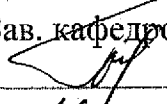


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет математики и информатики
Кафедра информационных и управляющих систем
Направление подготовки 09.04.04 – Программная инженерия
Направленность (профиль) образовательной программы «Компьютерное моделирование»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой


 А.В. Бушманов
« 16 / » 07 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Разработка алгоритмического и программного обеспечения для систем робастного управления нелинейным объектом по выходу

Исполнитель

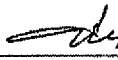
студент группы 857-ом

 01.07.2020
(подпись, дата)

К.О. Игнатович


Руководитель

профессор, доктор техн. наук

 14.07.2020
(подпись, дата)

Е.Л. Ерёмин


Руководитель магистерской программы

 14.07.2020
(подпись, дата)

И.Е. Ерёмин

Нормоконтроль


доцент, канд. техн. наук

 03.07.2020
(подпись, дата)

В.В. Ерёмина

Рецензент

доцент, канд. техн. наук

 14.07.2020
(подпись, дата)

Р.А. Кузьменко

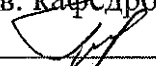
Благовещенск 2020

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет математики и информатики
Кафедра информационных и управляющих систем

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой


_____ А.В. Бушманов
« 02 » 09 2019 г.

ЗАДАНИЕ

К магистерской диссертации студента Игнатовича Кирилла Олеговича.

1. Тема магистерской диссертации: Разработка алгоритмического и программного обеспечения для систем робастного управления нелинейным объектом по выходу

(утверждено приказом от 30.04.2020 № 810-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы 20.06.2020


3. Исходные данные магистерской диссертации: отчет о прохождении преддипломной практики.

4. Содержание магистерской диссертации: описание предметной области, синтез робастной системы управления, имитационное моделирование, разработка прикладного программного обеспечения.

5. Перечень материалов приложения: построение эквивалентной системы, Simulink-схема системы при имитационном моделировании, основные этапы разработки спиральной модели, функциональная диаграмма прикладного программного обеспечения, UML-диаграммы разрабатываемого программного обеспечения, блок-схема алгоритма расчета имитационных характеристик.

6. Дата выдачи задания: 02.09.2019 г

Руководитель магистерской диссертации: Ерёмин Евгений Леонидович, профессор, доктор техн. наук.

Задание принял к исполнению  02.09.2019 г. К.О. Игнатович

72 ., 16 , 6 , 24

.

,

-

,

,

,

,

-

,

-

.

-

.

-

-

.

-

-

.

		6
1		8
1.1		8
1.2		9
1.2.1		9
1.2.2		9
1.2.3		10
1.2.4		11
1.3		11
1.4		12
1.5		13
1.6		16
1.7		19
1.8		21
2		23
2.1		23
2.2		24
2.3		28
3		33
3.1		33
3.1.1		33
3.1.2	matlab	35
3.1.3	simulink	36
3.2		38
3.3	simulink	39
4		42
4.1		42
4.2		43
		48

4.4		50
4.4.1		50
4.4.2		51
4.4.3		53
4.4.4		55
4.4.5		56
4.5		57
4.5.1		57
4.5.2	matlab	58
4.5.3		60
4.5.4		61
4.6		62
4.6.1		62
4.6.2		62
4.6.3		64
4.6.4		65
		67
		71
		74
		75
		76
		78
		83

-

,

-

-

-

.

-

,

-

.

,

-

,

,

.

.

,

,

-

,

-

.

,

,

.

.

,

,

.

,

:

-

,

;

-

;

-

-

;

-

.

-

,

-

,

-

,

.

.

,

-

,

-

.

.

-

.

.

,

-

.

1

1.1

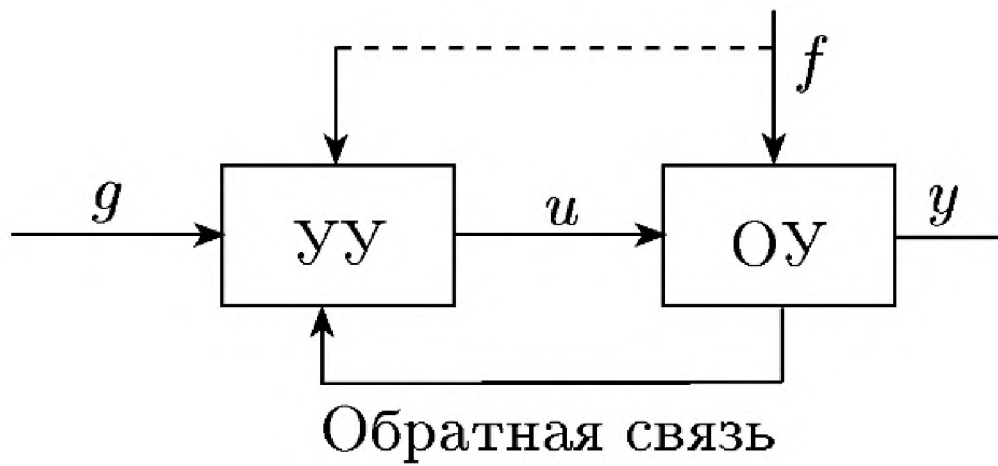


Рисунок 1 – Система управления

1.2

1.2.1

$$u = u^*(t).$$

2.

$$\begin{array}{c} \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \hline \end{array} \begin{array}{c} * \\ \\ \\ \end{array} \begin{array}{c} \\ \\ \\ \hline \end{array} \begin{array}{c} \\ \\ \\ \hline \end{array} >$$

2 - -

1.2.2

1.2.3

1.2.4

1.3

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t), \mathbf{x} = \text{col}(x_1, \dots, x_N), u = \text{col}(u_1, \dots, u_M), \quad (1)$$

$$x(t^0) = x(t^1), \quad \mathbf{u}(t) = [u_1(t), \dots, u_M(t)]^T, \quad x(t^0) = x(t^1).$$

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu, \mathbf{x} = \text{col}(x_1, \dots, x_n), \quad (2)$$

$$\mathbf{U} = \text{col}(U_1, \dots, U_m),$$

$$(2), \quad \mathbf{U} = [B, \dots, B]$$

$$A, B, \dots, A, B^1$$

$$\text{rank}(M) = n \quad (3)$$

1.5

$$y(t), \quad \mathbf{x}(t)$$

$$y(t),$$

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax + Bu, x = \text{col}(x_1, \dots, x_n), \\ y &= CTx + Du, y = \text{col}(y_1, \dots, y_m), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &= [C, ATC, (AT)^2C, \dots, (AT)^{n-1}C] \\ \text{rank}(\quad) &= \dots \end{aligned} \quad (5)$$

(4), s , -

$$\begin{aligned} t < s < t^*, \\ y(t^*) = u(t^*), \quad t^* \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} t < t^* < s, \\ x(t). \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= f(x, u, t), x = \text{col}(x_1, \dots, x_n), \\ y &= F(x, u, t), y = \text{col}(y_1, \dots, y_m), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dots, \quad s, \quad - \\ : \\ \dots < s < t, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} y(t^*), u(t^*), \quad t^*, \\ s < t^* < t, \end{aligned} \quad (10)$$

$x(t)$.

,

,

,

;

.

$$\frac{dz(t)}{dt} = Fz(t) + Ky(t) + Hu(t),$$

$$z(t) = \text{col}(z_1(t) \dots z_n(t)),$$
(11)

$z(t)$ - ;

$y(t)$ - ;

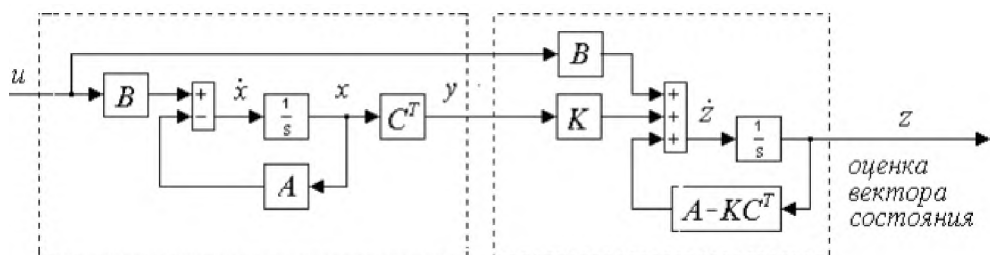
$u(t)$ - .

F,

K

F,

1.



3 -

1.6

p -

k=(p-1)

«

»

«

»

«

»

..

,
-
-
-

;

.

-

:

;

.

,

.

,

.

.

,

,

.

-

.

7 ^

7 \

:

-

;

-

,

,

.

,

()

(), ..

-

,

,

,

-

,

-

.

-

,

-

.

-

.

,

.

-

-

.

,

-

.

-

:

-

,

-

.

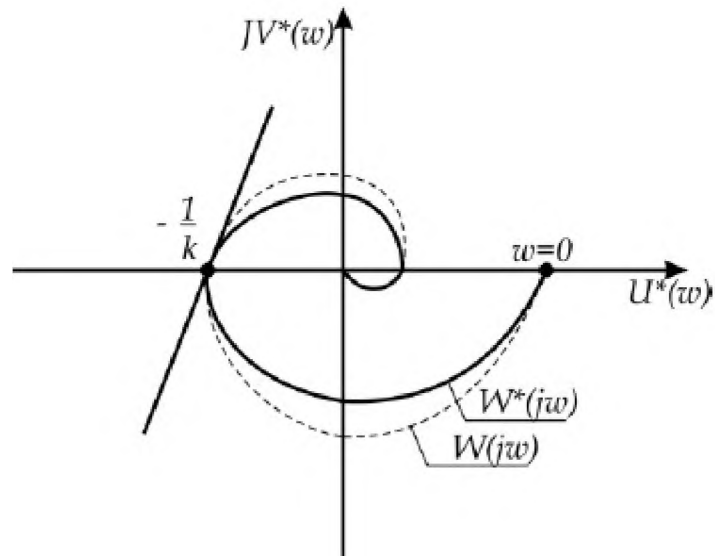
-

;

1.7

(-1/ ;j 0)

5.



5 -

1.8

4

() 1- , . . . () :

$$\frac{dx}{dt} = Ae(t) + Bq(t), z(t) = gTLTe(i),$$
$$q(t) = - F(z(t)).$$

$$h(0, t) = - \int_0^t q T(s) z_0(s) ds = \int_0^t F T(z_0(s)) z_0(s) ds > -h \quad \{;$$

g.

