

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

**СИСТЕМЫ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
И УПРАВЛЕНИЯ**

*Учебно-методическое пособие*

Казань

2023

УДК 681.516.3

ББК 32.965.8

С40

**С40 Системы автоматического регулирования и управления:**  
учебно-методическое пособие / сост.: В.М. Бутаков, П.П. Павлов,  
Л.Н. Киснеева. – Казань : КГЭУ, 2023. – 32 с.

Содержит методические указания по выполнению курсового проекта по дисциплине «Системы автоматического регулирования и управления», которые определяют общие требования, предъявляемые к курсовому проекту, последовательность его подготовки и выполнения, а также требования к структуре, содержанию и оформлению пояснительной записки.

Изложена методика применения стандартных настроек системы автоматического регулирования на примере системы стабилизации частоты синхронного генератора. Описаны способы исследования динамической модели системы автоматического регулирования на персональном компьютере в системе MATLAB Simulink.

Предназначено для всех форм обучения по образовательной программе направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, направленности (профили) «Электромеханические комплексы и системы», «Электромобильный и беспилотный транспорт», «Проектирование и эксплуатация электрохозяйства потребителей».

УДК 681.516.3

ББК 32.965.8

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к условиям реализации образовательной программы «Электромеханические комплексы и системы», «Электромобильный и беспилотный транспорт» и «Проектирование и эксплуатация электрохозяйства потребителей», обучающийся должен выполнить курсовой проект по дисциплине «Системы автоматического регулирования и управления».

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 системы автоматического регулирования, 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 структурной схемы динамической модели системы стабилизации частоты синхронного генератора 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 специальной и справочной литературы.

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 разбираться в принципах построения систем автоматического управления, закономерностях переходных процессов, протекающих в электроэнергетических системах, методах их анализа и синтеза.

# 1. ЗАДАНИЕ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

1. Разработайте регуляторы для системы стабилизации частоты синхронного генератора (ССЧСГ) с применением стандартных настроек и исследуйте ее динамическую модель в системе MATLAB Simulink:

- 1) изучите и опишите структурную схему ССЧСГ;
- 2) синтезируйте регулятор частоты (РЧ), обеспечивающий настройку ССЧСГ на ОМ;
- 3) проведите моделирование ССЧСГ с РЧ в системе Simulink;
- 4) Постройте графики переходных характеристик:
  - по задающему воздействию  $f_0$ ;
  - по моменту сопротивления нагрузки  $M_H$ ;
  - по ступенчато изменяющемуся напряжению на якоре  $\Delta U_{я}$ ;
  - по линейно возрастающему напряжению на якоре  $\Delta \dot{U}_{я}$ ;
- 5) выполните анализ графиков переходных характеристик и оцените установившиеся ошибки системы;
- 6) постройте графики ЛЧХ разомкнутой ССЧСГ в программе MATLAB;
- 7) проведите анализ ЛЧХ и оцените устойчивость ССЧСГ с определением запасов устойчивости по фазе и амплитуде;
- 8) синтезируйте регулятор частоты (РЧ), обеспечивающий настройку ССЧСГ на СО;
- 9) проведите моделирование ССЧСГ с РЧ в системе Simulink;
- 10) Постройте графики переходных характеристик:
  - по задающему воздействию  $f_0$ ;
  - по моменту сопротивления нагрузки  $M_H$ ;
  - по ступенчато изменяющемуся напряжению на якоре  $\Delta U_{я} = 2 \text{ В}$ ;
  - по линейно возрастающему напряжению на якоре  $\Delta \dot{U}_{я}$ ;
- 11) выполните анализ графиков переходных характеристик и оцените установившиеся ошибки системы;
- 12) постройте графики ЛЧХ разомкнутой ССЧСГ в программе MATLAB;
- 13) проведите анализ ЛЧХ и оцените устойчивость ССЧСГ с определением запасов устойчивости по фазе и амплитуде;
- 14) проведите сравнительный анализ результатов настройки ССЧСГ на ОМ и СО и сделайте соответствующие выводы.

2. Оформите расчетно-пояснительную записку.

Исходные данные для выполнения курсового проекта приведены в табл. 1.1, где  $K_{ИУ}$  – коэффициент усиления измерительного усилителя, В/Гц;  $K_u$  – коэффициент передачи усилителя статического преобразователя;  $T_{УСП}$  – постоянная времени усилителя статического преобразователя, с;  $K_{ДВ}$  – коэффициент передачи двигателя по скорости по цепи обмотки возбуждения, рад/В·с;  $T_M$  – электромеханическая постоянная времени двигателя, с;  $T_Э$  – электромагнитная постоянная времени двигателя, с;  $K_{СГ}$  – коэффициент передачи синхронного генератора, Гц·с/рад;  $K_1$  – коэффициент передачи по моменту нагрузки, 1/Н·м·с;  $K_я$  – коэффициент передачи двигателя по скорости по цепи якоря, рад/В·с;  $M_H$  – момент нагрузки, Н·м;  $f_0$  – задающее воздействие, Гц;  $\Delta U_я$  – изменение напряжения на якоре, В.

Таблица 1.1

Вариант	$K_{ИУ}$ , В/Гц	$K_u$	$T_{УСП}$ , с	$K_{ДВ}$ , $\frac{\text{рад}}{\text{В} \cdot \text{с}}$	$T_M$ , с	$T_Э$ , с	$K_{СГ}$ , $\frac{\text{Гц} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$	$K_1$ , $\frac{1}{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}$	$K_я$ , $\frac{\text{рад}}{\text{В} \cdot \text{с}}$	$M_H$ , Н·м	$f_0$ , Гц	$\Delta U_я$ , В
1	3	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,41	5	200	0,1	300	1
2	4	4,22	0,0115	1,304	0,3	0,02	0,42	6	210	0,2	400	2
3	5	5,33	0,0120	1,408	0,4	0,03	0,43	7	220	0,3	500	3
4	6	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,44	8	230	0,4	600	4
5	7	4,22	0,0115	1,304	0,3	0,02	0,45	9	200	0,2	300	1
6	3	5,33	0,0120	1,408	0,4	0,03	0,46	10	210	0,1	400	2
7	4	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,47	11	220	0,2	500	3
8	5	4,22	0,0115	1,304	0,3	0,02	0,49	12	230	0,3	600	4
9	6	5,33	0,0120	1,408	0,4	0,03	0,41	13	200	0,4	300	1
10	7	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,42	14	210	0,2	400	2
11	3	4,22	0,0115	1,304	0,3	0,02	0,43	15	220	0,1	500	3
12	4	5,33	0,0120	1,408	0,4	0,03	0,44	14	230	0,2	600	4
13	5	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,45	13	200	0,3	300	1
14	6	4,22	0,0115	1,304	0,3	0,02	0,46	12	210	0,4	400	2
15	7	5,33	0,0120	1,408	0,4	0,03	0,47	11	220	0,2	500	3
16	3	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,49	10	230	0,1	600	4
17	4	4,22	0,0115	1,304	0,3	0,02	0,41	9	200	0,2	300	1
18	5	5,33	0,0120	1,408	0,4	0,03	0,42	8	210	0,3	400	2
19	6	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,43	7	220	0,4	500	3
20	7	4,22	0,0115	1,304	0,3	0,02	0,44	6	230	0,2	600	4
21	3	5,33	0,0120	1,408	0,4	0,03	0,45	5	200	0,1	300	1
22	4	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,46	4	210	0,2	400	2
23	5	4,22	0,0115	1,304	0,3	0,02	0,47	3	220	0,3	500	3
24	6	5,33	0,0120	1,408	0,4	0,03	0,49	2	230	0,4	600	4
25	5	4,22	0,0125	1,706	0,4	0,02	0,48	10	227	0,2	500	2

