

**КАЗАНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Учебно-методическое пособие

**Казань
2025**

УДК 629.331:629.062(075)

ББК 39.333.2-048.2я73

М74

Моделирование электрооборудования электромобилей : учебно-
М74 методическое пособие / составитель В. М. Бутаков. – Казань : КГЭУ,
2025. – 54 с.

Содержит методические указания по выполнению курсового проекта по дисциплине «Моделирование электрооборудования электромобилей», которые определяют общие требования, предъявляемые к курсовому проекту, последовательность его подготовки и выполнения, а также требования к структуре, содержанию и оформлению пояснительной записки. Изложены методики выбора и расчета электродвигателя, синтеза системы подчиненного регулирования координат с разработкой регуляторов тока и скорости. Описаны способы исследования динамической модели скоростного следящего электропривода на персональном компьютере в системе MATLAB Simulink.

Предназначено для обучающихся по образовательной программе направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, направленность (профиль) «Электромобильный и беспилотный транспорт».

УДК 629.331:629.062(075)

ББК 39.333.2-048.2я73

*Рекомендовано к изданию учебно-методическим советом
Института электроэнергетики и электроники*

© Бутаков В. М., составление, 2025

© КГЭУ, 2025

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к условиям реализации образовательной программы «Электромобильный и беспилотный транспорт», обучающийся должен выполнить курсовой проект по дисциплине «Моделирование электрооборудования электромобилей».

Курсовой проект является одной из основных форм самостоятельной учебной деятельности студентов и представляет собой логически завершенное и оформленное научное исследование.

Настоящее учебно-методическое пособие, основу которого составляют типовые расчеты и примеры моделирования скоростного следящего электропривода, разработано с целью оказания помощи студентам, приступающим к выполнению курсового проекта, в отношении выбора методов расчета и моделирования, порядка их проведения, объема и содержания пояснительной записки.

Исследование структурных схем динамических моделей электродвигателя, контуров тока и скорости проведено на основе анализа соответствующих переходных и логарифмических частотных характеристик, построенных в системе MATLAB Simulink.

Условием качественного выполнения и защиты курсового проекта является самостоятельное углубленное изучение темы с использованием литературы [1–5].

Преподаватель выступает в качестве научного руководителя и обеспечивает систематические консультации, в ходе которых студенты получают рекомендации по использованию литературы и ответы на вопросы, возникающие в ходе выполнения курсового проекта.

В результате выполнения курсового проекта у обучающихся должна сформироваться способность устанавливать взаимосвязи задач эксплуатации и проектирования электромобильного и беспилотного транспорта, применять современные программные средства и цифровые информационные технологии при проектировании электромобильного и беспилотного транспорта.

1. ЗАДАНИЕ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

1. Разработайте скоростной следящий двухконтурный электропривод с расчетом регуляторов тока и скорости и исследуйте его динамическую модель в системе MATLAB Simulink:

1) изучите и опишите функциональную схему скоростного следящего двухконтурного электропривода;

2) рассчитайте требуемую мощность, выберите соответствующий электродвигатель и определите параметры его динамической модели;

3) постройте графики переходных характеристик электродвигателя по задающему и возмущающему воздействиям;

4) синтезируйте регулятор для настройки контура тока на оптимум по модулю;

5) постройте график переходной характеристики контура тока по задающему воздействию и графики логарифмических частотных характеристик;

6) синтезируйте регулятор для настройки контура скорости на симметричный оптимум;

7) постройте графики переходных характеристик контура скорости по задающему и возмущающему воздействиям и графики логарифмических частотных характеристик;

8) проведите анализ полученных графиков.

2. Оформите расчетно-пояснительную записку.

Исходные данные для выполнения курсового проекта приведены в табл. 1.1, где J_H – момент инерции нагрузки, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; M_H – статический момент сопротивления нагрузки, $\text{Н} \cdot \text{м}$; Ω_H – угловая скорость поворота нагрузки, $\text{град}/\text{с}$; ε_H – угловое ускорение поворота нагрузки, $\text{град}/\text{с}^2$; $K_{БП}$ – коэффициент передачи блока питания; m – число пульсаций выпрямленного напряжения за период; T_{Φ} – постоянная времени фильтра, с; $U_{\text{ВХ}}^{\text{КТ}}$ – входное напряжение суммирующего усилителя контура тока, В; $T_{\text{ДТ}}$ – постоянная времени датчика тока, с; $U_{\text{ВХ}}^{\text{КС}}$ – входное напряжение суммирующего усилителя контура скорости, В; $T_{\text{ТГ}}$ – постоянная времени тахогенератора, с; η – КПД редуктора; $f_{\Pi} = 400$ Гц – частота питающего напряжения преобразователя.

2. ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект состоит из двух разделов – графического и текстового (расчетно-пояснительная записка), каждый из которых оформляется в соответствии с определенными требованиями.

Таблица 1.1

Исходные данные

Номер варианта	$J_H,$ кг·м ²	$M_H,$ Н·м	$\Omega_H,$ град/с	$\varepsilon_H,$ град/с ²	$K_{БП}$	$T_{Ф},$ с	m	$U_{ВХ}^{КТ},$ В	$T_{ДТ},$ с	$U_{ВХ}^{КС},$ В	$T_{ТГ},$ с	η
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	142	250	10	6	10	0,001	2	15	0,002	3	0,008	0,80
2	345	155	18	3	12	0,002	3	14	0,004	4	0,007	0,85
3	48	60	70	25	14	0,003	6	13	0,006	5	0,008	0,90
4	251	65	60	24	16	0,004	9	12	0,008	6	0,005	0,90
5	254	90	97	25	18	0,005	12	11	0,007	7	0,006	0,90
6	57	75	100	37	20	0,006	9	10	0,005	8	0,007	0,92
7	160	80	62	25	22	0,001	6	9	0,003	10	0,008	0,82
8	263	85	84	30	24	0,002	3	8	0,003	9	0,01	0,88
9	366	80	16	14	26	0,003	2	7	0,004	11	0,008	0,90
10	269	95	48	11	28	0,004	3	6	0,006	12	0,007	0,85
11	172	100	80	42	10	0,005	6	5	0,008	13	0,006	0,90
12	375	105	23	5	12	0,006	9	4	0,007	14	0,005	0,92
13	78	10	100	80	14	0,001	12	3	0,005	15	0,006	0,88
14	81	15	72	20	16	0,002	9	15	0,003	5	0,007	0,85
15	184	120	33	15	18	0,003	6	14	0,002	6	0,008	0,90
16	187	125	86	15	20	0,003	3	13	0,004	7	0,01	0,92
17	100	130	38	9	22	0,005	2	12	0,006	8	0,008	0,80
18	205	135	41	8	24	0,006	3	11	0,008	9	0,007	0,85
19	110	140	52	11	26	0,001	6	10	0,007	4	0,006	0,82

Продолжение табл. 1.1

9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
20	115	145	54	18	28	0,002	9	9	0,005	5	0,008	0,90
21	120	150	56	16	10	0,001	12	8	0,003	10	0,006	0,80
22	126	160	60	12	12	0,004	9	7	0,002	11	0,007	0,87
23	132	170	58	17	14	0,005	6	6	0,004	12	0,008	0,80
24	138	180	53	6	16	0,003	3	5	0,006	13	0,01	0,85
25	144	190	50	23	18	0,001	2	4	0,005	15	0,008	0,90
26	151	200	47	22	20	0,002	3	3	0,004	10	0,007	0,95
27	155	190	44	21	22	0,003	2	4	0,005	9	0,006	0,90
28	159	185	40	20	24	0,004	3	5	0,003	8	0,005	0,92
29	163	180	42	8	26	0,005	6	6	0,002	7	0,007	0,82
30	160	170	38	10	28	0,006	9	7	0,004	6	0,008	0,88
31	157	165	36	23	10	0,001	12	8	0,006	5	0,01	0,90
32	154	160	34	22	12	0,002	9	9	0,004	4	0,008	0,80
33	150	155	30	21	14	0,003	6	10	0,005	3	0,007	0,85
34	148	150	27	20	16	0,004	3	11	0,003	15	0,006	0,90
35	145	140	24	12	18	0,002	2	12	0,005	14	0,007	0,90
36	139	130	21	17	20	0,006	3	13	0,002	12	0,008	0,82
37	133	120	17	10	22	0,005	6	14	0,004	11	0,01	0,85
38	152	260	13	7	10	0,001	2	15	0,002	10	0,008	0,80
39	355	165	21	4	12	0,002	3	14	0,004	9	0,007	0,85
40	58	70	73	26	14	0,003	6	13	0,006	8	0,008	0,90
41	261	75	63	25	16	0,004	9	12	0,008	7	0,005	0,90

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
42	264	100	100	26	18	0,005	12	11	0,007	6	0,006	0,90
43	67	85	103	38	20	0,006	9	10	0,005	5	0,007	0,92
44	170	90	65	26	22	0,001	6	9	0,003	4	0,008	0,82
45	273	95	87	31	24	0,002	3	8	0,003	3	0,01	0,88
46	376	90	19	15	26	0,003	2	7	0,004	15	0,008	0,90
47	279	105	51	12	28	0,004	3	6	0,006	14	0,007	0,85
48	182	100	83	43	10	0,005	6	5	0,008	13	0,006	0,90
49	385	115	26	6	12	0,006	9	4	0,007	12	0,005	0,92
50	88	20	103	81	14	0,001	12	3	0,005	11	0,006	0,88
51	91	25	75	21	16	0,002	9	4	0,003	10	0,007	0,85
52	194	130	36	16	18	0,003	6	5	0,002	9	0,008	0,90
53	197	135	89	16	20	0,003	3	6	0,004	8	0,01	0,92
54	110	140	41	10	22	0,005	2	7	0,006	5	0,008	0,80
55	215	145	44	9	24	0,006	3	8	0,008	6	0,007	0,85
56	120	150	55	12	26	0,001	6	9	0,007	7	0,006	0,82
57	125	155	57	19	28	0,002	9	10	0,005	4	0,008	0,90
58	130	160	59	17	10	0,001	12	11	0,003	3	0,006	0,80
59	136	170	63	13	12	0,004	9	12	0,002	10	0,007	0,87
60	142	180	61	18	14	0,005	6	13	0,004	9	0,008	0,80
61	148	190	56	7	16	0,003	3	14	0,006	8	0,01	0,85
62	154	200	53	24	18	0,001	2	15	0,005	7	0,008	0,90
63	161	210	50	23	20	0,002	3	3	0,004	13	0,007	0,95

Продолжение табл. 1.1

8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
64	165	200	47	22	22	0,003	2	4	0,005	11	0,006	0,90
65	169	195	43	21	24	0,004	3	5	0,003	10	0,005	0,92
66	173	190	45	9	26	0,005	6	6	0,002	8	0,007	0,82
67	170	180	41	11	28	0,006	9	7	0,004	6	0,008	0,88
68	167	175	39	24	10	0,001	12	8	0,006	4	0,01	0,90
69	164	170	37	23	12	0,002	9	9	0,004	15	0,008	0,80
70	160	165	33	22	14	0,003	6	10	0,005	14	0,007	0,85
71	158	160	30	21	16	0,004	3	11	0,003	12	0,006	0,90
72	155	150	27	13	18	0,002	2	12	0,005	9	0,005	0,90
73	149	140	24	18	20	0,006	3	13	0,002	7	0,006	0,82
74	143	130	20	11	22	0,005	6	14	0,004	5	0,007	0,85
75	157	265	16	8	10	0,001	2	15	0,002	3	0,008	0,80
76	360	170	24	5	12	0,002	3	13	0,004	15	0,01	0,85
77	63	75	76	27	14	0,003	6	12	0,006	13	0,008	0,90
78	266	80	9-66	26	16	0,004	9	10	0,008	8	0,007	0,90
79	269	105	103	27	18	0,005	12	8	0,007	5	0,006	0,90
80	75	90	106	39	20	0,006	9	6	0,005	3	0,008	0,92
81	175	95	68	27	22	0,001	6	11	0,003	4	0,006	0,82
82	278	100	90	32	24	0,002	3	9	0,003	6	0,007	0,88
83	381	95	22	16	26	0,003	2	7	0,004	8	0,008	0,90
84	284	110	54	13	28	0,004	3	5	0,006	10	0,01	0,85
85	187	105	86	44	10	0,005	6	3	0,008	12	0,008	0,90

Продолжение табл. 1.1

6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
86	39	120	29	7	12	0,006	9	4	0,007	13	0,007	0,92
87	93	25	106	82	14	0,001	12	6	0,005	15	0,006	0,88
88	96	30	78	22	16	0,002	9	7	0,003	14	0,005	0,85
89	199	135	39	17	18	0,003	6	8	0,002	15	0,007	0,90
90	202	140	92	17	20	0,003	3	9	0,004	8	0,008	0,92
91	115	145	44	11	22	0,005	2	10	0,006	9	0,01	0,80
92	220	150	47	10	24	0,006	3	11	0,008	10	0,008	0,85
93	125	155	58	13	26	0,001	6	12	0,007	11	0,006	0,82
94	130	160	60	20	28	0,002	9	13	0,005	12	0,008	0,90
95	135	165	62	18	10	0,001	12	14	0,003	13	0,006	0,80
96	141	175	66	14	12	0,004	9	15	0,002	14	0,007	0,87
97	147	185	64	19	14	0,005	6	14	0,004	15	0,008	0,80
98	153	195	59	8	16	0,003	3	13	0,006	3	0,01	0,85
99	159	205	56	25	18	0,001	2	12	0,005	4	0,008	0,90
100	166	215	53	24	20	0,002	3	11	0,004	5	0,007	0,95
101	170	205	50	23	22	0,003	2	10	0,005	6	0,006	0,90
102	174	200	46	22	24	0,004	3	9	0,003	7	0,005	0,92
103	178	195	48	10	26	0,005	6	8	0,002	9	0,007	0,82
104	175	185	44	12	28	0,006	9	7	0,004	8	0,008	0,88
105	172	180	42	25	10	0,001	12	6	0,006	10	0,01	0,90
106	169	175	40	24	12	0,002	9	5	0,004	11	0,008	0,80
107	165	170	36	23	14	0,003	6	4	0,005	12	0,007	0,85

Продолжение табл. 1.1

10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
108	163	165	33	22	16	0,004	3	3	0,003	13	0,006	0,90
109	160	155	30	14	18	0,002	2	15	0,005	3	0,007	0,90
110	154	145	27	19	20	0,006	3	13	0,002	4	0,008	0,82
111	148	135	23	12	22	0,005	6	12	0,004	5	0,01	0,85
112	177	285	25	11	10	0,001	2	9	0,002	6	0,008	0,80
113	380	190	33	8	12	0,002	3	7	0,004	7	0,007	0,85
114	83	95	85	30	14	0,003	6	5	0,006	8	0,008	0,90
115	286	100	75	29	16	0,004	9	3	0,008	9	0,005	0,90
116	289	125	112	30	18	0,005	12	14	0,007	10	0,006	0,90
117	95	110	115	42	20	0,006	9	12	0,005	11	0,007	0,92
118	195	115	77	30	22	0,001	6	10	0,003	12	0,008	0,82
119	298	120	99	35	24	0,002	3	8	0,003	13	0,01	0,88
120	401	115	31	19	26	0,003	2	6	0,004	14	0,008	0,90
121	304	130	63	16	28	0,004	3	4	0,006	15	0,007	0,85
122	207	125	95	47	10	0,005	6	3	0,008	14	0,006	0,90
123	410	140	38	10	12	0,006	9	4	0,007	13	0,005	0,92
124	113	45	115	85	14	0,001	12	5	0,005	12	0,006	0,88
125	116	50	87	25	16	0,002	9	6	0,003	11	0,007	0,85
126	219	155	48	20	18	0,003	6	7	0,002	10	0,008	0,90
127	222	160	111	20	20	0,003	3	8	0,004	9	0,01	0,92
128	135	165	53	14	22	0,005	2	9	0,006	8	0,008	0,80

