



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

---

Факультет: «Специальное машиностроение»

Кафедра: «Робототехнические системы и мехатроника»

## **Лабораторная работа № 6**

по курсу «Теория автоматического управления»

Выполнил: Садовец Роман  
Группа: СМ7-51Б

Проверил(а):

Москва, 2023 г.

# Оглавление

<b>1. План работы.....</b>	<b>2</b>
<b>2. Разработка компонентов системы.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Модель двигателя.....</b>	<b>2</b>
<b>2.2. Модель редуктора.....</b>	<b>4</b>
<b>2.3. Модель реечной передачи.....</b>	<b>6</b>
<b>2.4. Модель датчика тока.....</b>	<b>8</b>
<b>2.5. Модель служебного преобразователя скоростей и ускорений.....</b>	<b>8</b>
<b>2.6. Модель низкоуровневого контроллера.....</b>	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
<b>3. Компоновка модели САУ.....</b>	<b>9</b>
<b>4. Синтез модели. Настройка внутреннего контура коррекции.....</b>	<b>10</b>
<b>5. Исследование влияния нелинейностей на работоспособность системы.....</b>	<b>11</b>

# 1. План работы

Согласно общему плану распределения обязанностей в команде, в данной работе представлена реализация задач, представленных в таблице 1.

Подзадача	Стоимость, %
Создание модели двигателя	2
Создание модели редуктора	2
Создание модели реечной передачи	3
Создание модели датчика тока	2
Создание служебной модели преобразования скоростей	3
Компоновка модели объекта управления	10
Компоновка модели САУ	2
Настройка внутреннего контура коррекции	7
Исследование влияния наличия нелинейных элементов на работоспособность системы	25

Табл. 1. Таблица распределения по задачам

Суммарно за все выполненные задачи - 56%

## 2. Разработка компонентов системы

### 2.1. Модель двигателя

По условию, имеем двигатель ДБУ20-3,7-9-24 ГИ (параметры представлены на рис. 1). Согласно заданию, в модели двигателя должны присутствовать следующие входные и выходные сигналы:

- *Вход InVoltage* – входное напряжение, приходящее из усилителя мощности;
- *Вход FbVelocity* – обратная связь по скорости, приходящее из динамики обратного маятника через служебный блок преобразования скорости объекта в скорость двигателя;
- *Вход FbAcceleration* – аналогичен предыдущему, но являющийся обратной связью по ускорению;
- *Выход OutTorque* – момент на валу;
- *Выход OutVelocity* – скорость на валу;
- *Выход OutAcceleration* – ускорение на валу;

- *Выход OutCurrent* – ток в цепи двигателя (ток якоря).

Если брать в учет вязкое трение, при этом исключая сухое, то ДПТ описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} J_{\text{дв}} \ddot{\phi} = M_{\text{дв}} - M_{\text{тр}}; \\ M_{\text{дв}} = k_M I_{\text{я}}; \\ L_{\text{я}} \dot{I}_{\text{я}} + R_{\text{я}} I_{\text{я}} = U_{\text{упр}} - E_{\text{противо}}; \\ E_{\text{противо}} = k_{\omega} \dot{\phi} \end{cases} \quad (1)$$

где  $M_{\text{тр}} = \mu_{\text{тр1}} * \dot{\phi}$ ;  $\mu_{\text{тр1}}$  – коэф – т вязкого трения на валу

Параметры БДПТ	ДБУ20-3,7-9-24 ГИ
Напряжение питания, В	24
Активное сопротивление якоря в нормальных условиях, Ом	≈10
Скорость холостого хода, об/мин	14400
Ток холостого хода, мА	60
Начальный пусковой момент, мН*м	≈37
Собственный момент сопротивления вращению, мН*м	≈(1,05...1,4)*(n <sub>вращ</sub> /10000об/мин) <sup>0,4</sup> при (2500...25000) об/мин; ≈(0,2...0,4) при 0 об/мин; ≈(0,9...1,2) при 6000 об/мин
Скоростной коэффициент Кп, об/мин/В	≈600
Наклон механической характеристики Δn/ΔM, об/мин/мН*м	≈400
Коэффициент момента, мН*м/А	≈16
Индуктивность якоря, мкГн	≈350
Электромеханическая постоянная времени, мс	≈20
Момент инерции ротора, г*мм <sup>2</sup>	≈500
Угловое ускорение при пуске, крад/с <sup>2</sup>	≈70
Габариты, мм*мм	Ø20* L46
Рабочий диапазон температур, °С	Минус 50...+50 (обмотка до +125) До минус 60...+100 (по согласованию)

Рис. 1. Параметры выбранного ДПТ

Из параметров ДПТ выделим основные константы:

$$k_{\omega} = \frac{1}{\frac{2\pi}{60} k_n} = \frac{1}{\frac{2\pi}{60} * 600} = \frac{1}{20\pi} \left[ \frac{\text{с}}{\text{рад}} * \text{В} \right]$$

$$k_M = 16 * 10^{-3} \left[ \frac{\text{Н} * \text{м}}{\text{А}} \right]$$

$$R_{я} = 10 \text{ [Ом]}$$

$$L_{я} = 350 * 10^{-6} \text{ [Гн]}$$

$$J_{дв} = 0,5 * 10^{-6} \text{ [кг * м}^2\text{]}$$

Положим  $\mu_{тр1} = 10^{-7}$

По итогам моделирования получим следующую схему, представленную на рисунке 2.

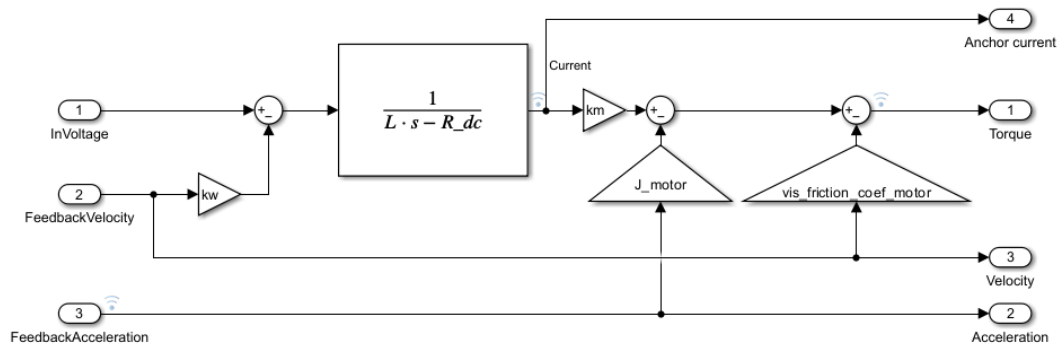


Рис. 2. Конечная структурная схема двигателя

Также добавляем маску для данного блока с учетом расчетных (входных) параметров (рис. 3).