26	1	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,41	5	200	0,1	100	1
27	2	4,22	0,0115	1,304	0,3	0,02	0,42	6	210	0,2	200	2
28	3	5,33	0,0120	1,408	0,4	0,03	0,43	7	220	0,3	300	3
29	4	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,44	8	230	0,4	400	4
30	5	4,22	0,0115	1,304	0,3	0,02	0,45	9	200	0,2	500	1
31	6	5,33	0,0120	1,408	0,4	0,03	0,46	10	210	0,1	600	2
32	7	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,47	11	220	0,2	700	3
33	8	4,22	0,0115	1,304	0,3	0,02	0,49	12	230	0,3	800	4
34	9	5,33	0,0120	1,408	0,4	0,03	0,41	13	200	0,4	900	1
35	1	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,42	14	210	0,2	100	2
36	2	4,22	0,0115	1,304	0,3	0,02	0,43	15	220	0,1	200	3
37	3	5,33	0,0120	1,408	0,4	0,03	0,44	14	230	0,2	300	4
38	4	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,45	13	200	0,3	400	1
39	5	4,22	0,0115	1,304	0,3	0,02	0,46	12	210	0,4	500	2
40	6	5,33	0,0120	1,408	0,4	0,03	0,47	11	220	0,2	600	3
41	7	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,49	10	230	0,1	700	4
42	8	4,22	0,0115	1,304	0,3	0,02	0,41	9	200	0,2	800	1
43	9	5,33	0,0120	1,408	0,4	0,03	0,42	8	210	0,3	900	2
44	1	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,43	7	220	0,4	100	3
45	2	4,22	0,0115	1,304	0,3	0,02	0,44	6	230	0,2	200	4
46	3	5,33	0,0120	1,408	0,4	0,03	0,45	5	200	0,1	300	1
47	4	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,46	4	210	0,2	400	2
48	5	4,22	0,0115	1,304	0,3	0,02	0,47	3	220	0,3	500	3
49	6	5,33	0,0120	1,408	0,4	0,03	0,49	2	230	0,4	600	4
50	7	4,22	0,0105	1,205	0,2	0,02	0,44	6	210	0,2	700	1
51	8	5,33	0,0115	1,304	0,3	0,03	0,45	5	220	0,3	800	2
52	9	3,11	0,0120	1,408	0,4	0,01	0,46	2	230	0,4	900	3
53	1	4,22	0,0115	0,49	0,3	0,02	0,49	3	230	0,2	200	4
54	2	5,33	0,0120	0,44	0,4	0,03	0,44	4	200	0,1	300	1
55	3	4,22	0,0105	0,45	0,2	0,01	0,45	5	210	0,2	400	2
56	4	5,33	0,0115	0,46	0,3	0,03	0,46	6	220	0,3	500	3
57	5	5,33	0,0120	0,44	0,4	0,01	0,44	7	230	0,4	600	4
58	6	4,22	0,0105	0,45	0,2	0,02	0,45	8	210	0,2	700	1
59	7	5,33	0,0115	0,46	0,3	0,03	0,46	9	220	0,3	800	2
60	8	3,11	0,0120	0,47	0,4	0,02	0,47	1	230	0,4	900	3
61	3	3,11	0,0105	1,408	0,4	0,03	0,45	5	200	0,1	300	1
62	4	4,22	0,0115	1,205	0,2	0,01	0,46	6	210	0,2	400	2
63	5	5,33	0,0120	1,304	0,3	0,02	0,47	7	220	0,3	500	3
64	6	3,11	0,0105	1,408	0,4	0,03	0,49	8	230	0,4	600	4
65	7	4,22	0,0115	1,706	0,4	0,02	0,48	9	200	0,2	300	1
66	3	5,33	0,0120	1,205	0,2	0,01	0,41	10	210	0,1	400	2
67	4	3,11	0,0105	1,304	0,3	0,02	0,42	11	220	0,2	500	3
68	5	4,22	0,0115	1,408	0,4	0,03	0,43	12	230	0,3	600	4
69	6	5,33	0,0120	1,205	0,2	0,01	0,44	13	200	0,4	300	1
70	7	3,11	0,0105	1,304	0,3	0,02	0,45	14	210	0,2	400	2