Продолжение табл. 1.1

11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
129	240	170	56	13	24	0,006	3	10	0,008	7	0,007	0,85
130	145	175	67	16	26	0,001	6	11	0,007	6	0,006	0,82
131	150	180	69	23	28	0,002	9	12	0,005	5	0,008	0,90
132	155	185	71	21	10	0,001	12	13	0,003	4	0,006	0,80
133	161	195	75	17	12	0,004	9	14	0,002	3	0,007	0,87
134	167	205	73	22	14	0,005	6	15	0,004	6	0,008	0,80
135	173	215	68	11	16	0,003	3	3	0,006	10	0,01	0,85
136	179	225	65	28	18	0,001	2	5	0,005	11	0,008	0,90
137	186	235	62	27	20	0,002	3	7	0,004	13	0,007	0,95
138	190	225	59	26	22	0,003	2	9	0,005	15	0,008	0,90
139	194	220	55	25	24	0,004	3	11	0,003	14	0,005	0,92
140	198	215	57	13	26	0,005	6	13	0,002	15	0,007	0,82
141	195	205	53	15	28	0,006	9	15	0,004	3	0,008	0,88
142	192	200	51	28	10	0,001	12	14	0,006	5	0,01	0,90
143	189	195	49	27	12	0,002	9	13	0,004	6	0,008	0,80
144	185	190	45	26	14	0,003	6	12	0,005	7	0,007	0,85
145	183	185	42	25	16	0,004	3	11	0,003	8	0,006	0,90
146	180	175	39	17	18	0,002	2	10	0,005	9	0,007	0,90
147	174	165	36	22	20	0,006	3	9	0,002	10	0,008	0,82
148	168	155	32	15	22	0,005	6	8	0,004	11	0,01	0,85
149	202	310	37	15	10	0,001	2	7	0,002	12	0,008	0,80
150	405	215	45	12	12	0,002	3	6	0,004	13	0,007	0,85

Продолжение табл. 1.1

12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
151	108	120	97	34	14	0,003	6	5	0,006	14	0,008	0,90
152	311	125	87	33	16	0,004	9	4	0,008	15	0,005	0,90
153	314	150	124	34	18	0,005	12	3	0,007	10	0,006	0,90
154	125	135	127	46	20	0,006	9	15	0,005	4	0,007	0,92
155	220	140	89	34	22	0,001	6	13	0,003	6	0,008	0,82
156	323	145	111	33	24	0,002	3	11	0,003	8	0,01	0,88
157	426	140	43	23	26	0,003	2	9	0,004	10	0,008	0,90
158	329	125	75	20	28	0,004	3	7	0,006	12	0,007	0,85
159	232	150	107	51	10	0,005	6	5	0,008	14	0,006	0,90
160	435	165	50	14	12	0,006	9	3	0,007	5	0,005	0,92
161	138	70	127	89	14	0,001	12	14	0,005	7	0,006	0,88
162	141	75	99	29	16	0,002	9	12	0,003	9	0,007	0,85
163	244	180	60	24	18	0,003	6	10	0,002	11	0,008	0,90
164	247	185	125	24	20	0,003	3	8	0,004	13	0,01	0,92
165	160	190	65	18	22	0,005	2	6	0,006	15	0,008	0,80
166	265	195	68	17	24	0,006	3	4	0,008	3	0,007	0,85
167	170	200	79	20	26	0,001	6	15	0,007	4	0,006	0,82
168	175	205	81	27	28	0,002	9	14	0,005	5	0,008	0,90
169	180	210	83	25	10	0,001	12	13	0,003	6	0,006	0,80
170	180	220	87	21	12	0,004	9	12	0,002	7	0,007	0,87
171	192	230	85	26	14	0,005	6	11	0,004	8	0,008	0,80
172	198	240	80	15	16	0,003	3	10	0,006	9	0,01	0,85

Продолжение табл. 1.1

13

173	204	250	77	32	18	0,001	2	9	0,005	10	0,008	0,90
174	211	260	74	31	20	0,002	3	8	0,004	11	0,007	0,95
175	215	250	71	30	22	0,003	2	7	0,005	12	0,006	0,90
176	219	245	67	29	24	0,004	3	6	0,003	13	0,005	0,92
177	223	240	69	17	26	0,005	6	5	0,002	14	0,007	0,82
178	220	230	65	19	28	0,006	9	4	0,004	15	0,008	0,88
179	217	225	63	32	10	0,001	12	3	0,006	9	0,01	0,90
180	214	220	61	31	12	0,002	9	5	0,004	13	0,008	0,80
181	210	215	57	30	14	0,003	6	7	0,005	15	0,007	0,85
182	208	210	54	29	16	0,004	3	8	0,003	12	0,006	0,90
183	205	200	51	21	18	0,002	2	10	0,005	8	0,007	0,90
184	199	190	48	26	20	0,006	3	11	0,002	9	0,008	0,82
185	193	180	44	19	22	0,005	6	13	0,004	11	0,01	0,85
186	232	340	52	20	10	0,001	2	12	0,002	10	0,008	0,80
187	435	245	60	17	12	0,002	3	15	0,004	13	0,007	0,85
188	133	150	112	39	14	0,003	6	14	0,006	8	0,008	0,90
189	336	155	102	38	16	0,004	9	10	0,008	7	0,005	0,90
190	339	180	139	39	18	0,005	12	8	0,007	3	0,006	0,90
191	150	165	142	51	20	0,006	9	5	0,005	4	0,007	0,92
192	245	170	104	39	22	0,001	6	3	0,003	5	0,008	0,82
193	348	175	126	44	24	0,002	3	8	0,003	7	0,01	0,88
194	451	170	58	28	26	0,003	2	7	0,004	5	0,008	0,90
195	354	185	90	25	28	0,004	3	5	0,006	8	0,007	0,85

Окончание табл. 1.1

14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
196	257	180	122	56	10	0,005	6	3	0,008	7	0,006	0,90
197	460	195	65	19	12	0,006	9	7	0,007	12	0,005	0,92
198	163	100	142	94	14	0,001	12	12	0,005	15	0,006	0,88
199	176	105	114	34	16	0,002	9	14	0,003	3	0,007	0,85
200	269	210	75	29	18	0,003	6	4	0,002	10	0,008	0,90
201	272	215	140	29	20	0,003	3	8	0,004	11	0,01	0,92
202	185	220	180	23	22	0,005	2	10	0,006	3	0,008	0,80
203	290	225	183	22	24	0,006	3	11	0,008	10	0,007	0,85
204	195	230	94	25	26	0,001	6	15	0,007	8	0,006	0,82
205	200	235	96	32	28	0,002	9	7	0,005	4	0,008	0,90
206	205	240	98	30	10	0,001	12	8	0,003	5	0,006	0,80
207	205	250	102	26	12	0,004	9	4	0,002	12	0,008	0,87
208	217	260	100	31	14	0,005	6	13	0,004	10	0,008	0,80
209	223	270	95	20	16	0,003	3	14	0,006	8	0,01	0,85
210	229	280	92	37	18	0,001	2	3	0,005	14	0,008	0,90
211	236	290	89	36	20	0,002	3	4	0,004	15	0,007	0,95
212	240	280	86	35	22	0,003	2	5	0,005	12	0,006	0,90
213	224	275	82	34	24	0,004	3	7	0,003	13	0,005	0,92
214	248	270	84	22	26	0,005	6	8	0,002	10	0,007	0,82
215	245	260	80	24	28	0,006	9	9	0,004	11	0,008	0,88

2.1. Структура расчетно-пояснительной записки

В расчетно-пояснительной записке материал располагается следующим образом:

1. *Титульный лист* является первой страницей и оформляется в соответствии с Положением о курсовой работе и курсовом проекте, размещенном на сайте КГЭУ.

2. *Бланк задания* на курсовой проект – основной документ, используемый при выполнении курсового проекта (прил. А). Оформляется на отдельном листе формата А4. Бланк содержит задания и исходные данные, необходимые для их выполнения.

3. *Содержание*. В содержании приводятся названия разделов и подразделов в полном объеме, как они даны в тексте, и указываются номера страниц, на которых они начинаются.

4. *Введение*. В этом разделе описывается принцип построения и работы функциональной схемы разрабатываемого скоростного следящего двухконтурного электропривода.

5. *Основная часть* включает расчет требуемой мощности, выбор соответствующего электродвигателя и определение параметров его динамической модели; синтез регулятора для настройки контура тока на оптимум по модулю; синтез регулятор для настройки контура скорости на симметричный оптимум; анализ результатов моделирования двигателя, контуров тока и скорости.

6. *Библиографический список* содержит библиографические описания использованных источников. В него рекомендуется включать издания, достаточно широко освещающие рассматриваемую проблему.

7. *Приложения*.

2.2. Оформление расчетно-пояснительной записки

Объем расчетно-пояснительной записки составляет 30–40 страниц текста на листах формата А4 (210×297 мм).

Требования к оформлению пояснительной записки аналогичны требованиям к оформлению текстовых документов. В связи с этим при оформлении пояснительной записки следует придерживаться следующих государственных стандартов:

1. ГОСТ 2.105 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам.

2. ГОСТ 7.32 СИБИД. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

3. ГОСТ 7.0.5 СИБИД. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления.

Пояснительная записка выполняется на компьютере. Поля на странице задаются следующие: слева – 30 мм, справа – 10 мм, сверху и снизу – 20 мм.

Текст должен состоять из разделов и подразделов. Разделы должны иметь порядковые номера. Номер подраздела состоит из номеров раздела и своего собственного, разделенных точкой. Разделы и подразделы должны иметь заголовки. Заголовки должны быть краткими и отражать содержание раздела или подраздела, соответственно. Их записывают с прописной буквы, без точки в конце, не подчёркивая. Переносы слов в заголовках не допускаются. Если заголовок состоит из двух предложений, то их разделяют точкой.

В тексте необходимо указать источники и материалы, которые использовались при её написании. Для этого в отсылке, которую приводят в квадратных скобках в строку с текстом документа, указывают порядковый номер источника и страницы. Сведения разделяют запятой.

В записке используется сквозная нумерация страниц и приложений, входящих в её состав. Страницы нумеруются, начиная с титульного листа.

В тексте пояснительной записки не допускается:

- применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных на русском языке;
- сокращать обозначения единиц физических величин, если они употребляются без цифр, за исключением их использования в головках и боковиках таблиц и в расшифровках буквенных обозначений, входящих в формулы и рисунки;
- сокращение слов, кроме установленных правилами русской орфографии, пунктуации, а также соответствующих государственным стандартам;
- использовать математический знак минус «–» перед отрицательными значениями величин (необходимо писать слово «минус»);
- употреблять математические знаки без цифр, например: $\leq$ (меньше или равно), $\geq$ (больше или равно), $\neq$ (не равно), а также знаки № (номер), % (процент);
- применять индексы стандартов (ГОСТ, ОСТ, СТП) без регистрационного номера;
- использовать обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- употреблять произвольные словообразования.

Термины и определения понятий, используемые в записке должны быть едиными и соответствовать стандартам, а при их отсутствии общепринятым в научно-технической литературе.

Формулы, уравнения. Расчетные уравнения и формулы приводятся сначала в общем виде, затем в них подставляют численные значения величин и записывают результат расчета с указанием размерности. Все расчеты должны быть выполнены в международной системе единиц СИ.

Оформление иллюстраций. Все иллюстрации (графики, схемы) именуются рисунками. Они должны быть связаны с текстом и содержать подрисуночную подпись. Рисунок располагают в работе после первого упоминания его в тексте или на следующей странице. Все рисунки имеют сквозную нумерацию в пределах раздела. Каждая подрисуночная подпись содержит номер рисунка. Точку после подписи не ставят, а слово «Рисунок» пишется сокращенно – «Рис. 1».

Оформление таблиц. Размещение и нумерация таблиц в тексте производится аналогично рисункам. Номер помещается справа над таблицей и сопровождается полным словом «Таблица». У всех таблиц должны быть заголовки. Таблицу необходимо располагать в записке непосредственно после текста, в котором она упоминается.

2.3. Графическая часть

Графическая часть курсового проекта выполняется на одном листе формата А3 и содержит структурную схему динамической модели контура скорости, соответствующую ей Simulink-модель и графики переходных характеристик контура скорости по задающему и возмущающему воздействиям и логарифмических частотных характеристик.

3. РАЗРАБОТКА СКОРОСТНОГО СЛЕДЯЩЕГО ДВУХКОНТУРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

3.1. Разработка функциональной схемы скоростного следящего электропривода

Функциональная схема скоростного следящего электропривода (ЭП) разрабатывается на основе анализа его структурной схемы, который проводится с целью выявления особенностей построения информационного и силового каналов, установления технических возможностей ЭП при работе на различных режимах и в зависимости от степени автоматизации процессов управления.

По результатам анализа формулируются недостатки соответствующих технических решений и намечаются пути модернизации ЭП с учетом исходных данных.

Структурная схема скоростного следящего электропривода представлена на рис. 3.1.

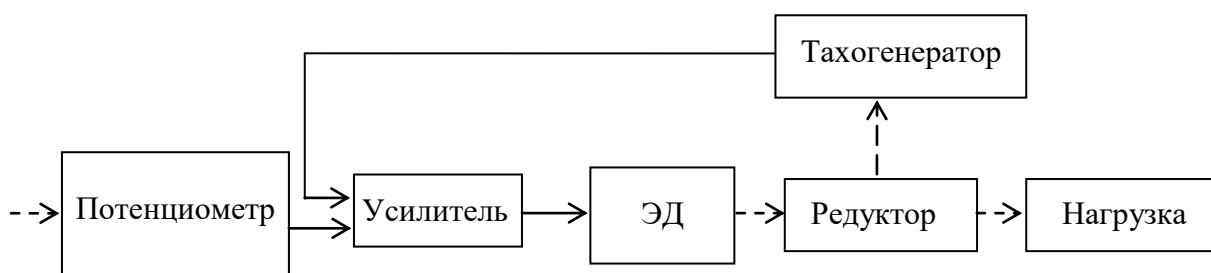


Рис. 3.1. Структурная схема скоростного следящего электропривода:

ЭД – электродвигатель

Потенциометр является элементом задающего устройства и располагается в пульте оператора. Подвижные контакты потенциометра механически связаны с рукояткой управления. При отклонении рукоятки управляющие сигналы с выхода потенциометра подаются на вход усилителя, нагрузкой которого является обмотка якоря ЭД постоянного тока с независимым возбуждением.

ЭД через редуктор поворачивает механизм с угловой скоростью, пропорциональной задающему воздействию. Направление поворота зависит от направления отклонения рукоятки управления, а угловая скорость поворота – от угла ее отклонения.

