



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ «Специальное машиностроение»

КАФЕДРА «Колесные машины»

Отчёт о выполнении домашнего задания
по курсу
«Управление техническими системами»
на тему
«Управление дроссельной заслонкой ДВС автомобиля»

Студент СМ10-81

В.Б. Сухоносенко

Преподаватель

(подпись, дата)

Принято

(подпись, дата)

(Ф.И.О.)

А.А. Смирнов

(Ф.И.О.)

Основное ДЗ - 8 баллов
Бонусное задание - 2 балла
Итого - 10 баллов

2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Выполнение работы	5
1.1 Модель ДПТ	5
1.2 Модель заслонки с приводом	7
1.3 Система управления (ПИД-регулятор)	9
1.4 Влияние белого шума и фильтрации в ПИД регуляторе . .	12
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	20
ПРИЛОЖЕНИЕ А Программы MATLAB	21
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Реакции на ступенчатое воздействие	31

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе рассматривается поворотная заслонка, приводимая в движение от двигателя постоянного тока через двухступенчатый редуктор. Заслонка имеет возвратную пружину. Поворот заслонки ограничен в диапазоне от 0 до 85 градусов. Схема системы представлена на рисунке 0.1.

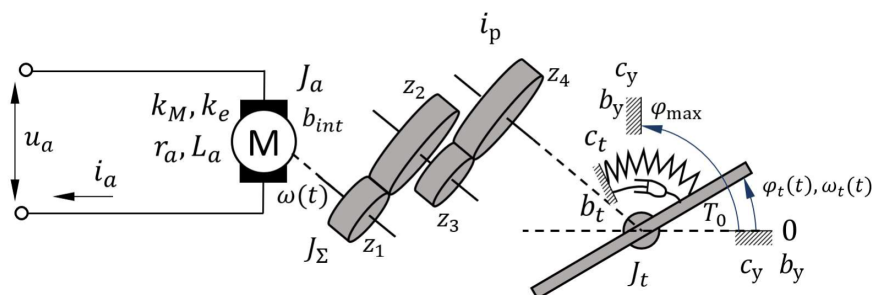


Рисунок 0.1 — Расчётная схема системы

В таблице 1 указаны параметры системы и их обозначения.

Задачей домашней работы являются:

1. Разработка математической модели электромотора в виде передаточной функции и построение его моментной характеристики,
2. Разработка математической модели заслонки с приводом в пакете MATLAB/Simulink,
3. Тестирование полученной матмодели,
4. Создание следящей системы автоматического управления заслонкой с ПИД-регулятором,
5. Подбор параметров регулятора для достижения удовлетворительных свойств системы управления,
6. Провести моделирование системы управления при различных входных воздействиях.

Таблица 1 — Параметры системы - вариант 14 (3-3-2)

Марка	-	EN35L-12V
Рабочее напряжение	U_a	12 В
Активное сопротивление обмотки	r_a	3,9 Ом
Индуктивность обмотки якоря	L_a	$2,6 \cdot 10^{-3}$ Гн
Момент инерции ротора мотора	J_e	$3,65 \cdot 10^{-6}$ кг·м ²
Моментный коэффициент двигателя	k_M	0,016 Вб
Коэффициент противоЭДС	k_e	0,017 Вб
Максимальный момент двигателя	M_{max}	$49 \cdot 10^{-3}$ Н·м
Коэффициент трения в роторе ДПТ	b_e	$5 \cdot 10^{-7}$ Н·м·с/рад
Число зубьев шестерни 1	z_1	12
Число зубьев шестерни 2	z_2	46
Число зубьев шестерни 3	z_3	12
Число зубьев шестерни 4	z_4	46
Момент инерции шестерни 1 относительно оси её вращения	J_1	$12,5 \cdot 10^{-8}$ кг·м ²
Момент инерции шестерни 2 относительно оси её вращения	J_2	$2,59 \cdot 10^{-5}$ кг·м ²
Момент инерции шестерни 3 относительно оси её вращения	J_3	$12,5 \cdot 10^{-8}$ кг·м ²
Момент инерции шестерни 4 относительно оси её вращения	J_4	$2,61 \cdot 10^{-5}$ кг·м ²
Момент инерции заслонки	J_d	$2,44 \cdot 10^{-6}$ кг·м ²
Угловая жесткость возвратной пружины	c	0,102 Н·м/рад
Крутящий момент начальной установки пружины заслонки	M_c	0,06 Н·м
Коэффициент сопротивления вращению заслонки	b	0,06 Н·м·с/рад
Коэффициент сопротивления упоров	b_y	$1 \cdot 10^6$ Н·м·с/рад
Жёсткость упоров	c_y	$5 \cdot 10^5$ Н·м/рад

1 Выполнение работы

1.1 Модель ДПТ

Двигатель постоянного тока описывается системой уравнений, первое из которых соответствует второму закону Кирхгофа для схемы замещения электродвигателя, а второе - механике вращательного движения ротора:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt}L_a + r_a i_a = u_a - k_e \omega_e, \\ J_e \frac{d\omega_e}{dt} = k_M i_a - b_e \omega_e - M_e. \end{cases} \quad (1.1)$$

Здесь i_a - ток якоря, u_a - напряжение, подаваемое на цепь якоря, ω_e - частота вращения ротора, r_a, L_a обозначают сопротивление и индуктивность в схеме замещения ДПТ соответственно, k_e, k_M - коэффициент ЭДС и коэффициент моментный - оба зависят от конструкции.

Момент, создаваемый обмотками, равен $k_M i_a$ и расходуется на вязкое трение $b_e \omega_e$ и преодоление внешней нагрузки M_e .

Выполнив преобразование Лапласа для системы уравнений выше, получим

$$\begin{cases} I_a(s)[L_a s + r_a] = U_a(s) - k_e \Omega_e(s), \\ J_e s \Omega_e(s) = k_M I_a(s) - b_e \Omega_e(s) - M_e(s). \end{cases} \quad (1.2)$$

Выразив $I_a(s)$ из первого уравнения и подставив его во второе, получим

$$\Omega_e(s) = \frac{\frac{k_M U_a(s)}{L_a s + r_a} - M_e(s)}{J_e s + b_e + \frac{k_M k_e}{L_a s + r_a}} = W_{U\Omega} U_a(s) + W_{M\Omega} M_e(s), \quad (1.3)$$

Где

$$W_{U\Omega} = \frac{k_m}{J_e L_a s^2 + (b_e L_a + J_e r_a)s + (b_e r_a + k_M k_e)}, \quad (1.4)$$

$$W_{M\Omega} = -\frac{L_a s + r_a}{J_e L_a s^2 + (b_e L_a + J_e r_a)s + (b_e r_a + k_M k_e)} \quad (1.5)$$

Моментную характеристику - значение частоты оборотов ротора в зависимости от (постоянного) момента сопротивления при определённом (постоянном) напряжении u_a можно получить, подставив $M_e = const =$

$M, U_a = const, \dot{\omega}_e = 0, \dot{i}_a = 0$ в 1.1, либо с помощью теоремы о предельном значении, приняв $M_e(s) = M/s, U_a(s) = U/s$:

$$\omega_e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s\Omega_e(s) = \frac{Uk_M - r_a M}{b_e r_a + k_M k_e}, \quad (1.6)$$

где $U_a = 12$ В, M - момент сопротивления, прикладываемый к валу электродвигателя)

В MATLAB заданы параметры по варианту и построен график моментной характеристики по уравнению выше.

```
M=0:Mmax/20:Mmax;
```

```
plot((Ua*kM-ra.*M)./(be*ra+kM*ke)/2/pi*60,M*1000,'-o')
```

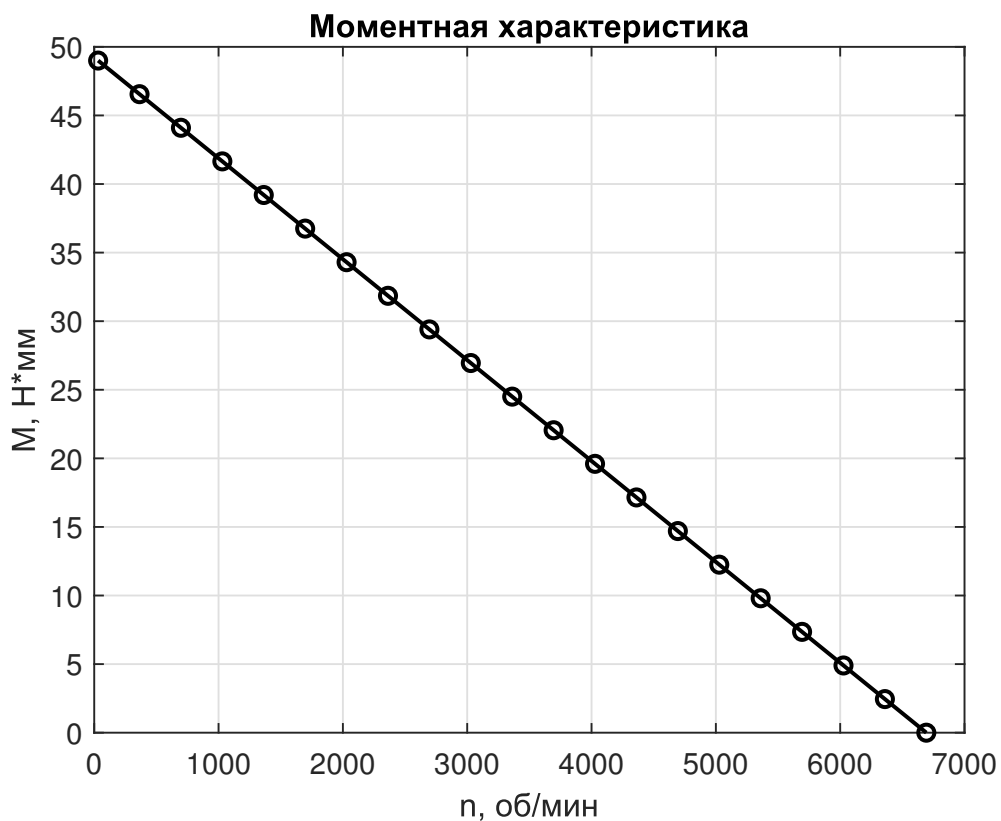


Рисунок 1.1 — Моментная характеристика

Характеристика линейная и проходит через точки (0 об/мин, $M_{max} = 49 \cdot 10^{-3}$ Нм) и (6692.7 об/мин, 0 Нм)

1.2 Модель заслонки с приводом

Если применить теорему об изменении кинетической энергии для всей системы (за координату принимаем угол поворота заслонки φ) и подставить $\varphi_e = u_r \varphi$, где $u_r = \frac{z_2 z_4}{z_1 z_3}$ - передаточное число редуктора, придём к следующему выражению:

$$J_{\Sigma} \ddot{\varphi} = k_M i_a u_{red} - \dot{\varphi} b_{\Sigma} - c \varphi - M_c - M_{отб} \quad (1.7)$$

Здесь $J_{\Sigma} = (J_e + J_1)(\frac{z_2 z_4}{z_1 z_3})^2 + (J_2 + J_3)(\frac{z_4}{z_3})^2 + (J_4 + J_d)$ - момент инерции системы, приведённый к оси заслонки, c - коэффициент жёсткости пружины заслонки, $b_{\Sigma} = (b + b_e u_r^2)$ - коэффициент демпфирования, приведённый к оси заслонки, $k_M i_a u_{red} = M_e$ - подводимый от электродвигателя момент, M_c - момент о предварительного натяга пружины. $M_{отб}$ - момент, действующий со стороны упоров и описываемая нелинейной зависимостью (приведена ниже).