71	3	4,22	0,0115	1,408	0,4	0,03	0,46	15	220	0,1	500	3
72	8	5,33	0,0120	1,205	0,2	0,01	0,47	14	230	0,2	600	4
73	3	3,11	0,0105	1,304	0,3	0,02	0,49	13	200	0,3	300	1
74	4	4,22	0,0115	1,408	0,4	0,03	0,41	12	210	0,4	400	2
75	5	5,33	0,0120	1,205	0,2	0,01	0,42	11	220	0,2	500	3
76	6	3,11	0,0105	1,304	0,3	0,02	0,43	10	230	0,1	600	4
77	7	4,22	0,0115	1,408	0,4	0,03	0,44	9	200	0,2	300	1
78	3	5,33	0,0120	1,205	0,2	0,01	0,45	8	210	0,3	400	2
79	4	3,11	0,0105	1,304	0,3	0,02	0,46	7	220	0,4	500	3
80	5	4,22	0,0115	1,408	0,4	0,03	0,47	6	230	0,2	600	4
81	6	5,33	0,0120	1,205	0,2	0,01	0,49	5	200	0,1	300	1
82	7	4,22	0,0115	1,408	0,3	0,02	0,41	4	210	0,2	400	2
83	5	5,33	0,0120	1,205	0,4	0,03	0,42	3	220	0,3	500	3
84	6	3,11	0,0105	1,304	0,2	0,01	0,43	2	230	0,4	600	4
85	5	4,22	0,0115	1,408	0,3	0,02	0,44	10	227	0,2	500	2
86	1	5,33	0,0120	1,205	0,4	0,03	0,45	5	200	0,1	100	1
87	2	3,11	0,0105	1,304	0,2	0,01	0,46	6	210	0,2	200	2
88	8	4,22	0,0115	1,408	0,3	0,02	0,47	7	220	0,3	300	3
89	3	5,33	0,0120	1,205	0,4	0,03	0,49	8	230	0,4	400	4
90	4	4,22	0,0125	1,408	0,4	0,03	0,47	9	200	0,2	500	1
91	5	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,49	10	210	0,1	600	2
92	6	4,22	0,0115	1,408	0,3	0,02	0,41	11	220	0,2	700	3
93	7	4,22	0,0115	1,205	0,4	0,03	0,42	12	230	0,3	800	4
94	3	5,33	0,0120	1,304	0,2	0,01	0,43	13	200	0,4	900	1
95	4	3,11	0,0105	1,408	0,3	0,02	0,44	14	210	0,2	100	2
96	5	4,22	0,0115	1,205	0,4	0,03	0,45	15	220	0,1	200	3
97	6	5,33	0,0120	1,304	0,2	0,01	0,46	14	230	0,2	300	4
98	7	3,11	0,0105	1,408	0,3	0,02	0,47	13	200	0,3	400	1
99	5	4,22	0,0115	1,205	0,4	0,03	0,49	12	210	0,4	500	2
100	6	5,33	0,0120	1,304	0,2	0,02	0,44	11	220	0,2	600	3
101	4	5,33	0,0115	1,408	0,4	0,03	0,45	15	200	0,1	700	1
102	5	3,11	0,0120	1,205	0,2	0,01	0,46	14	210	0,2	800	2
103	6	4,22	0,0115	1,304	0,3	0,02	0,47	13	220	0,3	900	3
104	7	5,33	0,0120	1,408	0,4	0,03	0,49	12	230	0,4	100	4
105	5	4,22	0,0105	1,205	0,4	0,03	0,47	11	200	0,2	200	1
106	6	3,11	0,0115	1,304	0,2	0,01	0,49	5	210	0,1	300	2
107	1	4,22	0,0120	1,408	0,3	0,02	0,41	6	220	0,2	400	3
108	2	4,22	0,0105	1,205	0,4	0,03	0,42	7	230	0,3	500	4
109	8	5,33	0,0115	1,408	0,2	0,01	0,43	8	200	0,4	600	1
110	3	3,11	0,0120	1,205	0,3	0,02	0,44	9	210	0,2	100	2
111	4	4,22	0,0125	1,304	0,4	0,03	0,45	10	220	0,1	200	3
112	5	5,33	0,0105	1,408	0,2	0,01	0,46	11	230	0,2	300	4
113	6	3,11	0,0115	1,205	0,3	0,02	0,47	12	200	0,3	400	1
114	7	4,22	0,0115	1,304	0,4	0,03	0,49	13	210	0,4	500	2
115	3	5,33	0,0120	1,408	0,2	0,02	0,44	14	220	0,2	600	3

## **2. ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

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

### **2.1. Структура пояснительной записки**

В пояснительной записке материал располагается следующим образом:

1. *Титульный лист* является первой страницей и оформляется в соответствии с определенными требованиями.

2. *Бланк задания* на курсовой проект – основной документ, используемый при выполнении курсового проекта (прил. 1). 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 структурной схемы разрабатываемой ССЧСГ.

5. *Основная часть*. Синтез регулятора для настройки ССЧСГ на оптимум по модулю; синтез регулятора для настройки ССЧСГ на симметричный оптимум; анализ результатов моделирования.

6. *Заключение*. Приводятся результаты разработки ССЧСГ.

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

8. *Приложения*.

### **2.2. Оформление пояснительной записки**

Объем пояснительной записки составляет 20–25 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 2.105-95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам.

2. ГОСТ 7.32-2001 СИБИБД. Отчет о научно-исследовательской работе.

Структура и правила оформления.



### 3. ГОСТ Р 7.0.100-2018 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления»

Пояснительная записка выполняется одним из следующих способов: рукописным или 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 ссылке, 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;
- применять сокращение слов, кроме установленных правилами русской орфографии, пунктуации, а также соответствующих государственным стандартам;
- использовать в тексте 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) именуется рисунками. Они должны быть связаны с текстом и содержать подрисуючную подпись. Рисунок располагают в работе после первого упоминания его в тексте или на следующей странице. Все рисунки имеют сквозную нумерацию в пределах раздела. Каждая подрисуючная 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 структурные схемы динамической модели ССЧСГ и соответствующие им Simulink-модели.

### 3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

#### 3.1. Разработка структурной схемы динамической модели системы стабилизации частоты синхронного генератора

Структурная схема динамической модели системы стабилизации частоты синхронного генератора (ССЧСГ) разрабатывается на основе анализа его структурной схемы, который проводится с целью выявления особенностей построения информационного и силового каналов ССЧСГ.

По результатам анализа формулируются недостатки и намечаются пути модернизации ССЧСГ с учетом исходных данных.

Структурная схема системы стабилизации частоты синхронного генератора представлена на рис. 3.1.

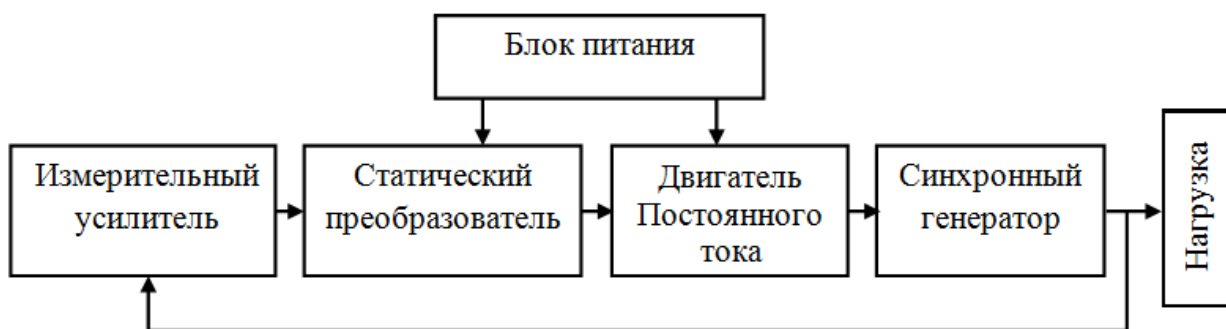


Рис. 3.1. Структурная схема системы стабилизации частоты синхронного генератора

Вращение вала синхронного генератора осуществляется от двигателя постоянного тока с управлением по цепи обмотки возбуждения широтно-импульсным сигналом статического преобразователя. На якорь двигателя подается постоянное напряжение с блока питания. Переменное напряжение с выхода синхронного генератора поступает в нагрузку и по цепи обратной связи на измерительный усилитель, осуществляющий преобразование частоты в напряжение, которым управляется статический преобразователь.

