Оглавление

[1 Исследование динамики объекта 3](#_Toc74086081)

[1.1 Технические требования к системе 3](#_Toc74086082)

[1.2 Исходные данные 3](#_Toc74086083)

[1.3 Переходные процессы исходной системы 4](#_Toc74086084)

[2 Параметры цифрового закона управления в канале по углу рысканья 8](#_Toc74086085)

[2.1 Составление упрощенной системы 8](#_Toc74086086)

[2.2 Вычисление коэффициентов обратной связи 9](#_Toc74086087)

[2.3 Построение области устойчивости 11](#_Toc74086088)

[2.4 Составление полной модели бокового движения самолета 15](#_Toc74086089)

[2.5 Подбор коэффициента обратной связи в канале элеронов 16](#_Toc74086090)

[2.6 Построение ПФЧХ системы 20](#_Toc74086091)

[2.7 Обеспечение требуемого расхода по 21](#_Toc74086092)

[2.8 Алгоритм управления 21](#_Toc74086093)

[3 Проверка требований к системе 27](#_Toc74086094)

[Заключение 29](#_Toc74086095)

[Приложения 30](#_Toc74086096)

[А. Листинг программы для выполнения курсовой работы 30](#_Toc74086097)

[Список использованных источников 38](#_Toc74086098)

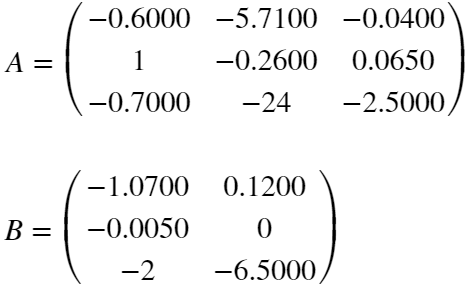
# Исследование динамики объекта

## Технические требования к системе

1. Затухание короткопериодических колебаний при управлении по wy и b должно быть не менее, чем в 10 раз за период колебаний.
2. Собственная частота колебаний по wy и b должна быть не менее w0.
3. Переходный процесс при управлении wx от ручки летчика дожен иметь практически монотонный характер, допустимое перерегулирование 5%. Время процесса не должно превышать t\*=1с.,
4. Расход ручки на приращение dw\* в установившемся режиме управления по wx должен соответствовать величине R\*.
5. Параметры закона управления должны обеспечивать не менее, чем двукратный запас устойчивости по любому коэффициенту Kij.
6. Алгоритмы цифрового управления должны обладать свойствами собственной устойчивости и реализуемости.

## Исходные данные

Вариант: 15



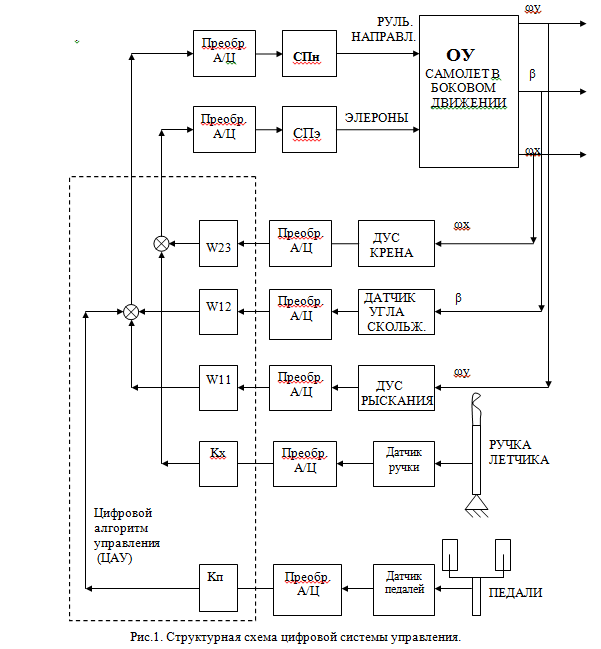


Рисунок Структурная схема цифровой системы управления.

## Переходные процессы исходной системы

Графики переходных процессов при начальных условиях – угол скольжения равен 5 градусам представлены на рисунке 1

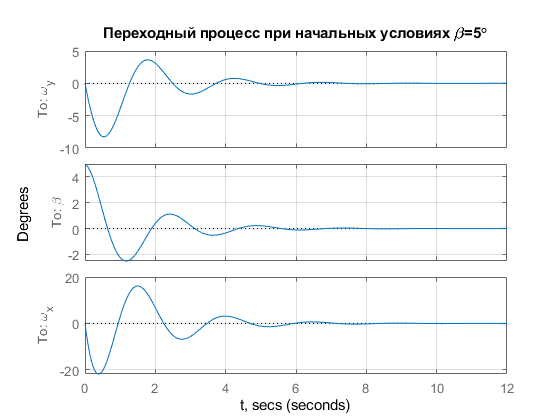


Рисунок 1 – Графики переходных процессов при заданных начальных условиях.

Графики переходных процессов при отклонении руля направления на 5 градусов и отклонении элеронов на 5 градусов представлены на рисунке 2.

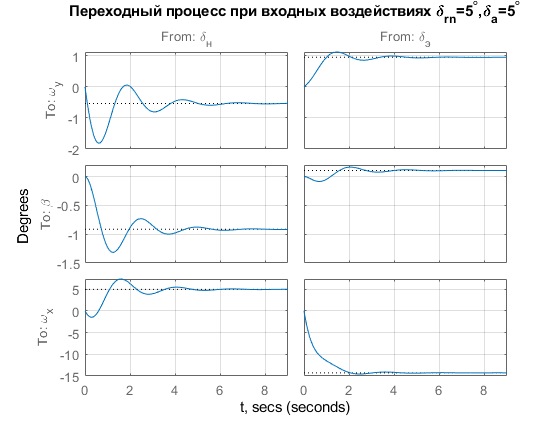


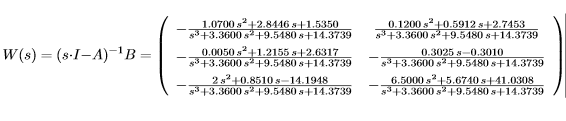
Рисунок Графики переходных процессов при воздействии.