Таким образом, поведение всей системы описывается системой уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{i}_a = (u_a - k_e \dot{\varphi} u_r - r_a i_a) / L_a, \\ J_{\Sigma} \ddot{\varphi} = k_M i_a u_{red} - \dot{\varphi} b_{\Sigma} - c \varphi - M_c - M_{отб} \\ M_{отб} = M_{cy} + M_{by}, \\ M_{cy} = \begin{cases} 0, & \varphi \in [0^\circ, 85^\circ], \\ c_y(\varphi - 85^\circ) & \varphi > 85^\circ, \\ c_y \varphi & \varphi < 0^\circ; \end{cases} \\ M_{by} = \begin{cases} 0, & \varphi \in [0^\circ, 85^\circ], \\ 0, & (sign(\dot{\varphi}) > 0 \wedge \varphi < 0) \vee (sign(\dot{\varphi}) < 0 \wedge \varphi > 85), \\ b_y \dot{\varphi}, & (sign(\dot{\varphi}) > 0 \wedge \varphi < 0) \vee (sign(\dot{\varphi}) > 0 \wedge \varphi > 85). \end{cases} \end{array} \right. \quad (1.8)$$

Момент при ударе работает следующим образом - при перемещении заслонки за допустимые пределы возникает момент от сил упругости M_{cy} и демпфирующих сил M_{by} . Силы упругости работают всё время, что проис-

ходит удар. Демпфирующие силы применяются только во время движения в сторону упора (аналогично модели "full stiffness and damping applied at bounds, undamped rebound" в блоке "rotational hard stop" в Simscape).

На рисунке 1.2 представлена схема Simulink, решающая систему уравнений выше. Модель ДПТ принимает значения u_a и выдаёт значение угловой частоты заслонки ω , угла поворота заслонки φ . Сопротивление упоров $M_{отб}$ реализовано с помощью нелинейных блоков Dead space, Sign.

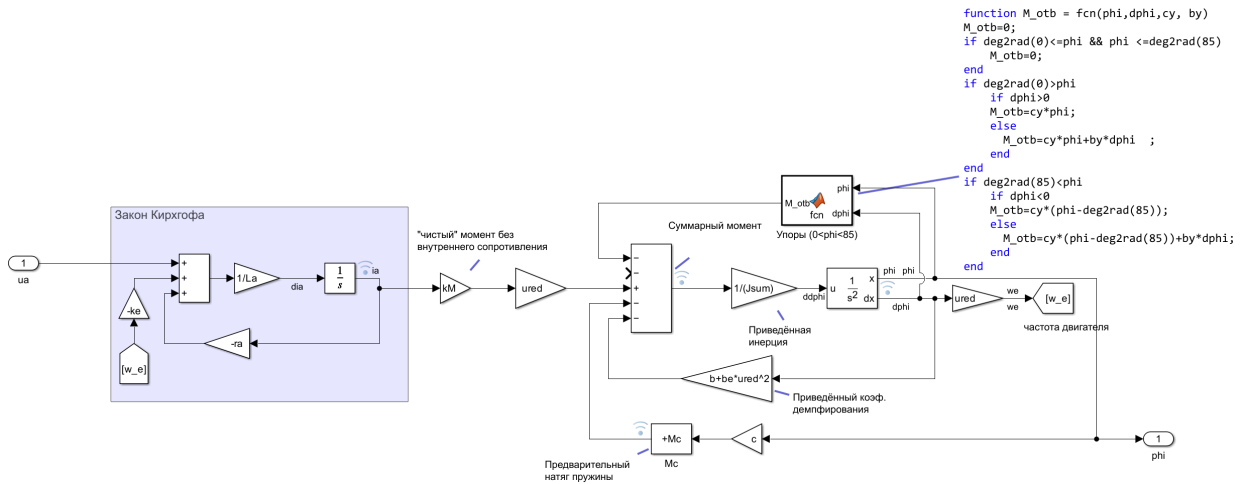


Рисунок 1.2 — Схема Simulink ДПТ

Применение $M_{отб}$ только при ударе реализуется с помощью блока Simulink function.

Реакция на воздействие «обратная ступенька» показана на рисунке 1.3. В силу большой жёсткости и коэффициента демпфирования упоров необходимо использовать решатель `ode23t` со значением относительной погрешности 10^{-4} , абсолютной 10^{-6} . На нижнем графике можно увидеть, как происходит отскок заслонки при ударе об упор. Аналогичные колебания возникают при ударе об упор 0 градусов.

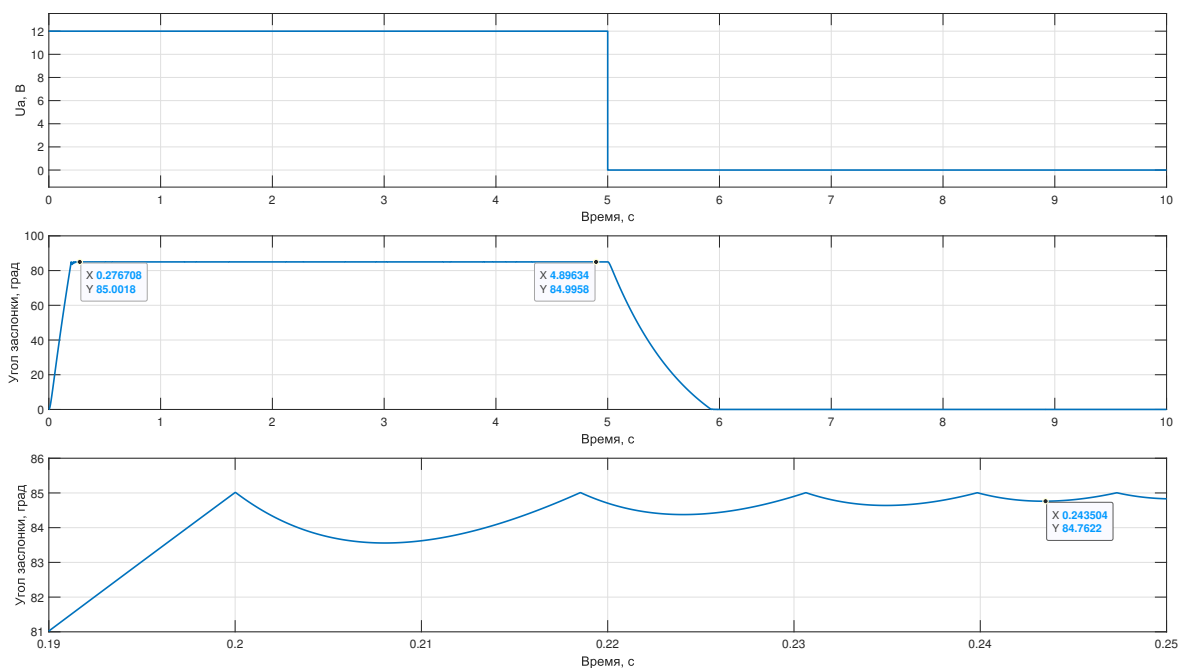


Рисунок 1.3 — Реакция системы на воздействие

1.3 Система управления (ПИД-регулятор)

На рисунке 1.4 двигатель, редуктор и заслонка объединены в подсистему, построена отрицательная обратная связь, поставлен ПИД-регулятор (рисунок 1.5).

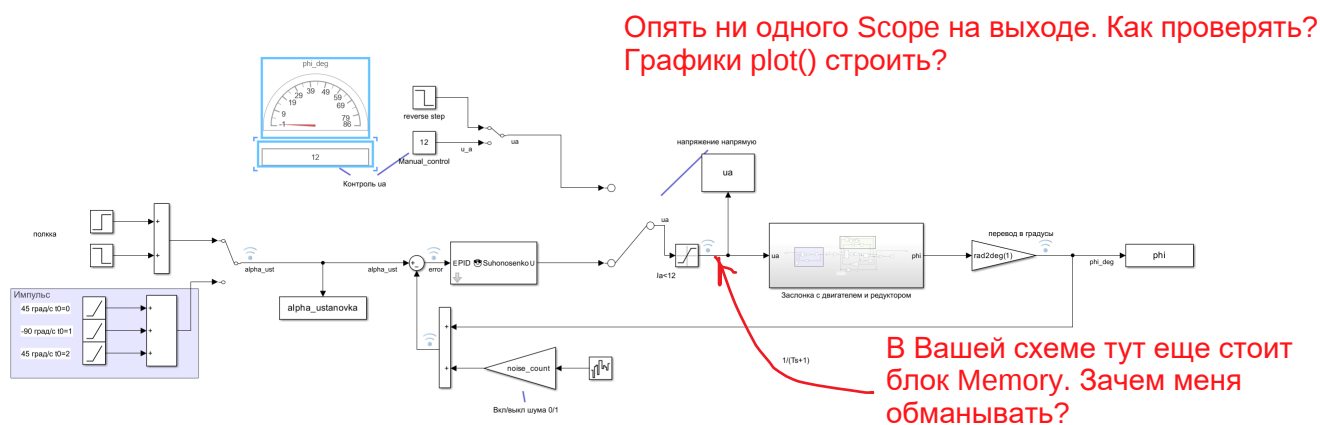


Рисунок 1.4 — САУ (ПИД-регулятор)

Подобраны следующие коэффициенты ПИД-регулятора:

$$K_p = 1.2, K_i = 7, K_d = 0.6$$

Форма записи регулятора имеет вид $\frac{U_a(s)}{E(s)} = [K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s]$, где $E(s)$ – изображение ошибки, подаваемой на вход регулятора. Большое значение K_i выбрано с той целью, чтобы при целевых углах около одного градуса