На рис. 3.2 изображена структурная схема динамической модели системы стабилизации частоты синхронного генератора.

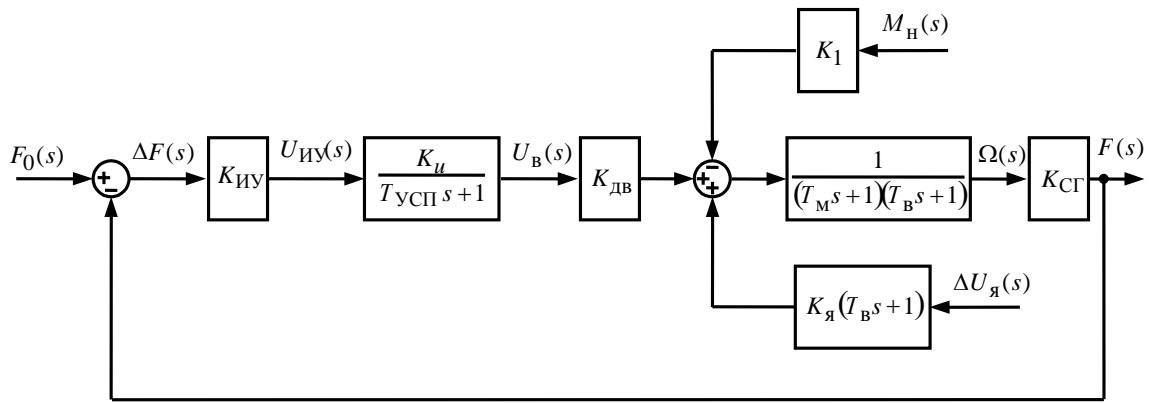


Рис. 3.2. Структурная схема динамической модели системы стабилизации частоты синхронного генератора

Задающим воздействием является номинальное значение частоты  $f_0$ , выходной координатой – фактическая частота синхронного генератора  $f_{СГ}$ , а возмущающими воздействиями – отклонение напряжения на якоре  $\Delta U_{я}$  и момент нагрузки  $M_{н}$ . Отклонение частоты от номинального значения  $\Delta f = f_0 - f_{СГ}$  является ошибкой системы.

### Методические указания по выполнению курсового проекта

Рассмотрим выполнение курсового проекта на конкретном примере:  
 $K_{ИУ} = 5$  В/Гц;  $K_u = 4,22$ ;  $T_{УСП} = 0,0125$  с;  $T_B = 0,02$  с;  $T_M = 0,4$  с;  
 $M_{н} = 0,2$  Н·м;  $K_{ДВ} = 1,706$  рад/(В·с);  $K_{СГ} = 0,48$  (Гц·с)/рад;  $K_1 = 10$  1/(Н·м·с);  
 $\Delta U_{я} = 2$  В;  $K_{я} = 227$  рад/(В·с);  $f_0 = 500$  Гц.

## 3.2. Синтез РЧ для настройки ССЧСГ на ОМ

### Определение структуры РЧ

Рассчитаем передаточную функцию разомкнутой ССЧСГ с учётом включенного последовательно с усилителем РЧ и сопоставим полученное выражение с известной передаточной функцией контура, настроенного на ОМ.

Передаточная функция разомкнутой ССЧСГ с РЧ

$$W(s) = \frac{F(s)}{\Delta F(s)} = W_I(s)W_{II}(s) = W_{РЧ}(s) \frac{K_{ИУ}K_uK_{ДВ}K_{СГ}}{(T_{УСП}s + 1)(T_M s + 1)(T_B s + 1)}. \quad (3.1)$$

Передаточная функция контура, настроенного на ОМ,

$$W(s) = \frac{1}{2T_{\Sigma}s(T_{\Sigma}s + 1)}, \quad (3.2)$$

где  $T_{\Sigma} = T_{УСП} + T_{В}$  – суммарная малая постоянная времени.

Приравняем передаточную функцию разомкнутой ССЧСГ с учётом последовательно включенного с усилителем РЧ к передаточной функции контура, настроенного на ОМ:

$$W_{РЧ}(s) \frac{K_{ИУ}K_uK_{дв}K_{СГ}}{(T_{УСП}s + 1)(T_Ms + 1)(T_{В}s + 1)} = \frac{1}{2T_{\Sigma}s(T_{\Sigma}s + 1)}.$$

Найдем передаточную функцию РЧ:

$$W_{РЧ}(s) = \frac{T_Ms + 1}{2K_{ИУ}K_uK_{дв}K_{СГ}T_{\Sigma}s}. \quad (3.3)$$

Полученное выражение по своей структуре является передаточной функцией ПИ-регулятора

$$W_{РЧ}(s) = \frac{K_{РЧ}(T_{РЧ}s + 1)}{T_{РЧ}s} = \frac{K_{РЧ}T_{РЧ}s + K_{РЧ}}{T_{РЧ}s}. \quad (3.4)$$

*Расчет коэффициентов ПИ-регулятора*

Коэффициенты ПИ-регулятора вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} K_{РЧ}(s) &= \frac{T_M}{2K_{ИУ}K_uK_{дв}K_{СГ}T_{\Sigma}} = \\ &= \frac{0,4}{2 \cdot 5 \cdot 4,22 \cdot 1,706 \cdot 0,48(0,0125 + 0,02)} = 0,356 \end{aligned} \quad ; \quad (3.5)$$

$$T_{РЧ} = T_M = 0,4с.$$

Подставив в формулу передаточной функции ПИ-регулятора численные значения, получим выражение передаточной функции РЧ для моделирования в системе MATLAB Simulink:

$$W_{PC}(s) = \frac{K_{PC}(T_{PC}s + 1)}{T_{PC}s} = \frac{0,356 \cdot (0,4s + 1)}{0,4s} = \frac{0,4s + 1}{1,123s}. \quad (3.6)$$

### 3.3. Моделирование настроенной на ОМ ССЧСГ в системе MATLAB Simulink

Simulink-модель ССЧСГ с РЧ представлена на рис. 3.3.

