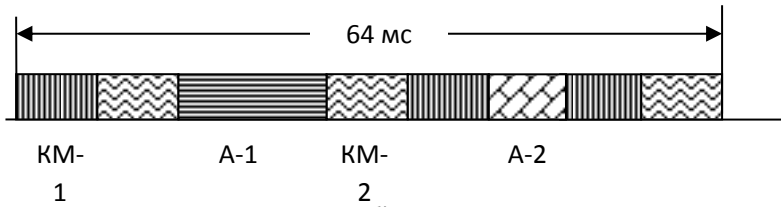


- 1- азимутальна антена; 2 - осьова лінія ЗПС; 3 - сканування «туди»;
- 4 - сканування «назад»;
- 5- сигнальні імпульси;
- 6- поріг вимірювання -3дБ;
- 7 - час, мс;
- 8 – початок сканування «туди»;
- 9 - кутове положення повітряного судна пропорційне результату вимірювання часової різниці  $T1 - T2$  ;
- 10 - кінець сканування «назад».

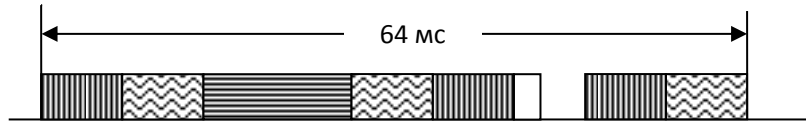
# ФОРМАТ РАДІОСИГНАЛУ ПОСАДКОВОЇ СИСТЕМИ САНТИМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ



а)



б)

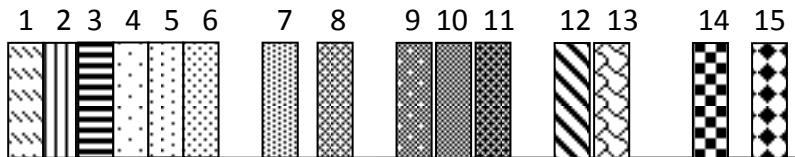


в)

а) повний цикл роботи системи;

б) послідовність кутових функцій у підциклі П1:  
 КМ-1- вимірювання кута місця при зниженні;  
 КМ-2 - вимірювання кута місця при вирівнюванні;  
 А-1 – вимірювання азимуту при заході на посадку;  
 А-2- вимірювання азимуту при відході на друге коло;

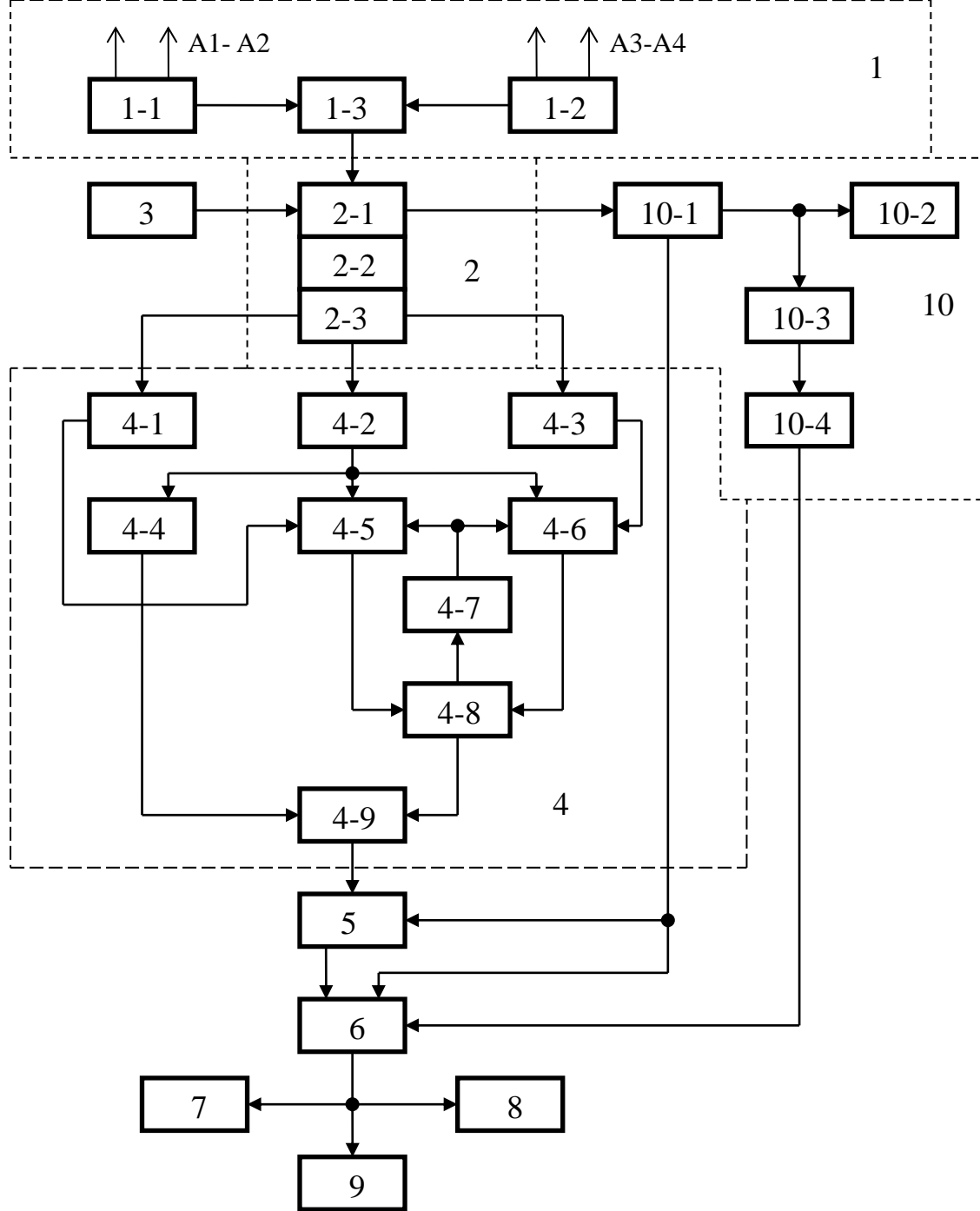
в) послідовність кутових функцій у підциклі П2:  
 (співпадаючі операції підциклів П1 та П2 однаково заштриховані); ДІ- додаткова інформація.