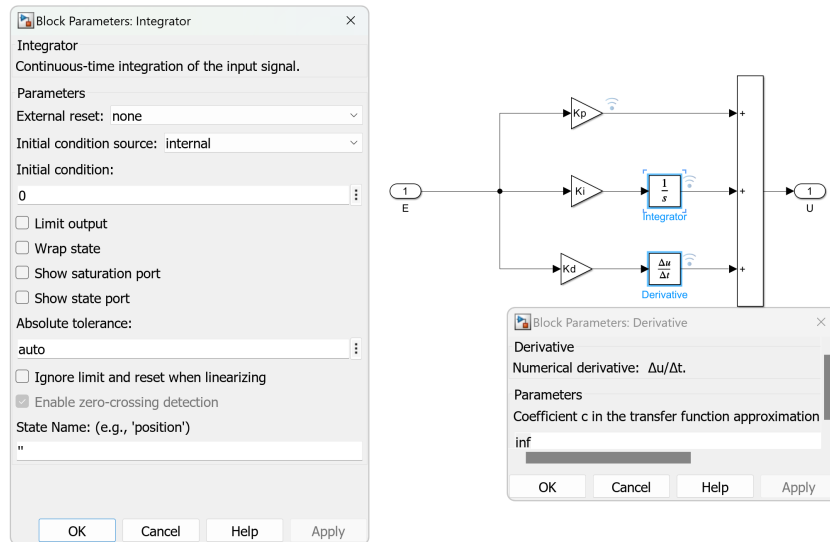


Рисунок 1.5 — Подсистема ПИД-регулятора

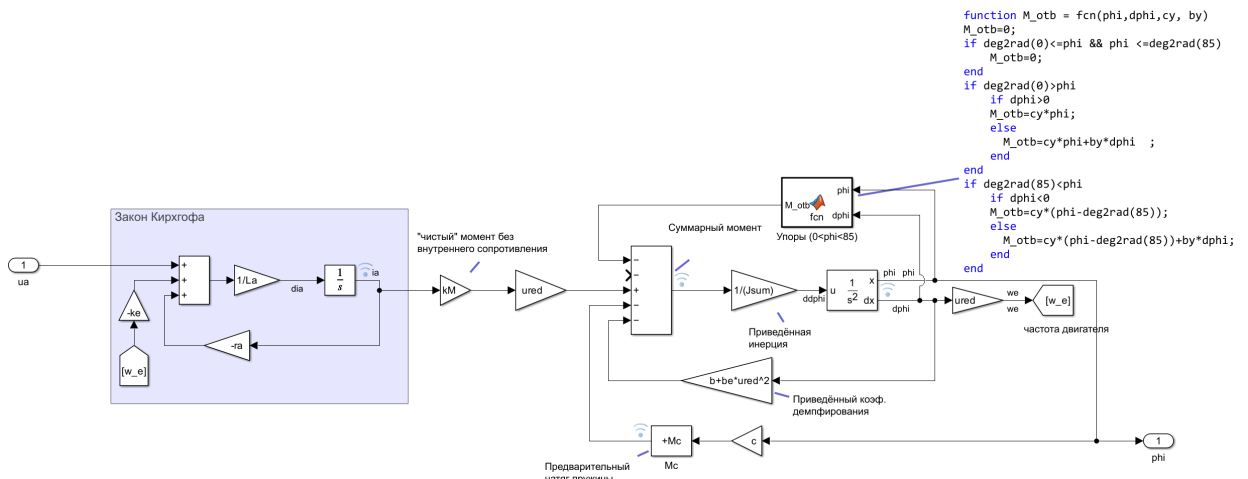


Рисунок 1.6 — Подсистема "Заслонка с двигателем и редуктором"

уменьшение ошибки было достаточно большим, так как увеличение K_p в данном случае приводит к изменению подаваемого напряжения сразу до насыщения при больших целевых углах. Помимо этого, интегрирующее звено компенсирует усилие от предварительного натяга пружины.

Составлена программа для моделирования поведения САУ при ступенчатых воздействиях: полка формировалась с помощью двух ступенчатых воздействий: прямого и обратного (блоки Step), сдвинутых относительно друг друга во времени.

```

alpha_m=15:10:85;
for i = 1:length(alpha_m)
alpha_ust=alpha_m(i)

```

```
sim("model.slx")
charp(i)=out.phi;
charu(i)=out.ua;
end

% Через plot(charp(i)) строим графики...
```

Общий результат показан на рисунке 1.8. **Подробные графики приведены в приложении Б.** Видно, что перерегулирование во всех случаях не превышает 30 процентов и длится не дольше 1 секунды.

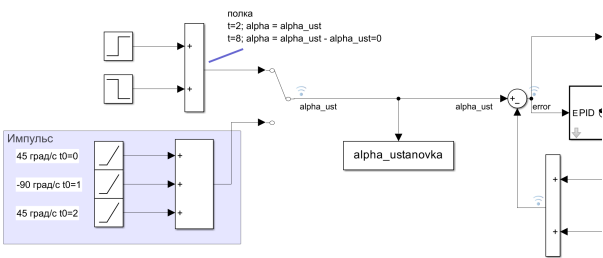


Рисунок 1.7 — Формирование управляющих сигналов в Simulink

Графики не совпадают с моими. Возможно это из-за ошибки в исходных данных (см. Приложение А).

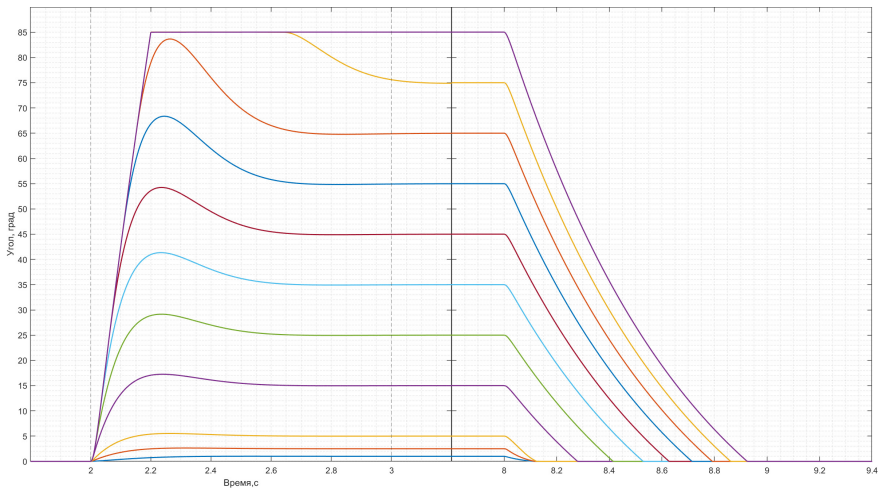


Рисунок 1.8 — Реакции на ступенчатое воздействие

Таблица 2 — Качественные показатели

Угол, град	15	25	35	45	55	65	75	85
Перерегулирование, %	16,6	16,9	17,1	17,8	21	16,9	13	0
Время регулирования, с (2%)	2,72	2,79	2,81	2,81	2,81	2,82	2,98	2,18

откуда взялись такие времена регулирования? По графикам невооруженным глазом видно, что это не так.

График для воздействия, имитирующего импульсное, показан на рисунке 1.9. Задающее воздействие формируется с помощью трёх блоков Ramp. Видно, что ПИД-регулятор за счёт дифференцирующего звена успевает за возрастающим целевым углом (коэффициент ошибки по скорости нулевой). Требования к переходному процессу в этом случае не предъявлялось.

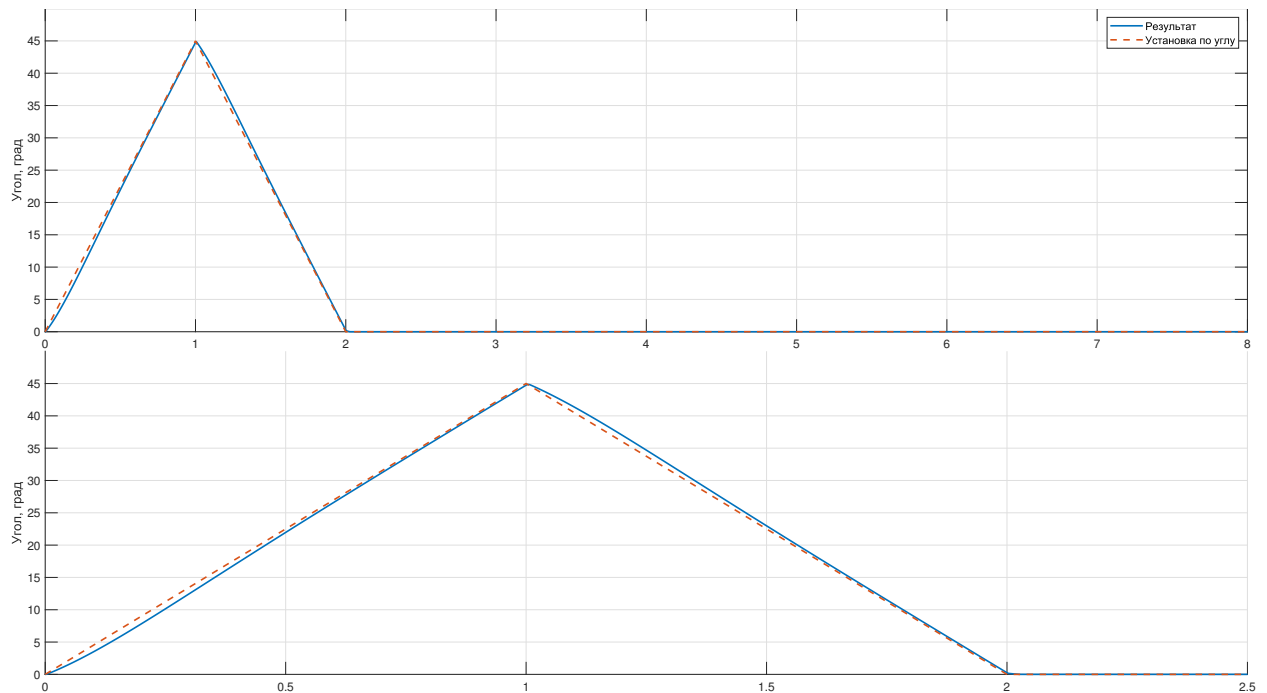


Рисунок 1.9 — Имитация импульсного воздействия

1.4 Влияние белого шума и фильтрации в ПИД регуляторе

Схема дополнена введением в канал измерения угла поворота заслонки помехи в виде белого шума с интенсивностью 0,01 и временем корреляции 0,001 (см. рисунок 1.10).

На рисунке 1.11 показан пример того, какой сигнал "видит" регулятор при вычислении ошибки (зелёный) на фоне графика реального угла поворота заслонки (фиолетовый).

ПИД-регулятор с фильтром выполнен отдельным элементом (блок PID Controller, рисунок). Здесь передаточная функция регулятора имеет вид $K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \frac{N}{1+\frac{N}{s}}$, где дифференциальное звено имеет постоянную фильтра $N = \frac{1}{T}$ (T - постоянная времени фильтра).