()

2.1

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u), \quad (12)$$

$$x(t) \in \mathbb{R}^n \quad ;$$

$$u(t) \in \mathbb{R}^m \quad ;$$

$$f(x, u) \in \mathbb{R}^n \quad ;$$

$$f(0, 0) = 0 \quad ;$$

$$\frac{df(x, u)}{du} = f_u(x) \quad 1 \quad 1$$

$$f_u(x) \in \mathbb{R}^{n \times m} \quad ; \quad q = \{x: \|x\| < M\} \quad -$$

$$\mathbb{R}^n, \quad x = 0.$$

(12)

$$\frac{dx}{dt} = A(x)x + B(x)u(t), \quad (13)$$

$$B(x) = [B_1(x), \dots, B_n(x)]^T;$$

$$A(x) = \{a_{ij}(x)\}, i, j = 1, \dots, n \quad (n \times n) - ,$$

$$a_{il}(x) = \int_0^1 J_{jx}(x_1, \dots, x_n, \beta, x_t, 0, \dots, 0) d\beta, \quad i = \overline{1, n}, \quad (14)$$

$$a_{if}(x) = \int_0^1 J_{fx}(0, \dots, 0, 0x_i, x_{i+1}, \dots, x_n) d\theta, \quad i = \overline{1, n}, \quad (15)$$

$J_{fx} -$.

2.2

$$(13) \quad -$$

,

, (13), :

$$\frac{dx}{dt} = A(x, \xi)x + B(x, \xi) \cdot (u(t) + \varphi(t)), \quad y(t) = x, \quad x(0) = 10, \quad (16)$$

$\varphi(t) -$;

$y(t) \in R -$;

$\xi -$,

S .

$$(16) \quad -$$

$$, \quad (16)$$

, (16):

$$\frac{dx}{dt} = \varphi(x) + Bf \cdot \varphi(t), \quad z(t) = g(x) \varphi(t), \quad x(0) = 0, \quad (17)$$

$\forall \varphi \in R^n$ - ;

$z(t) \in R$.

$$Wf(s) = \frac{g(s)}{(Ts \cdot 21)^{n-1}}, \quad (18)$$

$g(s)$, (- 1)

$$g(s) = g_n s^{n-1} + g_{n-1} s^{n-2} + \dots + g_1 s + g_0 = 2$$

$g(s)$; g_n ,

$g(s)$, $n = 0, 1, \dots, n-1$;

T ,

[20].

(16) :

$$\frac{dx}{dt} = (A - B_0)T(x, \&)x^2 + (B_0 - 12P(x) - (u(t) - 2K_0)), y(t) = x_i(t), \quad (19)$$

A - () ;

B - ;

$B_0 = [0, 0, \dots, i]T$;

$x(0) = x_0$;

$a(x), P(x)$ - ;

$0 < P(x) < 0$, $0 = const > 0$.

, (20) $a(x)$ -

$$(x) = (x_1(x), x_2(x), \dots, x_n(x)), |x_i(x)| < a, Q(x) = \text{const}, i = 1, n, \quad (20)$$

[16].

(20)

(20).

(19),

:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + BQ(t), y(t) = xi(t)$$

$$\&(t) = a T(x)x + (1 + J\mathcal{B}(x)) \cdot (u(t) + iy(t))$$

:

$$\frac{dx_m(t)}{dt} = A_m x_m(t) + B_m r(t) \quad (t) = x_m(t) \quad (21)$$

$$A_n - ;$$

$$B_m = B_0 a_0;$$

$$a = \text{const} > 0 ;$$

$$r(t) \in R - ;$$

$$y(t) \in R - .$$

$$(19) \quad (20)$$

:

$$A = A_m + B_0 Q(t), B(x) = B_0(1 + P(x)X \quad (22)$$

(8) :

$$\frac{dx}{dt} = Ax + BQ(t), y(t) = x(t), \quad (23)$$

$$z(t) = c_0gTx + aT(x)x + (1 + J3(x)) \bullet (u(t) + / (x, t)).$$

$$(17)$$

£,

y(t)

$$y(t), \dots$$

:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} |y(t) - y_m(t)| < \epsilon, \epsilon = const > 0. \quad (24)$$

L-

():

$$\frac{dr}{dt} = Ax + BQ(t), y(t) = gTx(t), \quad (25)$$

$$z(t) = c_0y + aT(x)x + (1 + P(x)) \bullet (u(t) + / (t)),$$

$$y(t) - ;$$

$$xI(t) -$$

:

$$\frac{dx}{dt} = \dots \bullet y(t), z(t) = x f_i(t), \quad (26)$$

$$(25), (26)$$

:

$$\frac{dx}{dt} = Amk m(t) + B m(t) X_y m(t) = g T_x m(t), \quad (27)$$

$$(26)$$

$$\frac{d^*}{dt} = Am\bar{X}(t) + B0\bar{3}(t), \quad \bar{y}(t) = gT\bar{x}(t) \quad (28)$$

$$3(t) = c0y + aT(x)x(t) + (1 + P(x)) \bullet (u(t) + / (t)),$$

(27), (28)

(t)

:

$$\lim_{x \leftarrow} |y(t) - ym(t)| < 0, \quad 0 = const > 0. \quad (29)$$

2.3

$$e(t) = xm(t) - x(t),$$

(27),(28):

$$\frac{de(t)}{dt} = Am\bar{e}(t) + B0M(tXv(t) = gTe(t)$$

$$ju(t) = a0r(t) - (1 + P(x)) \bullet u(t) - (1 + P(x)) \bullet / (t) - c0y - a0(x)x(t),$$

(30)

(30).

(19)

:

$$am(P)v(t) = g(P)M(tX$$

(31)

am -

aC(s) -

$$am(s) = sn + amisn-1 + \dots + am^s$$

g(p) -

(n - 1) -

g(s),

(18).

$$am(\) = g(\)(\ + 0) - \quad (30)$$

$$wz \quad (* > \frac{1}{s + \dots})$$

$$T(0, t) = - \int_0^t M(s)v(s) ds - 2 = const, \forall t > 0, \quad (32)$$

(19):

$$T(0, t) = - \int_0^t a0r(s)v(s) ds + \int_0^t (1 + B(x(s))) u(s)v(s) ds + \int_0^t (1 + P(x(s))) iy(s)v(s) ds + \int_0^t (c0gT + ar(x(s))) x(s) ds. \quad (33)$$

(21)

$$u(t) = (t) + (t) + (t), \quad (34)$$

$$T(0, t) = \sum_{i=1}^3 \int_0^t (1 + B(x(s))) u(s)v(s) ds + \int_0^t (c0g + a(x(s))) X(s) ds + \int_0^t (1 + B(x(s))) u2(s)v(s) ds - a0 \int_0^t r(s)v(s) ds + \int_0^t (1 + P(x(s))) ui(s)v(s) ds + \int_0^t (1 + P(x(s))) ^ (s)v(s) ds \quad (20)$$

() (33).

$$(20) \quad , \quad (t) \quad , \quad -$$

$$(32).$$

$$(0,t), \quad (20) \quad -$$

$$am = c_0 g + a_0 i, \quad :$$

$$\begin{aligned} * \chi(0,t) &= \int_0^t (1 + P(x)) u x(s) v(s) ds + \int_0^t \sum_{i=1}^n (c_0 g_i + a(x)) x(s) v(s) ds \pm \\ &\pm \int_0^t (1 + P(x)) I a \partial \bar{X}_i(s) v(s) ds > \int_0^t (1 + P(x)) u l(s) v(s) ds - \\ &- \int_0^t (1 + P(x)) I a \partial \bar{X}_i(s) v(s) ds \pm \int_0^t (1 + P(x)) (1 + p_0) I \sum_{i=1}^n X(s) v_2(s) ds > \\ &> \int_0^t (1 + P(x)) u l(s) v(s) ds - \int_0^t (1 + P(x)) I a \partial \bar{X}_i(s) v(s) ds + \\ &+ \int_0^t (1 + P(x)) 2 \sum_{i=1}^n x(s) v_2(s) ds - \int_0^t (1 + P(x)) (1 + p_0) I \sum_{i=1}^n x(s) v_2(s) ds > \\ &> \int_0^t (1 + P(x)) u l(s) v(s) ds - \int_0^t (1 + P(x)) I a \partial \bar{X}_i(s) v(s) ds + \\ &\quad \sum_{i=1}^n \int_0^t (1 + p(x)) x(s) v(s) ds - \int_0^t (1 + p(x)) (1 + p_0) \sum_{i=1}^n X(s) v_2(s) ds \\ &\quad - 2 \int_0^t \sum_{i=1}^n (1 + P(x)) u l(s) v(s) ds - \sum_{i=1}^n \int_0^t (1 + P(x)) x_i(s) v_6(s) U(s) ds \\ &\quad \frac{2}{\alpha} \wedge \frac{2}{\alpha} \ll ; = - \quad 0 l = \circ \quad 1 \\ &\quad i=1 \quad 4 M \quad i \quad z=1 \quad 4 M \quad i \end{aligned}$$

$$(34):$$

$$u l(t) = \sum_{i=1}^n h_i \cdot x_i(t) \cdot v(t) \quad (35)$$

$$h X = (1 + 0) h_i = const > 0, i = 1, \dots, n$$

$$(0,t),$$

$$(t) = \cdot r(t) \cdot v(t), \quad = (1 + P_0) a_0 K = const > 0 \quad (36)$$

(33):

$$U(t) = h^{-1} v(t), h = (1 + Po)Woh = const > 0 \quad (37)$$

:

$$\overline{u(t)} = \sum_{i=1}^n h_i \cdot \overline{X_i}(t) \cdot v(t) + h_2 \cdot \overline{r}(t) \cdot v(t) + h_3 \cdot v(t). \quad (38)$$

,

.

$$a(\) -$$

$$(19) - \quad A \quad (19),$$

$$(\) - \quad A \quad (21),$$

$$(26)$$

:

$$(\) = a(\) - 0g(\) \cdot$$

$$(31)$$

:

$$(a(p) - cog(p))v(t) = g(p)p(t), \quad (39)$$

$$, \quad (27), (28), (38)$$

$$(26),$$

$$(25) -$$

$$(27), (38)$$

:

$$\mathbb{I}, \quad \frac{g(s)}{(Ts+1)^{n-1}} \quad \frac{g(s)}{(Ts+1)^{n-1} a(s) - Cg(s)} \quad (40)$$

$$[1]$$

$$(25) - (27), (38)$$

$$(40)$$

L-

$$(17)$$

:

$$T < \frac{0.93}{(n-2)a_{ml}} < 0.465 \cdot a_{ml} \frac{1}{(n-1)a_{m2}} \quad (41)$$

(25) - (27), (38) (17), (19), (21), (38) -

L- , . . .

(24).

,

-

.

,

.

3.1

3.1.1

, - , -
, -
, - , -

[10].

,
.
:

- Scilab & Xcos;
- Simulink;
- SimulationX.

Scilab. Xcos, Xcos

,
,
.
,
.
,
,

Xcos.

Xcos

Simulink -

MATLAB,

[13].

MATLAB,

Xcos.

SimulationX. SimulationX -

500

Modelica,

MATLAB

Simulink,

3.1.2

MATLAB

MATLAB -

Methods.

MEX -

MATLAB.

