**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

федеральное государственное автономное образовательное учреждение   
высшего образования

«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

|  |  |
| --- | --- |
| Школа / филиал | Инженерная школа информационных технологий и робототехники |
| Обеспечивающее подразделение | Отделение автоматизации и робототехники |
| Направление подготовки / специальность | 15.03.06 Мехатроника и робототехника |
| Образовательная программа (направленность (профиль)) | Интеллектуальные мехатронные  и робототехнические системы |

**ОТЧЕТ**

**ПО УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

|  |  |
| --- | --- |
| Тема | Разработка алгоритмов системы управления рулевой рейкой беспилотного транспортного средства |

|  |  |
| --- | --- |
| Выполнил обучающийся | Сокуров Р.Е. |
| Группа | 8Е02 |

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(подпись обучающегося)

Дата сдачи работы«\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Проверил науч. руководитель \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(Степень, звание, должность) (Ф.И.О.)

Дата проверки \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_г.

Баллы (из 40) \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Допустить/не допустить к защите,

Подпись \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Отчет принял

(Степень, звание, должность) (Ф.И.О.)

Дата защиты \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_г.

Баллы (из 60) \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Подпись \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Итоговое решение: зачет/незачет, итоговые баллы (из 100)\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Томск 2024

Оглавление

[Введение 2](#_Toc164688816)

[1. Исследование коэффициента передачи электропривода рулевой рейки 3](#_Toc164688817)

[2. Разработка контура положения рулевой рейки 8](#_Toc164688818)

[3. Оптимизация контура управления током с учетом физических ограничений, присущих системе 13](#_Toc164688819)

[4. Оптимизация контура управления скоростью с учетом физических ограничений, присущих системе 14](#_Toc164688820)

[5. Оптимизация контура управления положением с учетом физических ограничений, присущих системе 16](#_Toc164688821)

[Заключение 20](#_Toc164688822)

[Список литературы 21](#_Toc164688823)

# Введение

Беспилотные автомобили представляют собой набор технологий, которые позволяют перемещаться без участия водителя.

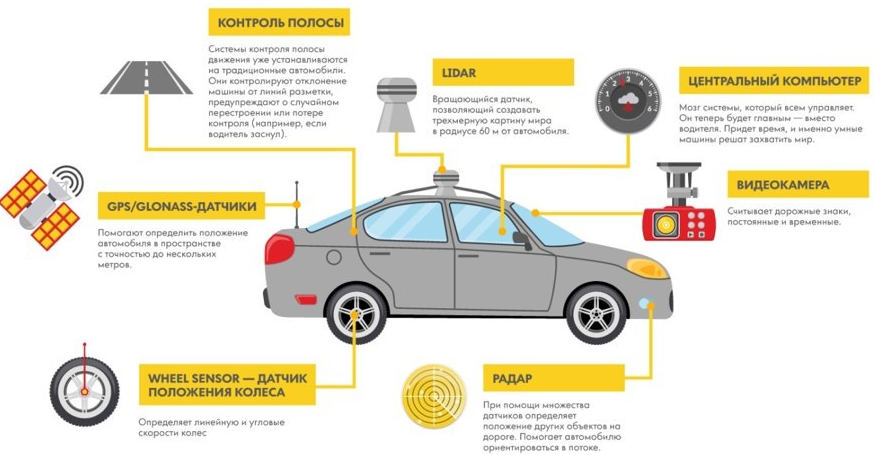


Рисунок 1.1 — Комплекс различных технологий, использующихся в БТС

Эти автомобили оснащены различными компонентами, которые работают вместе для обеспечения безопасности и эффективности движения. Одним из важных и главных элементов БТС является рулевая рейка.

Рулевая рейка является механизмом управления направлением движения автомобиля. Она состоит из зубчатых полос, которые передвигаются вдоль рейки при вращении руля, а также электродвигателя, который, в случае отсутствия водителя (как в БТС) может полностью обеспечить её функционирование (Рисунок 1.2).

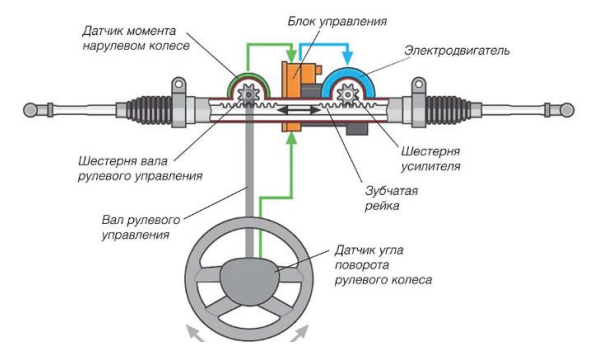


Рисунок 1.2 — Рулевая рейка с ЭМУР

Блок управления рулевой рейкой обеспечивает регулирование электродвигателем, тем самым формируя точное и плавное управление автомобилем без водителя, обеспечивая нужную траекторию и безопасность движения. Примером такого блока управления может являться БУРР-30, функциональная схема которого представлена на рисунке 1.3.

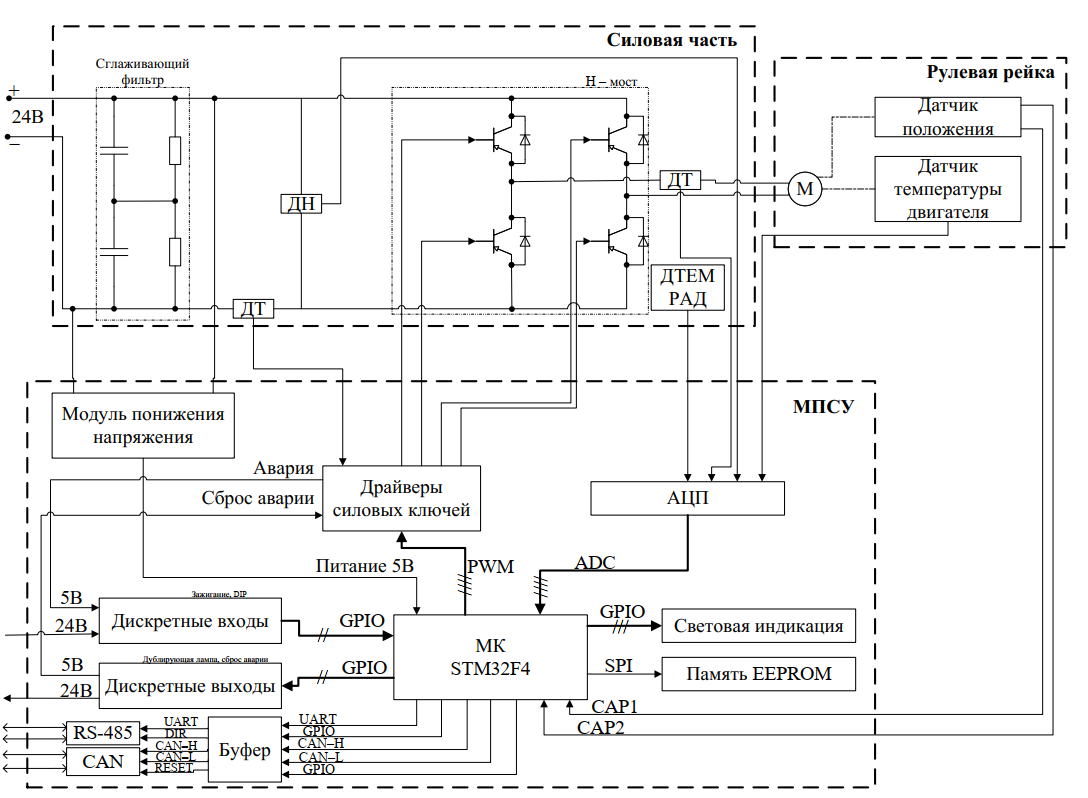


Рисунок 3.1 — Функциональная схема БУРР-30

Именно на базе БУРР-30 будет создаваться система управления рулевой рейкой.

# 1. Исследование характеристик электропривода рулевой рейки

Для разработки контура управления рулевой рейки с ЭМУР необходимо произвести идентификацию объекта управления, т. е. найти характеристики и параметры ДПТ рулевой рейки.

1. Определение сопротивления обмотки якоря 

Для определения сопротивления обмотки якоря зафиксируем шток рулевой рейки, с целью ограничить возможность вращения электропривода. Это приведет к отсутствию противоЭДС. В этом случае ток якоря будет полностью равен току, потребляемому электроприводом. Оценивать его будем, подавая ток через лабораторный источник питания. Эквивалентное сопротивление найдём по закону Ома для линейного участка цепи: .

Таблица 1 — Определение сопротивления обмотки якоря

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| U, В | I, А | R, Ом |
| 1 | 2,522 | 0,396511 |
| 1,09 | 3,069 | 0,355165 |
| 1,64 | 5,123 | 0,320125 |

Тогда, среднее значение сопротивления:



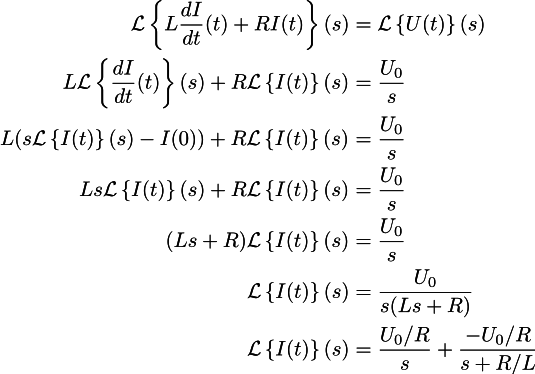
1. Определение индуктивности и сопротивления обмотки якоря

Чтобы проверить предыдущие вычисления, рассчитаем сопротивление обмотки якоря ещё одним способом, а вместе с ним и индуктивность.