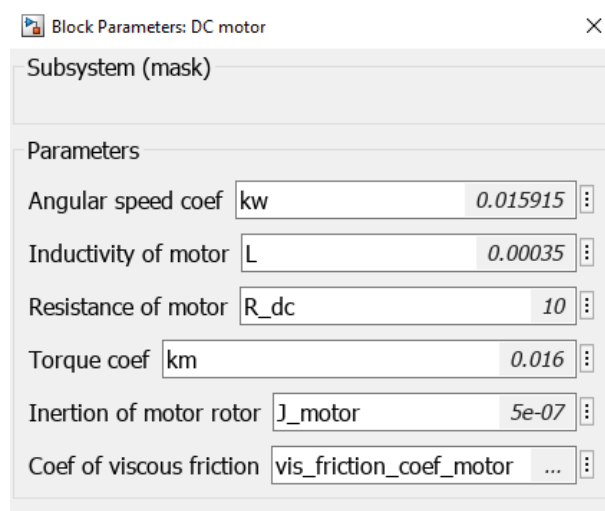


Рис. 3. Маска для двигателя

## 2.2. Модель редуктора

Редуктор предназначен для снижения выходного количества оборотов двигателя и повышения момента. Рассматриваются следующие входные и выходные параметры:

- *Вход InTorque* – момент на входном валу, приходящий из двигателя;

- *Вход InVelocity* – скорость на входном валу, приходящая из двигателя;
- *Вход InAcceleration* – ускорение на входном валу, приходящее из двигателя;
- *Выход OutTorque* – момент на выходном валу;
- *Выход OutVelocity* – скорость на выходном валу;
- *Выход OutAcceleration* – ускорение на выходном валу.

По условиям задания имеем редуктор со следующими параметрами:

$$i = 100$$

$$J_{\text{ред}} = 2,4 * 10^{-6} \text{ [кг * м}^2\text{]}$$

Также учтем момент вязкого трения, которые возникает при вращении зубчатых колёс. Редуктор можно описать следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{i} * \dot{\phi}_{\text{ВХ}} \\ \ddot{\phi}_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{i} * \ddot{\phi}_{\text{ВХ}} \\ J_{\text{ред}} \frac{\ddot{\phi}_{\text{ВХ}}}{i} = M_{\text{ВЫХ}} - M_{\text{тр}} + M_{\text{ВЫХ}}^* \end{cases}, \quad (2)$$

Поскольку мы рассматриваем упрощенную систему (не берём в учет КПД подшипников и зубчатых передач), то можно сказать, что  $M_{\text{ВЫХ}}^* = i * M_{\text{ВХ}}$ , где  $M_{\text{ВЫХ}}^*$  - теоретический момент на валу редуктора до вычета момента вязкого трения и инерции редуктора.

В упрощенном случае  $M_{\text{тр}} = \mu_{\text{тр}2} * \dot{\phi}_{\text{ВЫХ}}$ . Положим  $\mu_{\text{тр}2} = 10^{-5}$ . Тогда получим структурную схему, представленную на рисунке 4.

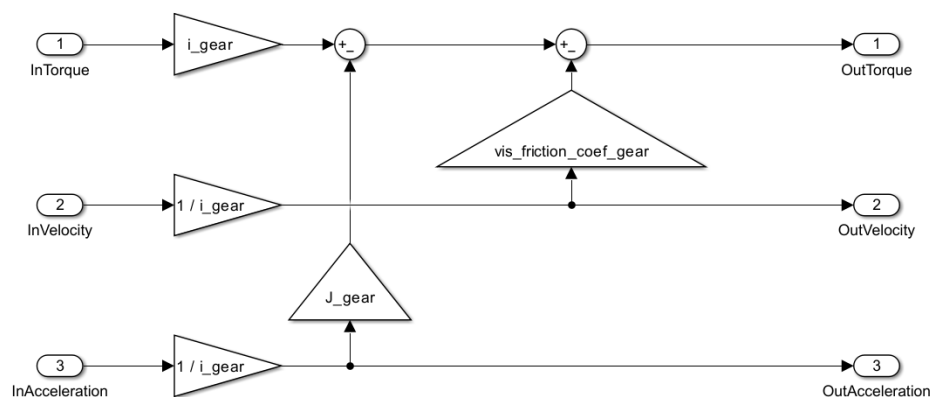


Рис. 4. Конечная структурная схема редуктора

Также добавляем маску для данного блока с учетом расчетных (входных) параметров (рис. 5).

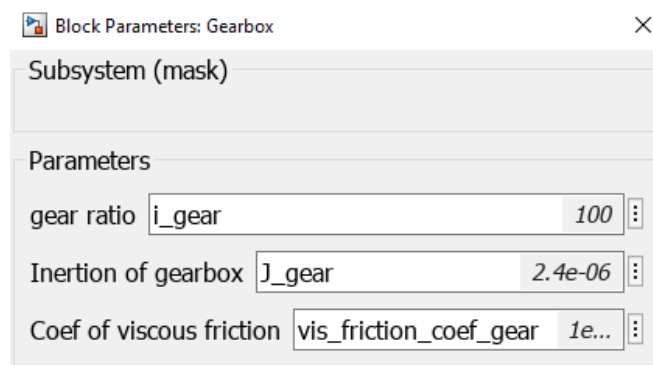


Рис. 5. Маска для редуктора

### 2.3. Модель реечной передачи

Реечная передача предназначена для преобразования вращательного движения вала в линейное перемещение корпуса модели для стабилизации маятника. Рассматриваются следующие входные и выходные параметры:

- *Вход InTorque* – момент на шестерне, приходящий из редуктора;
- *Вход InVelocity* – скорость на шестерне, приходящая из редуктора;
- *Вход InAcceleration* – ускорение на шестерне, приходящее из редуктора;
- *Выход OutForce* – сила, действующая на ось шестерни рейкой;
- *Выход OutSpeed* – скорость центра шестерни;
- *Выход OutAcceleration* – ускорение центра шестерни.

По условиям задания имеем реечную передачу со следующими параметрами:

$$i = 20 \left[ \frac{\text{рад}}{\text{м}} \right]$$

$$J_{\text{ш}} = 1 * 10^{-6} [\text{кг} * \text{м}^2]$$

Также учтем момент вязкого трения, которые возникает в местах контакта зубчатых передач.