MATLAB

, MATLAB

(MCR),

MATLAB

MATLAB

3.1.3

Simulink

Simulink [13].

Simulink -

Simulink

:

- ;
- ;
- - ;
- .
- :
- ;
- ;
- ;
- ;
- .
- -
- -
- .
- :
- ;
- ,
- ;
- MATLAB, ,
- , , ;
- ;
- ;
- .
- , ,
- MATALB

3.2

$$\frac{dx}{dt} = \sin(x) + x^2,$$

$$\frac{dx}{dt} = \sin(x) + x^2 \arctg(x) + x^3, \quad (42)$$

$$\frac{dx}{dt} = x^2 + x^3 + \cos(x) + (1 + \sin^2(x^2))(u(t) + v(t)).$$

$$0 < x < 8; 1 < x^2 < 5; 0.8 < x < 1.2; 0.5 < x^4 < 3; 1 < x < 5; 0.8 < x < 1.5; 1.5 < x < 5.$$

(42): $v(t) = \sin(t)$.

(42)

(2)

$$Jfu = \frac{\sin(x) + x^2}{1 + x^2} + \arctg(x) + x^3 + 2x \cos(x) \quad (3):$$

$$A(x) = \frac{\sin(x) + x^2}{1 + x^2} + \arctg(x) + x^3 + 2x \cos(x) \quad (43)$$

$$B(x) = \dots$$

$$B(x) = \dots + \sin^2(x^2)j \quad (44)$$

$$, \quad (43)$$

$$A(*,4) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -4 & 4 \cos(*1) - 4 \cos(*2) \end{pmatrix} \quad (45)$$

$$B(*) = B \cdot 0 \cdot 4 \cdot \sin(*1) + 42(4 \arctg(*1) + 4) \cdot (1 + \sin 2(*2)) = B \cdot 0 \cdot (1 + *) -$$

$$(*) \quad (45), \quad , \quad (9)$$

$$(t)$$

$$(32).$$

:

$$u(t) = *4v(t) + h*2*2v(t) + *2v(t) + h*2*2*lv(t) + h*2 + h r 2(t)v(t) + h l(t)$$

(21): $am=1$;

$$: r(t)=1.7sm(u(1))sm(0.5u(1)).$$

$$(17) \quad : g(s)=0.25s^2+1s+1$$

$$: 4_1=4_2=3; 4_3=1; 4_4=0.5; 4_5=5; 4_6=1; 4_7=2.$$

3.3

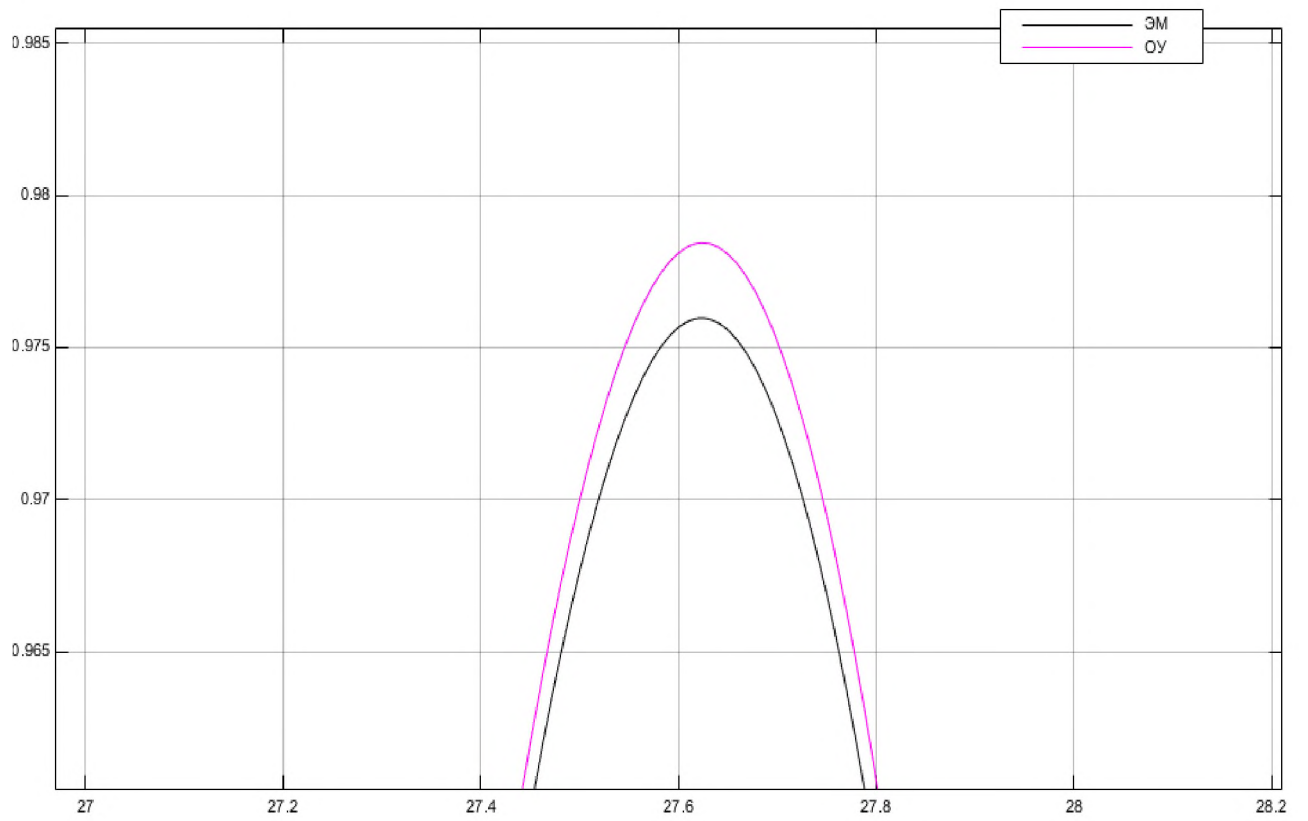
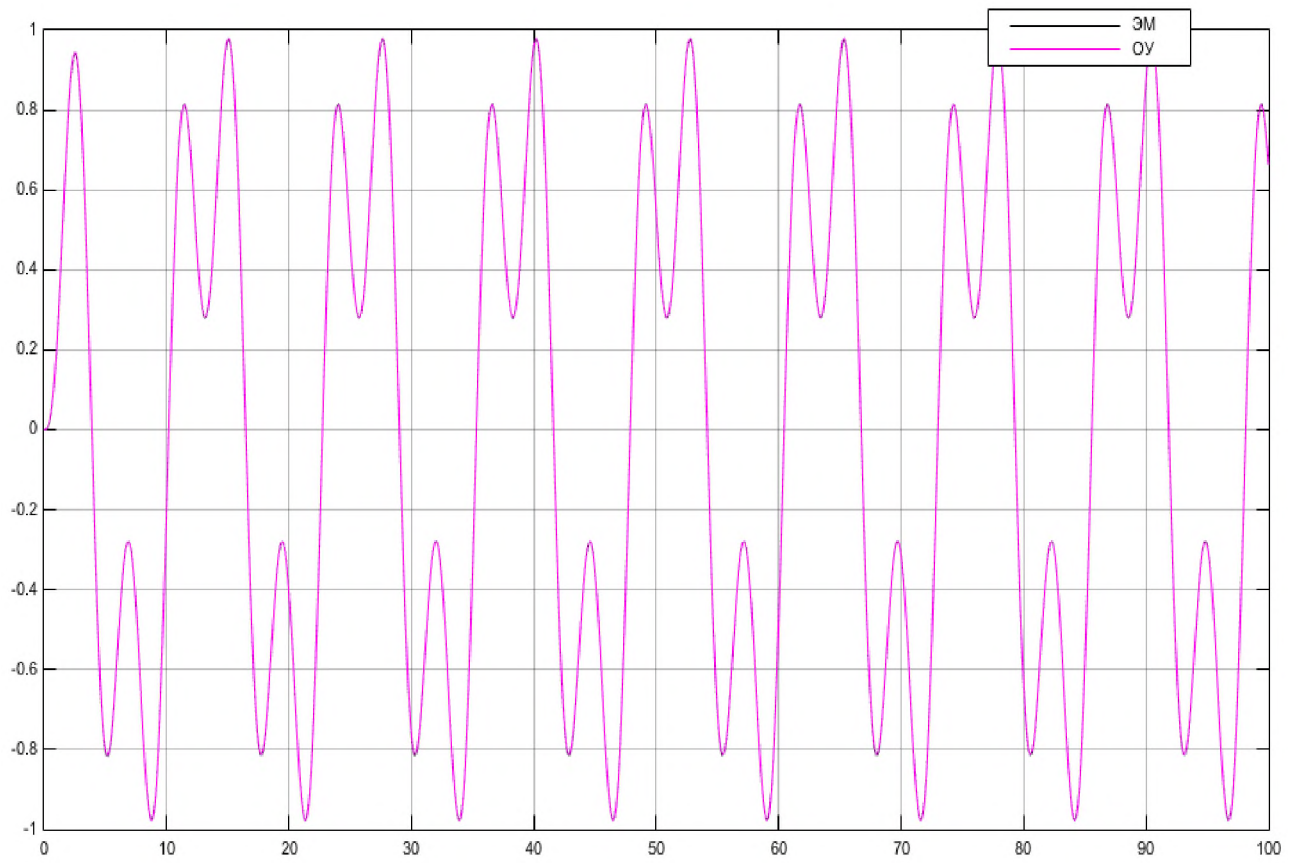
Simulink

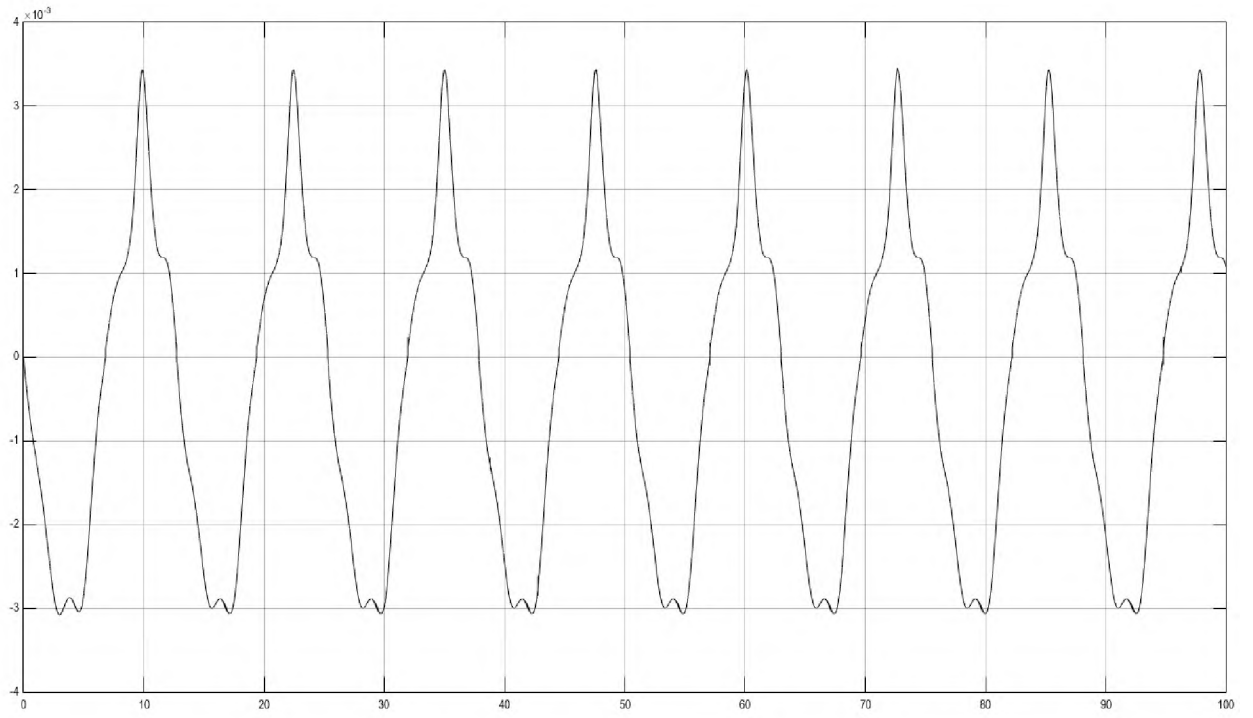
, .1.

