

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**



ИШИТР, ОАР

15.03.06 «Мехатроника и робототехника»

**«Разработка контура управления током электродвигателя рулевой
рейки с электромеханическим усилителем руля»**

Курсовой проект

По дисциплине Междисциплинарный проект

Выполнил студент гр.8Е02



Подпись

Дата

Сокуров Р.Е.

ФИО

Проверил доцент ОАР

Должность

Подпись

Дата

Тырышкин А.В.

ФИО

Оглавление

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ	3
Актуальность	4
Обзор существующих решений	5
Техническое задание	9
Расчёт характеристик электродвигателя рулевой рейки с ЭМУР.....	10
Разработка контура управления током электродвигателя рулевой рейкой	18
Функциональная схема блока управления рулевой рейкой	23
Заключение	23
Список литературы	24

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ООП

ФИО
руководителя ООП
« ____ » _____ 2024 г.

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Тема «Разработка контура управления током электродвигателя рулевой рейки с ЭМУР»

1. Перечень работ (заданий), подлежащих выполнению:

Анализ актуальности проекта
Обзор существующих решений
Техническое задание
Расчёт характеристик электродвигателя рулевой рейки с ЭМУР
Разработка контура управления током электродвигателя рулевой рейки
Разработка структурной схемы блока управления рулевой рейкой

2. Перечень отчетных материалов и требования к их оформлению:

[illegible]

Руководитель УИРС/НИРС

(ДОЛЖНОСТЬ)

(ПОДПИСЬ)

(Ф. И. О.)

Задание принял к исполнению _____ (подпись) _____ (Ф. И. О. обучающегося)
студент гр. _____
« » 20 г.

Актуальность

Беспилотные автомобили являются одной из самых актуальных и перспективных тем в автомобильной индустрии. Они представляют собой транспортные средства, которые способны перемещаться без участия водителя.

По последним прогнозам, Boston Consulting Group (BCG), всего через 10 лет общий объем рынка беспилотных машин может составить около \$42 млрд. Ожидается, что доля беспилотных автомобилей в общей структуре мировых продаж достигнет отметки в 12–13%. Иными словами, на рынок будет выпущено около 14 млн беспилотных автомобилей. 500 тыс. из них будут полностью автономными. McKinsey Global Institute еще более оптимистичен в своих прогнозах, полагая что общая доля беспилотных машин (как полностью автономных, так и полуавтономных) к 2025 году достигнет 15–20% [1], но в распоряжении Правительства РФ говорится о 10–15% к 2035 году [3].

Актуальность беспилотных автомобилей объясняется несколькими факторами. Во-первых, они могут значительно повысить безопасность на дорогах. Около 90% аварий на дорогах вызваны ошибками водителей [2], и беспилотные транспортные средства, оснащенные передовыми системами безопасности и алгоритмами управления, могут снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Основные проблемы внедрения технологий автономности включают в себя отсутствие в настоящее время в Российской Федерации ряда критичных электронных компонентов 2-го и 3-го уровней [3]. Уровни автономности описаны на следующем рисунке:

SAE J3016 УРОВНИ АВТОМАТИЗАЦИИ ВОЖДЕНИЯ

	УРОВЕНЬ 0	УРОВЕНЬ 1	УРОВЕНЬ 2	УРОВЕНЬ 3	УРОВЕНЬ 4	УРОВЕНЬ 5
Что должен делать водитель?	Вы ведёте автомобиль, даже если ноги находятся не на педалях, а руки не на руле			Вы не ведёте автомобиль, если активированы функции автоматического вождения		
	Вы обязаны следить за электронными ассистентами и подруливать, разгоняться и тормозить при необходимости			Если система попросит, вы должны взять управление на себя	Электронные ассистенты не требуют от человека брать управление на себя	
Системы помощи водителю						
Что делает автоматика?	Ассистенты лишь предупреждают и оказывают кратковременную помощь	Ассистенты помогают рулить ИЛИ ускоряться/тормозить	Ассистенты помогают рулить И ускоряться/тормозить	Система может самостоятельно вести автомобиль только при одновременном выполнении нескольких условий		Система может самостоятельно вести автомобиль при любых условиях
	• Автоматическое экстренное торможение; • Предупреждение о слепых зонах; • Предупреждение о покидании полосы	• Удержание в полосе ИЛИ • Адаптивный круиз-контроль	• Удержание в полосе И • Адаптивный круиз-контроль одновременно	• Ассистент движения в дорожных заторах	• Местное беспилотное такси; • У автомобиля может не быть руля и педалей	• То же самое, что уровень 4, но способность автономного передвижения сохраняется везде
Примеры систем						

Рисунок 1 — Уровни автономности системы

Поскольку рулевая рейка является одним из ключевых компонентов систем 2-го и 3-го уровней (например, система удержания в полосе) разработка её блока управления является важной задачей.

Обзор существующих решений

Рассмотрим существующие решения, а именно блоки управления рулевыми рейками от других производителей. В связи с очень ограниченным числом информации по техническим характеристикам, у некоторых устройств технические характеристики не будут ёмкими.

Блок управления ЭУР от автомобилей ВАЗ

Электромеханический усилитель руля (122.3405010-02, 122.3405010-03) «АЭ» Калуга — это устройство, которое в наше время устанавливается на большинство машин отечественного производства Лада Калина / ВАЗ 1117-1119, Лада Гранта ВАЗ 2190, Лада Гранта FL, Лада Калина 2, Датсун.