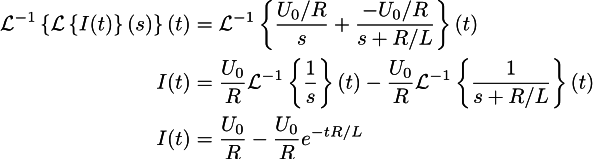
У ДПТ протекающий ток  и напряжение на клеммах связаны следующим дифференциальным уравнением:

https://habrastorage.org/r/w1560/getpro/habr/post_images/5c4/9c3/4a0/5c49c34a00d10bd864362ff317ad4300.png

Здесь  — скорость вращения двигателя. Поскольку вал двигателя заблокирован (в прошлом пункте зафиксировали), то мы исключаем влияние конструктивного параметра в виде ЭДС вращения двигателя. Возьмём преобразование Лапласа от левой и правой частей уравнения (1):



Перейдём к оригиналам:



Таким образом, по истечении нескольких миллисекунд после подачи питания ступенчатой формы питания индуктивность двигателя уже не будет иметь большое значение на протекающий в обмотке ток, а в самом начале ток будет экспоненциально нарастать, причём скорость возрастания (время переходного процесса) напрямую зависит от индуктивности. Подключим измерительнй щуп осциллографа через токовые клещи НАЗВАНИЕ к проводам ДПТ и снимем переходную характеристику тока при подаче ступенчатого напряжения:



Рисунок 1 — Переходный процесс по току при ступенчатом сигнале напряжения

Зная напряжение, что было на двигателе в момент снятия характеристики , можем подобрать такую кривую, которая максимально точно бы повторяла полученный переходный процесс. Для этого зададим закон изменения кривой, и с помощью метода curve\_fit библиотеки scipy\_optimize в языке Python произведём подбор:

Листинг 1 — Подбор кривой

1. import numpy as np

2. from scipy.optimize import curve\_fit

3. import matplotlib.pyplot as plt

4.

5. U0 = 1.2

6.

7. def unit\_step\_current(x, R, L):

8.     return [U0/R - U0/R\*np.exp(-t\*R/L) for t in x]

9.

10. data = np.genfromtxt('Oscil\_3A.csv', delimiter=',', names=['t', 'A'])

11.

12. [R, L] = curve\_fit(unit\_step\_current, data['t'], data['A'])[0]

13. print(R, L)

14.

15. fig = plt.figure()

16. ax1 = fig.add\_subplot(1,1,1)

17.

18. ax1.set\_title("Подбор сопротивления/индуктивности")

19. ax1.set\_xlabel('Время, с')

20. ax1.set\_ylabel('Ток, А')

21.

22. #ax1.plot(data['t'], U0, color='b', label='input tension')

23. #ax1.plot(U0, color='b', label='input tension')

24. ax1.plot(data['t'], data['A'], color='g', label='измеренный ток')

25. model=unit\_step\_current(data['t'], R, L)

26. ax1.plot(data['t'], model, color='r', label='подобранная кривая')

27. ax1.legend()

28.

29. plt.show()



Рисунок 6 — Результат выполнения листинга 1

По итогам программной реализации НАЗВАНИЕ получили значение , . Сопротивление от найденного в п.1 отличается не более чем на 8,6%, а значит вычисления были проведены корректно.

1. Определение конструктивного параметра электродвигателя 

// что такое См

Определим момент вращения экспериментальным путём. Для этого, жестко прикрепим к валу двигателя рычаг и замерим линейное усилие развиваемое с учётом рычага приложения к валу двигателя:



Рисунок 7 — Определение конструктивного коэффициента

Линейное усилие измерялось динамометром, с пересчётом значений в [Н] с учётом :

Таблица 2 — Полученное значение момента

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| U, В | I, А | Замеренное усилие, кг | Усилие, Н | Длина рычага, м | Момент вращения ЭД, Н \* м |
| 10 | 15 | 0,5 | 4,9 | 0,146 | 0,7154 |
| 10 | 20 | 0,7 | 6,86 | 0,146 | 1,00156 |
| 10 | 25 | 0,9 | 8,82 | 0,146 | 1,28772 |
| 15 | 30 | 1,1 | 10,78 | 0,146 | 1,57388 |
| -10 | -15 | 0,5 | 4,9 | 0,146 | 0,7154 |
| -10 | -20 | 0,7 | 6,86 | 0,146 | 1,00156 |
| -15 | -25 | 0,8 | 7,84 | 0,146 | 1,14464 |
| -15 | -30 | 1 | 9,8 | 0,146 | 1,4308 |
| -20 | -35 | 1,3 | 12,74 | 0,146 | 1,86004 |

Теперь последней неизвестной переменной в механической характеристике ДПТ для нас остаётся конструктивный параметр электродвигателя.

Рассчитаем конструктивный параметр электродвигателя исходя из линеаризованного уравнения ДПТ: . Тогда таблица 1 расширяется на один столбец:

Таблица 3 — Рассчитанное значение конструктивного параметра

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| U, В | I, А | Замеренное усилие, кг | Усилие, Н | Длина рычага, м | Момент вращения ЭД, Н \* м | Конструктивный параметр Cм |
| 10 | 15 | 0,5 | 4,9 | 0,146 | 0,7154 | 0,047693333 |
| 10 | 20 | 0,7 | 6,86 | 0,146 | 1,00156 | 0,050078 |
| 10 | 25 | 0,9 | 8,82 | 0,146 | 1,28772 | 0,0515088 |
| 15 | 30 | 1,1 | 10,78 | 0,146 | 1,57388 | 0,052462667 |
| -10 | -15 | 0,5 | 4,9 | 0,146 | 0,7154 | 0,047693333 |
| -10 | -20 | 0,7 | 6,86 | 0,146 | 1,00156 | 0,050078 |
| -15 | -25 | 0,8 | 7,84 | 0,146 | 1,14464 | 0,0457856 |
| -15 | -30 | 1 | 9,8 | 0,146 | 1,4308 | 0,047693333 |
| -20 | -35 | 1,3 | 12,74 | 0,146 | 1,86004 | 0,053144 |

По итогам усреднения значений,  — 0,049570785.

Проверим полученное значение конструктивного параметра. Для этого снимем блокировку вала ДПТ и подадим серию напряжений на обмотку ДПТ, а тахометром модели ТАКОЙ-ТО снимем скорость вращения вала в режиме холостого хода:

Таблица 4 — Рассчитанный иным способом конструктивный параметр

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| U, В | I, А | (скорость), об/мин | , рад/с | (сопротивление обмотки якоря), Ом | См (конструктивный параметр), В\*с/рад |
| 1 | 0,64 | 40 | 4,1887902 | 0,357267 | 0,18414604 |
| 2 | 0,67 | 225 | 23,5619449 | 0,357267 | 0,07472351 |
| 3 | 0,74 | 400 | 41,887902 | 0,357267 | 0,06530817 |
| 4 | 0,79 | 564 | 59,0619419 | 0,357267 | 0,06294678 |
| 5 | 0,83 | 745 | 78,0162176 | 0,357267 | 0,06028834 |
| 6 | 0,88 | 910 | 95,2949772 | 0,357267 | 0,05966322 |
| 7 | 0,94 | 1085 | 113,620934 | 0,357267 | 0,05865265 |
| 8 | 0,98 | 1265 | 132,47049 | 0,357267 | 0,05774779 |
| 9 | 1,02 | 1450 | 151,843645 | 0,357267 | 0,05687158 |
| 10 | 1,08 | 1637 | 171,426239 | 0,357267 | 0,05608331 |
| 11 | 1,13 | 1828 | 191,427712 | 0,357267 | 0,05535399 |
| 12 | 1,19 | 2018 | 211,324466 | 0,357267 | 0,05477289 |
| 13 | 1,28 | 2207 | 231,1165 | 0,357267 | 0,05427003 |
| 14 | 1,28 | 2397 | 251,013253 | 0,357267 | 0,05395212 |
| 15 | 1,35 | 2575 | 269,653369 | 0,357267 | 0,05383834 |
| 16 | 1,42 | 2760 | 289,026524 | 0,357267 | 0,05360297 |
| 17 | 1,45 | 2944 | 308,294959 | 0,357267 | 0,05346167 |
| 18 | 1,59 | 3145 | 329,34363 | 0,357267 | 0,05292935 |

В данной таблице конструктивный параметр  рассчитывается исходя из формулы статического движения ДПТ:  (из механической характеристики ДПТ).

Здесь первые два полученных значения мы не берем в расчёт, как сильно отличающиеся, поскольку на малых мощностях различные потери оказывают сильное влияние. Среднее значение  — 0,056858951, отличается на 14% от прошлого значения.

1. Расчёт момента инерции электропривода

Согласно второму закону динамики вращательного движения, момент инерции тела связан с моментом вращения по следующему закону: , где М – вращающий момент, J – механический момент инерции тела,  – угловое ускорение.

Угловое ускорение  будем находить как первую производную скорости по времени: . Поскольку нас интересует момент инерции всей системы (включая рулевую рейку и кинематические связи), то для его анализа вернём мотор на штатное место (согласно кинематической схеме на рисунке 4) ФОТО СЮДА.

