# maiМИНИСТЕРСТВО науки и высшего ОБРАЗОВАНИЯ РОссИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ

УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ

(национальный исследовательский университет)»

|  |  |
| --- | --- |
| **Институт №3** | **Кафедра №301** |

Курсовой проект по дисциплине

**«Проектирование систем автоматического управления ЛА»**

на тему:

**«Проектирование системы автоматического управления**

**боковым движением самолёта на режиме полета №1»**

Выполнил студент группы М30-501С-18

Дзуцев С. С.

Принял преподаватель:

Мулин П. В.

### Москва 2022

**Содержание**

[**Задание** 3](#_Toc120926309)

[**Исходные данные и требования к системам** 4](#_Toc120926310)

[**1.** **Математические модели бокового движения самолёта** 5](#_Toc120926311)

[**1.1.** **Уравнения бокового движения самолёта** 5](#_Toc120926312)

[**1.2.** **Упрощённые модели бокового движения** 8](#_Toc120926313)

[**2.** **Система стабилизации угла крена** 11](#_Toc120926314)

[**2.1.** **Теоретические сведения** 11](#_Toc120926315)

[**2.2.** **Синтез системы управления углом крена** 13](#_Toc120926316)

[**2.3.** **Подбор коэффициентов в NCD-блоке для САУ углом крена** 17](#_Toc120926317)

[**2.4.** **Построение области устойчивости для САУ углом крена** 19](#_Toc120926318)

[**3.** **Система стабилизации угла рысканья в режиме плоского разворота** 20](#_Toc120926319)

[**3.1.** **Теоретические сведения** 20](#_Toc120926320)

[**3.2.** **Синтез системы управления углом рыскания в режиме плоского разворота** 22](#_Toc120926321)

[**3.3.** **Подбор коэффициентов в NCD-блоке для САУ углом рыскания в режиме плоского разворота** 24](#_Toc120926322)

[**3.4.** **Построение области устойчивости для САУ углом рыскания в режиме плоского разворота** 25](#_Toc120926323)

[**4.** **Система стабилизации угла рыскания при использовании координированного разворота** 26](#_Toc120926324)

[**4.1.** **Теоретические сведения** 26](#_Toc120926325)

[**4.2.** **Синтез системы управления углом рыскания в режиме плоского разворота** 30](#_Toc120926326)

[**4.3.** **Подбор коэффициентов в NCD-блоке для САУ углом рыскания в режиме координированного разворота** 32](#_Toc120926327)

[**4.4.** **Построение области устойчивости для САУ углом рыскания в режиме координированного разворота** 33](#_Toc120926328)

[**Заключение** 34](#_Toc120926329)

[**Список использованных источников** 35](#_Toc120926330)

[**Приложение 1** 36](#_Toc120926331)

[**Приложение 2** 40](#_Toc120926332)

[**Приложение 3** 45](#_Toc120926333)

# **Задание**

1. Разработать систему управления углом крена на указанном режиме полета, удовлетворяющую требованиям к точности, быстродействию и качеству процессов управления.

* Разработать функциональную и структурную схемы.
* Выбрать параметры законов управления.

1. Разработать систему управления углом рыскания при использовании плоского разворота на указанном режиме полета, удовлетворяющую требованиям к точности, быстродействию и качеству процессов управления.
   * Разработать функциональную и структурную схемы.
   * Выбрать параметры законов управления.
2. Разработать систему управления углом рыскания при использовании координированного разворота на указанном режиме полета, удовлетворяющую требованиям к точности, быстродействию и качеству процессов управления:
   * Разработать функциональную и структурную схемы.
   * Выбрать параметры законов управления.

# **Исходные данные и требования к системам**

Линейная математическая модель привода имеет передаточную функцию:

где ; .

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1б | 5 | 0.6 | 192 | -0.2 | 0.08 | 1 | 0.051 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| -5.8 | -1.0 | -0.2 | -7 | -3.0 | -0.05 | -0.2 | -2.5 |

* Переходный процесс отработки заданного угла крена должен удовлетворять требованиям:
* Переходный процесс отработки заданного угла рыскания при использовании плоского разворота должен удовлетворять требованиям:
* Переходный процесс отработки заданного угла рыскания при использовании координированного разворота должен удовлетворять требованиям:

# **Математические модели бокового движения самолёта**

## **Уравнения бокового движения самолёта**

Дифференциальные уравнения бокового движения самолёта в горизонтальном полёте без крена и скольжения в спокойной атмосфере, записанные в проекциях на оси связанной системы координат, совпадающей с главными осями инерции, имеют вид:

где: , остальные обозначения – стандартные.

Верхний индекс в коэффициентах уравнений (1.1.1) означает частное дифференцирование по данной переменной, измеренной в радианах в секунду (для угловых скоростей).

При решении различных задач система (1.1.1) обычно упрощается, причём характер упрощений зависит от специфики задачи. Самое распространённое упрощение, состоящее в пренебрежении слагаемыми, величина которых обычно мала, в частности слагаемыми: кроме того, принимается: .

В результате получается система следующая система уравнений бокового движения самолёта:

Данной системе уравнений соответствует структурная схема на рисунке 1:

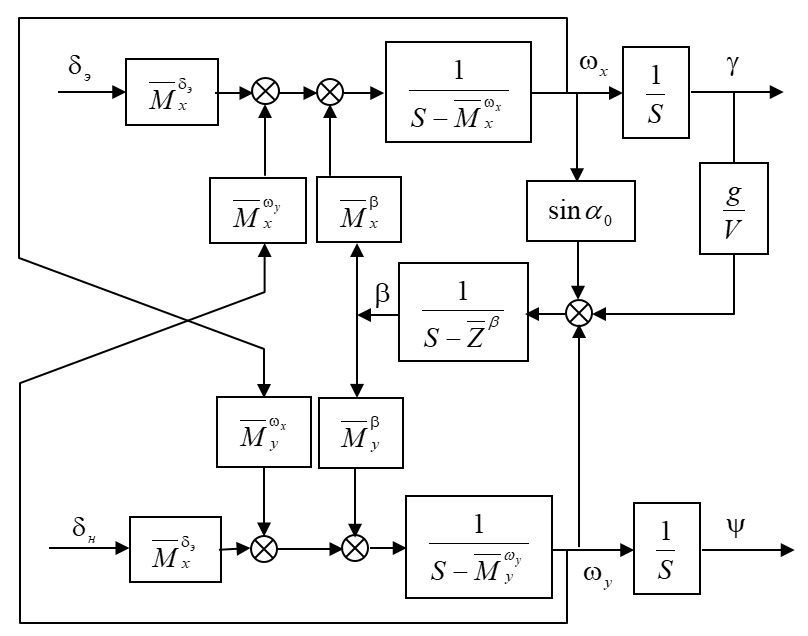


Рисунок 1. Структурная схема бокового движения самолёта

При исследовании неуправляемого бокового движения самолёта принимается , а последнее уравнение системы (1.1.2) обычно отбрасывается, так как силы и моменты, действующие на самолёт, не зависят от угла рыскания (в первые четыре уравнения не входит). Получаемая при этом из (1.1.2) система имеет характеристический многочлен четвёртого порядка: коэффициенты которого выражаются через коэффициенты системы (2) следующим образом:

Характеристический многочлен имеет два действительных и два комплексно-сопряжённых корня. Один действительный корень всегда большой по модулю, он называется креновым и обозначается , другой действительный корень очень мал по модулю, называется спиральным и обозначается . Модуль комплексных корней находится между модулями кренового и спирального корней. Квадратный трёхчлен, образованный комплексными корнями, обычно обозначается как: и, таким образом, весь характеристический многочлен можно представить в виде:

В боковом движении может быть два вида неустойчивости: спиральная, когда в правой полуплоскости находится корень , и колебательная, когда там находятся комплексные корни.

## **Упрощённые модели бокового движения**

Так как спиральный корень по модулю очень мал, то при исследовании креновой и колебательных составляющих без большой погрешности можно принять его равным нулю. Так как физически спиральное движение возникает из-за влияния крена на скольжение, то "обнуление" спирального корня произойдёт при пренебрежении слагаемым в системе (1.1.2). Часто можно пренебречь спиральными моментами ; а также слагаемыми .

В итоге система (1.1.2) принимает вид:

Как видно, движение рыскания (1-ое, 3-е и 5-ое уравнения) стало независимым от движения крена (2-ое и 4-ое уравнения), но не наоборот.

Система (1.2.1) распадается на две системы:

Вместо в правую часть первого уравнения системы (1.2.3) следует подставлять решение системы (1.2.2).

Системе уравнений (1.2.1) соответствует структурная схема, показанная на рисунке 2:

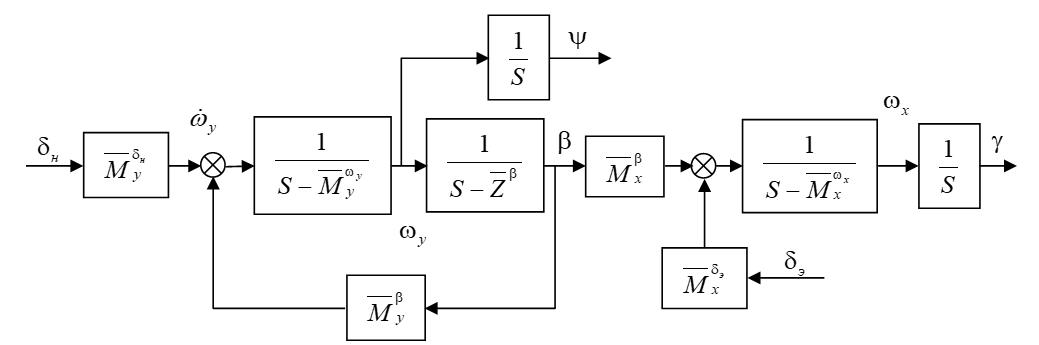


Рисунок 2. Структурная схема по системе (1.2.2)

Как видно из этой схемы, движение крена, возникающее при отклонении элеронов, можно исследовать независимо от движения рыскания, т.е. используя систему (1.2.3) при :

Уравнения (1.2.4) называются уравнениями изолированного движения крена, а (1.2.2) – изолированного движения рыскания.

Характеристический многочлен системы (4) имеет вид:

Трёхчлен в квадратных скобках обозначается, как , так как он являетсяхарактеристическим многочленом двух первых уравнений системы (5), описывающих изолированные колебания самолёта по и .

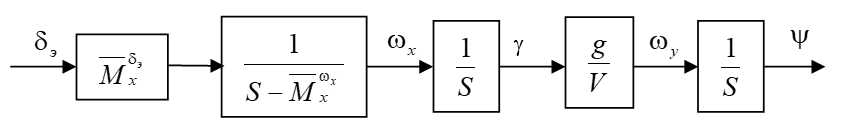


Рисунок 3. Структурная схема по системе (1.2.6)

При исследовании координированного (β = 0) или близкого к координированному (β мал) развороту применяется система уравнений (1.2.6) которой соответствует структурная схема на рисунке 3.