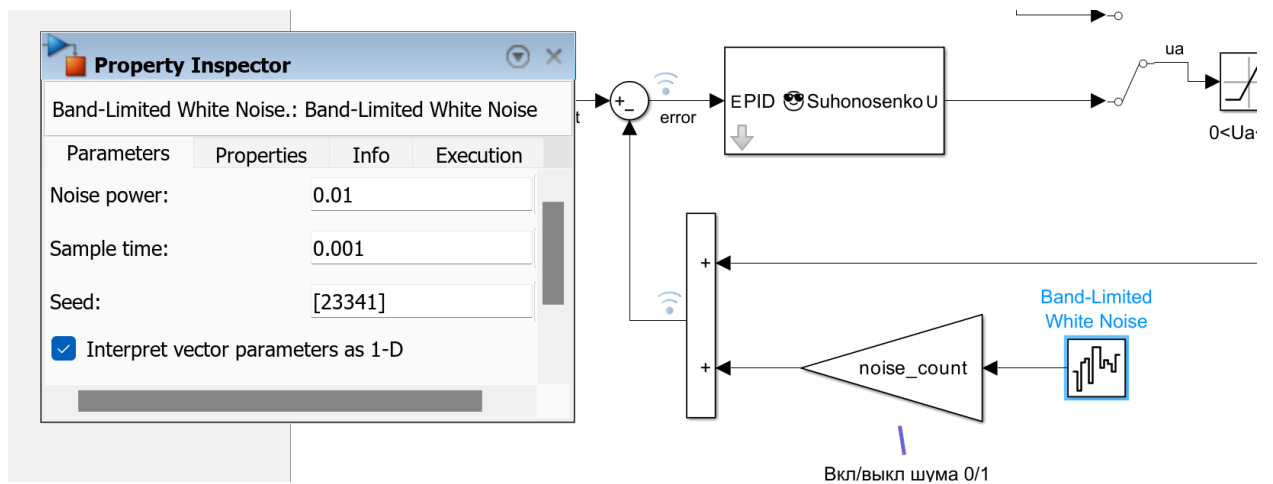


Рисунок 1.10 — Добавление белого шума в обратную связь

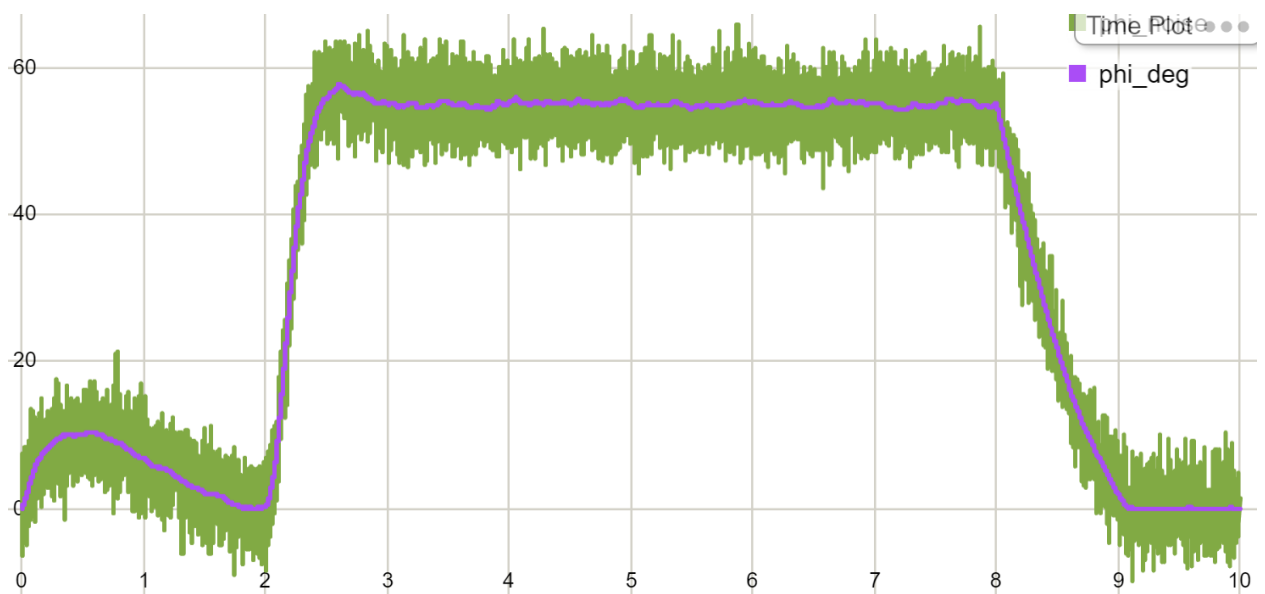


Рисунок 1.11 — Сигнал с датчика при наличии шума по сравнению с реальным значением

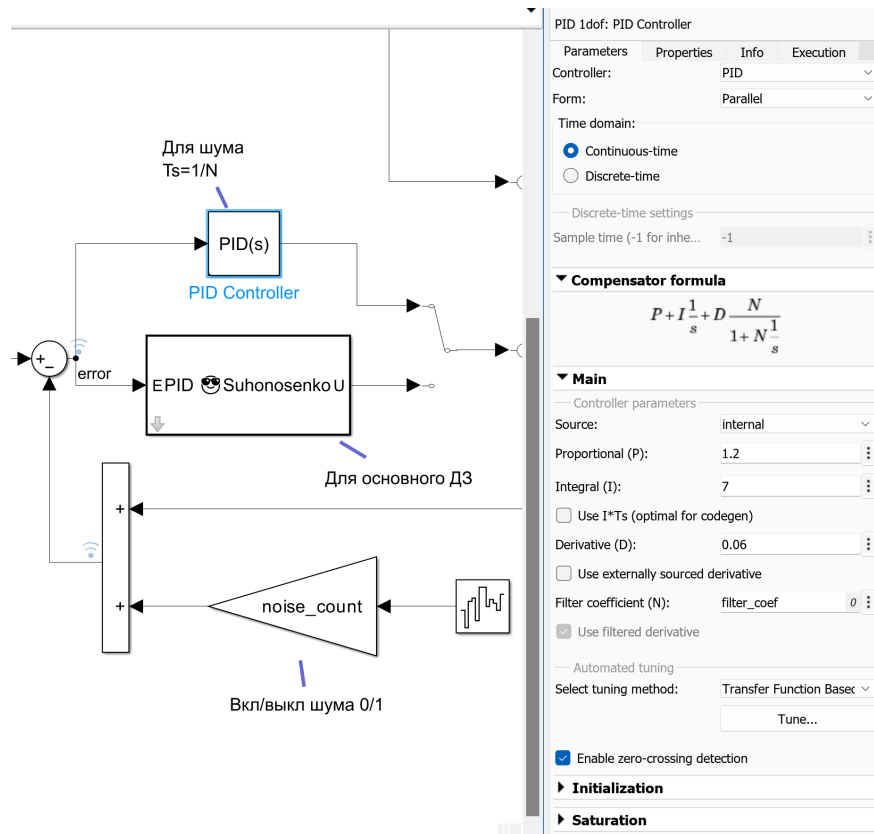


Рисунок 1.12 — ПИД с фильтрацией

К дифференцирующему звену добавлен фильтр низких частот первого порядка с постоянной времени $T = 0.7 \cdot 10^{-3}$, что меньше периода, с коорым обновляется значение шума (10^{-3} секунды). С данным значением T проведены эксперименты для ступенчатого и импульсного воздействия.

```
alpha_m=[15 45 65 85];
noise_count=1;
%% ВЫБРАТЬ SWITCH НА ИДЕАЛЬНЫЙ ПИД
for i = 1:length(alpha_m)
    alpha_ust=alpha_m(i)
    sim("model.slx")
    charpn(i)=phi;
    charu(i)=ua;
end
%% ВЫБРАТЬ SWITCH НА ПИД С ФИЛЬТРОМ
filter_coef=7/1e-4 % Фильтрация Д-действия T=7e-4
for i = 1:length(alpha_m)
```

```

alpha_ust=alpha_m(i)
sim("model.slx")
charpf(i)=phi;
charuf(i)=ua;
end

disp('Batch Complete!')

```

В силу значительного шума (достигает 7-10 градусов в очень малый промежуток времени), "жесткость" системы в плане решения повышается из-за больших и резких значений на выходе дифференцирующего звена.

Для качественной динамики процесса был выбран решатель ode1be (обратный Эйлер) с шагом $4 \cdot 10^{-6}$ с, который достаточно хорошо отражает поведение заслонки при её движении, но не расходится при упоре. Этот шаг на несколько порядков меньше шага, с которым обновляется значение шума.

чем объясняются различия на этом участке? Вы опять не привели графики сигнала управления для этого участка. Здесь по-хорошему сигнал управления должен быть равен 0 в обоих случаях и тогда непонятно!

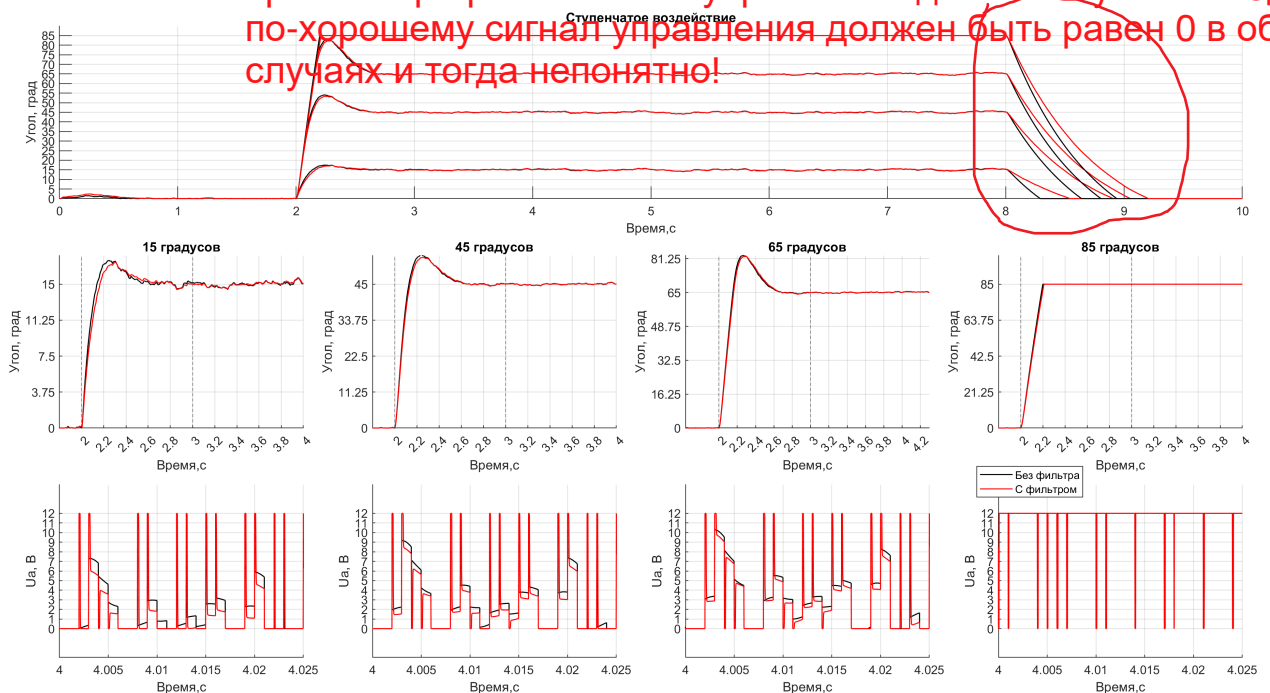


Рисунок 1.13 — Сравнение работы регулятора с (красное, $T = 0.7 \cdot 10^{-3}$ с) и без (черное, $T = 0$ с) фильтрации дифференцирующего звена

На рисунке 1.13 чёрным показано поведение системы при различных целевых углах при отсутствии фильтра дифференцирующего звена ПИД-

регулятора. Красные кривые соответствуют тем же целевым углам, но с наличием фильтра в ПИД-регуляторе.