## 2.4. Модель датчика тока

Датчик тока обеспечивает снятия тока якоря с двигателя, и возвращает значение измеренное напряжение (сигнал) на вход микроконтроллера в виде тока. Датчик тока – это прибор, которые снимает разницу потенциалов с внутреннего резистивного элемента, и конвертирует полученные сигналы в ток. В схеме используются следующие входы и выходы:

- *Вход RealCurrent* – действительный ток на двигателе;
- *Выход MeasuredCurrent* – измеренный ток на двигателе

Обычно сопротивление принимается крайне малым, дабы не влиять на механические характеристики двигателя. Примем:

$$R = 0,01 \text{ [Ом]}$$

Датчик тока описывается следующим уравнением:

$$U_{\text{вых}} = I_{\text{вх}} * R \quad (4)$$

Тогда получим следующую схему для датчика тока (рис. 8):

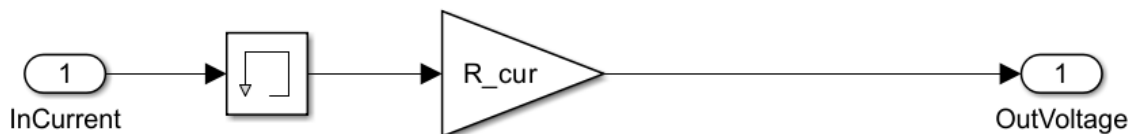


Рис. 8. Конечная структурная схема датчика тока

## 2.5. Модель служебного преобразователя скоростей и ускорений

Модуль используется для преобразования выходных значений линейного перемещения модели маятника в угловое вращение вала двигателя. Это необходимо для создания контура обратной связи между выходной моделью маятника и двигателем. Из сигналов в модуле используются:

- *Вход InVelocity* – линейная скорость динамики объекта;
- *Вход InAcceleration* – линейное ускорение динамики объекта;
- *Выход OutVelocity* – угловая скорость динамики объекта, приведенная к валу двигателя.

- *Выход OutAcceleration* – угловое ускорение динамики объекта, приведенная к валу двигателя.

Используются ранее введенные параметры редуктора и реечной передачи. В самом простом случае всю систему можно описать следующими уравнениям:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_{\text{вых}} = i_{\text{ред}} * i_{\text{р.п}} * v_{\text{вх}} \\ \ddot{\varphi}_{\text{вых}} = i_{\text{ред}} * i_{\text{р.п}} * a_{\text{вх}} \end{cases} \quad (3)$$

Для устранения помех в системе также включим в общую схему фильтр низких частот НЧ. Тогда получим структурную схему, представленную на рисунке 9.

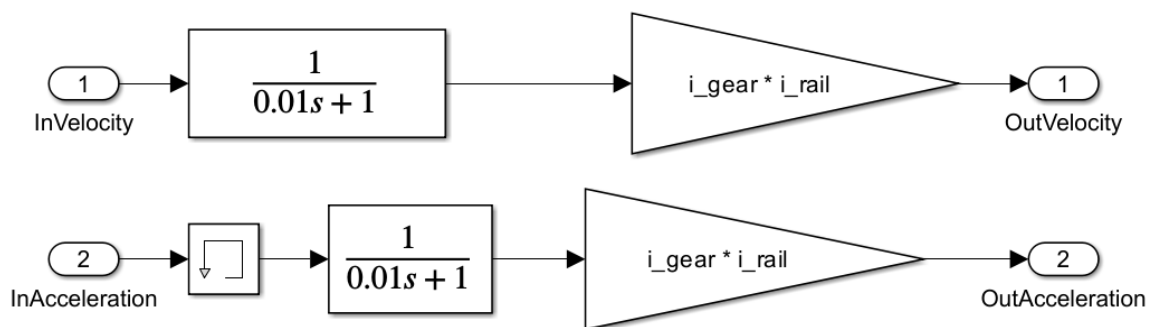


Рис. 9. Конечная структурная схема служебного преобразователя скоростей

### 3. Компоновка модели САУ

Возьмем все разработанные нами subsystems и объединим их в единую system. Наденем на каждую из этих subsystems маску для ввода необходимых параметров. Получим общую схему, представленную на рисунке 10.

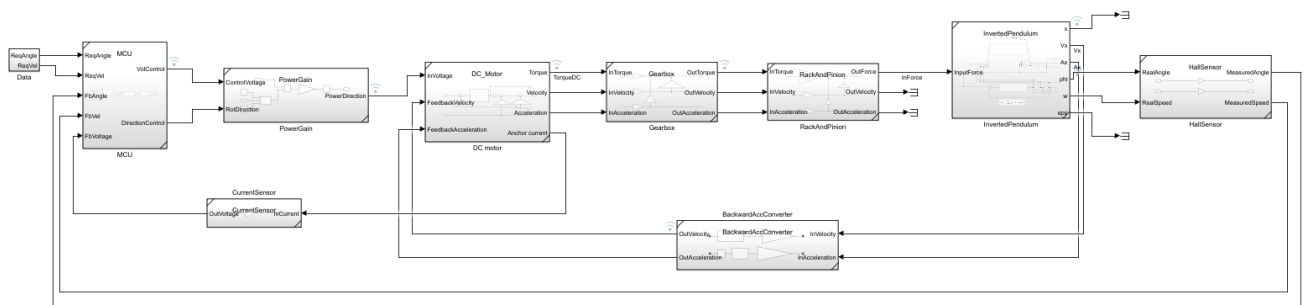


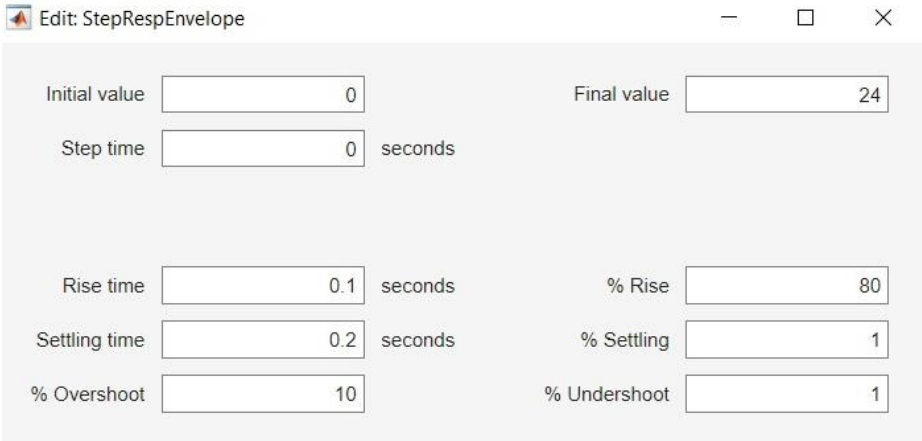
Рис. 10. Полная компоновка модели САУ

## 4. Синтез модели. Настройка внутреннего контура коррекции

По заданию внутренний контур коррекции – это последовательное корректирующее устройство КУ, расположенной внутри низкоуровневого контроллера после вычисления ошибки между задающим и реальным значением положения.

Синтезировать систему необходимо исходя из того, что входным сигналом является сигнал ошибка, а выходным – значением момента на двигателе.

К самому важному требованию, которое можно предъявить к системе, можно выделить **реакцию на ступенчатое воздействие** (рис. 11, 12). Для синтеза понадобится линеаризовать модель маятника, а также разомкнуть связь с высокоуровневым контроллером. Тогда с помощью Response Optimazer зададим требования, указанные на рисунке 11, входным воздействием назначим вход в низкоуровневый контроллер (ОС осталась, с высокоуровневым разомкнули и поставили на вход ступенчатое воздействие), а выходом – выходной момент на двигателе.



