

## **МЕТОДИ ПОБУДОВИ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ ПЕЛЕНГАТОРІВ ТА ОЦІНКА ЇХ ТОЧНОСТІ**

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

Виконав:

студент 2-го курсу, групи РТ – 17м з/в

Сидоренко В . В.

Керівник: к.т.н., доцент каф. РТ

Воловик А. Ю.

**Об'єктом дослідження** є процеси перетворення електромагнітних сигналів у кутомірних каналах радіонавігаційних пристроїв та систем різноманітної геометричної конфігурації та апріорної інформації щодо стану навколишнього середовища.

**Предметом дослідження** є аналіз точності та достовірності оцінок місцеположення повітряного судна, отриманих методами обробки прийнятих електромагнітних сигналів у кутомірних каналах радіонавігаційних систем різноманітної геометричної конфігурації та апріорної інформації щодо стану навколишнього середовища.

**Мета роботи** полягає у пошуку таких геометричних конфігурацій радіонавігаційних систем та методів обробки прийнятих електромагнітних сигналів, які здатні забезпечити, максимально можливу або прийнятну з практичної точки зору, точність та достовірність оцінювання місцеположення повітряного судна на основі апріорі заданої інформації щодо стану навколишнього середовища.2

**Задачі дослідження.** Заявлена мета магістерської кваліфікаційної роботи може бути досягнутою у результаті розв'язання низки задач, виконаних у такій послідовності:

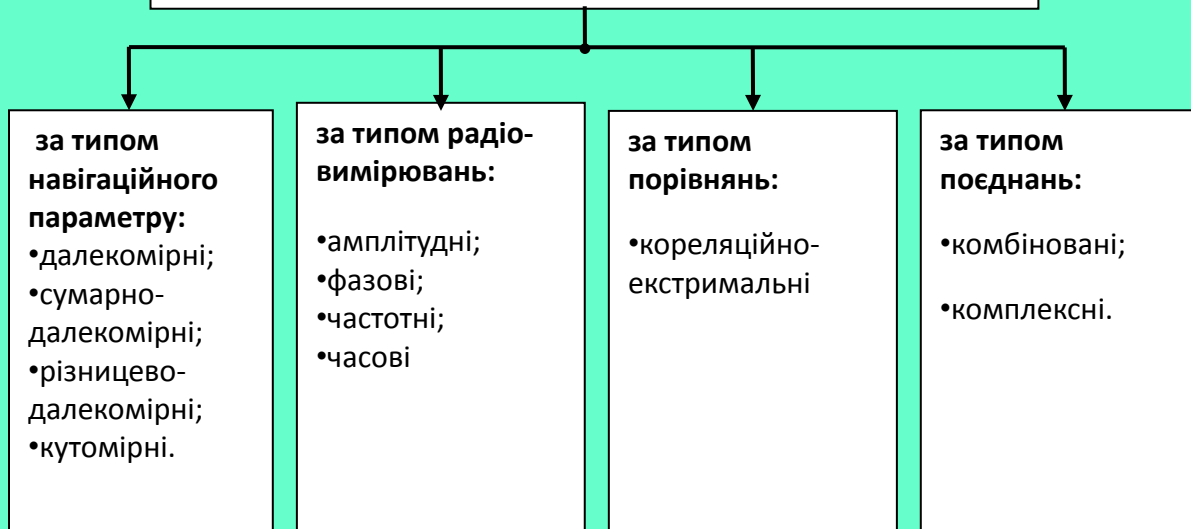
- відповідно до технічного завдання обґрунтувати вибір координатної системи та базового навігаційного елементу серед відомих варіантів;
- виконати порівняльний аналіз точності методів визначення місцеположення повітряного судна за результатами радіонавігаційних вимірювань;
- оцінити потенційну точність базових методів побудови кутомірних радіонавігаційних пристроїв та систем за умови прийому, як сильних так і слабких сигналів;
- для радіонавігаційних пеленгаторів, побудованих за принципом мінімуму глибини модуляції, як найбільш важливих та поширених у сучасній авіації, методом змінних стану виконати уточнені дослідження точності в перехідному та усталеному режимах, а мотивом для виконання таких досліджень може слугувати той факт, що на сьогоднішній день, практично неможливо, знайти повітряне судно, яке б не було укомплектовано пристроєм приводу (радіокомпасом) до місця його посадки.

**Методи дослідження:** для аналізу точності визначення місцеположення повітряного судна як функції від вимірюваного навігаційного елементу використовувались методи аналітичної геометрії; оцінка потенційної точності базових методів побудови радіонавігаційних систем в усталеному режимі роботи виконувалась методом перетворень Лапласа, а точність у перехідних режимах досліджувалась методом простору станів; для визначення середньоквадратичних похибок при прийомі слабких та сильних сигналів застосовувались елементи лінійної та нелінійної оптимізації, засновані на розвиненнях у функціональні ряди.

## Класифікація технічних засобів навігації



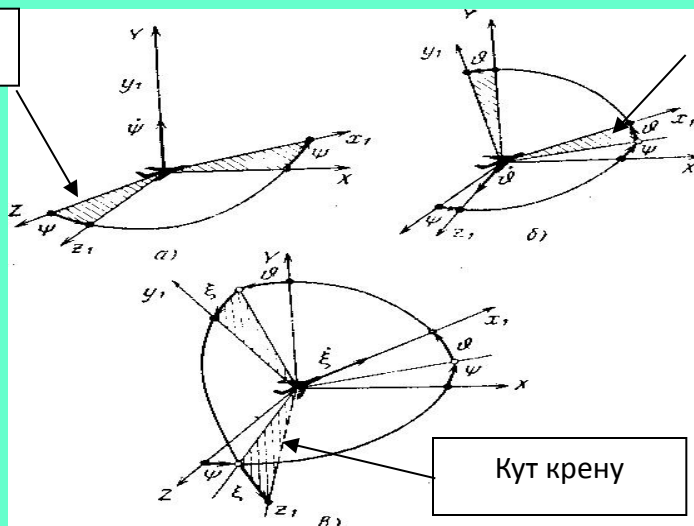
## Класифікація радіотехнічних засобів навігації