Послідовність інформаційних імпульсів у форматі радіосигналу окремої кутової функції:

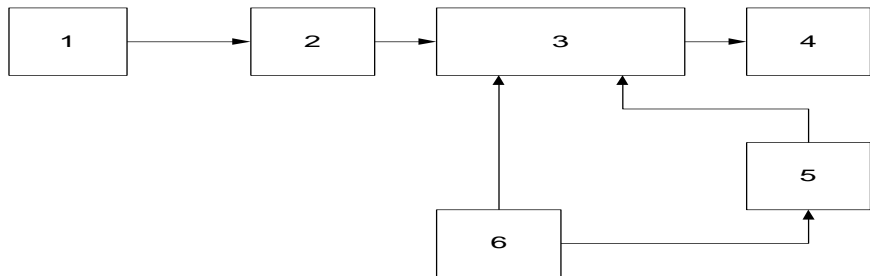
1 – не модульований, попередній сигнал для ФАПЧ;  
 2 - код Баркера; 3 - код упізнавання кутової функції;  
 4 - вибір масштабу по азимуту; 5 - сигнал вибору антени; 6 - мінімальний кут нахилу глісади; 7- летіти «правіше»; 8- летіти «лівіше»; 9, 10, 11 - сигнали пригнічення бокових пелюсток: задній, лівий, правий, відповідно; 12 - контрольний сигнал «туди»; 13 - кутовий сигнальний імпульс «туди»; 14 - кутовий сигнальний імпульс «назад»; 15 - контрольний сигнал «назад».

# СТРУКТУРА БОРТОВОГО КУТОМІРНОГО КАНАЛУ



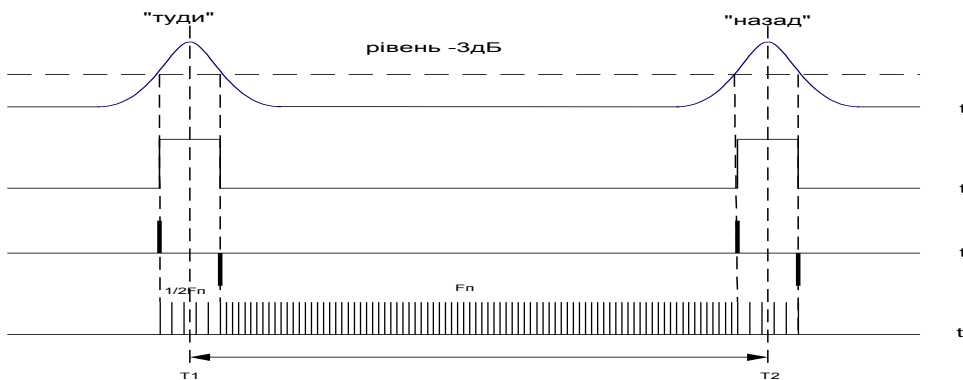
1- блок антенних пристроїв: A1-A4 - бортові антени; 1-1, 1-2 - пристрої попереднього перетворення та підсилення; 1-3 - схема вибору антени; 2 - радіоприймальний блок: 2-1 - лінійна частина радіоприймача; 2-2 - логарифмічний підсилювач проміжної частоти; 2-3 - детектор; 3 - пульт керування; 4 - цифровий блок виділення кутової інформації: 4-1, 4-3 - пристрої диференціювання; 4-2 - АЦП; 4-4 - формувач опорного сигналу; 4-5, 4-6 - пікові детектори; 4-7 - генератор строб-імпульсів; 4-8 - пристрій об'єднання сигналів; 4-9 - компаратор; 5 - блок цифрової обробки кутової інформації; 6 - інтерфейс; 7 - САУ; 8 - блок індикаторів; 9 - ПНК; 10 - блок виділення даних: 10-1 - дешифратор преамбули; 10-2 - схема контролю основних даних; 10-3 - схема контролю допоміжних даних; 10-4 - декодер.

# ВАРІАНТИ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ ВИМІРЮВАЧІВ КУТОВИХ КООРДИНАТ НА БОРТУ ПС

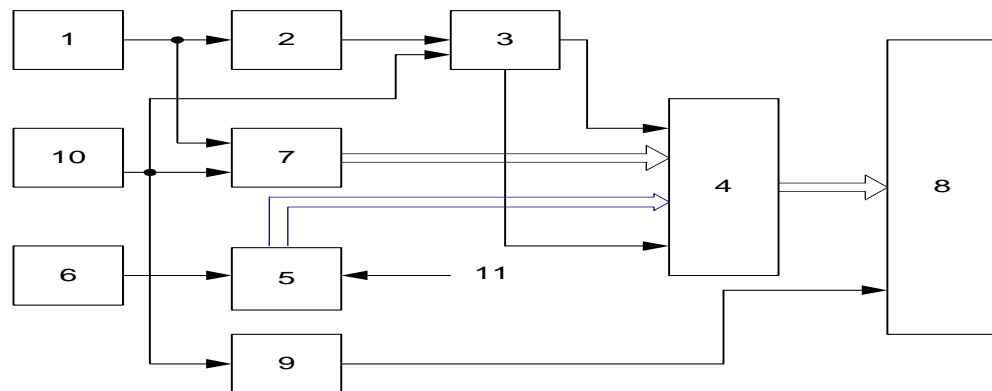


Функціональна схема цифрового вимірювача кутових координат [23]:

1 – контрольний виявлювач кутових сигналів « туди – назад »; 2 – порогова схема; 3 – комутатор частоти; 4 – реверсивний лічильник; 5 – подільник частоти на 2; 6 – генератор масштабних імпульсів.