# **Система стабилизации угла крена**

## **Теоретические сведения**

Функциональная схема статической системы стабилизации угла крена:

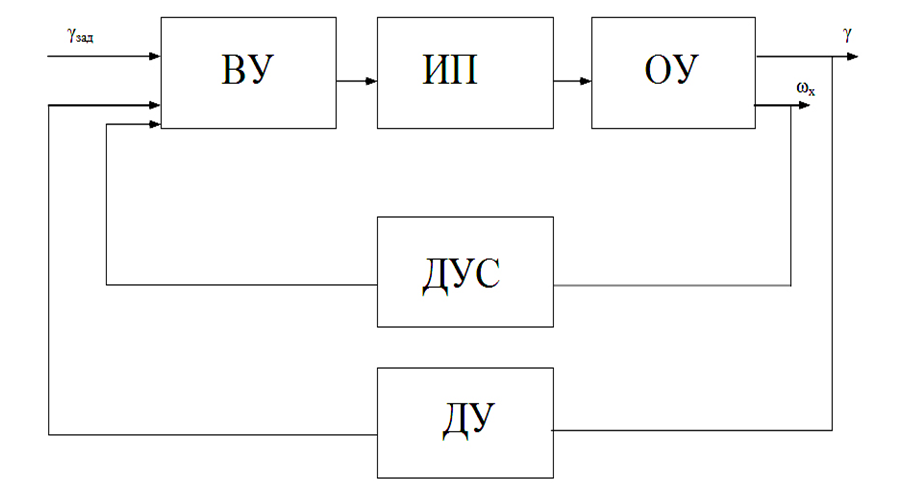


Рисунок 4. Функциональная схема статической системы стабилизации угла крена

где:

ВУ – вычислительное устройство,

ИП – исполнительный привод,

ОУ – объект управления,

ДУ – датчик угла,

ДУС – датчик угловых скоростей.

Закон управления статической системы стабилизации угла крена имеет вид:

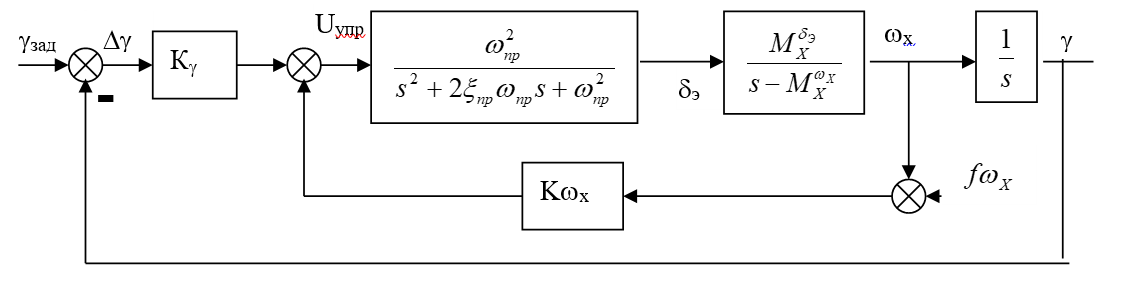


Рисунок 5. Система стабилизации угла крена

Для приближённого анализа процессов управления креном и предварительного выбора передаточных чисел САУ можно воспользоваться уравнением изолированного движения крена (1.2.4).

Уравнение (1.2.4) совместно с уравнением САУ (1.2.6) образуют систему уравнений замкнутого контура автоматической стабилизации угла крена. Структурная схема контура представлена на рисунке 4. Передаточная функция самолёта из уравнений (1.2.4) имеет вид:

Передаточная функция замкнутого контура в режиме управления запишется следующим образом:

## **Синтез системы управления углом крена**

Передаточная функция (2.1.4) представляет собой передаточную функцию колебательного звена. Поэтому выбор передаточных чисел и можно достаточно просто произвести с помощью метода стандартных коэффициентов.

Представим передаточную функцию (2.1.4) в виде:

где:

Качество переходного процесса полностью определяется степенью демпфирования и собственной частотой ω0.

Характеристическое уравнение:

Решая его, получим

При этом

Время переходного процесса будет примерно равно

При этом

При этом, чтобы перерегулирование не было больше 5%, должно соблюдаться условие . При этом необходимо минимизировать время переходного процесса. Для этого нужно максимизировать .

Решим неравенство

Преобразуем крест-накрест и поделим левую и правую часть на :

Возведём левую и правую часть в квадрат:

Отсюда

Возьмём

Как видно, перерегулирование не зависит от параметра .

Если задать , то

Подставляя полученные значение и , находим передаточные числа и , соответствующие оптимальной переходной функции:

Исходная передаточная функция системы стабилизации угла крена без учёта привода примет вид:

Исходная передаточная функция системы стабилизации угла крена с учётом привода примет вид:

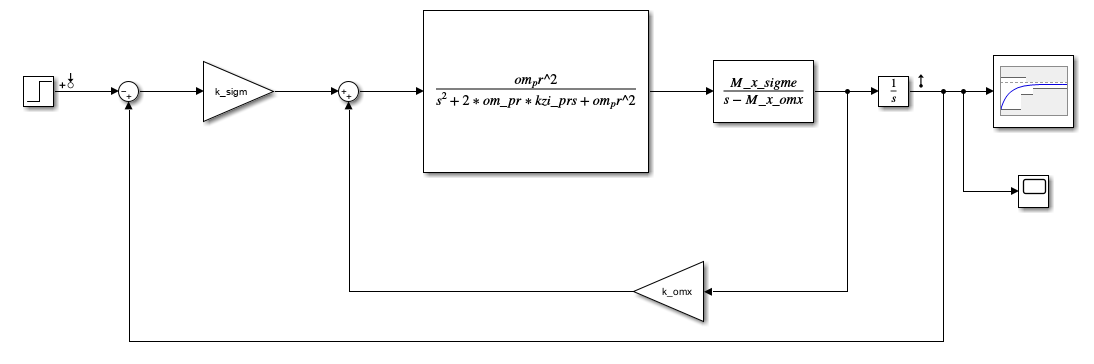


Рисунок 6. Схема моделирования САУ крена в среде Simulink с учетом динамики привода

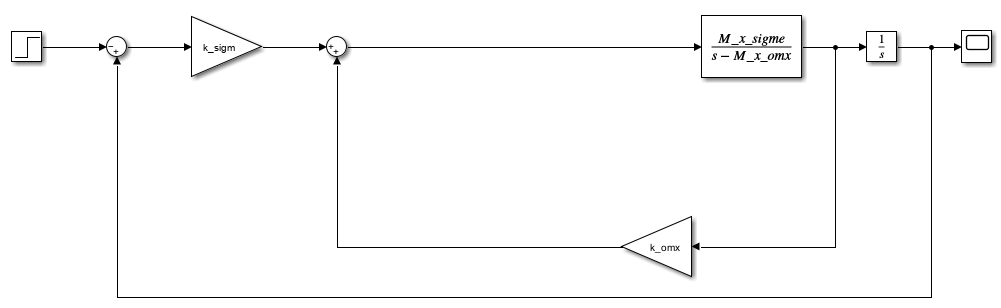


Рисунок 7. Схема моделирования САУ крена в среде Simulink без учета динамики привода

График переходных функций в системе с учётом привода и без учёта привода представлен на рисунке 8.

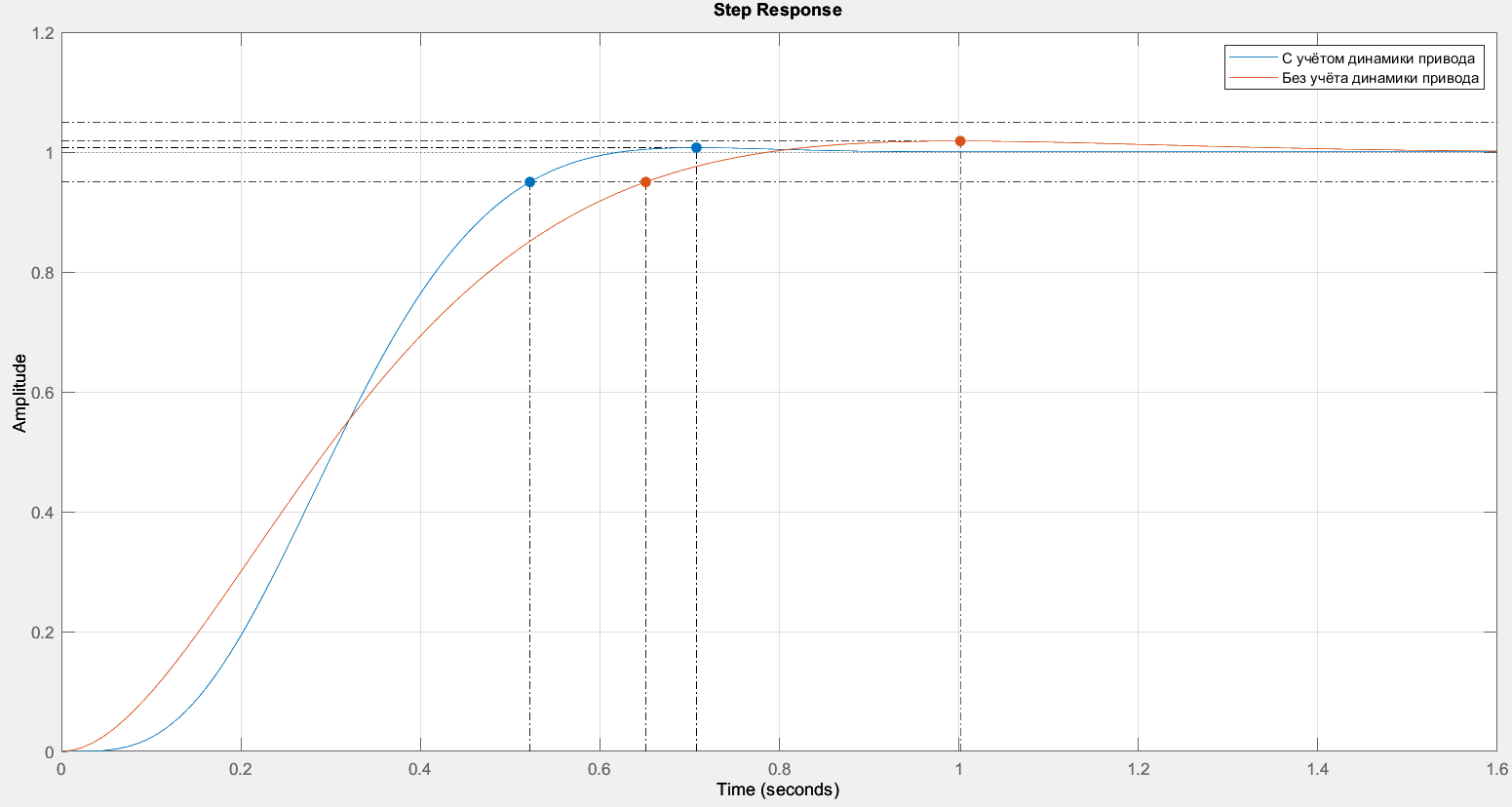


Рисунок 8. График переходной функции для системы стабилизации крена

С учетом динамики привода:

Без учета динамики привода:

## **Подбор коэффициентов в NCD-блоке для САУ углом крена**

Теперь попробуем воспользоваться NCD-блоком в Simulink для подбора коэффициентов, чтобы уменьшить длительность переходных процессов. Схема с NCD-блоком представлена на рисунке 9.