Parameter	Value	Unit
Initial value	0	
Final value	24	
Step time	0	seconds
Rise time	0.1	seconds
% Rise	80	
Settling time	0.2	seconds
% Settling	1	
% Overshoot	10	
% Undershoot	1	

Рис. 11. Требования к синтезу для ступенчатого воздействия

Синтезируем систему с указанными требованиями. Тогда на выходе получим значение коэффициента усиления последовательного КУ:  $k_n = 8.2491$

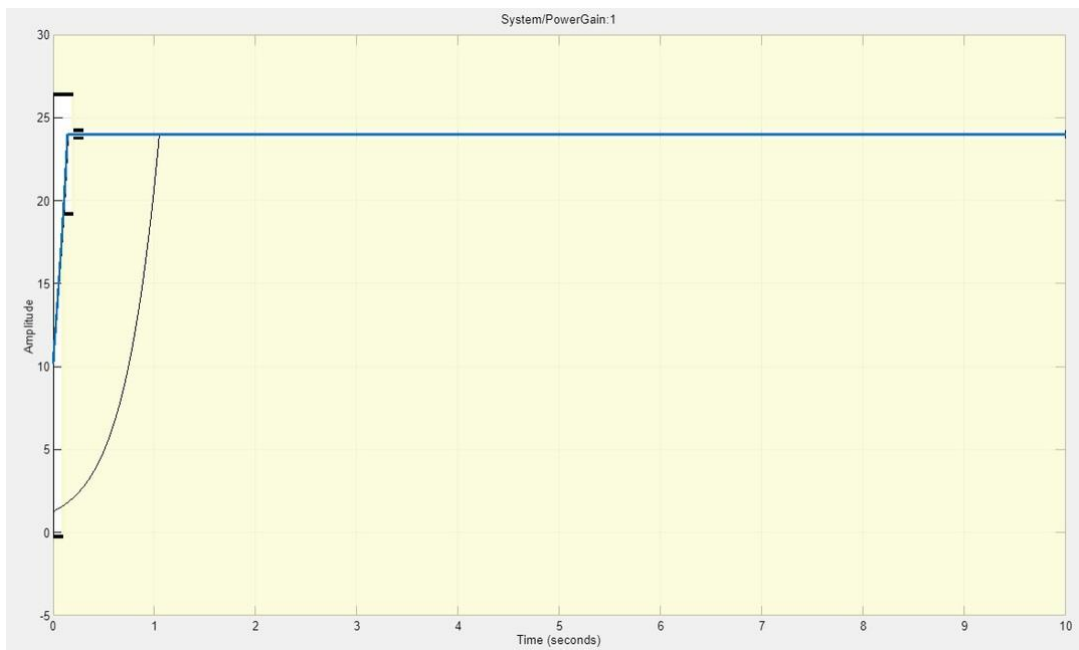


Рис. 12. График, отображающий требования к реакции на ступенчатое воздействие

## 5. Исследование влияния нелинейностей на работоспособность системы

Перед началом синтеза рассмотрим графики, выводимые при отсутствии нелинейности внутри схем. Наибольший интерес будут представлять такие графики, как: *угол отклонения маятника от нулевого положения  $\varphi$*  (рис. 13) и *значение момента на валу двигателя* (рис. 14).