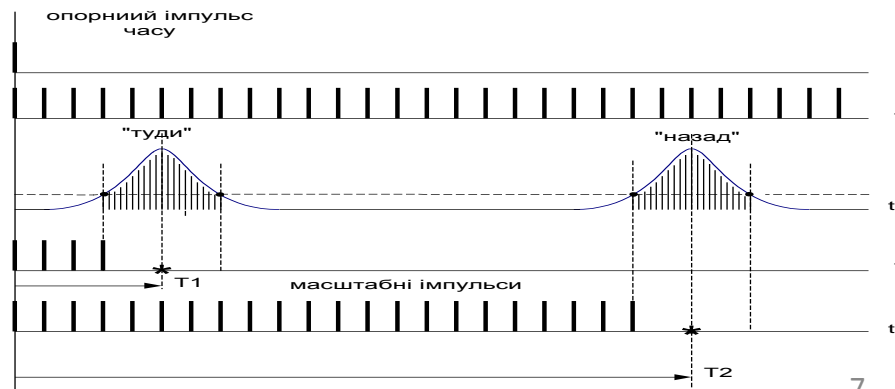


Часові діаграми роботи цифрових вимірювачів кутових координат



Функціональна схема вимірювача кутових координат з використанням каналу прямого доступу до оперативної пам'яті мікро-ЕОМ [ 24 ]:

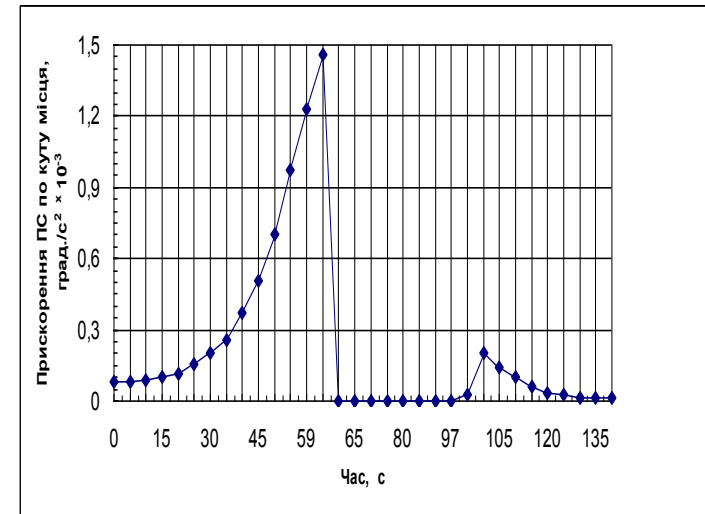
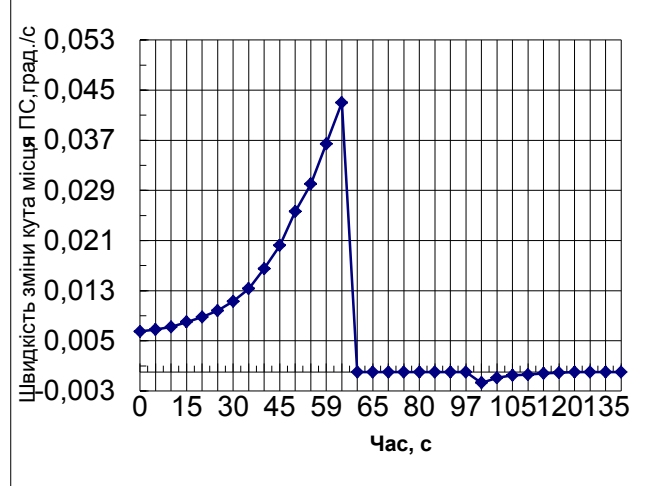
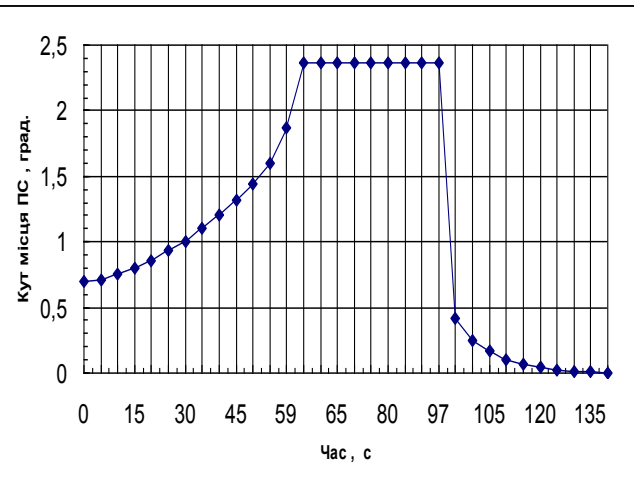
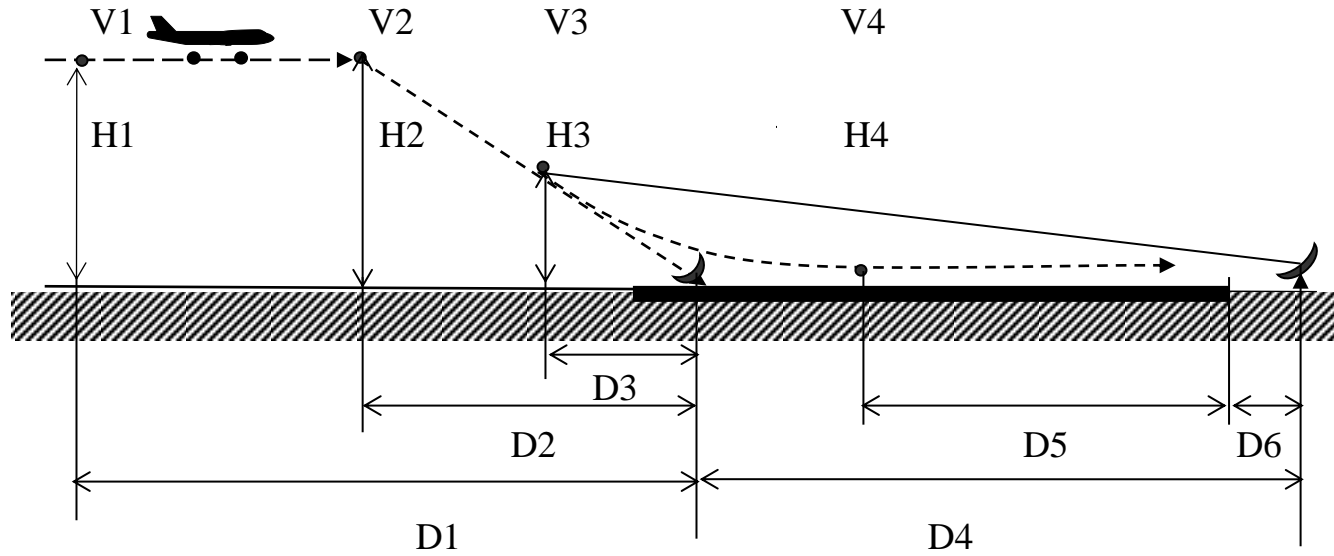
1 – контрольний виявлювач імпульсів « туди-назад »; 2 – порогова схема; 3 – пристрій керування обміном; 4 – комутатор зовнішніх пристроїв; 5 – лічильник числа масштабних імпульсів; 6 – генератор масштабних імпульсів; 7 – аналого-цифровий перетворювач; 8 – мікро-ЕОМ ;9 – лічильник адрес; 10 – генератор тактових імпульсів; 11– сигнал опорного часу.