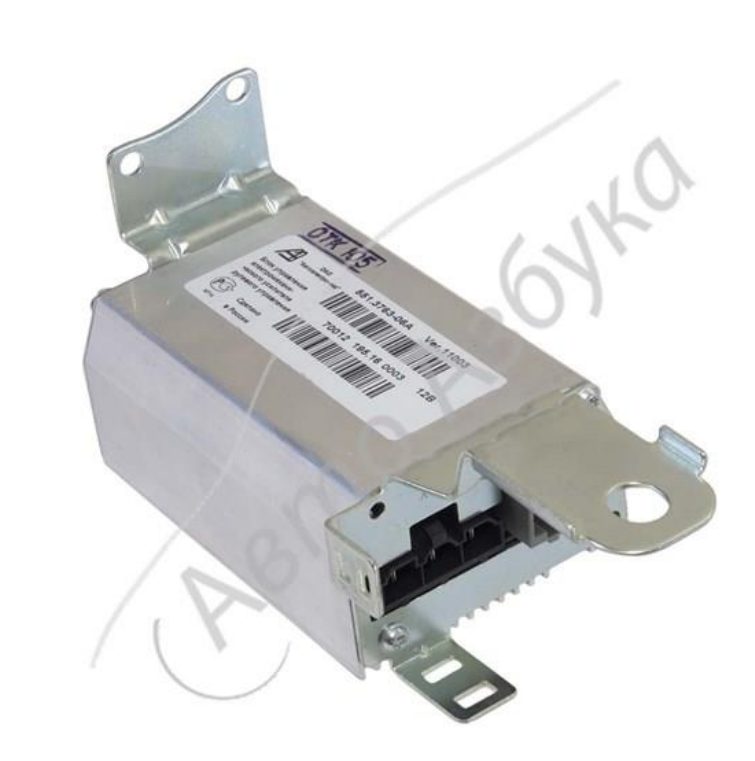


Рисунок 2 — ЭУР 122.3405010-02

Его основные характеристики:

Номинальное напряжение питания: 13,5 В.

Потребление тока, не более: 55А

Компенсирующий момент: 28 Нм

Электроусилитель руля от АО «ПО Муроммашзавод»

Электромеханический усилитель руля от АО «ПО Муроммашзавод» устанавливается на грузовые транспортные средства, автобусы и электромобили с нагрузкой на управляемую ось до 9 тонн. Он поддерживает обмен данными по CAN-шине; координация системы автономного управления движением (поддержка 2-5 уровня автономности согласно SAE J3016); возможность реализации беспилотного управления грузовым транспортом.

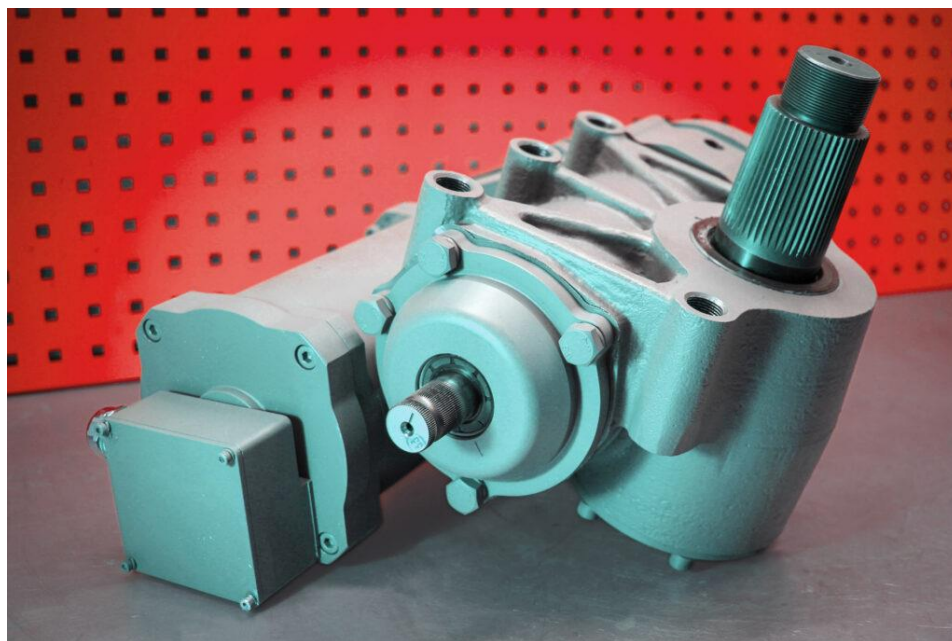


Рисунок 3 — Электроусилитель руля от АО «ПО Муроммашзавод»

Его основные характеристики:

Номинальное напряжение питания: 21,6–30В

Максимальный ток потребления: 400А

Компенсирующий момент: 560 Нм

Недостаточное количество данных об аналогичных устройствах, применяемых на данный момент, оказало значительное влияние на процесс осуществления настоящего обзора.

Составим таблицу, где раскроем плюсы и минусы каждого блока управления:

	ЭУР ВАЗ Универсальный	ЭУР от АО «ПО Муроммашзавод»	Разрабатываемый блок управления
Напряжение питания, В	13,5	24	24
Максимальный ток потребления, А	55	400	70
Компенсирующий момент, Н * м	28	560	27

Поддержка 2-5 уровня автономности согласно SAE	Нет	Да	Да
Нагрузка на управляемую ось, тонны	2	9	2,5

Как видно из обзора несмотря на то, что ЭУР от АО «ПО Муроммашзавод» полностью справляется со всеми вышеуказанными требованиями, конечное устройство рассчитано на гораздо более тяжелый класс автомобилей, что делает сам блок громоздким и массивным.

