

_____ . . .
“ ” _____ 2024 .

()

“ - ”

: _____

: _____ -403 _____

: . . . , _____

: . . . , _____

151 « ,

»

« _____ » _____ 2024 .

1. _____ : _____

01.04.2024 . 511/ _____

2. _____ : 13.04.2024 . 16.06.2024 .

3. _____ : _____ , - 17; _____ , -

4; _____ , / - 160; _____ , - 5; _____ ,

- 80; _____ , - 3000; _____ / -

_____ : 15 / .

4. _____ :

1. _____ .

2. _____ .

3. _____

5. _____ :

1. _____ ;

2. _____ , _____ ;

3. _____ ;

4. - ;
5. ;
6. MATLAB;
- 7.
- ;
8. .
- 9.

6. -

.			
1.	.	13.04.24 16.04.24	
2.	, , ,	17.04.24 – 22.04.24	
3.		23.04.24 – 12.05.24	
4.		13.05.24 - 17.05.24	
5.	,	18.05.24 – 28.05.24	
6.		29.05.24 – 31.05.24	
7.		01.06.24	

7. : 13.04.2024 .

_____ . .

_____ . .

: 61 ., 25 ., 3 ., 10 .

—

.

,

—

.

—

.

—

:

,

,

,

,

.

,

.

.

.

.

,

,

,

,

		.....6
		..... 7
1.		..... 9
1.1.		..... 9
1.2.		..... 15
1.3.		..... 22
2.		..... 28
2.1.		..... 28
2.2		..... 32
2.3	GPS	..... 38
2.4		..... 41
3.		..... 48
3.1.	-	..... 48
3.2.		..... 57
3.3.		..... 60
		..... 68
		..... 69

-
-
GPS-
-
-
-
-
-
- ;
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
C C-
-
-
-
-
-
-

3D-

()

« - »,

.

—

,

,

.

,

,

.

—

,

.

,

.

,

.

,

,

—

.

,

—

—

,

.

1

1.1.

(. 1.1).

- ;
- , ;
- , ;

	Кирпач Л.А.						70
Н-контр.	Дивнич М.П.				С - 403		
Зав.каф.	Мельник Ю.В.						



. 1.1.

- :
- ;
- (;
- - ;
- ;
- ();
- ;
- ();
- ;
- ;
- ;
- ;
- ;
- ;
- ;
- ;
- ;

- ;
- - ;
- .

1. , — , . , , . 3 . , 5 .

2. , — , , . , , (), ,

3. , , (). — , . , , (, ,) .



.1.2.

()

5.

—
, ,
(). ,
— ,
.
.
,
:
• ;
• ;

- ,
 - ;
 - ;
 - ;
 - ,
 - , ;
 - .
6. — , , , .
7. — 6 ,
- 50 . , .
8. — 1 10
9. — .
10. — .
- , .

11.

—

, , ,
.
.

1.2

()

,
.
.
—
,
.
—
,
.

().

(

).

().

:

1.

• :

• :

.

- ' :
,
- :
(,).

2.

- :
• :
• :
• : GPS,

- :
• :
• :

3.

- :
• :
• : ()
• : () -

- :
• ;

- ;
- ' ;
- ;
- ;
- ;
- .

.1.1.

1.1.

Категорія БПЛА	Позначення	Дальність, км	Висота польоту, м	Ресурс, год	Вага, кг
Тактичні БПС					
Нано	Nano	< 1	100	< 1	< 0,025
Мікро	Micro	< 10	250	1	< 5
Міні	Mini	< 10	150-300	< 2	< 20 (150)
Ближня дальність	CR	1030	3000	24	25-150
Мала дальність	SR	3070	3000	36	50-250
Середня дальність	MR	70200	5000	610	150-500
Середня дальність, тривалий політ	MRE	> 500	8000	1018	500-1500
Велика дальність на малій висоті	LADP	> 250	9000	0,51	250-2500
Тривалий політ на малій висоті	LALE	> 500	3000	> 24	150-250
Тривалий середньовисотний політ	MALE	> 500	8000	2448	1000-1500
Стратегічні БПЛА					
Дальність польоту на великій висоті	HALE	> 2000	20000	2448	2500-5000
БПС спеціального використання					
Безпілотні бойові	UCAV	≈1500	12000	≈ 2	>1000
Ударні	LET	300	4000	34	не визначена
Пастки	DEC	0 – 500	5000	< 4	150-500
Стратосферні	STRATO	> 2000	20000-30000	> 48	>2500
Надстратосферні	EXO	не визначена	>30500	не визначений	не визначена

0:
1:
2:
3:
4:
5:
6:
7:
8:
9:
10:

. 1.3.



. 1.3.

. 1.2

1.2.