Поскольку мы уже знаем, как взаимосвязаны ток и момент двигателя (нам известен конструктивный параметр ), то второй закон динамики вращательного движения можно преобразовать:



Если принять что I – конст в пределах разгона двигателя, можно допустить что и вращающий момент на валу ДПТ также является постоянным в течение времени разгона ДПТ.

Выведем на осциллограф в сервисной программе MViewer [] изменение скорости и подадим ток определенной стабилизированной величины на обмотку двигателя.

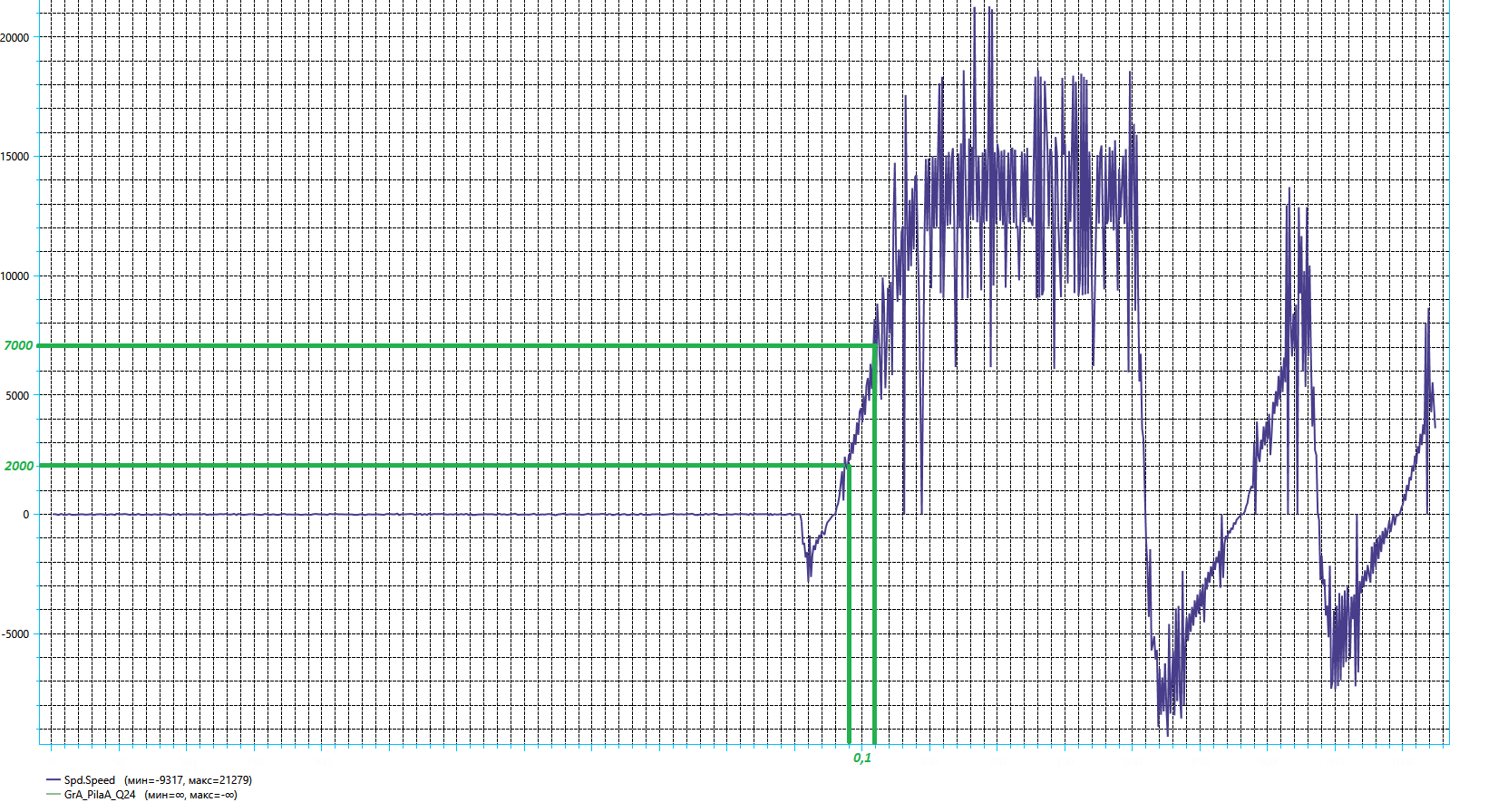


Рисунок 8 — Снятие скорости при токе равным 8А

Здесь переменная Speed.Spd изменилась на 5000 единиц за время сек, что соответствует изменению скорости на 91,1755 рад/с. При этом, поскольку стабилизированный ток в обмотках двигателя был равен 8А, то постоянный момент вращения:

.

Тогда момент инерции электропривода:



Однако, данный эксперимент имел место быть на рулевой рейке, которая в составе испытательного стенда прикреплена вертикально. Соответственно, гравитация тоже оказывала значительное влияние на возможности перемещения рулевой рейки. Выполним перемещение в другую сторону, чтобы компенсировать это отклонение:

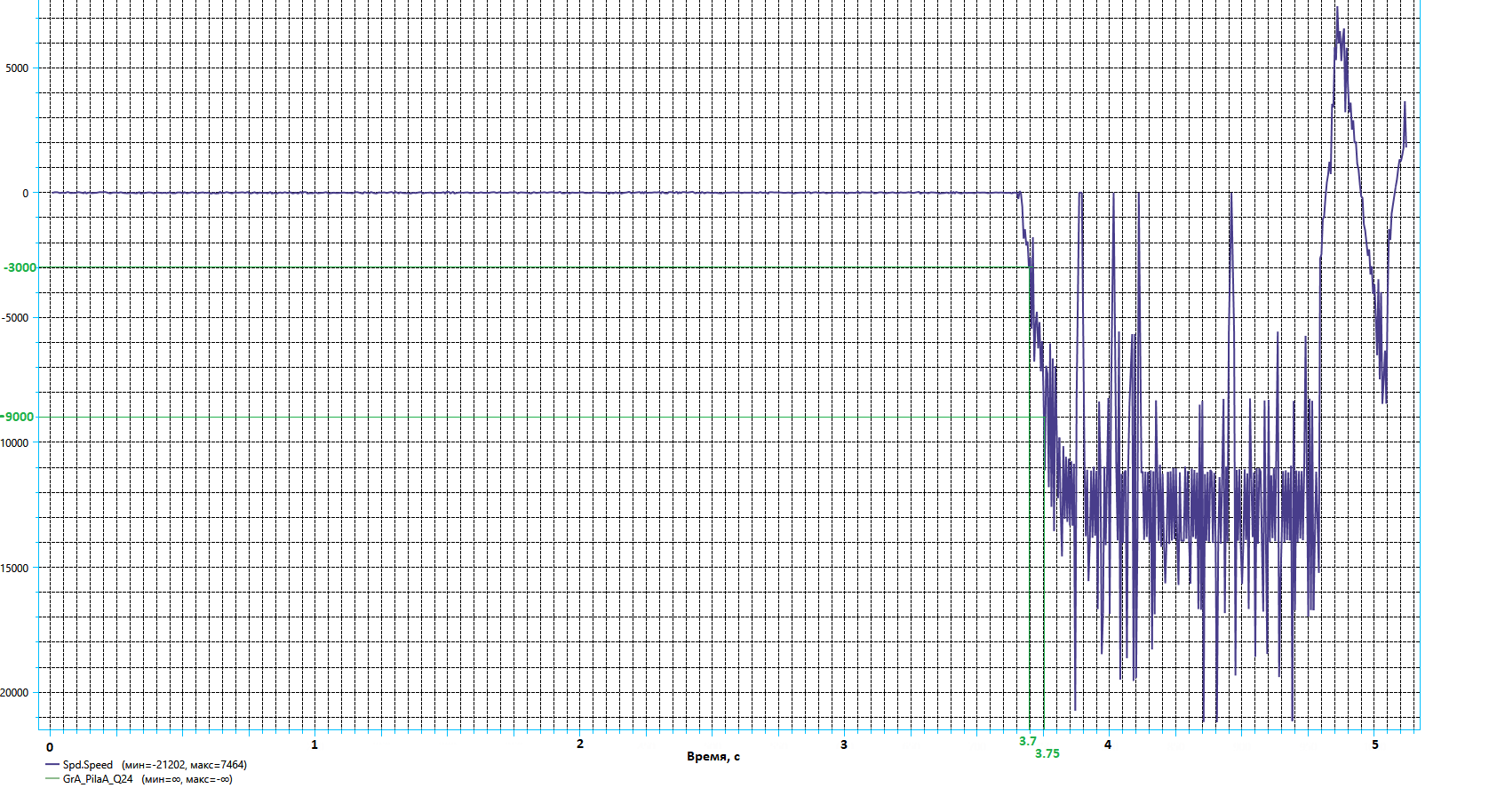


Рисунок 9 — Снятие скорости при токе равным -8А

Здесь переменная Speed.Spd изменилась на 6000 за время сек, что соответствует изменению скорости на 109,410632 рад/с. При этом, поскольку стабилизированный ток в обмотках двигателя был равен 8А, то постоянный момент:

.

Тогда момент инерции:



Истинный значение момента инерции определим как усредненное значение: ФОТО СТЕНДА



1. Поддержка датчика положения

Рулевая рейка имеет на своём борту абсолютный энкодер с импульсным интерфейсом. С данного датчика на микроконтроллер приходит два ШИМ сигнала: А и B (Рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 — ШИМ сигнал с датчика положения ротора: здесь сигнал B находится сверху, сигнал A — снизу

Во время движения скважность ШИМ этих сигналов меняется (Рисунок 3.2), благодаря чему мы можем вычислить положение ротора.