Рисунок ЛАЧХ передаточной функции по .

Пик ЛАЧХ передаточной функции по ω𝑦 соответствует собственной частоте системы ω0=2.65 рад/c.

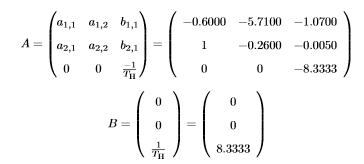
Матричная передаточная функция исходной системы



# Параметры цифрового закона управления в канале по углу рысканья

## Составление упрощенной системы

Матрицы пространства состояний для упрощенной системы будут иметь вид:



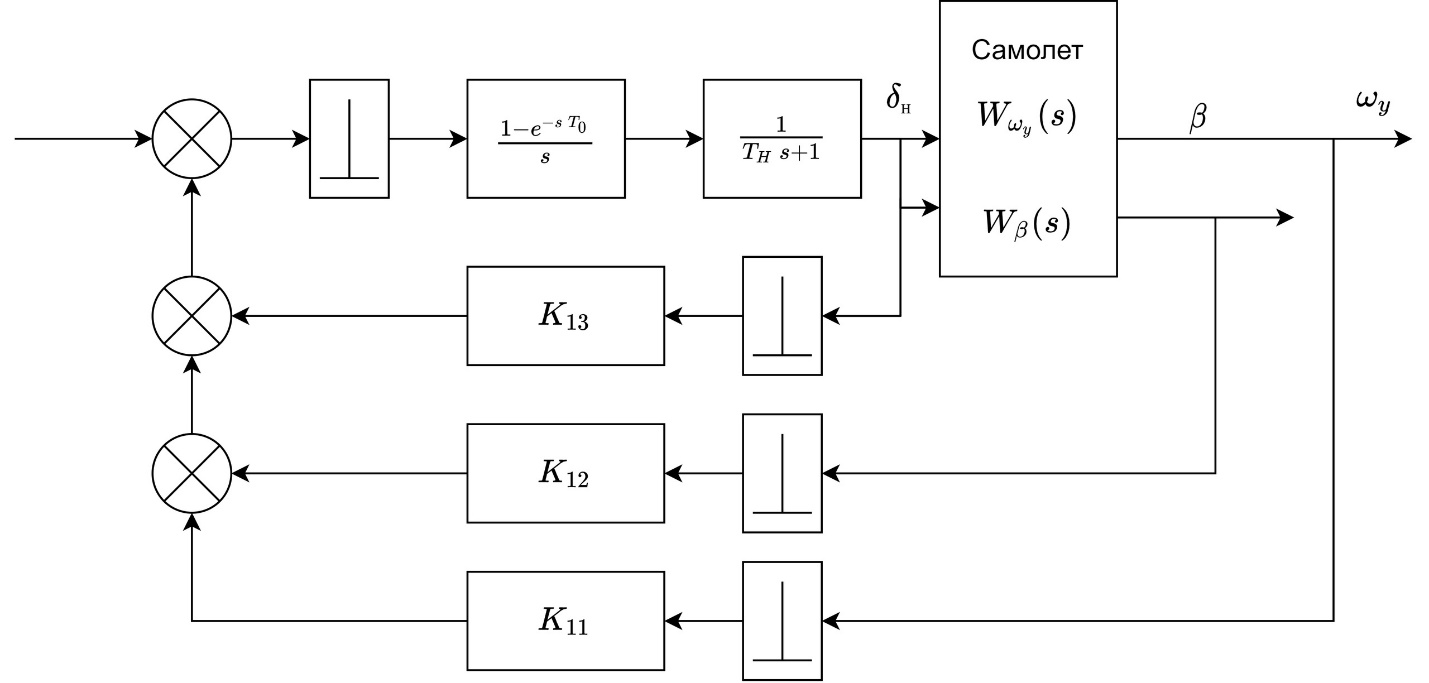
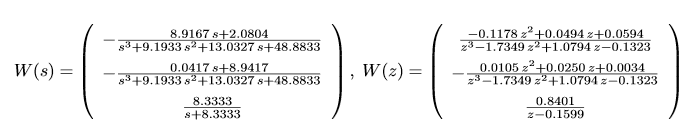


Рисунок Структурная схема упрощенной системы.

Матричная передаточная функция разомкнутой системы по и .



## Вычисление коэффициентов обратной связи

Желаемый характеристический многочлен соответствует полиному Баттерворта 3 порядка:

Для выбора коэффициентов обратной связи используется метод Аккермана:

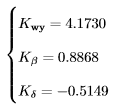
Где Y – матрица управляемости:

- матричный многочлен с желаемыми коэффициентами характеристического уравнения:

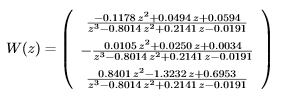
*.*

Однако метод Аккермана применяется для систем с отрицательной обратной связью, а текущая структура подразумевает положительную обратную связь. Поэтому полученные значения коэффициентов следует умножить на -1.

Значения коэффициентов с учетом обратной связи:



Матричная передаточная функция замкнутой системы. Как видно, знаменатель ПФ равен желаемому.



При полученных значениях коэффициентов переходные процессы будут иметь вид:

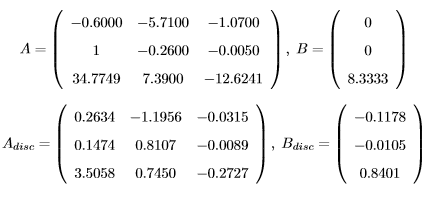


Рисунок Переходный процесс замкнутой системы по .