Клас БПЛА	Маса, кг	Висота польоту, км	Час польоту, часів
ТЯЖКИ	над 1.000	до 20	24 та більш
СЕРЕДНІ	до 1.000	до 9 – 10	10 – 12
ЛЕГКІ	до 50	до 3 – 5	3 – 8
НАДЛЕГКІ	до 10	до 1	около 1

« » « » (.1.2).

(GPS, ..).

9-10

GPS

10

(. .)

(
).

1.2.

()

. 1.4.



. 1.4.

’ .
, ’
.
, - .
.
(,).
, ’
, ,
. ,
. ,
, ,
, ,
. ,
, , , ,
. ,
. ,
. ,
, ,
, ,
, ,
;
,

(,).

, GPS

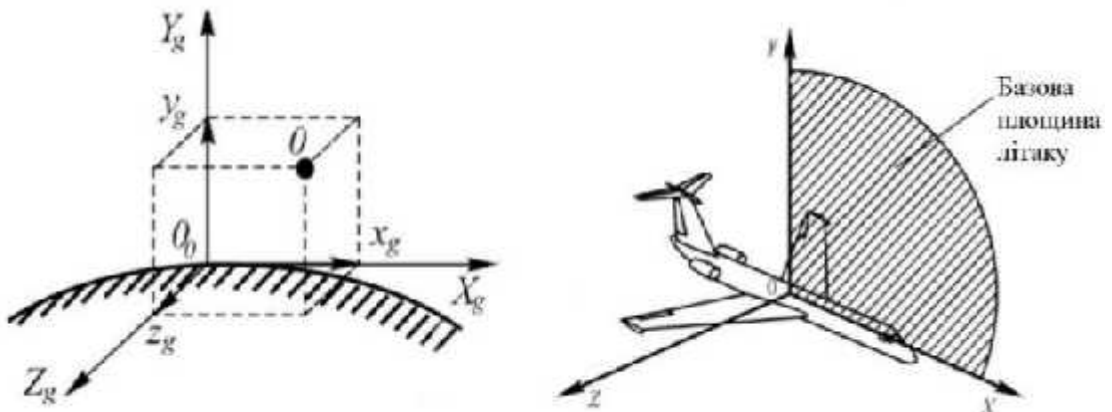
: STANAG
, EASA JARUS –

(. 1.4).

(GNSS)

, , . .
 , , . .
 , , , , , , . .
 , , . .
 , , , , , , . .
 : , , - , ,
 , - , ,
 , . .
 : ,
 ,
 ;
 ,
 . ,
 , , . ,
 . ,
 , . ,
 , , , , , .
 , . , ,
 , , . , , .
 , , , , , ,
 , , . , , ,
 , , , , , , , .
 , .

2.1



))
 . 2.1.

	Кирпачч Л.А.						70
Н-контр.	Дивнич М.П.			С - 403			
Зав.каф.	Мельник Ю.В.						

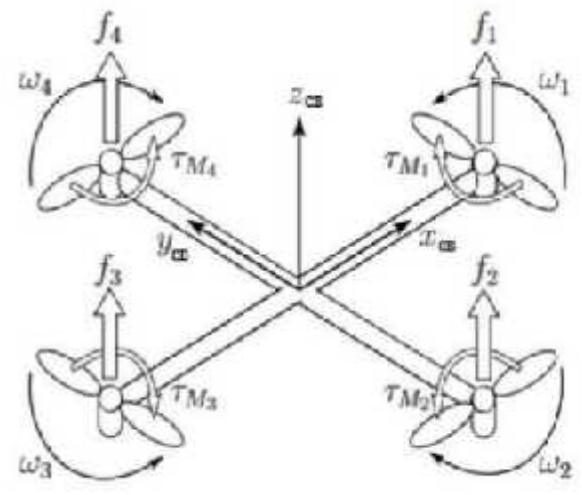
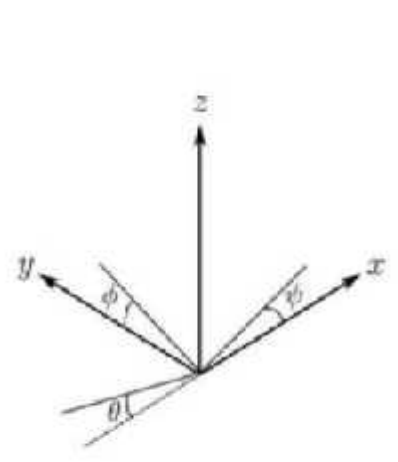
), (. 2.1,) (,).

, (. 2.1,).

R, :

$$R = \begin{bmatrix} C_\varphi C_\psi - S_\varphi C_\theta S_\psi & -C_\varphi S_\psi - S_\varphi C_\theta C_\psi & S_\varphi S_\theta \\ S_\varphi C_\psi + C_\varphi C_\theta S_\psi & -S_\varphi S_\psi + C_\varphi C_\theta C_\psi & -C_\varphi S_\theta \\ -S_0 S_\psi & S_0 C_\psi & C_0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

cos() C x x = sin() x S x = , φ - , θ - , ψ - .