:

$$h_1=25; h_2=20; h_3=25; h_4=30; h_5=0.5; h_6=40; h_7=300.$$

$$6,7 \quad *(t) \quad *n(t),$$





4.1

Simulink-

MATLAB

MATLAB.

MATLAB,

MATLAB;

MATLAB Simulink;

ulink

Sim-

-
- , Simulink- ;
- , *.mat
- ,

MATLAB,

- :
- - ;
- ;
- Simulink- ;
- ;
- ;
- ;
- ,

4.2

-
- ,
- 19.201-78
- ,
- ,

- , ;

2

,

,

.

,

-

;

3

,

,

.

-

-

,

,

-

-

.

:

1

;

2

;

3

.

-

,

,

,

,

-

.

,

.

-

,

,

,

-

,

,

-

.

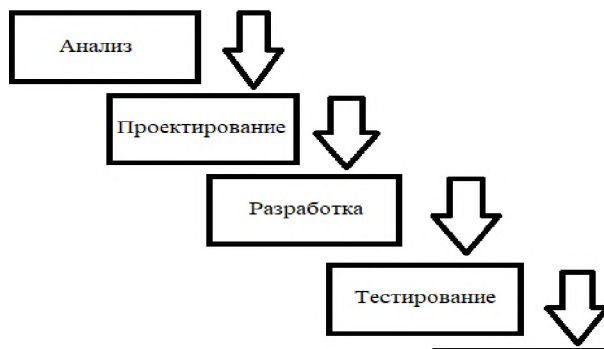
,

-

-

:

.



9 -

-

;

-

\

.

-

.

-

.

-

-

,

.

-

,

.

:

-

-

,

;

-

,

;

-

-

.

-

,

.

:

-

-

;

-

-

,

;

-

-

.

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

,

,

,

;

;

,

-

-

:

-

-

-

-

;

-

-

.

.

,

,

.

,

,

.

.

,

.

,

,

.

:

-

;

-

;

-

-

;

;

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

4.3

,
.1.
,
:
- ;
- ;
- .
,
,
,
. ,
, , ,
.

space»,
Simulink-

MATLAB,

«COM»,

«Work-

.2.

MATLAB.

MATLAB

MATLAB.

«COM»,

4.4

4.4.1

:

- ();

- .

, .1.

:

- MATLAB 2014b (,

MATLAB);

- Microsoft .NET Framework 4.6 ;

- ,

.

MySQL MATLAB.

.

.

,

,

.

,

,

.

4.4.2

,

.

,

.

MATLAB.

MATLAB

MATLAB,

MATLAB.

MATLAB.

()

4.4.3

.3.

.3

7

« » -

«

».

« ».

« » -

«

».

«

»

«

».

« » -

. , -

« » -

« M A T L A B » .

« M A T L A B » -

, M A T L A B ,

. «

»

«

» .

« » -

,

,

,

,

,

«

»,

«

,

» .

«

,

» -

,

.

-

« »

4.4.4

.4.

3

()

MATLAB,

-

-

.

4.4.5

,

-

,

,

.5.

,

-

,

-

-

-

,

:

- «DBUtils»;

- «BDMYSQLUtils»;

- «MainForm»;

- «Autorisation»;

- «User»;

- «OU»;

- «DK»;

- «EM»;

- «RG»;

«DBUtils» «BDMYSQLUtils»

-

.

«MainForm»

-

,

,

,

,

.

«DK» «RRParam»

-

, «RRParam»

,

.

«RG»

« »

«OU»

4.5

4.5.1

Microsoft

Visual Studio 2017 Community.

,

, :

-

,

,

IntelliSense,

,

;

-

,

;

-

-

,

;

-

;

-

Visual Studio

-

,

-

.

-

Visual Studio,

,

,

-

,

,

[15-17].

:

- WPF - Windows Presentation Foundation (WPF)

-

API-

Windows Forms, WPF

-

(WPF , -
DirectX). -

Windows Forms. -

Windows Forms. -

- COM (Component Object Model) - , -

MATLAB.

4.5.2

MATLAB

COM

- . - -

- , -

, -

, COM,

COM-
(GUID) -

, ,
MATLAB -

GUID, -

, -

COM -

(), -

: , -

10.

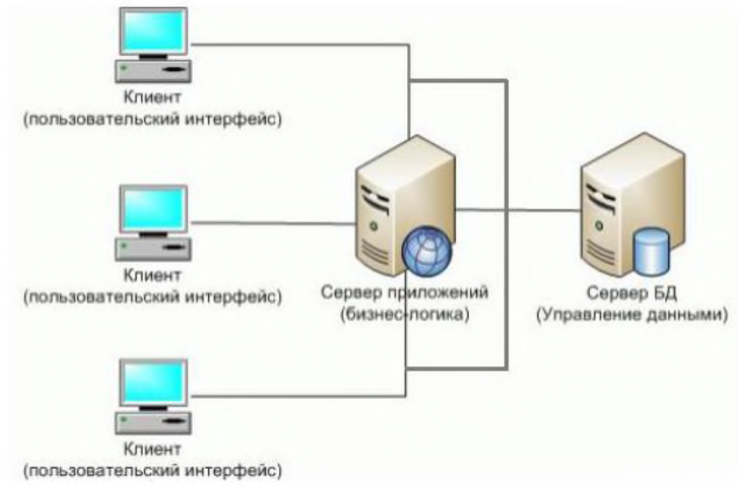


Рисунок 10 – Трехуровневая архитектура

MATLAB

GUID

MATLAB.

4.5.3

MATLAB

COM,

1.

GUID,

COM

MATLAB,

4.5.4

Microsoft - SQL Server Express.

Microsoft SQL Server Express

SQL Server, MSDE.

XML -

Microsoft SQL Server

SQL,

Transact-SQL,

SQL-92

Transact-SQL

Microsoft SQL Server
(ODBC) -

Open Database Connectivity

.NET Framework, Common Type System (

Microsoft .NET Framework).

, .NET Framework

SQL Server

Windows.

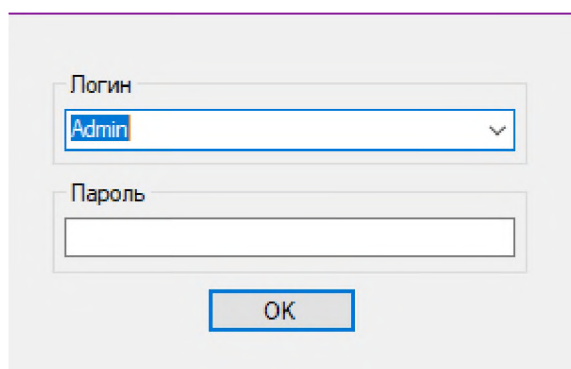
Windows,

SQL Server.

4.6

4.6.1

11

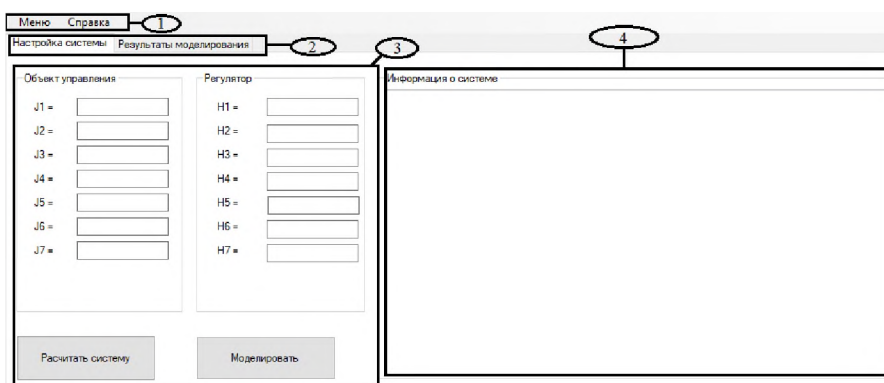


A login dialog box with a light gray background. It contains two input fields: "Логин" (Login) with a dropdown menu showing "Admin" and a small downward arrow, and "Пароль" (Password) with an empty text box. Below the fields is a blue "OK" button.

11 -

4.6.2

12.



The main application window features a menu bar with "Меню" and "Справка" (1). Below the menu bar are two tabs: "Настройки системы" and "Результаты моделирования" (2). The main area is divided into three sections: "Объект управления" (Control Object) with seven input fields labeled J1 through J7; "Регулятор" (Controller) with seven input fields labeled H1 through H7; and "Информация о системе" (System Information) (3), which is currently empty. At the bottom, there are two buttons: "Расчитать систему" (Calculate system) and "Моделировать" (Simulate) (4).