Рисунок Переходный процесс замкнутой системы по .

Матрицы пространства состояний замкнутой системы в непрерывной и дискретной форме:



## Построение области устойчивости

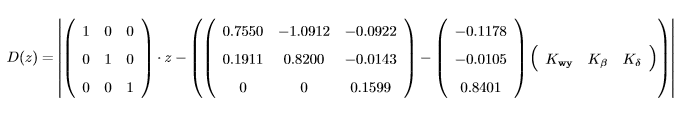
Характеристический многочлен замкнутой системы с отрицательной обратной связью находится следующим образом:

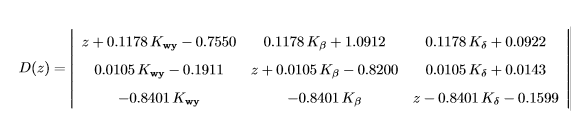
,

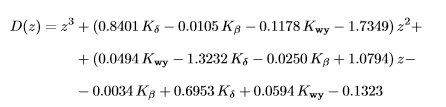
где E – единичная матрица.

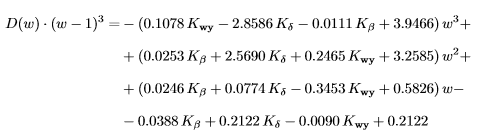
Однако поскольку рассматриваемая система имеет положительную обратную связь, в данном пункте значение вектора коэффициентов учитывается как

.

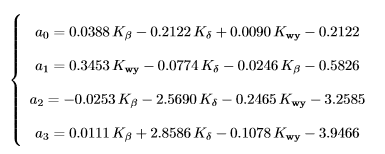


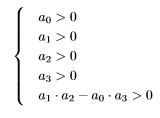






Коэффициенты многочлена:



Условия устойчивости для системы 3 порядка согласно критерию Гурвица:

Построение областей с учетом знака обратной связи было выполнено при следующих условиях: , , .

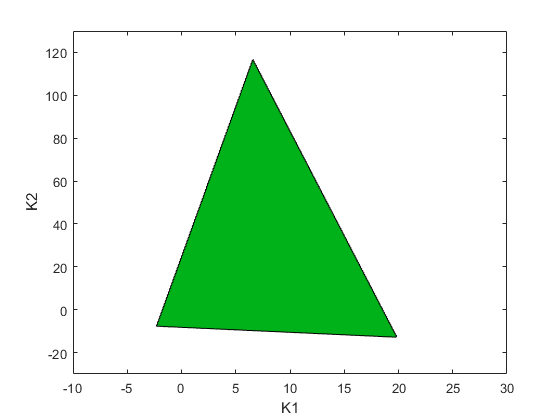


Рисунок Область, в которой выполняются условия .

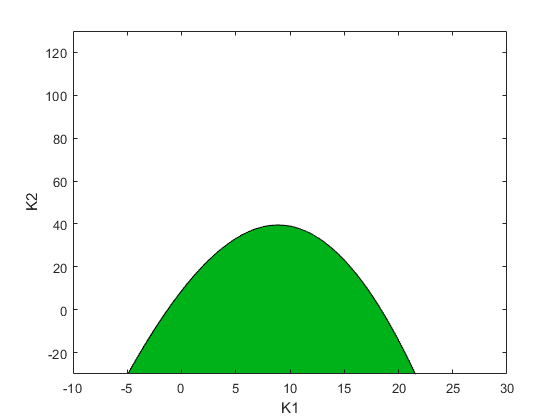


Рисунок Область, в которой выполняется нелинейное условие .

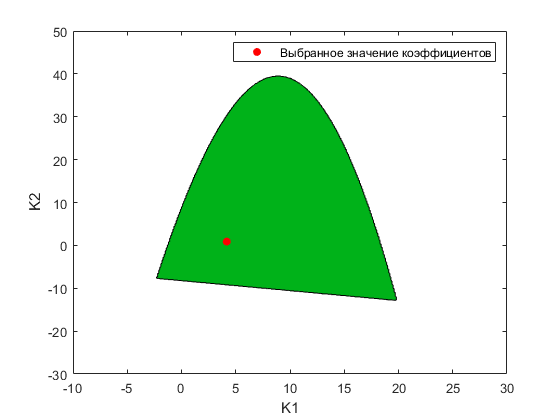


Рисунок Пересечение указанных выше областей – область устойчивости системы по коэффициентам .



Рисунок Область, соответствующая двойному запасу устойчивости по всем коэффициентам.

Для построения области, соответствующей двойному запасу устойчивости, во всех неравенствах коэффициенты заменяются на соответственно.

По рисунку видно, что полученные значения коэффициентов находятся в области устойчивости. При увеличении значений коэффициентов вдвое, новые значения так же расположены в области, следовательно запас устойчивости по коэффициентам больше двух.

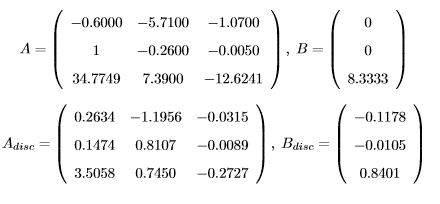
Области были построены с по следующему алгоритму:

1. Задается сетка , , с шагом соответственно. – границы построения.
2. Для каждого узла сетки проверятся выполнение одного или нескольких неравенств.
3. Если неравенство выполняется, то узел сетки считается принадлежащим области устойчивости, результат записывается в матрицу в виде

или .

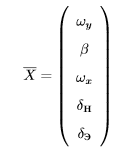
1. Получившаяся матрица булевых значений отображается в виде изображения.
2. Если в результате отображается, что система устойчива в определенной области, то процесс прошел успешно. Если отображается, что система устойчива на всей плоскости параметров, за исключением некой области, либо не устойчива для любых областей, то результат соответствует условиям и , что так же является корректным, но формально критерий Гурвица записывается как и , так что следует умножить весь полином на -1 и повторить процедуру еще раз.