Рисунок 3.2 — Осциллограмма ШИМ сигнала во время движения рулевой рейки, сигнал А находится снизу, сигнал B — сверху.

Для характеристики ШИМ сигнала будем использовать время включенного состояния сигнала за один период. Искать его будем следующим образом: заведём по таймеру для каждого из сигналов. Этот таймер в ходе работы микроконтроллера будет просто накапливаться, достигать максимального значения и сбрасываться вновь (Рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 — График работы TIM2

Начнём фиксировать значения таймера в момент изменения состояния соответствующего сигнала, то есть при переходе из 0 в 1 или из 1 в 0 (Рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 — Соотношение сигнала А с независимым таймером

Как видно из рисунка, нам сразу становится известно  и  — время включённого и выключенного состояния сигнала А. Сложив эти две переменные, мы получим период сигнала.

Поскольку при перемещении рулевой рейки меняется скважность ШИМ, но не меняется период, то введём величину (для каждого сигнала отдельно), которая будет равняться отношению длительности включения (состояния 1, ) к периоду ШИМ:



Здесь T — период ШИМ сигнала А, в среднем  (зависит от рулевой рейки),  принимает разные значения в зависимости от позиции рулевой рейки. Её примерные границы от 0,13 до 0,93 мс.

Выведем *PilaA\_orig* на график и запустим рейку в движение от края до края (Рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 — Отображение пилы А

Получили пилообразный сигнал. Пила Б будет иметь такую же форму, но с большим периодом:



Период (что подтверждается рисунками 3.1–3.2),  принимает разные значения в зависимости от позиции рулевой рейки. Её примерные границы: от 0,6 до 4,2 мс.



Рисунок 3.4 — Отображение пилы Б

Промоделируем эти сигналы в MATLAB Simulink. В качестве блока генерации пилообразного сигнала будем использовать Repeating Table. Исходя из рисунков 3.3 и 3.4, можно посчитать количество пил, которые рейка проходит при перемещении из одного крайнего положения в другое. Для сигнала А это 29,2 пилы, для сигнала Б — 3,94 пилы. Тогда, графики этих пил:



Рисунок 3.5 — Графики пил

Построим итоговую пилу, которая будет изменяться от 0 до 1 за весь ход рулевой рейки от -1000 до 1000. Строить её будем, используя пилы A и B. Умножим пилу A на 2, а пилу B на 15 и назовём эти переменные PilaA\_shift и PilaB\_shift соответственно. Тогда за перемещение от -1000 до +1000 будет насчитано 58,4 pilaA\_shift и 59,1 pilaB\_shift. Коэффициенты 2 и 15 были выбраны не просто так. В идеале, итоговые значения pilaA\_shift и pilaB\_shift должны отличаться на единицу, для лучшей точности определения позиции рулевой рейки. У нас же получилось добиться разницы равной 59,1 – 58,4 = 0,7.

Теперь выведем большую пилу, которая будет считаться по следующему условию: если значение pilaA\_shift больше чем pilaB\_shift, то итоговая равняется разности 1 – (pilaA\_shift – pilaB\_shift), а если pilaB\_shift > pilaA\_shift, то итоговая равняется pilaB\_shift – pilaА\_shift. Графически это условие будет выглядеть следующим образом:



Рисунок 3.6 — Расчёт большой пилы



Рисунок 3.7 — График высчитанной пилы

Именно используя эту высчитанную пилу, полученную из двух (А и Б), и считается местоположение рулевой рейки. Величина наклона рассчитанной пилы высчитывается исходя из разницы pilaB\_shift и pilaA\_shift. Чем больше эта разница, тем сильнее наклон прямой, тем точнее мы определяем положение (поскольку разница между двумя соседними значениями больше). Чрезмерно большая разница приведёт к тому, что на один полный ход рейки рассчитанной пилы будет несколько штук, что недопустимо, поскольку создаёт неоднозначность позиции по одному рассчитанному значению.

# 2. Разработка контура управления током электродвигателя рулевой рейкой

Теперь, зная характеристики и параметры электродвигателя, можем разработать контур управления током. Контроль тока будем осуществлять через пропорционально-интегрирующий регулятор. Тогда структурная схема контура выглядит следующим образом:



Рисунок 9 — Структурная схема контура управления током

На структурной схеме приняты следующие сокращения:

 — коэффициент передачи инвертора по напряжению;

 — постоянная времени инвертора;

 — эквивалентное активное сопротивление фазы обмотки якоря;

 — постоянная времени фазы обмотки статора;

 — коэффициент пропорционального усиления регулятора тока;

 — коэффициент усиления интегральной составляющей регулятора тока.

При проведении оптимизации контура управления током рассматриваются следующие допущения:

– область изменения рабочих параметров не достигает максимально-допустимых ограничений и таким образом модель можно считать линеаризованной;

– время дискретизации, обусловленное несущей частотой ШИМ инвертора значительно меньше, чем постоянная времени объекта регулирования;

– при проведении оптимизации в контуре тока предполагаем полное отсутствие внешних возмущений, обусловленных вращением ротора и нагрузкой приложенной к валу синхронного двигателя.

*Kinv* — определяется исходя из величины рабочего напряжения Udc на шине конденсаторе и коэффициенте ШИМ:

.

 — можно определить, зная несущую частоту ШИМ инвертора блока управления БУРР-30(Гц):

(сек).

*Re* — эквивалентное сопротивление, было получено экспериментальным путём:

(Ом).

*Te* — постоянная времени электромагнитной составляющей двигателя, определяется исходя из индуктивности якорной цепи (которая была также определена экспериментально) (Гн) и активного сопротивления якорной цепи Ом:

(сек).

**Оптимизация контура управления током**

Воспользуемся принципами оптимизации линейных систем и определим параметры управляющего регулятора для контура тока. Основываясь на методике настройки на модульный оптимум, предложенной Кесслером (Keßler) [методичка пдф] постараемся привести передаточную функцию замкнутого контура к желаемому виду:



Выполнив несложные преобразования, можно получить эквивалентную желаемую передаточную функцию, но применительно к разомкнутому контуру и с единичной обратной связью:



В данном случае становится наиболее удобно определить параметры регулятора, отталкиваясь от имеющейся передаточной функции объекта управления:



Здесь  — передаточная функция инвертора, а  — передаточная функция электромагнитного контура двигателя.

В конечном итоге получаем расчётное выражение для передаточной функции регулятора в следующем виде:



Согласно методике оптимизации на модульный оптимум в линейной системе, следующим шагом необходимо выбрать величину малой некомпенсируемой постоянной времени . В рассматриваемом контуре минимальной постоянной времени, определяющей максимально-достижимое быстродействие системы является постоянная времени инвертора  и, следовательно, далее можно полагать, что .

В соответствии с этим можно выполнить ряд преобразований над передаточной функцией регулятора, упрощающих её вид:



Анализируя полученное выражение, приводим его к виду, соответствующему канонической форме пропорционально-интегрального регулятора:

,

Таким образом, мы получили ПИ-регулятор с коэффициентами  и . В соответствии с полученными результатами аналитических вычислений, получим численные значения коэффициентов:



сек – постоянная времени интегрирования.

.

**Ожидаемые показатели качества**

Для определения ожидаемых показателей качества оптимизированной системы электропривода будет удобно воспользоваться методикой оптимизации на модульный оптимум. Ниже представлен ряд показателей качества, характеризующий работоспособность системы.

(сек) – время вхождения в 5-ти процентную зону от установившегося значения при ступенчатом сигнале задания;

% – величина перерегулирования при отработке системой ступенчатого входного сигнала;

(рад/сек) — полоса пропускания контура по модулю и по фазе.

Полученные ожидаемые показатели качества системы сведём в таблицу 1

Таблица 1. Ожидаемые показатели качества оптимизированной системы

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Эквивалентная малая постоянная времени , сек | Время переходного процесса , сек | Перерегулирование при ступенчатом сигнале задания , % | Полоса пропускания по модулю , рад/сек | Полоса пропускания по фазе , рад/сек |
| 0.00026 | 0.001066 | 4.32 | 2730 | 2730 |

4. Имитационное моделирование переходных процессов

Для проверки правильности проведённой оптимизации и соответствия показателей качества ожидаемым, воспользуемся методом имитационного моделирования. Программный пакет Matlab Simulink даёт возможность для детальной имитации системы на уровне структурной схемы. На рисунке 3 представлена имитационная модель системы в соответствии с её структурной схемой, рисунок 10.

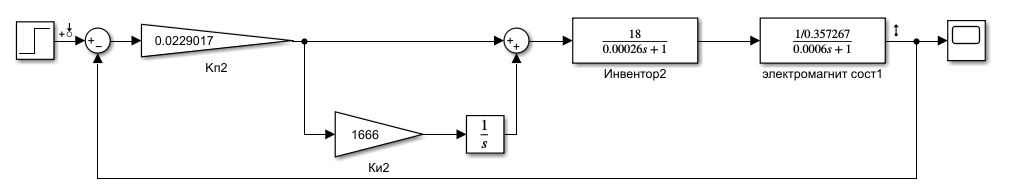


Рисунок 10 — Контур управления током в Matlab Simulink

Для расчёта переходных процессов использовался численный метод Эйлера первого порядка с фиксированным шагом dt = 1/1000000. На рисунках 11 и 12 представлены графики переходного процесса при ступенчатом входном сигнале задания и частотные характеристики, полученные посредством инструмента из пакета Simulink Model Linearizer.