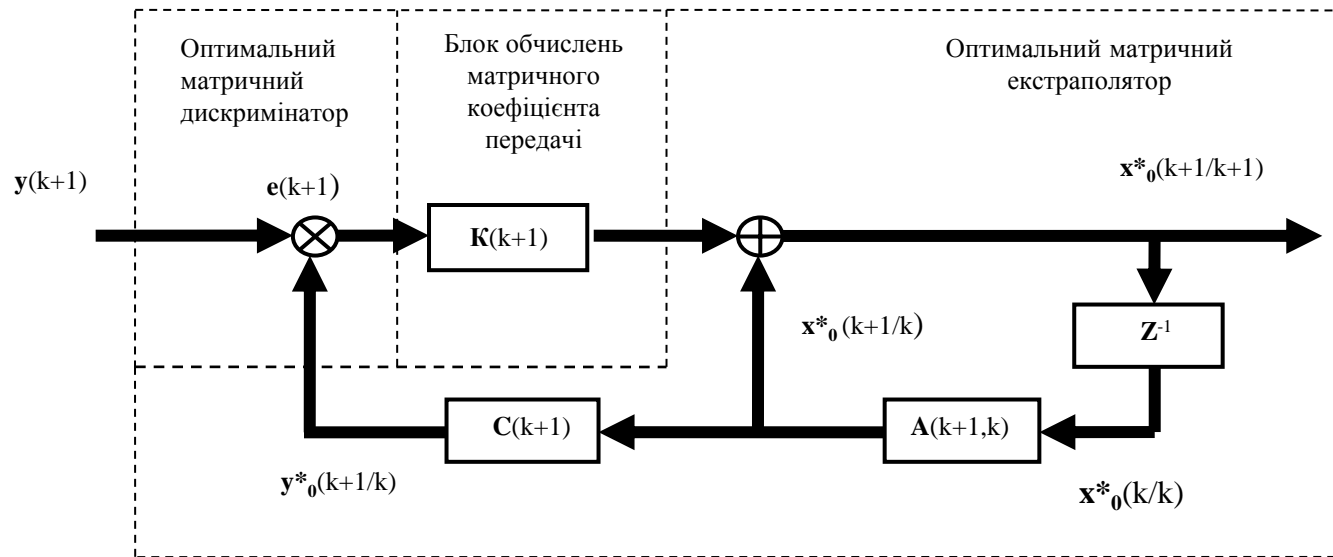


# РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ КУТА МІСЦЯ ПС ПРИ ЗАХОДІ НА ПОСАДКУ



ДИНАМІКА ПАРАМЕТРІВ ТРАЄКТОРІЇ

# СТРУКТУРА ОПТИМАЛЬНОГО ФІЛЬТРА



$$\mathbf{x}_0^*(k+1/k+1) = \mathbf{A}(k+1,k) \mathbf{x}_0^*(k/k) + \mathbf{K}(k+1) [\mathbf{y}(k+1) - \mathbf{C}(k+1) \mathbf{A}(k+1,k) \mathbf{x}_0^*(k/k)]; \quad (2.8)$$

$$\mathbf{P}(k+1/k) = \mathbf{A}(k+1,k) \mathbf{P}(k/k) \mathbf{A}^T(k+1) + \mathbf{B}(k+1) \mathbf{Q}(k) \mathbf{B}^T(k+1), \quad (2.9)$$

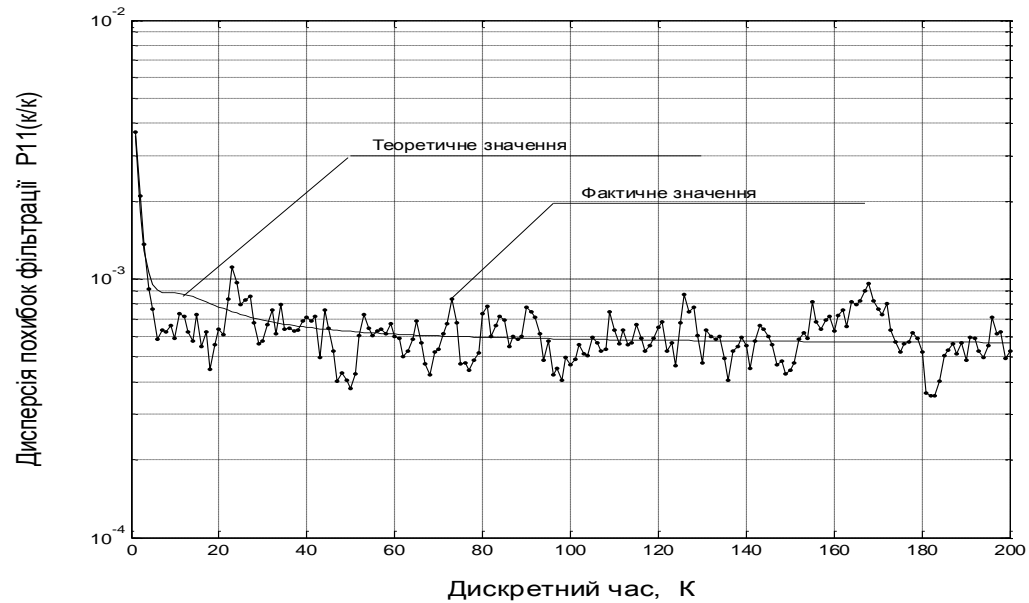
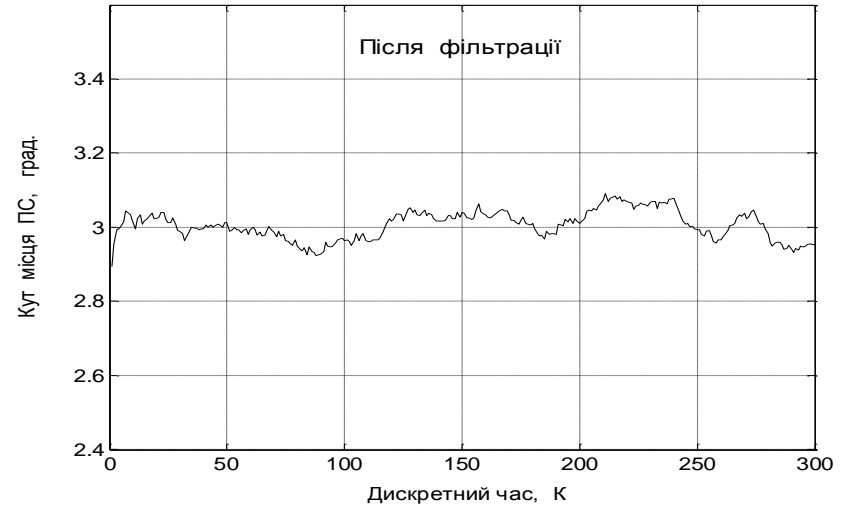
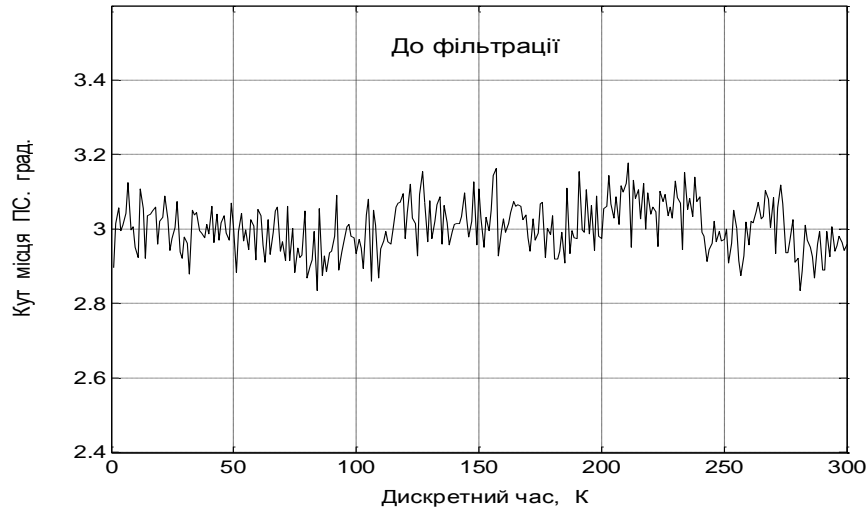
$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1/k) \mathbf{C}^T(k+1) [\mathbf{C}(k+1) \mathbf{P}(k+1/k) \mathbf{C}^T(k+1) + \mathbf{R}(k+1)]^{-1}; \quad (2.10)$$