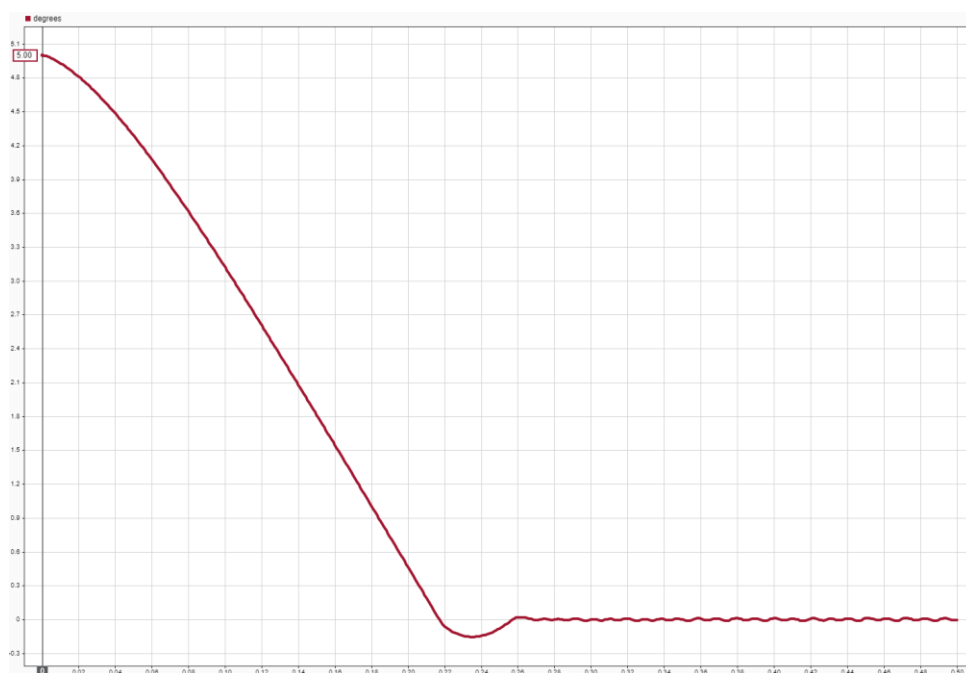


Рис. 13. График угла до введения нелинейных элементов

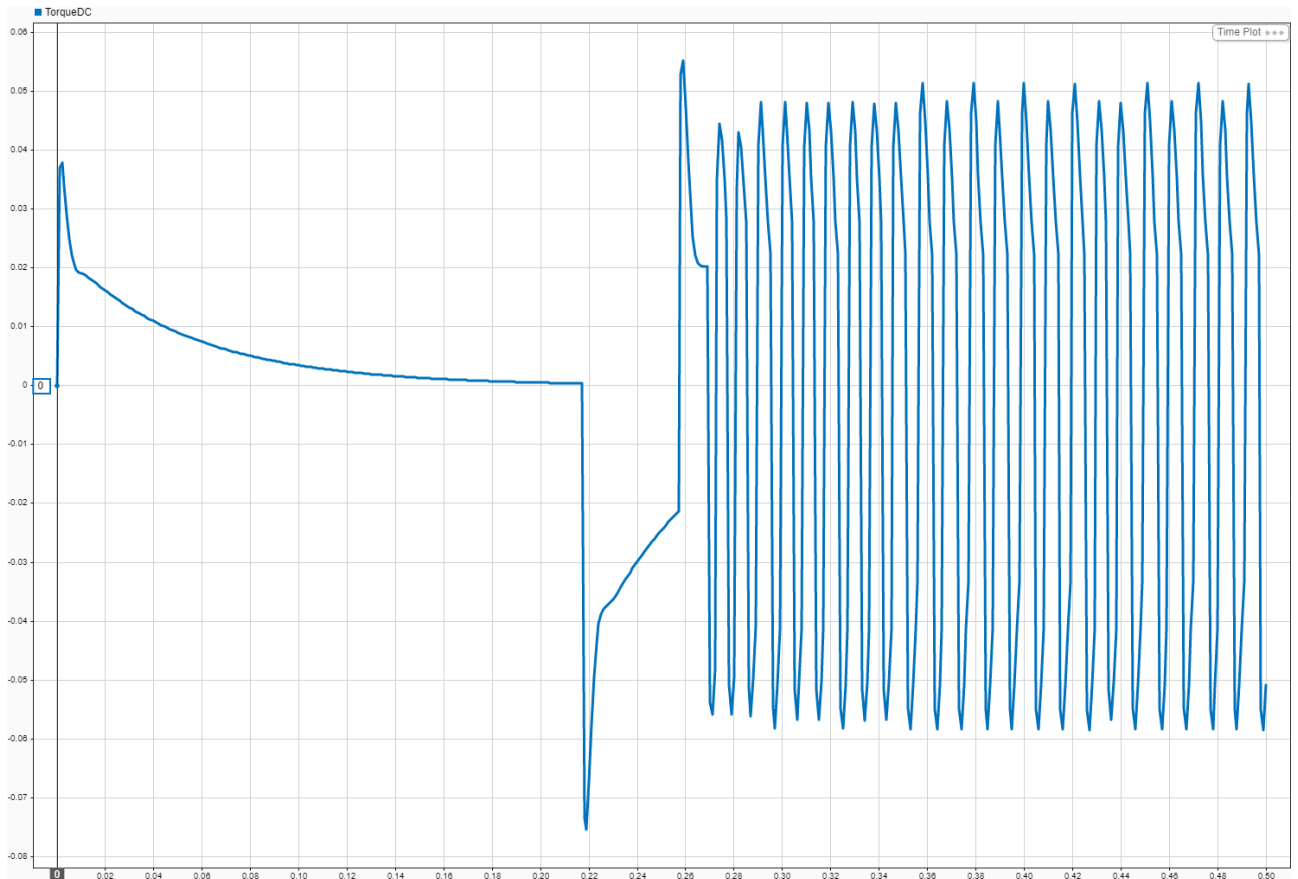


Рис. 14. График момента двигателя до введения нелинейных элементов

Далее рассмотрим нелинейности, которые можно добавить в систему и проанализировать последствия их влияния. Введём в каждый из блоков хотя бы по одному из таковых (помимо служебного преобразователя – в нём уже присутствует нелинейности в виде инертности фильтра НЧ):

### **I. Мертвый ход (люфт) редуктора**

Люфт удобнее всего реализовать с помощью блока Backlash (рис. 15). Он даёт возможность установить систему, в которой изменение во входе вызывает равное изменение в выходе, кроме тех случаев, когда вход изменяет направление. Когда вход изменяет направление, начальное изменение во входе не оказывает влияния на выход. Блок очень похож на мертвую зону, но действует не только в нулевой области (на старте), но и при изменении вращения. На рисунках 16-18 представлены выходные параметры при введении люфта в редуктор.



Рис. 15. Блок Backlash



Рис. 16. График угла маятника при наличии люфта редуктора

Экспериментально было определено, что при ширине люфта более  $5 \text{ Н*м}$  системы выходит из равновесия и прекращает стабилизироваться (происходит прыжок между значениями угла маятника). Для просмотра варианта с потерей равновесия при наличии люфта можно открыть модель в ветке Non-linear на GitHub и изучить этот момент более детально.

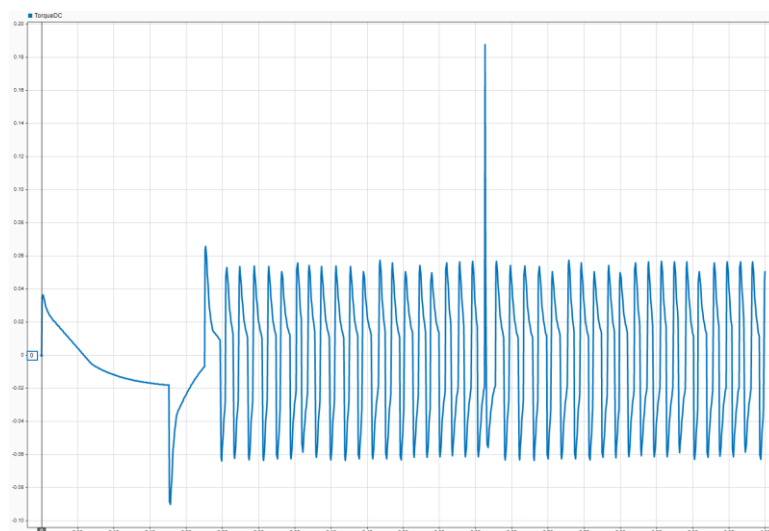


Рис. 17. График момента двигателя при наличии люфта двигателя

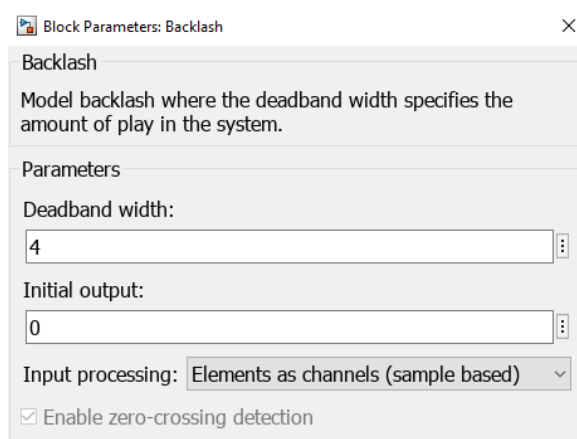


Рис. 18. Параметры блока Backlash

Делая вывод по проделанной работе можно сказать, что наличие люфта сказывается и на устойчивости системы, и на её колебательности

## II. Зона нечувствительности двигателя (реактивная нагрузка)

Зона нечувствительности в зоне регулирования – это отсутствие реакции двигателя при малых значениях напряжений. Данная зона нечувствительности выполняется с помощью блока Dead zone. Введём его в цепь с напряжением с параметрами, указанными на рисунке 19, и выведем интересующие параметры (рис. 20, 21).