# Функціональні зв'язки між горизонтальною та зв'язаною з повітряним судном місцевими координатними системами у декартовій формі

Кут курсу

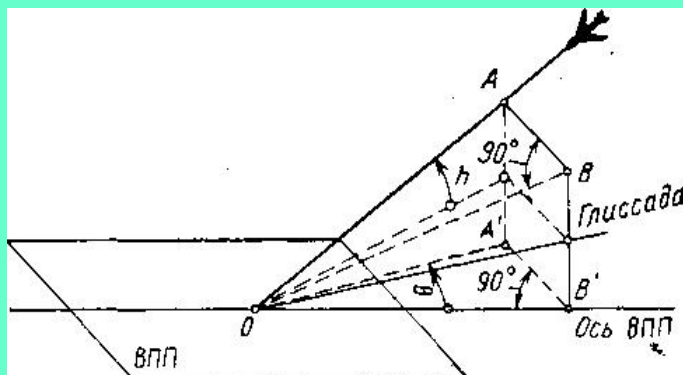
**Горизонтальна Координатна система:**  
початок відліку – у центрі маси;  
основна площина  $ZOX$  – горизонтальна і перпендикулярна до місцевої вертикалі  $OY$



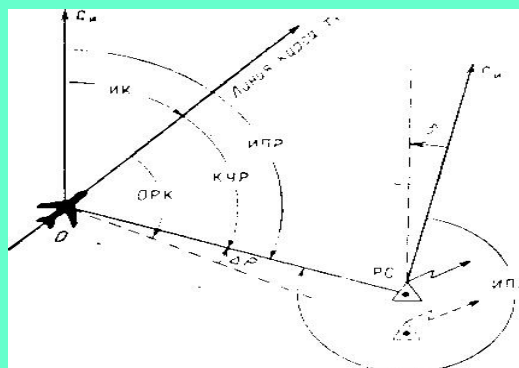
Кут тангажу

**Зв'язана з ПС координатна система**  
утворюється будівельними осями ПС:  
початок відліку – у центрі маси;  
 $OX_1$  – поздовжня вісь,  
 $OZ_1$  – поперечна вісь  
 $OY_1$  – вісь, нормальна до площини  $OX_1Z_1$ .

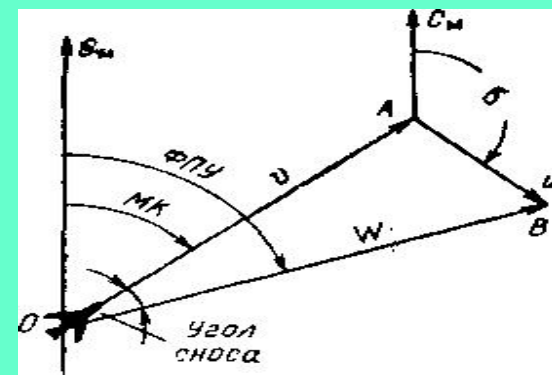
Кут крену



а)

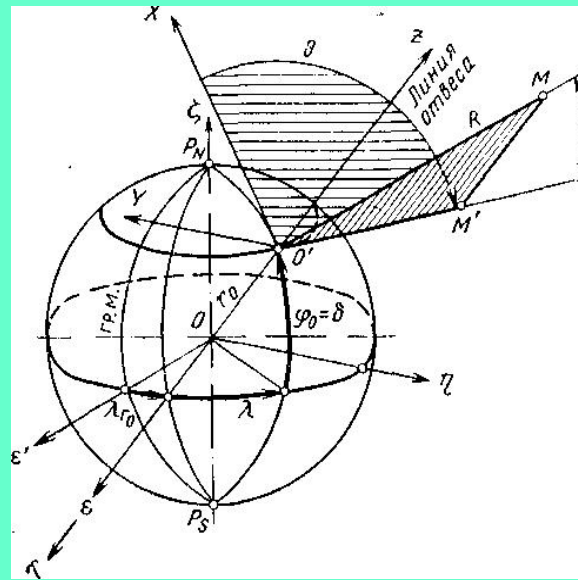
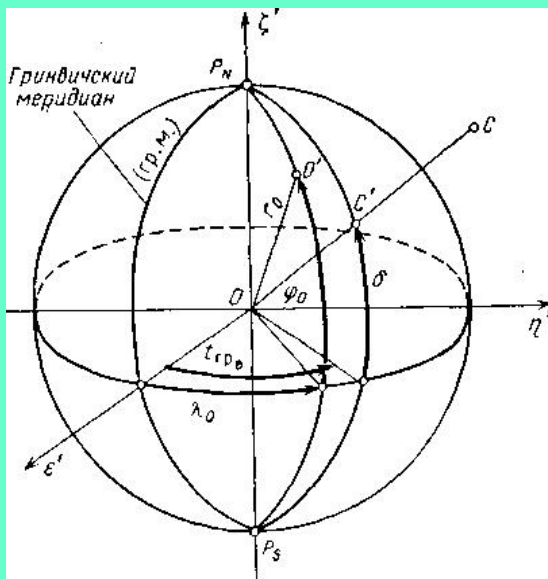


б)



в)

- Модифіковані варіанти місцевих координатних систем:
- а) схема розташування ПС щодо осі злітно-посадкової смуги;
  - б) визначення азимуту ПС на площині;
  - в) схема розташування ПС у навігаційному трикутник



Приклади інших координатних систем:

- а) геоцентричні системи сферичних і прямокутних координат;
- б) горизонтальні системи сферичних і прямокутних координат з центром у точці ПС та інерційна екваторіальна система прямокутних координат з початком у центрі Землі

## Методи визначення місцеположення ПС за результатами радіонавігаційних вимірювань та аналіз їх точності

Основні тези:

Точність обчислення координат ПС у просторі залежить від похибок визначення ліній або поверхонь положення, які у свою чергу обумовлені похибками вимірювань радіонавігаційних параметрів.

Похибка визначення поверхонь(ліній) положення прийнято оцінювати відстанню по нормалі між двома поверхнями(лініями), що відповідають дійсному і виміряному значенню.