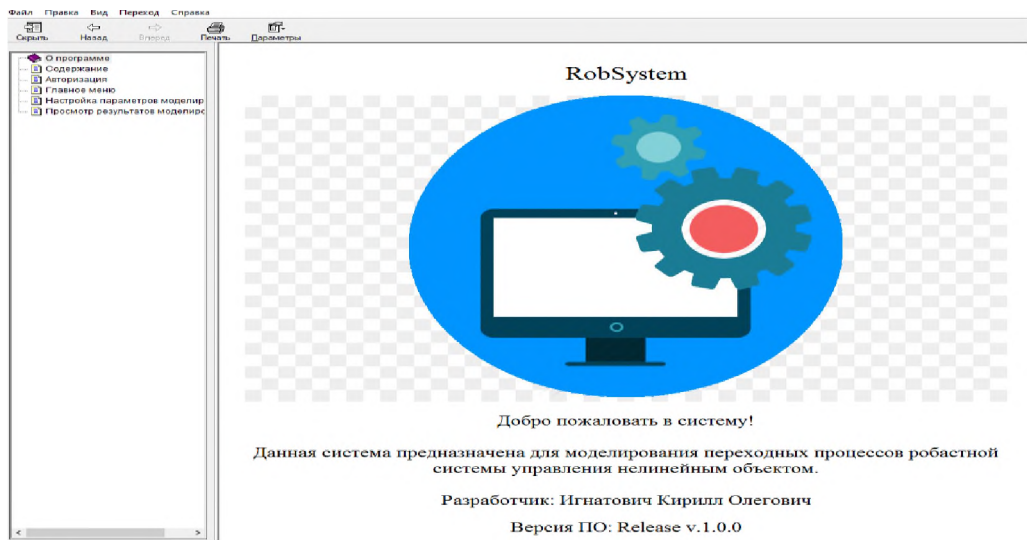
12 -

: « » , « » .

« »

« »

13.



13 -

« »

12

2

« » - ,

« » « »

3

12

,

4

12

,

<<

>>

4.6.3

:

<<

>>;

<<

>>.

<<

>>

<<

>>

:

;

<<

>>

<<

>>.

<<

>>

14.

Меню Справка

Настройка системы Результаты моделирования

Объект управления	Регулятор
J1 = <input type="text" value="3"/>	H1 = <input type="text" value="0,8"/>
J2 = <input type="text" value="3"/>	H2 = <input type="text" value="10"/>
J3 = <input type="text" value="1"/>	H3 = <input type="text" value="5"/>
J4 = <input type="text" value="0,5"/>	H4 = <input type="text" value="5"/>
J5 = <input type="text" value="5"/>	H5 = <input type="text" value="5"/>
J6 = <input type="text" value="1"/>	H6 = <input type="text" value="180"/>
J7 = <input type="text" value="2"/>	H7 = <input type="text" value="0,2"/>

Информация о системе

Объект:
 $(det) \cdot ab = Am \cdot e(t) + B$
 $Am = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1^2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot \cos(k1) & 1 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 2 \cdot 3 \cdot \cos(k1) \end{bmatrix}$
 $B = B0 \cdot (3 \cdot \sin(k1) + 3) \cdot (0,5 \cdot \arctg(k1) + 5) \cdot (1 + \sin(k2)^2)$
 Регулятор: H1 = 0,8; H2 = 10; H3 = 5; H4 = 5; H5 = 5; H6 = 180; H7 = 0,2;

Рассчитать систему

Моделировать

4.6.4

15.

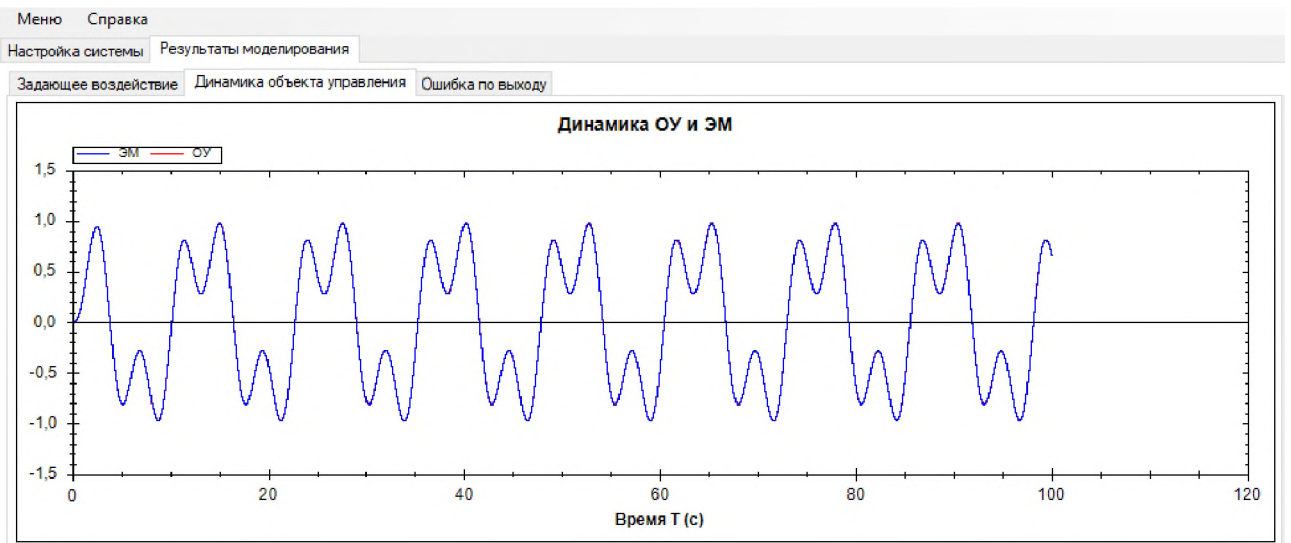


Рисунок 15 – Внешний вид окна «Динамика ОУ»

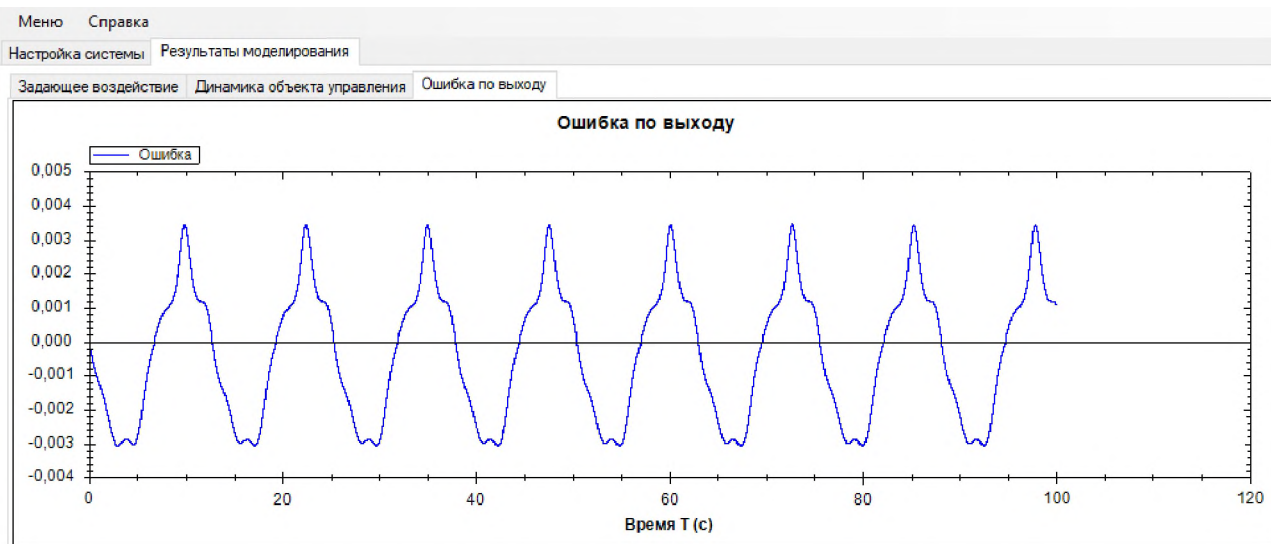


Рисунок 16 – Внешний вид окна «Ошибка»

< >

1 , . . . L -

/ . . //

. - 2006. - 2 (12). - . 94-101.

2 , . .

- / . .

// . - 2004. - 2 (8). - . 157-166.

3 , . .

/ . . //

. - 2005. - 1 (9). - . 122-128.

4 , . .

/ . .

, . . // , , . - 2006. -

6. - . 9-16.

5 , . .

/ . . , . . ,

. . // -

. - 2011. - 35. - . 108-116.

6 , . .

/ . . , . . // -

. - 2010. - 3. - . 23-32.

7 , . .

/ . . , . . . - : , 1992.

8 , . .

/ . . , . . //

. - 2014. - 3 (41). - . 121-129.

9 , . .

2017. - 10 (218). - . 3-9.

10 , . . / . . // . -

- / . . // . - 2001. - 3. - . 61-74.

11 , . . / . . // . - 2012. - 4 (34) - . 107 -118.

12 , 1. / . . - . . - .: , 2016. - 312 .

13 , . COM COM+. / . . , . - . . - .: - 2009 - 560 .

14 , . . / . . , . . . - . . - .: , 2011. - 226 .

15 , . . MATLAB. / . . // .: , , 2012. - 768 .

16 , . . () / . . // - .: , 2012.

17 , # 7.0 . // . - , . // . . - .: « », 2019. - 1024 .

18 , . # 7 .NET .NET Core / . , . // 8- .: . - .: « - », 2020 - 1328 .

19 , . . Microsoft Visual C# 2010 / . . // .: - , 2011. - 368 .

20 , . . SISO / . . // . - 2015. - 3 (45) - . 89 -100.

21 , . . . -
/ . . . , . . . // -

∴ , 2000.

22 19.201-78 ().

N 1). - M.: - , 2010.

23 . . . // XXI :

: . XIX . - . - : -

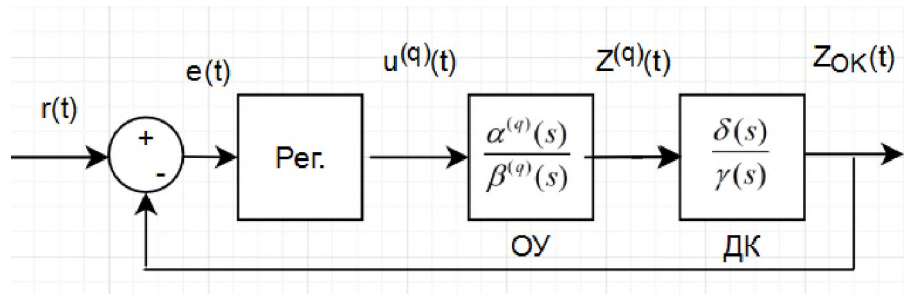
. - , 2018. - .3. - . 185-186.

24 . . . -

// . - 2020. 25. - . 95-99.

(27) (11),

. 1.