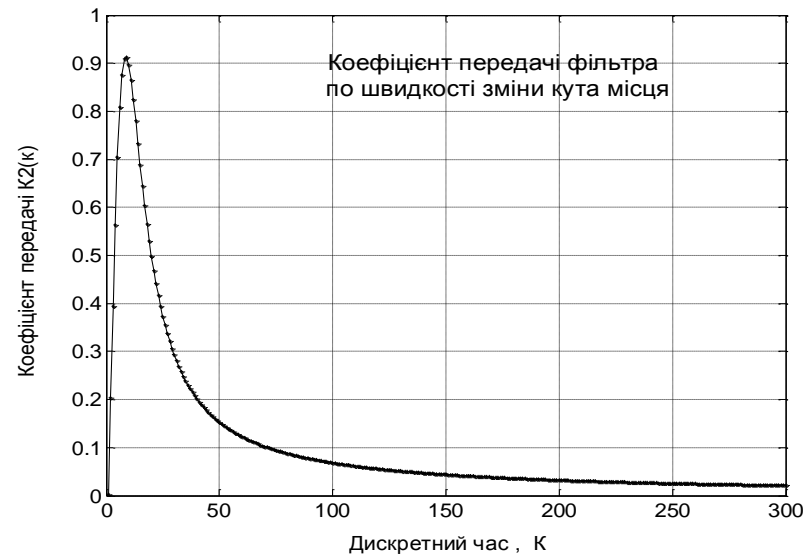
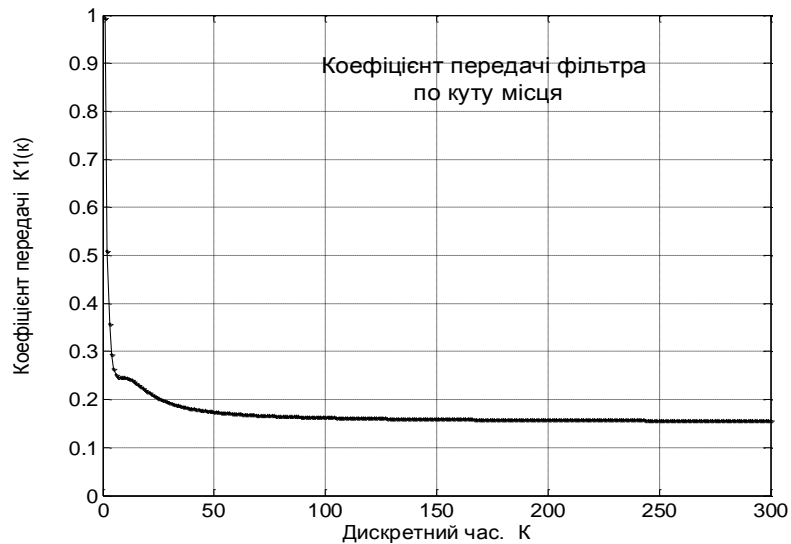
$$\mathbf{P}(k+1/k+1) = \mathbf{Cov} \{ \mathbf{x}(k+1) / Y_1^{k+1} \} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1) \mathbf{C}(k+1)] \mathbf{P}(k+1/k); \quad (2.11)$$

$$\mathbf{x}(0) = \begin{bmatrix} 3.0 \\ 0.01 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x}^*(0/0) = \begin{bmatrix} 2.5 \\ 0.006 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R}(k+1) = 0.0036; \quad \mathbf{Q}(k) = 0.0001; \quad ;$$

$$\mathbf{P}(0/0) = \begin{bmatrix} 0.625 & 0.0 \\ 0.0 & 0.06 \end{bmatrix}; \quad N_1 = 50; \quad T = 0.0247.$$

# РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ЗА МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО



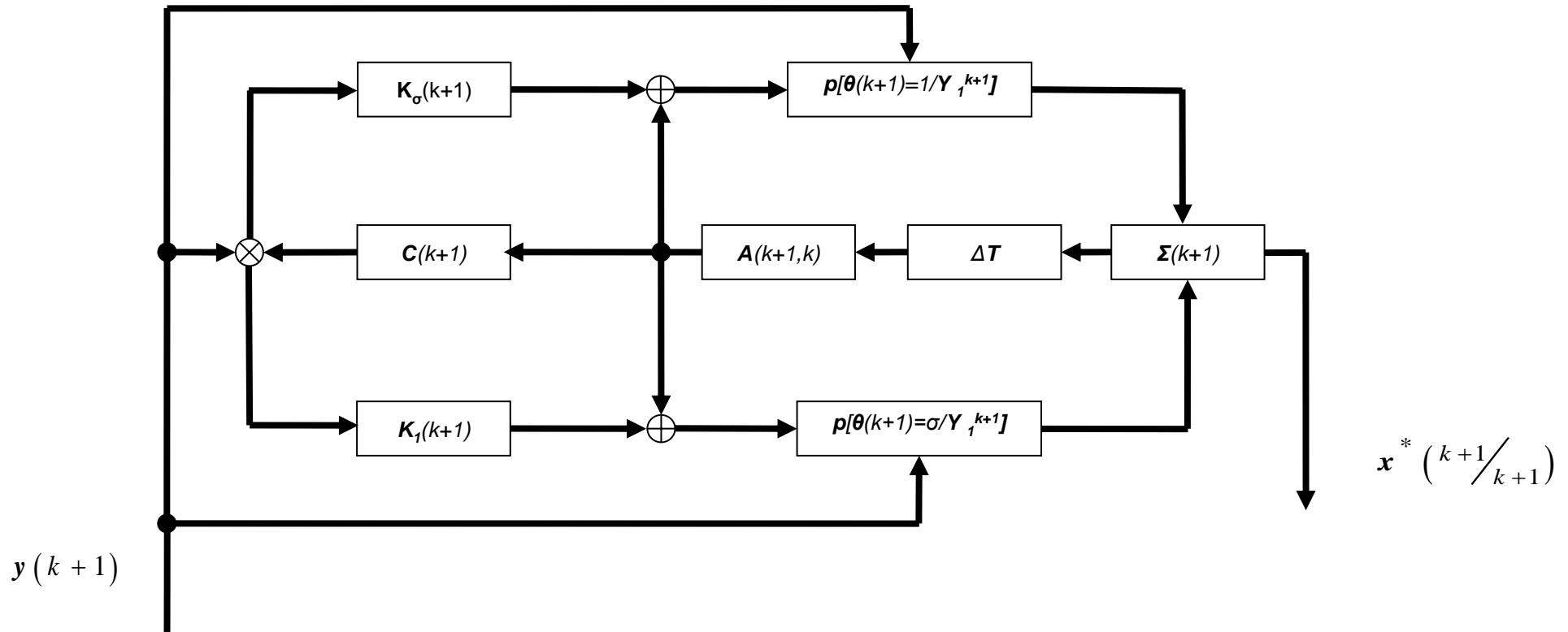


Варіанти реалізації	Змінні	Число операцій множення $M(n,m)$	Число операцій додавання $S(n,m)$	Номера формул
Перший	$x^*_0(k+1/k)$	$n^2$	$n^2 - n$	(2.14)
	$P(k+1/k)$	$2n^3$	$2n^3 - n^2$	(2.17)
	$K(k+1)$	$n^2m + 2nm^2 + m^3$	$n^2m + 2nm^2 + m^3 - 2nm$	(2.16)
	$x^*_0(k+1/k+1)$	$2nm$	$2nm$	(2.15)
	$P(k+1/k+1)$		$n^3 + n^2m - n^2$	(2.18)
	Загалом:	$3n^3 + 2n^2m + 2nm^2 + m^3 + n^2 + 2nm$	$3n^3 + 2n^2m + 2nm^2 + m^3 - n^2 - n$	
Четвертий	$x^*_0(k+1/k)$	$n^2$	$n^2 - n$	(2.27)
	$x^*_0(k+1/k+1)$	$2nm$	$2nm$	(2.28)
	Загалом:	$n^2 + 2nm$	$n^2 + 2nm - n$	

Результати аналізу  
необхідних  
обчислювальних ресурсів

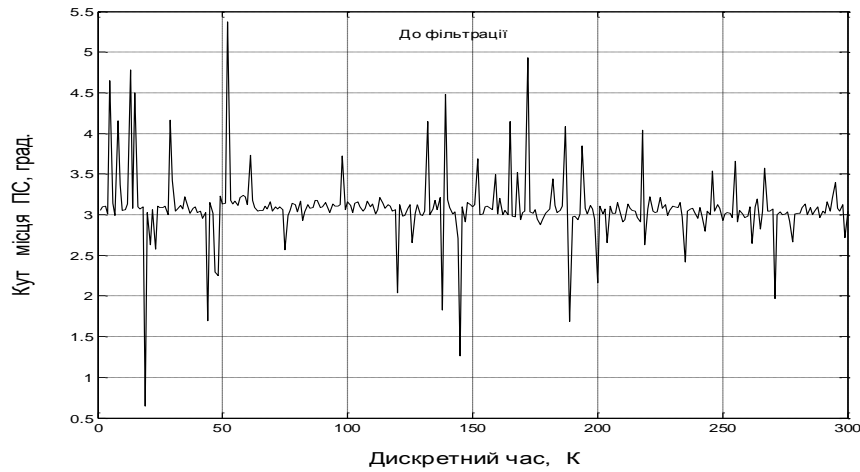
# РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ АЛГОРИТМІВ ФІЛЬТРАЦІЇ КУТОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗА НАЯВНОСТІ АНОМАЛЬНИХ ПОХИБОК

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}(k+1, k) \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k+1, k) \mathbf{w}(k) ; \\ \mathbf{y}(k+1) &= \mathbf{C}(k+1) \mathbf{x}(k+1) + \boldsymbol{\theta}(k+1) \mathbf{n}(k+1) \end{aligned}$$