Тахогенератор образует жесткую обратную отрицательную связь (ООС) по угловой скорости и обеспечивает формирование на входе усилителя сигнала рассогласования, пропорционального отклонению угловой скорости поворота нагрузки от требуемых значений.

В современной теории и практике широкое применение получили замкнутые ЭП, построенные по принципу подчиненного регулирования координат [1, 4, 5]. Такие системы являются многоконтурными. Каждый контур такой системы подвергается коррекции (настройке) по отдельности. Процедура настройки сводится к выбору структуры и расчету параметров регуляторов, включенных последовательно по отношению к элементам неизменяемой части каждого контура. Достоинством системы подчиненного регулирования является простота коррекции, возможность легко ограничивать предельные значения пусковых токов при резких изменениях нагрузки или значительные рассогласования в следящих ЭП.

На рис. 3.2 изображена электрокинематическая функциональная схема скоростного следящего ЭП, содержащая два контура: контур тока (КТ) и контур скорости (КС). КТ состоит из сумматора $A\Sigma_2$, регулятора тока (РТ) F_2 , блока питания (БП) AW , обмотки якоря (ОЯ) ЭД M и датчика тока (ДТ) UA .

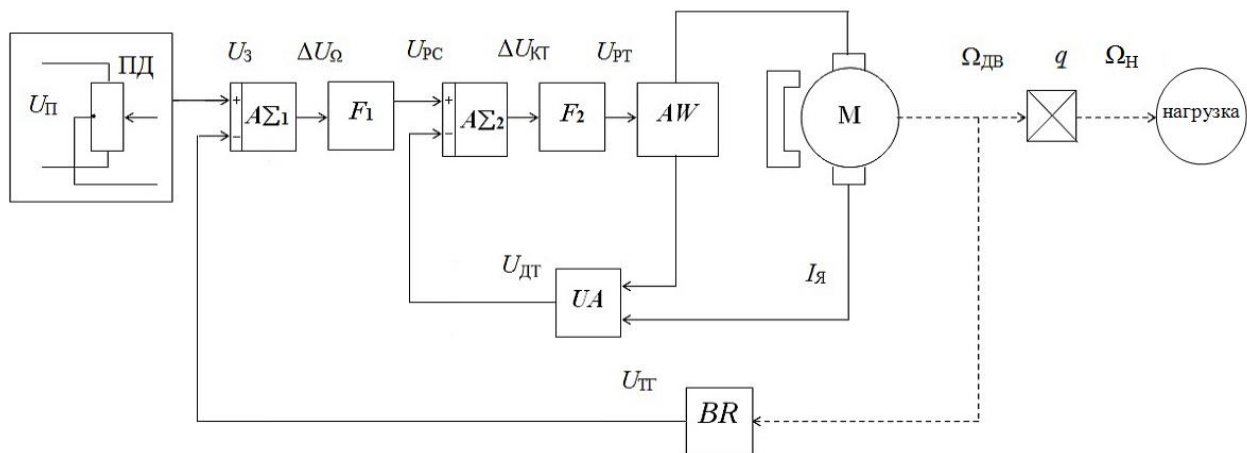


Рис. 3.2. Электрокинематическая функциональная схема скоростного следящего ЭП

Управляемой координатой КТ является ток якоря $I_я$. Задающим воздействием является сигнал $U_РС$, формируемый регулятором скорости (РС) F_1 .

РТ F_2 является последовательным корректирующим устройством и реализует пропорционально-интегральный алгоритм управления, т. е. является ПИ-регулятором. Структура и параметры РТ выбираются и рассчитываются таким образом, чтобы обеспечить настройку КТ на оптимум по модулю (ОМ) в соответствии с целевой установкой на курсовой проект.

ДТ образует ООС КТ. При отклонении $I_{\text{я}}$ от требуемого значения на выходе сумматора $A\Sigma_2$ формируется сигнал ошибки:

$$\Delta U_{\text{КТ}} = U_{\text{РС}} - U_{\text{ДТ}}.$$

КС является внешним по отношению к КТ и состоит из потенциометрического датчика (ПД), сумматора $A\Sigma_1$, РС F_1 , ЭД постоянного тока M и тахогенератора (ТГ) BR .

Управляемой координатой КС является угловая скорость $\Omega_{\text{н}}$ исполнительного вала ЭП.

Задающим воздействием КС является сигнал U_3 , формируемый на выходе ПД.

ТГ BR образует жёсткую ООС по угловой скорости вращения вала ЭД. При отклонении угловой скорости исполнительного вала ЭП от требуемого значения на выходе сумматора $A\Sigma_1$ формируется сигнал ошибки:

$$\Delta U_{\Omega} = U_3 - U_{\text{ТГ}},$$

где $U_{\text{ТГ}}$ – сигнал на выходе ТГ BR .

РС F_1 является последовательным корректирующим устройством и также выполняется в виде ПИ-регулятора. Структура и параметры РС выбираются и рассчитываются таким образом, чтобы обеспечить настройку КС на симметричный оптимум (СО).

3.2. Расчет требуемой мощности и выбор электродвигателя

В качестве электромеханического преобразователя силового канала следящего скоростного ЭП применен ЭД постоянного тока с управлением по цепи якоря. К его достоинствам следует отнести большой диапазон мощностей, линейность регулировочных и механических характеристик. В настоящее время отечественная промышленность выпускает ЭД постоянного тока стандартных серий МИ, ДИ и СП.

Выбор и расчет ЭД производим в следующем порядке.

1. На основании исходных данных определяем требуемую мощность электродвигателя:

$$P_{\text{тр}} = 2 \left(J_{\text{н}} \varepsilon_{\text{н}} + \frac{M_{\text{н}}}{\eta} \right) \Omega_{\text{н}}. \quad (3.1)$$

2. Выбор ЭД, номинальная мощность которого больше требуемой, и соответствующих ему технических характеристик осуществляем по табл. 3.1. Анализ данных таблицы показывает, что ЭД с равными

значениями номинальной мощности $P_{\text{НОМ}}$ имеют различные значения частоты вращения $n_{\text{НОМ}}$, напряжения питания $U_{\text{НОМ}}$, тока якоря $I_{\text{я}}$, сопротивления обмотки якоря $R_{\text{я}}$, номинального момента $M_{\text{НОМ}}$ и момента инерции $J_{\text{дв}}$. Поэтому выбор типа ЭД производим исходя из технической целесообразности применения различных инженерных решений и условий его дальнейшей эксплуатации. Так, например, для обеспечения конструктивных требований следует выбирать быстроходные ЭД с малым значением момента инерции $J_{\text{дв}}$, несмотря на увеличение передаточного числа редуктора. Вместе с тем, для выполнения требований по моменту нужно выбирать менее быстроходный ЭД (с большими габаритами и массой), имеющий большее значение номинального момента $M_{\text{НОМ}}$.

При выборе напряжения питания необходимо учитывать условия эксплуатации и требования по технике безопасности, предъявляемые к ЭП.

3. Производим расчет оптимального числа редуктора i_0 по формуле:

$$i_0 = \sqrt{\frac{J_{\text{н}}\varepsilon_{\text{н}}\eta + M_{\text{н}}}{J_{\text{дв}}\varepsilon_{\text{н}}\eta}}. \quad (3.2)$$

4. Выполняем проверку выбранного ЭД на соответствие требований по угловой скорости:

$$\Omega_{\text{НОМ}} > i_0\Omega_{\text{н}}, \quad (3.3)$$

где $\Omega_{\text{НОМ}} = \frac{\pi n_{\text{НОМ}}}{30}$, рад/с.

При невыполнении условия (3.3) необходимо рассчитать новое передаточное число редуктора i_1 по формуле:

$$i_1 = \frac{\Omega_{\text{НОМ}}}{\Omega_{\text{н}}} \quad (3.4)$$

и далее в расчётах использовать это значение.

5. Требуемый вращающий момент определяем по формуле:

$$M_{\text{тр}} = \left(J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{н}}}{i_0^2} \right) i_0 \varepsilon_{\text{н}} + \frac{M_{\text{н}}}{i_0 \eta}. \quad (3.5)$$

6. Проверяем выбранный ЭД на соответствие требований по моменту:

$$\frac{M_{\text{тр}}}{M_{\text{НОМ}}} \leq 2 \text{ и } \frac{M_{\text{н}}}{i_0 \eta} < M_{\text{НОМ}}. \quad (3.6)$$

При невыполнении условий (3.6) следует выбрать более мощный ЭД.

Таблица 3.1

Технические данные двигателей серии МИ

Тип двигателя	Мощность на валу $P_{\text{ном}}$, кВт	Частота вращения $n_{\text{ном}}$, мин ⁻¹	Напряжение питания $U_{\text{ном}}$, В	Ток якоря $I_{\text{я}}$, А	Сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$, Ом	Момент номинальный $M_{\text{ном}}$, Н·м	Момент инерции $J_{\text{дв}} \cdot 10^{-4}$, кг·м ²
1	2	3	4	5	6	7	8
МИ-11	0,12	3000	60	2,86	0,46	0,39	15,3
	0,10	2000		2,27	0,94	0,49	
	0,12	3000	110	1,53	1,48	0,39	
	0,10	2000		1,22	3,0	0,49	
МИ-12	0,20	3000	60	4,57	0,23	0,65	20,4
	0,12	2000		2,72	0,52	0,585	
	0,20	3000	110	2,46	0,765	0,65	
	0,12	2000		1,46	1,74	0,585	
МИ-21	0,25	3000	60	5,6	0,284	0,81	35,7
	0,20	2000		4,3	0,645	0,97	
	0,25	3000	110	3,05	0,945	0,81	
	0,20	2000		2,33	2,2	0,97	
МИ-22	0,37	3000	60	8,2	0,192	1,2	40,8
	0,25	2000		5,5	0,36	1,22	
	0,12	1000		2,6	1,44	1,17	
	0,37	3000	110	4,4	0,546	1,2	
	0,25	2000		2,9	1,29	1,22	
	0,12	1000		1,4	4,59	1,17	

Окончание табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8
МИ-31	0,45	3000	60	10,3	0,118	1,45	91,8
	0,37	2000		8,2	–	1,8	
	0,20	1000		4,4	–	1,95	
	0,45	3000	100	5,6	0,345	1,45	
	0,37	2000		4,4	0,757	1,8	
	0,20	1000		2,4	2,5	1,95	
МИ-32	0,76	2500	110	8,2	0,237	2,96	135
	0,45	1500		5,0	0,605	2,92	
	0,37	1000		4,2	1,46	3,6	
	0,76	2500	220	4,1	0,85	2,96	
	0,45	1500		2,5	2,38	2,92	
	0,37	1000		2,1	5,27	3,6	
МИ-41	1,60	2500	110	19,2	0,147	6,25	408
	1,10	1500		13,0	0,42	7,15	
	0,76	1000		9,0	1,5	7,4	
	1,60	2500	220	9,5	0,58	6,25	
	1,10	1500		6,4	1,7	7,15	
	0,76	1000		4,5	3,32	7,4	
МИ-42	3,2	2500	110	36,3	0,06	12,5	662
	1,6	1500		18,2	0,192	10,4	
	1,1	1000		12,6	0,435	10,7	
	3,2	2500		18,2	0,239	12,5	
МИ-51	5,0	2500	220	27,2	–	19,4	127
	3,2	1500		17,1	–	20,8	
	1,6	1000		8,7	–	15,6	
МИ-52	7,0	2500		37,0	0,065	27,2	153
	4,5	1500		24,0	0,162	29,2	
	2,5	1000		13,1	0,392	24,2	

3.3. Построение структурной схемы динамической модели электродвигателя

Для построения структурной схемы динамической модели электродвигателя (ССДМ ЭД) необходимо выполнить следующие действия:

1. Определить параметры модели:

– коэффициент противо-ЭДС K_e , (В·с)/рад:

$$K_e = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{\Omega_{\text{ном}}}; \quad (3.7)$$

– коэффициент момента K_M , (Н·м)/А:

$$K_M = \frac{M_{\text{ном}}}{I_{\text{я}}}; \quad (3.8)$$

– электромеханическую постоянную времени ЭД T_M , с:

$$T_M = \frac{\left(J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{н}}}{i_0^2} \right) R_{\text{я}}}{K_e K_M}. \quad (3.9)$$

– электромагнитную постоянную времени ЭД $T_{\text{э}}$, с:

$$T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}, \quad (3.10)$$

где $L_{\text{я}}$ – индуктивность обмотки якоря, при выборе значения которой необходимо соблюдать выполнение условия:

$$L_{\text{я}} < \frac{T_M R_{\text{я}}}{4}. \quad (3.11)$$

2. В рабочее окно Simulink перетащить все необходимые блоки:

– входные воздействия (номинальное напряжение ЭД $U_{\text{ном}}$ и статический момент сопротивления нагрузки $M_{\text{н}}$) реализуются блоками **Step** и **Step1**;

– передаточные функции электромагнитной и электромеханической частей ЭД задаются блоками **Transfer Fcn** и **Transfer Fcn1**;

– для реализации безынерционных звеньев используются блоки **Gain** и **Gain1**.

3. Выполнить соединение блоков. Готовая ССДМ ЭД будет выглядеть так, как показано на рис. 3.3.

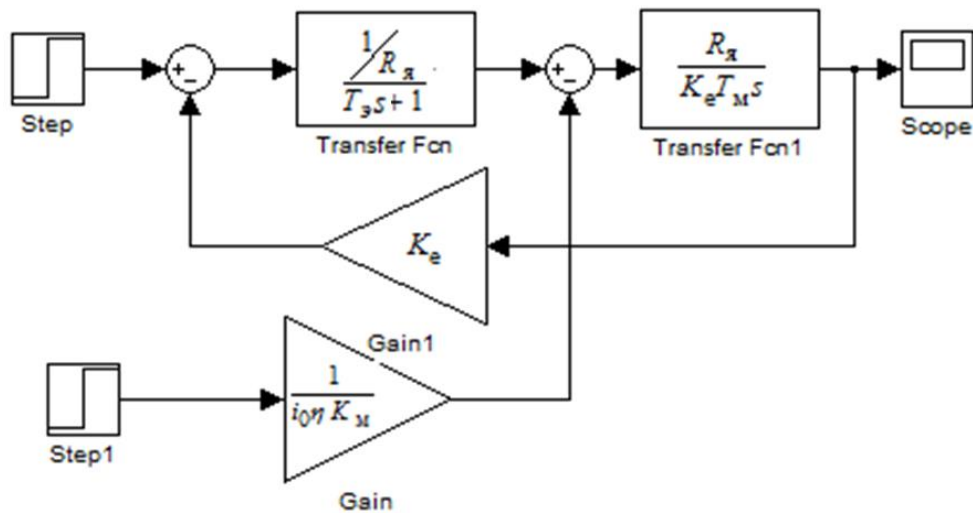


Рис. 3.3. ССДМ ЭД

4. Задать параметры блоков и приступить к моделированию.

Пример 3.1. Выберите ЭД (табл. 3.1) и рассчитайте его динамическую модель при следующих исходных данных: $\Omega_H = 50$ град/с, $\varepsilon_H = 10$ град/с², $J_H = 50$ кг·м², $M_H = 180$ Н·м. КПД редуктора ориентировочно примите $\eta = 0,9$.