По полученным графикам можно сказать, что зона нечувствительности увеличивает время стабилизации всей системы, т.е. из-за её наличия вся конструкция затрачивает большее чуть большее время на разгон и торможение

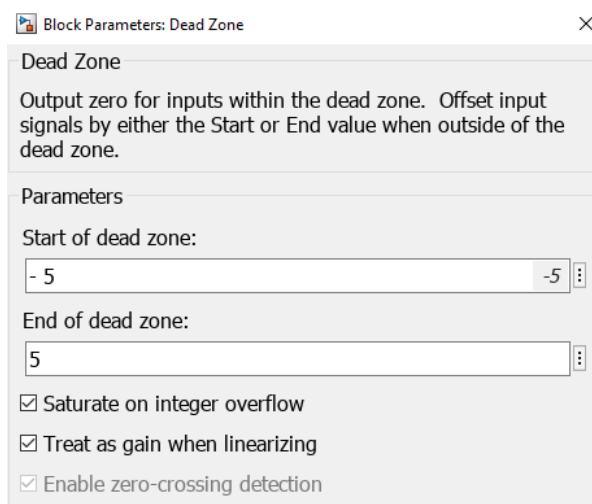


Рис. 19. Параметры блока Dead zone

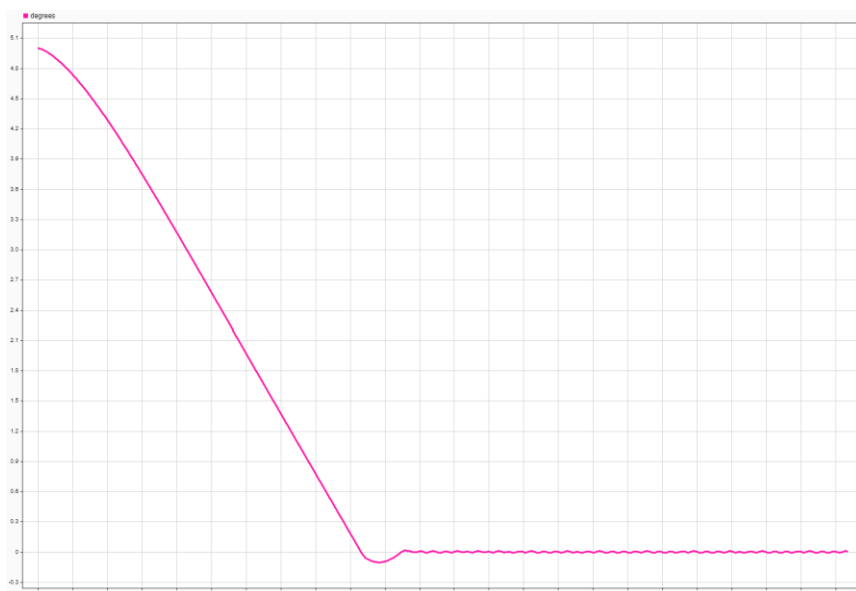


Рис. 20. График угла маятника при наличии мертвой зоны двигателя

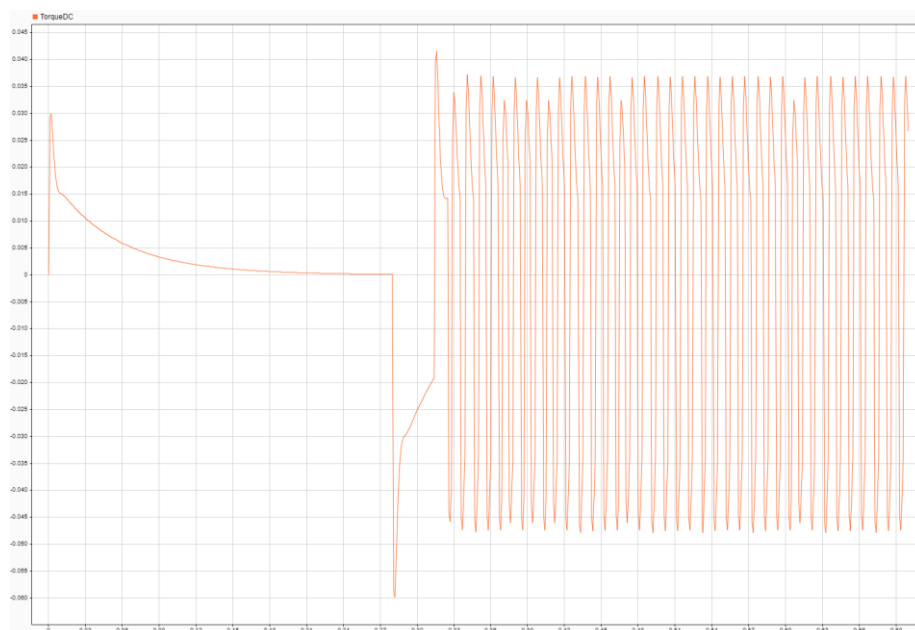


Рис. 21. График момента двигателя при наличии мертвой зоны двигателя

### III. Нагрев резистора в схеме датчика тока

Поскольку нагрев резистора происходит в течение какого-то времени и только до определенного значения, то перделаем структурную схему датчика тока (см. рис. 22). Обычно при нагреве сопротивление резистора возрастает, а если быть более точным, то увеличивается на 0,4...0,5% от номинала при нагреве на один градус Цельсия. Примем, что резистор максимально нагреется до 30 градусов с некоторой условно заданной скоростью.



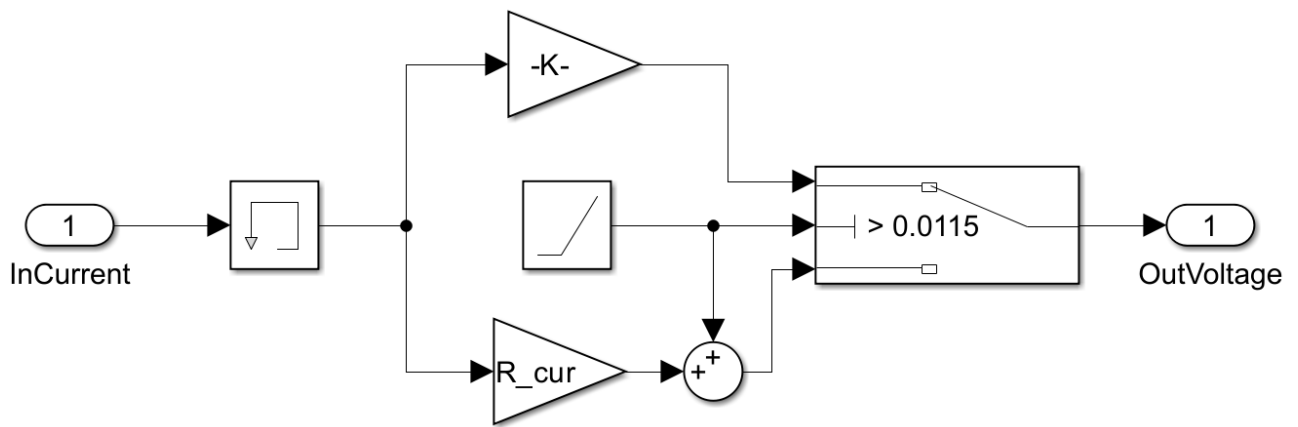


Рис. 22. Схема датчика тока при учёте нагрева резистора

Проводя анализ выходных характеристик (рис. 23) можно прийти к выводу, что нагрев резистора не сказывается (либо сказывается крайне мало) на выходных параметрах всей системы.