.1 -

.1: $r(t)$ -

; $e(t)$ -

; -

; $u(q(t))$ -

q;

q; $Z q (1)$ -

q.

$$P(s) = \frac{a(s)}{b(s)} = \frac{1}{s} \frac{d(s)}{r(s)}$$

(1)

$d(s)$ -

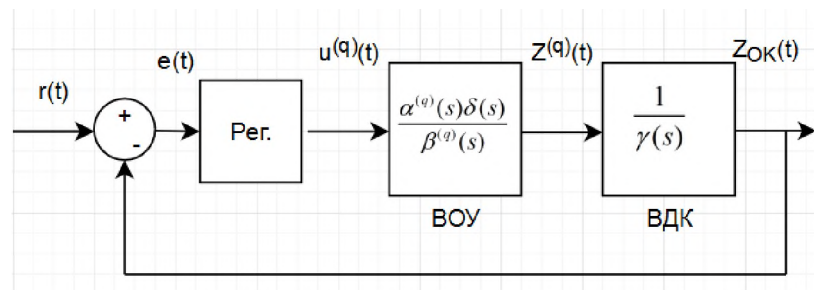
$p-1$.

$$z^{(q)}(s) = \frac{S(s) \alpha^{(q)}(s)}{0 \quad q} u^{(q)}(s) = \frac{d(s)}{0 \quad 4(s)} u^{(q)}(s), \quad (2)$$

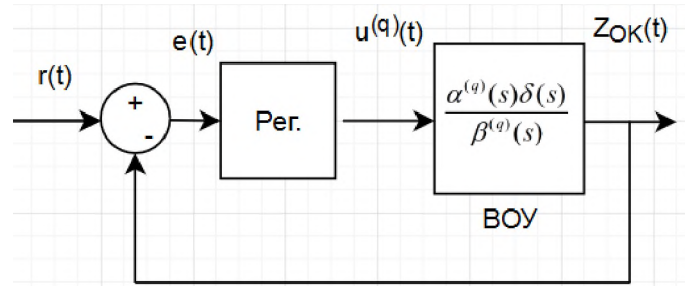
:

$$u(s) = \frac{1}{r(s)} \frac{1}{(T^*s + 1)^2} (?) (s), \quad (3)$$

.2 .3.



.2 -



.3 -

[6]

.3,

T^*

L-

L-

$$\circ = \frac{k!}{z_i} (Tksk + ' \xi e i T^k - l s k - 1 + 1) + (d^{\circ} s p - 1 + \dots + d - s + d n_i), \quad (4)$$

0 - , -

:

$$\% = \frac{k!}{(-1)! 1!} = k \quad 2 = \frac{!}{(-2)! 2!} \quad (5)$$

$$T^* << 1, \quad (4)$$

:

$$\begin{aligned} (s) &= T k s k + p + T k - 2 p k + T \dots s k + p - 1 + \dots + \\ &+ t - 2 (- 2 + \dots + \dots + \dots - \dots + T k - 2 p k - 2) s p + 2 + \\ &+ (- 1 + \dots + - 3 \quad 2 \dots + \dots + 9 I T k - 2 p k - 1 + T k - 4 p k - p s p + \\ &+ (1 + k - T P_1 + 0 k - 2 T 2 P 2 + \dots + 9 I T k - 1 P k - 1 + T k \dots) s p + \\ &+ (d 0 + P 1 + 2 - \Pi^* + P 3 k - 2 T^* + \dots) s^{n-1} + \\ &+ (d 1 + P 2 + P \% k - \Pi^* + P 4 - 2 T^* + \dots) s^{n-2} + \\ &+ \dots + (d n - 2 + P n - 1 + 3 - \Pi^*) s + (d n - 1 + P n) a \end{aligned} \quad (6)$$

:

$$\begin{aligned} T k - 1 (\% + T \dots) &= T k - 1 \%, \dots, \\ T.2 (\% k - 2 + - T P \dots + \dots + 0 I T k - 3 P k - 3 + T, k - 2 P k - 2) &= t \% - 2 \\ T^* (9 k - 1 + e k - 2 T P \dots + e k - 3 T 2 P 2 + \dots + e, T k - 2 P k - 2 + T k - 1 P k - 2) &= T \% k +, \\ (1 + 9 k - 1 T P 1 + e k - 2 T 2 P 2 + \dots + \% T - 1 P k - 1 + T k P k) &= 1, \\ (d 0 + P 1 + P 2 \% - \Pi^* + P 3 k - 2 T^* + \dots) &= d 0 \\ (d 1 + P 2 + 3 - \Pi^* + P 4 - 2 T^* + \dots) &= d 1 \\ (d p - 1 + P p) &= d p - 1. \end{aligned} \quad (7)$$

$$(6) \quad (7) \quad (4) \quad :$$

$$\begin{aligned} (s) &= T k s k + p + T k - 2 p k + T \dots s k + p - 1 + \dots + T \dots 2 s p + 2 + \\ &+ T \% 4 s p + 1 + s p + d 0 s p - 1 + d s p - 2 + \dots + d p A \end{aligned} \quad (8)$$

, L -

(27),

,

[6]:

$$\begin{aligned} 0 < T < T^* 5 \\ (T + X < \frac{0.93}{(-1)^{dj}} \chi(T) 2 < \dots, \dots, \dots) & \quad (9) \end{aligned}$$

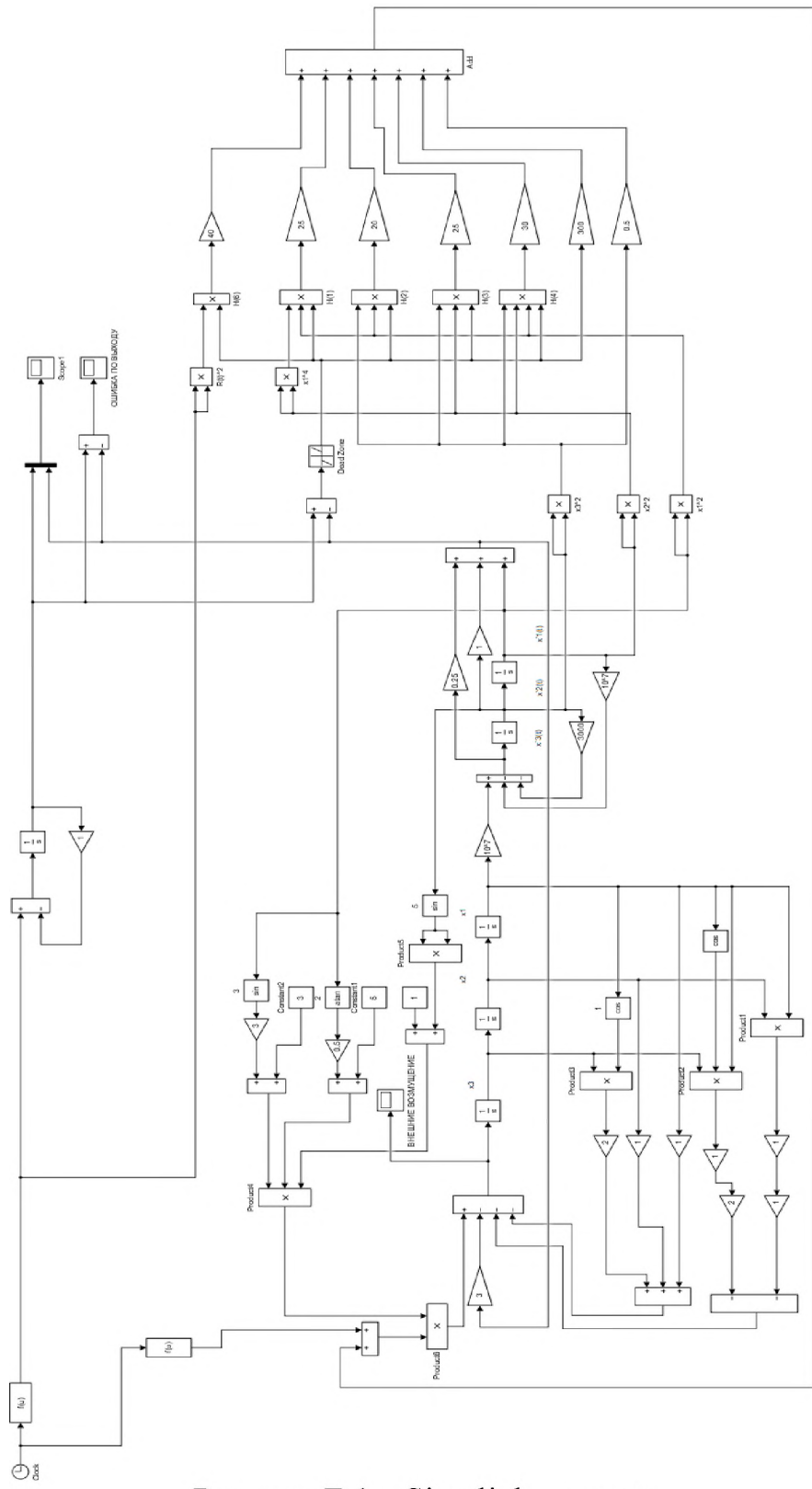
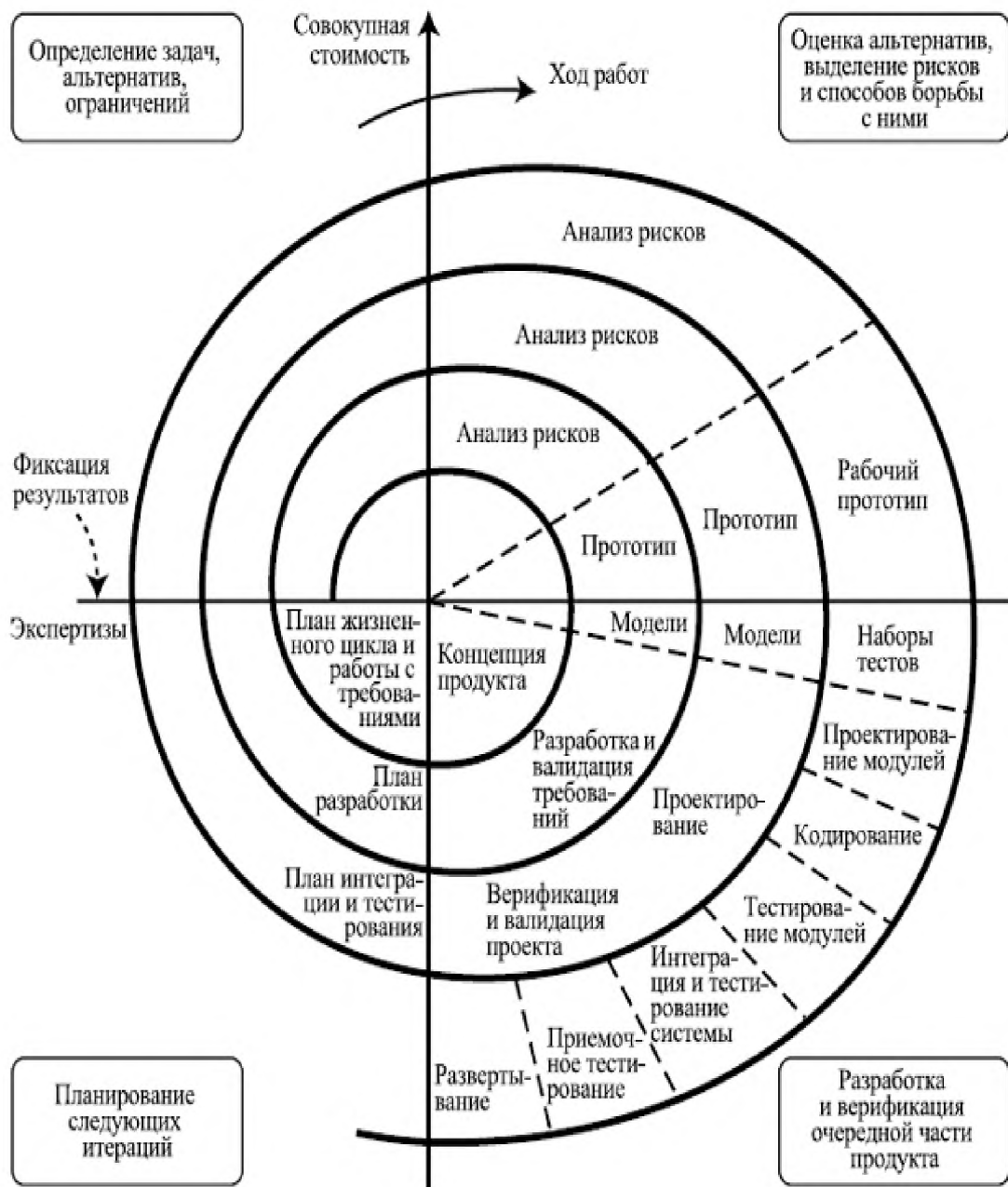
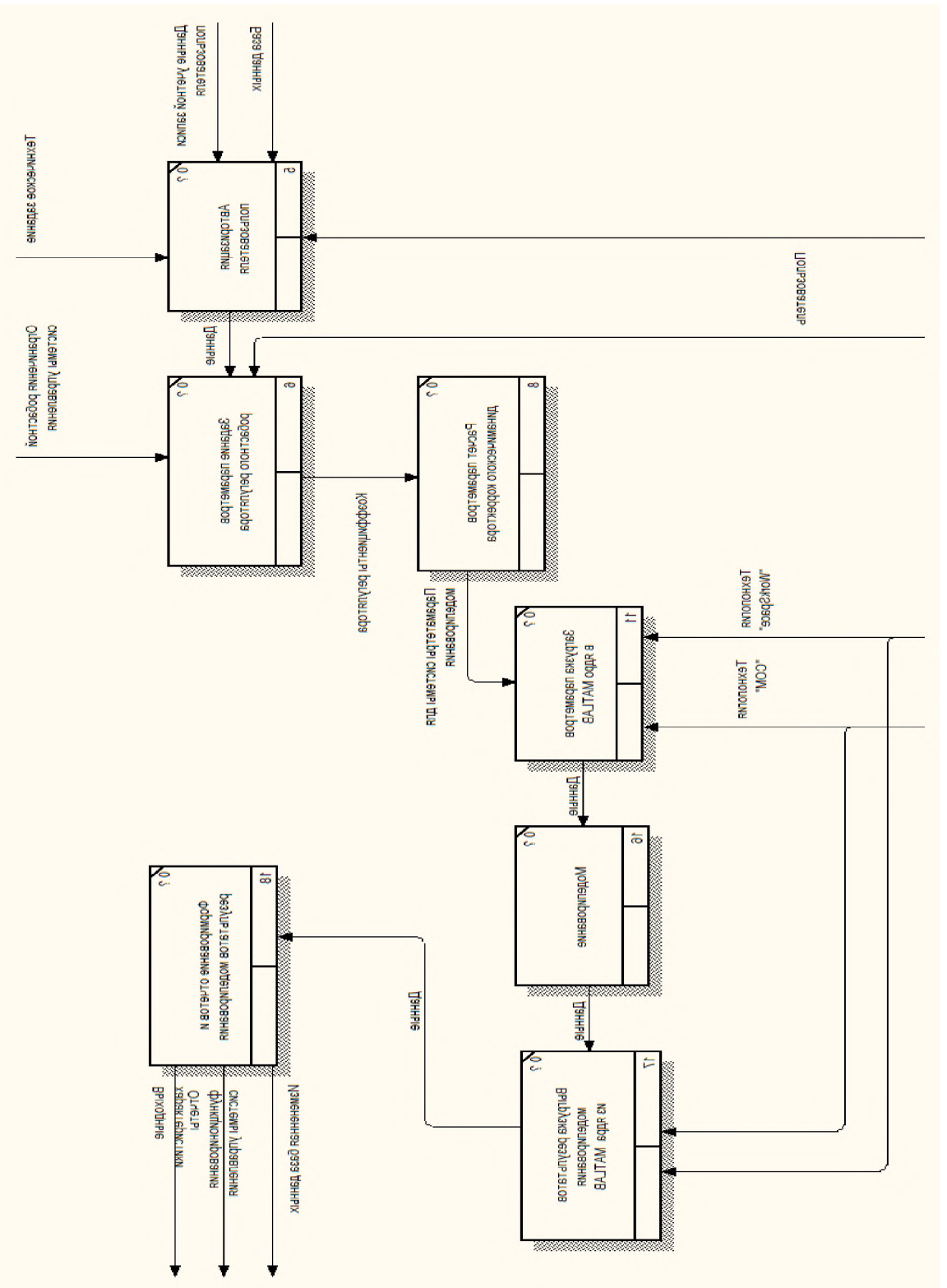