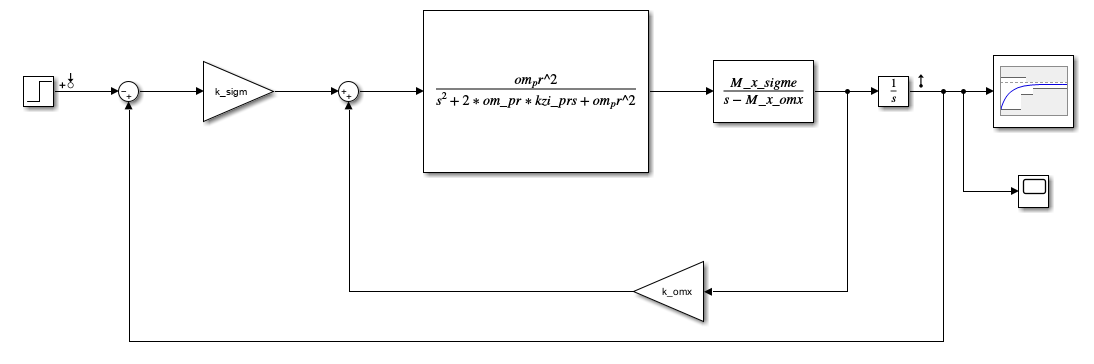


Рисунок 9. Схема моделирования САУ крена с учётом динамики привода с NCD-блоком

В результате многократных испытаний получаем переходный процесс с минимальным временем переходного процесса.

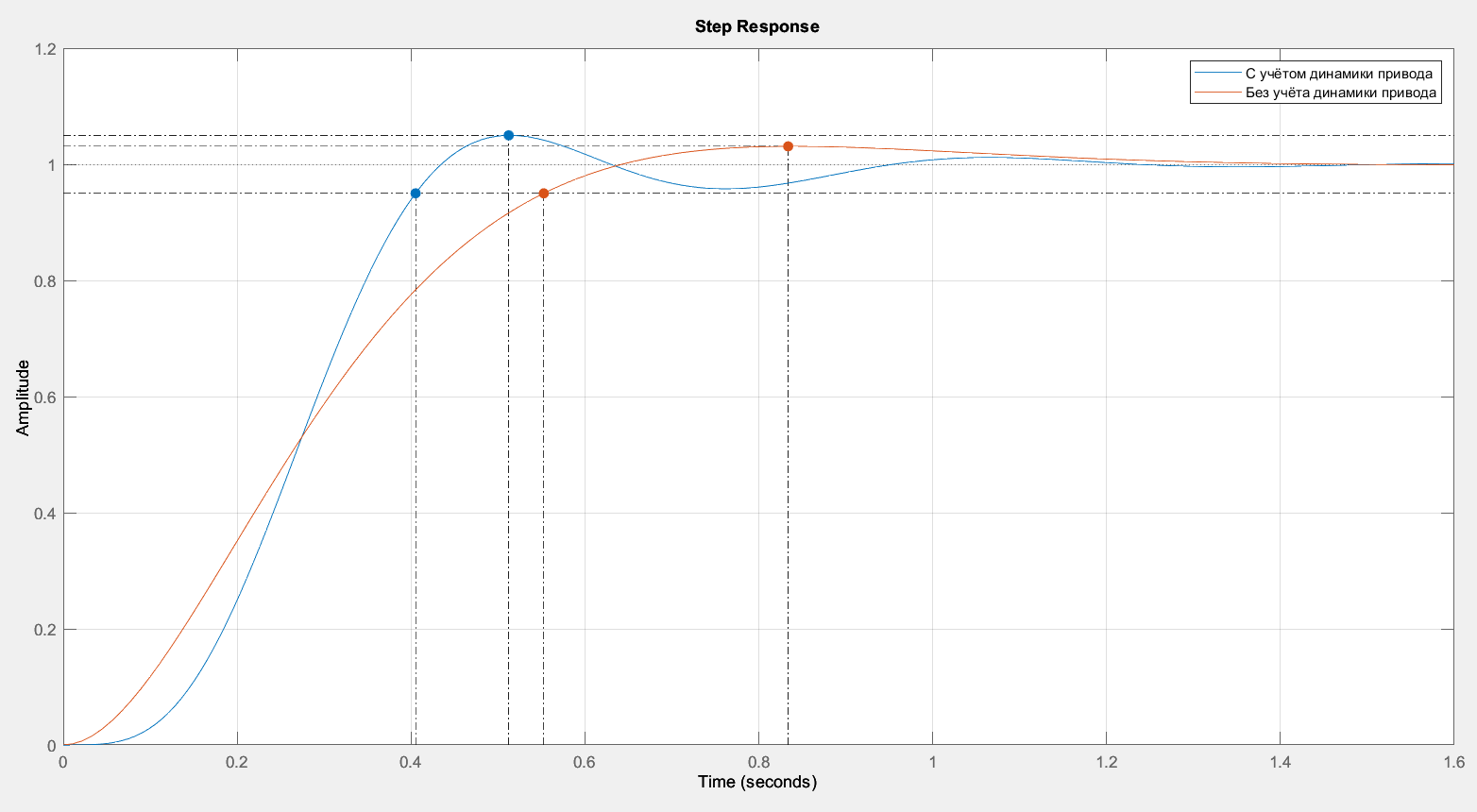


Рисунок 10. График переходного процесса по крену после моделирования в NCD-блоке

С учетом динамики привода:

Без учета динамики привода:

Данные результаты получились при моделировании с коэффициентами равными

Исходная передаточная функция системы стабилизации угла крена без учёта привода примет вид:

Исходная передаточная функция системы стабилизации угла крена с учётом привода примет вид:

Как видно, моделирование в NCD-блоке позволило достичь минимального времени переходного процесса, подобрав соответствующие коэффициенты, но при этом видно, что качество переходного процесса в системе с учётом динамики привода заметно уменьшилось.

## **Построение области устойчивости для САУ углом крена**

Построим область устойчивости в зависимости от параметров и . Для этого воспользуемся критерием Рауса. Для системы четвёртого порядка условия устойчивости по этому критерию выглядят следующим образом:

Где – коэффициенты характеристического многочлена полной системы с учётом привода.

Область устойчивости – это область, которая соответствует выполнению критерия Рауса для системы 4 порядка в данном случае, и на рисунке 11 она обведена оранжевым цветом.

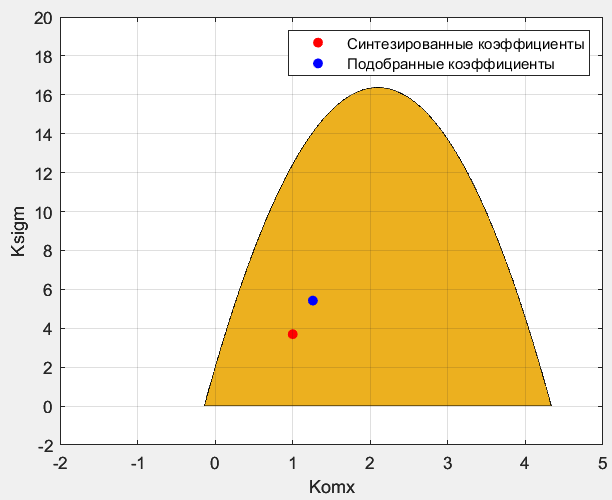


Рисунок 11. Область устойчивости для системы управления креном

# **Система стабилизации угла рысканья в режиме плоского разворота**

## **Теоретические сведения**

Плоский разворот – управление курсом воздействием на руль направления. При таком способе руль направления создаёт скольжение, которое в свою очередь создаёт поперечную, искривляющую траекторию силу . Для осуществления плоского разворота необходимо отклонять элероны для стабилизации угла крена (для ликвидации моментов и ). Т.е. в плоском развороте руль направления используется для создания скольжения, а элероны – для ликвидации крена.

Закон управления идеальной статической системы стабилизации угла рыскания имеет вид:

Для приближённого анализа движения рыскания и предварительного выбора передаточных чисел можно воспользоваться уравнениями изолированного движения рыскания (1.2.2). Добавив к уравнениям (1.2.2) уравнение САУ (), получим систему уравнений замкнутого контура. Функциональная схема системы стабилизации угла рыскания в режиме плоского разворота:

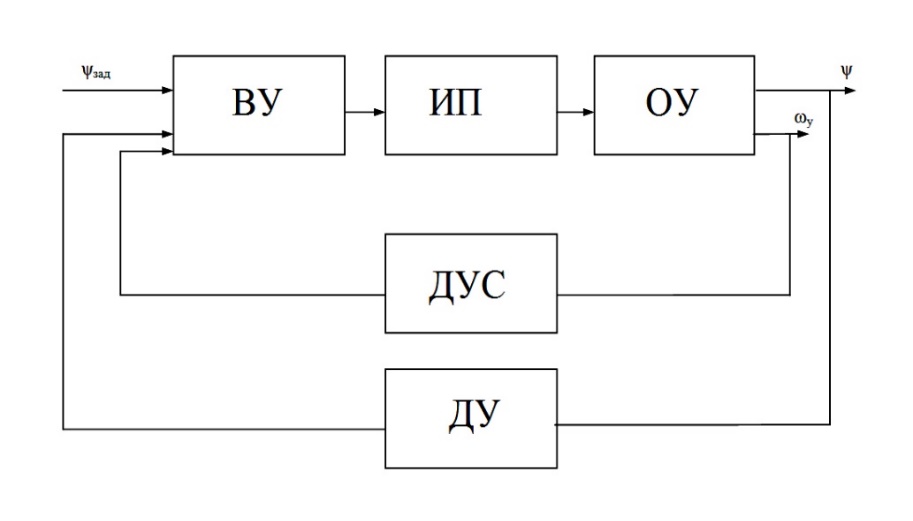


Рисунок 12. Функциональная схема системы стабилизации угла рыскания в режиме плоского разворота

Структурная схема контура показана на рисунке 13.

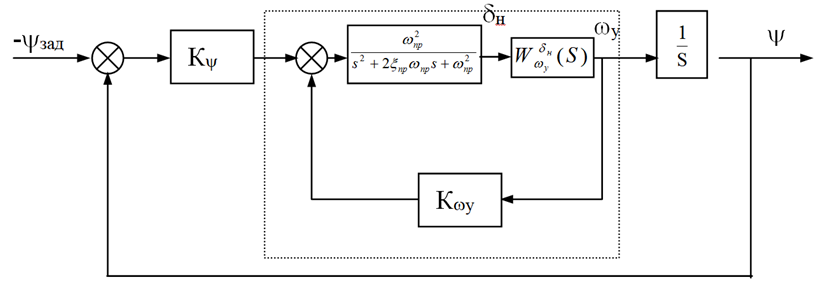


Рисунок 13. Структурная схема управления углом рыскания в режиме плоского разворота

Передаточная функция самолёта по угловой скорости рыскания, полученная из уравнений (5), имеет вид:

Передаточная функция для системы на рисунке 11 определяется формулой:

## **Синтез системы управления углом рыскания в режиме плоского разворота**

Коэффициенты характеристического многочлена ПФ 14:

Сформулируем задачу математического программирования

При ограничениях

После определения целевой функции и нелинейных ограничений, применим функцию fmicon(). Полученные коэффициенты:

Получили передаточную функцию:

Переходный процесс с заданными коэффициентами показан на рисунке 14.