Видно, что идеальный ПИД-регулятор отрабатывает лучше в начальный промежуток (0-2 секунды), чем регулятор с фильтром.

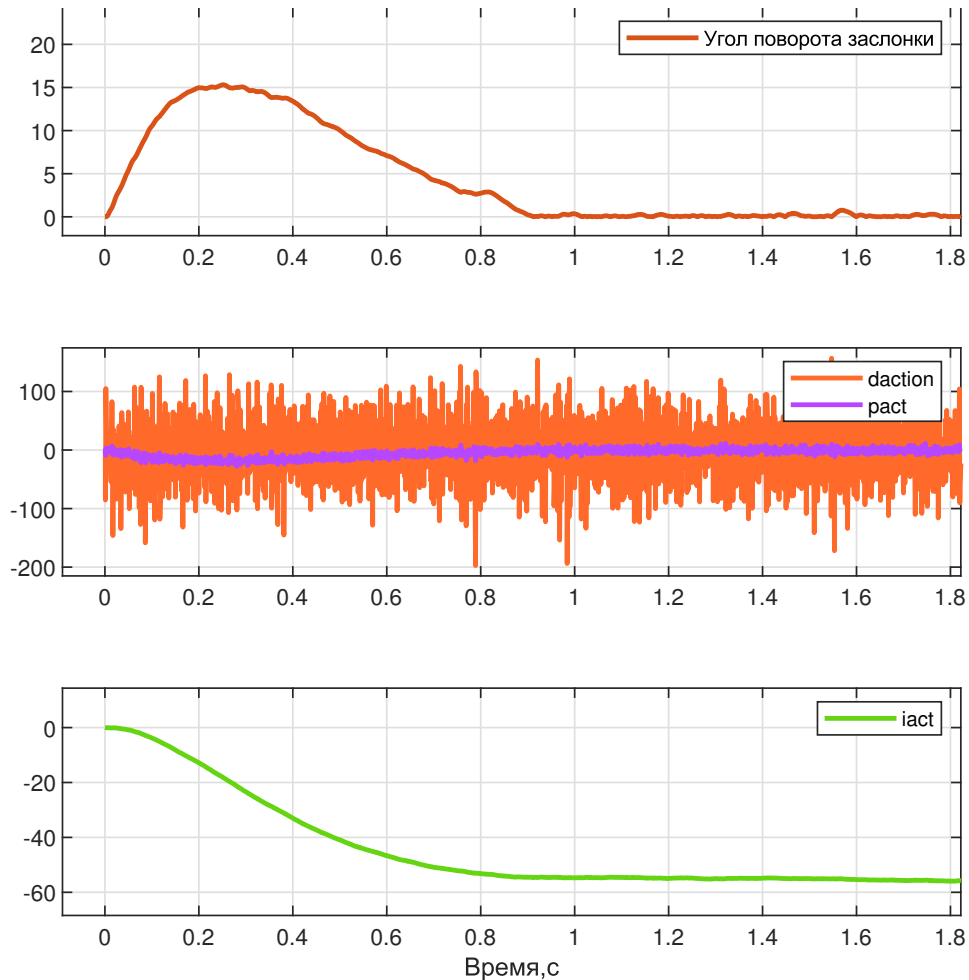


Рисунок 1.14 — "Горб" во время 0-1 сек

Наблюдается "горб" в промежутке 0-1 секунды. На 1.14 показаны отдельно действия от П, Д-звеньев (график посередине) и от интегрального звена (нижний график). Из-за шума интегральному звену нужно время, чтобы накопить отрицательный сигнал, который удерживает заслонку у упора и компенсирует действие П,Д-звеньев регулятора, возникающее от шумов. Изменение зерна (seed) блока White Noise не изменяет наличие "горба"

На рисунке 1.15 показана реакция на имитацию импульсного воздействия с $(T = 0.7 \cdot 10^{-3})$ и без фильтра. Идеальный регулятор следит за установкой лучше, чем ПИД с фильтром.

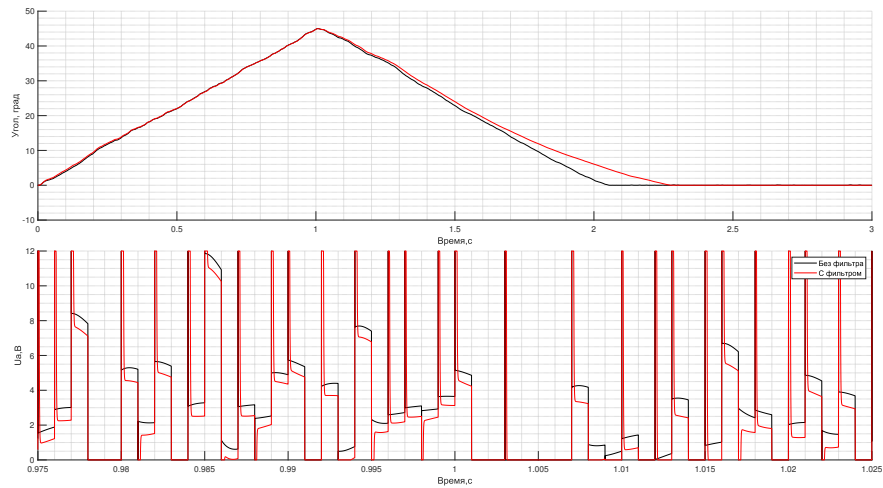


Рисунок 1.15 — Реакция на имитацию импульсного воздействия с и без фильтра

Если увеличить постоянную времени фильтра до $T = 10^{-3}$, равную периоду, с которым обновляется значение шума, получим значительно худшую обработку фильтра. Результаты показаны на 1.16, 1.17.

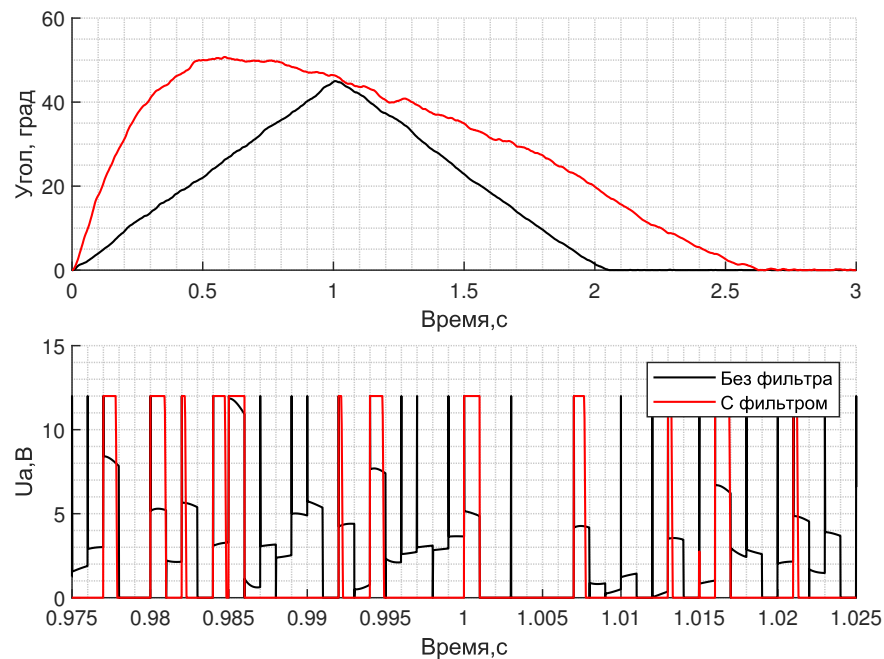


Рисунок 1.16 — Реакция на импульсное воздействие $T = 10^{-3}$ с

Регулятор с фильтром достигает меньшего перерегулирования, однако время регулирования увеличено, на протяжении всего движения (нарастание угла и установившийся режим) колебания из-за шума выше, чем в случае идеального ПИД-регулятора.

Объяснить худший результат (красные графики) можно объяснить несколькими факторами.

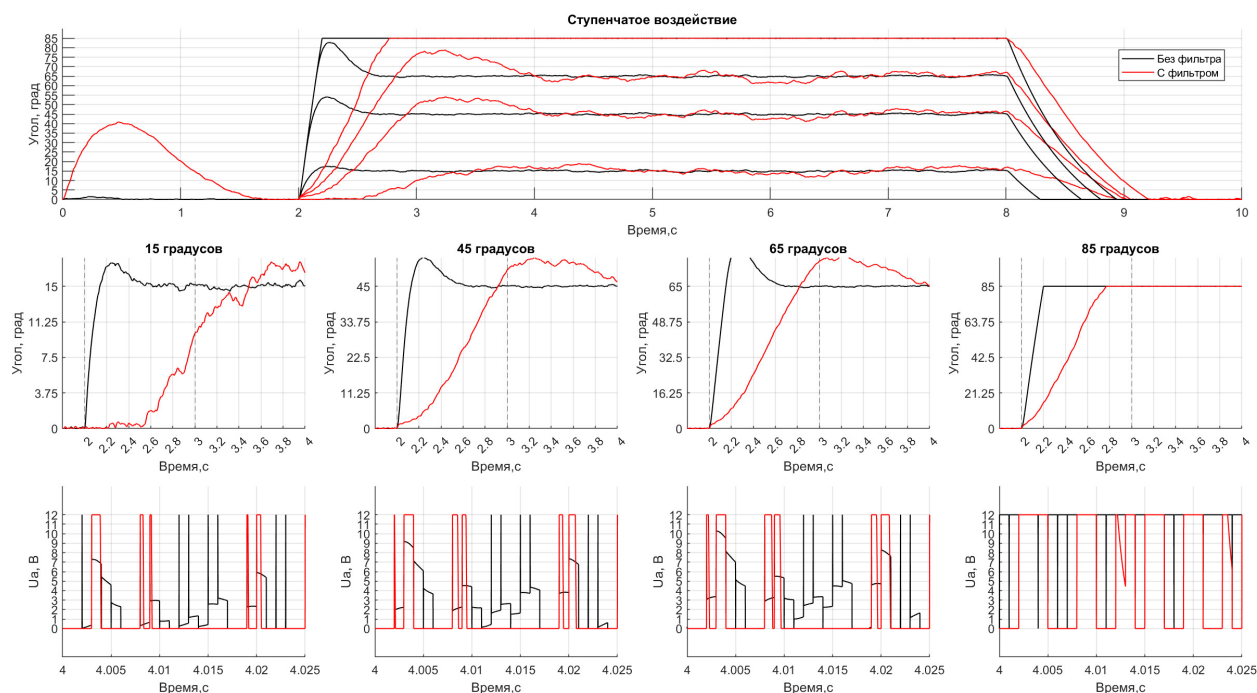


Рисунок 1.17 — Работа регулятора с (красное, $T = 10^{-3}$ с) и без (черное, $T = 0$ с) фильтрации дифференцирующего звена

Ограничение на входное напряжение от 0 до 12 В (блок Saturation в модели) само по себе является фильтром высоких частот – например, синусоида, у которой пики "срезаны" насыщением, будет иметь отличный от исходного спектр. Когда за счёт шума регулятор "думает что нужно увеличить угол, он подаёт напряжение 12 В и максимально возможный момент при данной частоте вращения вала. Когда происходит обратное он подаёт значение, близкое к 0 В, и главное усилие, которое возникает только за счёт пружины, меньше.