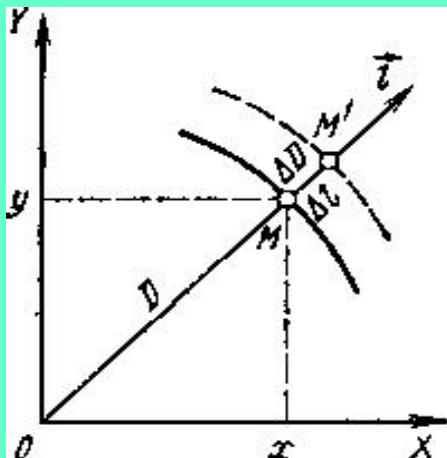
Рівняння навігаційного параметру являє собою скалярне поле координат  $p=(x, y, z)$ . Зміну цього поля зручно описувати за допомогою поняття градієнту поля.

Уведення поняття градієнту дає змогу зв'язати похибку вимірювань навігаційного параметру  $\Delta p$  з похибкою визначення поверхонь(ліній) положення  $\Delta l$  у вигляді

$$\Delta l = \frac{\Delta p}{|\text{grad } p|}; \quad |\text{grad } p| = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)^2}.$$

# Похибки визначення ліній положення для базових методів вимірювань навігаційних параметрів

## Далекомірний метод:

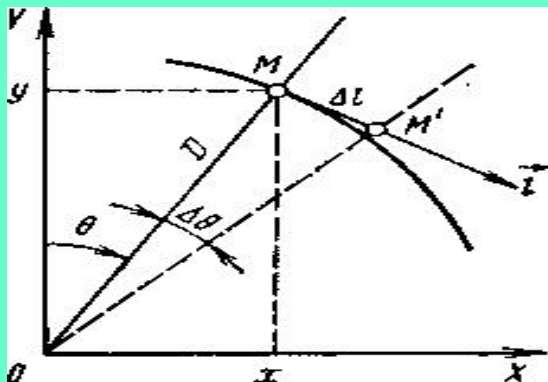


$$|\text{grad } D| = 1, \quad \Delta l = \Delta D, \quad \sigma_l = \sigma_D = \frac{c}{2} \sigma_\tau$$

де  $\sigma_D$  середньоквадратичне значення похибки вимірювання віддалі  $\Delta D$ ;  $\sigma_\tau$  середньоквадратичне значення похибки вимірювання запізнення сигналу;  $c$  – швидкість поширення радіохвиль.

Лінії положення далекомірної системи

## Кутомірний метод:



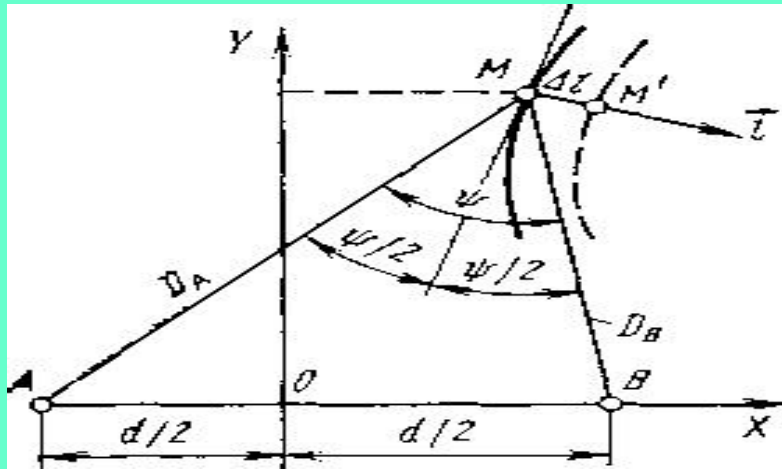
$$|\text{grad } \theta| = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{1}{D}; \quad \Delta l = D\theta, \quad \sigma_l = D\sigma_\theta$$

де  $\sigma_\theta$  середньоквадратичне значення похибки вимірювання кута  $\Delta\theta$ .

**Висновок:** величина похибки зростає пропорційно віддалі між ПС та радіонавігаційною точкою .

Лінії положення кутомірної системи

# Різницево-далекомірний метод



Лінії положення різницево-далекомірної системи

$$D_p = \sqrt{(x + d/2)^2 + y^2} - \sqrt{(x - d/2)^2 + y^2};$$

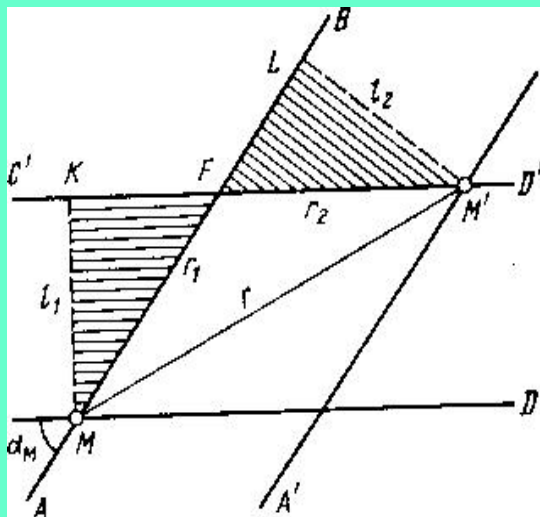
$$|\text{grad } D_p| = \sqrt{2(1 - \frac{x^2 + y^2 - d^2/4}{D_A D_B})} =$$

$$= \sqrt{2(1 - \frac{D_A^2 + D_B^2 - d^2}{2D_A D_B})};$$

$$\Delta l = \Delta D_p / 2 \sin(\psi/2); \quad \sigma_l = \sigma_{D_p} / 2 \sin(\Psi/2);$$

$$\sigma_l = c \sigma_\tau / 2 \sin(\Psi/2).$$

**Висновок:** величина середньоквадратичної похибки залежить від похибок вимірювання часу запізнення та кута, під яким видна база системи.



$$r = \frac{\sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \alpha_M}}{\sin \alpha_M}$$

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sigma_{l_1}^2 + \sigma_{l_2}^2 + 2\sigma_{l_1} \sigma_{l_2} \rho \cos \alpha_M}}{\sin \alpha_M}$$

## Висновки:

1. Середньоквадратичне значення радіальної похибки визначення місцеположення ПС залежить від дисперсій похибок виміру ліній положення АВ і CD і кута, під яким перетинаються ці лінії, а також від взаємкореляційної функції.