Решение: 1. Для расчетов необходимо перевести угловую скорость поворота нагрузки Ω_H из град/с в рад/с и угловое ускорение поворота нагрузки ε_H – из град/с² в рад/с²:

$$\Omega_H \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right] = \frac{\Omega_H \left[\frac{\text{град}}{\text{с}} \right] 2\pi}{360} = \frac{50 \cdot 2 \cdot 3,14}{360} = 0,87;$$

$$\varepsilon_H \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \right] = \frac{\varepsilon_H \left[\frac{\text{град}}{\text{с}^2} \right] 2\pi}{360} = \frac{10 \cdot 2 \cdot 3,14}{360} = 0,174.$$

2. По формуле (3.1) рассчитаем требуемую мощность:

$$P_{\text{тр}} = 2 \left(J_H \varepsilon_H + \frac{M_H}{\eta} \right) \Omega_H = 2 \cdot \left(50 \cdot 0,174 + \frac{180}{0,9} \right) \cdot 0,87 = 366 \text{ Вт} = 0,366 \text{ кВт}.$$

3. По табл. 3.1 определяем тип ЭД, номинальная мощность на валу которого больше требуемой, т. е. $P_{\text{ном}} > P_{\text{тр}}$. Из таблицы видно, что значению номинальной $P_{\text{ном}} = 0,37$ кВт соответствуют ЭД следующих типов: МИ-22,

МИ-31 и МИ-32. Последний (МИ-32) имеет самую низкую частоту вращения $n_{\text{ном}} = 1\,000 \text{ мин}^{-1}$ и самый большой момент инерции $J_{\text{дв}} = 135 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, т. е. с точки зрения обеспечения конструктивных требований он не подходит.

Вдвое большая частота вращения $n_{\text{ном}} = 2\,000 \text{ мин}^{-1}$ и несколько меньший момент инерции $J_{\text{дв}} = 91,8 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ у ЭД МИ-31.

ЭД МИ-22 обладает наибольшей частотой вращения $n_{\text{ном}} = 3\,000 \text{ мин}^{-1}$ и наименьшим моментом инерции $J_{\text{дв}} = 40,8 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ по сравнению с ЭД МИ-32 и МИ-31. Таким образом, с целью обеспечения конструктивных требований следует выбирать быстроходный ЭД МИ-22 (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Технические характеристики ЭД МИ-22

Параметры	Значение
Мощность на валу $P_{\text{ном}}$, кВт	0,37
Частота вращения $n_{\text{ном}}$, мин^{-1}	3000
Напряжение питания $U_{\text{ном}}$, В	60
Ток якоря $I_{\text{я}}$, А	8,2
Сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$, Ом	0,192
Момент номинальный $M_{\text{ном}}$, Н·м	1,2
Момент инерции $J_{\text{дв}} \cdot 10^{-4}$, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	40,8

4. Оптимальное передаточное число редуктора i_0 определяем по формуле (3.2):

$$i_0 = \sqrt{\frac{J_{\text{н}} \varepsilon_{\text{н}} \eta + M_{\text{н}}}{J_{\text{дв}} \varepsilon_{\text{н}} \eta}} = \sqrt{\frac{50 \cdot 0,174 \cdot 0,9 + 180}{40,8 \cdot 10^{-4} \cdot 0,174 \cdot 0,9}} = 540.$$

5. Проверяем выбранный тип ЭД на соответствие требований по скорости. Для этого рассчитаем номинальную угловую скорость:

$$\Omega_{\text{ном}} = \frac{\pi n_{\text{ном}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314 \text{ рад/с}$$

и приведенную к валу ЭД угловую скорость поворота нагрузки:

$$i_0 \cdot \Omega_{\text{н}} = 540 \cdot 0,87 = 473,68 \text{ рад/с}.$$

Так как $\Omega_{\text{НОМ}} < i_0 \Omega_{\text{Н}}$ ($314 \text{ рад/с} < 473,68 \text{ рад/с}$), требования по скорости (3.3) не выполняются. Следовательно, необходимо определить новое передаточное число редуктора i_1 по формуле (3.4):

$$i_1 = \frac{\Omega_{\text{НОМ}}}{\Omega_{\text{Н}}} = \frac{314}{0,87} = 358.$$

5. Вычисляем значение требуемого вращающего момента в соответствии с выражением (3.5):

$$\begin{aligned} M_{\text{тр}} &= \left(J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{Н}}}{i_1^2} \right) i_1 \varepsilon_{\text{Н}} + \frac{M_{\text{Н}}}{i_1 \eta} = \\ &= \left(40,8 \cdot 10^{-4} + \frac{50}{358^2} \right) \cdot 358 \cdot 0,174 + \frac{180}{358 \cdot 0,9} = 0,84 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

6. Проверяем выбранный ЭД на соответствие требований по моменту, используя выражение (3.6):

$$\begin{aligned} \frac{M_{\text{тр}}}{M_{\text{НОМ}}} &= \frac{0,84}{1,2} = 0,7 \leq 2; \\ \frac{M_{\text{Н}}}{i_1 \eta} &= \frac{180}{358 \cdot 0,9} = 0,56 < M_{\text{НОМ}} = 1,2. \end{aligned}$$

Расчеты показали, что требования по моменту выполняются.

7. Определяем параметры динамической модели ЭД. Используя формулы (3.7)–(3.9), получаем:

– коэффициент противо-ЭДС:

$$K_{\text{е}} = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{\Omega_{\text{НОМ}}} = \frac{60 - 8,2 \cdot 0,192}{314} = 0,186 \text{ (В} \cdot \text{с)/рад};$$

– коэффициент момента:

$$K_{\text{м}} = \frac{M_{\text{НОМ}}}{I_{\text{я}}} = \frac{1,2}{8,2} = 0,146 \text{ Н} \cdot \text{м/А}.$$

– электромеханическую постоянную времени ЭД:

$$T_{\text{м}} = \frac{\left(J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{Н}}}{i_1^2} \right) R_{\text{я}}}{K_{\text{е}} K_{\text{м}}} = \frac{\left(40,8 \cdot 10^{-4} + \frac{50}{358^2} \right) \cdot 0,192}{0,186 \cdot 0,146} = 0,0316 \text{ с}.$$

Находим электромагнитную постоянную времени ЭД. Согласно (3.11) индуктивность обмотки якоря

$$L_{\text{я}} < \frac{T_{\text{м}} R_{\text{я}}}{4} = \frac{0,0316 \cdot 0,192}{4} = 0,0015 \text{ Г.}$$

Тогда, принимая $L_{\text{я}} = 0,0006 \text{ Г}$, имеем:

$$T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = \frac{0,0006}{0,192} = 0,003 \text{ с.}$$

8. Рассчитаем коэффициенты блоков **Transfer Fcn**, **Transfer Fcn1** и **Gain** (см. рис. 3.3):

$$\frac{1}{R_{\text{я}}} = \frac{1}{0,192} = 5,208 \text{ Ом}^{-1};$$

$$\frac{1}{i_1 \eta K_{\text{м}}} = \frac{1}{358 \cdot 0,9 \cdot 0,146} = 0,021 \text{ А/(Н·м)};$$

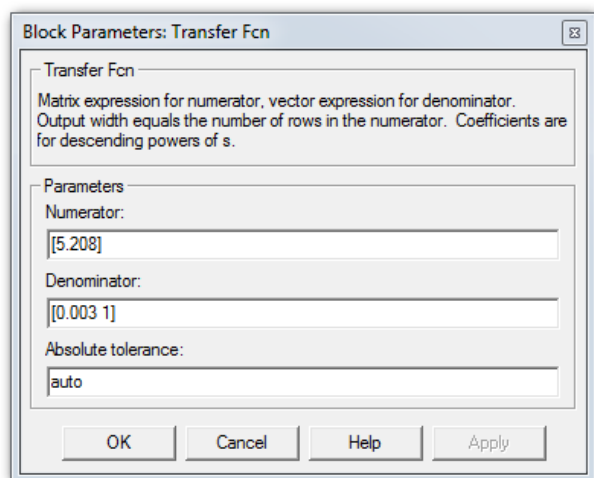
$$\frac{R_{\text{я}}}{K_{\text{е}} T_{\text{м}}} = \frac{0,192}{0,186 \cdot 0,0316} = 32,666 \text{ рад/(А·с}^2\text{)}.$$

9. Используя диалоговые окна соответствующих блоков, устанавливаем значения параметров:

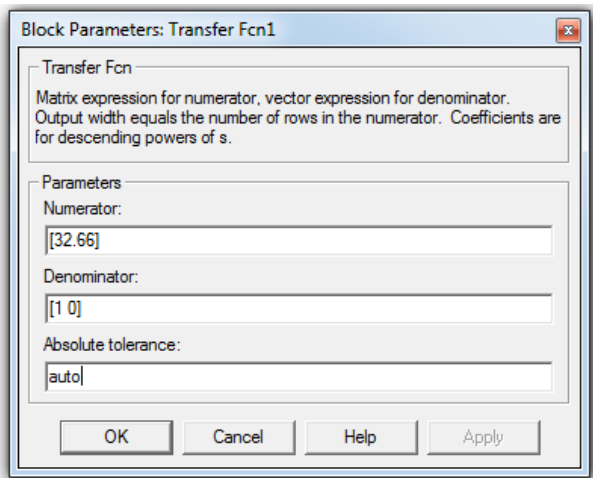
1) динамических звеньев ССДМ ЭД:

– блок **Transfer Fcn** – звено $\frac{5,208}{0,003s + 1}$ (рис. 3.4, а);

– блок **Transfer Fcn1** – звено $\frac{32,666}{s}$ (рис. 3.4, б);



а

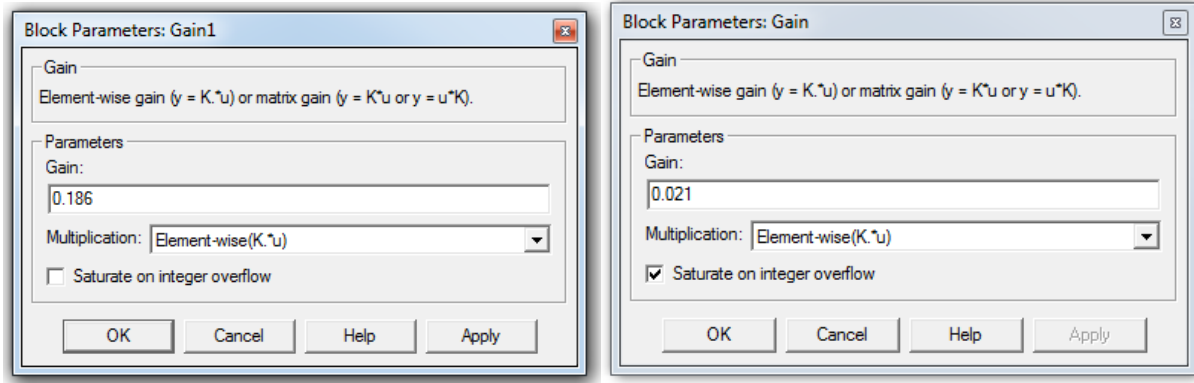


б

Рис. 3.4. Диалоговые окна параметров блоков **Transfer Fcn** (а) и **Transfer Fcn1** (б)

2) безынерционных звеньев:

- блок **Gain1** – звено $K_e = 0,186$ (рис. 3.5, а);
- блок **Gain** – звено $\frac{1}{i_1 \eta \cdot K_M} = 0,021$ (рис. 3.5, б).



а

б

Рис. 3.5. Диалоговые окна параметров блоков **Gain1** (а) и **Gain** (б)

В результате получаем Simulink-модель ЭД (рис. 3.6).

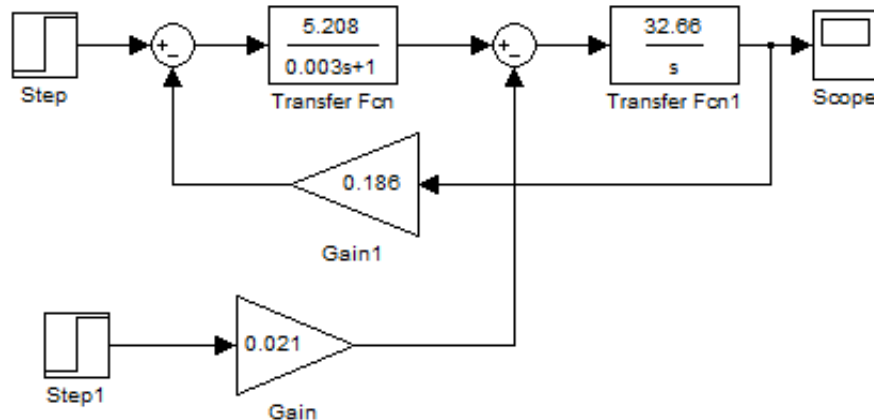
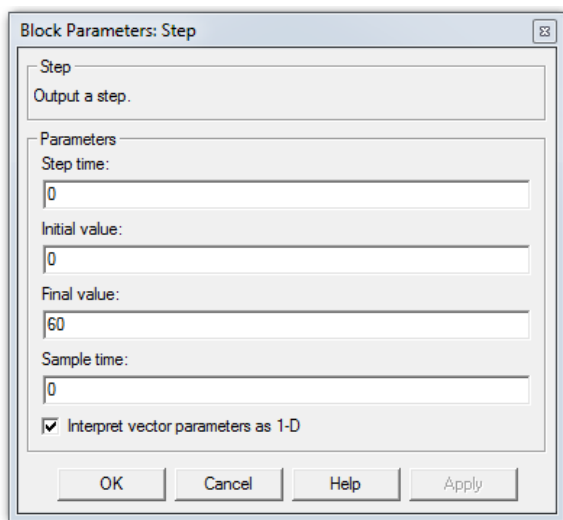


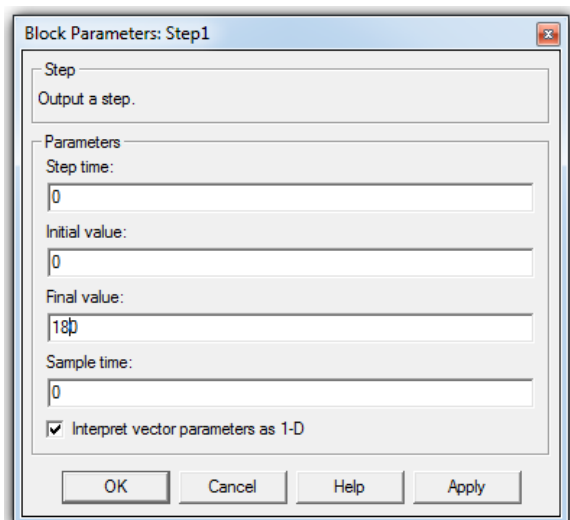
Рис. 3.6. Simulink-модель ЭД

10. Для получения переходной характеристики двигателя по задающему воздействию в строке **Final value** диалогового окна параметров блока **Step** (рис. 3.7, а) необходимо установить значение $U_{ном} = 60$ В, а в той же строке диалогового окна блока **Step 1** – «0» (нуль).

11. С целью определения переходной характеристики двигателя по возмущающему воздействию M_H (моменту сопротивления нагрузки) в поле **Final Value** диалогового окна параметров блока **Step** заносим «0» (нуль), а в ту же строку диалогового окна блока **Step 1** – значение $M_H = 180$ Н·м (рис. 3.7, б).