. 2.2.

, :

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

i, ω_i , fi;

Mi τ :

$$f_i = k\omega_i^2 \quad (2.3)$$

$$\tau_{M_i} = b\omega_i^2 + I_M \dot{\omega}_i \quad (2.4)$$

k – , b – , MI –

T z :

$$T = \sum_{i=1}^4 f_i = k \sum_{i=1}^4 \omega_i^2 \quad (2.5)$$

$$\tau_{zz} = \begin{bmatrix} Lk(\omega_1^2 - \omega_3^2) \\ Lk(\omega_2^2 - \omega_4^2) \\ b(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$m\ddot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} + \mathbf{RT}_{32} \quad (2.7)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = I^{-1}(\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\omega} \times (I\boldsymbol{\omega})) \quad (2.8)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \begin{bmatrix} \tau_{\phi} I_{xx}^{-1} \\ \tau_{\phi} I_{yy}^{-1} \\ \tau_{\phi} I_{zz}^{-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \omega_y \omega_z \\ \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \omega_z \omega_x \\ \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \omega_x \omega_y \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\varphi & \cos\theta\sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\theta\sin\varphi \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (2.10)$$

1 x -

, 2 x -

, 3 x -

(,), 4 x -

,

:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \dot{x}_1 = x_2 \\
 \dot{x}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} + \frac{1}{m} RT_{20} \\
 \dot{x}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\varphi & \cos\theta\sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\theta\sin\varphi \end{bmatrix}^{-1} x_4 \\
 \dot{x}_4 = \begin{bmatrix} \tau_\theta I_{xx}^{-1} \\ \tau_\varphi I_{yy}^{-1} \\ \tau_\phi I_{zz}^{-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \omega_y \omega_z \\ \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \omega_x \omega_z \\ \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \omega_x \omega_y \end{bmatrix}
 \end{array} \right. \quad (2.11)$$

2.2

():

- (,);

- (,);

- (, ,).

,

:

- (, (,);

- () ()
(, ');

- (,).

,

,

· — ,

·

— · , ,

,

·

() :

- ;

- ;

- ;

- ;

- ;

- ;

(, , ,)

(). , :

(, ,) .

().

,

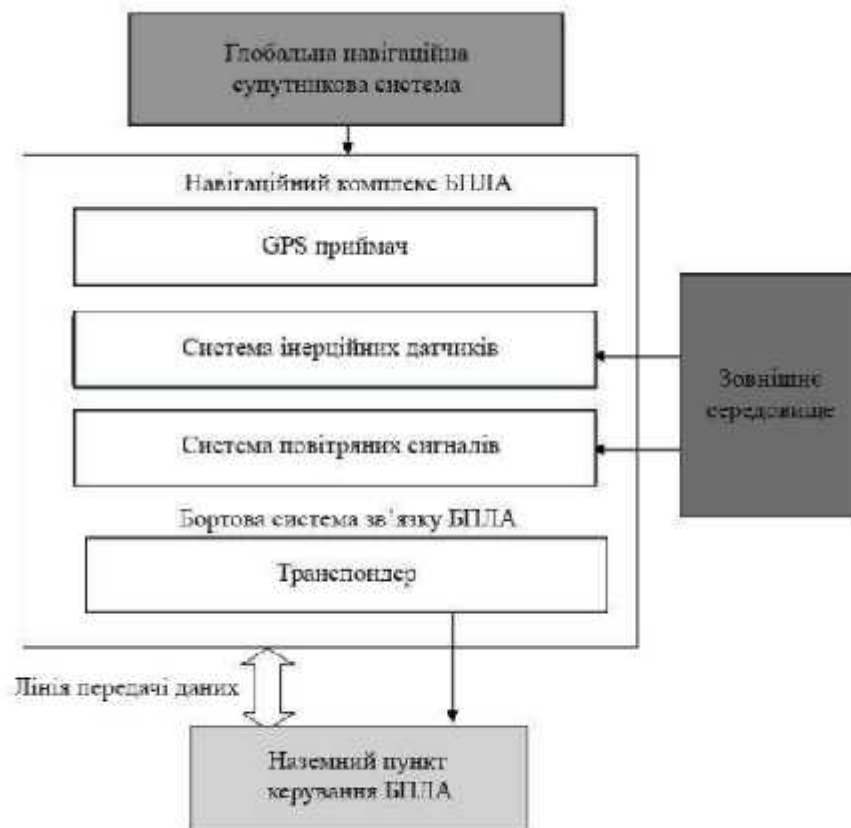
,



. 2.3.



. 2.4.



. 2.5.



. 2.6.

2.3 GPS

- GPS- : GPS (Global Positioning System) –

. GPS-

.GPS

. GPS

.GPS

, GPS

' . GPS-

. GPS-

GPS

GPS,

GPS

GPS

(DD).

«+»

«-»

60

3600.