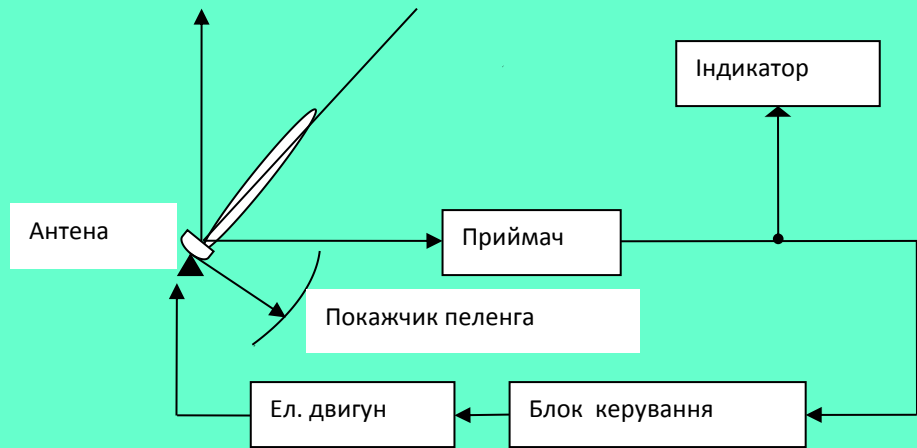
2. Максимальна точність буде тоді, коли лінії положення перетинаються під кутом у 90°.

Похибки визначення місцеположення ПС позиційним методом

# МЕТОДИ ТА ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ КУТОМІРНИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ

## Радіопеленгатори, що працюють за принципом максимуму прийнятого сигналу

### Робота радіопеленгатора у режимі стеження:



### Принцип роботи:

Радіопеленгатор має спрямовану антену, приймач та систему стеження, що забезпечує поворот антени навколо вертикальної осі до збігу максимуму діаграми спрямованості з напрямком на випромінювач. Кут повороту антени щодо обраного за початок відліку напрямку відзначається показчиком

### Структура радіопеленгатора, що працює за максимумом сигналу

### Характеристики точності:

з модуляцією та квадратичним детектором:  $\sigma_{\theta} = \sqrt{\frac{2}{q_{max} F''(0)}} \sqrt{\frac{2\Delta F}{\Delta f}}$  сильний сигнал

без модуляції  $\sigma_{\theta} = \frac{\sqrt{2}}{q_{max} \sqrt{F''(0)}} \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}}$  слабкий сигнал

де  $q_{max}$  — максимальне відношення сигнал/шум на вході детектора ( $\theta = 0$ ),  
 $\Delta F$  — ефективна смуга пропускання підсилювача проміжної частоти;  
 $\Delta f$  — ефективна смуга пропускання фільтра низької частоти;  
 $F''(0)$  — друга похідна від функції діаграми спрямованості антени.

**Висновок:** При прийманні слабого сигналу квадратичний детектор пригнічує слабкий сигнал і середньоквадратична похибка визначення напрямку зростає





# Радіопеленгатори моно-імпульсного типу

**Загальна характеристика класу:** Для кутомірних пристроїв цього типу характерна присутність на вході двох сигналів. Антенна система має два виходи, а приймач – два канали підсилення, і таким чином, з'являється можливість визначення кутової координати на основі одного прийнятого імпульсу. У зв'язку з цим вони отримали назву моно-імпульсних. Сигнал похибки може отримуватись шляхом множення, поділом або відніманням амплітуд двох вихідних напруг.

## Радіопеленгатори з режимом множення амплітуд сигналів

### Принцип роботи:

1. Антенна система складається із двох рознесених антен, напруги з яких подаються на перетворювач «сума – різниця». У каналах суми і різниці основне посилення здійснюється на проміжній частоті. Для цього існує спільний гетеродин і змішувачі у обох каналах. Діаграма сумарного каналу складається з однієї пелюстки, а діаграма різниці – з двох з мінімумом при  $\theta = 0$ .
2. Напруги суми та різниці подаються на перемножувач (фазовий детектор), напруга постійного струму на виході якого буде

$$\bar{U}_{fd} = k_1 k_2 E^2 G_0 F_c(\theta) F_p(\theta) \cos(\varphi_{\Pi} + \varphi_0)$$

- де  $k_1, k_2$  – коефіцієнти підсилення каналів;  $\varphi_{\Pi}, \varphi_0$  – зсуви фаз у фазозсувній ланці та між напругами на виході перетворювача, відповідно.
3. Оскільки  $\varphi_0 = 90^\circ$ , то встановлюється ще зсув фази на  $90^\circ$ . Тоді сигнали на вході фазового детектора виявляються, або у фазі або у протифазі, а напруга постійного струму на виході максимальна. Полярність напруги на виході залежить від сторони відхилення радіостанції до напрямку перпендикуляра до бази, а величина її пропорційна величині цього відхилення.
  4. Напруга з виходу ФД подається на схему керування приводом антенної платформи, яка автоматично виставляється так, що напрямок на радіостанцію пеленгування збігається з перпендикуляром до бази пеленгатора. За положенням антенної платформи щодо напрямку на північ здійснюється відлік пеленгу