Шум на датике по амплитуде достаточно высокий и быстро изменяющийся, из-за чего производная ошибки большая (без фильтра управляющее воздействие – напряжение от Д-звена достигает 1200 В, с фильтром - около 300 В).

Без фильтра (см. нижние графики на рисунке 1.13) скачки управляющего воздействия от дифференцирующего звена частые, но короткие – они реагируют на большую часть шума, но действие кратковременно, в то время как при наличии фильтра при скачке ошибки действие от дифференцирующего звена изменяется не так быстро из-за ненулевой постоянной фильтра. За счёт этого возросший сигнал напряжения, в течение некоторо-

го времени не спадает, потому что действие от Д-звена медленно убывает после пика – ошибка в интегрирующем звене накапливается, колебания угла заслонки увеличиваются.

В результате этого можно сделать следующий вывод: увеличение постоянной времени фильтра ухудшает качественные показатели; уменьшение постоянной времени приближает регулятор к идеальному (при $T = 10^{-6}$ отличие от идеального регулятора почти не наблюдается)

Данное явление не соответствует обычному случаю, когда внедрение фильтра улучшает устойчивость к шумам – связано это именно с блоком Saturation. Без него регулятор с фильтром отработывал бы лучше, но такая модель не соответствует физике процесса (упоры в модели пропадут, заслонка сможет делать несколько полных оборотов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения домашней работы была разработана математическая модель электромотора в виде передаточной функции, с помощью неё построена моментная характеристика; собрана модель заслонки с приводом в пакете MATLAB/Simulink, произведено тестирование модели; Создана следящая система автоматического управления заслонкой с помощью ПИД-регулятора; подобраны коэффициенты ПИД-регулятора и исследовано поведение системы управления при различных входных воздействиях.

Проведено сравнение поведения системы при наличии шума в сигнале чувствительного элемента (датчика угла поворота заслонки) при использовании ПИД-регулятора с и без фильтром в дифференцирующем звене. Рассмотрение результатов приводит к тому, что при реализации реального ПИД-регулятора, в котором наличие идеального дифференцирующего звена невозможно, качественные показатели системы управления хуже, чем при идеальном регуляторе.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Программы MATLAB

Файл `model_prerequisite.m` – задаются исходные данные. Необходимо запустить перед работой с Simulink-моделью.

```
Ua=12;  
ra=3.9;  
La=2.6e-3;  
Je=3.65e-6;  
kM=0.016;  
ke=0.017;  
Mmax=49e-3;  
be=5e-7;  
z1=12;  
z2=46;  
z3=12;  
z4=46;  
J1=12.5e-8;  
J2=2.59e-8;  
J3=12.5e-8;  
J4=2.61e-5;  
Jd=2.44e-6;  
c=0.102;  
Mc=0.06;  
b=0.06;  
by=1e6;  
cy=5e5;
```

2,59e-5 !

ошибка в исходных данных

```
noise_count=0;  
filter_coef=inf;
```

```
u1=z2/z1  
u2=z4/z3
```

```
ured=u1*u2
```

```
Jsum = (J1+Je)*ured^2+(J2+J3)*u2^2+J4+Jd;
```

```
alpha_ust=55;
```

Файл preload_live_script.mlx использовался для построения графиков.

```
run("model_prerequisite.m")
```

```
%Моментная характеристика
```

```
M=0:Mmax/20:Mmax
```

```
plot((Ua*kM-ra.*M)./(be*ra+kM*ke)/2/pi*60,M*1000,'-o')
```

```
gostplot("Моментная характеристика","n, об/мин", "M, Н*мм")
```

```
Ua*kM-(be*ra+kM*ke)*0/ra
```

```
figure()
```

```
 tiledlayout(3,1,'TileSpacing','Compact','Padding','compact');
```

```
nexttile()
```

```
title("Управляющее воздействие")
```

```
plot(out.ua.Time,out.ua.Data)
```

```
xlabel('Время, с')
```

```
grid on
```

```
ylabel('Ua, В')
```

```
nexttile
```

```
title("Реакция объекта")
```

```
plot(out.phi.Time,out.phi.Data)
```

```
grid on
```

```
xlabel('Время, с')
```

```
ylabel('Угол заслонки, град')
```

```

nexttile([1 1])
plot(out.phi.Time,out.phi.Data)
grid on
ylabel('Ua, B')
xlabel('Время, с')
xlim([0.19 0.25])

% Подбор ПИД
wuph=tf([kM],[Je*La (be*La+Je*ra) (be*ra+kM*ke) 0])
wMphi =tf(-[La ra],[Je*La (be*La+Je*ra) (be*ra+kM*ke) 0])
wMephi=tf([J1*ured^2+(J2+J3)*u2^2+(J4+Jd), b, c, Mc],[1 0])

wsys=ured*wuph/(1-ured*wMphi*wMephi)

pidtune(wsys,pidstd(1,1,1))

pole(wsys)
zero(wsys)

wsys_s=minreal(wsys)
pole(wsys_s)
pid=tf([1 18e-4 106e-8],[1 0])
wsys*pid
sys_pidded=feedback(ans,tf(1,1))
sys_pidded=minreal(sys_pidded)
pole(sys_pidded)

alpha_m=[1 2.5 5:10:85];
noise_count=0;
filter_coef=0;
for i = 1:length(alpha_m)
alpha_ust=alpha_m(i)
sim("model.slx")

```

```

charp(i)=phi;
charu(i)=ua;
end
disp('Batch Complete!')

%разные переходные характеристики
figure()
tiledlayout(2,2,'Padding','tight','TileSpacing','tight')
nexttile([1 2])
for i = 1:length(charp)
plot(charp(i).Time,charp(i).Data);
hold on
end
hold off
legend(num2str(alpha_m'))
grid minor
yticks(0:5:85)
xticks(0:1:14)
xlim([0 14])
ylim([0 90])
xlabel('Время,с')
ylabel('Угол, град')
title('Ступенчатое воздействие')

nexttile([1 1])
for i = 1:length(charp)
plot(charp(i).Time,charp(i).Data);
%idx=find(charp(i).Data==max(charp(i).Data));
%plot(charp(i).Time(idx),charp(i).Data(idx),'x','MarkerSize',10)

%idx=find(charp(i).Time<3,1,'last');
%plot(charp(i).Time(idx),charp(i).Data(idx),'X','MarkerSize',10)

```

```

hold on
end
xline(2,'--')
xline(3,'--')
hold off
xlabel('Время,с')
ylabel('Угол, град')
grid minor
yticks(0:5:85)
xticks(2:0.2:3)
xlim([2-0.2 3.2])
ylim([0 90])

nexttile([1 1])

for i = 1:length(charp)
plot(charp(i).Time,charp(i).Data);

hold on
end
hold off
yticklabels("")
grid minor
yticks(0:5:85)
xticks(8:0.2:14)
xlim([8-0.2 9.4])
ylim([0 90])

% Включить импульс
sim('model')

figure
tiledlayout(2,1,'Padding','tight','TileSpacing','tight')

```

```

nexttile()

plot(phi)
title("")
hold on
xlabel("")
grid on
plot(alpha_ustanovka, '--')
legend("Результат", "Установка по углу")
ylabel('Угол, град')
yticks(0:5:45)
xlim([0 8])
ylim([0 50])
nexttile()
%
% plot(ua)
% title(" ")
% xlabel('Время, с')
% ylabel('Ua, В')
% grid on
% xlim([0 8])
%
% nexttile()

hold on
plot(phi)

plot(alpha_ustanovka , '--')
title("")

xlabel("")
grid on

```

```

%legend("Результат", "Задающее воздействие")
xlim([0 2.5])
ylim([0 50])
ylabel('Угол, град')

yticks(0:5:45)

alpha_m=[15 45 65 85];
noise_count=1;
filter_coef=0;
for i = 1:length(alpha_m)
alpha_ust=alpha_m(i)
sim("model.slx")
charpn(i)=phi;
charu(i)=ua;
end
filter_coef=0.001
for i = 1:length(alpha_m)
alpha_ust=alpha_m(i)
sim("model.slx")
charpf(i)=phi;
charuf(i)=ua;
end

disp('Batch Complete!')

figure()
tiledlayout(3,4,'Padding','tight','TileSpacing','tight')
nexttile([1 4])
for i = 1:length(charpn)
hold on
plot(charpn(i).Time,charpn(i).Data,'k','LineWidth',1);
plot(charpf(i).Time,charpf(i).Data,'r','LineWidth',1);

```

```

end
hold off
grid minor
yticks(0:5:85)
xticks(0:1:14)
xlim([0 10])
ylim([0 90])
xlabel('Время,с')
ylabel('Угол, град')
title('Ступенчатое воздействие')

```

```

hold on
for i = 1:length(charpn)
nexttile([1 1])
title(num2str(alpha_m(i))+" градусов")
hold on
plot(charpn(i).Time,charpn(i).Data,'k','LineWidth',1);
plot(charpf(i).Time,charpf(i).Data,'r','LineWidth',1);

```

```

xline(2,'--')
xline(3,'--')
hold off
xlabel('Время,с')
ylabel('Угол, град')
grid minor
yticks(0:alpha_m(i)/4:100)
xticks(2:0.2:13)
xlim([2-0.2 4])
ylim([0 alpha_m(i)*1.2])

```

```

end

for i = 1:length(charpn)
nexttile([1 1])
hold on
plot(charu(i).Time,charu(i).Data,'k','LineWidth',1);
plot(charuf(i).Time,charuf(i).Data,'r','LineWidth',1);

hold off
xlabel('Время,с')
ylabel('Ua, В')
grid minor
yticks(0:1:12)
ylim([-3,15])
xlim([4 4.025])
end

legend("Без фильтра", "С фильтром")

noise_count=1;
filter_coef=0;

sim("model.slx")
charpimp=phi;
charuimp=ua;
filter_coef=0.001

sim("model.slx")
charpimpf=phi;
charuimpf=ua;