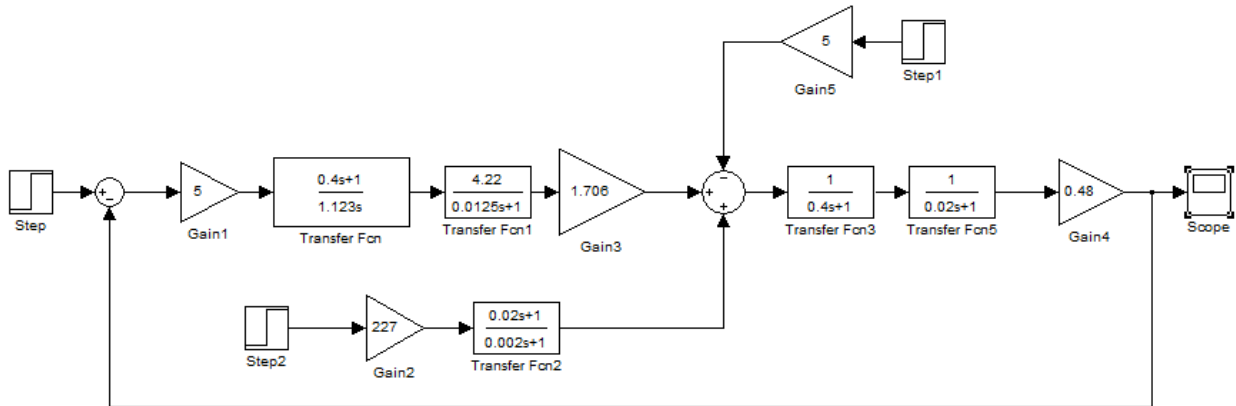


Рис. 3.3

#### Построение и анализ переходных характеристик. Оценка установившихся ошибок системы

В MATLAB Simulink для построения переходной характеристики КС по задающему воздействию  $f_0$  в блоке **Step** зададим входное воздействие  $f_0 = 500$  Гц, а в блоках **Step 1** и **Step 2** – значения момента нагрузки  $M_H$  и изменения напряжения на якоре  $\Delta U_{\text{я}}$  равными нулю. Соответствующая переходная характеристика изображена на рис. 3.4.

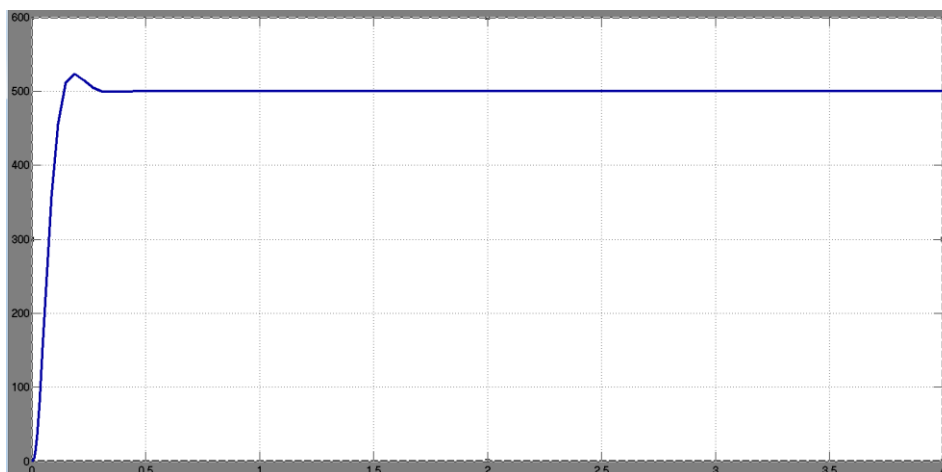


Рис. 3.4

По графику переходной характеристики КС по задающему воздействию  $f_0$  (рис. 3.4) определим максимальное значение частоты СГ  $f_{\max} = 523$  Гц и установившееся –  $f_{\text{уст}} = 500$  Гц.

По этим данным рассчитаем перерегулирование:

$$\sigma = \frac{f_{\max} - f_{\text{уст}}}{f_{\text{уст}}} \cdot 100 \% = \frac{523 - 500}{500} \cdot 100 \% = 4,6 \% . \quad (3.7)$$

Время нарастания определим в первой точке пересечения графика переходной функции и установившегося значения:  $t_{\text{н}} = 0,14$  с.

Проверим соответствие полученного значения требованиям настройки на ОМ путем сравнения его с расчетным значением:

$$t_{\text{н}} \cong 4,7T_{\Sigma} = 4,7 \cdot 0,0325 = 0,15 \text{ с.} \quad (3.8)$$

Для построения переходной характеристики по моменту нагрузки  $M_{\text{н}}$  в блоках **Step** и **Step 2** установим нулевые значения, а в блоке **Step 1** –  $M_{\text{н}} = 0,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Полученная переходная характеристика представлена на рис. 3.5.

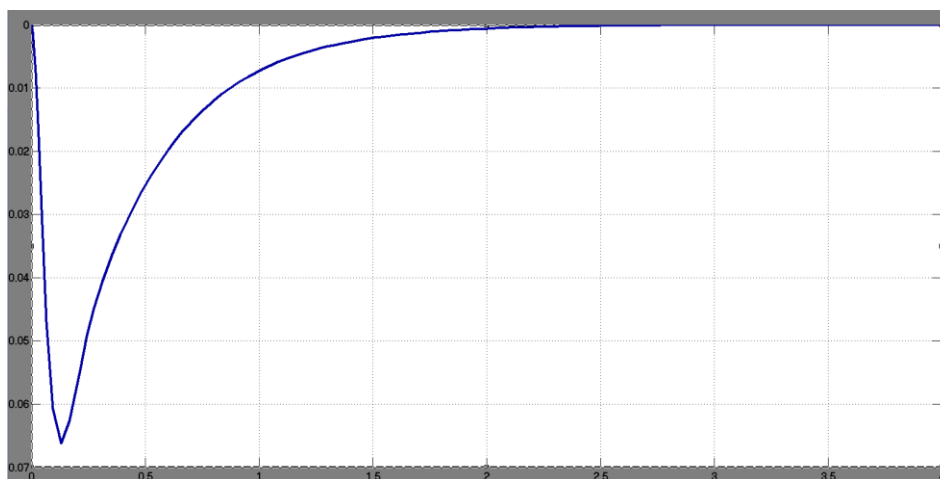


Рис. 3.5

Из графика переходной характеристики КС по моменту нагрузки  $M_H$  (рис. 3.5) видно, что при воздействии неизменного по величине момента нагрузки  $M_H$  моментная составляющая ошибки  $\Delta f_{ст}^M$  примерно через 2,5 с становится равной нулю, что обусловлено наличием в структуре регулятора частоты интегральной составляющей.

Для построения переходной характеристики при отработке ступенчатого изменения напряжения на якоре (рис. 3.6) в блоке **Step2** установим  $\Delta U_{я} = 2$  В, а в блоках **Step** и **Step1** – нулевые значения.