В связи с этим была продолжена разработка блока управления рулевой рейкой БУРР-30 как решение для автомобилей массой до 2,5 тонн.

Техническое задание

На разработку контура управления током электродвигателя рулевой рейки беспилотного транспортного средства.

Заказчик

ООО «ЭвоКарго», г. Москва

Исполнитель

Сокуров Руслан Ергалиевич, студент 4-го курса Томского Политехнического Университета по направлению «Мехатроника и робототехника».

Объект управления

Объектом управления является силовой транзисторный преобразователь управляющий электродвигателем постоянного тока в составе рулевой рейки.

Необходимо разработать контур управления током электродвигателя рулевой рейки, который будет управлять уровнем тока в обмотках электродвигателя обеспечивая следующие показатели качества:

- Время нарастания переходного процесса по току не более 0,2 сек;
- Перерегулирование переходного процесса по току должно быть не более 5%;

Известные параметры объекта управления

- Номинальное напряжение электродвигателя — 12В;
- Максимальный ток двигателя рулевой рейки — 120А;
- Несущая частота ШИМ силового транзисторного преобразователя $f_{\text{pwm}} = 7500 \text{ Гц}$;
- Коэффициент передачи силового преобразователя — 0,75.

***Техническое задание может быть скорректировано по соглашению сторон.**

Расчёт характеристик электродвигателя рулевой рейки с ЭМУР

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

1. Определение сопротивления обмотки якоря $R_{я}$

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. Сопротивление найдём по закону Ома для линейного участка цепи: $R_{я} = \frac{U}{I}$.

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:

$$\overline{R_{я}} = \frac{0,396511 + 0,355165 + 0,320125}{3} = 0,357267 \text{ Ом}$$

2. 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 $I(t)$ и напряжение на клеммах $U(t)$ связаны следующим дифференциальным уравнением:

$$L \frac{dI}{dt}(t) + RI(t) = U(t) - C_{\omega} \omega(t) \quad (1)$$

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

$$\begin{aligned}
\mathcal{L} \left\{ L \frac{dI}{dt}(t) + RI(t) \right\} (s) &= \mathcal{L} \{ U(t) \} (s) \\
L \mathcal{L} \left\{ \frac{dI}{dt}(t) \right\} (s) + R \mathcal{L} \{ I(t) \} (s) &= \frac{U_0}{s} \\
L(s \mathcal{L} \{ I(t) \} (s) - I(0)) + R \mathcal{L} \{ I(t) \} (s) &= \frac{U_0}{s} \\
Ls \mathcal{L} \{ I(t) \} (s) + R \mathcal{L} \{ I(t) \} (s) &= \frac{U_0}{s} \\
(Ls + R) \mathcal{L} \{ I(t) \} (s) &= \frac{U_0}{s} \\
\mathcal{L} \{ I(t) \} (s) &= \frac{U_0}{s(Ls + R)} \\
\mathcal{L} \{ I(t) \} (s) &= \frac{U_0/R}{s} + \frac{-U_0/R}{s + R/L}
\end{aligned}$$

Перейдём к оригиналам:

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}^{-1} \{ \mathcal{L} \{ I(t) \} (s) \} (t) &= \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{U_0/R}{s} + \frac{-U_0/R}{s + R/L} \right\} (t) \\
I(t) &= \frac{U_0}{R} \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s} \right\} (t) - \frac{U_0}{R} \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s + R/L} \right\} (t) \\
I(t) &= \frac{U_0}{R} - \frac{U_0}{R} e^{-tR/L}
\end{aligned}$$

Таким образом, по истечении нескольких миллисекунд после подачи 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 осциллограф к проводам ДПТ и снимем переходную характеристику:

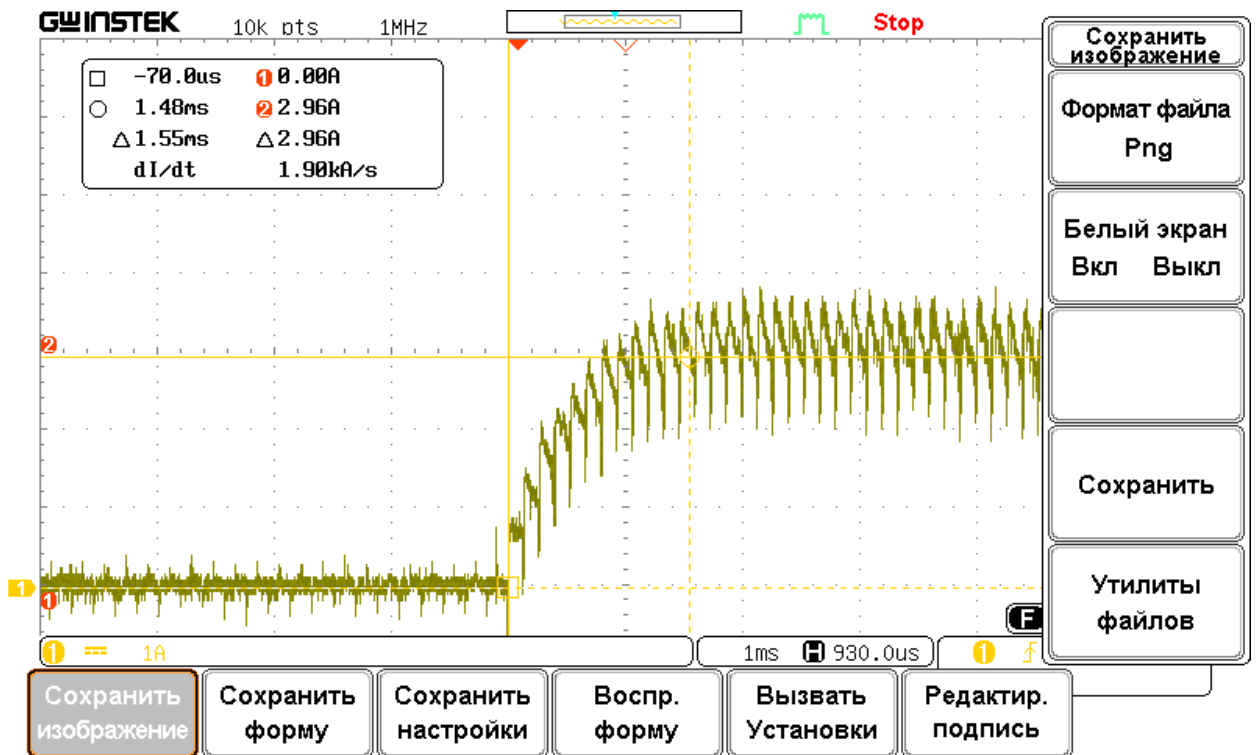


Рисунок 5 — Переходный процесс по току при ограничении на уровне 3А с источника питания