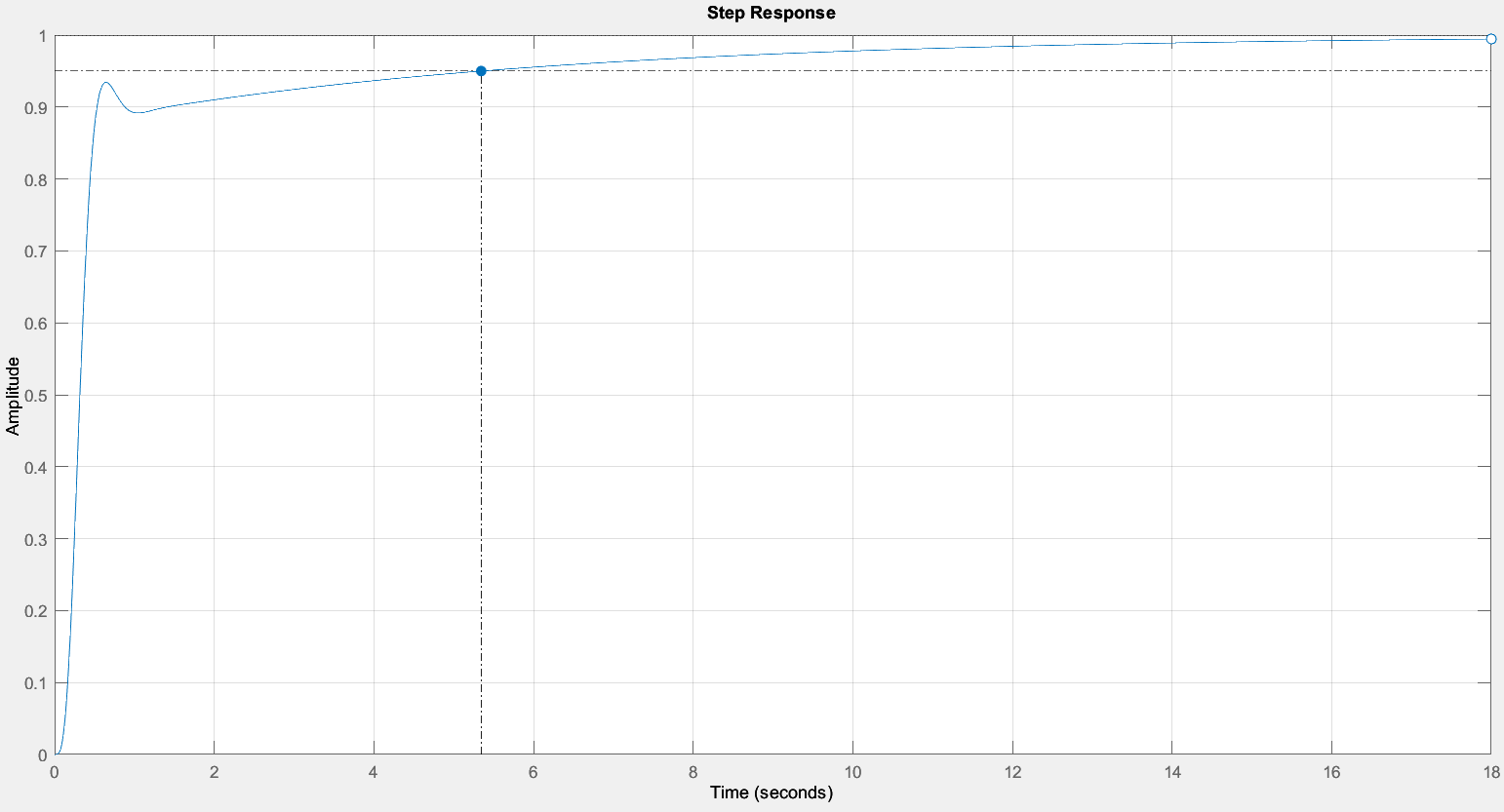


Рисунок 14. Переходный процесс в канале рыскания при плоском развороте после синтеза функцией fmicon

## **Подбор коэффициентов в NCD-блоке для САУ углом рыскания в режиме плоского разворота**

Осуществим подбор коэффициентов в системе Simulink при помощи NCD-блока для с параметрами моделирования.

Схема моделирования представлена на рисунке 15.

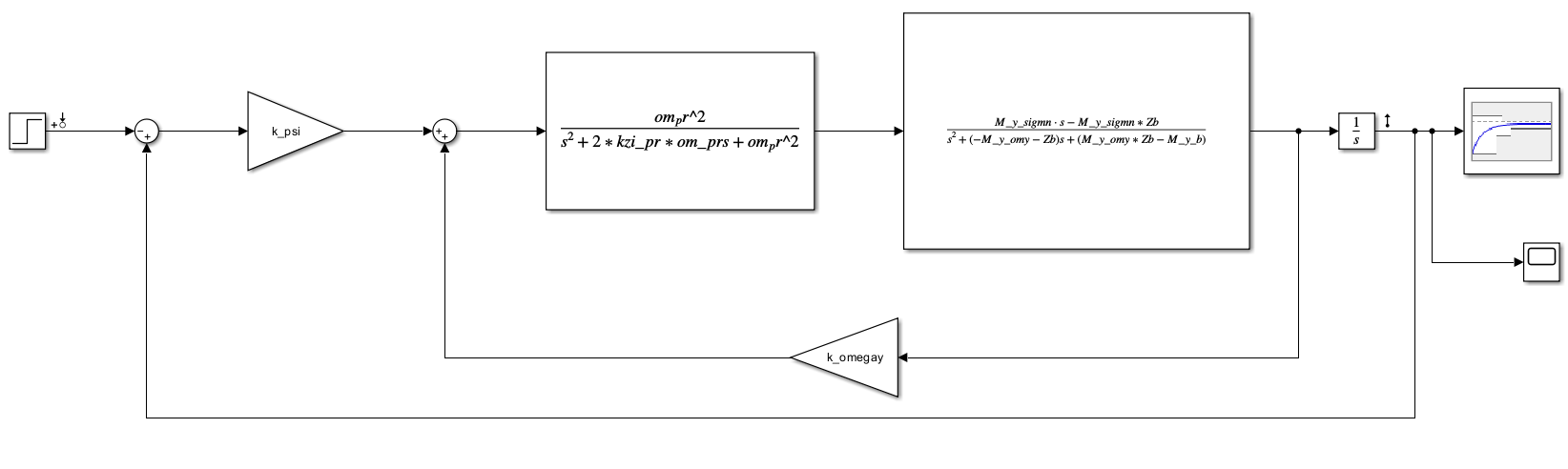


Рисунок 15. Схема моделирования для САУ углом рыскания в режиме плоского разворота

В ходе моделирования получаем коэффициенты

Переходный процесс при таких параметрах показан на рисунке 16.

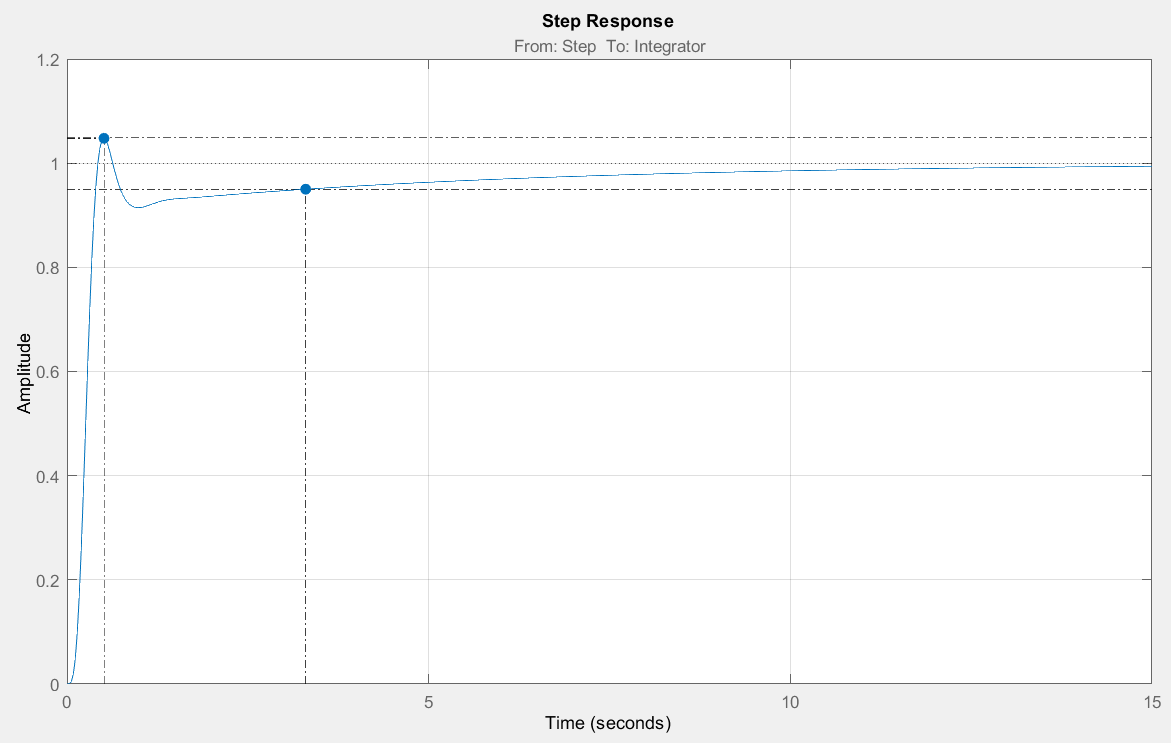


Рисунок 16. Переходный процесс в канале рыскания при плоском развороте после моделирования в NCD-блоке

## **Построение области устойчивости для САУ углом рыскания в режиме плоского разворота**

Построим область устойчивости в зависимости от параметров и . Для этого воспользуемся критерием Рауса. Для системы четвёртого порядка условия устойчивости по этому критерию выглядят следующим образом:

Где – коэффициенты характеристического многочлена полной системы с учётом привода (уравнение 3.2.1).

Область устойчивости – это область, которая соответствует выполнению критерия Рауса для системы 5 порядка в данном случае, и на рисунке 17 она обведена оранжевым цветом.

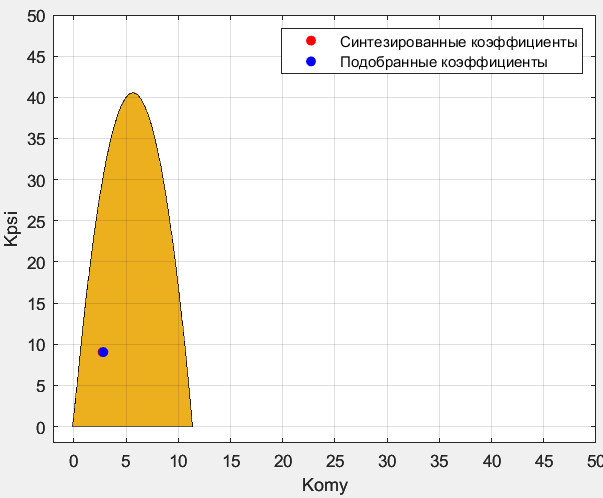


Рисунок 17. Область устойчивости для системы управления рысканием в режиме плоского разворота

# **Система стабилизации угла рыскания при использовании координированного разворота**

## **Теоретические сведения**

Управление курсом воздействием на элероны называется разворотом с креном. При таком способе разворота в качестве силы, разворачивающей вектор скорости в горизонтальной плоскости, используется проекция подъёмной силы на эту плоскость. Разворот с креном без скольжения называется координированным. Для ликвидации (или уменьшения) скольжения используется руль направления. Таким образом, при развороте с креном руль направления используется для ликвидации скольжения, а элероны – для создания крена.

При развороте с креном сигнал отклонения от заданного курса подаётся не на руль направления, а на элероны. Законы управления каналов элеронов и руля направления идеального статической САУ принимают вид:

При координированном развороте в канал руля направления САУ подаётся сигнал перекрёстной связи по крену. Закон управления (4.1.1) принимает вид:

Передаточные числа и определяются так, как описано во главе 2. Передаточное число выбирается из условия на всех этапах разворота. Для его выбора используется система уравнений (1.1.2), дополненная законами управления (4.1.2), (4.1.3).

Полученную систему уравнений представляют в области изображения по Лапласу

или , где и - матрицы коэффициентов:

 (4.1.5)

 (4.1.6)

Для определения ПФ и находят выражения для определителей и , где - главный определитель, а – частный определитель (в матрице столбец, соответствующий заменён на столбец ).