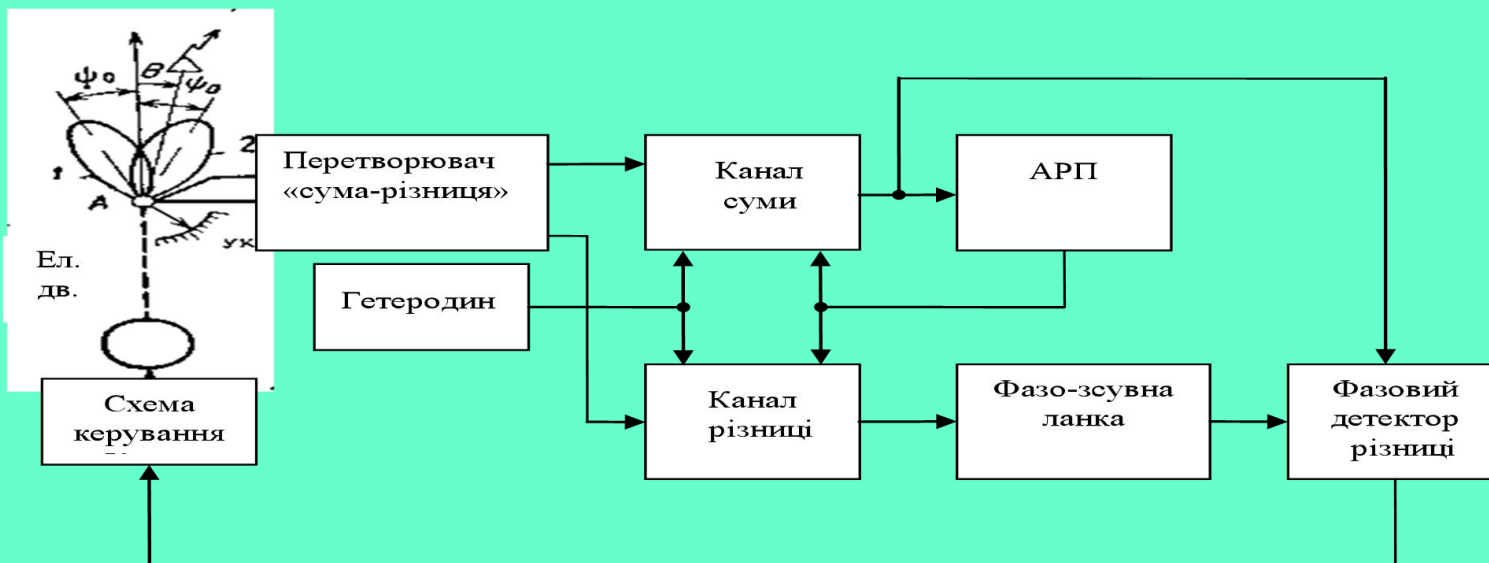
### Структура пеленгатора

#### Характеристика точності:

$$\sigma_{\theta} = \frac{\lambda}{q_{\max} \pi d \cos \theta} \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}}, \quad d - \text{база, } \lambda - \text{довжина хвилі.}$$

**Головна перевага:** Похибки пеленгування визначаються лише розміром бази і не залежать від форми діаграм спрямованості антен.

# Радіопеленгатори з режимом поділу амплітуд сигналів



Структура радіопеленгатора з поділом амплітуд напруг і автоматичним приводом антенної платформи

## Принцип роботи:

1. Радіопеленгатор заснований на використанні відношення амплітуд напруг двох антен, максимуми діаграми спрямованості яких зсунуті у просторі

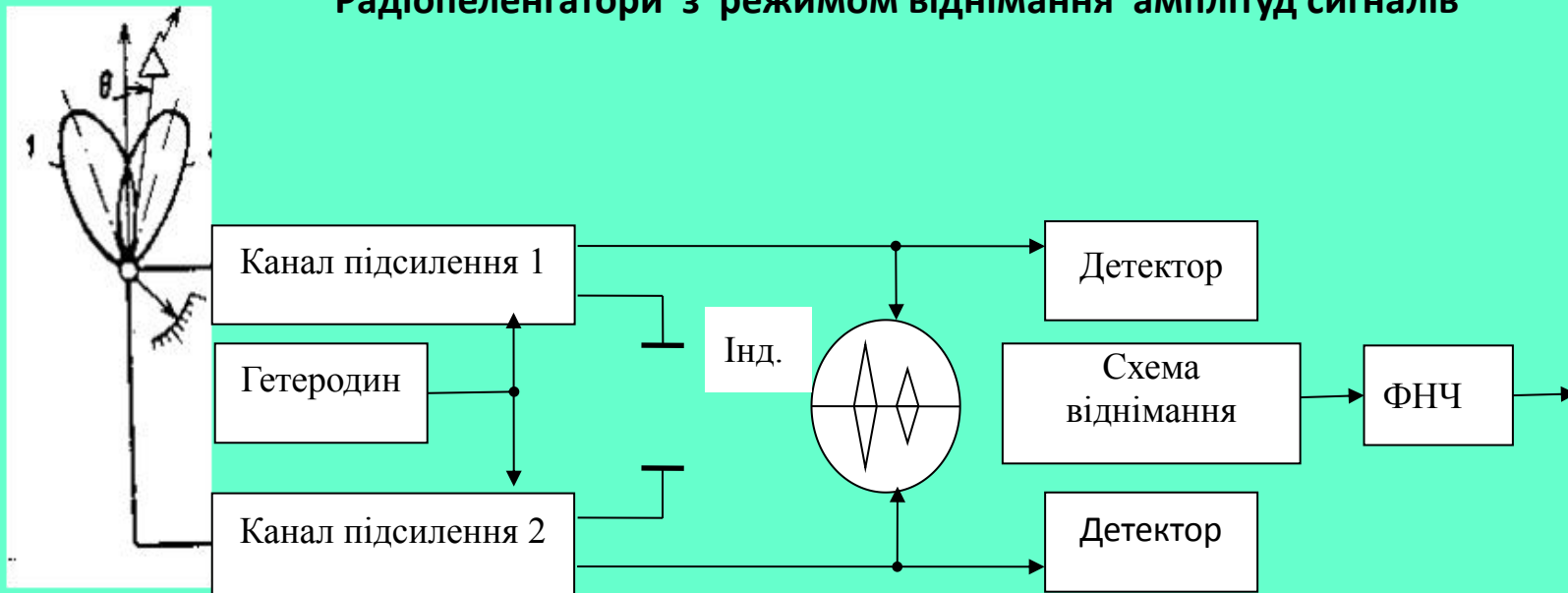
$$v = \frac{U_1}{U_2} = \frac{F(\theta + \psi_0; \gamma)}{F(\theta - \psi_0; \gamma)}$$

2. Операція поділу амплітуд напруг високої частоти здійснюється системою АРП (автоматичне регулювання підсилення) в одному з каналів, і яка діє на підсилювачі, що знаходяться у обох каналах

## Характеристика точності:

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2q_{\max} F'(\psi_0)} \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}}$$