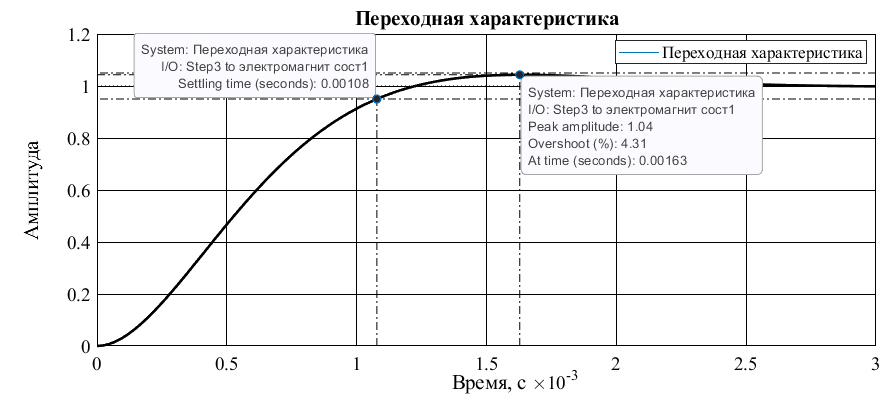


Рисунок 11 — Переходный процесс по току

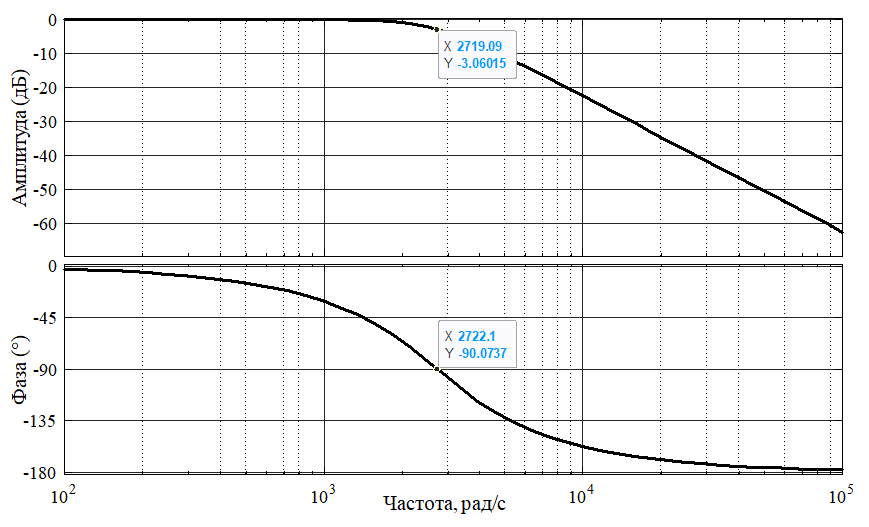


Рисунок 12 — АЧХ и ФЧХ контура тока

В таблице 2 представлено сравнение ожидаемых показателей качества и полученных в результате имитационного моделирования в пакете Matlab-Simulink.

Таблица 2. Сравнение ожидаемых и экспериментальных показателей качества

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Время переходного процесса , сек | Перерегулирование при ступенчатом сигнале задания , % | Полоса пропускания по модулю , рад/сек | Полоса пропускания по фазе , рад/сек |
| Ожидаемый | 0.001066 | 4.32 | 2730 | 2730 |
| Эксперимент | 0.00108 | 4.31 | 2710 | 2710 |

Анализируя полученные результаты можно сделать положительный вывод о работоспособности системы управления и правильности проведённой оптимизации контура тока.

# 3. Разработка контура управления скоростью рулевой рейки с ЭМУР

При разработке контура управления скоростью рулевой рейки будем брать за основу разработанный ранее контур управления током рулевой рейки в п.2. Тогда схема контура скорости выглядит следующим образом:

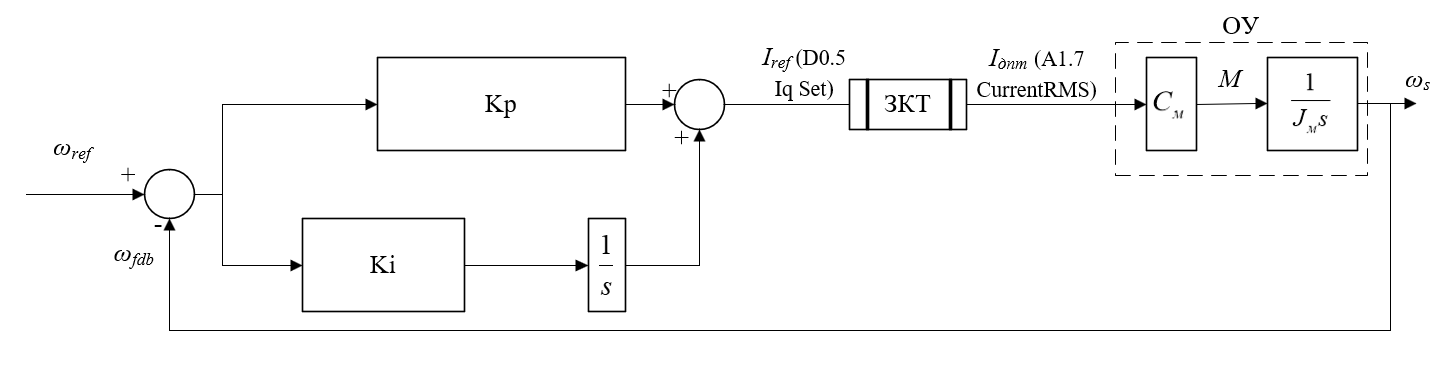


Рисунок 13 — Контур управления скоростью ДПТ

На структурной схеме приняты следующие сокращения:

 — конструктивный параметр электродвигателя;

 — момент инерции рулевой рейки;

ЗКТ — Замкнутый контур тока;

 — коэффициент пропорционального усиления регулятора скорости;

 — коэффициент усиления интегральной составляющей регулятора скорости.

При проведении оптимизации контура управления скоростью рассматриваются следующие допущения:

– область изменения рабочих параметров не достигает максимально-допустимых ограничений и таким образом модель можно считать линеаризованной;

- Не принимаются во внимание ЭДС вращения вала

 был определен в пункте 1 и равен 0,053215.

 был определен в пункте 1 и равен 0,058..

**Оптимизация контура управления скоростью**

Контур скорости можно настроить как на модульный оптимум, так и на симметричный. В данной работе была выбрана настройка на симметричный оптимум, поскольку требования к быстродействию переходного процесса невелики, но требуется отсутствие статической ошибки.

Воспользуемся принципами оптимизации линейных систем и определим параметры управляющего регулятора для контура скорости. Основываясь на методике настройки на симметричный оптимум, приведем передаточную функцию замкнутого контура к желаемому виду [методичка ПДФ] нужно описать что такое wкс со w зкт:

.

В то же время 



В данном случае наиболее удобно определить параметры регулятора, отталкиваясь от имеющейся передаточной функции объекта управления:

, где

.

Однако, для облегчения расчёта регулятора скорости, а также в силу того, что  аппроксимируем контур тока как



В итоге получаем расчётное выражение для передаточной функции регулятора скорости в следующем виде:



Где.

**Ожидаемые показатели качества**

Для определения ожидаемых показателей качества оптимизированной системы электропривода будет удобно воспользоваться методикой оптимизации на симметричный оптимум. Ниже представлен ряд показателей качества, характеризующий работоспособность системы.

Время вхождения в 5-ти процентную зону от установившегося значения при ступенчатом сигнале задания:

;

 – величина перерегулирования при отработке системой ступенчатого входного сигнала;

Полученные ожидаемые показатели качества системы сведём в таблицу 3.

Таблица 3. Ожидаемые показатели качества оптимизированной системы

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Эквивалентная малая постоянная времени , сек | Время переходного процесса , сек | Время переходного процесса , сек | Перерегулирование при ступенчатом сигнале задания , % |
| 0.00052 | 0.001508 | 0.007644 | 43.4 |

**Имитационное моделирование переходных процессов**

Для проверки правильности проведённой оптимизации и соответствия показателей качества ожидаемым, воспользуемся методом имитационного моделирования. Программный пакет Matlab Simulink даёт возможность для детальной имитации системы на уровне структурной схемы. На рисунке 3 представлена имитационная модель системы в соответствии с её структурной схемой, рисунок 10.

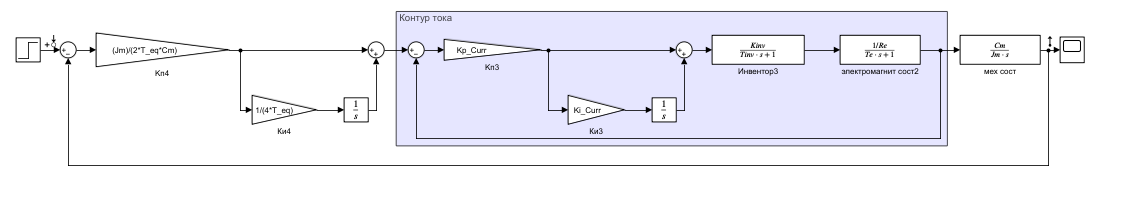


Рисунок 14 — Контур управления скоростью в Matlab Simulink

Для расчёта переходных процессов использовался численный метод Эйлера первого порядка с фиксированным шагом dt = 1/1000000. На рисунке 15 представлен график переходного процесса при ступенчатом входном сигнале задания и частотные характеристики, полученные посредством инструмента из пакета Simulink Model Linearizer.