В результате получим:

Чтобы выполнялось условие , коэффициенты , , также должны быть равны нулю. Последнее реализовать технически трудно, поэтому на практике ограничиваются требованием отсутствия скольжения только в установившемся развороте, для чего достаточно лишь выполнение условия

, что соответствует

Передаточное число определяют, исходя из требований к контуру демпфирования изолированного канала РН:

При выборе передаточного числа используется упрощённая система уравнений самолёта в виде (1.2.6). Так как переменная в этой системе не фигурирует, то для получения системы уравнений контура стабилизации угла рыскания достаточно к системе (1.2.6) добавить уравнение (4.1.2). В итоге получим систему уравнений, описывающих динамику координированного разворота.

Функциональная схема системы стабилизации угла рыскания при использовании координированного разворота (рисунок 18):

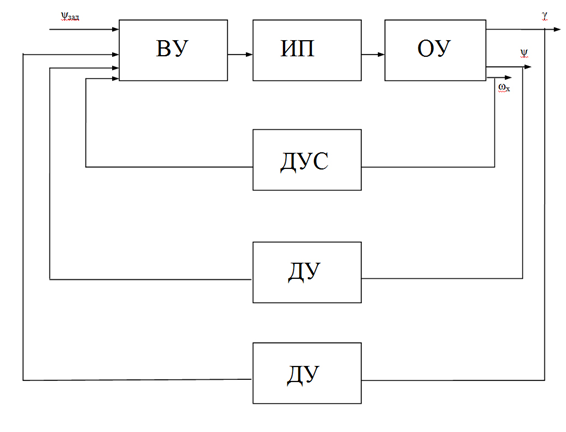


Рисунок 18. Функциональная схема системы стабилизации угла рыскания при использовании координированного разворота

Этой системе соответствует структурная схема, показанная на рисунке 19.

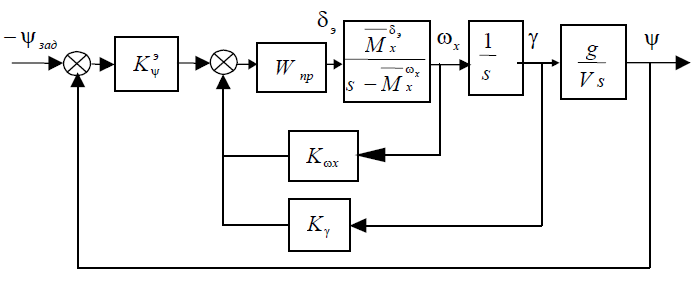


Рисунок 19. Система управления углом рыскания в режиме координированного разворота

Из этой схемы можно получить передаточную функцию замкнутой системы:

## **Синтез системы управления углом рыскания в режиме плоского разворота**

Коэффициенты характеристического многочлена ПФ 14:

Сформулируем задачу математического программирования

При ограничениях

После определения целевой функции и нелинейных ограничений, применим функцию fmicon(). Полученные коэффициенты:

Получили передаточную функцию:

Переходный процесс с заданными коэффициентами показан на рисунке 20.

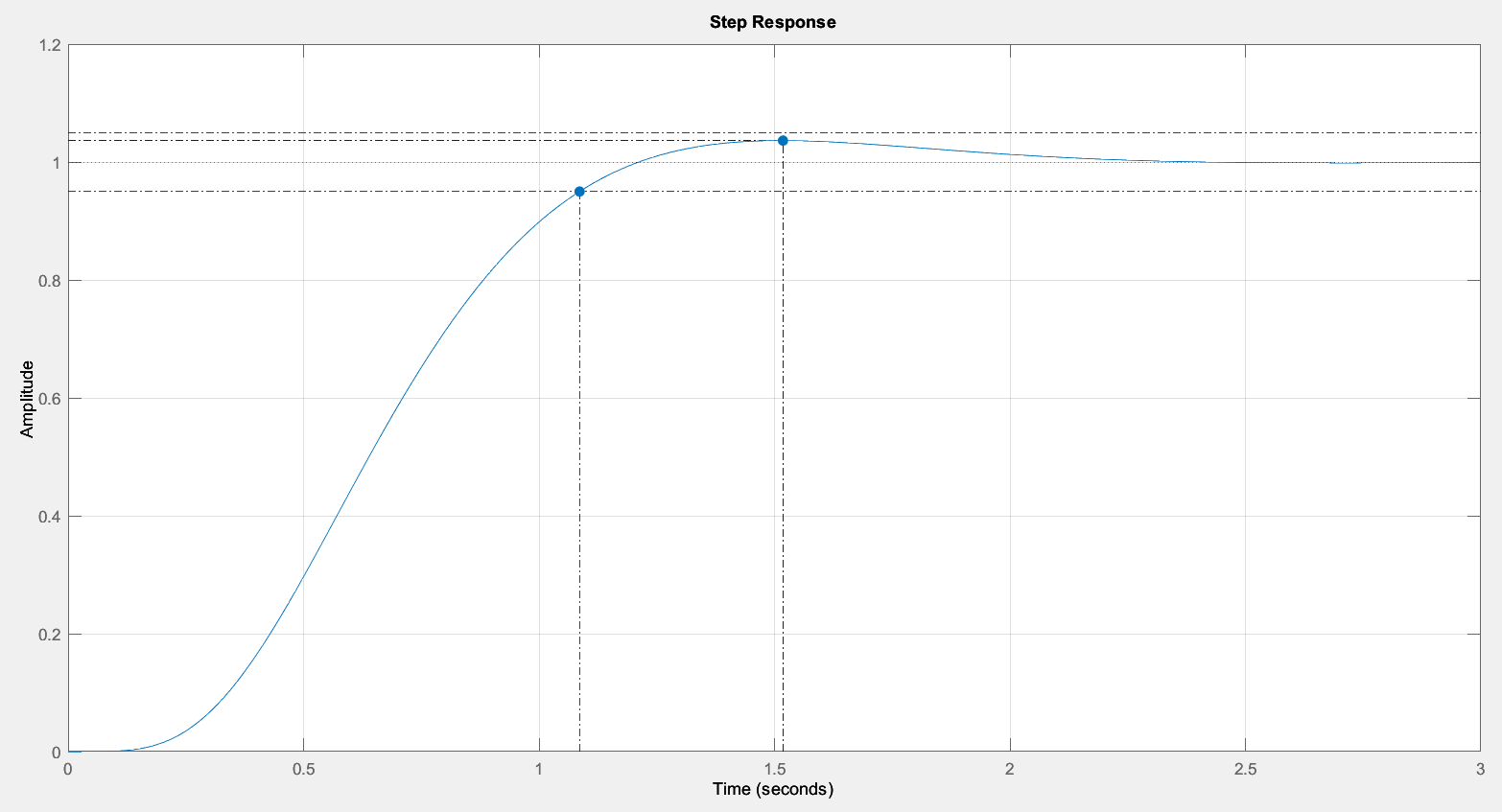


Рисунок 20. Переходный процесс в канале рыскания при координированном развороте после синтеза функцией fmicon

## **Подбор коэффициентов в NCD-блоке для САУ углом рыскания в режиме координированного разворота**

Осуществим подбор коэффициентов в системе Simulink при помощи NCD-блока для с параметрами моделирования.

Схема моделирования представлена на рисунке 21.

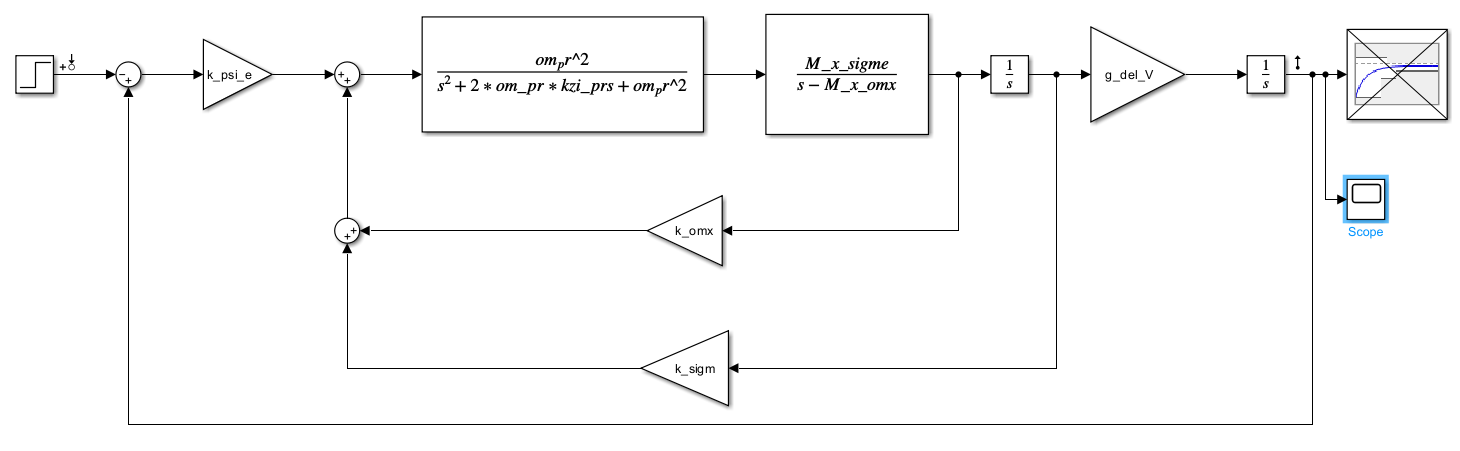


Рисунок 21. Схема моделирования для САУ углом рыскания в режиме координированного разворота

В ходе моделирования получаем коэффициенты

Переходный процесс при таких параметрах показан на рисунке 22.

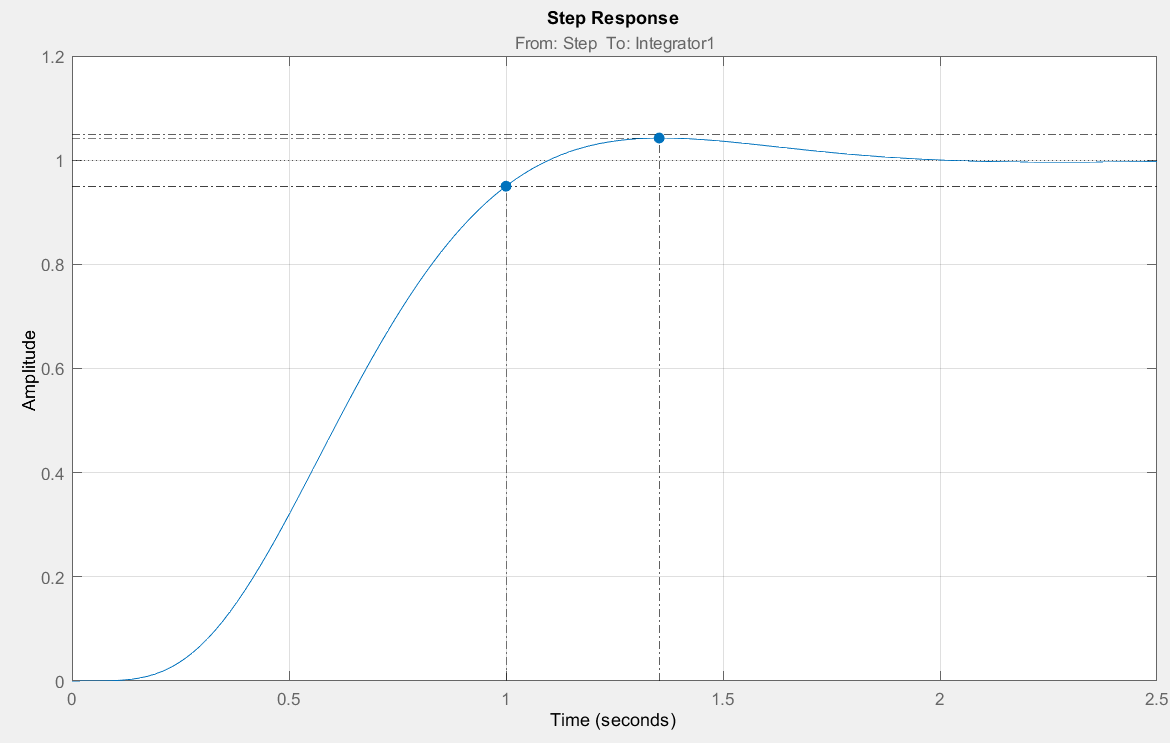


Рисунок 22. Переходный процесс в канале рыскания при координированном развороте после моделирования в NCD-блоке

## **Построение области устойчивости для САУ углом рыскания в режиме координированного разворота**

Построим область устойчивости в зависимости от параметров , и . Для этого воспользуемся критерием Рауса. Для системы пятого порядка условия устойчивости по этому критерию выглядят следующим образом:

Где – коэффициенты характеристического многочлена полной системы с учётом привода (система (4.2.1)).