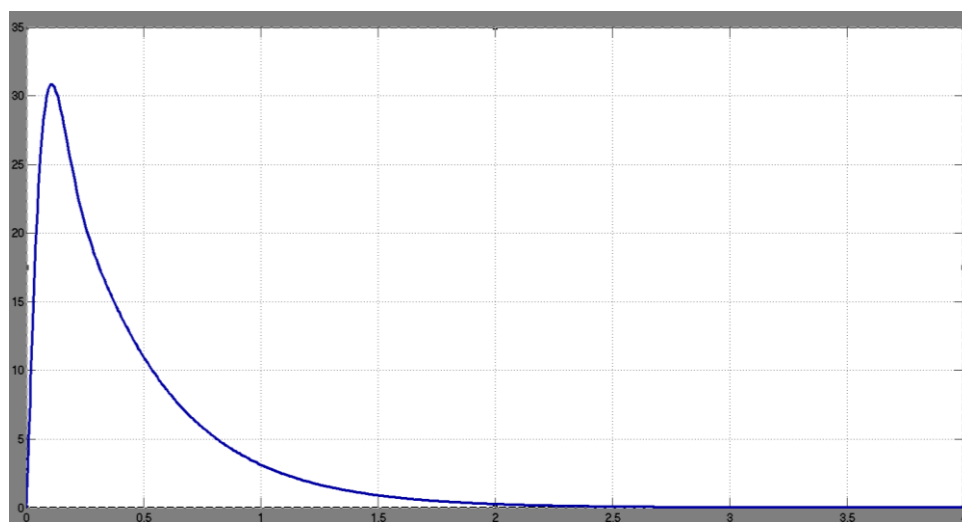


Рис. 3.6

Из графика переходной характеристики КС при отработке ступенчатого изменения напряжения на якоре  $\Delta U_{я}$  (рис. 3.6) видно, что составляющая ошибки примерно через 2,5 с становится равной нулю. Это обусловлено наличием в структуре РЧ интегральной составляющей.



Для построения переходной характеристики при обработке линейно возрастающего напряжения на якоре (рис. 3.7) линейно возрастающее воздействие смоделируем при помощи блока **Ramp**, находящегося в библиотеке блоков **Sources**, в диалоговом окне которого установим значение  $\Delta\dot{U}_я = 2$  В/с.

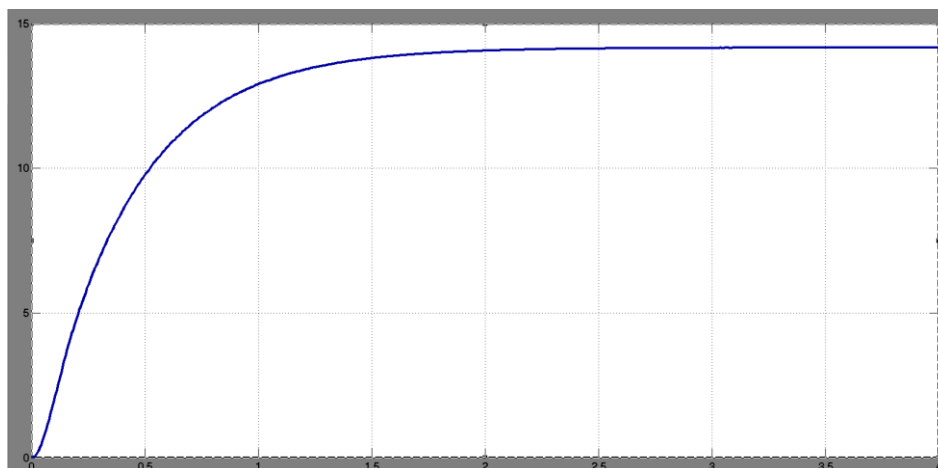


Рис. 3.7

При воздействии на систему возмущения в виде линейно возрастающего напряжения на якоре  $\Delta\dot{U}_я$  (рис. 3.7) появляется ошибка регулирования  $\Delta f_{ст}^{\Delta u} = 14,16$  Гц. Расчет установившейся ошибки производится на основании теоремы о конечном значении по формуле:

$$\begin{aligned}
 \Delta f_{ст}^{\Delta u} &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \Phi_{\Delta f}^{\Delta u}(s) \cdot \frac{\Delta\dot{U}_я}{s^2} = \\
 &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{-2T_{\Sigma}K_яK_{СГ}(T_{УСП}s+1)(T_Бs+1)s}{2T_{\Sigma}(T_{УСП}s+1)(T_Мs+1)(T_Бs+1)s+(T_Мs+1)} \cdot \frac{\Delta\dot{U}_я}{s^2} = \\
 &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{-2T_{\Sigma}K_яK_{СГ}(T_{УСП}s+1)(T_Бs+1)s}{2T_{\Sigma}(T_{УСП}s+1)(T_Мs+1)(T_Бs+1)s+(T_Мs+1)} \cdot \frac{\Delta\dot{U}_я}{s} = \\
 &= -2 \cdot T_{\Sigma} \cdot K_я \cdot K_{СГ} \cdot \Delta\dot{U}_я = -2 \cdot 0,0325 \cdot 227 \cdot 0,48 \cdot 2 = -14,16 \text{ Гц},
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

где  $\Phi_{\Delta f}^{\Delta u}(s)$  – передаточная функция замкнутой ССЧСГ по ошибке  $\Delta F(s)$  относительно возмущающего воздействия  $\Delta\dot{U}_я(s)$  с учетом РЧ вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned}
\Phi_{\Delta f}^{\Delta u}(s) &= \frac{\Delta F(s)}{\Delta U_{\text{я}}(s)} = -\Phi_{\Delta u}(s) = -\frac{F(s)}{\Delta U_{\text{я}}(s)} = -\frac{W_u(s)W_{\Pi}(s)}{1+W(s)} = \\
&= -\frac{\frac{K_{\text{я}}K_{\text{сг}}(T_{\text{б}}s+1)}{(T_{\text{м}}s+1)(T_{\text{б}}s+1)}}{1+\frac{(T_{\text{м}}s+1)K_{\text{иу}}K_uK_{\text{дв}}K_{\text{сг}}}{2K_{\text{иу}}K_uK_{\text{дв}}K_{\text{сг}}T_{\Sigma}s(T_{\text{у.с.п.}}s+1)(T_{\text{м}}s+1)(T_{\text{б}}s+1)}} = \quad (3.10) \\
&= -\frac{2T_{\Sigma}K_{\text{я}}K_{\text{сг}}(T_{\text{у.с.п.}}s+1)(T_{\text{б}}s+1)s}{2T_{\Sigma}(T_{\text{у.с.п.}}s+1)(T_{\text{м}}s+1)(T_{\text{б}}s+1)s+(T_{\text{м}}s+1)}.
\end{aligned}$$