## Составление полной модели бокового движения самолета

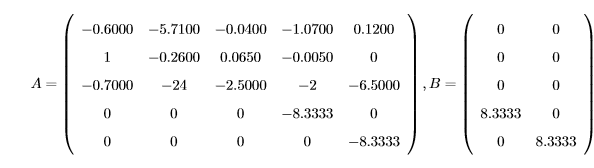


Приведенные выше матрицы пространства состояний соответствуют упрощенной системе.

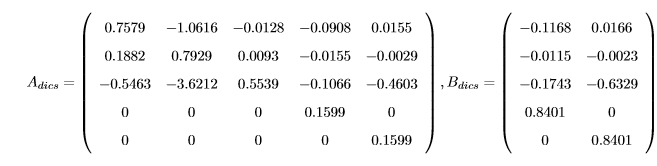
Необходимо дополнить вектор состояния координатами и :



Тогда система уравнений для полной непрерывной системы будет иметь вид:



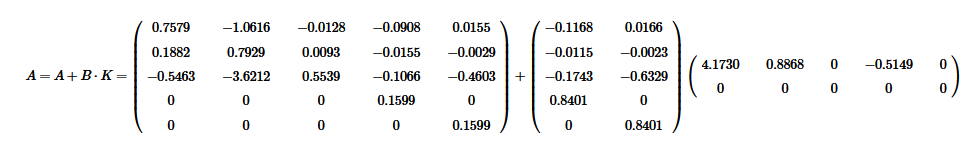
Матрицы пространства состояний полной системы в дискретной форме:



## Подбор коэффициента обратной связи в канале элеронов

Для того, чтобы переходный процесс по удовлетворял условиям задачи, значение коэффициента обратной связи можно подобрать. Критическое значение коэффициента находится по ЛПЧХ , таким образом коэффициент находится в диапазоне .

Дискретная матрица А для замкнутой по и , но разомкнутой по системе находится следующим образом:

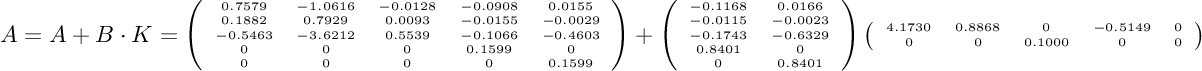


Передаточная функция разомкнутой системы по :



Рисунок – Псевдочастотные характеристики разомкнутой системы.

При переходный процесс не имеет перерегулирования и длится менее 1 с, что удовлетворяет условиям задачи. Переходные процессы при различных значениях коэффициента приведены на рисунках ниже. С учетом положительной обратной связи:



Матричная ПФ замкнутой системы:

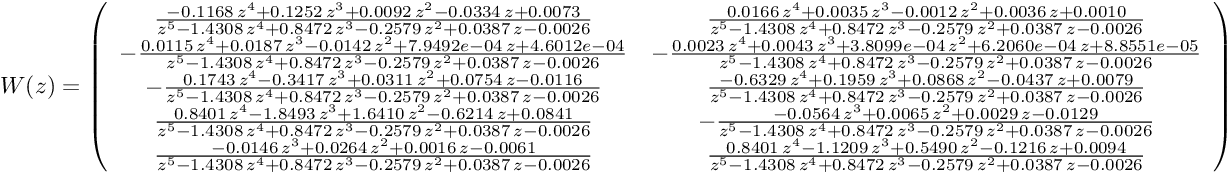




Рисунок - Переходный процесс замкнутой системы по при .



Рисунок - Переходный процесс замкнутой системы по при .



Рисунок - Переходный процесс замкнутой системы по при .



Рисунок - Переходный процесс замкнутой системы по при .

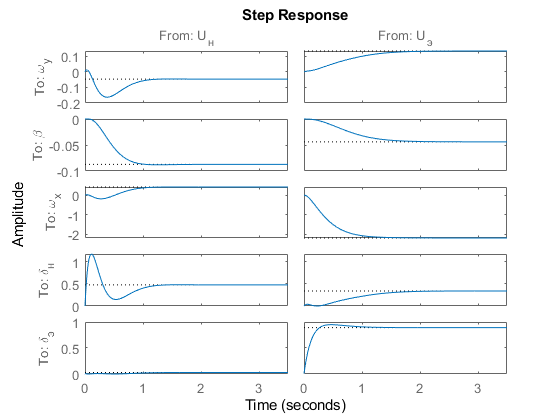


Рисунок - Переходные процессы всей системы

## Построение ПФЧХ системы



Рисунок - Псевдочастотные характеристики замкнутой системы.

## Обеспечение требуемого расхода по

Значение в установившемся режиме =-1.984.



Рисунок - Переходный процесс по при заданном расходе при отклонении ручки на 10 мм.

## Алгоритм управления

Полная система с цифровым алгоритмом управления может быть описана схемой, представленной на рисунке 19. На вход цифрового управляющего устройства поступает 6 сигналов: положение ручки и положение педалей . Выходами являются управляющие сигнала в каналах элеронов и руля направления: .



Выражение вида



Требует 2 регистра для промежуточных значений T0 и T1 (в один записываются результаты умножения, в другой умножения), n регистров для входных значений, n ячеек для констант, 1 регистр выходного значения Y.

В процессе вычисления происходят следующие операции:

1. Перемещение входных значений в соответствующие регистры.
2. Умножение на : и перемещение содержимого регистра T0 в регистр T1: .
3. операций умножения и сложения состоящих из последовательности: , где .
4. Перемещение Y=T1.