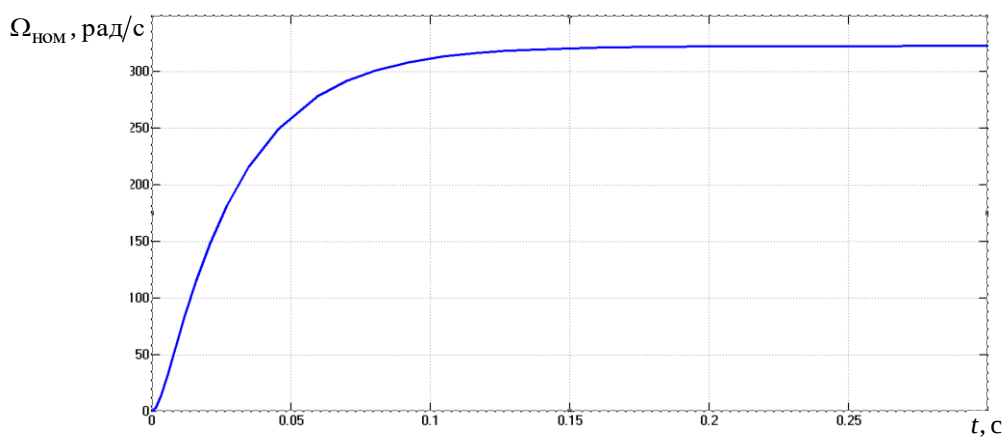
a



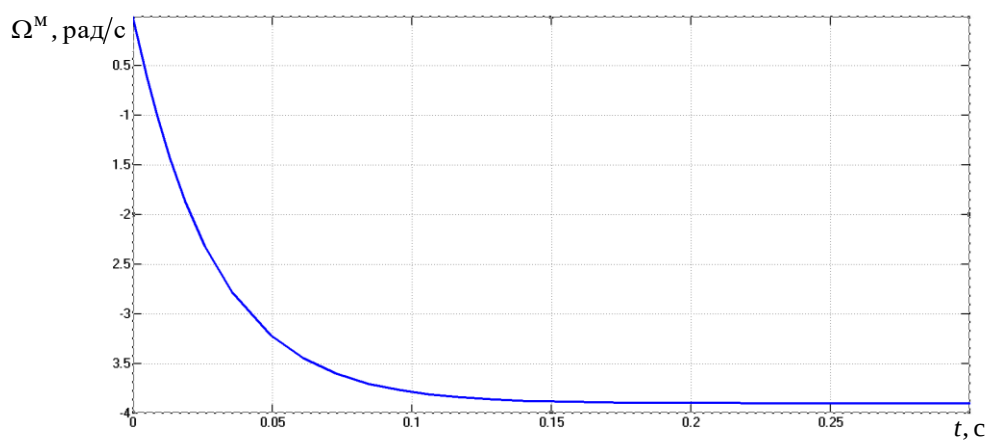
б

Рис. 3.7. Диалоговые окна параметров блоков **Step** (*a*) и **Step1** (*б*)

Результаты моделирования представлены на рис. 3.8.



a



б

Рис. 3.8. Переходные характеристики ЭД по задающему $U_{\text{ном}}$ (*a*) и возмущающему $M_{\text{н}}$ (*б*) воздействиям

12. Переходим к анализу результатов моделирования. Апериодический характер графиков (рис. 3.8) подтверждает правильность расчёта постоянных времени T_M и T_γ .

Установившиеся значения скорости вращения ЭД при наличии задающего и возмущающего воздействий составляют, соответственно, $\Omega_{уст} = 322,56$ рад/с (рис. 3.8, а) и $\Omega_{уст}^M = -3,942$ рад/с (рис. 3.8, б).

Паспортное номинальное значение угловой скорости вращения ЭД МИ-22 составляет $\Omega_{ном} = 314$ рад/с и незначительно отличается от установившегося, что позволяет сделать вывод о правильности проведённых расчётов.

Вместе с тем, за счёт наличия моментной составляющей погрешности $\Omega_{уст}^M = -3,942$ рад/с значение относительной погрешности

$$\Delta = \frac{\Omega_{уст}^M}{\Omega_{уст}} \cdot 100\% = -1,222\%$$

характеризует наклон механической характеристики ЭД. Для ее устранения необходимо в контуре скорости разрабатываемого ЭП применить настройку на СО, что позволит повысить порядок астатизма и увеличить жесткость механической характеристики привода в целом.

3.4. Синтез регулятора тока для настройки контура тока на оптимум по модулю

Прежде всего, необходимо уяснить состав и динамические свойства элементов КТ. Согласно функциональной схеме (см. рис. 3.2) КТ состоит из РТ, БП, а также включает якорную цепь ЭД и ДТ. Динамические модели БП, ЭД и ДТ известны.

БП, как правило, включает широтно-импульсный преобразователь (ШИП), на выходе которого формируется последовательность импульсов переменной скважности γ , и является существенно нелинейным элементом. Вместе с тем, частота среза КТ находится значительно ниже зоны рабочих частот БП, и поэтому для решения практических задач полагают, что динамические свойства последнего с большой степенью точности описываются инерционным звеном с передаточной функцией

$$w_{БП}(s) = \frac{K_{БП}}{T_{БП}s + 1}. \quad (3.12)$$

ДТ формирует сигнал, пропорциональный току $I_{\text{я}}$, протекающему в обмотке якоря, обеспечивает гальваническую развязку силовой цепи и цепи прохождения управляющего сигнала. Его динамические свойства также описываются инерционным звеном

$$W_{\text{ДТ}}(s) = \frac{K_{\text{ДТ}}}{T_{\text{ДТ}}s + 1}. \quad (3.13)$$

Поскольку параметры динамической модели ЭД уже рассчитаны (см. подразд. 3.3), то синтез РТ сводится к определению его структуры и определению параметров, обеспечивающих настройку КТ на ОМ.

На основании изложенного получаем ССДМ КТ, изображенную на рис. 3.9.

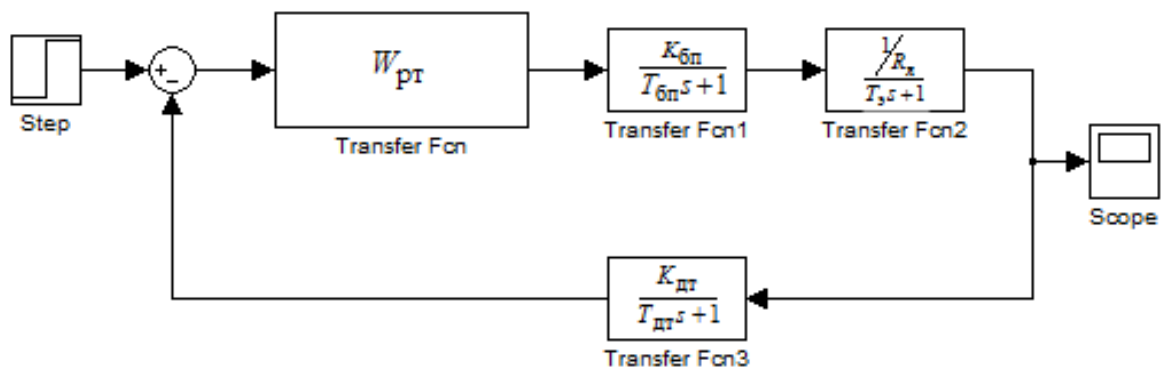


Рис. 3.9. ССДМ КТ

Внутренней ООС по ЭДС в дальнейшем будем пренебрегать, полагая, что $E(s) = 0$.

3.4.1. Расчет параметров регулятора тока и построение динамической модели контура тока

Для определения структуры РТ необходимо рассчитать передаточную функцию разомкнутого КТ и сопоставить полученное выражение с известной передаточной функцией КТ, настроенного на ОМ.

В соответствии со структурной схемой динамической модели КТ (рис. 3.9) передаточная функция разомкнутого КТ запишется в виде:

$$W_{\text{КТ}}(s) = \frac{U_{\text{ДТ}}(s)}{\Delta U_{\text{КТ}}(s)} = W_{\text{РТ}}(s) \cdot \frac{K_{\text{БП}}}{T_{\text{БП}}s + 1} \cdot \frac{1/R_{\text{я}}}{T_{\text{я}}s + 1} \cdot \frac{K_{\text{ДТ}}}{T_{\text{ДТ}}s + 1}. \quad (3.14)$$

В полученном выражении постоянные времени $T_{\text{БП}}$ и $T_{\text{ДТ}}$ следует отнести к малым постоянным времени.

Передаточная функция КТ, настроенного на ОМ:

$$W_{КТ}(s) = \frac{1}{2T_{\Sigma}^{КТ} s (T_{\Sigma}^{КТ} s + 1)}, \quad (3.15)$$

где $T_{\Sigma}^{КТ} = T_{БП} + T_{ДТ}$ – суммарная малая постоянная времени КТ.

Для нахождения передаточной функции РТ правые части выражений (3.14) и (3.15) необходимо приравнять:

$$W_{РТ}(s) \cdot \frac{K_{БП}}{T_{БП} s + 1} \cdot \frac{1/R_{я}}{T_{\Sigma} s + 1} \cdot \frac{K_{ДТ}}{T_{ДТ} s + 1} = \frac{1}{2T_{\Sigma}^{КТ} s (T_{\Sigma}^{КТ} s + 1)}.$$

Откуда

$$W_{РТ}(s) = \frac{R_{я} (T_{\Sigma} s + 1)}{K_{БП} K_{ДТ} 2T_{\Sigma}^{КТ} s}. \quad (3.16)$$

Полученное выражение по своей структуре является передаточной функцией ПИ-регулятора:

$$W_{РТ}(s) = \frac{K_{РТ} (T_{РТ} s + 1)}{T_{РТ} s}. \quad (3.17)$$

Сравнивая выражения (3.16) и (3.17), получаем формулы для расчета коэффициента передачи $K_{РТ}$ и постоянной времени $T_{РТ}$:

$$K_{РТ} = \frac{R_{я} T_{\Sigma}}{2T_{\Sigma}^{КТ} K_{БП} K_{ДТ}}; \quad (3.18)$$

$$T_{РТ} = T_{\Sigma}. \quad (3.19)$$

Для вычисления коэффициента передачи ДТ используем формулу:

$$K_{ДТ} = \frac{U_{ВХ}^{КТ}}{I_{я}}. \quad (3.20)$$

Прежде чем приступить к моделированию КТ на ПК, в выражении (3.17) следует раскрыть скобки:

$$W_{РТ}(s) = \frac{K_{РТ} (T_{РТ} s + 1)}{T_{РТ} s} = \frac{K_{РТ} T_{РТ} s + K_{РТ}}{T_{РТ} s}. \quad (3.21)$$

После замены в ССДМ КТ (см. рис. 3.9) передаточной функции РТ $W_{РТ}(s)$ выражением (3.21) получаем ССДМ КТ с ПИ-регулятором, настроенным на ОМ (рис. 3.10).

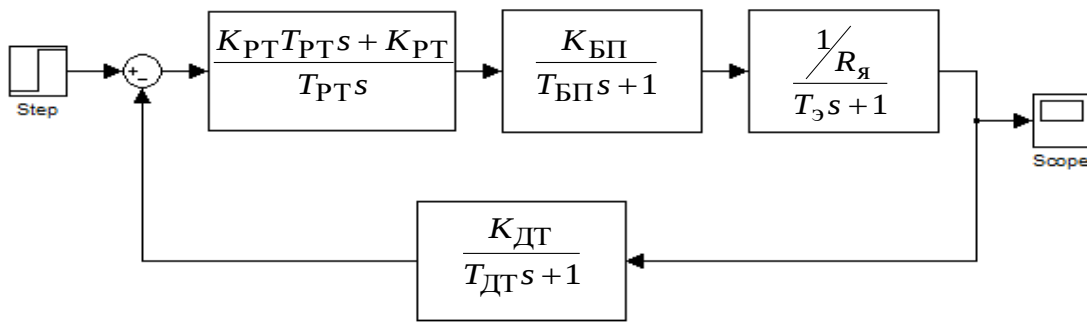


Рис. 3.10. ССДМ КТ с ПИ-регулятором

Пример 3.2. Определите параметры РТ и постройте динамическую модель КТ скоростного следящего ЭП нагрузки с ЭД МИ-22 (см. табл. 3.2) при следующих исходных данных: коэффициент передачи БП $K_{БП} = 30$; постоянная времени фильтра $T_{\phi} = 0,0024$ с; число пульсаций выпрямленного напряжения за период $m = 2$; частота питающего напряжения бортового преобразователя $f_{\Pi} = 400$ Гц; входное напряжение суммирующего усилителя КТ $U_{ВХ}^{КТ} = 10$ В; постоянная времени ДТ $T_{ДТ} = 0,001$ с.

Решение: 1. По формуле (3.20) рассчитываем коэффициент передачи ДТ:

$$K_{ДТ} = \frac{U_{ВХ}^{КТ}}{I_{я}} = \frac{10}{8,2} = 1,22 \text{ В/А.}$$

2. Определяем суммарную малую постоянную времени КТ. Согласно выражению (3.15)

$$T_{\Sigma}^{КТ} = T_{БП} + T_{ДТ}.$$

Поскольку номинальная мощность выбранного ЭД ($P_{НОМ} = 0,37$ кВт) превышает значение 0,2 кВт, постоянная времени БП

$$T_{БП} = T_{\phi} + \frac{1}{2 f_{\Pi} m} = 0,0024 + \frac{1}{2 \cdot 400 \cdot 2} = 0,003 \text{ с.}$$

Подставляя в выражение (3.15) вместо $T_{БП}$ ее числовое значение, получаем:

$$T_{\Sigma}^{КТ} = 0,003 + 0,001 = 0,004 \text{ с.}$$

3. По формуле (3.18) вычисляем коэффициент передачи РТ:

$$K_{РТ} = \frac{R_{я} T_{я}}{2 T_{\Sigma}^{КТ} K_{БП} K_{ДТ}} = \frac{0,192 \cdot 0,003}{2 \cdot 0,004 \cdot 30 \cdot 1,22} = 0,001967.$$

4. Согласно (3.19) постоянная времени T_T и электромагнитная постоянная времени ЭД равны между собой: $T_{PT} = T_{\Sigma} = 0,003 \text{ с}$.

5. В соответствии с выражением (3.21) определяем передаточную функцию РТ:

$$W_{PT}(s) = \frac{K_{PT}T_{PT}s + K_{PT}}{T_{PT}s} = \frac{0,001967 \cdot 0,003s + 0,001967}{0,003s} =$$

$$= \frac{0,0000059s + 0,001967}{0,003s}.$$

6. На основании проведенных расчетов строим Simulink-модель КТ с ПИ-регулятором, настроенного на ОМ (рис. 3.11).