Зная напряжение, что было на двигателе в момент снятия характеристики $U_0(t)=1.2B$, 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, A')
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()

```

$R_{\text{я}} = 0.388274648131726$, $L = 0.0001419256439732361$

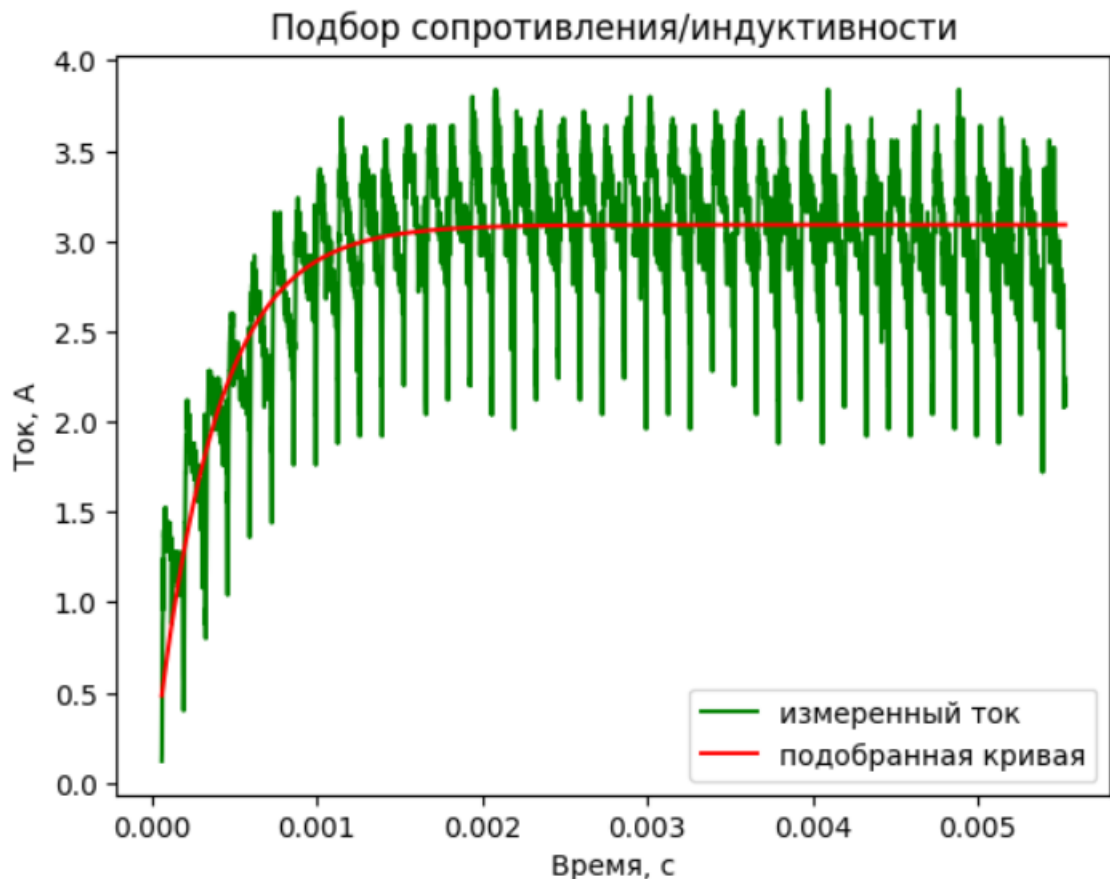


Рисунок 6 — Результат выполнения листинга 1

Получили значение $R_{\text{я}} \approx 0.388 \text{ Ом}$, $L \approx 0.142 \text{ мГн}$. Сопротивление от найденного в пункте один отличается на 8,6%, а значит вычисления были проведены корректно.

3. Определение момента вращения электродвигателя

Определим момент вращения экспериментальным путём. Для этого, жестко прикрепим к валу двигателя рычаг и замерим силу вращения:



Рисунок 7 — Определение момента вращения

Усилие было измерено весами, поэтому значение с них было умножено на $g = 9,8 \text{ м / с}^2$ для получения силы в [Н]:

Таблица 1 — 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.

4. Расчёт конструктивного параметра электродвигателя

Рассчитаем его исходя из линеаризованного уравнения ДПТ:

$M = C_m \cdot I_a$. Тогда таблица 1 расширяется на один столбец:

Таблица 2 — Рассчитанное значение конструктивного параметра

U, В	I, А	Замеренное усилие, кг	Усилие, Н	Длина рычага, м	Момент вращения ЭД, Н * м	Конструктивный параметр См
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

Среднее значение конструктивного параметра C_m — 0,049570785.

Проверим полученное значение конструктивного параметра. Для этого снимем блокировку вала ротора и подадим напряжение на обмотку ДПТ, тахометром снимем скорость вращения вала:

Таблица 3 — Рассчитанный иным способом конструктивный параметр

U, В	I, А	ϑ (скорость), об/мин	ω , рад/с	$R_{\text{я}}$ (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

Здесь конструктивный параметр C_m рассчитывается исходя из формулы статического движения электропривода: $\omega = \frac{U - IR}{C_m} \Rightarrow C_m = \frac{U - IR}{\omega}$ (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 C_m — 0,056858951, отличается на 14% от прошлого значения.

5. Расчёт момента инерции электропривода

Согласно второму закону динамики вращательного движения, момент инерции тела связан с моментом вращения по следующему закону: $M = J \cdot \varepsilon$, где M – момент вращения тела, J – момент инерции тела, ε – угловое ускорение.

Угловое ускорение ε будем находить как первую производную скорости по времени: $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$. Поскольку нас интересует момент инерции всей системы (включая рулевую рейку), то для его анализа вернём мотор на его место (согласно кинематической схеме на рисунке 4).

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

$$M = J \cdot \varepsilon$$

$$I \cdot C_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

$$J = \frac{I \cdot C_m}{\frac{d\omega}{dt}}$$