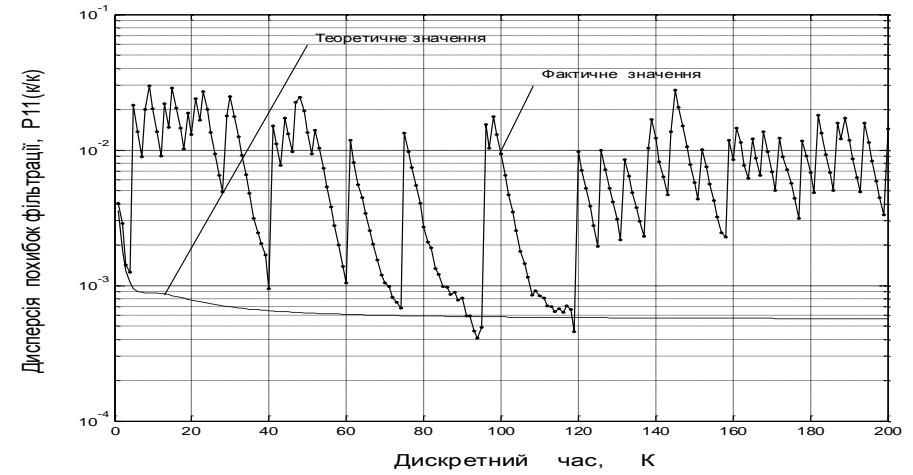


Математична модель та структура оптимального фільтра, інваріантного до статистично незалежних порушень працездатності радіовимірювального тракту

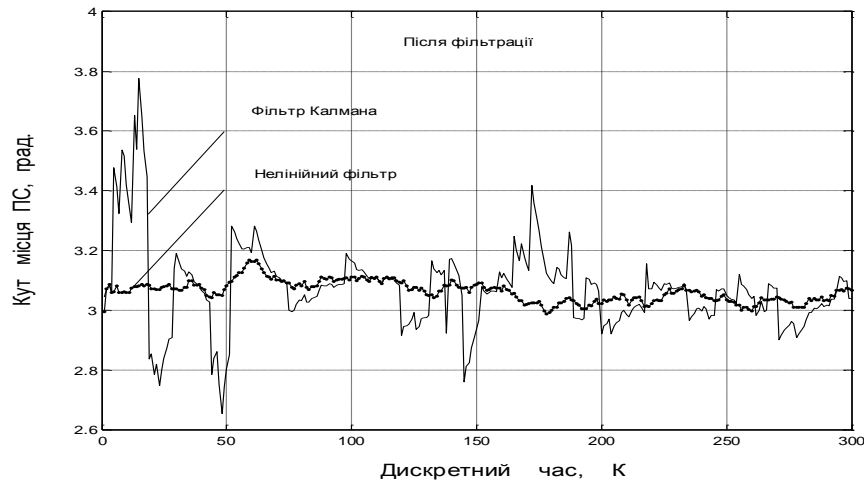
# ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ФІЛЬТРА СТІЙКОГО ДО НЕСПРАВНОСТЕЙ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО ТРАКТУ