### Построение ЛЧХ разомкнутой ССЧСГ

Для построения ЛЧХ вычислим передаточную функцию разомкнутой ССЧСГ с учётом РЧ:

$$\begin{aligned}
W(s) &= W_{\text{РЧ}}(s) \frac{K_{\text{иу}}K_uK_{\text{дв}}K_{\text{сг}}}{(T_{\text{у.с.п.}}s+1)(T_{\text{м}}s+1)(T_{\text{б}}s+1)} = \\
&= \frac{T_{\text{м}}s+1}{2K_{\text{иу}}K_uK_{\text{дв}}K_{\text{сг}}T_{\Sigma}s} \cdot \frac{K_{\text{иу}}K_uK_{\text{дв}}K_{\text{сг}}}{(T_{\text{у.с.п.}}s+1)(T_{\text{м}}s+1)(T_{\text{б}}s+1)} = \quad (3.11) \\
&= \frac{1}{2T_{\Sigma}(T_{\text{у.с.п.}}s+1)(T_{\text{б}}s+1)s} = \frac{1}{2(T_{\text{у.с.п.}}+T_{\text{б}})(T_{\text{у.с.п.}}s+1)(T_{\text{б}}s+1)s}.
\end{aligned}$$

Раскроем скобки в полученном выражении и подставим вместо постоянных времени  $T_{\text{у.с.п.}}$  и  $T_{\text{б}}$  соответствующие значения получим окончательное выражение для передаточной функции разомкнутой ССЧСГ с учётом РЧ

$$\begin{aligned}
W(s) &= \frac{1}{2(T_{\text{у.с.п.}}+T_{\text{б}})T_{\text{у.с.п.}}T_{\text{б}}s^3 + 2(T_{\text{у.с.п.}}+T_{\text{б}})^2s^2 + 2(T_{\text{у.с.п.}}+T_{\text{б}})s} = \\
&= \frac{1}{1,625 \cdot 10^{-5}s^3 + 2,1125 \cdot 10^{-3}s^2 + 0,065s}. \quad (3.12)
\end{aligned}$$

Для построения ЛЧХ ССЧСГ, настроенного на ОМ, в MATLAB Simulink запишем следующую программу:

```
num = [1];  
den = [1.625e-5 2.1125e-3 0.065 0];  
sys = tf(num, den);  
bode(sys)
```

Результат выполнения программы представлен на рис. 3.8.

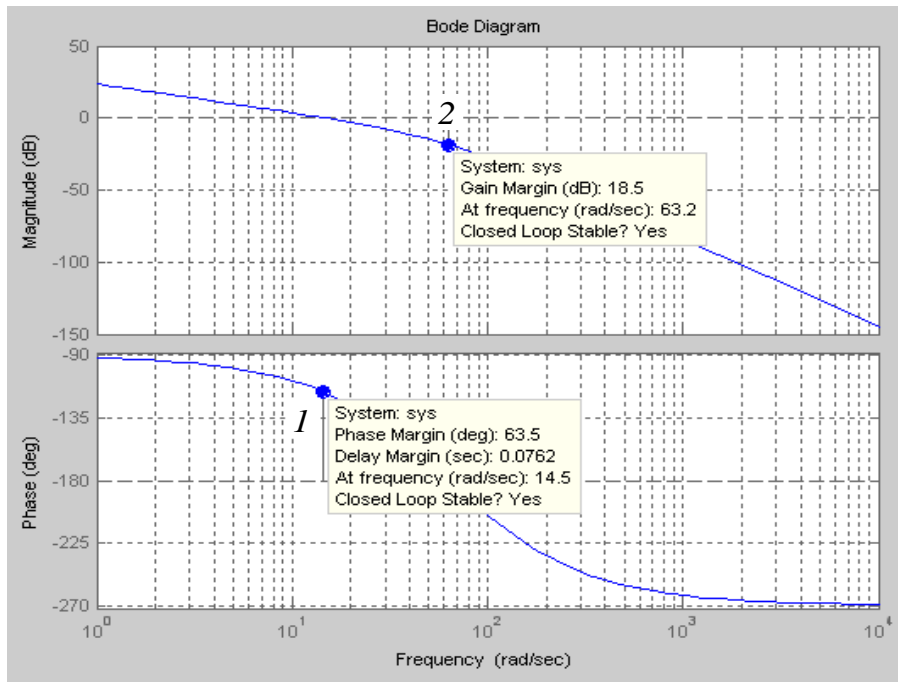


Рис. 3.8

### Анализ ЛЧХ и оценка устойчивости ССЧСГ с определением запасов устойчивости по фазе и амплитуде

Запасы устойчивости ССЧСГ по фазе  $\theta_3 = 63,5^\circ$  (рис. 3.8, разница между значением фазы в точке 1 и значением минус  $180^\circ$ ) и амплитуде  $L_3 = 18,5$  дБ (рис. 3.8, разница между значением амплитуды в точке точка 2 и уровнем нуля) соответствуют контуру, настроенному на ОМ.

Результаты моделирования подтверждают правильность расчёта параметров РЧ и позволяют сделать вывод о том, что ССЧСГ настроена на ОМ.

Вместе с тем, при отработке линейно возрастающего воздействия по цепи якоря появляется погрешность равная минус 14,16 Гц. Для её устранения представляется целесообразным повысить порядок астатизма системы, применив настройку на СО.

### 3.4. Синтез РЧ для настройки ССЧСГ на СО

#### Определение структуры РЧ

Передаточная функция контура, настроенного на СО,

$$W(s) = \frac{4T_{\Sigma}s + 1}{8T_{\Sigma}^2 s^2 (T_{\Sigma}s + 1)}. \quad (3.13)$$

Приравняем передаточную функцию разомкнутой ССЧСГ, описанную выражением (3.1), к передаточной функции контура, настроенного на СО:

$$W_{\text{РЧ}}(s) \frac{K_{\text{ИУ}} K_u K_{\text{дв}} K_{\text{СГ}}}{(T_{\text{УСП}}s + 1)(T_{\text{М}}s + 1)(T_{\text{В}}s + 1)} = \frac{(4T_{\Sigma}s + 1)}{8T_{\Sigma}^2 s^2 (T_{\Sigma}s + 1)}. \quad (3.14)$$

Находим передаточную функцию РЧ:

$$\begin{aligned} W_{\text{РЧ}}(s) &= \frac{(T_{\text{УСП}}s + 1)(T_{\text{М}}s + 1)(T_{\text{В}}s + 1)(4T_{\Sigma}s + 1)}{8T_{\Sigma}^2 K_{\text{ИУ}} K_u K_{\text{дв}} K_{\text{СГ}} s^2 (T_{\Sigma}s + 1)} = \\ &= \frac{(T_{\text{М}}s + 1)(4T_{\Sigma}s + 1)}{8T_{\Sigma}^2 K_{\text{ИУ}} K_u K_{\text{дв}} K_{\text{СГ}} s^2}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Из полученного выражения следует, что структура регулятора частоты представляет собой последовательное соединение двух ПИ-регуляторов.