```

```

disp('impulse Batch Complete!')

figure()
tiledlayout(2,1,'Padding','tight','TileSpacing','tight')

nexttile([1 1])
hold on
plot(charpimp.Time,charpimp.Data,'k','LineWidth',1);
plot(charpimpf.Time,charpimpf.Data,'r','LineWidth',1);

hold off
xlabel('Время,с')
ylabel('Угол, град')
grid minor
xlim([0 3])

nexttile([1 1])
hold on
plot(charuimp.Time,charuimp.Data,'k','LineWidth',1);
plot(charuimpf.Time,charuimpf.Data,'r','LineWidth',1);

hold off
xlabel('Время,с')
ylabel('Ua,B')
grid minor
xlim([0.975 1.025])

legend("Без фильтра", "С фильтром")

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Реакции на ступенчатое воздействие

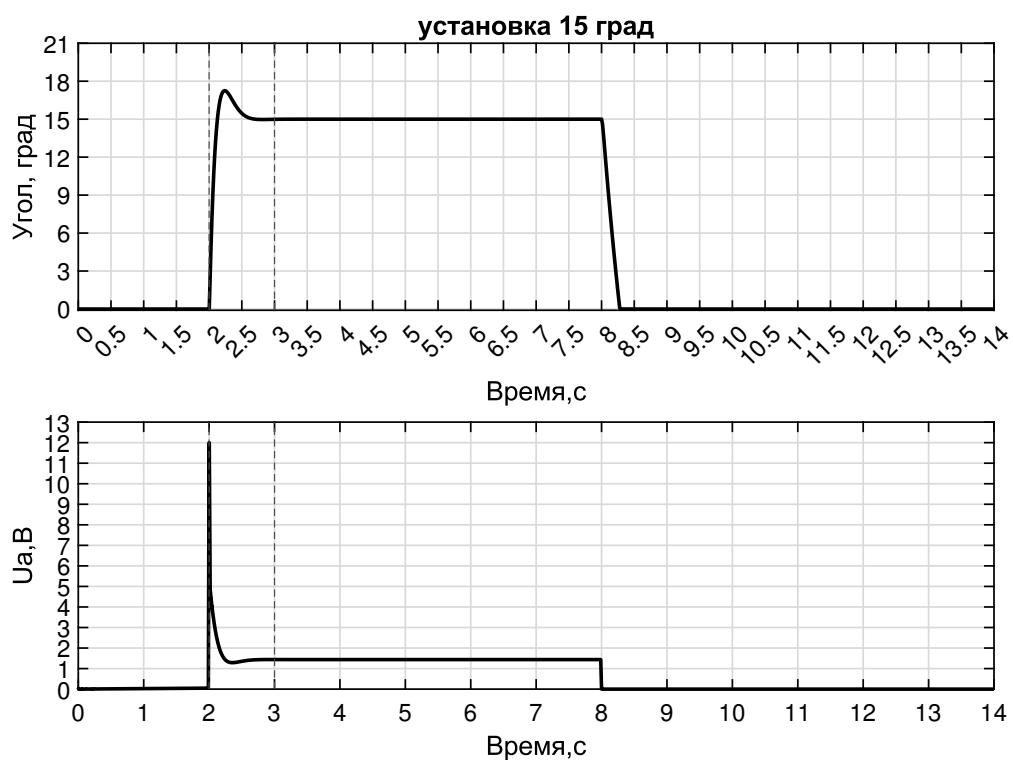


Рисунок Б.1 – Реакция на ступенчатое воздействие 15 градусов