## Радіопеленгатори з режимом віднімання амплітуд сигналів



Структурна схема радіопеленгатора з відніманням амплітуд

### Принцип роботи:

1. Вихідні напруги двох ідентичних каналів підсилення подаються вертикальні пластини індикаторного пристрою. На екрані індикатора спостерігаються дві вертикальні лінії, розміри яких пропорційні амплітудам напруг у антенах 1 і 2.
2. Оператор повертає антенну платформу за азимутом у до тих пір, поки лінії не стануть однаковими. При цьому рівно-сигнальний напрямок  $\theta = 0$  буде збігатися з напрямком на радіостанцію і азимут може бути визначеним за положенням антенної платформи.
3. Також порівняння сигналів може здійснюватися каскадом віднімання, на який надходять сигнали, перетворені у напруги постійного струму. Для цієї мети можна поставити у кожному каналі квадратичні детектори, виходи яких увімкнені на спільний загальний опір навантаження назустріч один одному. Далі напруга з опору навантаження подається на фільтр нижніх частот.

### Характеристика точності:

Пеленгування методом порівняння потужностей зручно виконувати при прийомі шумо-подібних сигналів. Наприклад при використанні параболічної антени середньоквадратичне значення похибки визначається

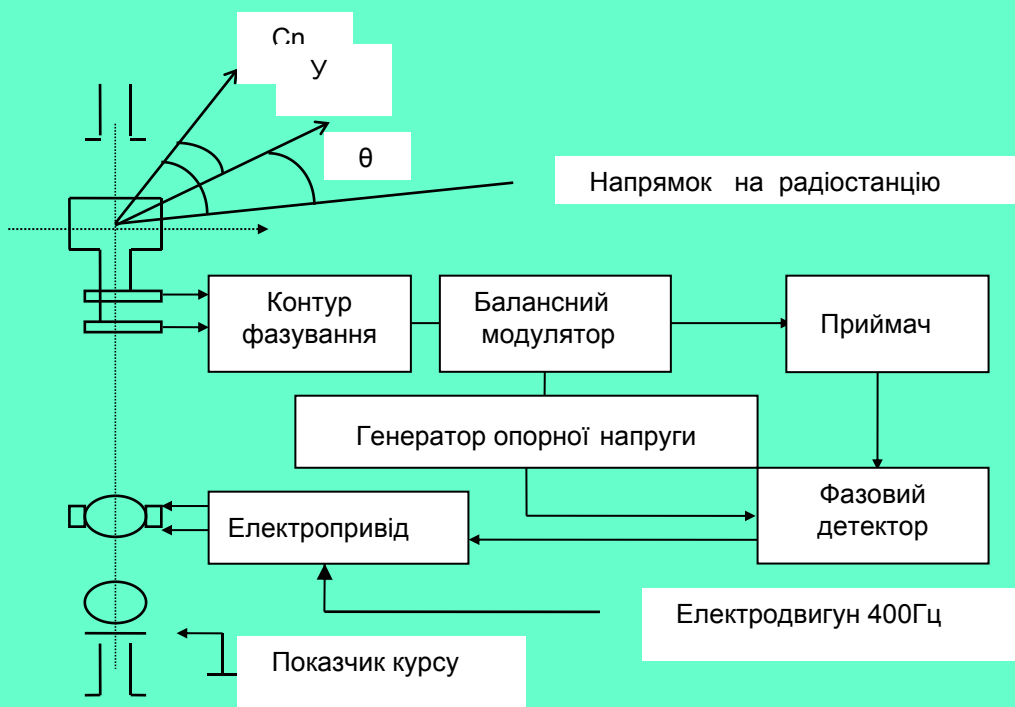
Формулою  $\sigma_{\theta} = \frac{2,25NT_0}{\Omega_{\text{ш}} T_{\text{ш}}} \left( \frac{\lambda}{D} \right)^3 \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}}$ , де  $N$  – спектральна густина потужності вхідного шуму;  $T_0$  – температура

за Кельвіном;  $\Omega_{\text{ш}}$ ,  $T_{\text{ш}}$  – ефективна ширина спектру теплового шуму джерела і температура джерела, відповідно ;  $D$  – діаметр дзеркала антени.

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ ПЕЛЕНГАТОРІВ ПОБУДОВАНИХ ЗА ПРИНЦИПОМ МІНІМУМУ ГЛИБИНИ МОДУЛЯЦІЇ

## Мотивація та загальна характеристика класу:

1. Радіопеленгатори, що працюють за критерієм мінімуму глибини модуляції являють собою підклас радіопеленгаторів заснованих на концепції визначення кутових координат за мінімумом прийнятого сигналу.
2. Проте вони винесені у окремий розділ у зв'язку з важливістю вирішуваних задач та їх надзвичайним поширенням у радіонавігації ПС у якості радіокомпасів, як напівавтоматичного, так і автоматичного типів.
3. На сьогоднішній день, практично неможливо, знайти повітряне судно, яке б не було укомплектовано пристроєм приводу – радіокомпасом до місця посадки. Вітчизняні повітряні судна цивільної авіації важкого та середнього класів ще до цих пір комплектуються різноманітними модифікаціями, заснованими на базовому варіанті автоматичного радіокомпаса АРК 15
4. Повітряні судна легких класів, приватні літаки та авіація сільськогосподарського призначення використовують полегшені, спрощені варіанти радіокомпасів невеликого енергоспоживання, ваги та габаритів. При цьому знижується далькодія та точність визначення напрямку на привідну радіостанцію, проте для вирішення регіональних задач це може бути прийнятним компромісом.