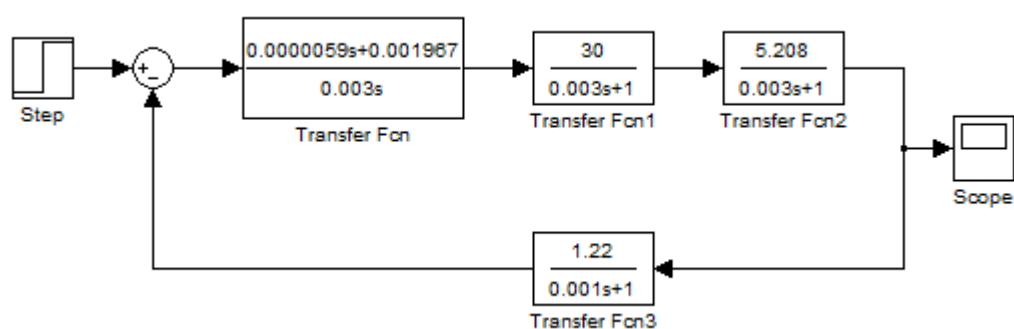


Рис. 3.11. Simulink-модель КТ с ПИ-регулятором, настроенного на ОМ

3.4.2. Моделирование контура тока и анализ полученных результатов

Процесс моделирования КТ рассмотрим на конкретном примере. По результатам моделирования определяются прямые (перерегулирование и время нарастания) и косвенные (запас устойчивости по фазе и запас устойчивости по амплитуде) показатели качества. Проводится сравнительный анализ полученных и расчетных значений этих параметров, на основании которого делается вывод о правильности проведенных расчетов и настройке КТ на ОМ.

Пример 3.3. Используя данные примера 3.2, в системе MATLAB Simulink постройте переходную характеристику КТ и ЛЧХ. Проведите анализ результатов моделирования.

Решение. 1. Строим переходную характеристику КТ по задающему воздействию. Значение задающего воздействия на КТ равно $U_{BX}^{KT} = 10 \text{ В}$ (см. пример 3.2). Согласно методике, изложенной в примере 3.1, получаем переходную характеристику КТ по задающему воздействию, изображенную на рис. 3.12. Рекомендуемое время решения задачи **Simulation time** задаем равным 0,1 с.

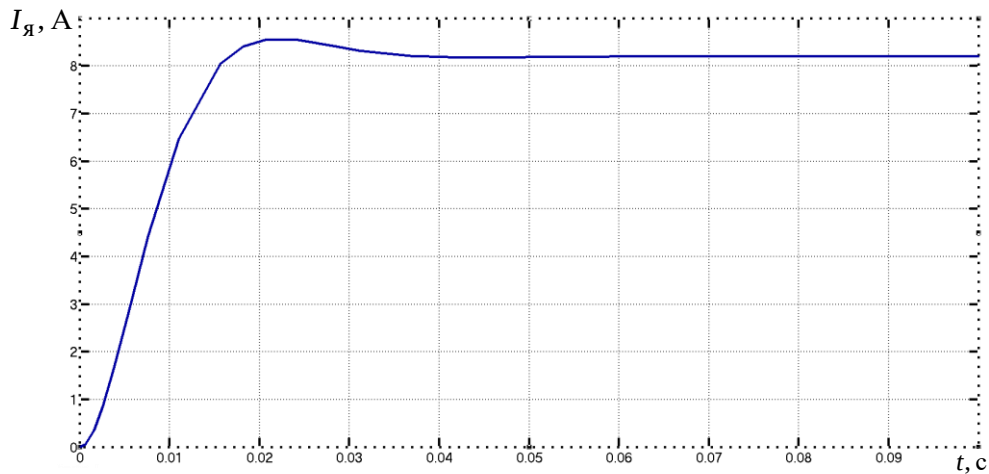


Рис. 3.12. Переходная характеристика КТ по задающему воздействию

2. Чтобы построить ЛЧХ необходимо знать передаточную функцию разомкнутого КТ $W_{КТ}$, которую определяем как отношение изображений по Лапласу тока якоря $I_я(s)$ и сигнала рассогласования $\Delta U_{КТ}(s)$ с выхода суммирующего усилителя КТ:

$$W_{КТ}(s) = \frac{I_я(s)}{\Delta U_{КТ}(s)}. \quad (3.22)$$

Поскольку все элементы в цепи КТ соединены последовательно, то выражение (3.22) можно представить в виде произведения передаточных функций элементов, входящих в КТ:

$$W_{КТ}(s) = W_{РТ}(s) \cdot W_{БП}(s) \cdot W_{ОЯ}(s) \cdot W_{ДТ}(s), \quad (3.23)$$

где $W_{ОЯ}(s)$ – передаточной функция обмотки якоря (ОЯ).

Далее в главное окно системы MATLAB Simulink **Command Windows** осуществляем ввод выражения (3.23) с учетом следующих обозначений передаточных функций:

$$\begin{aligned} \text{sys1} &= W_{РТ}(s); \text{ sys2} = W_{БП}(s); \\ \text{sys3} &= W_{ОЯ}(s); \text{ sys4} = W_{ДТ}(s); \text{ sys5} = W_{КТ}(s). \end{aligned}$$

Существует определенный порядок ввода передаточных функций: сначала записываем числитель, затем – знаменатель соответствующего блока. Коэффициенты числителя и знаменателя записываем через пробел. Например, если передаточная функция имеет вид:

$$W_1(s) = \frac{b_1 s + b_0}{d_1 s + d_0},$$

то в **Command Windows** производим следующую запись:

```
>> num1 = [b1 b0];  
>> den1 = [d1 d0];  
>> sys1 = tf(num1,den1)
```

После набора программы для контроля правильности обозначений необходимо нажать клавишу **Enter**.

Результат вычисления выражения (3.23) используется для построения ЛЧХ КТ посредством функции **bode(sys5,w)**. Функция **w=logspace(-n,m)** задает логарифмическое пространство. Аргументы **-n** и **m** – показатели степени при основании 10, указывающие диапазон частот, в котором будут построены ЛЧХ. Например, при $n = 3$ и $m=5$, диапазон частот варьируется в пределах от 10^{-3} до 10^5 рад/с.

Программа для построения ЛЧХ КТ:

```
>> num1=[0.0000059 0.001967];  
>> den1=[0.003 0];  
>> sys1=tf(num1,den1)
```

```
Transfer function:  
5.9e-006 s + 0.001967  
-----  
0.003 s
```

```
>> num2=[30];  
>> den2=[0.003 1];  
>> sys2=tf(num2,den2)
```

```
Transfer function:  
30  
-----  
0.003 s + 1
```

```
>> num3=[5.208];  
>> den3=[0.003 1];  
>> sys3=tf(num3,den3)
```

```
Transfer function:  
5.208  
-----  
0.003 s + 1
```

```
>> num4=[1.22];
>> den4=[0.001 1];
>> sys4=tf(num4,den4)
```

Transfer function:

```
1.22
-----
0.001 s + 1
```

```
>> sys5=sys1*sys2*sys3*sys4
```

Transfer function:

```
0.001125 s + 0.3749
-----
2.7e-011 s^4 + 4.5e-008 s^3 + 2.1e-005 s^2 + 0.003 s
```

```
>> w=logspace(-3,3);
```

```
>> bode(sys5,w)
```

Результат выполнения программы представлен на рис. 3.13.

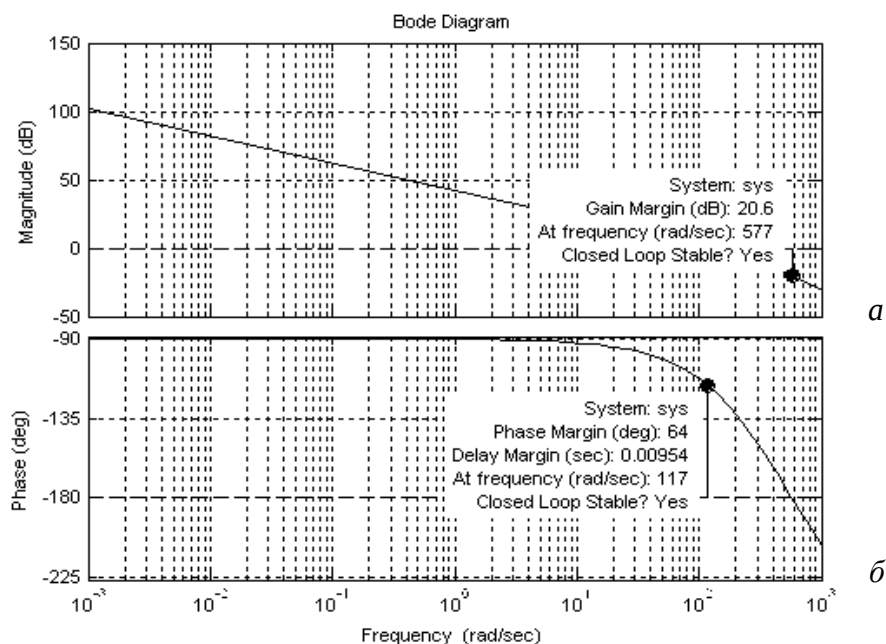


Рис. 3.13. ЛАЧХ (а) и ЛФЧХ (б) КТ

3. Переходим к анализу результатов моделирования.

Анализ переходной характеристики. Из рис. 3.12 видно, что максимальное отклонение тока якоря $I_{\max} = 8,55 \text{ A}$, а его установившееся значение $I_{\text{уст}} = 8,2 \text{ A}$.

Перерегулирование рассчитываем по формуле (3.24), подставляя в нее полученные числовые значения:

$$\sigma_{КТ} = \frac{I_{\max} - I_{уст}}{I_{уст}} \cdot 100\% = \frac{8,55 - 8,2}{8,2} \cdot 100\% = 4,3\%. \quad (3.24)$$

Время нарастания $t_H^{КТ}$ определяем по графику переходной функции (первая точка пересечения графика переходной функции и установившегося значения тока якоря): $t_H^{КТ} = 0,018$ с. Следует учесть, что найденное значение $t_H^{КТ}$ не должно значительно отличаться от расчетного:

$$t_H^{КТ} = 4,7 \cdot 0,004 = 0,0188 \text{ с.}$$

Таким образом, по результатам моделирования можно сделать вывод о том, что параметры РТ рассчитаны правильно и КТ настроен на ОМ.

Анализ ЛЧХ. Запас устойчивости по фазе $\theta_3^{КТ}$ определяем по графику ЛФЧХ (рис. 3.13, б) на частоте среза $\omega_c^{КТ} = 117$ рад/с, которая соответствует точке пересечения ЛАЧХ (рис. 3.13, а) с осью частот: $\theta_3^{КТ} = 64^\circ$.

Следует учесть, что найденное значение $\omega_c^{КТ}$ не должно значительно отличаться от расчетного:

$$\omega_c^{КТ} = \frac{1}{2T_{\Sigma}^{КТ}} = \frac{1}{2 \cdot 0,004} = 125 \text{ рад/с.}$$

Запас устойчивости по амплитуде $L_3^{КТ} = 20,6$ дБ определяется по графику ЛАЧХ (рис. 3.13, а) на частоте $\omega_\pi^{КТ} = 577$ рад/с, соответствующей точке пересечения ЛФЧХ (рис. 3.13, б), с линией -180° .

Таким образом, запасы устойчивости $\theta_3^{КТ} = 64^\circ$ и $L_3^{КТ} = 20,6$ дБ соответствуют КТ, настроенному на ОМ, что подтверждает правильность проведенных расчетов.

3.5. Синтез регулятора скорости для настройки контура скорости на симметричный оптимум

Из схем, приведенных на рис. 3.2 и 3.10, видно, что КС состоит из следующих элементов: РС F_1 ; КТ, настроенного на ОМ; электромеханической части двигателя; ТГ BR .

Так как КС является внешним по отношению к КТ, для определения структуры РС необходимо определить передаточную функцию замкнутого КТ $\Phi_{КТ}(s)$ как отношение изображений по Лапласу тока якоря $I_{я}(s)$ и выходного сигнала РС $U_{РС}(s)$:

$$\Phi_{КТ}(s) = \frac{I_{я}(s)}{U_{РС}(s)}. \quad (3.25)$$

Динамические свойства ТГ можно отобразить на структурной схеме в виде передаточной функции инерционного звена:

$$W_{ТГ}(s) = \frac{K_{ТГ}}{T_{ТГ}s + 1}. \quad (3.26)$$

Передаточная функция разомкнутого КТ, настроенного на ОМ

$$W_{КТ}(s) = \frac{U_{ДТ}(s)}{\Delta U_{КТ}(s)} = \frac{1}{2T_{\Sigma}^{КТ} s (T_{\Sigma}^{КТ} s + 1)}.$$

Чтобы использовать последнее выражение для получения передаточной функции $\Phi_{КТ}(s)$, необходимо ее представить в виде:

$$\Phi_{КТ}(s) = \frac{U_{КТ}(s)}{U_{РС}(s)W_{ДТ}(s)}.$$

Тогда

$$\Phi_{КТ}(s) = \frac{W_{КТ}(s)}{[1 + W_{КТ}(s)]W_{ДТ}(s)}$$

или

$$\Phi_{КТ}(s) = \frac{T_{ДТ}s + 1}{K_{ДТ} \left[2 \left(T_{\Sigma}^{КТ} \right)^2 s^2 + 2T_{\Sigma}^{КТ} s + 1 \right]}. \quad (3.27)$$

При настройке КС на СО выражение (3.27) из-за малости значений постоянных времени $T_{ДТ}$ и $T_{\Sigma}^{КТ}$ в зоне рабочих частот можно упростить:

$$\Phi_{КТ}(s) \approx \frac{1/K_{ДТ}}{2T_{\Sigma}^{КТ} s + 1} = \frac{1/1,22}{2 \cdot 0,004s + 1} = \frac{0,82}{0,008s + 1}. \quad (3.28)$$

С учетом выражений (3.26) и (3.28) ССДМ КС примет вид, показанный на рис. 3.14.