В результате суммарное число операций для n>1:

* Сложение:
* Умножение:
* Перемещение:



Обозначим используемые регистры для всех переменных и коэффициентов

|  |  |
| --- | --- |
| Символ | Ячейка |
| *ωy* | X1 |
| *β* | X2 |
| *δ*н | X3 |
| *d*п | X4 |
| *ωx* | X5 |
| *dx* | X6 |
| *U*н | Y1 |
| *U*э | Y2 |
| *K*1*,*1 | C1 |
| *K*1*,*2 | C2 |
| *K*1*,*3 | C3 |
| *K*п | C4 |
| *K*2*,*3 | C5 |
| *Kx* | C6 |
| промежуточный регистр для умножения | T0 |
| промежуточный регистр для сложения | T1 |

Алгоритм:

1. Переместить входное значение *ωy* в ячейку X1.
2. Переместить входное значение *β* в ячейку X2.
3. Переместить входное значение *δ*н в ячейку X3.
4. Переместить входное значение *d*п в ячейку X4. 5. Переместить входное значение *ωx* в ячейку X5.
5. Переместить входное значение *dx* в ячейку X6.
6. Умножить содержимое ячейки C1 на содержимое ячейки X1, результат записать в T0.

*T*0 = *C*1 · *X*1

1. Переместить содержимое ячейки T0 в ячейку T1.

*T*1 = *T*0

*T*1 = *K*1*,*1 · *ωy*[*k*]

1. Умножить содержимое ячейки C2 на содержимое ячейки X2, результат записать в T0.

*T*0 = *C*2 · *X*2

1. Прибавить к содержимому ячейки T1 содержимое ячейки T0, результат поместить в T1.

*T*1+ = *T*0

*T*1 = *K*1*,*1 · *ωy*[*k*] + *K*1*,*2 · *β*[*k*]

1. Умножить содержимое ячейки C3 на содержимое ячейки X3, результат записать в T0.

*T*0 = *C*3 · *X*3

1. Прибавить к содержимому ячейки T1 содержимое ячейки T0, результат поместить в T1.

*T*1+ = *T*0

*T*1 = *K*1*,*1 · *ωy*[*k*] + *K*1*,*2 · *β*[*k*] + *K*1*,*3 · *δ*н[*k*]

1. Умножить содержимое ячейки C4 на содержимое ячейки X4, результат записать в T0.

*T*0 = *C*4 · *X*4

1. Прибавить к содержимому ячейки T1 содержимое ячейки T0, результат поместить в T1.

*T*1+ = *T*0

*T*1 = *K*1*,*1 · *ωy*[*k*] + *K*1*,*2 · *β*[*k*] + *K*1*,*3 · *δ*н[*k*] + *K*п · *d*п

1. Переместить содержимое ячейки T1 в выходной регистр Y1.

*U*н = *K*1*,*1 · *ωy*[*k*] + *K*1*,*2 · *β*[*k*] + *K*1*,*3 · *δ*н[*k*] + *K*п · *d*п

1. Умножить содержимое ячейки C5 на содержимое ячейки X5, результат записать в T0.

*T*0 = *C*5 · *X*5

1. Переместить содержимое ячейки T0 в ячейку T1.

*T*1 = *T*0

*T*1 = *K*2*,*3 · *ωx*[*k*]

1. Умножить содержимое ячейки C6 на содержимое ячейки X6, результат записать в T0.

*T*0 = *C*6 · *X*6

1. Прибавить к содержимому ячейки T1 содержимое ячейки T0, результат поместить в T1.

*T*1+ = *T*0

*T*1 = *K*2*,*3 · *ωx*[*k*] + *Kx* · *dx*[*k*]

1. Переместить содержимое ячейки T1 в выходной регистр Y2.

*U*э = *K*2*,*3 · *ωx*[*k*] + *Kx* · *dx*[*k*]

По приведенному выше алгоритму можно посчитать, что понадобится:

* Регистров для входных значений: 6
* Регистров для констант: 6
* Регистров для выходных значений: 2
* Промежуточных регистров: 2
* Всего регистров: 14
* Операций умножения: 6
* Операций сложения: 4
* Перемещений: 10
* Всего операций: 20