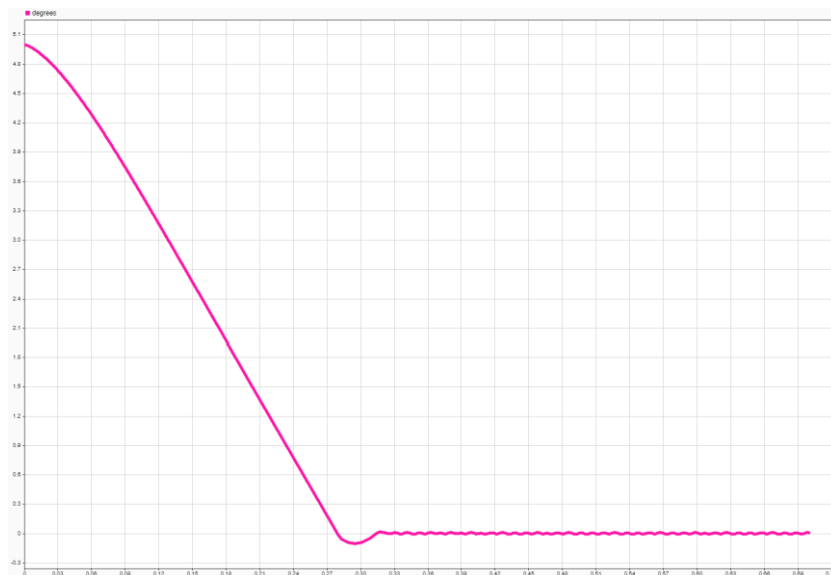


Рис. 23. График угла маятника при учёте нагрева резистора в схеме датчика тока

#### IV. Шумы в датчике в датчике Холла

Датчик Холла – измерительный преобразователь для измерения величины магнитного поля. Измерение магнитного поля – очень сложное дело, которое подвержено большому количеству внешних влияний и воздействий. Одно из последствий таких влияний – наличие шума.

Рассмотрим случай наличия шума в датчике Холла. Пусть имеется генератор Uniform Random Number, который выбрасывает в схему случайные

численные значения. Тогда получим схему, представленную на рисунке 24. На рисунке 26 и 27 – выходные графики системы.

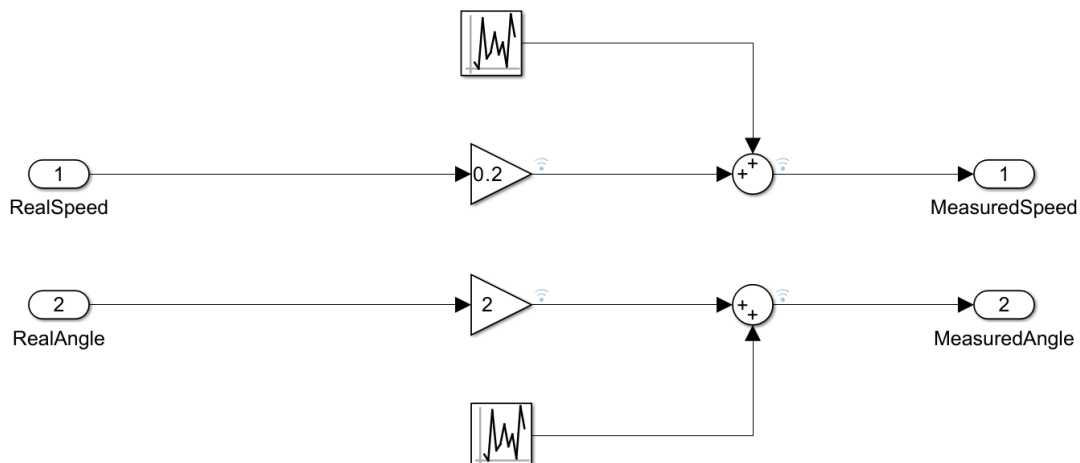


Рис. 24. Схема датчика Холла при наличии шумов в схеме

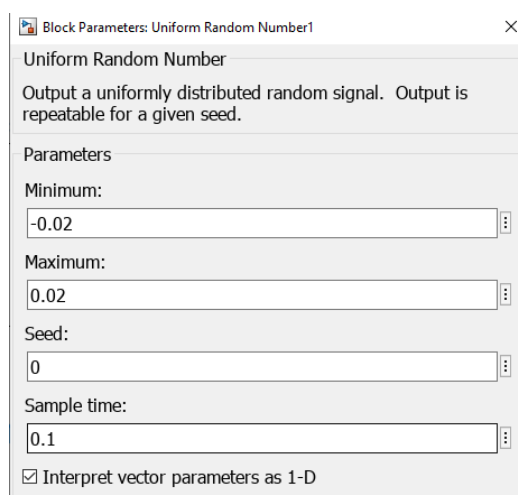


Рис. 25. Параметры генератора шума (произвольных чисел)