(

)

49°59'36.6" N, 36°13'49.4" E:

$$49 + \frac{59}{60} + \frac{36.6}{3600} = 49.9935 \text{ (широта)}$$

$$36 + \frac{13}{60} + \frac{49.4}{3600} = 36.2304 \text{ (довгота)}$$
(2.12)

49.9935° N, 36.2304° E.

49, 59, 36, 36
13, 49, GPS

GPS,

GLONASS, BeiDou Galileo.



. 2.7.

, GPS

GPS,

GPS-

. GPS-

, GPS-

, GPS-

, GPS-

2.4

- ;

- .

Beginner Mode, Positioning Mode, Attitude Mode Sport Mode.

, Beginner Mode – ,

. Beginner Mode

Positioning Mode () – GPS

Mode . Positioning

Attitude Mode ()

, GPS.

. Attitude Mode

Sport Mode .

. Sport Mode

1. (Follow Me Mode)

GPS- : , .
: , ,
, ,
.

2. (Waypoint Navigation Mode)

:
, (waypoints),
, .
:
, ,
.



2.8. DJI Waypoints

3. (Return to Home Mode)

:

,

:

,

,

.

4. (Obstacle Avoidance Mode)

:

(

,

,

,

),

.

:

,

,

,

.

5. (Stabilize Mode)

:

,

.

6.

(Object Tracking Mode)

7.

(Mapping Mode)

8.

(Inspection Mode)

9.

(Geofencing Mode)

GPS

10. (Autonomous Flight Mode)

: , , : , , .

11 (Course Lock).

()

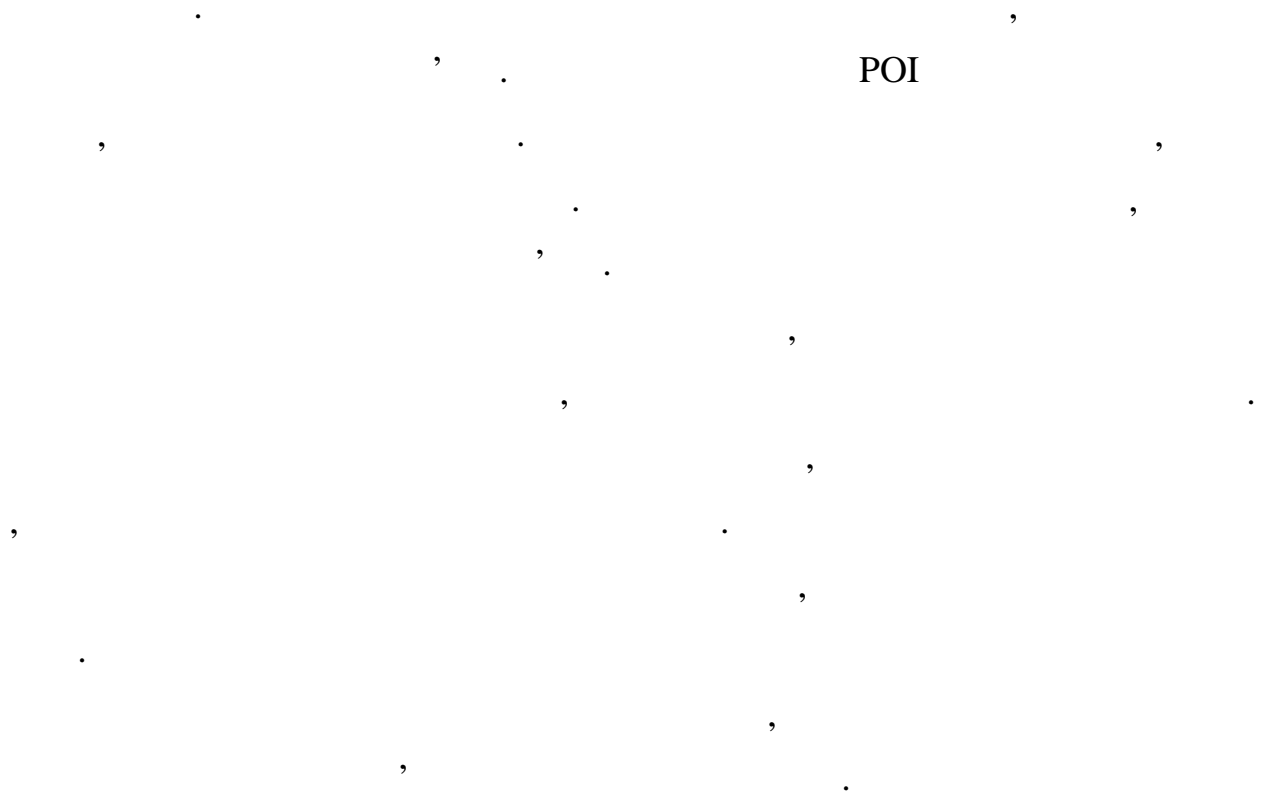
« » (. 2.9).