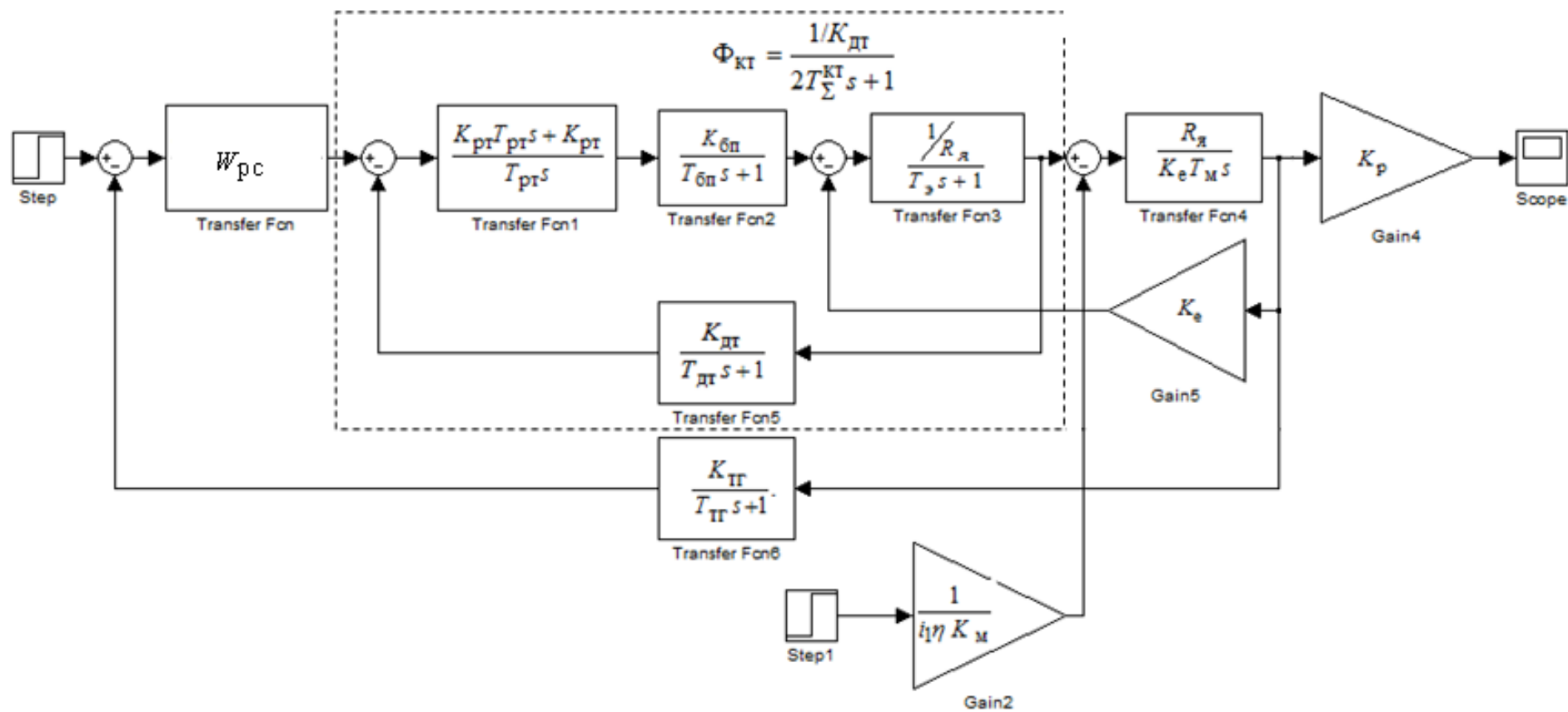


Рис. 3.14. ССДМ КС, настроенного на СО

3.5.1. Расчет параметров регулятора скорости и построение динамической модели контура скорости

Передающая функция разомкнутого КС определяется по ССДМ, изображенной на рис. 3.14:

$$W_{KC}(s) = \frac{U_{TG}(s)}{\Delta U_{\Omega}(s)} = W_{PC}(s) \cdot \frac{1/K_{ДТ}}{2T_{\Sigma}^{КТ} s + 1} \cdot \frac{R_{я}}{K_e \cdot T_M s} \cdot \frac{K_{ТГ}}{T_{ТГ} s + 1}. \quad (3.29)$$

При расчете параметров РС постоянные времени $2T_{\Sigma}^{КТ}$ и $T_{ТГ}$ следует отнести к малым постоянным времени.

Передающая функция КС, настроенного на СО, имеет вид:

$$W_{KC}(s) = \frac{4T_{\Sigma}^{КС} s + 1}{8(T_{\Sigma}^{КС})^2 s^2 (T_{\Sigma}^{КС} s + 1)}, \quad (3.30)$$

где $T_{\Sigma}^{КС} = 2T_{\Sigma}^{КТ} + T_{ТГ}$ – суммарная малая постоянная времени КС.

Для определения структуры РС необходимо приравнять правые части выражений (3.29) и (3.30):

$$W_{PC}(s) \cdot \frac{1/K_{ДТ}}{2T_{\Sigma}^{КТ} s + 1} \cdot \frac{R_{я}}{K_e \cdot T_M s} \cdot \frac{K_{ТГ}}{T_{ТГ} s + 1} = \frac{4T_{\Sigma}^{КС} s + 1}{8(T_{\Sigma}^{КС})^2 s^2 (T_{\Sigma}^{КС} s + 1)},$$

тогда

$$W_{PC}(s) = \frac{K_{ДТ} K_e T_M (4T_{\Sigma}^{КС} s + 1)}{R_{я} K_{ТГ} 8(T_{\Sigma}^{КС})^2 s}. \quad (3.31)$$

Введем обозначения:

– коэффициент передачи РС:

$$K_{PC} = \frac{K_{ДТ} K_e T_M}{2T_{\Sigma}^{КС} R_{я} K_{ТГ}}; \quad (3.32)$$

– постоянная времени РС:

$$T_{PC} = 4T_{\Sigma}^{КС}. \quad (3.33)$$

Тогда вместо (3.31) получаем

$$W_{PC}(s) = \frac{K_{PC}(T_{PC} s + 1)}{T_{PC} s}. \quad (3.34)$$

Выражение (3.34) является передаточной функцией ПИ-регулятора, в котором для удобства моделирования можно раскрыть скобки:

$$W_{PC}(s) = \frac{K_{PC}T_{PC}s + K_{PC}}{T_{PC}s}. \quad (3.35)$$

После подстановки полученного значения передаточной функции РС в ССДМ КС (см. рис. 3.14) будем иметь ССДМ КС с ПИ-регулятором, настроенного на СО (рис. 3.15).

Пример 3.4. Определите параметры РС и постройте динамическую модель КС скоростного следящего ЭП нагрузки с ЭД МИ-22 (см. пример 3.1), если задающее воздействие (входное напряжение суммирующего усилителя контура скорости) $U_{BX}^{KC} = 10$ В, постоянная времени ТГ $T_{TG} = 0,01$ с. При построении динамической модели КС используйте параметры РТ, рассчитанные в примере 3.2.

Решение: 1. Рассчитываем суммарную малую постоянную КС T_{Σ}^{KC} . Согласно (3.30)

$$T_{\Sigma}^{KC} = 2T_{\Sigma}^{KT} + T_{TG} = 2 \cdot 0,004 + 0,01 = 0,018 \text{ с.}$$

2. Вычислим требуемый коэффициент передачи ТГ:

$$K_{TG} = \frac{U_{BX}^{KC}}{\Omega_{ном}} = \frac{10}{314} = 0,0318 \text{ (В} \cdot \text{с)/рад.}$$

3. Используя формулы (3.32) и (3.33), определяем параметры РС:
– коэффициент передачи РС:

$$K_{PC} = \frac{K_{дт} K_{\epsilon} T_{м}}{2T_{\Sigma}^{KC} R_{я} K_{TG}} = \frac{1,22 \cdot 0,186 \cdot 0,0316}{2 \cdot 0,018 \cdot 0,192 \cdot 0,0318} = 32,6;$$

– постоянную времени РС:

$$T_{PC} = 4T_{\Sigma}^{KC} = 4 \cdot 0,018 = 0,072 \text{ с.}$$

4. Находим передаточную функцию регулятора скорости. В соответствии с выражением (3.35)

$$W_{PC}(s) = \frac{K_{PC}T_{PC}s + K_{PC}}{T_{PC}s} = \frac{2,35s + 32,6}{0,072s}.$$

5. Определяем коэффициент передачи редуктора: $K_p = \frac{1}{i_1} = \frac{1}{358} = 0,0028$.

После подстановки в ССДМ КС (рис. 3.15) заданных и рассчитанных числовых значений получаем Simulink-Модель КС, настроенного на СО, изображенную на рис. 3.16.

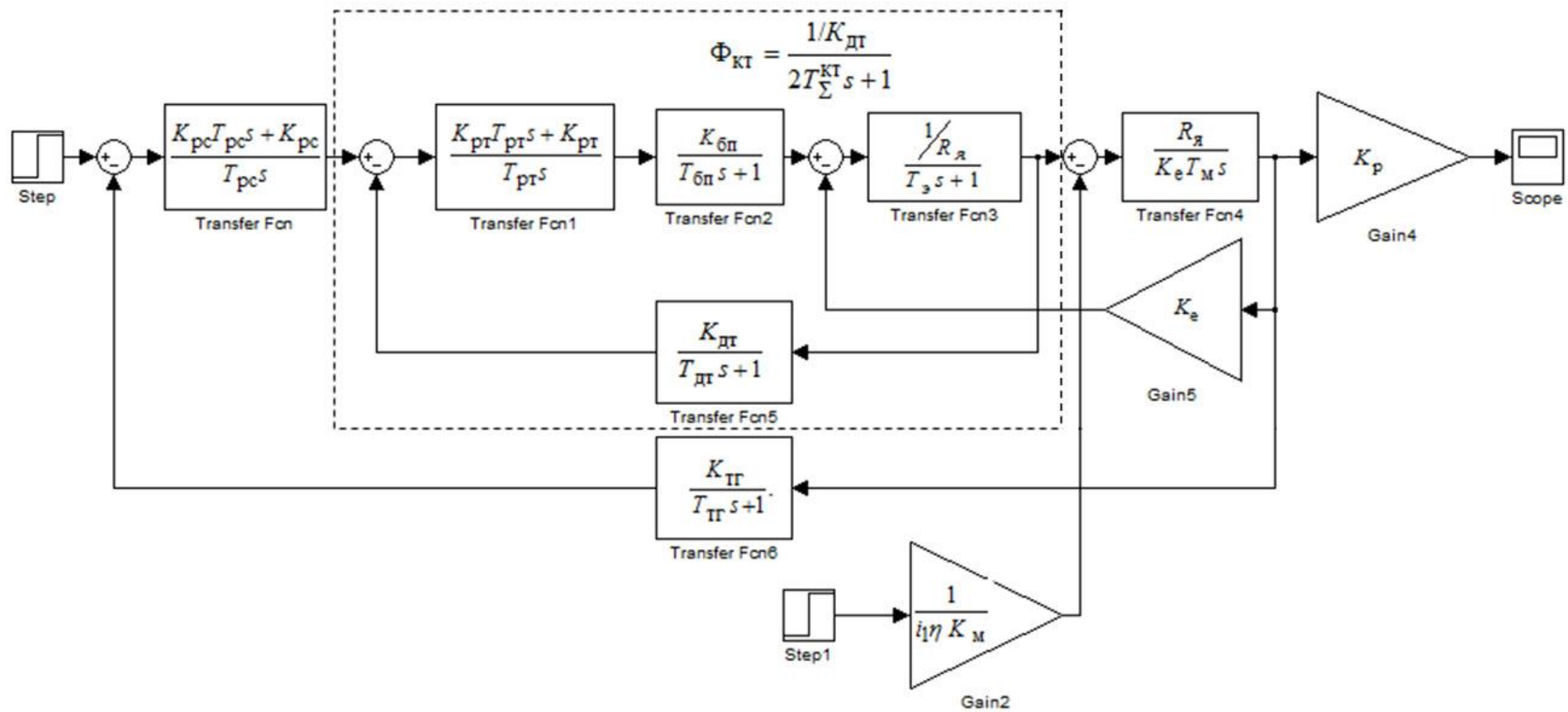


Рис. 3.15. ССДМ КС с ПИ-регулятором, настроенного на СО

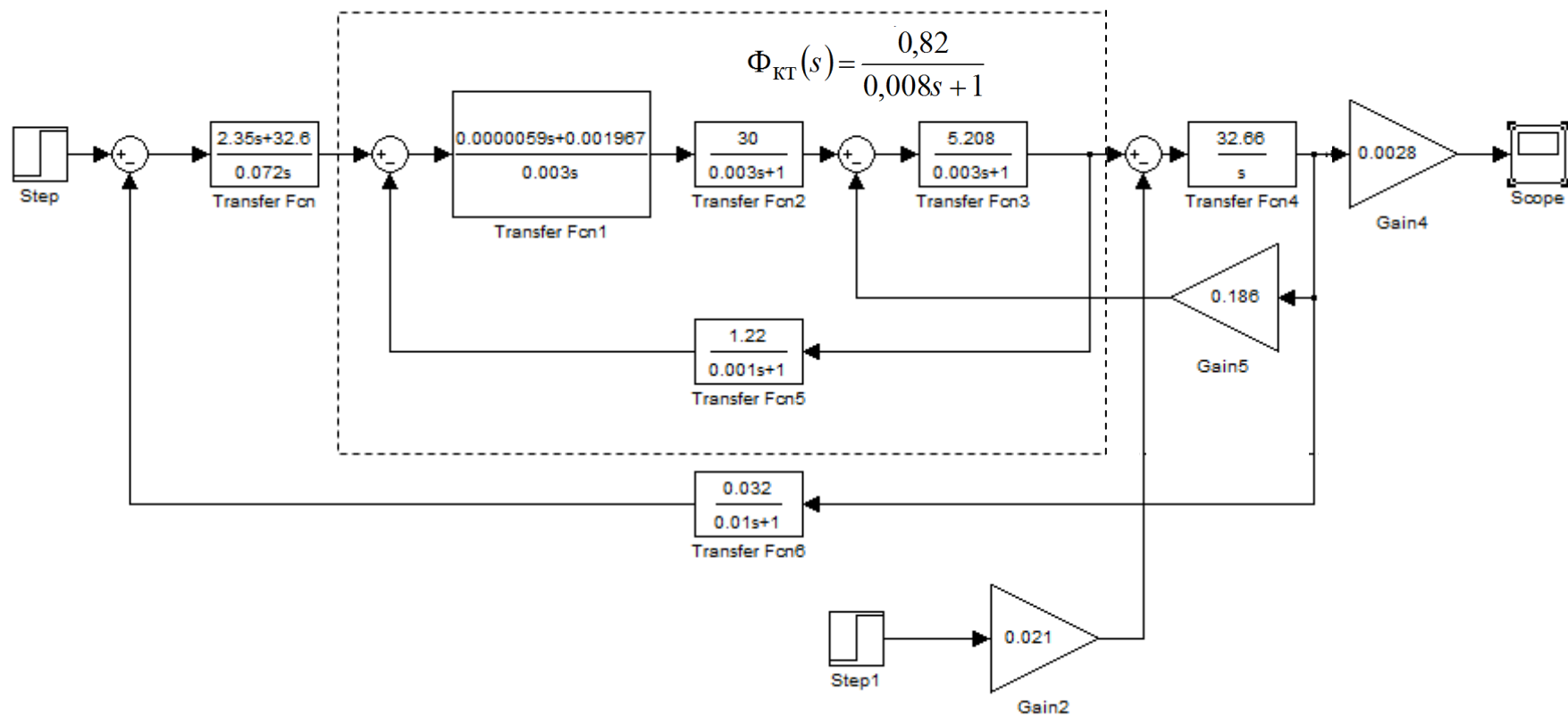


Рис. 3.16. Simulink-модель КС с ПИ-регулятором, настроенного на СО

3.5.2. Моделирование контура скорости и анализ полученных результатов

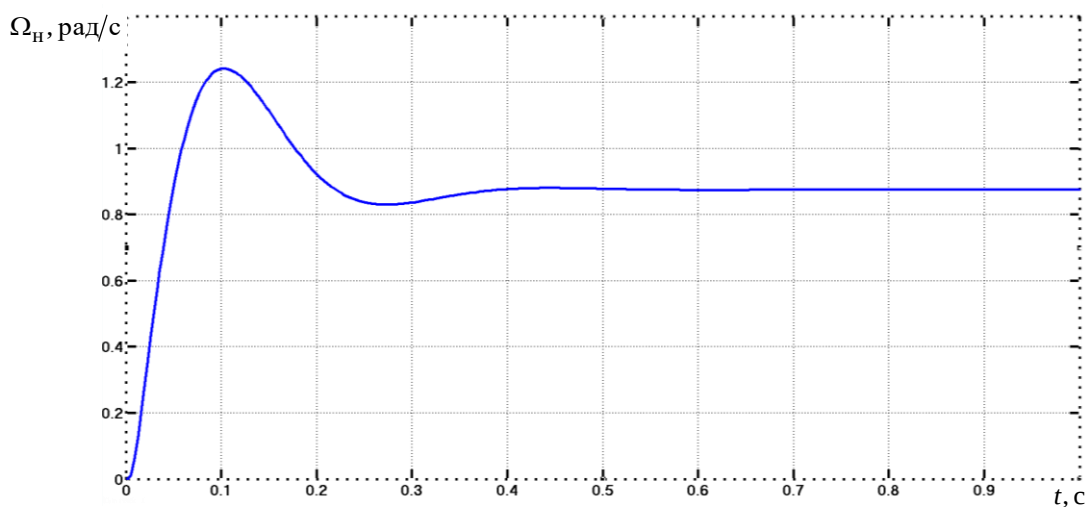
Моделирование КС с ПИ-регулятором, настроенного на СО, рассмотрим на конкретном примере. Результат моделирования – графики переходных характеристик по задающему и возмущающему воздействиям и ЛЧХ. По результатам моделирования проводится анализ полученных показателей качества.