Область устойчивости – это область, которая соответствует выполнению критерия Рауса для системы 5-го порядка в данном случае. Данная область была построена в пространстве 3-х параметров и показана на рисунке 23.

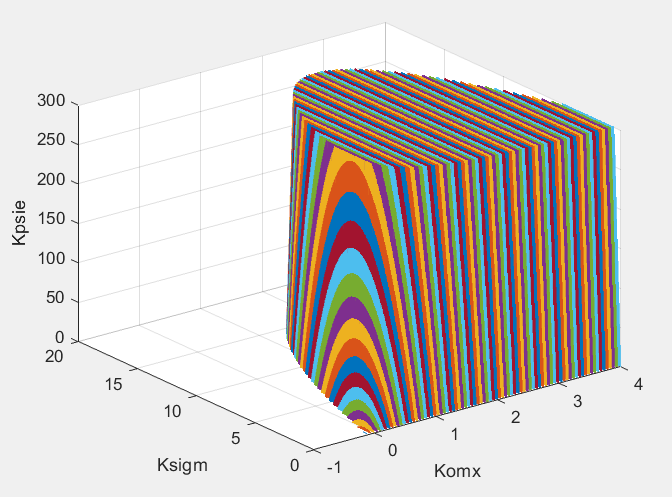


Рисунок 23. Область устойчивости для системы управления рысканием в режиме координированного разворота

# **Заключение**

1. Разработана система управления углом крена на указанном режиме полета, удовлетворяющая требованиям к точности, быстродействию и качеству процессов управления (без учета динамики привода , с учетом динамики привода )

Получены следующие значения коэффициентов передачи:

Разработана система управления углом рыскания при использовании плоского разворота на указанном режиме полета, удовлетворяющая требованиям ко времени переходного процесса, но немного нарушающая требование на перерегулирование ()

Получены следующие значения коэффициентов передачи:

3. Разработана система управления углом рыскания при использовании координированного разворота на указанном режиме полета, удовлетворяющая требованиям к точности, быстродействию и качеству процессов управления ().

Получены следующие значения коэффициентов передачи:

# **Список использованных источников**

1. Лекции по дисциплине «Проектирование систем автоматического управления летательных аппаратов». Лектор: Мулин П.В.

Дата обращения: 01.11.2022.

1. Лекции по дисциплине «Системы автоматического управления воздушными летательными аппаратами». Лектор: Рыбников С.И.

Дата обращения: 02.11.2022.

# **Приложение 1**

clc

clear

% Определение параметров системы

H = 5;

M = 0.6;

V = 192;

Zb = -0.2;

sin = 0.08;

cos = 1;

g\_del\_V = 0.051;

M\_x\_b = -5.8;

M\_x\_omx = -1;

M\_x\_omy = -0.2;

M\_x\_sigme = -7;

M\_y\_b = -3;

M\_y\_omx = -0.05;

M\_y\_omy = -0.2;

M\_y\_sigmn = -2.5;

om\_pr = 20;

kzi\_pr = sqrt(2)/2;

% Синтез параметров

a = 4; % Коэффициент пропорциональности между tpp и временем релаксации

kzi = sqrt(a^2/(pi^2+a^2)); % Коэффициент затухания

t\_pp = 1; % Задаём примерное время переходного процесса

om0 = a / kzi / t\_pp; % Определяем собственную частоту колебаний

T = 2\*pi / (om0\*sqrt(1-kzi^2)); % Определяем время релаксации

disp('Синтезированные коэффициенты')

k\_sigm = - om0^2 / M\_x\_sigme % Значение коэффициент k\_sigm

k\_omx = - (M\_x\_omx + 2\*kzi\*om0) / M\_x\_sigme % Определяем коэффициент k\_omx

% Построение переходного процесса в системе с учётом привода

% с синтезированными коэффициентами

W1 = tf(M\_x\_sigme, [1 -M\_x\_omx]); % ПФ по угловой скорости

W2 = tf(om\_pr^2, [1 2\*kzi\_pr\*om\_pr om\_pr^2]); % ПФ привода

W3 = W1\*W2; % Связываем W1 и W2

integr = tf(1, [1, 0]); % ПФ интегратора

W4 = feedback(W3, k\_omx, 1); % Положительная ОС по угловой скорости

W5 = k\_sigm \* W4 \* integr; % Разомкнутая цепь по углу крена

disp('ПФ замкнутой цепи по углу крена с учётом привода')

W6 = feedback(W5, 1, 1) % Замкнутая цепь по углу крена

disp('Корни характеристического уравнения')

roots(W6.denominator{1}) % Корни характеристического уравнения

figure;

step(-1\*W6); % Построение переходного процесса

% Построение переходного процесса в системе без учёта привода

% с синтезированными коэффициентами

W1 = tf(M\_x\_sigme, [1 -M\_x\_omx]); % ПФ по угловой скорости

integr = tf(1, [1, 0]); % ПФ интегратора

W2 = feedback(W1, k\_omx, 1); % Положительная ОС по угловой скорости

W3 = k\_sigm \* W2 \* integr; % Разомкнутая цепь по углу крена

disp('ПФ замкнутой цепи по углу крена без учёта привода')

W4 = feedback(W3, 1, 1) % Замкнутая цепь по углу крена

disp('Корни характеристического уравнения')

roots(W4.denominator{1}) % Корни характеристического уравнения

hold on

step(-1\*W4); % Построение переходного процесса

hold off

grid on

legend('С учётом динамики привода','Без учёта динамики привода')

% Корни, полученные при моделирования в NCD-блоке

disp('Плученные в NCD-блоке коэффициенты')

k\_sigm = 5.4231

k\_omx = 1.2597

% Те же самые построение только уже для подобранных в NCD-блоке

% коэффициентов

W1 = tf(M\_x\_sigme, [1 -M\_x\_omx]);

W2 = tf(om\_pr^2, [1 2\*kzi\_pr\*om\_pr om\_pr^2]);

W3 = W1\*W2;

integr = tf(1, [1, 0]);

W4 = feedback(W3, k\_omx, 1);

W5 = k\_sigm \* W4 \* integr;

disp('ПФ замкнутой цепи по углу крена с учётом привода')

W6 = feedback(W5, 1, 1)

disp('Корни характеристического уравнения')

roots(W6.denominator{1})

figure;

step(-1\*W6)

W1 = tf(M\_x\_sigme, [1 -M\_x\_omx]);

integr = tf(1, [1, 0]);

W2 = feedback(W1, k\_omx, 1);

W3 = k\_sigm \* W2 \* integr;

disp('ПФ замкнутой цепи по углу крена без учёта привода')

W4 = feedback(W3, 1, 1)

disp('Корни характеристического уравнения')

roots(W4.denominator{1})

hold on

step(-1\*W4)

hold off

legend('С учётом динамики привода','Без учёта динамики привода')

grid on

Программа 1. Основной код для системы управления стабилизацией крена

clc

clear

syms k\_sigm k\_omx s

% Определение параметров системы

H = 5;

M = 0.6;

V = 192;

Zb = -0.2;

sin = 0.08;

cos = 1;

g\_del\_V = 0.051;

M\_x\_b = -5.8;

M\_x\_omx = -1;

M\_x\_omy = -0.2;

M\_x\_sigme = -7;

M\_y\_b = -3;

M\_y\_omx = -0.05;

M\_y\_omy = -0.2;

M\_y\_sigmn = -2.5;

om\_pr = 20;

kzi\_pr = sqrt(2)/2;

W\_pr = om\_pr^2 / (s^2 + 2\*om\_pr\*kzi\_pr\*s + om\_pr^2); % ПФ привода

W1 = collect(M\_x\_sigme / (s - M\_x\_omx)); % ПФ по угловой скорости

W2 = collect(W1 \* W\_pr); % Связываем W1 и W2

W3 = collect(W2 / (1 - W2\*k\_omx)); % Положительная ОС по угловой скорости

W4 = collect(k\_sigm \* W3 / s); % Разомкнутая цепь по углу крена

W5 = collect(W4 / (1 - W4)); % Замкнутая цепь по углу крена

disp('ПФ замкнутой цепи по углу крена с учётом привода')

pretty(W5)

[num, den] = numden(W5);

disp('Числитель передаточной функции')

num = vpa(collect(num), 4)

disp('Знаменатель передаточной функции')

den = vpa(collect(den), 4)

% Выделим коэффициенты в числителе и знаменателе

% Функция coeffs запишет их от младшей степени к старшей

koefs\_num = coeffs(num, 's'); % Массив коэффициентов числителя

koefs\_den = coeffs(den, 's'); % Массив коэффициентов знаменателя

% Перевернём массивы на 180 градусов, чтобы получить коэффициенты

% от старшего ко младшему

koefs\_num = rot90(rot90(koefs\_num));

koefs\_den = rot90(rot90(koefs\_den));

% Запишем соответствующие коэффициенты в соответствующие переменные

B0 = koefs\_num(1);

A4 = koefs\_den(1);

A3 = koefs\_den(2);

A2 = koefs\_den(3);

A1 = koefs\_den(4);

A0 = koefs\_den(5);

% Запишем неравенства жля критерия Рауса

eq1 = A0 > 0;

eq2 = A1 > 0;

eq3 = A2 > 0;

eq4 = A3 > 0;

eq5 = A4 > 0;

eq6 = simplify(A1\*A2\*A3 - A1^2\*A4 - A0\*A3^2) > 0;

% Преобразуем неравенства из символьного типа данных в функции

eq1 = matlabFunction(eq1);

eq2 = matlabFunction(eq2);

eq3 = matlabFunction(eq3);

eq4 = matlabFunction(eq4);

eq5 = matlabFunction(eq5);

eq6 = matlabFunction(eq6);

% Задание сетки

l1 = [-2:0.005:5];

l2 = [-2:0.005:20];

[ko, ks] = meshgrid(l1, l2);

% Проверка устойчивости узлов сетки

c1 = eq1(ks);

c2 = eq2(ko);

c3 = eq3();

c4 = eq4();

c5 = eq5();

c6 = eq6(ko, ks);

figure;

contourf(l1, l2, c1 & c2 & c3 & c4 & c5 & c6, [1 1 1 1 1 1])

colormap lines

grid on

hold on

% Синтезированные коэффициенты

k\_omx = 1;

k\_sigm = 3.6957;

pnt1 = scatter(k\_omx, k\_sigm, 'r','filled');