. 2.9. DJI Course Lock

12 « » / Points of Interest.

Point of Interest (POI)



3.1.

-

-10 « 2»,

20-25

-10 « 2» - V-

4,95 ; 0,8

120 ; 150 ;

150 / ; 2000 ;

22 ;

- /

-10 « 2»

;

(, , , , - ,) ;

(, , ,) ; - ;

	Кирпач Л.А.						69
Н-контр.	Дивнич М.П.			С -403			
Зав.каф.	Мельник Ю.В.						

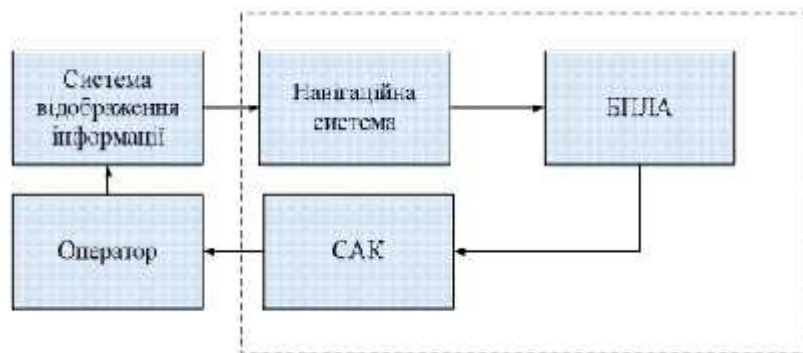
() .

() ,

() .

() ,

. 3.1.



. 3.1.

10 « 2»

GPS,

. 3.2.



. 3.2.

), ' .

— ;

— ;

— ;

— ;

— ;

— ;

—

— (R — ; V —);

— .

C C — .

— ;

— .

(),

() () ()

.

(R —

; V —),

(,

).

SiRF StarII/LP)

.
.
-
,
().

,
.
:
;

,
.
,
.

,
,
.
.
.

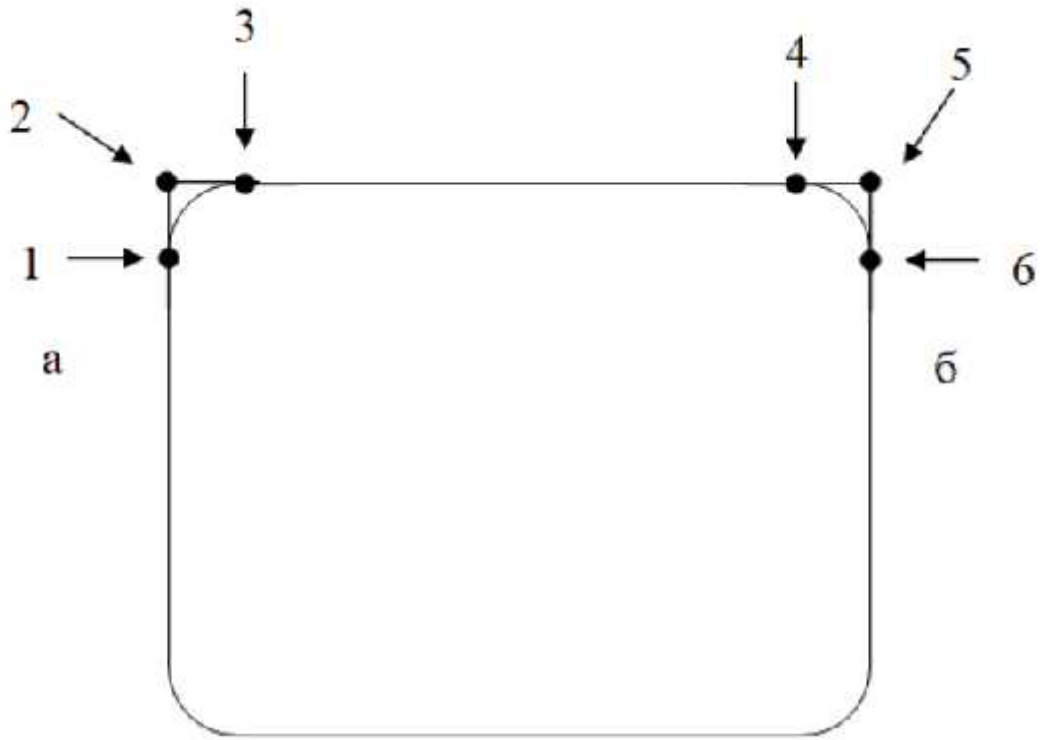
() : H; cs -
.
.
δ (.3.2). () : ψ - ;

cs -
,
,
,

. 3.2, δ).

3.3.