Пример 3.5. Постройте переходную характеристику КС по задающему U_3 и возмущающему M_H воздействиям и ЛЧХ с применением MATLAB Simulink и сделайте сравнительный анализ результатов моделирования. При решении задачи используйте числовые значения параметров и ССДМ из примера 3.4.

Решение: 1. Строим переходную характеристику КС по задающему воздействию U_3 . Исходя из условия и используя методику, изложенную в примере 3.1, получаем переходную характеристику КС по задающему воздействию, изображённую на рис. 3.17, *а*: в поле **Final Value** диалоговых окон блоков **Step** и **Step1** вводим значения $U_{BX}^{KC}=10$ В и «0» (нуль), соответственно.

2. Для построения переходной характеристики КС по возмущающему (статическому моменту сопротивления нагрузки) воздействию M_H (рис. 3.17, *б*) в поле **Final Value** диалоговых окон блоков **Step** и **Step1** вводим значения «0» (нуль) и $M_H=180$ Н·м, соответственно.

В первом и во втором случае рекомендуемое время решения задачи **Simulation time** задается равным 1 с.



a

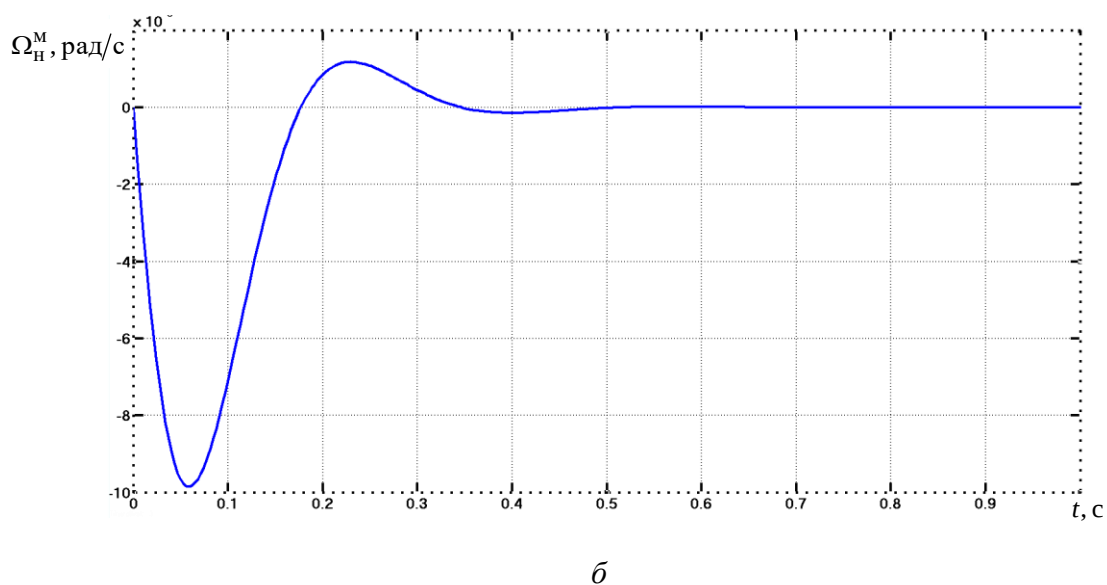


Рис. 3.17. Переходные характеристики КС с ПИ-регулятором, настроенного на СО по задающему U_z (а) и возмущающему M_H (б) воздействиям

3. Переходим к построению ЛЧХ КС. Для этого воспользуемся методикой, изложенной в примере 3.3.

Согласно (3.28) передаточная функция замкнутого КТ

$$\Phi_{КТ}(s) = \frac{0,82}{0,008s + 1}.$$

Составляем соответствующую программу:

```
>> num1=[2.35 32.6];
>> den1=[0.072 0];
>> sys1=tf(num1,den1)
```

Transfer function:

2.35 s + 32.6

0.072 s

```
>> num2=[0.82];
>> den2=[0 .008 1];
>> sys2=tf(num2,den2)
```

Transfer function:

0.82

0.008 s + 1

```
>> num3=[32.666];
```

```

>> den3=[1 0];
>> sys3=tf(num3,den3)

Transfer function:
32.67
-----
s

>> num4=[0.032];
>> den4=[0.01 1];
>> sys4=tf(num4,den4)

Transfer function:
0.032
-----
0.01 s + 1

>> sys5=sys1*sys2*sys3*sys4

Transfer function:
2.014 s + 27.94
-----
5.76e-006 s^4 + 0.001296 s^3 + 0.072 s^2

>> w=logspace(-3,3);
>> bode(sys5,w)

```

Результат выполнения программы представлен на рис. 3.18.

4. Переходим к анализу полученных графиков.

Анализ переходной характеристики. Из рис. 3.17, а видно, что максимальное отклонение угловой скорости вращения нагрузки $\Omega_{\max}=1,24$ рад/с, а его установившееся значение – $\Omega_{\text{уст}}=0,87$ рад/с. Подставляя эти численные значения в формулу для определения перерегулирования $\sigma_{\text{КС}}$, получаем

$$\sigma_{\text{КС}} = \frac{\Omega_{\max} - \Omega_{\text{уст}}}{\Omega_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{1,24 - 0,87}{0,87} \cdot 100\% = 43\%.$$

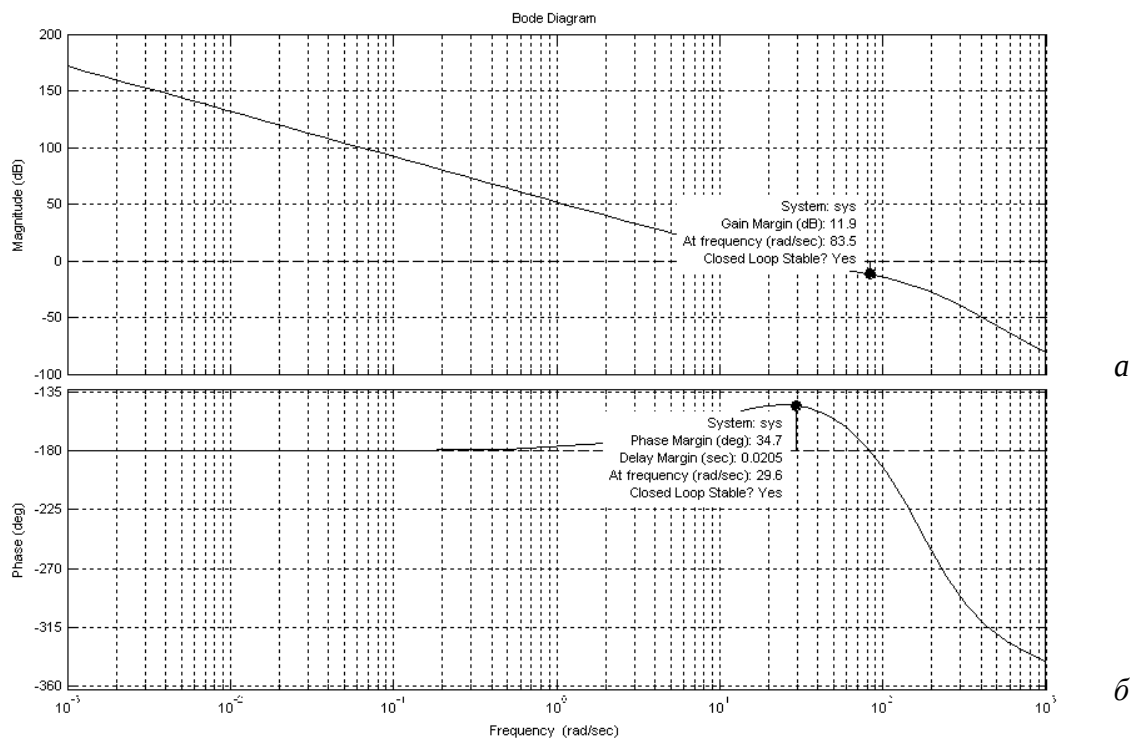


Рис. 3.18. ЛАЧХ (а) и ЛФЧХ (б) КС с ПИ-регулятором, настроенного на СО

Время нарастания t_H^{KC} определяется в первой точке пересечения графика переходной функции и установившегося значения угловой скорости и не должно значительно отличаться от расчетного:

$$t_H^{KC} = 3,17 T_{\Sigma}^{KC} = 3,1 \cdot 0,018 = 0,0558 \text{ с.}$$

Из графика видно, что $t_H^{KC} = 0,05 \text{ с}$ (см. рис. 3.17, а).

Таким образом, результаты моделирования говорят о том, что параметры РС рассчитаны правильно и КС настроен на СО.

Из рис. 3.17, б следует, что требования, предъявляемые к моментной составляющей ошибки угловой скорости нагрузки $\Delta\Omega_H^M$, выполняются и при постоянном значении статического момента сопротивления нагрузки $M_H = 180 \text{ Н} \cdot \text{м}$ в установившемся режиме ко времени $t_1 \leq 0,5 \text{ с}$ сводятся к нулю: $\Delta\Omega_H^M = 0$.

Благодаря наличию интегрирующего звена в РС обеспечена абсолютная жёсткость искусственной механической характеристики скоростного следящего ЭП нагрузки.

Анализ ЛЧХ. Запас устойчивости по фазе $\theta_3^{KC} = 34,7 \text{ рад/с}$ определяется по ЛФЧХ (рис. 3.18, б) на частоте среза $\omega_c^{KC} = 29,6 \text{ рад/с}$, которая соответствует точке пересечения ЛАЧХ (рис. 3.18, а) с осью частот.

Следует учесть, что найденное значение $\omega_c^{КС}$ не должно значительно отличаться от расчетного:

$$\omega_c^{КС} = \frac{1}{2T_{\Sigma}^{КС}} = \frac{1}{2 \cdot 0,018} = 27 \text{ рад/с}.$$

Полученное значение соответствует результатам моделирования.

Запас устойчивости по амплитуде (по модулю) $L_3^{КС} = 11,9$ дБ определяется по ЛАЧХ (рис. 3.18, *а*) на частоте $\omega_{\pi}^{КС} = 83,5$ рад/с, соответствующей точке пересечения ЛФЧХ (рис. 3.18, *б*) с линией -180° .

Значения запасов устойчивости по фазе и амплитуде соответствуют КС, настроенному на СО, что подтверждает правильность проведенных расчетов.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башарин, А. В. Управление электроприводами : учебное пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Ленинград : Энергоиздат, 1982. – 392 с.
2. Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода : учебное пособие для вузов / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 576 с.
3. Ильинский Н. Ф. Общий курс электропривода : учебник для вузов / Н. Ф. Ильинский, В. Ф. Козаченко. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.
4. Автоматизированный электропривод : производственно-практическое издание / под редакцией Н. Ф. Ильинского, М. Г. Юнькова. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 544 с.
5. Системы автоматизированного управления электроприводами : учебное пособие / Г. И. Гульков, Ю. Н. Петренко, Е. П. Раткевич, О. Л. Симоненкова ; под общей редакцией Ю. Н. Петренко. – Минск : Новое знание, 2004. – 384 с.

ОБРАЗЕЦ БЛАНКА ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

БЛАНК ЗАДАНИЯ

1. Разработайте скоростной следящий двухконтурный электропривод с расчетом регуляторов тока и скорости и исследуйте его динамическую модель на компьютере с использованием системы MatLab Simulink:

а) изучите и опишите функциональную схему скоростного следящего двухконтурного электропривода;

б) рассчитайте требуемую мощность, выберите соответствующий электродвигатель и определите параметры его динамической модели;

в) наберите структурную схему динамической модели электродвигателя в системе MatLab Simulink и постройте графики его переходных характеристик по задающему и возмущающему воздействиям;

г) синтезируйте регулятор для настройки контура тока на оптимум по модулю;

д) наберите структурную схему динамической модели контура тока в системе MatLab Simulink и постройте график его переходной характеристики по задающему воздействию и графики логарифмических частотных характеристик;

е) синтезируйте регулятор для настройки контура скорости на симметричный оптимум;

ж) наберите структурную схему динамической модели контура скорости в системе MatLab Simulink и постройте графики его переходных характеристики по задающему и возмущающему воздействиям и графики логарифмических частотных характеристик;

з) проведите анализ полученных графиков;

2. Оформите расчетно-пояснительную записку.

Исходные данные для расчета

J_n , кг·м ²	M_n , Н·м	Ω_n , град/с	ε_n , град/с ²	$K_{б.п}$	$T_{ф}$, с	m	$U_{вх}^{к.т}$, В	$T_{д.т}$, с	$U_{вх}^{к.с}$, В	$T_{тп}$, с	η
142	250	10	6	10	0,001	2	15	0,002	3	0,008	0,80

Руководитель _____
Ф.И.О. руководителя подпись

« _____ » _____ 20__ г.

Выполнил _____
Ф.И.О. студента, № группы подпись

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Задание и исходные данные для выполнения курсового проекта.....	4
2. Требования к содержанию и оформлению курсового проекта.....	4
2.1. Структура пояснительной записки.....	15
2.2. Оформление пояснительной записки.....	15
2.3. Графическая часть.....	17
3. Разработка скоростного следящего двухконтурного электропривода	18
3.1. Разработка функциональной схемы скоростного следящего электропривода.....	18
3.2. Расчет требуемой мощности и выбор электродвигателя	20
3.3. Построение структурной схемы динамической модели электропривода	24
3.4. Синтез регулятора тока для настройки контура тока на оптимум по модулю.....	31
3.4.1. Расчет параметров регулятора тока и построение динамической модели контура тока.....	32
3.4.2. Моделирование контура тока и анализ полученных результатов.....	35
3.5. Синтез регулятора скорости для настройки контура скорости на симметричный оптимум.....	39
3.5.1. Расчет параметров регулятора скорости и построение динамической модели контура скорости	42
3.5.2. Моделирование контура скорости и анализ полученных результатов.....	46
Список рекомендуемой литературы	51
Приложение А	52

Учебное издание

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Учебно-методическое пособие

Составитель
Бутаков Валерий Михайлович

Кафедра электротехнических комплексов и систем КГЭУ

Редактор *И. В. Краснова*
Компьютерная верстка *И. В. Красновой*

Подписано в печать 17.04.2025.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 3,14. Уч.-изд. л. 1,32.
Заказ № 580/эл.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ.
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51