% Подобранные коэффициенты

k\_omx = 1.2597;

k\_sigm = 5.4231;

pnt2 = scatter(k\_omx, k\_sigm, 'b','filled');

legend([pnt1, pnt2],"Синтезированные коэффициенты", "Подобранные коэффициенты")

hold off

xlabel('Komx')

ylabel('Ksigm')

Программа 2. Область устойчивости для системы управления стабилизацией крена

# **Приложение 2**

clc

clear

syms k\_psi k\_omegay s

% Определение параметров системы

H = 5;

M = 0.6;

V = 192;

Zb = -0.2;

sin = 0.08;

cos = 1;

g\_del\_V = 0.051;

M\_x\_b = -5.8;

M\_x\_omx = -1;

M\_x\_omy = -0.2;

M\_x\_sigme = -7;

M\_y\_b = -3;

M\_y\_omx = -0.05;

M\_y\_omy = -0.2;

M\_y\_sigmn = -2.5;

om\_pr = 20;

kzi\_pr = sqrt(2)/2;

% Передаточная функция привода

W\_pr = om\_pr^2 / (s^2 + 2\*om\_pr\*kzi\_pr\*s + om\_pr^2);

% Передаточная функция по угловой скорости рысканья с учётом привода

W\_sigmn\_omy\_raz = collect((M\_y\_sigmn\*s + (-M\_y\_sigmn\*Zb)) / (s^2 + (-M\_y\_omy-Zb)\*s + (M\_y\_omy\*Zb-M\_y\_b)) \* W\_pr);

% Обратная связь с коэффициентом обратной связи k\_omegay

W\_sigmn\_omy\_zamk = collect(W\_sigmn\_omy\_raz / (1 - k\_omegay\*W\_sigmn\_omy\_raz));

% Разомкнутая передаточная функция по углу рысканья с замкнутым внутренним

% контуром

W\_psizad\_psi\_raz = collect(k\_psi \* W\_sigmn\_omy\_zamk / s);

% Передаточная функция замкнутой системы по углу рысканья

W\_psizad\_psi\_zamk = collect(W\_psizad\_psi\_raz / (1 - W\_psizad\_psi\_raz));

% Выделим числитель и знаменатель итоговой ПФ

[num, den] = numden(W\_psizad\_psi\_zamk);

num = collect(num);

den = collect(den);

% Выделим коэффициенты числителя и знаменателя

% При этом сами коэффициенты будут записаны в порядке от младшего к

% старшему, то есть перевернутся

koefs\_num = coeffs(num, 's');

koefs\_den = coeffs(den, 's');

% Выделим старший коэффициент знаменателя. В списке он будет последний

starsh\_koef = koefs\_den(length(koefs\_den));

% Поделим все коэффициенты на это число

koefs\_num = vpa(koefs\_num / starsh\_koef);

koefs\_den = vpa(koefs\_den / starsh\_koef);

% Развернём оба списка с коэффициентами, чтобы они шли от старшего ко

% младшему

koefs\_num = rot90(rot90(koefs\_num));

koefs\_den = rot90(rot90(koefs\_den));

% Преобразованные коэффициенты передаточной функции

B1 = koefs\_num(1);

B0 = koefs\_num(2);

A5 = koefs\_den(1);

A4 = koefs\_den(2);

A3 = koefs\_den(3);

A2 = koefs\_den(4);

A1 = koefs\_den(5);

A0 = koefs\_den(6);

% Передаточная функция в нормальном виде (старший коэффициент знаменателя

% равен 1

num = (B1\*s + B0);

den = (A5\*s^5 + A4\*s^4 + A3\*s^3 + A2\*s^2 + A1\*s + A0);

PF = (num / den);

disp('Числитель ПФ')

pretty(num)

disp('Знаменатель ПФ')

pretty(den)

% Зададим параметры для оптимизации в fmicon

k0 = [10, 10];

A = [];

b = [];

Aeg = [];

beg = [];

lb = 0.1\*ones(2,1);

ub = 300\*ones(2,1);

% Осуществим параметрическую оптимизацию

[x, fval] = fmincon('fun\_min', k0, A, b, Aeg, beg, lb, ub, 'nonclon');

% Полученные коэффициенты

k\_omegay = x(1)

k\_psi = x(2)

% Преобразовывает коэффициенты характеристического полинома,

% подставляя в них найденные значения

B\_1 = vpa(-1000.0\*x(2));

B\_0 = vpa(-200.0\*x(2));

A\_5 = vpa(1);

A\_4 = vpa(28.6842);

A\_3 = vpa(414.3537);

A\_2 = vpa(1000\*x(1) + 245.98);

A\_1 = vpa(1000\*x(2) + 200\*x(1) + 1216);

A\_0 = vpa(200.0.\*x(2));

num = B\_1\*s + B\_0;

den = A\_5\*s^5 + A\_4\*s^4 + A\_3\*s^3 + A\_2\*s^2 + A\_1\*s + A\_0;

num = sym2poly(num);

den = sym2poly(den);

% Получаем передаточную функцию и строим переходный процесс

disp('Передаточная функция с полученными коэффициентами')

W\_sys = tf(num, den)

figure;

step(-1\*W\_sys)

grid on

Программа 3. Основной код для системы управление рысканием в режиме плоского разворота

function f = fun\_min(x)

% x(1) = k\_omegay, x(2) = k\_psi

A\_1 = 1000\*x(2) + 200\*x(1) + 1216;

A\_0 = 200.0\*x(2);

f = A\_1 \* A\_0^(-1);

end

Программа 4. Целевая функция для системы управления углом рыскания в режиме плоского разворота

function [c, seq] = nonclon(x)

% x(1) = k\_omegay, x(2) = k\_psi

A\_5 = 1;

A\_4 = 28.6842;

A\_3 = 414.3537;

A\_2 = 1000\*x(1) + 245.98;

A\_1 = 1000\*x(2) + 200\*x(1) + 1216;

A\_0 = 200.0\*x(2);

lambd\_star = 2.15; % Желаемое значение лямбды

lambd1 = lambd\_star - (A\_0^(-1) \* A\_1 \* A\_2 \* A\_3^(-1));

lambd2 = lambd\_star - (A\_1^(-1) \* A\_2 \* A\_3 \* A\_4^(-1));

lambd3 = lambd\_star - (A\_2^(-1) \* A\_3 \* A\_4 \* A\_5^(-1));

sigm\_star = 2; % Желаемое значение сигмы

sigm1 = sigm\_star - (A\_0^(-1) \* A\_1^2 \* A\_2^(-1));

sigm2 = sigm\_star - (A\_1^(-1) \* A\_2^2 \* A\_3^(-1));

sigm3 = sigm\_star - (A\_2^(-1) \* A\_3^2 \* A\_4^(-1));

c = [lambd1; lambd2; lambd3; sigm1; sigm2; sigm3];

seq = [];

end

Программа 5. Ограничения для системы управления углом рыскания в режиме плоского разворота

clc

clear

syms k\_psi k\_omegay s

% Задаём параметры системы

H = 5;

M = 0.6;

V = 192;

Zb = -0.2;

sin = 0.08;

cos = 1;

g\_del\_V = 0.051;

M\_x\_b = -5.8;

M\_x\_omx = -1;

M\_x\_omy = -0.2;

M\_x\_sigme = -7;

M\_y\_b = -3;

M\_y\_omx = -0.05;

M\_y\_omy = -0.2;

M\_y\_sigmn = -2.5;

om\_pr = 20;

kzi\_pr = 0.707;

% Передаточная функция привода

W\_pr = om\_pr^2 / (s^2 + 2\*om\_pr\*kzi\_pr\*s + om\_pr^2);

% Передаточная функция по угловой скорости рысканья с учётом привода

W\_sigmn\_omy\_raz = collect((M\_y\_sigmn\*s + (-M\_y\_sigmn\*Zb)) / (s^2 + (-M\_y\_omy-Zb)\*s + (M\_y\_omy\*Zb-M\_y\_b)) \* W\_pr);

% Обратная связь с коэффициентом обратной связи k\_omegay

W\_sigmn\_omy\_zamk = collect(W\_sigmn\_omy\_raz / (1 - k\_omegay\*W\_sigmn\_omy\_raz));

% Разомкнутая передаточная функция по углу рысканья с замкнутым внутренним

% контуром

W\_psizad\_psi\_raz = collect(k\_psi \* W\_sigmn\_omy\_zamk / s);

% Передаточная функция замкнутой системы по углу рысканья

W\_psizad\_psi\_zamk = collect(W\_psizad\_psi\_raz / (1 - W\_psizad\_psi\_raz));

% Выделим числитель и знаменатель итоговой ПФ

[num, den] = numden(W\_psizad\_psi\_zamk);

num = collect(num);

den = collect(den);

% Выделим коэффициенты числителя и знаменателя

% При этом сами коэффициенты будут записаны в порядке от младшего к

% старшему, то есть перевернутся

koefs\_num = coeffs(num, 's');

koefs\_den = coeffs(den, 's');

% Выделим старший коэффициент знаменателя. В списке он будет последний

starsh\_koef = koefs\_den(length(koefs\_den));

% Поделим все коэффициенты на это число

koefs\_num = vpa(koefs\_num / starsh\_koef);

koefs\_den = vpa(koefs\_den / starsh\_koef);

% Развернём оба списка с коэффициентами, чтобы они шли от старшего ко

% младшему

koefs\_num = rot90(rot90(koefs\_num));

koefs\_den = rot90(rot90(koefs\_den));

% Преобразованные коэффициенты передаточной функции

B1 = koefs\_num(1);

B0 = koefs\_num(2);

A5 = koefs\_den(1);

A4 = koefs\_den(2);

A3 = koefs\_den(3);

A2 = koefs\_den(4);

A1 = koefs\_den(5);

A0 = koefs\_den(6);

% Передаточная функция в нормальном виде (старший коэффициент знаменателя

% равен 1

num = (B1\*s + B0);

den = (A5\*s^5 + A4\*s^4 + A3\*s^3 + A2\*s^2 + A1\*s + A0);

PF = (num / den);

disp('Числитель ПФ')

pretty(num)

disp('Знаменатель ПФ')

pretty(den)

% Запишем неравенства ждя критерия Рауса

eq1 = A0 > 0;

eq2 = A1 > 0;

eq3 = A2 > 0;

eq4 = A3 > 0;

eq5 = A4 > 0;

eq6 = A5 > 0;

eq7 = simplify((A1\*A2-A0\*A3)\*(A3\*A4-A2\*A5) - (A1\*A4-A0\*A5)^2) > 0;

% Преобразуем неравенства из символьного типа данных в функции

eq1 = matlabFunction(eq1);

eq2 = matlabFunction(eq2);

eq3 = matlabFunction(eq3);

eq4 = matlabFunction(eq4);

eq5 = matlabFunction(eq5);

eq6 = matlabFunction(eq6);

eq7 = matlabFunction(eq7);

% Задание сетки

l1 = [-2:0.05:50];

l2 = [-2:0.05:50];

[ko, kp] = meshgrid(l1, l2);

% Проверка устойчивости узлов сетки

c1 = eq1(kp);

c2 = eq2(kp, ko);

c3 = eq3(ko);

c4 = eq4();

c5 = eq5();

c6 = eq6();

c7 = eq7(kp, ko);