Рисунок Б.1 – Simulink – схема





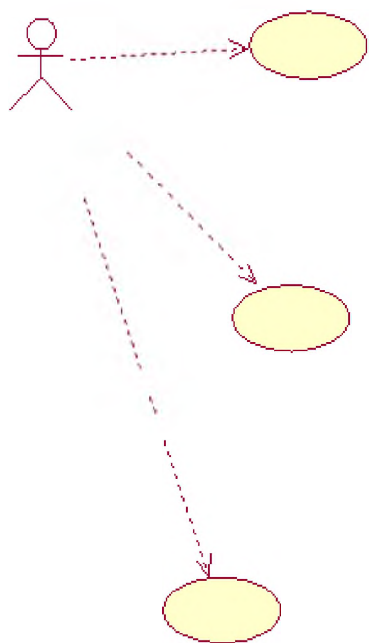
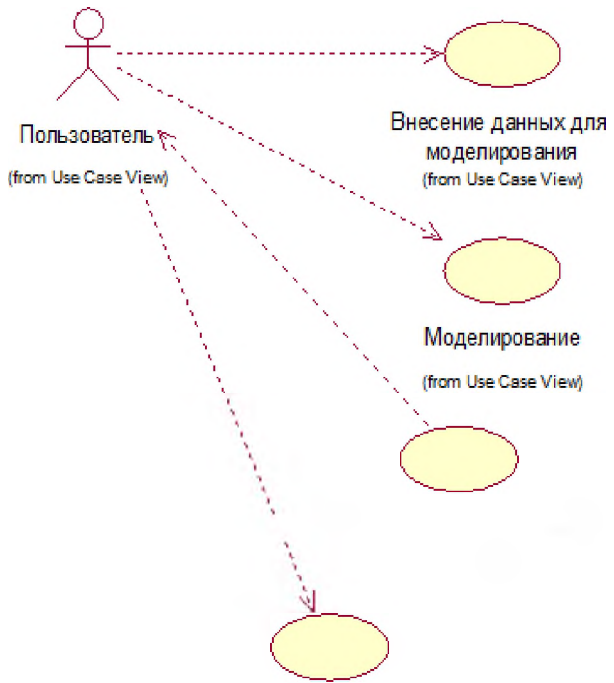
У