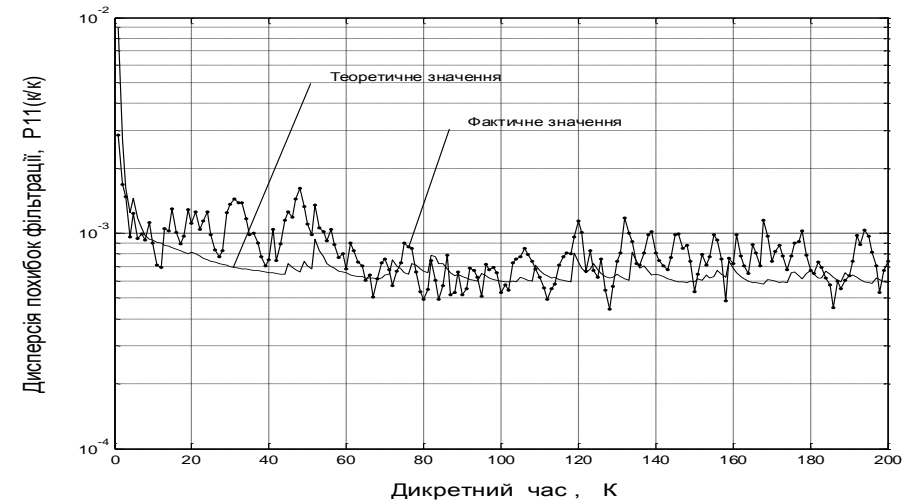
а) до фільтрації



в) дисперсія похибок класичного фільтра Калмана

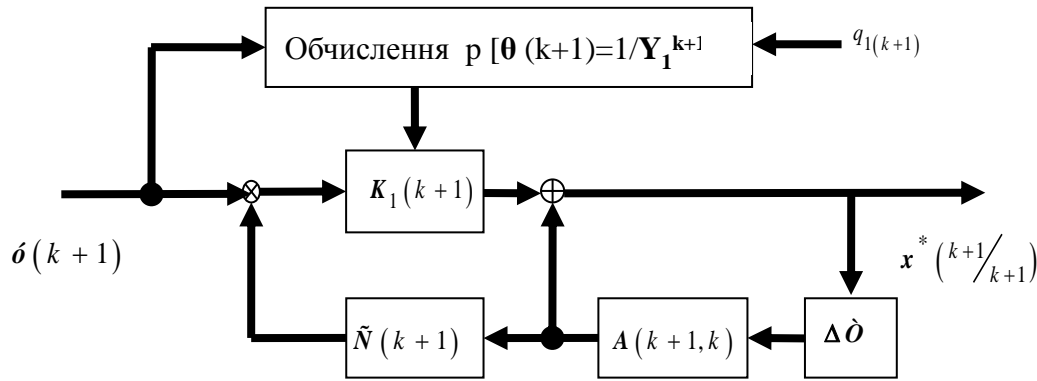


б) після фільтрації

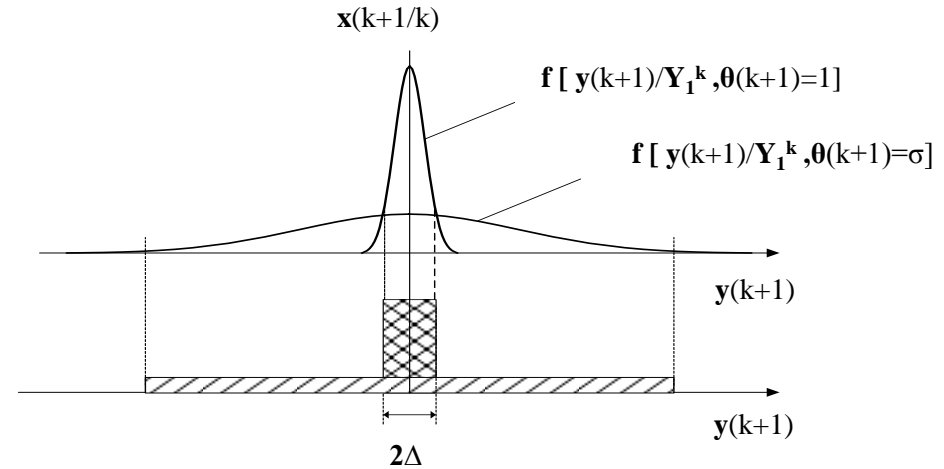


г) дисперсія похибок фільтра, стійкого до несправностей

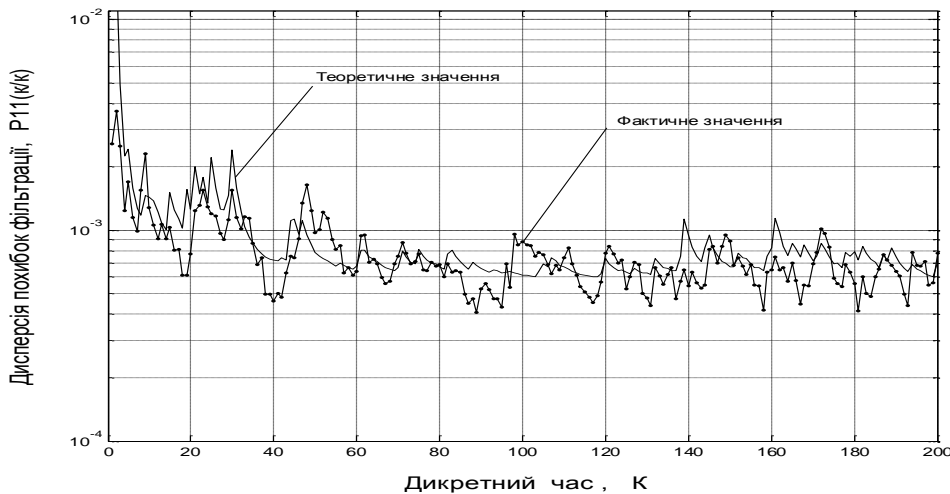
# СТРУКТУРА ТА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ КВАЗІОПТИМАЛЬНИХ ФІЛЬТРІВ СТІЙКИХ ДО НЕСПРАВНОСТЕЙ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО ТРАКТУ



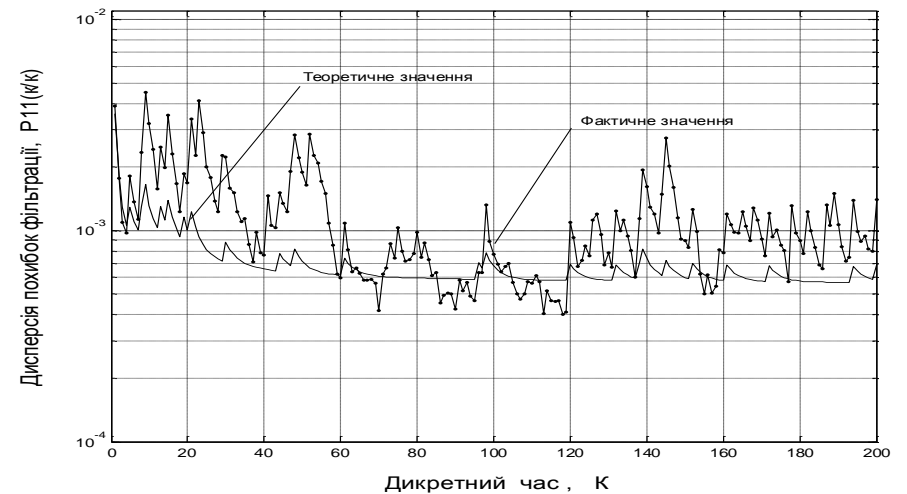
а) структура квазіоптимального фільтра з ймовірністним механізмом редагування



в) схема спрощення механізму редагування вхідних даних



б) дисперсія похибок схеми фільтрації з ймовірністним механізмом редагування вхідних даних



б) дисперсія похибок схеми фільтрації зі спрощеним механізмом редагування вхідних даних

# ВИСНОВКИ

1. На основі результатів виконаних досліджень можна стверджувати, що використання надмірності апаратних та програмних засобів разом з надзвичайно високою тактовою частотою сучасних мікропроцесорних пристроїв є перспективним напрямком підвищення точності, контролю достовірності та цілісності посадкових даних у процесі їх спеціальної обробки на шляху побудови високонадійної радіотехнічної системи посадки сантиметрового діапазону на перспективу після 2000 року.
2. Успішний розвиток цього напрямку нерозривно пов'язаний з розробкою методів дискретної фільтрації за умови жорстких конструктивних, експлуатаційних, економічних та інших обмежень характерних для сучасної бортової навігаційної апаратури. Загально визнаним методом вирішення таких проблем є використання фільтрів зі змінними параметрами – фільтрів Калмана.
3. Ефективне використання методів оптимальної фільтрації передбачає повноту апріорної інформації про стан кутомірного каналу, статистичних характеристик діючих збурень та математичну модель динаміки зміни у часі кутових координат ПС у процесі виконання посадкового маневру.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у наступному:

1. Оцінена потенційна точність кутомірного каналу у широкому діапазоні співвідношень сигнал / шум.
2. Проаналізована структура бортового радіовимірювального тракту кутових координат ПС, підвищена точність якого забезпечується за рахунок використання мікро - ЕОМ з каналом прямого доступу до оперативної пам'яті та більш складного методу фіксації характерної точки кутового сигнального радіоімпульсу.



3. Удосконалена математична модель динамічного процесу зміни кута місця ПС у часі, яка на відміну від відомих результатів [34]–[35] враховує не тільки тактико-технічні характеристики ПС, а також особливості режиму польоту на окремих ділянках посадочної траєкторії
4. З метою підвищення швидкодії процесу фільтрації та спрощення його структури запропоновано чотири варіанти технічної реалізації оптимального фільтра Калмана. За результатами порівняльного аналізу визначено два найкращих варіанти. Дана оцінка їх точності та обчислювальної ефективності
5. Достовірність результатів аналізу підтверджена результатами статистичного моделювання за методом Монте-Карло.
6. У розділі охорони праці розглянуті такі аспекти:
  - аналіз небезпечних та шкідливих чинників у виробничому приміщенні;
  - складена карта умов праці та перелік заходів, що сприяють їх покращенню;
  - здійснено розрахунок загального рівномірного штучного освітлення виробничого приміщення;
  - враховано регламентовані протипожежні норми.

ДОПОВІДЬ ЗАКІНЧЕНО!

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!