4,



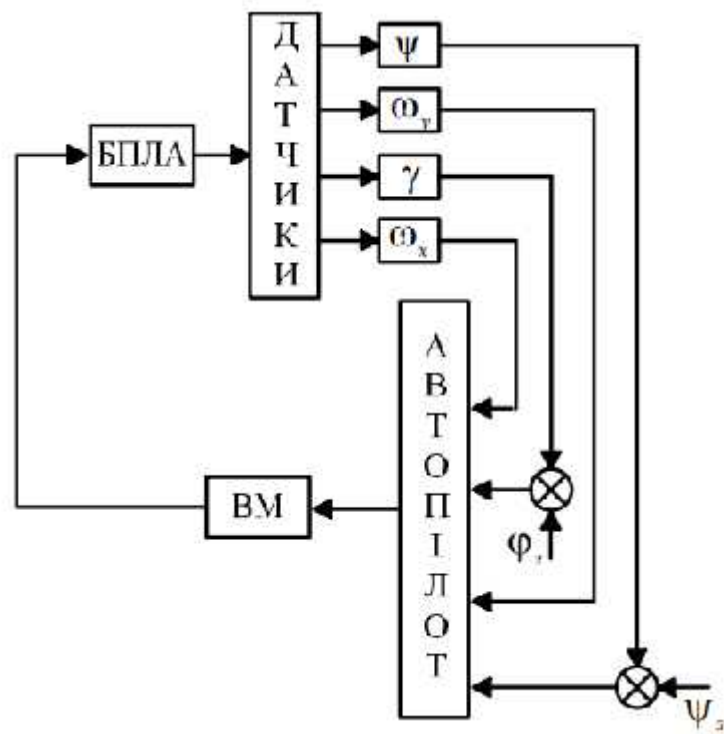
. 3.3. , 1, 3, 4, 6 – ; 2, 5 – ; , –

: $Z = 0$; $N = 0$; $X = 0$; $L = 0$, L , N –
 , Z – , X – .

$X, Z,$
 Z
 X

3.2.

.3.4.



.3.4.

, $\Psi, \Phi -$

Ψ, γ .
 $\omega x, \omega y$
().

$\omega x \omega y$

. CS -

$$\dot{x} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u + w;$$

$$y = \mathbf{C}x + v;$$

$x -$;

$A, B -$;

$u -$;

$y -$;

$C -$;

W, V -

:

$$X = [\beta, \gamma, \omega_x, \psi, \omega_y]^T$$

ω_x -

; ω_y -

; ψ, γ, β

- , , .
:

$$Y = [\gamma, \omega_x, \psi, \omega_y]^T$$

$$u = [\delta_e]^T$$

: u -

; δ -

(250 /),

$$A = \begin{bmatrix} -0.136 & 0.14 & 10^{-4} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -56.21 & 0 & -11.25 & 3.3 & 0 \\ 1.2 & 0 & -0.21 & -0.24 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = [0 \ 0 \ 160 \ 0 \ 0]^T.$$

(

200

/):

$$\mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} -0.109 & 0.175 & 10^{-4} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -36.28 & 0 & -9.2 & 2.8 & 0 \\ 0.86 & 0 & -0.17 & -0.185 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_p = [0 \ 0 \ 103.6 \ 0 \ 0]^T$$

: - , «p» -

3.3.

« (), () ». ,
 ,
 : , (), , (),
 , (), (), (), (),
 ().
 15 /c « » (.3.1).

« »

$\epsilon_{\psi} \rightarrow$ $\epsilon_{\psi} \downarrow$	ВВ	ВС	ВМ	Н	ДМ	ДС	ДВ
ВВ	ВВ	ВС	ВМ	ВВ	ВС	ВМ	Н
ВС	ВС	ВМ	ВВ	ВС	ВМ	Н	ДМ
ВМ	ВМ	ВВ	ВС	ВМ	Н	ДМ	ДС
Н	ВВ	ВС	ВМ	Н	ДМ	ДС	ДВ
ДМ	ВС	ВМ	Н	ДМ	ДС	ДВ	ДМ
ДС	ВМ	Н	ДМ	ДС	ДВ	ДМ	ДС
ДВ	Н	ДМ	ДС	ДВ	ДМ	ДС	ДВ

«

» - $\psi \epsilon$.

«

»

«

» - $\psi \epsilon$.

«

» - δ .

,

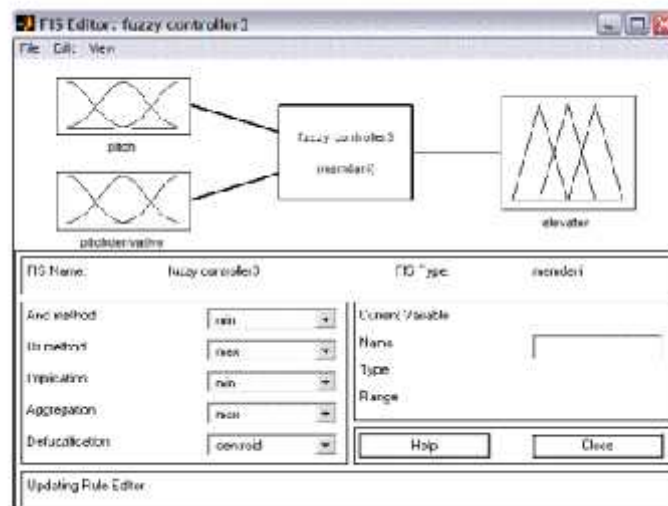
(

)