Структурна схема радіокомпаса

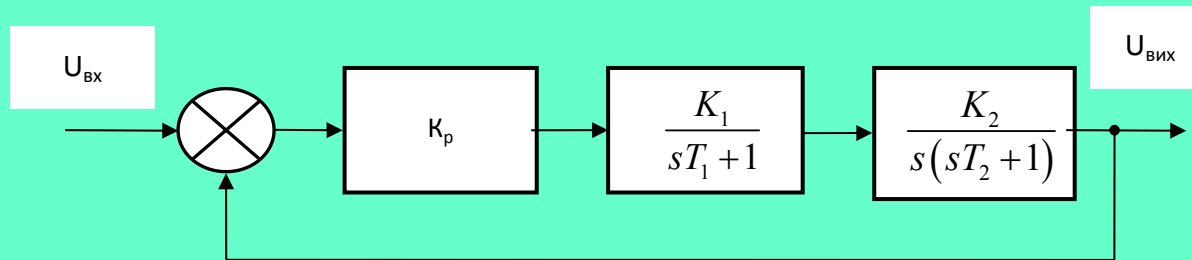
## Принцип роботи:

1. Радіо хвилі сприймаються рамковою і не спрямованою антеною і надходять до приймача. У приймачі шляхом порівняння фаз та визначення амплітуди е.р.с створюється змінна напруга, фаза якої залежить від того з якої сторони знаходиться радіостанція відносно напрямку нульового прийому. Ця напруга через систему стеження та підсилювач подається на електродвигун, який розвертає рамку у потрібну сторону до тих пір, поки різницевий сигнал не стане мінімальним (теоретично нульовим). Одночасно кут повороту передається на показчик, стрілка якого повертається синхронно з рамковою антеною.
2. Таким чином, як би швидко не повертався літак, стрілка завжди показує на шкалі напрямок на радіостанцію. Тому радіокомпас називають автоматичним.

# Побудова динамічної моделі радіокомпаса

## Методика:

1. Представимо автоматичний радіокомпас у вигляді сукупності динамічних елементів спрямованої дії.
2. Кожному динамічному елементу поставимо у відповідність диференціальне рівняння, яке відображає причинно-наслідкові зв'язки між входом та виходом.
3. У випадку лінійного динамічного елементу можна обмежитись записом передаточної функції.
4. Будуємо структурну схему АРК.
5. Використовуючи рівняння зв'язку між елементами, вилучаємо проміжні змінні та складаємо рівняння системи у цілому, як правило, це рівняння пов'язує вихід систем зі входом, або похибку зі вхідними діяннями та завадами.



Функціональна схема системи стеження

$$W_{\delta}(s) = \frac{K}{s(sT_1 + 1)(sT_2 + 1)}$$

$$W_{\epsilon}(s) = \frac{W_p(s)}{1 + W_p(s)}$$

## Апріорні дані:

Для подальшого аналізу динаміки шляхом математичного моделювання слід визначитись з числовими значеннями величин, що входять до формули передаточної функції  $W_p(s)$ . Для цього обмежимося типовими значеннями  $T_1$  і  $T_2$ , а  $K$  визначимо за умови стійкості. Прийmemo  $T_1=2$ ,  $T_2=0,2$ . Тоді  $K_{кр}=11$ , а  $K=10$ .

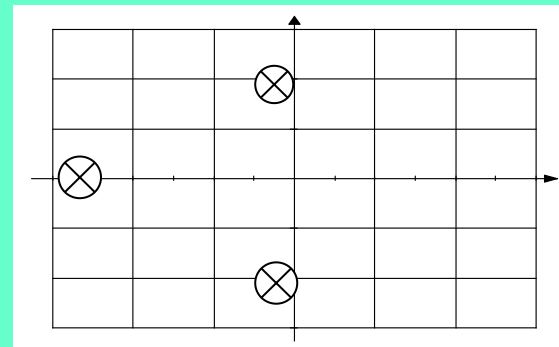
$$W_p(s) = \frac{10}{s(2s+1)(0.2s+1)}$$

$$W_{\epsilon}(s) = \frac{W_p(s)}{1+W_p(s)} = \frac{10}{0.4s^3 + 2.2s^2 + s + 10}$$

# Результати моделювання у частотній області

Діаграма розташування нулів та полюсів АРК:

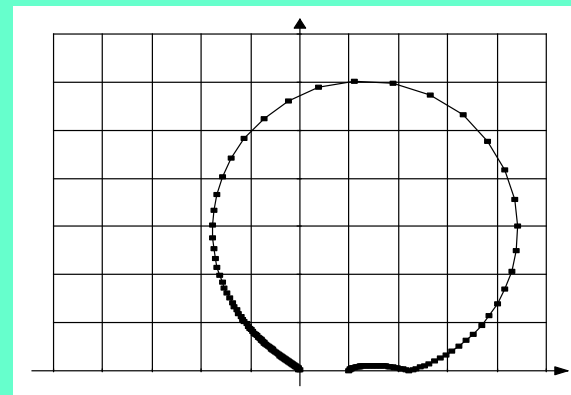
```
>> p = [0.4;2.2;1;10];      polusa = [ -5.8113  
>> polusa = roots(p);      (-0.1551 + 2.0685i);  
                           (-0.1551 - 2.0685i);
```



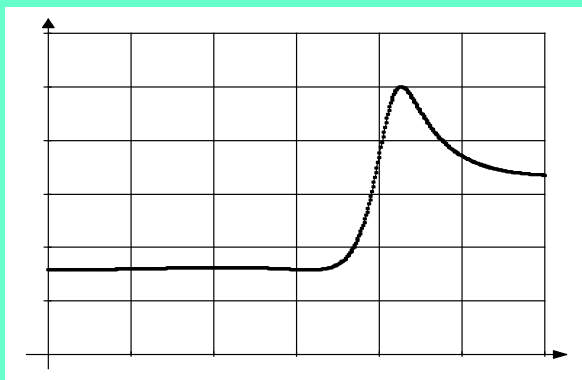
Побудова годографа:

$$\text{Im}[W_{\zeta}(j\omega)] = \frac{-10(\omega - 0.4\omega^3)}{(10 - 2.2\omega^2)^2 + (\omega - 0.4\omega^3)^2}$$