Выведем на осциллограф в программе MViewer значение скорости и подадим ток определенной величины на двигатель. Осциллограф работает на тактовой частоте 20кГц, что слишком подробно, чтобы мы увидели изменения скорости. Сделаем график менее подробным, введя децимацию равной 50. Тогда 1 секунда равна $20000/50 = 400$ меткам на графике осциллографа:

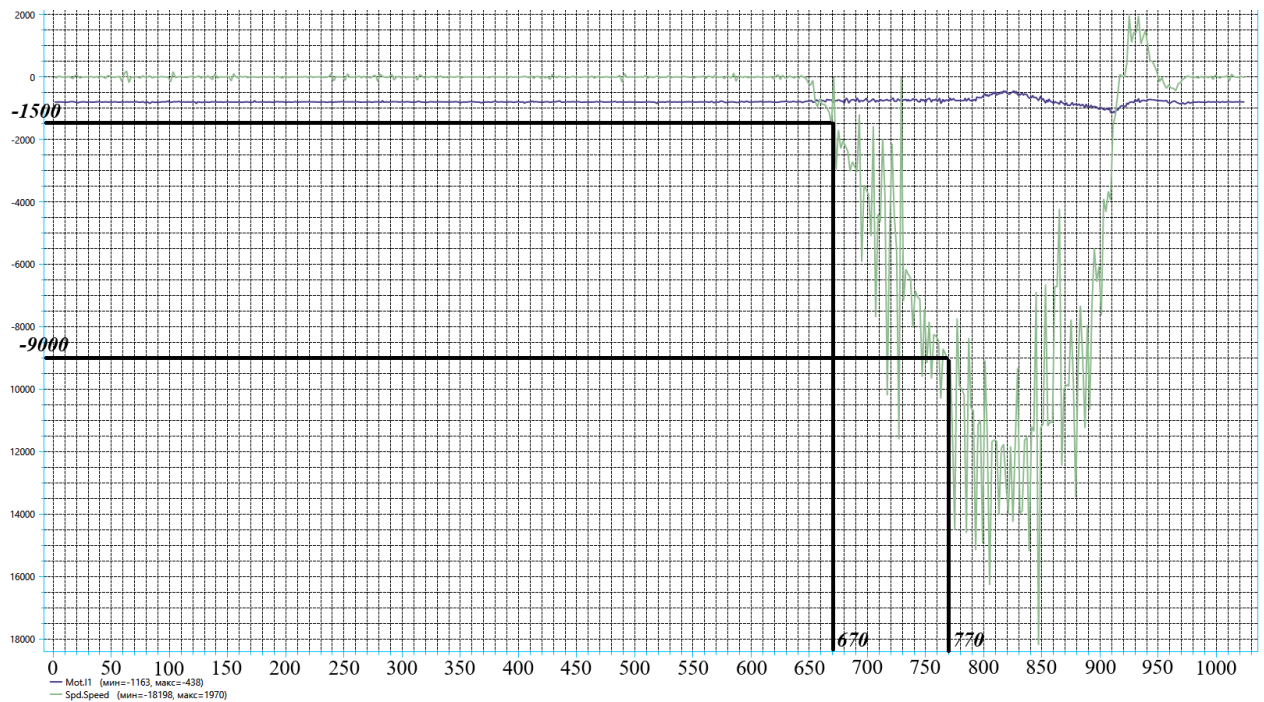


Рисунок 8 — Снятие скорости при токе равным 8А

Здесь переменная Speed.Spd изменилась на 7500, что соответствует изменению скорости на 136,76 рад/с за время $dt = \frac{770 - 670}{400} = 0,25$ сек. При

этом, поскольку ток в обмотках двигателя был равен 8А, то момент:

$$M = I \cdot C_{\text{м}} = 8 \cdot 0,053215 \approx 0,397 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Тогда момент инерции:

$$J = \frac{0,397}{\frac{136,76}{0,25}} = \frac{0,397}{547,04} = 0,000725724 (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$$

Разработка контура управления током электродвигателя рулевой рейкой

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

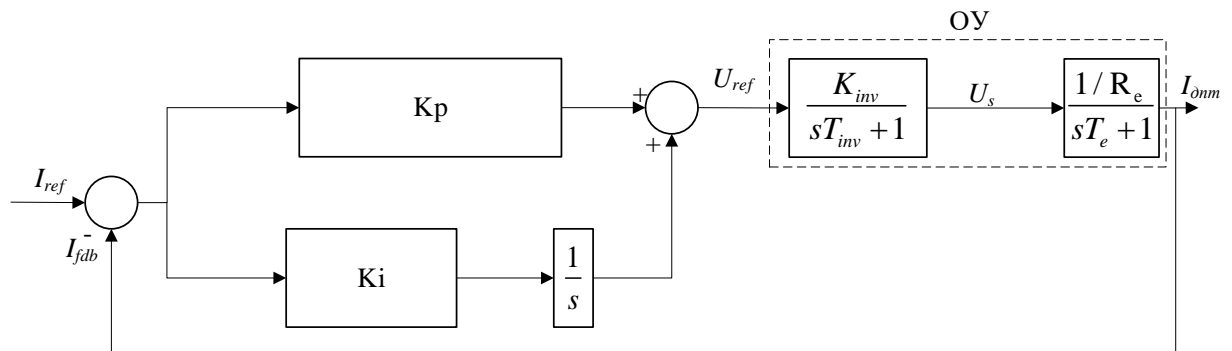


Рисунок 9 — Структурная схема контура управления током

На структурной схеме приняты следующие сокращения:

K_{inv} — коэффициент передачи инвертора по напряжению;

T_{inv} — постоянная времени инвертора;

R_e — эквивалентное активное сопротивление фазы обмотки якоря;

T_e — постоянная времени фазы обмотки статора;

K_p — коэффициент пропорционального усиления регулятора тока;

K_i — коэффициент усиления интегральной составляющей регулятора тока.

При проведении оптимизации контура управления током рассматриваются следующие допущения:

- все фазы статорной обмотки одинаковы и симметричны, следовательно, можно рассмотреть цепь питания отдельно взятой фазы синхронного двигателя как объект оптимального управления;

– 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.

K_{inv} — определяется исходя из величины рабочего напряжения U_{dc} на шине конденсаторе и коэффициенте ШИМ:

$$K_{inv} = U_{dc} \cdot 0,75 = 24 \cdot 0,75 = 18.$$

T_{inv} — можно определить, зная несущую частоту ШИМ инвертора $f_{pwm} = 7500$ (Гц):

$$T_{inv} = \frac{1}{0,5 \cdot f_{pwm}} = \frac{1}{0,5 \cdot 7500} = 0,00026 \text{ (сек)}.$$

R_e — эквивалентное сопротивление, было получено экспериментальным путём:

$$R_e = 0,357267 \text{ (Ом)}.$$

T_e — постоянная времени электромагнитной составляющей двигателя, определяется исходя из его индуктивности (которая была также определена экспериментально) $L_s = 0,000142$ (Гн) и активного сопротивления $R_e = 0,357267$ Ом:

$$T_e = \frac{L_s \cdot \frac{3}{2}}{R_e} = \frac{0,000142 \cdot \frac{3}{2}}{0,357267} \approx 0,0006 \text{ (сек)}.$$

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) постараемся привести передаточную функцию замкнутого контура к желаемому виду:

$$W_{зк}^{MO}(s) = \frac{1}{s2T_{\mu}(sT_{\mu} + 1) + 1}$$