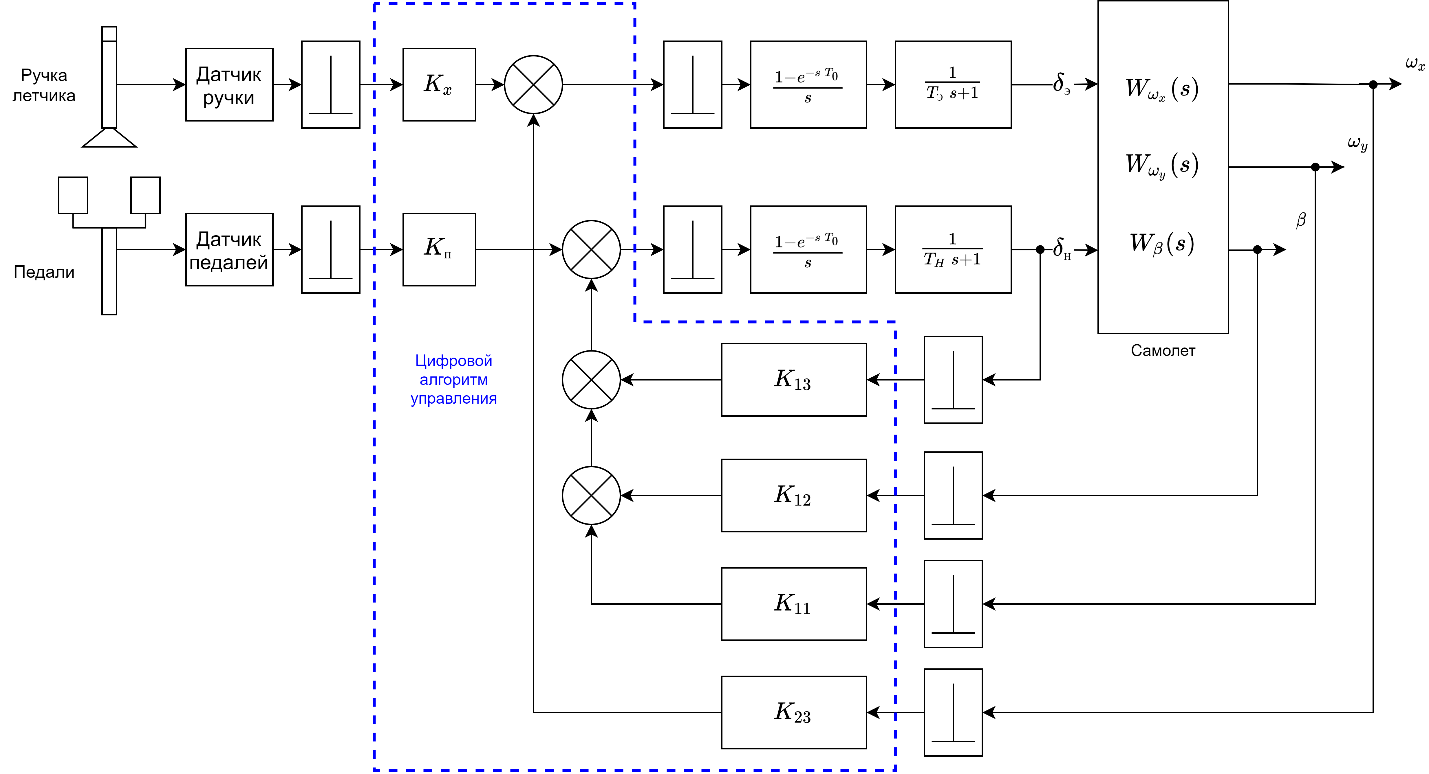


Рисунок – Схема системы.

# Проверка требований к системе

Для проверки двукратного запаса устойчивости были построены графики переходных процессов при удвоенных коэффициентах обратной связи. Результат, приведенный на рисунке 20 говорит о том, что система устойчива.

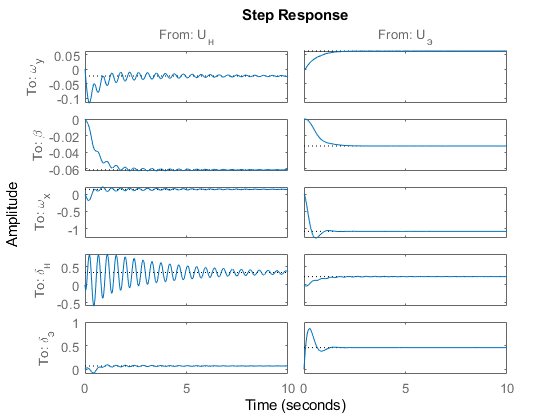


Рисунок – Переходные процессы при удвоенных коэффициентах.

При переходных процессах с выбранными коэффициентами (рисунок 21) колебания затухают за период более, чем в 10 раз.

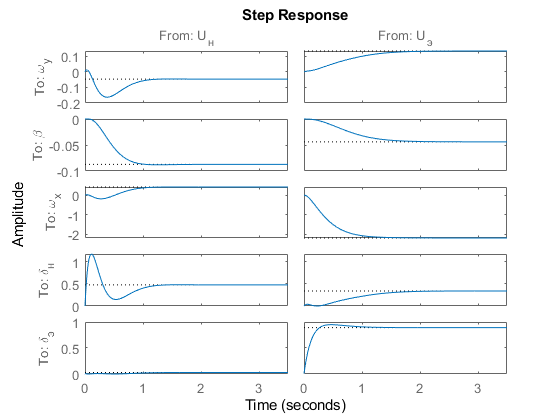


Рисунок – Переходные процессы системы с выбранными коэффициентами.

Время переходного процесса по не превышает 1 секунды, перерегулирование отсутствует.



Рисунок – Переходный процесс по .

# Заключение

В ходе курсовой работы была исследована динамика САУ ЛА самолётом, а также синтезирован цифровой алгоритм управления.

В процессе исследования динамики было выяснено, что система удовлетворяет техническим требованиям. Для улучшения динамики системы была построена область устойчивости, найдены коэффициенты обратных связей, произведён частотный синтез системы.

# Приложения

## Листинг программы для выполнения курсовой работы

Ниже приведен листинг скрипта на языке MATLAB (2020b) для выполнения курсовой работы.