(

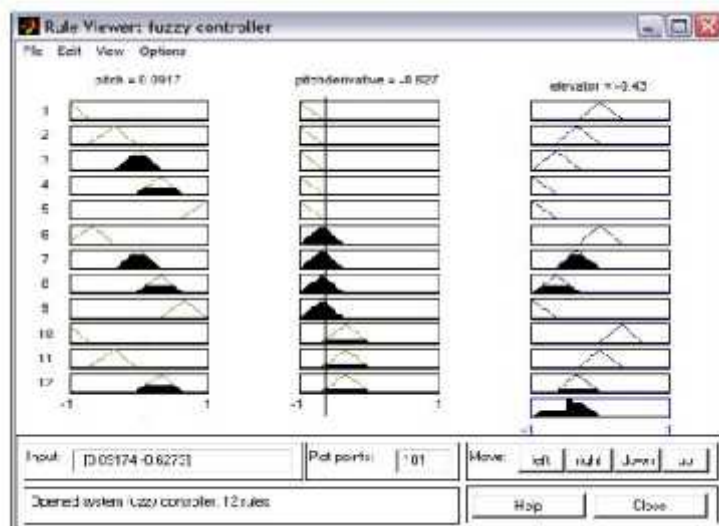
)

. 3.8.



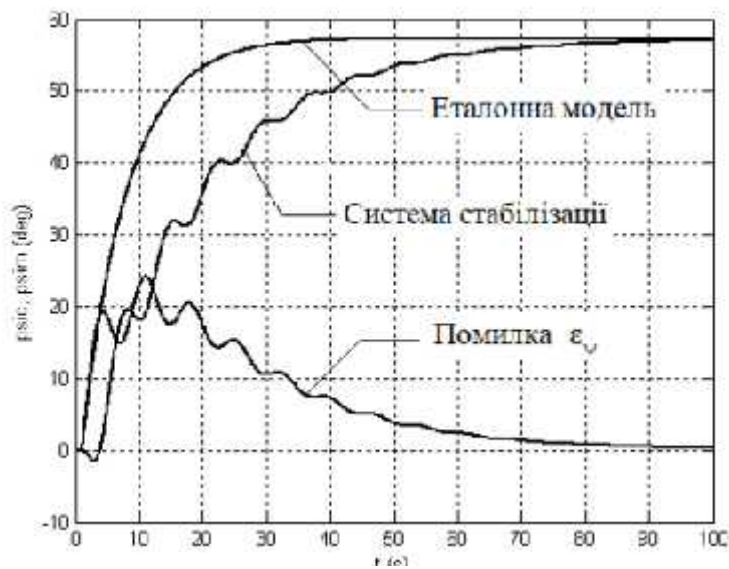
. 3.8. ,

MATlab



. 3.10.

3.11.



. 3.11.

$J = 0,11.$

-

«

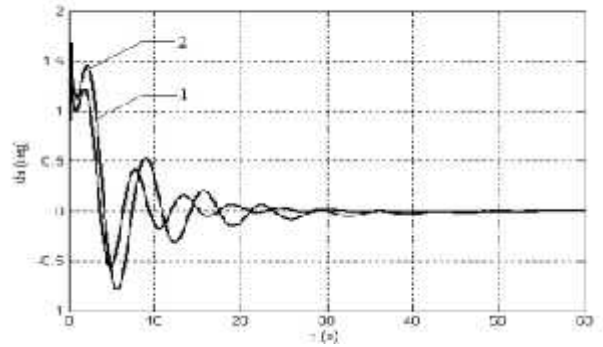
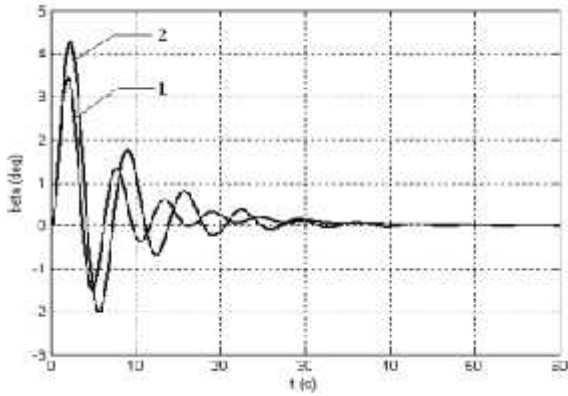
»

. 3.12

(Fuzzy Logic Controller –)

3

» .3.13



.3.13.