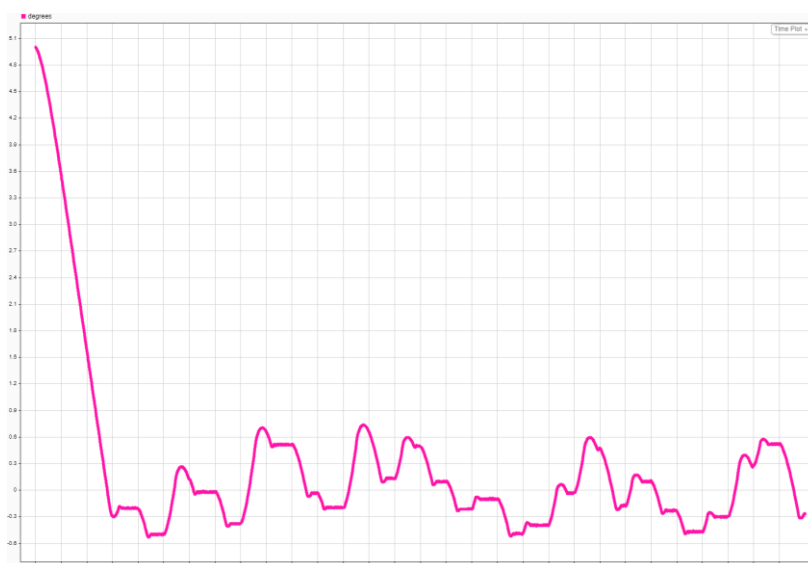


Рис. 26. График угла маятника при наличии шумов в датчике Холла

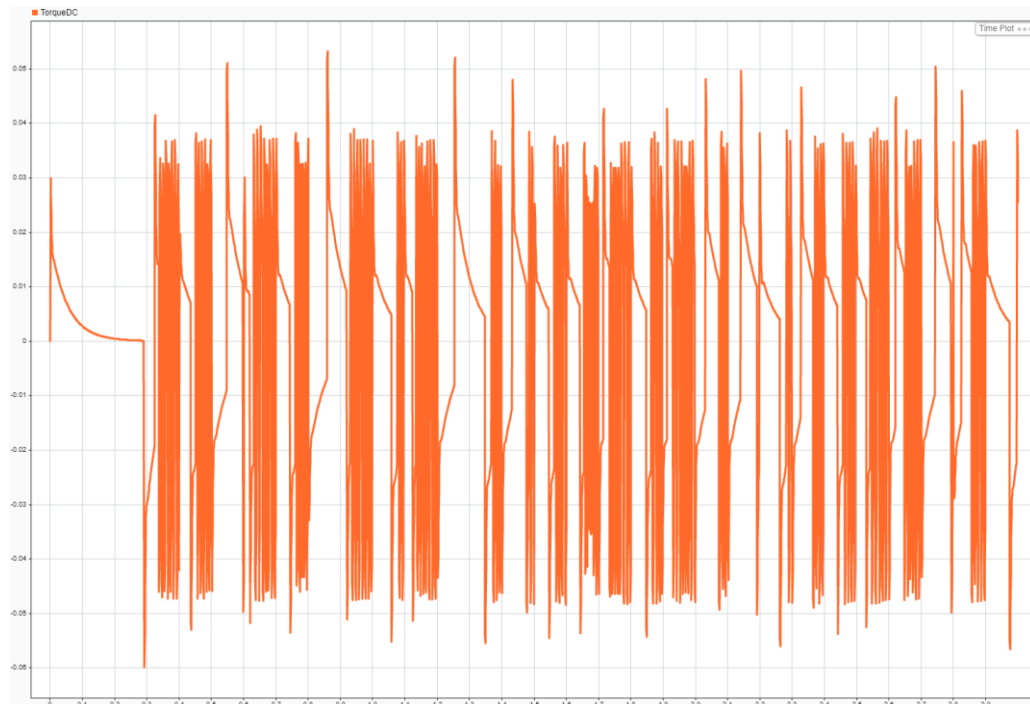


Рис. 27. График моментов двигателя при наличии шумов в датчике Холла

На основе полученных графиков можно сказать, что шумы в датчике Холла имеет крайне большое значение на выходных параметрах всей системы. Все выходные значения начинают сильно скакать на всём промежутке своей работы.

## V. Все нелинейности вместе

Рассмотрим случай, когда в системе присутствуют сразу все нелинейности, рассмотренные выше.

Введем параметры:

- Ширина зоны люфта редуктора: 0,5 Н\*м
- Мертвая зона двигателя: от -1,2 В до 1,2 В
- Нагрев резистора до 30 градусов
- Амплитуда шумов 0.005 и шагом 0.001

Выходные графики примут вид:

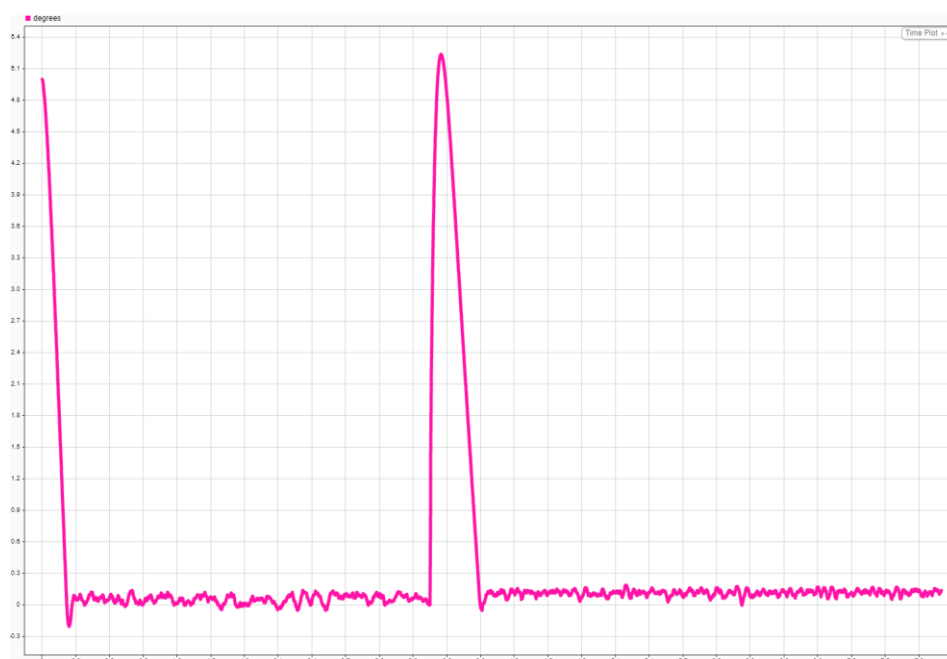


Рис. 28. График угла маятника при наличии всех рассмотренных нелинейностей

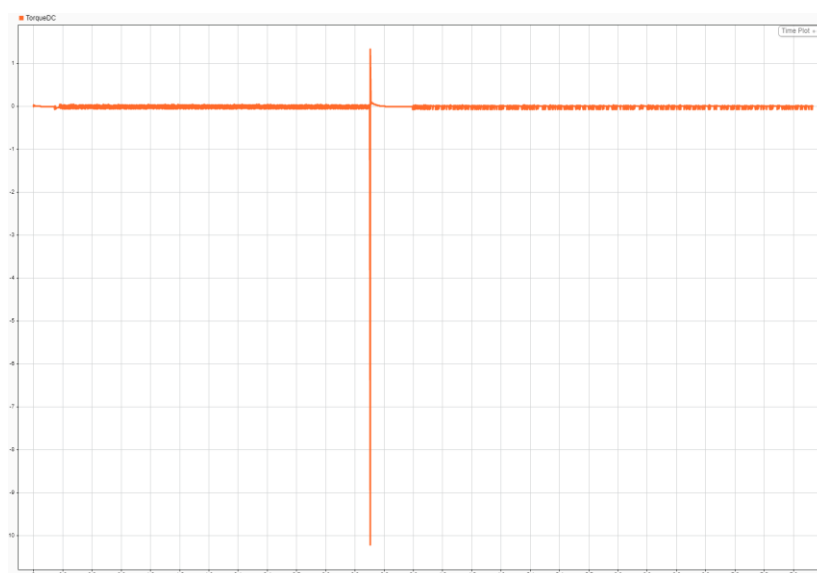


Рис. 29. График момента на валу двигателя при наличии всех рассмотренных нелинейностей

## Приложение

1. Публичный репозиторий для лабораторных работ по ТАУ // GitHub  
URL: <https://github.com/RiXenGC/Control-Theory.git>