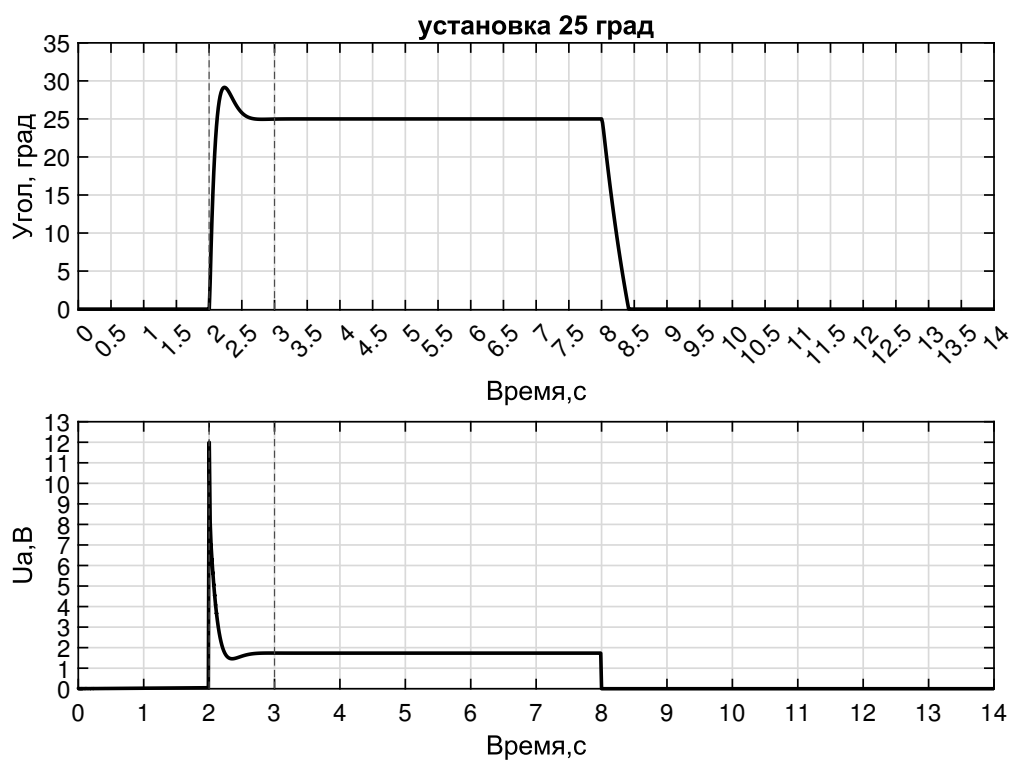


Рисунок Б.2 – Реакция на ступенчатое воздействие 25 градусов

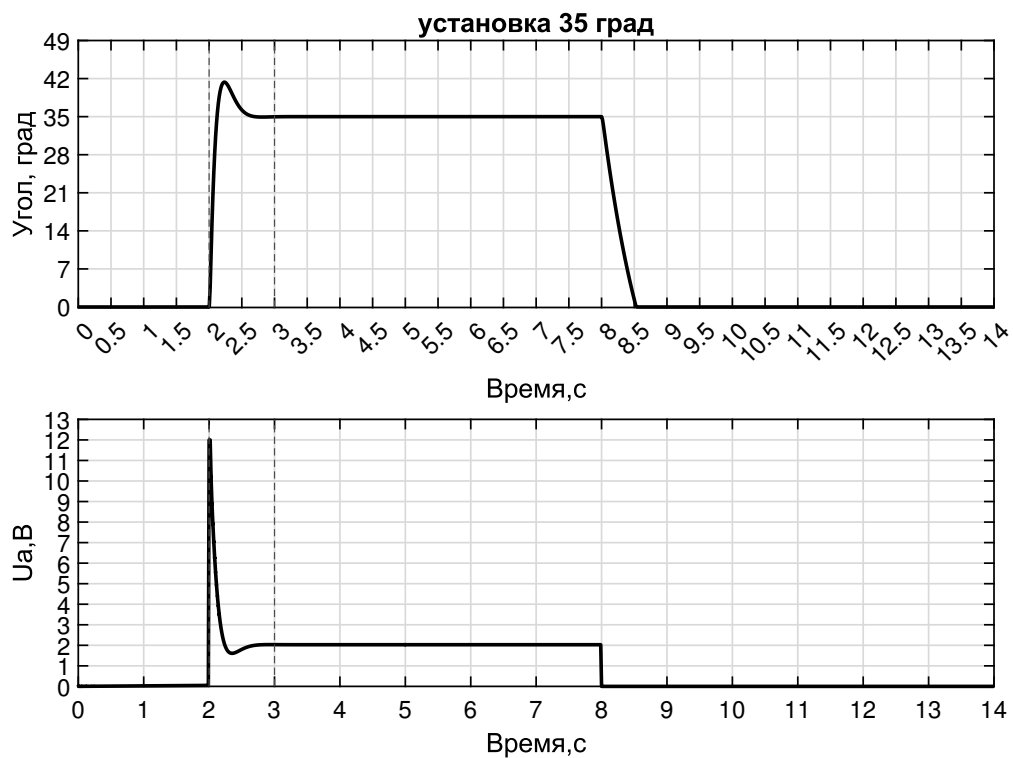


Рисунок Б.3 –Реакция на ступенчатое воздействие 35 градусов

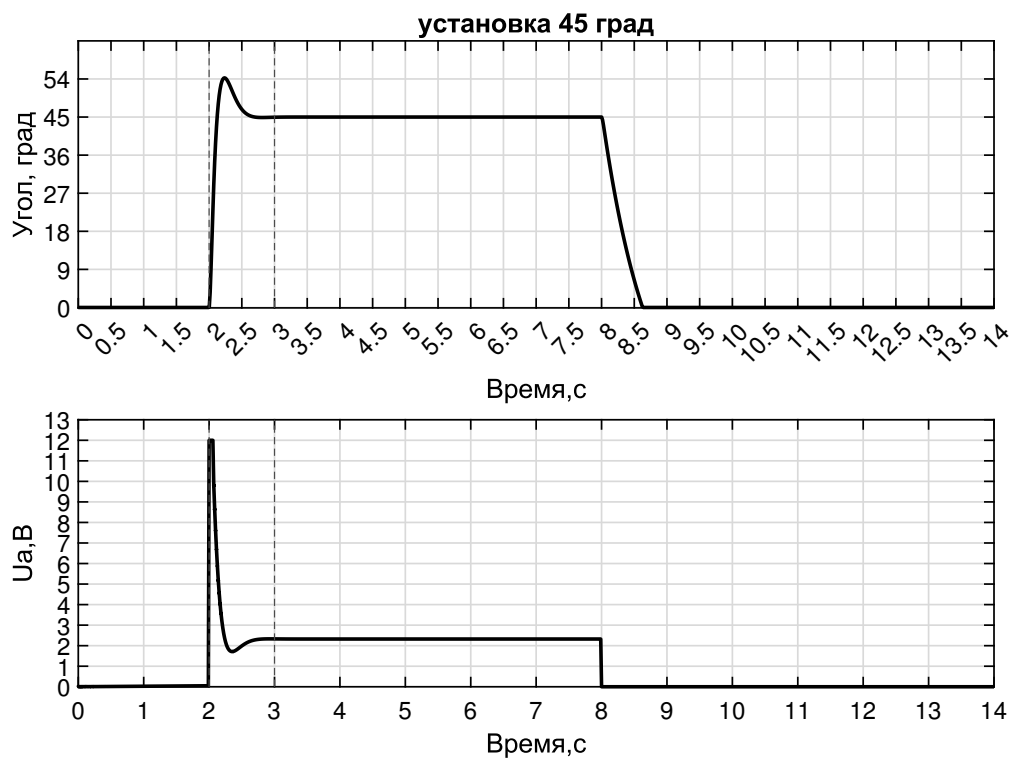


Рисунок Б.4 –Реакция на ступенчатое воздействие 45 градусов

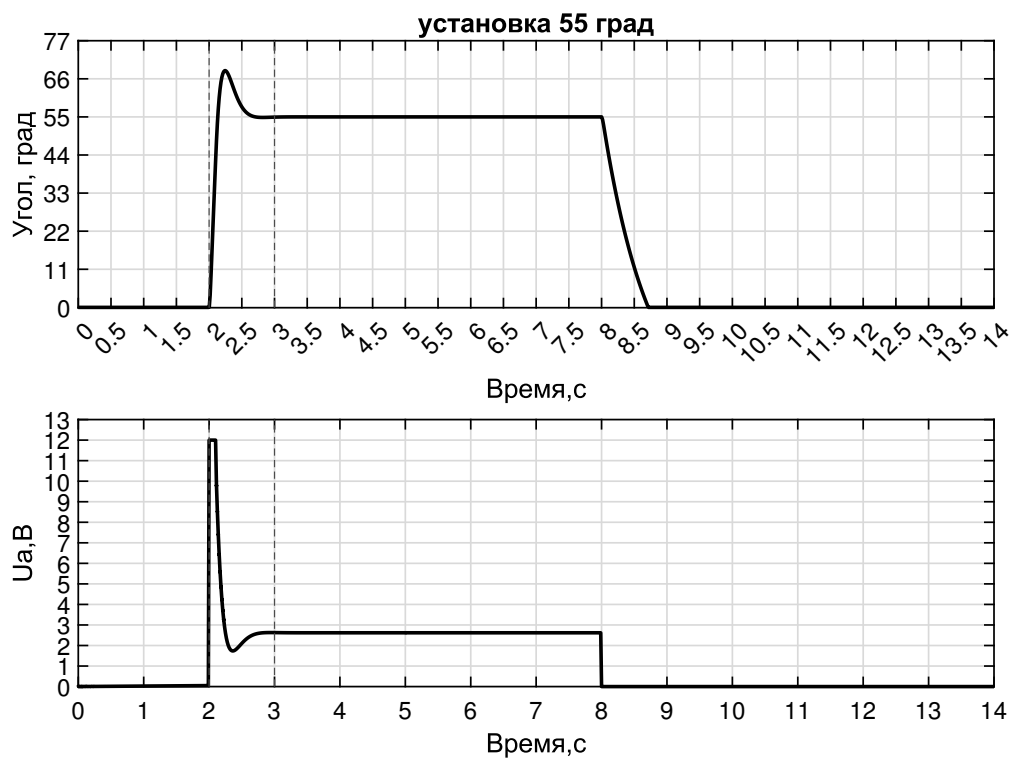


Рисунок Б.5 –Реакция на ступенчатое воздействие 55 градусов

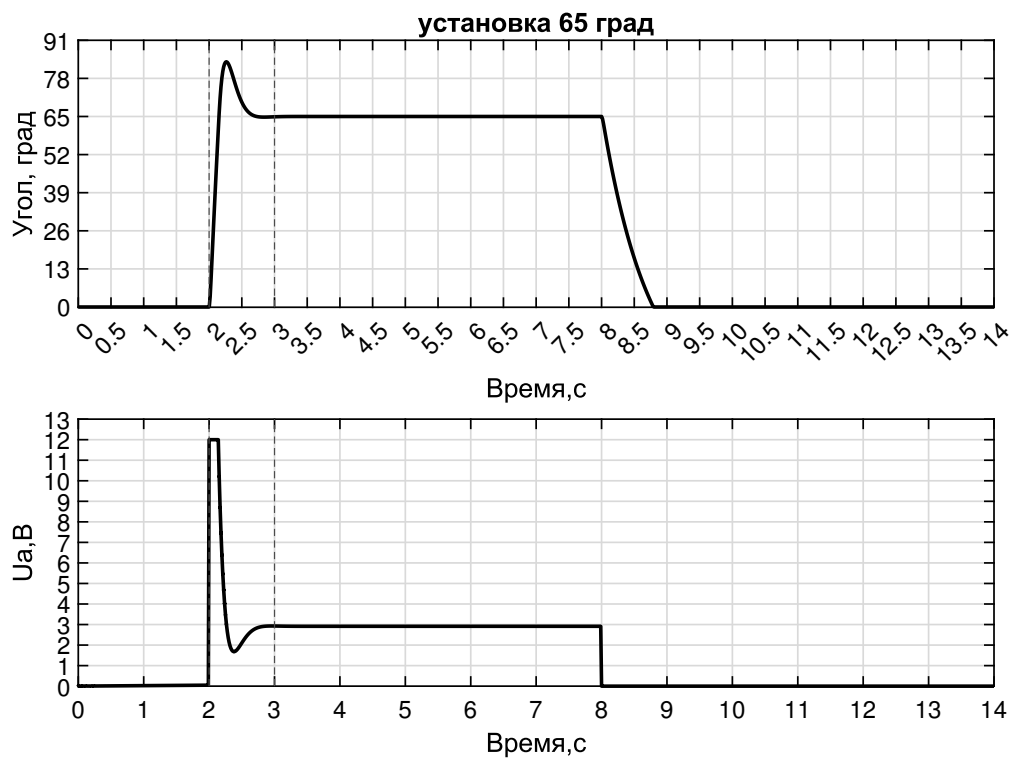


Рисунок Б.6 –Реакция на ступенчатое воздействие 65 градусов

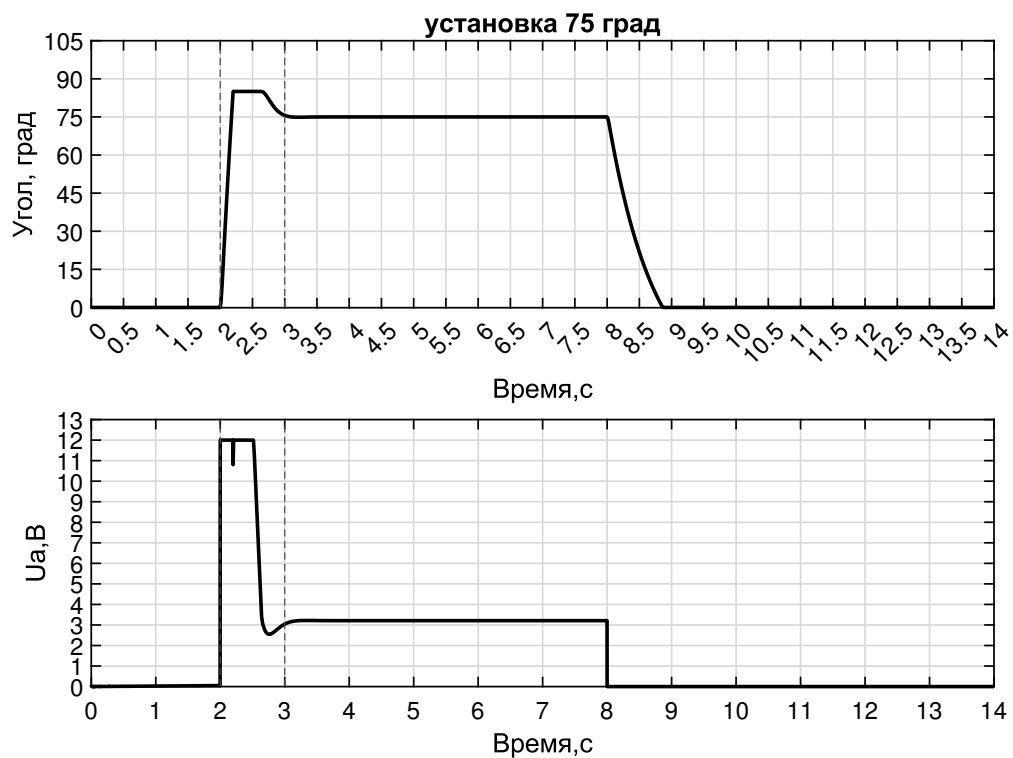


Рисунок Б.7 –Реакция на ступенчатое воздействие 75 градусов

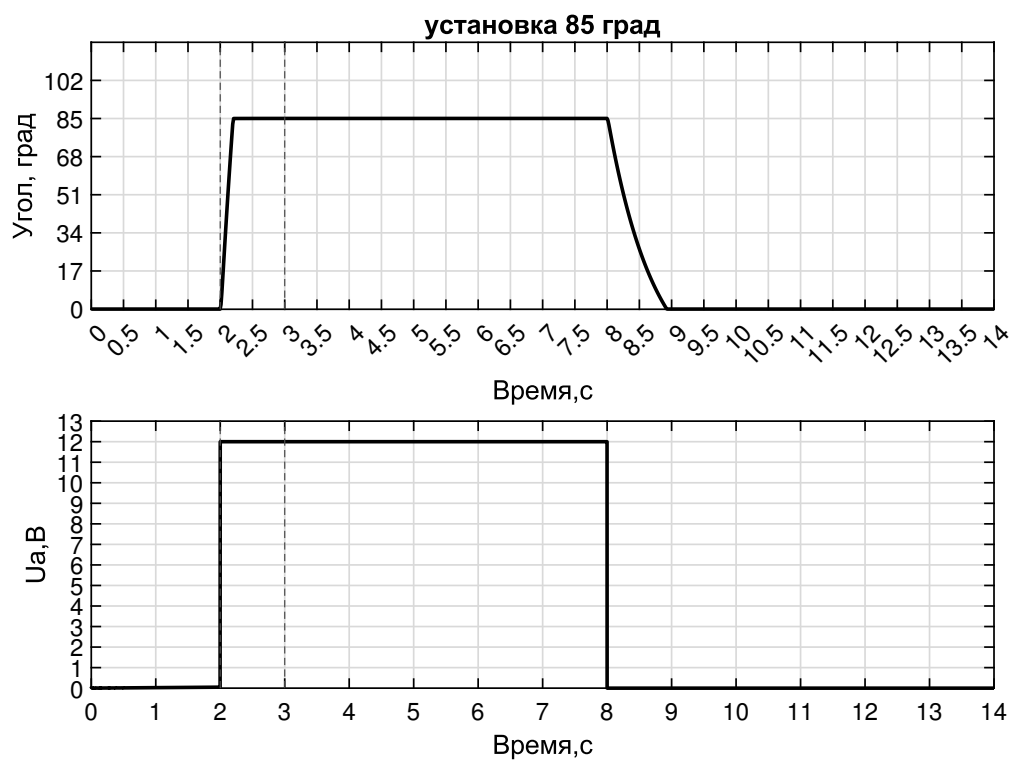


Рисунок Б.8 –Реакция на ступенчатое воздействие 85 градусов