% Построение области устойчивости

figure;

contourf(l1, l2, c1 & c2 & c3 & c4 & c5 & c6 & c7, [1 1 1 1 1 1 1])

colormap lines

hold on

% Синтезированные коэффициенты

k\_omegay = 2.7468;

k\_psi = 9.0425;

pnt1 = scatter(k\_omegay, k\_psi,'r','filled');

% Подобранные коэффициенты

k\_omegay = 2.8172;

k\_psi = 9.0425;

pnt2 = scatter(k\_omegay, k\_psi, 'b','filled');

legend([pnt1, pnt2],"Синтезированные коэффициенты", "Подобранные коэффициенты")

hold off

xlabel("Komy")

ylabel("Kpsi")

grid on

Программа 6. Построение области устойчивости для системы управления углом рыскания в режиме плоского разворота

# **Приложение 3**

clc

clear

syms s k\_psi\_e k\_omx k\_sigm

% Зададим параметры в системе

H = 5;

M = 0.6;

V = 192;

Zb = -0.2;

sin = 0.08;

cos = 1;

g\_del\_V = 0.051;

M\_x\_b = -5.8;

M\_x\_omx = -1;

M\_x\_omy = -0.2;

M\_x\_sigme = -7;

M\_y\_b = -3;

M\_y\_omx = -0.05;

M\_y\_omy = -0.2;

M\_y\_sigmn = -2.5;

om\_pr = 20;

kzi\_pr = 0.707;

% Передаточная функция привода

W\_pr = om\_pr^2 / (s^2 + 2\*om\_pr\*kzi\_pr\*s + om\_pr^2);

% Передаточная функция ОУ

W1 = M\_x\_sigme / (s - M\_x\_omx);

% Передаточная функция ОУ и привода вместе

W2 = collect(W\_pr\*W1);

% Передаточная функция с обратной связью

W3 = collect(W2 / (1 - W2\*k\_omx));

% Умножаем на интегратор

W4 = collect(W3 / s);

% Ещё раз оборачиваем обратной связью

W5 = collect(W4 / (1 - W4\*k\_sigm));

% ПФ разомкнутой цепи

W6 = collect(k\_psi\_e \* W5 \* g\_del\_V / s);

% ПФ всей системы

W7 = collect(W6 / (1 - W6));

% Выделим числитель и знаменатель итоговой ПФ

[num, den] = numden(W7);

num = collect(num);

den = collect(den);

% Выделим коэффициенты числителя и знаменателя

% При этом сами коэффициенты будут записаны в порядке от младшего к

% старшему, то есть перевернутся

koefs\_num = coeffs(num, 's');

koefs\_den = coeffs(den, 's');

% Выделим старший коэффициент знаменателя. В списке он будет последний

starsh\_koef = koefs\_den(length(koefs\_den));

% Поделим все коэффициенты на это число

koefs\_num = vpa(koefs\_num / starsh\_koef);

koefs\_den = vpa(koefs\_den / starsh\_koef);

% Развернём оба списка с коэффициентами, чтобы они шли от старшего ко

% младшему

koefs\_num = rot90(rot90(koefs\_num));

koefs\_den = rot90(rot90(koefs\_den));

% Преобразованные коэффициенты передаточной функции

B0 = koefs\_num(1);

A5 = koefs\_den(1);

A4 = koefs\_den(2);

A3 = koefs\_den(3);

A2 = koefs\_den(4);

A1 = koefs\_den(5);

A0 = koefs\_den(6);

% Передаточная функция в нормальном виде (старший коэффициент знаменателя

% равен 1

num = B0;

den = (A5\*s^5 + A4\*s^4 + A3\*s^3 + A2\*s^2 + A1\*s + A0);

PF = (num / den);

disp('Числитель ПФ')

pretty(num)

disp('Знаменатель ПФ')

pretty(den)

% Зададим параметры для оптимизации в fmicon

k0 = [1;1;1];

A = [];

b = [];

Aeg = [];

beg = [];

lb = 0.1\*ones(2,1);

ub = 300\*ones(2,1);

% Осуществим параметрическую оптимизацию

[x, fval] = fmincon('fun\_min', k0, A, b, Aeg, beg, lb, ub, 'nonclon');

% Полученные коэффициенты

k\_omx = x(1)

k\_sigm = x(2)

k\_psi\_e = x(3)

% Преобразовывает коэффициенты характеристического полинома,

% подставляя в них найденные значения

B\_0 = vpa(-142.8\*x(3));

A\_5 = vpa(1);

A\_4 = vpa(29.28);

A\_3 = vpa(428.28);

A\_2 = vpa(400.0 + 2800.0\*x(1));

A\_1 = vpa(2800.0\*x(2));

A\_0 = vpa(142.8\*x(3));

num = B\_0;

den = A\_5\*s^5 + A\_4\*s^4 + A\_3\*s^3 + A\_2\*s^2 + A\_1\*s + A\_0;

num = sym2poly(num);

den = sym2poly(den);

% Получаем передаточную функцию и строим переходный процесс

disp('Передаточная функция с полученными коэффициентами')

W\_sys = tf(num, den)

figure;

step(-1\*W\_sys)

grid on

Программа 7. Основной код для системы управления углом рыскания в режиме координированного разворота

function f = fun\_min(x)

% x(1) = k\_omegay, x(2) = k\_psi

A\_1 = 2800\*x(2);

A\_0 = 142.8\*x(3);

f = A\_1 \* A\_0^(-1);

end

Программа 8. Целевая функция для системы управления углом рыскания в режиме координированного разворота

function [c, seq] = nonclon(x)

% x(1) = k\_omegay, x(2) = k\_psi

A\_5 = 1;

A\_4 = 29.28;

A\_3 = 428.28;

A\_2 = 400.0 + 2800.0\*x(1);

A\_1 = 2800\*x(2);

A\_0 = 142.8\*x(3);

lambd\_star = 2.15; % Желаемое значение лямбды

lambd1 = lambd\_star - (A\_0^(-1) \* A\_1 \* A\_2 \* A\_3^(-1));

lambd2 = lambd\_star - (A\_1^(-1) \* A\_2 \* A\_3 \* A\_4^(-1));

lambd3 = lambd\_star - (A\_2^(-1) \* A\_3 \* A\_4 \* A\_5^(-1));

sigm\_star = 2.1; % Желаемое значение сигмы

sigm1 = sigm\_star - (A\_0^(-1) \* A\_1^2 \* A\_2^(-1));

sigm2 = sigm\_star - (A\_1^(-1) \* A\_2^2 \* A\_3^(-1));

sigm3 = sigm\_star - (A\_2^(-1) \* A\_3^2 \* A\_4^(-1));

c = [lambd1; lambd2; lambd3; sigm1; sigm2; sigm3];

seq = [];

end

Программа 9. Ограничения для системы управления углом рыскания в режиме координированного разворота

clc

clear

syms k\_psi\_e k\_omx k\_sigm s

% Зададим параметры в системе

H = 5;

M = 0.6;

V = 192;

Zb = 0.2;

sin = 0.08;

cos = 1;

g\_del\_V = 0.051;

M\_x\_b = -5.8;

M\_x\_omx = -1;

M\_x\_omy = -0.2;

M\_x\_sigme = -7;

M\_y\_b = -3;

M\_y\_omx = -0.05;

M\_y\_omy = -0.2;

M\_y\_sigmn = -2.5;

om\_pr = 20;

kzi\_pr = 0.707;

% Передаточная функция привода

W\_pr = om\_pr^2 / (s^2 + 2\*om\_pr\*kzi\_pr\*s + om\_pr^2);

% Передаточная функция ОУ

W1 = M\_x\_sigme / (s - M\_x\_omx);

% Передаточная функция ОУ и привода вместе

W2 = collect(W\_pr\*W1);

% Передаточная функция с обратной связью

W3 = collect(W2 / (1 - W2\*k\_omx));

% Умножаем на интегратор

W4 = collect(W3 / s);

% Ещё раз оборачиваем обратной связью

W5 = collect(W4 / (1 - W4\*k\_sigm));

% ПФ разомкнутой цепи

W6 = collect(k\_psi\_e \* W5 \* g\_del\_V / s);

% ПФ всей системы

W7 = collect(W6 / (1 - W6));

% Выделим числитель и знаменатель итоговой ПФ

[num, den] = numden(W7);

num = collect(num);

den = collect(den);

% Выделим коэффициенты числителя и знаменателя

% При этом сами коэффициенты будут записаны в порядке от младшего к

% старшему, то есть перевернутся

koefs\_num = coeffs(num, 's');

koefs\_den = coeffs(den, 's');

% Выделим старший коэффициент знаменателя. В списке он будет последний

starsh\_koef = koefs\_den(length(koefs\_den));

% Поделим все коэффициенты на это число

koefs\_num = vpa(koefs\_num / starsh\_koef);

koefs\_den = vpa(koefs\_den / starsh\_koef);

% Развернём оба списка с коэффициентами, чтобы они шли от старшего ко

% младшему

koefs\_num = rot90(rot90(koefs\_num));

koefs\_den = rot90(rot90(koefs\_den));

% Преобразованные коэффициенты передаточной функции

B0 = koefs\_num(1);

A5 = koefs\_den(1);

A4 = koefs\_den(2);

A3 = koefs\_den(3);

A2 = koefs\_den(4);

A1 = koefs\_den(5);

A0 = koefs\_den(6);

% Передаточная функция в нормальном виде (старший коэффициент знаменателя

% равен 1

num = B0;

den = (A5\*s^5 + A4\*s^4 + A3\*s^3 + A2\*s^2 + A1\*s + A0);

PF = (num / den);

disp('Числитель ПФ')

pretty(num)

disp('Знаменатель ПФ')

pretty(den)

% Запишем неравенства ждя критерия Рауса

eq1 = A0 > 0;

eq2 = A1 > 0;

eq3 = A2 > 0;

eq4 = A3 > 0;

eq5 = A4 > 0;

eq6 = A5 > 0;

eq7 = simplify((A1\*A2-A0\*A3)\*(A3\*A4-A2\*A5) - (A1\*A4-A0\*A5)^2) > 0;

% Преобразуем неравенства из символьного типа данных в функции

eq1 = matlabFunction(eq1);

eq2 = matlabFunction(eq2);

eq3 = matlabFunction(eq3);

eq4 = matlabFunction(eq4);

eq5 = matlabFunction(eq5);

eq6 = matlabFunction(eq6);

eq7 = matlabFunction(eq7);

% Задание сетки

ko = [-1:0.05:4];

ks = [-1:0.05:20];

kp = [-1:0.5:300];

% Построение трехмерного графика

% Задаём k\_omega

% Строим плоскую область для параметров k\_sigm, k\_psi

% Прибавляет к параметру k\_omega шаг 0.05

% Повторяем действия

% Таким образом - получится много плоских рисунков,

% которые в сумме будут давать пространство устойчивости

hold on

grid on

view(3)

for i=1:length(ko)

X = [];

Y = [];

Z = [];

ind = 1;

for j=1:length(ks)

for k=1:length(kp)

c1 = eq1(kp(k));

c2 = eq2(ks(j));

c3 = eq3(ko(i));

c4 = eq4();

c5 = eq5();

c6 = eq6();

c7 = eq7(ko(i), kp(k), ks(j));

if c1 & c2 & c3 & c4 & c5 & c6 & c7

X(ind) = ko(i);

Y(ind) = ks(j);

Z(ind) = kp(k);

ind = ind + 1;

end

end

end

plot3(X, Y, Z)

end

xlabel('Komx')

ylabel('Ksigm')

zlabel('Kpsie')

Программа 10. Построение области устойчивости для системы управления углом рыскания в режиме координированного разворота