|  |
| --- |
| %% Начальные условия    clc  Kx=1;  Ts=0.22; % Время дискретизации  Tyaw=0.12; % Постоянная времени привода РН  Tael=0.12; % Постоянная времени привода Э    % Матрицы пространства состояний  A0=[-0.6 -5.71 -0.04;  1 -0.26 0.065;  -0.7 -24 -2.5];    B0=[-1.07 0.12;  -0.005 0;  -2 -6.5];    % Отображения матриц в удобной форме  sym(A0)  sym(B0)    C=[1 0 0;0 1 0;0 0 1];  D=[];    % Исходная система  Os=ss(A0,B0,C,D);  Os.OutputName=["\omega\_y" "\beta" "\omega\_x"];  Os.InputName=["\delta\_{н}" "\delta\_{э}"];    % Переходный процесс при начальных условиях  x1=[0 5 0];  initial(Os,x1), grid  xlabel('t, secs')  ylabel('Degrees')  title('Переходный процесс при начальных условиях \beta=5\circ')    % Переходный процесс при заданных входных воздействиях  opt = stepDataOptions('StepAmplitude',5);  figure  step(Os,opt), grid  xlabel('t, secs')  ylabel('Degrees')  title('Переходный процесс при входных воздействиях \delta\_{н}=5^\circ,\delta\_{э}=5^\circ')    syms s    M=nd\_reduce(collect((s\*eye(3)-A0)^-1\*B0))  disp(latex(M))  [Num, Den]=numden(M);  Den=Den(1,1);  d=sym2poly(Den);  d=d/d(1);  roots(d)  %% Изолированный канал рысканья    % Матрицы пространства состояний для упрощенной системы  A1 = [  A0(1,1) A0(1,2) B0(1,1)  A0(2,1) A0(2,2) B0(2,1)  0 0 -1/Tyaw];    B1=[0;0;1/Tyaw];    % Удобное отображение матриц  sym(A1)  sym(B1)    % Используемые символы  clear W  syms s z K1 K2 k T0 x  I=eye(3);    % Упрощенная система  O1=ss(A1,B1,C,D);    % Матричная ПФ упрощенной системы  Ws=collect((inv((s\*I-O1.A)))\*O1.B);  Ws=nd\_reduce(Ws,'max')    % Дискретизация упрощенной системы  O1z=c2d(O1,Ts);    % Матричная ПФ дискретной упрощенной системы  Wz=collect((inv((z\*I-O1z.A)))\*O1z.B);  Wz=nd\_reduce(Wz,'max')    %% Задание желаемой передаточной функции по угловой скорости рысканья    % В качестве знааменателя выбран полином Ньютона 3 порядка  Om=1  W\_prf=tf(Om^3,[1 3\*Om^1 3\*Om^2 Om^3])  inf=stepinfo(W\_prf,'SettlingTimeThreshold',0.05);  Tp0=6.296  % Вычисление требуемой собственной частоты для  % продолжительности переходного процесса в 0.7 с  Om=6  w=sym('Omega')  sympref('PolynomialDisplayStyle','descend')  s^3+2\*s^2\*w+2\*s\*w^2+w^3  % Желаемая ПФ  W\_prf=tf(Om^3,[1 3\*Om^1 3\*Om^2 Om^3]);  tf2sym(W\_prf)  step(W\_prf)  % Желаемая дискретная ПФ  W\_prf\_z=c2d(W\_prf,Ts)  tf2sym(W\_prf\_z)  %% Метод Аккермана    A=O1z.A;  B=O1z.B;  % Характеристический многочлен ПФ по угловой скорости рысканья  Den=W\_prf\_z.Denominator{:}  % Матрица управляемости  Y=[B A\*B A^2\*B]  sym(Y)  % Вычисление значения коэффициентов обратной связи  Kv = -[0 0 1]\*Y^(-1)\*(A^3+Den(2)\*A^2+Den(3)\*A+Den(4)\*eye(3,3))  syms K\_wy K\_beta K\_delta real  % Kv(3)=0  [K\_wy K\_beta K\_delta]'==Kv'  sym(Kv')      % Замкнутая дискретная система  O2z = feedback(O1z, Kv, 1)  O2s = feedback(O1, Kv, 1)  W\_closed=tf(O2z)  [y,t]=step(W\_closed);    % Переходные процессы замкнутой дискретной системы  figure  plot(t,y(:,1),'-o','MarkerFaceColor',"auto")  grid on  xlabel("Время, с")  ylabel("\omega\_y, deg/s")  figure  plot(t,y(:,2),'-o','MarkerFaceColor',"auto")  grid on  xlabel("Время, с")  ylabel("\beta, deg")    tf2sym(W\_closed)    % Матрицы пространства состояний  disp("$$A="+latex(sym(O2s.A))+",\;B="+latex(sym(O2s.B))+"$$"...  +sprintf("\n")+"$$A\_{disc}="+latex(sym(O2z.A))+",\;B\_{disc}="+latex(sym(O2z.B))+"$$")  %% Построение области устойчивости    % Используемые символы  syms K\_wy K\_beta K\_delta z w K1 K2 real  % Удобное представление вектора коэффициентов  K=[K\_wy K\_beta K\_delta]    % Получение матрицы замкнутой системы в символьном виде  A=sym(O1z.A)  B=sym(O1z.B)  D=eye(3)\*z-(A+B\*K)  sympref('PolynomialDisplayStyle',"default")    % Характеристический многочлен замкнутой системы  D=collect(det(D),z)    % Коэффициент K\_прив равен полученному, разбиение выполняется  % по коэффициентам K\_wy и K\_beta  subs(D,K,Kv)    % Замена z на (1+w)/(1-w) и упрощение дроби  [D,Num,Den]=nd\_reduce(collect(subs(-D,z,(1+w)/(1-w))),'max')    % Коэффициенты при w  syms a0 a1 a2 a3 real  a=[a0 a1 a2 a3]';  A=coeffs(Num,w)';  a==A    safe=2;    % Линейные и нелинейные условия устойчивости по Гурвицу  eq=[A>0];  eq=subs(eq,K,safe\*[K1 K2 Kv(3)]);  eq1=eq(1)&eq(2)&eq(3)&eq(4)  eq2=subs(simplify(A(2)\*A(3)-A(1)\*A(4))>0,K,safe\*[K1 K2 Kv(3)])    % Преобразование условий из символьного вида в функции  eq1=matlabFunction(eq1)  eq2=matlabFunction(eq2)    % Проверка, полученных ранее коэффициентов  K\_ok=eq1(Kv(1),Kv(2))\*eq2(Kv(1),Kv(2))    % Задание сетки  l1=[-10:0.1:30];  l2=[-30:0.1:50];  [k1,k2] = meshgrid(l1,l2);    % Проверка устойчивости узлов сетки  c1=eq1(k1,k2); % Линейные условия  c2=eq2(k1,k2); % Нелинейные условия    figure;  contourf(l1,l2,c1&c2,[1 1])  colormap([0 0.7 0.1])  hold on  pnt=scatter(Kv(1),Kv(2),'r','filled');  hold off  legend([pnt],"Выбранное значение коэффициентов")    xlabel("K1")  ylabel("K2")  %% Полная модель бокового движения      A=zeros(5,5);  B=zeros(5,2);  %A(1:3,1:3)=a;  %A(4,:)=[f(3,1) f(3,2) h(3,1) f(3,3) h(3,2)];  %A(:,4)=[f(1,3) f(2,3) 0 f(3,3) 0]';  %A(:,5)=[h(1,2) h(2,2) 0 h(3,2) -1/Ta]';  %B(3,1)=b(3,1);  %B(5,2)=1/Ta;    A(1:3,:)=[A0 B0];  A(4,4)=-1/Tyaw;  A(5,5)=-1/Tael;  B(4,1)=1/Tyaw;  B(5,2)=1/Tael    disp("$$A="+latex(sym(A))+", B="+latex(sym(B))+"$$")  C=eye(5);    O3s=ss(A,B,C,[]);  O3s.OutputName=["\omega\_y" "\beta" "\omega\_x" "\delta\_н" "\delta\_э"];  O3s.InputName=["U\_н" "U\_э"];    figure  step(O3s)  grid on    %%  syms k      K\_yaw=[Kv(1) Kv(2) 0 Kv(3) 0  0 0 0 0 0];  K\_ael=[0 0 0 0 0  0 0 0.25 0 0];    K=K\_yaw+K\_ael  O3z=c2d(O3s,Ts);  Owx=O3z;  Owx.A=Owx.B\*K\_yaw+Owx.A;  H=tf(Owx)  Hwx=tf2sym(H(3,2))  Hwx=nd\_reduce(collect(Hwx/(1-k\*Hwx),z))  subs(Hwx,z,-1)  [Num(z) Den(z)]=numden(Hwx)  k(z)=nd\_reduce(solve(Den(z),k))  k(-1)    disp("$$A\_{dics}="+latex(sym(O3z.A))+", B\_{dics}="+latex(sym(O3z.B))+"$$")  O4z=O3z;  O4z.A=O4z.B\*K+O4z.A;  disp("\tiny A=A+B\cdot K="+latex(sym(O3z.A))+"+"+latex(sym(O3z.B))+latex(sym(K))+""+sprintf("\\\\\nA=%s",latex(sym(O4z.A))));  disp("\tiny A=A+B\cdot K="+latex(sym(O3z.A))+"+"+latex(sym(O3z.B))+latex(sym(K\_yaw)));    figure;    step(d2c(O4z))    % Переходные процессы замкнутой дискретной системы  figure  [y,t]=step(O4z(3,2));  plot(t,y,'-o','MarkerFaceColor',"auto")  grid on  xlabel("Время, с")  ylabel("\omega\_x, deg/s")    W4f=tf(O4z)  disp(latex(tf2sym(W4f)))  H=tf2sym(W4f(3,2))  %bode(O4z(3,2))  %% Псевдочастотная характеристика    dlah(H,Ts)  %% Обеспечение требуемого расхода    [y,t]=step(O4z(3,2));  wy=y(end)  Kx=1/abs(wy)  opt=stepDataOptions;  opt.StepAmplitude=Kx;  figure  [y,t]=step(O4z(3,2),opt);  plot(t,y,'-o','MarkerFaceColor',"auto")  grid on  xlabel("Время, с")  ylabel("\omega\_x, deg/s")  %%  function dlah(H,Ts)  syms w z lambda  z2w=(1+w\*Ts/2)/(1-w\*Ts/2)  H=nd\_reduce(collect(subs(H,z,z2w),w))  H=subs(H,w,j\*lambda)  H=matlabFunction(H)  w\_max=2\*pi/(Ts);  l=logspace(-1,2,1000);  Z=H(l)  L=20\*log10(abs(Z))  phi=180-rad2deg(angle(Z))    subplot(2,1,1)  semilogx(l,L)  xlabel("\lambda, рад/c")  ylabel("20 lg |W|, Дб",'FontSize',15)  grid on  subplot(2,1,2)  semilogx(l,phi)  xlabel("\lambda, рад/c")  ylabel("\phi, градусы",'FontSize',15)  ylim([0 200])    grid on  end |