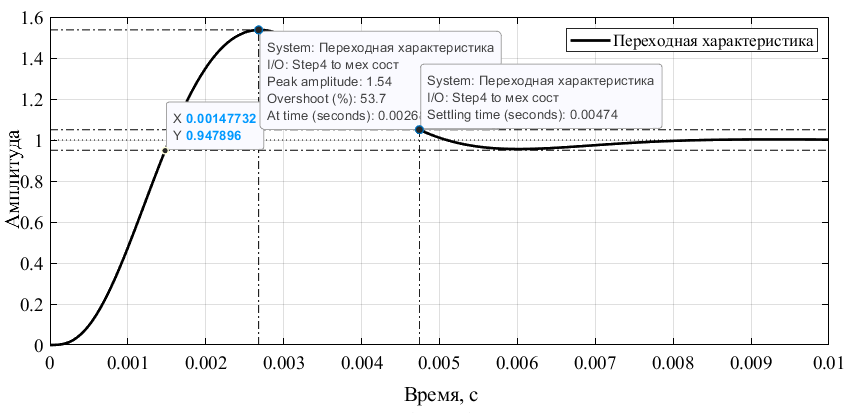


Рисунок 15 — Переходный процесс по скорости

В таблице 4 представлено сравнение ожидаемых показателей качества и полученных в результате имитационного моделирования в пакете Matlab-Simulink.

Таблица 4. Сравнение ожидаемых и экспериментальных показателей качества

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Время переходного процесса , сек | Время переходного процесса , сек | Перерегулирование при ступенчатом сигнале задания , % |
| Ожидаемый | 0.001508 | 0.007644 | 43.4 |
| Эксперимент | 0.00148 | 0.00474 | 53.7 |

Как видно, полученные экспериментально данные отличаются от ожидаемых. Вспомним, что настройку на симметричный оптимум мы делали для аппроксимированного контура тока, ПФ которого выглядела следующим образом:



Для проверки совершенных ранее вычислений, выясним, как работает рассчитанный нами регулятор на аппроксимированном замкнутом контуре тока, для этого вновь соберем модель:

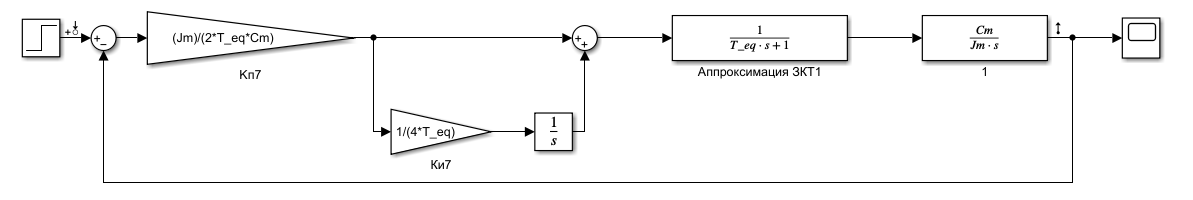


Рисунок 16 — Имитационная модель с аппроксимированным ЗКТ

И снимем переходную характеристику:

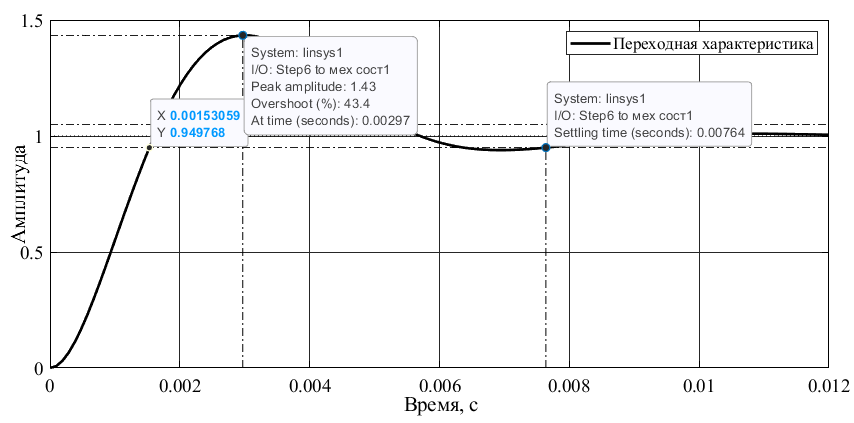


Рисунок 17 — Переходная характеристика с аппроксимированным ЗКТ

Дополним таблицу новыми данными:

Таблица 5. Сравнение ожидаемых и экспериментальных показателей качества

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Время переходного процесса , сек | Время переходного процесса , сек | Перерегулирование при ступенчатом сигнале задания , % |
| Ожидаемый | 0.001508 | 0.007644 | 43.4 |
| Эксперимент | 0.00148 | 0.00474 | 53.7 |
| Эксперимент с аппроксимацией ЗКТ | 0.00153 | 0.00764 | 43.4 |

Анализируя полученные результаты можно сделать положительный вывод о настройки контура управления скоростью на симметричный оптимум, а неточности, полученные в ходе эксперимента, связаны с тем, что при расчётах регуляторов ЗКТ был аппроксимирован апериодическим звеном первого порядка.

Однако, несмотря на то, что настройка контура удалась, значение перерегулирования 53% является слишком большой величиной для корректной работы контура скорости в составе рулевой рейки. Исправим эту ситуацию, задав оптимизирующий фильтр в канале управления, передаточная функция которого .[] Тогда имитационная модель выглядит следующим образом:

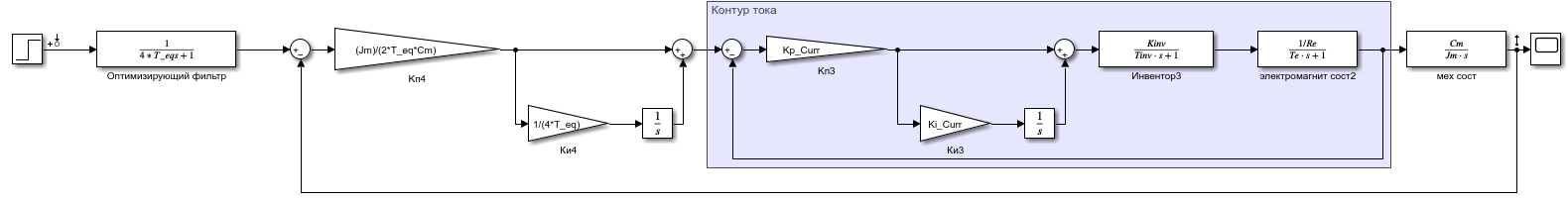


Рисунок 18 — Имитационная модель с оптимизирующим фильтром

И рассчитаем ожидаемые показатели качества с оптимизирующим фильтром в канале управления при ступенчатом входном воздействии.

Таблица 5. Сравнение ожидаемых и экспериментальных показателей качества

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Время переходного процесса , сек | Время переходного процесса , сек | Перерегулирование при ступенчатом сигнале задания , % |
| Ожидаемый | 0.001508 | 0.007644 | 43.4 |
| Эксперимент | 0.00148 | 0.00474 | 53.7 |
| Эксперимент с аппроксимацией ЗКТ | 0.00153 | 0.00764 | 43.4 |
| Ожидаемый с опт. фильтром | 0.00364 | 0.00624 | 8.1 |

Снимем переходную характеристику:

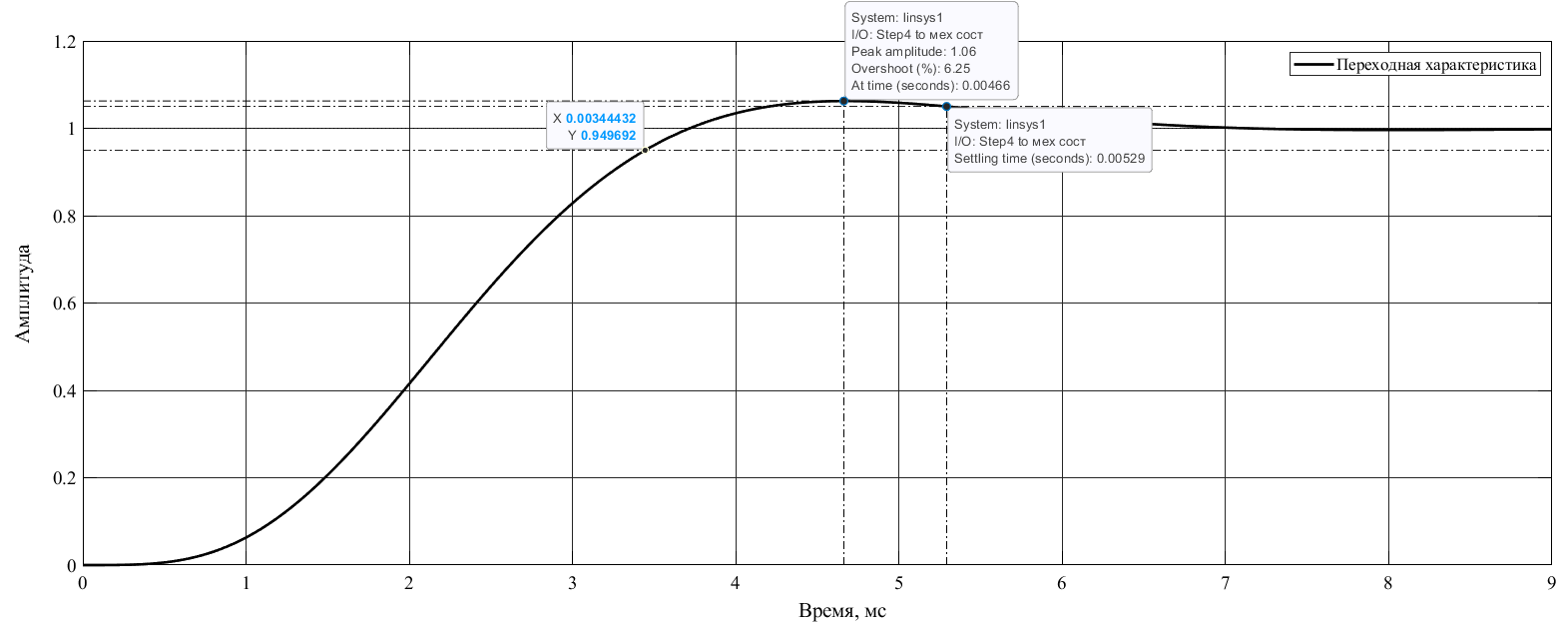


Рисунок 19 — Переходная характеристика с оптимизирующим фильтром

Полученные показатели качества запишем в таблицу:

Таблица 6. Сравнение ожидаемых и экспериментальных показателей качества

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Время переходного процесса , сек | Время переходного процесса , сек | Перерегулирование при ступенчатом сигнале задания , % |
| Ожидаемый | 0.001508 | 0.007644 | 43.4 |
| Эксперимент | 0.00148 | 0.00474 | 53.7 |
| Эксперимент с аппроксимацией ЗКТ | 0.00153 | 0.00764 | 43.4 |
| Ожидаемый с опт. фильтром | 0.00364 | 0.00624 | 8.1 |
| Эксперимент с опт. фильтром | 0.00344 | 0.00529 | 6.25 |

Полученные экспериментально данные незначительно отличаются от ожидаемых, что говорит об успешной настройке контура скорости.

# Разработка и оптимизация контура положения при отсутствии ограничений

При разработке контура управления положением рулевой рейки будем использовать разработанный ранее контур управления скоростью рулевой рейки.

Тогда структурная схема контура выглядит следующим образом:

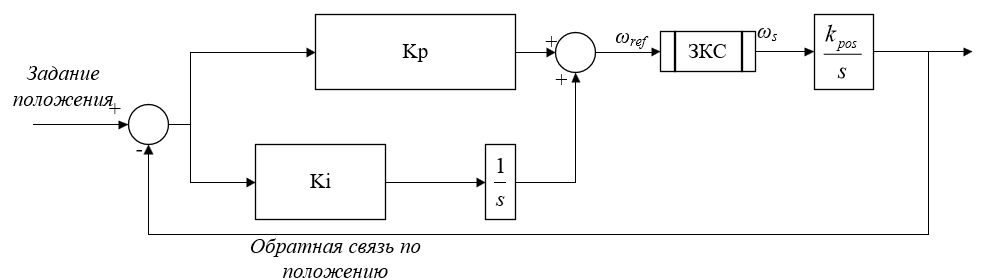


Рисунок 11 — Контур управления положением ДПТ

На структурной схеме приняты следующие сокращения:

— коэффициент передачи редуктора относительно рад/c;

ЗКC — Замкнутый контур скорости;

 — коэффициент пропорционального усиления регулятора скорости;

 — коэффициент усиления интегральной составляющей регулятора скорости.

При проведении оптимизации контура управления положением рассматриваются следующие допущения:

– область изменения рабочих параметров не достигает максимально-допустимых ограничений и таким образом модель можно считать линеаризованной;

Найдём  учитывая вычисления, проделанные в прошлом пункте. Мы знаем, что 1 оборот двигателя перемещает рейку на 2.48мм. Поскольку обороты и радианы взаимосвязаны следующим выражением . Таким образом , где .

**Оптимизация контура управления положением**

Воспользуемся принципами оптимизации линейных систем и определим параметры управляющего регулятора для контура положения.

Настроим контур положения на симметричный оптимум с целью устранения статической и динамической ошибки при работе контура.[4]

Воспользуемся принципами оптимизации линейных систем и определим параметры управляющего регулятора для контура положения. Основываясь на методике настройки на симметричный оптимум, приведем передаточную функцию замкнутого контура к желаемому виду:

.

В данном случае становится наиболее удобно определить параметры регулятора, отталкиваясь от имеющейся передаточной функции объекта управления:





В силу того, что  и , можем аппроксимировать замкнутый контур скорости апериодическим звеном первого порядка:



Тогда ПФ объекта управления:



В итоге получаем расчётное выражение для передаточной функции регулятора в следующем виде:



Где.

Для проверки полученных значений соберем имитационную модель контура управления положением в Matlab Simulink и подадим ступенчатый сигнал на вход:

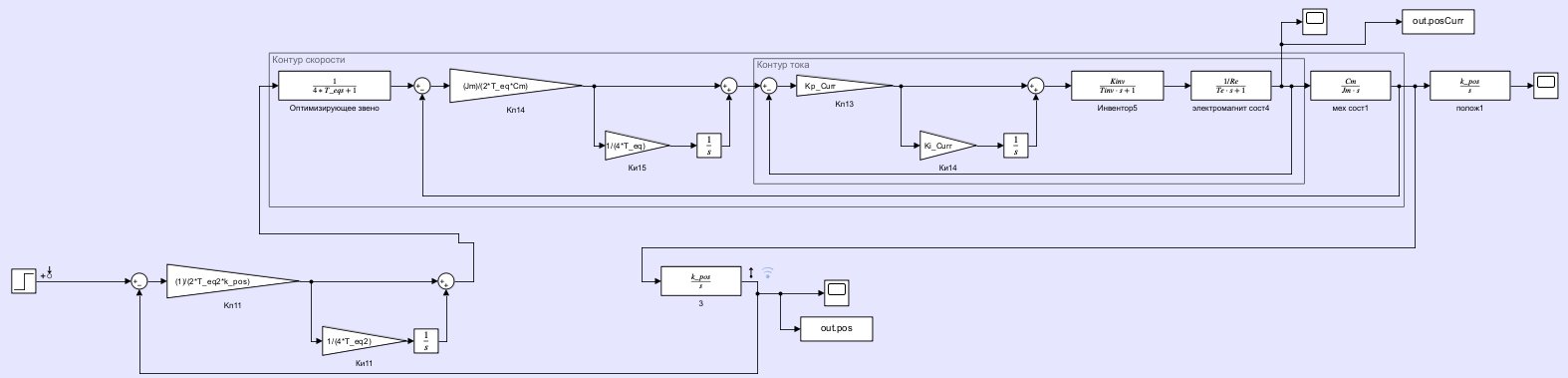


Рисунок 12 — Имитационная модель контура положения

Переходная характеристика в этом случае:



Рисунок 13 — Переходная характеристика по положению при ступенчатом сигнале

При этом перерегулирование составило 50.9%, а время регулирования — 0.0194 секунды. Для компенсации большого перерегулирования введем задатчик интенсивности.

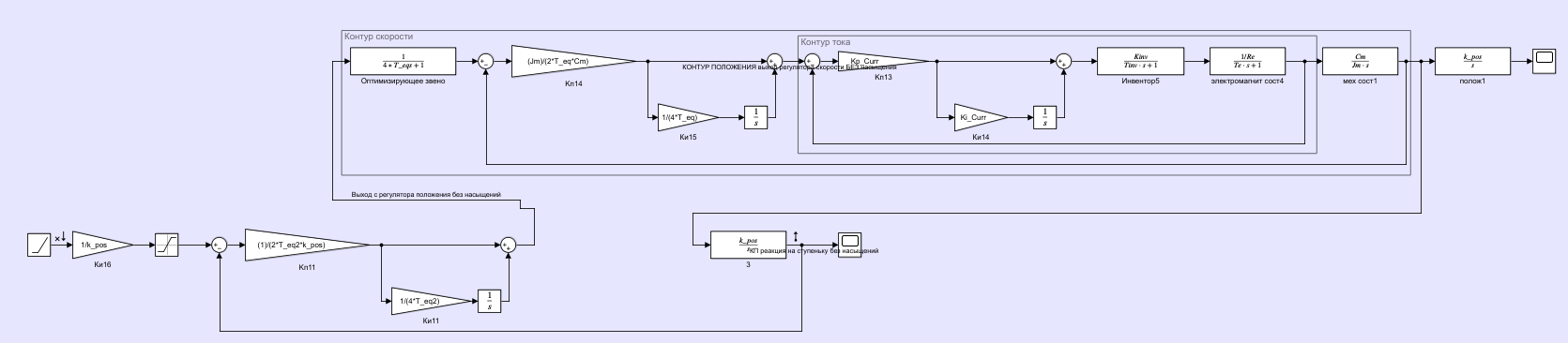


Рисунок 14 — Имитационная модель контура положения вместе с задатчиком интенсивности

И сформируем команду на перемещение рулевой рейки на 96мм, что соответствует перемещению из одного крайнего положения в другое. Снимем график перемещения рейки:



Рисунок 14 — Переходная характеристика контура положения с задатчиком интенсивности

По результатам наблюдений, можно отметить значительное снижение перерегулирования, сопровождаемое существенным увеличением времени, необходимого для завершения процесса регулирования. Тем не менее, в процессе разработки контуров управления не были учтены физические ограничения, существующие в реальном мире. Например, при анализе переходных характеристик контура положения, изображенных на рисунке 14, можно наблюдать, что выходное значение контура регулирования скоростью (то есть задание на контур тока) изменяется в соответствии со следующей кривой:



Рисунок 15 — Выход контура управления током

Очевидно, что ток достигает значений, приблизительно равных 60 килоамперам, что превышает предельные допустимые значения для электродвигателя рулевой рейки.