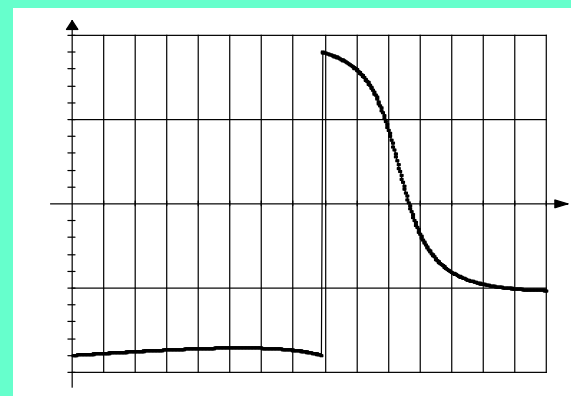
$$\text{Re}[W_{\zeta}(j\omega)] = \frac{10(10 - 2.2\omega^2)}{(10 - 2.2\omega^2)^2 + (\omega - 0.4\omega^3)^2};$$



Побудова частотних характеристик:

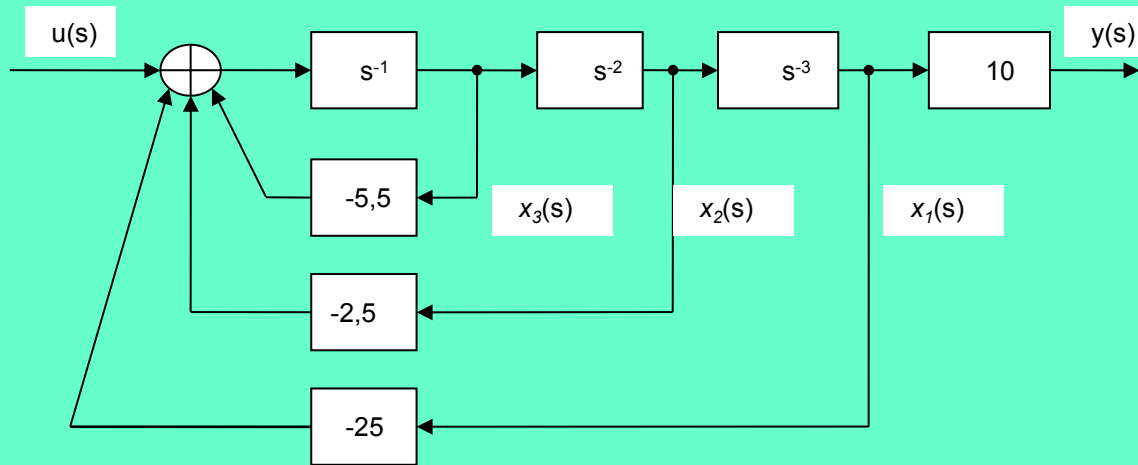


АЧХ



ФЧХ

# Результати моделювання у часовій області



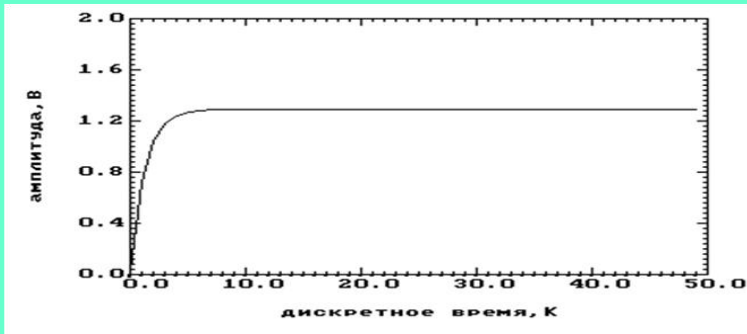
Система рівнянь у просторі станів:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t);$$

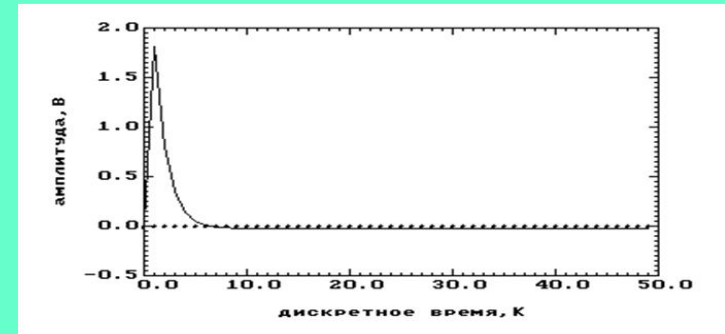
$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ -25 & -2,5 & -5,5 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2,5 \end{bmatrix};$$

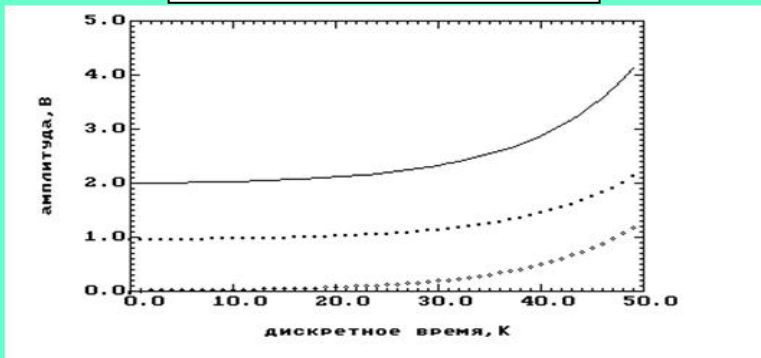
$$C = [10 \ 0 \ 0]; \quad D = 0.$$



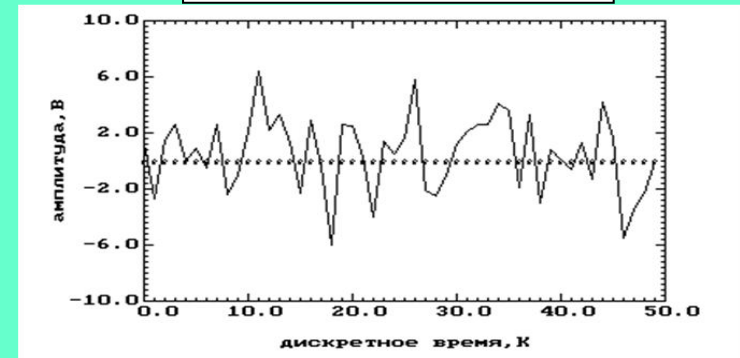
Перехідна характеристика



Імпульсна характеристика



Реакція на ненульові початкові умови



Реакція на стохастичні збурення



Доповідь закінчено !

Дякую за увагу!