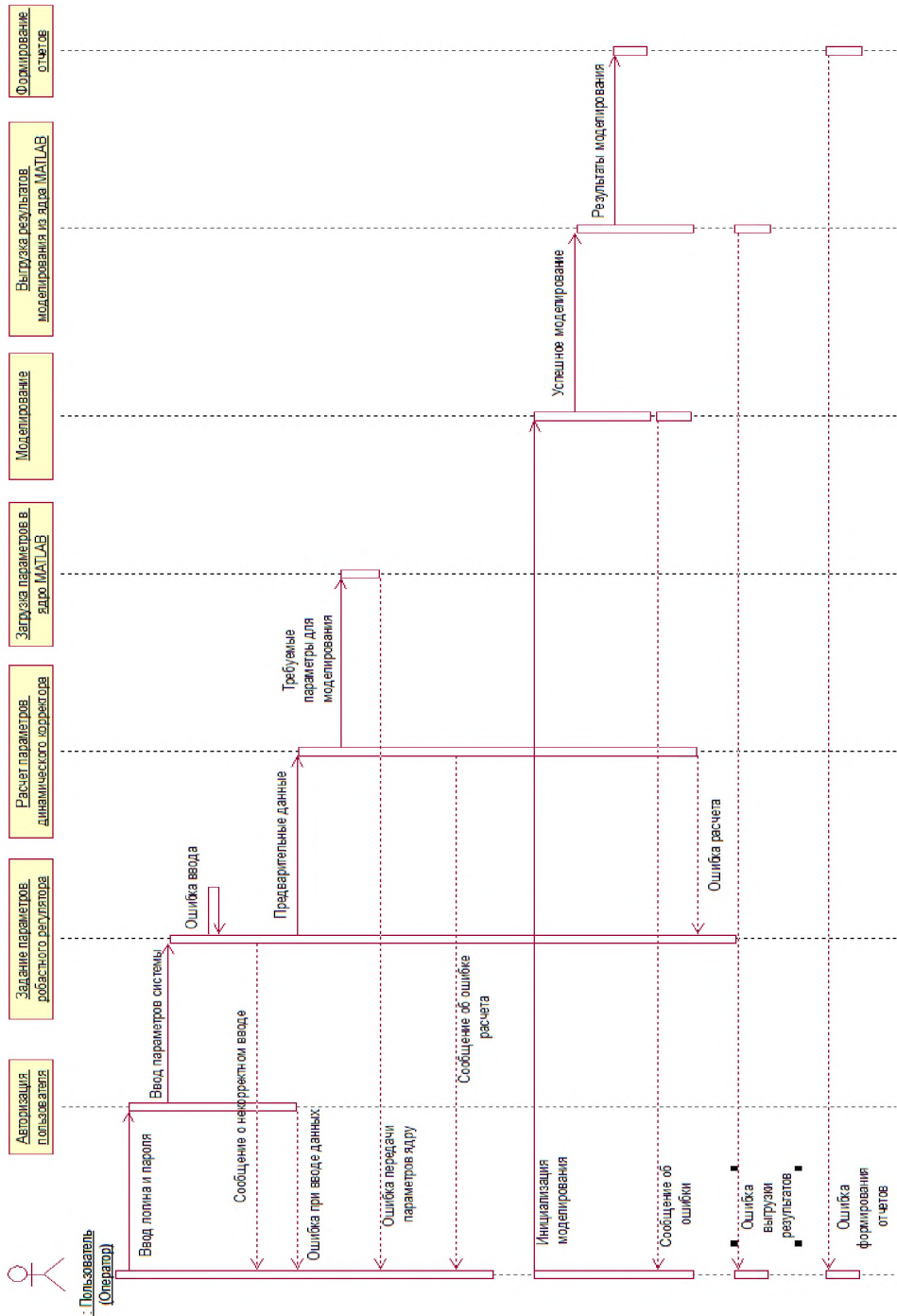
Д.1 - Д

ММ

ар

ан





ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Д

Диаграмма состояний

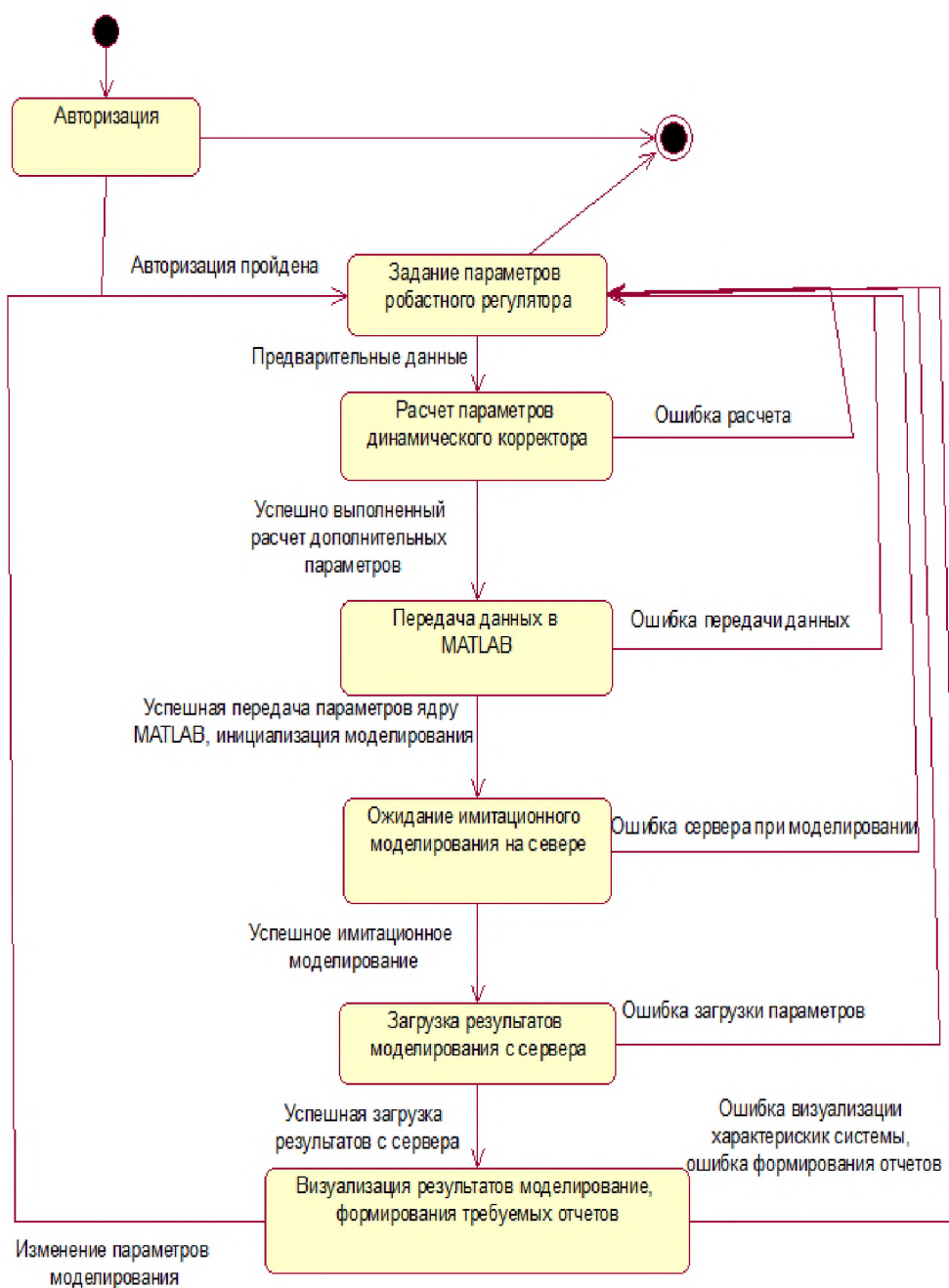
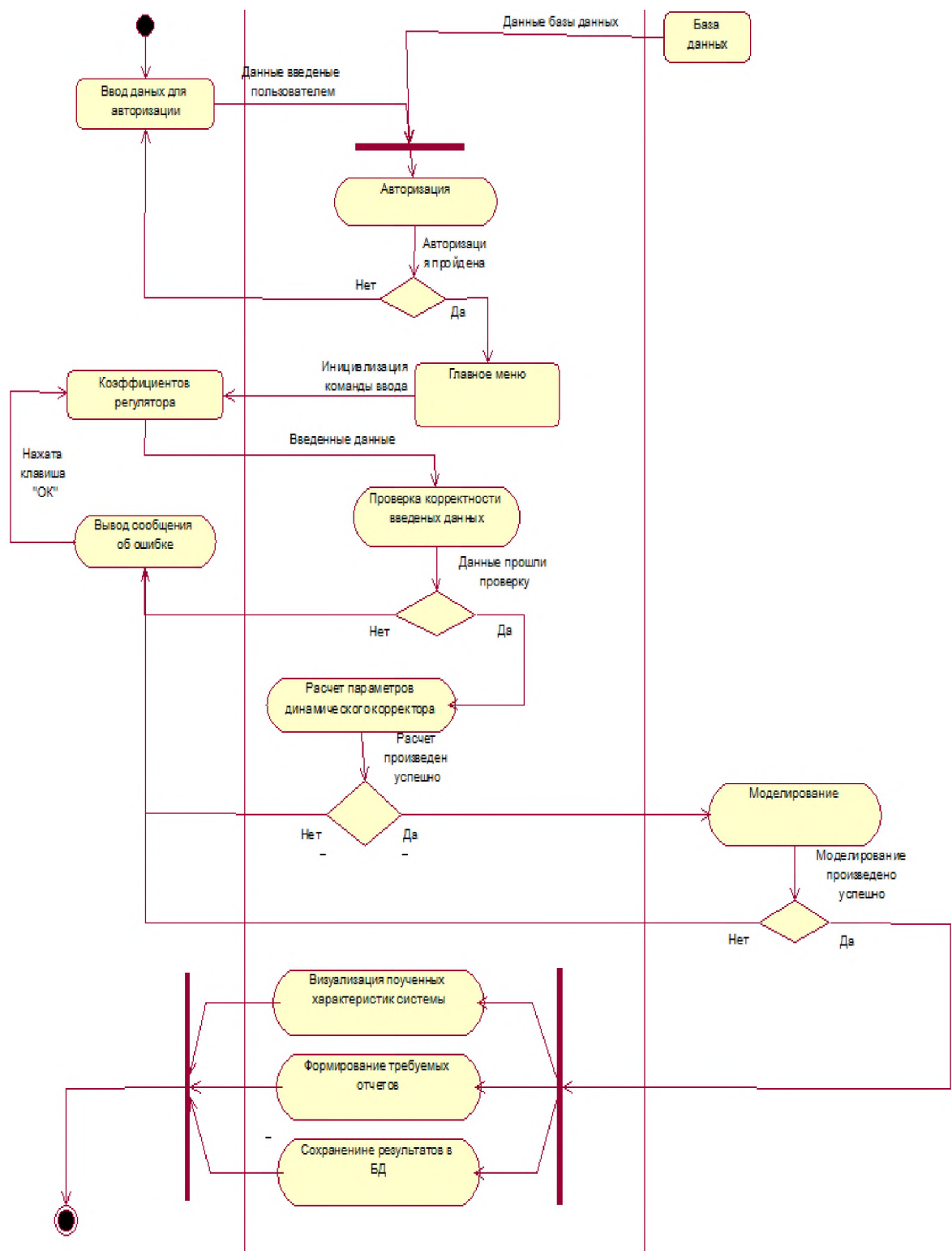
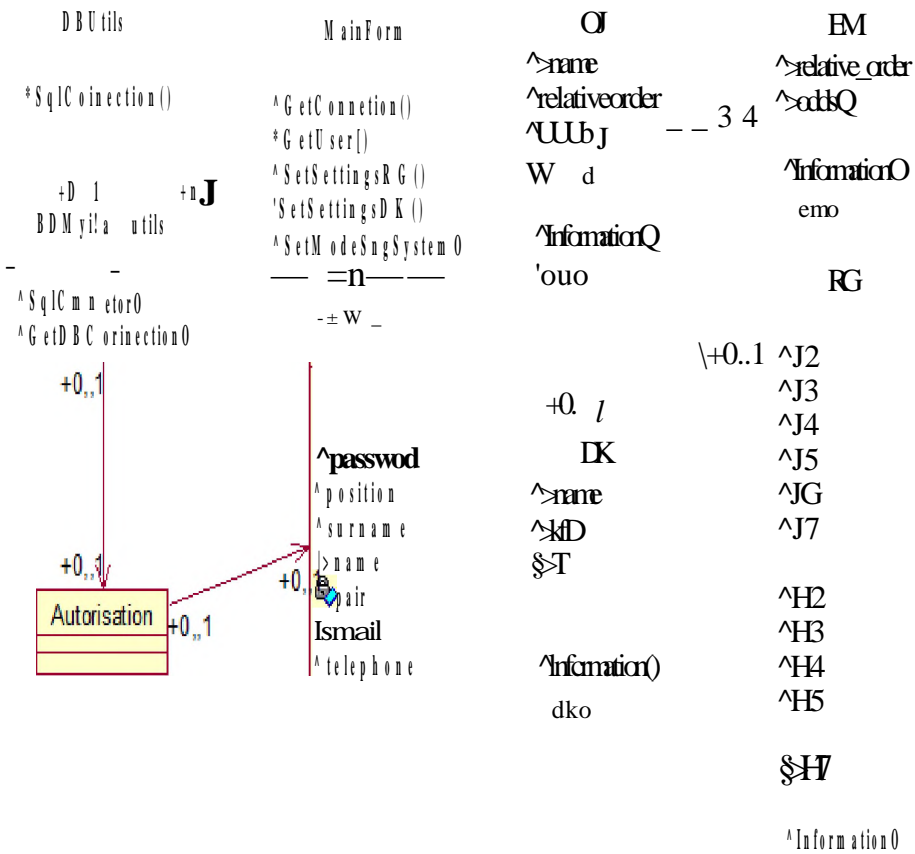


Рисунок Д.3 – Диаграмма состояний

Изм.	Лист	№ докум.	Подпи-	Дата





.5 -