# 3. Оптимизация контура управления током с учетом накладываемых ограничений

В связи с ограничениями напряжения, присутствующими в системе, предлагается внедрить механизм насыщения на выходе регулятора тока на уровне 18 вольт в связи с ограничениями, накладываемыми напряжением бортовой сети беспилотного ТС, силовым преобразователем и номинальным напряжением двигателя. Кроме того, для предотвращения насыщения регулятора также предлагается внедрить дополнительное воздействие на интегральную составляющую регулятора в соответствии со следующей схемой:

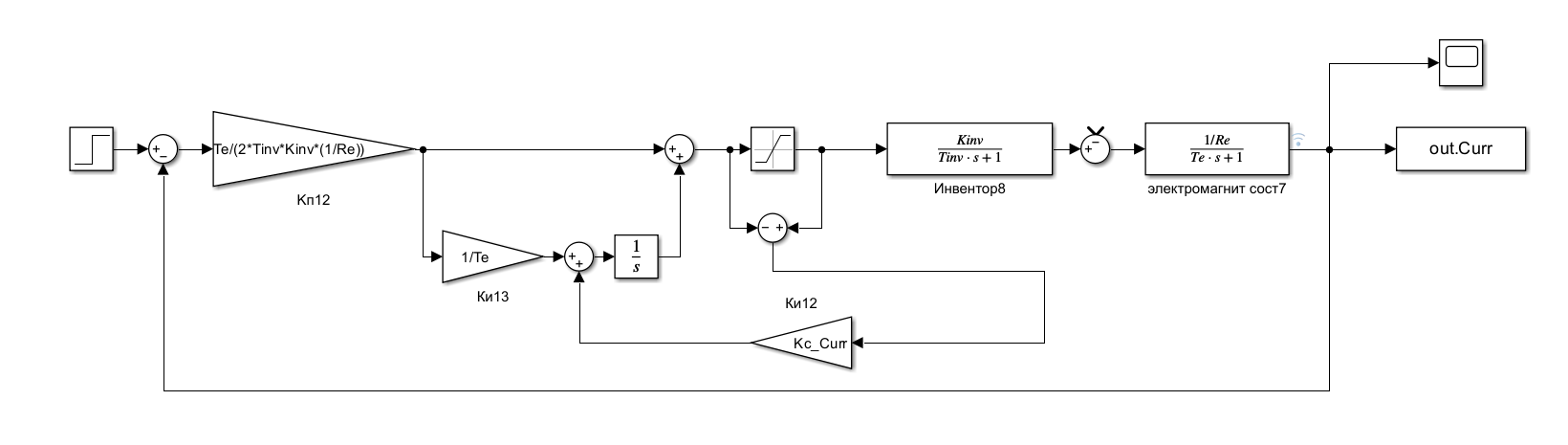


Рисунок 16 — Имитационная модель контура тока

В ПИД регуляторе интегральная составляющая отвечает за коррекцию системных ошибок по времени. Она интегрирует разницу между желаемым и фактическим состоянием системы во времени и применяет корректировку, чтобы минимизировать эту ошибку. Без ограничений интегральная составляющая может продолжать нарастать бесконечно, что может вызвать нестабильность системы. Благодаря введению дополнительного воздействия, становится возможно предотвратить переполнения интегральной составляющей. Это становится проблемой, если ошибку не удаётся устранить в связи с ограничениями системы, ведь в этом случае интегральная составляющая будет расти бесконечно. Также это позволяет уменьшить время на восстановление регулирования после больших ошибок, например когда задание было гораздо больше чем то, что можно реализовать на выходе контура.

Рассмотрим реакцию контура тока на задание, которое сильно превышает реально достижимый ток в системе:



Рисунок 17 — Значения сигналов

Таким образом, при попытке установить значения тока в обмотке двигателя выше физически допустимого предела, модель будет ограничивать значение тока на максимально достижимом уровне.

# 4. Оптимизация контура управления скоростью с учетом накладываемых ограничений

В связи с физическими ограничениями, накладываемыми на силовой преобразователь и двигатель, предлагается установить ограничение на выходе регулятора скорости на уровне максимального допустимого тока, соответствующего 70 амперам, с целью предотвращения возможных перегревов и сохранения необходимого уровня момента (достаточного для работы). Данный уровень тока соответствует допустимой кратковременной токовой перегрузке. Кроме того, для предотвращения насыщения регулятора также предлагается внести корректировки в интегральную составляющую регулятора в соответствии с указанной схемой:

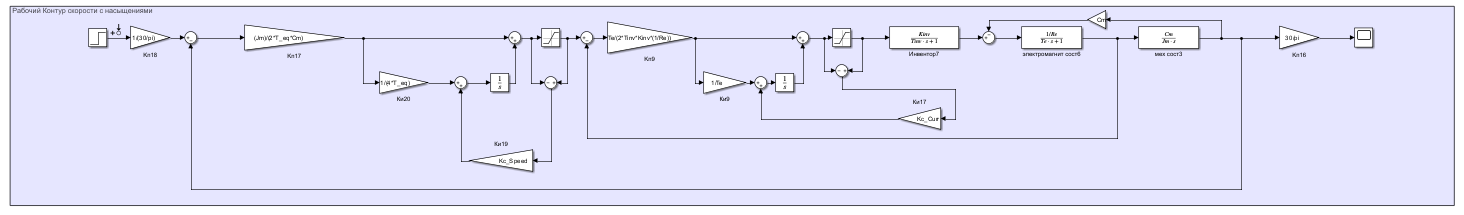


Рисунок 18 — Имитационная модель контура скорости с ограничениями



Рисунок 19 — Реакция контура скорости на ступенчатый сигнал

При этом во вложенном контуре управления током сигналы изменялись по следующим кривым



Рисунок 20 — Управление током во время отработки скорости

Таким образом, была проведена проверка эффективности механизма, который предотвращает насыщение регулятора.

Если сравнить отработку контура скорости текущего варианта с идеализированным предыдущим, то увидим такую картину:



Рисунок 21 — Сравнение контуров

На рисунке 21 можно увидеть, что время регулирования стало в разы больше.

# 5. Оптимизация контура управления положением с учетом накладываемых ограничений

Из-за физических ограничений, связанных с невозможностью бесконечного увеличения скорости вращения двигателя для более быстрого установления рейки в нужное положение, необходимо ограничить максимальную скорость вращения двигателя на номинальном уровне 875 оборотов в минуту. Для предотвращения насыщения регулятора также предлагается внести корректировки в интегральную составляющую регулятора в соответствии с указанной схемой:

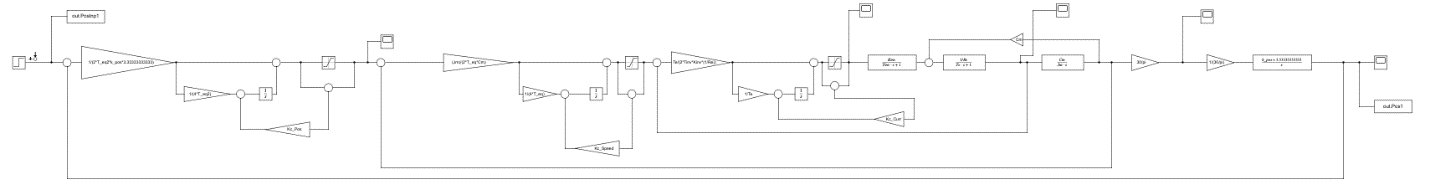


Рисунок 21 — Имитационная модель контура положения с ограничениями

Подадим команду на перемещение на 96мм, что соответствует перемещению рулевой рейки из одного крайнего положения в другое:



Рисунок 22 — Переходная характеристика контура положения

Исходя из рисунка 22 видно, что система входит в автоколебания, что является неудовлетворительным поведением системы. Происходит это из-за соответствующей формы регулятора положения:



Рисунок 23 — Сравнение выходного сигнала КП с выходом регулятора положения

Для достижения стабильной контура положения, выполним корректировку коэффициента регулятора положения с учётом следующего: уменьшим  в 20 раз,  в 16,66 раз. В результате получим следующую картину:



Рисунок 24 — Полученный результат перемещения из одного крайнего положения рейки в другое

Сравнение качеств переходного процесса. Несмотря на значительное увеличение времени переходного процесса в контуре положения, удалось достигнуть удовлетворительных показателей качества по форме перемещений с учётом всех имеющихся ограничений в контурах тока, скорости и положения.

При этом скорость изменяется в соответствии со следующим законом:



Рисунок 25 — Работа контура скорости

Из графика на рисунке 25 видно, что при отработке задания в контуре положения электродвигатель выходит на номинальные обороты, что соответствует максимально эффективному использованию мотора.

При этом ток в цепи электродвигателя изменяется в соответствии с последующей кривой:



Рисунок 26 — Работа контура тока

Из графика на рисунке 26 видно, что при отработке задания в контуре положения в цепи электродвигателя происходит увеличение тока до уровня соответствующего допустимой кратковременной токовой перегрузке в 70А, что соответствует максимальной эффективности использования мотора и силового преобразователя без перегрузки.

Полученный результат можно считать успешным, поскольку система остается устойчивой, время переходного процесса удовлетворительное, и линейная ошибка по положению рулевой рейки отсутствует. Кроме того, значения тока и скорости не принимают неадекватных значений. (мотор использован на 100% по скорости току и энергетической эффеткивноси двигателя по моменту).