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

$$W_{рк}^{MO}(s) = \frac{1}{s2T_{\mu}(sT_{\mu} + 1)}$$

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

$$W_{оп}(s) = W_{inv}(s) \cdot W_d(s)$$

Здесь $W_{inv}(s) = \frac{K_{inv}}{sT_{inv} + 1}$ — передаточная функция инвертора, а

$W_d(s) = \frac{1/R_e}{sT_e + 1}$ — передаточная функция электромагнитного контура двигателя.

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

$$\begin{aligned} W_{рег}(s) &= \frac{W_{рк}^{MO}(s)}{W_{оп}(s)} = \frac{W_{рк}^{MO}(s)}{W_{inv}(s) \cdot W_d(s) \cdot k_{i3} \cdot k_{i5} \cdot k_{i6}} = \frac{\frac{1}{s2T_{\mu}(sT_{\mu} + 1)}}{\frac{K_{inv}}{(sT_{inv} + 1)} \cdot \frac{1/R_e}{(sT_e + 1)}} = \\ &= \frac{(sT_{inv} + 1) \cdot (sT_e + 1)}{s2T_{\mu}(sT_{\mu} + 1) \cdot K_{inv} \cdot 1/R_e} \end{aligned}$$

Согласно методике оптимизации на модульный оптимум в линейной системе, следующим шагом необходимо выбрать величину малой

некомпенсируемой постоянной времени T_μ . В рассматриваемом контуре минимальной постоянной времени, определяющей максимально-достижимое быстродействие системы является постоянная времени инвертора T_{inv} и, следовательно, далее можно полагать, что $T_\mu = T_{inv}$.

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

$$\begin{aligned} W_{\text{РЕГ}}(s) &= \frac{(sT_{inv} + 1) \cdot (sT_e + 1)}{s2T_\mu (sT_\mu + 1) \cdot K_{inv} \cdot 1/R_e} = \frac{(sT_{inv} + 1) \cdot (sT_e + 1)}{s2T_{inv} (sT_{inv} + 1) \cdot K_{inv} \cdot 1/R_e} = \\ &= \frac{(sT_e + 1)}{s2T_{inv} \cdot K_{inv} \cdot 1/R_e} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} W_{\text{РЕГ}}(s) &= \frac{(sT_e + 1)}{s2T_{inv} \cdot K_{inv} \cdot 1/R_e} = \frac{T_e \cdot R_e}{2T_{inv} \cdot K_{inv}} \cdot \frac{(sT_e + 1)}{sT_e} = \\ &= K_{\text{рег}} \cdot \frac{(sT_{\text{рег}} + 1)}{sT_{\text{рег}}} = K_{\text{рег}} \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_{\text{рег}}} \right) = K_{\text{рег}} + \frac{K_{\text{рег}}}{sT_{\text{рег}}} \end{aligned}$$

$$\text{Где } K_{\text{рег}} = \frac{T_e \cdot R_e}{2T_{inv} \cdot K_{inv}} = \frac{0,0006 \cdot 0,357267}{2 \cdot 0,00026 \cdot 18} = 0,0229$$

$T_{\text{рег}} = T_e = 0.0006$ сек – постоянная времени интегрирования.

$$K_i = \frac{dt}{T_{\text{рег}}} = \frac{0.000133}{0.0006} = 0,22167$$

$$dt = \frac{1}{f_{\text{pwm}}} = \frac{1}{7500} = 0,000133 (\text{сек}) \text{ – период дискретизации системы}$$

управления по времени.

Для проверки полученных значений регуляторов соберем имитационную модель контура тока в Matlab Simulink и оценим качество переходного процесса:

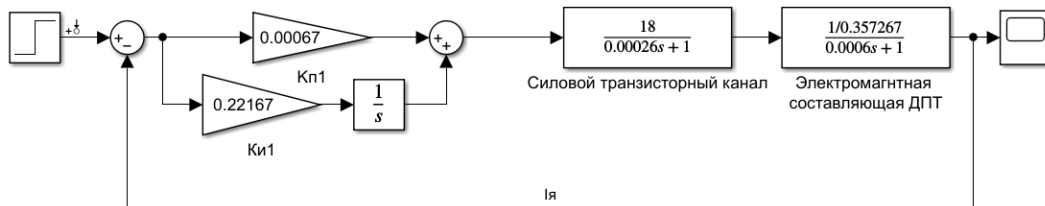


Рисунок 10 — Контур управления током в Matlab Simulink

Снимем показатели качества переходного процесса по току:

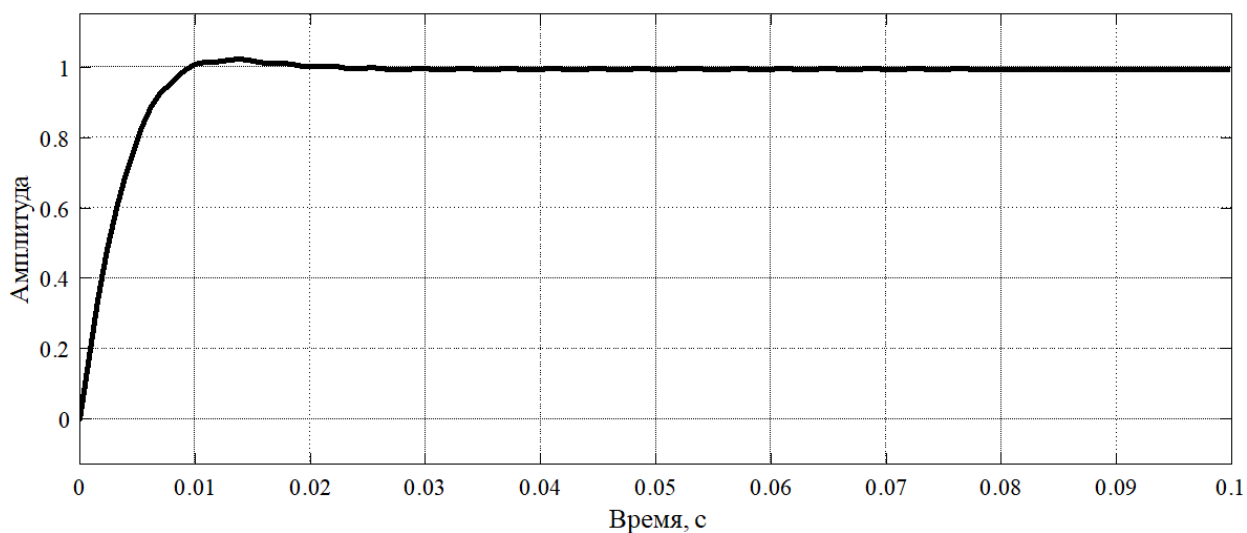


Рисунок 11 — Переходный процесс по току

Полученные показатели качества переходного процесса отображены на рисунке 12:

```
>> stepinfo(out.simout.data, out.simout.time)
```

```
ans =
```

```
struct with fields:
```

```

    RiseTime: 0.0059
  TransientTime: 0.0152
    SettlingTime: 0.0152
    SettlingMin: 0.9283
    SettlingMax: 1.0239
    Overshoot: 2.7733
    Undershoot: 0
        Peak: 1.0239
    PeakTime: 0.0138

```

Рисунок 12 — Показатели качества

Таким образом, перерегулирование $\sigma = 2,7733\%$, время переходного процесса $t = 0.0152$ сек.

Функциональная схема блока управления рулевой рейкой

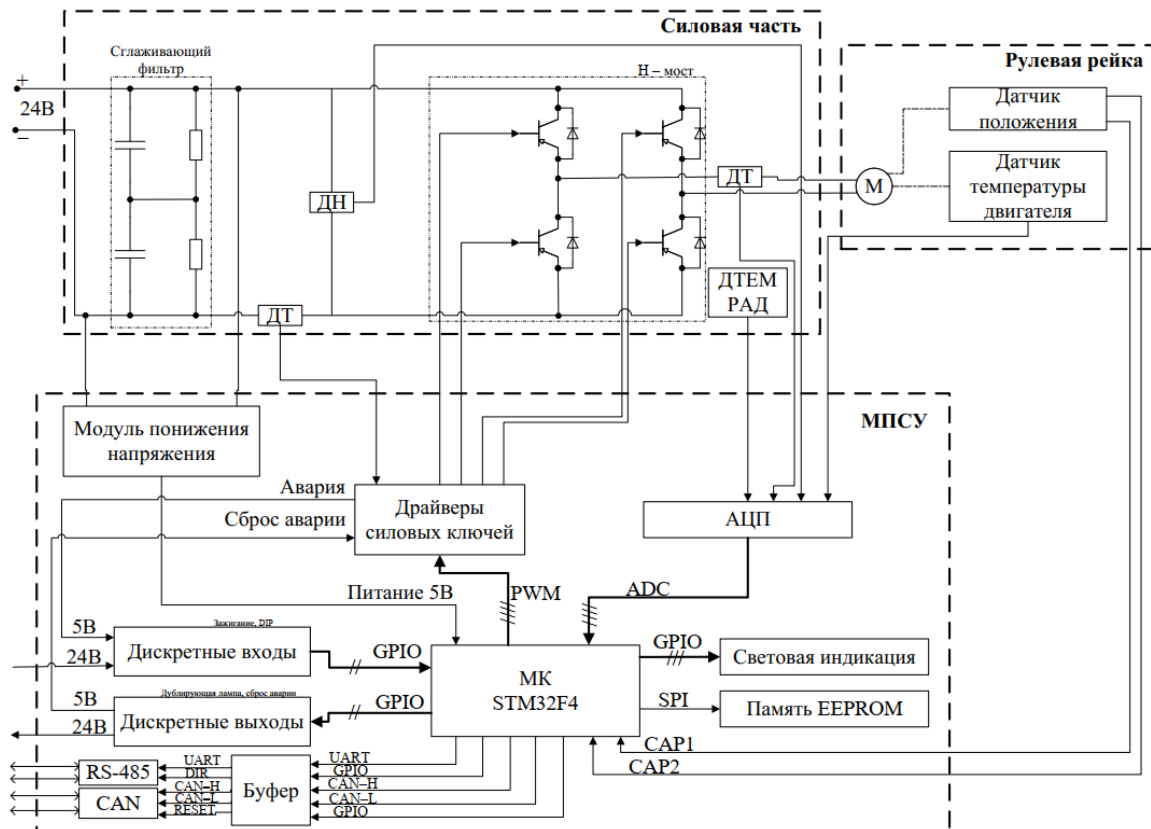


Рисунок 12 — Электрическая функциональная схема (Э2) разрабатываемого блока

Заключение

В ходе выполнения курсового проекта был проведен анализ актуальности беспилотных автомобилей, проведен обзор аналогов разрабатываемого блока управления рулевой рейкой.

Далее было составлено техническое задание, были рассчитаны характеристики электродвигателя рулевой рейки, а также был создан и оптимизирован на модульный оптимум контур управления током, удовлетворяющий требованиям технического задания.

Составлена функциональная схема разрабатываемого блока управления рулевой рейкой.

В дальнейшем планируется продолжение работы над проектом, создание контура управления скоростью, положением электродвигателя, используя характеристики, полученные в текущем проекте. Также предполагается программная реализация полученных контуров и проведение эксперимента на рулевой рейке.

Список литературы

1. Беспилотные автомобили. Состояние рынка, тренды и перспективы развития // iot.ru URL: <https://iot.ru/transportnaya-telematika/bespilotnye-avtomobili-sostoyanie-rynka-trendy-i-perspektivy-razvitiya> (дата обращения: 28.03.2024).

2. Человеческий фактор как главный виновник дорожных аварий. Как он появился и насколько актуален сегодня // techinsider.ru URL: <https://www.techinsider.ru/vehicles/768513-chelovecheskiy-faktor-kak-glavnyy-vinovnik-dorozhnyh-avariy-kak-on-poyavilsya-i-naskolko-aktualen-segodnya/> (дата обращения: 28.03.2024).

3. Распоряжение Правительства РФ от 28.12.2022 N 4261-р <Об утверждении Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации до 2035 года>.