|  |
| --- |
| Реализация функции tf2sym |
| function W = tf2sym(sys)  S=size(sys.Numerator);  if max(S)>1  syms W [S(1), S(2)]    for i=1:S(1)  for j=1:S(2)  W(i,j)=tf2sym(sys(i,j));  end  end    else  s=sym(sys.variable);  n=flip(sys.Numerator{:});  d=flip(sys.Denominator{:});  N=0;  D=0;  for i=0:length(n)-1  N=N+n(i+1)\*s^i;  end  for i=0:length(d)-1  D=D+d(i+1)\*s^i;  end  W=N/D;  end  end |

|  |
| --- |
| Реализация функции nd\_reduce |
| function [H,N,D] = nd\_reduce(W,v)  sw=size(W);  if max(sw)>1  for i=1:sw(1)  for j=1:sw(2)  H(i,j)=nd\_reduce(W(i,j),'max');  end  end  else    [N,D]=numden(W);  [Nc]=coeffs(N,'all');  [Dc,Ds]=coeffs(D,'all');    if nargin==1  [~,i]=find(Ds==sym("1"));  else  switch v  case "max"  i=1;  otherwise  [~,i]=find(Ds==v);  end  end    if i  N=collect(N/abs(Dc(i)));  D=collect(D/abs(Dc(i)));  H=N/D;  else  H=W;  end  end  end |

# Список использованных источников

1. Белоногов В.Д. Лекции по курсу «Теория цифровых систем управления»

2. Белоногов В.Д. Лекции по курсу «Математические основы и вычислительные алгоритмы теории автоматического управления»

3. Шамриков Б.М. Основы теории цифровых систем управления: Учебник для ВУЗов. – М.:Машиностроение, 1995

4. Тумеля П.М., Белоногов В.Д., Березуев А.В., Мулин П.В. Частотный метод синтеза систем автоматического управления: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2017.-64 с