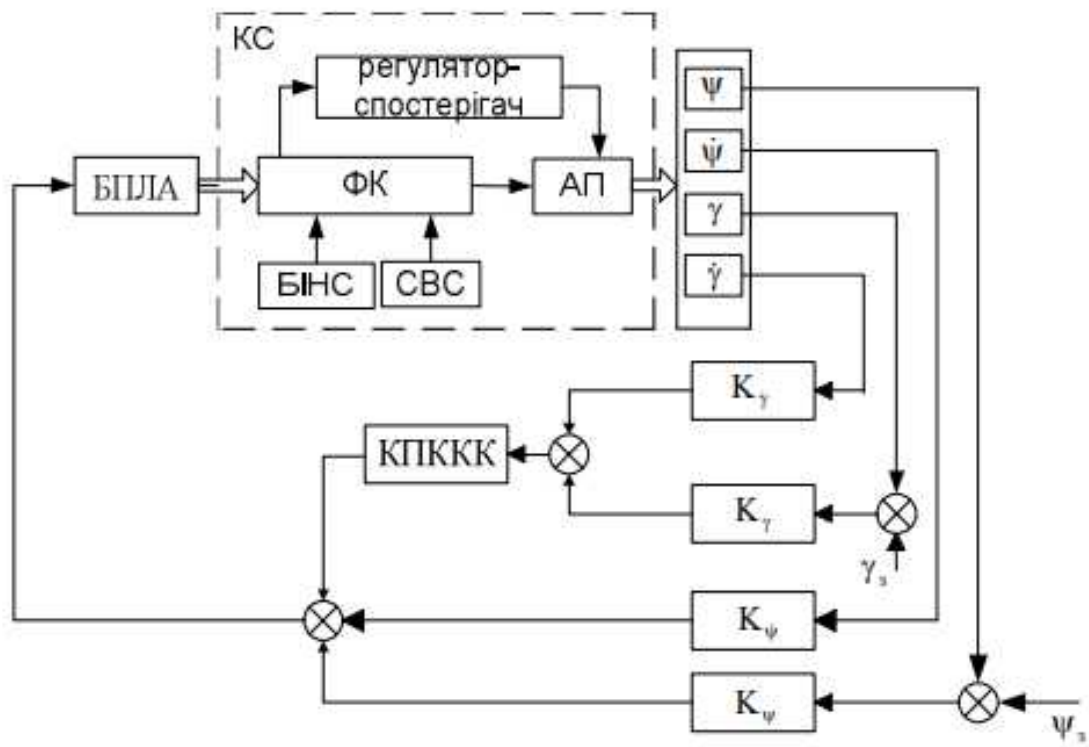
, :1-

« »,2- - .) ;)

15 /c 22%,

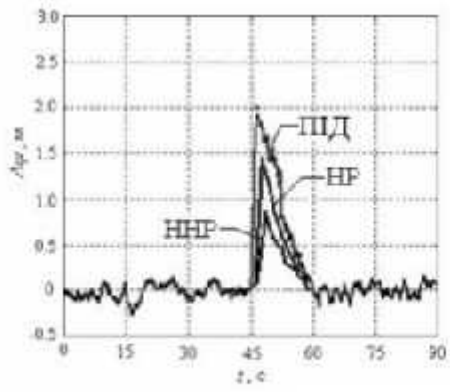
6%.

.3.14

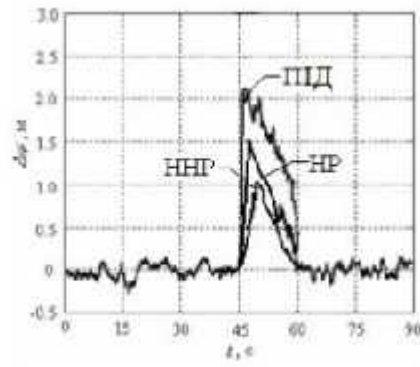


. 3.14. : - ,
 - , - , -
 , -
 ; - , -
 , - (- ,
 -).

. 3.15.
 (5 / 10 /),
 - . -
 , - .



а



б

3.15.

5 / - 10 / -

,

-

,

-

,

,

-

16% 28%

,

(5 / 10 /).

:

,

.

.

:

.

-

.

:

«

»

22%

15 / .

6%.

:

-

16%

28%

-

.

(5 / 10 /).

,

,

.

-

.

,

.

1. () – :
, 2023. – 126 . – (978-966-370-793-8).
2. / – 2019. – . 26–29.
3. . . .
, 2020. – 192 .
4. . . . –
.: - « i » , 2013. – 705 c.
5. . . . – :
, 1969. – 256 .
6. . . . – : , 2017. –
371 .
7. . . . ,
//
. – 2010. – 6. – C. 68–71.
8. . . .
. – : , 2011. – 560 .
9. . . . ,
//
– 2000. – . 2. – C. 177–182.
10. . . . – : , 2007. – 416 .