Подставляем вместо параметров соответствующие численные значения и получаем выражение передаточной функции РЧ для моделирования в системе MATLAB Simulink:

$$W_{\text{РЧ}}(s) = \frac{(0,4s + 1)(4 \cdot 0,0325s + 1)}{8 \cdot 0,0325^2 \cdot 5 \cdot 4,22 \cdot 1,706 \cdot 0,48s^2} = \frac{0,052s^2 + 0,53s + 1}{0,146s^2}. \quad (3.16)$$

### 3.5. Моделирование настроенной на СО ССЧСГ в системе MATLAB Simulink

Simulink-модель ССЧСГ, настроенной на СО, в системе Simulink представлена на рис. 3.9.

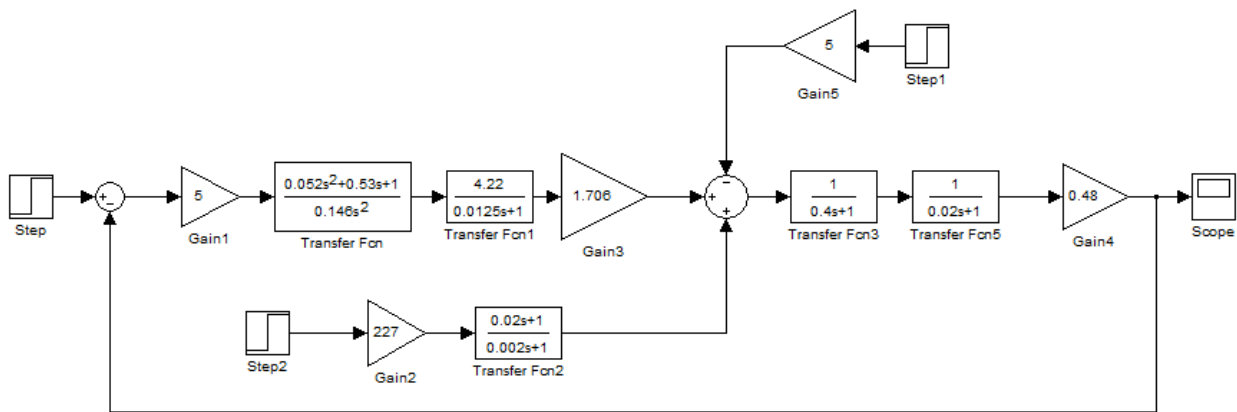


Рис. 3.9

### Построение и анализ переходных характеристик. Оценка установившихся ошибок системы

В результате моделирования были получены переходные характеристики КС (рис. 3.10-3.13).

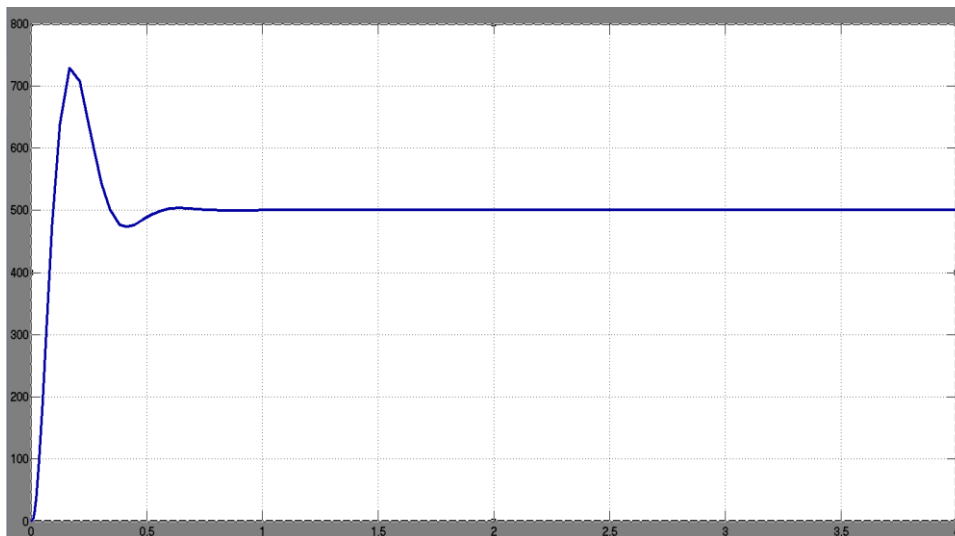


Рис. 3.10

Из графика переходной характеристики по задающему воздействию  $f_0 = 500$  Гц (рис. 3.10) видно, что появление в структуре ССЧСГ, настроенной на СО, второго интегрирующего звена:

1) увеличило перерегулирование:

$$\sigma = \frac{f_{\max} - f_{\text{уст}}}{f_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{730 - 500}{500} \cdot 100\% = 46\% ;$$

2) уменьшило время нарастания до величины  $t_H = 0,1$  с, соответствующей расчётному значению:  $t_H \cong 3,1T_\Sigma = 3,1 \cdot 0,0325 = 0,1$  с.

Из графиков переходных характеристик при отработке ступенчатых изменений момента нагрузки  $M_H$  (рис. 3.11) и по ступенчато изменяющемуся напряжению на якоре  $\Delta U_{я} = 2$  В (рис. 3.12) видно, что составляющие ошибок примерно через 2 с становятся равными нулю.

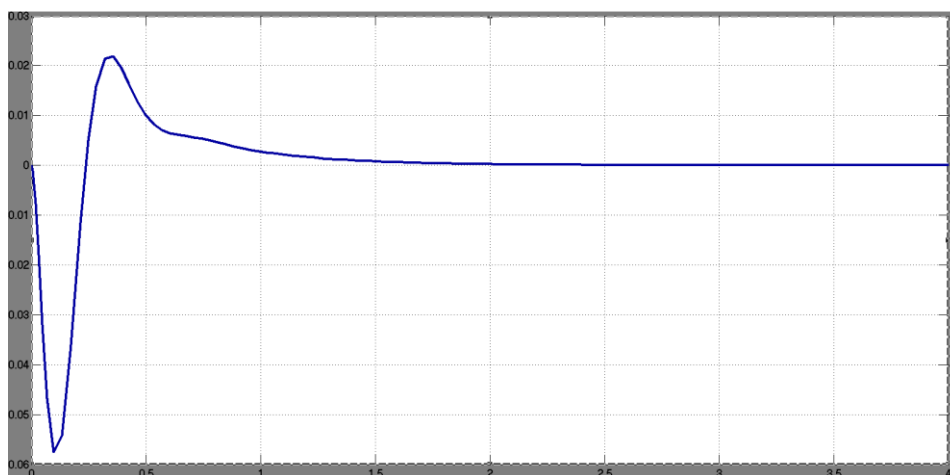


Рис. 3.11

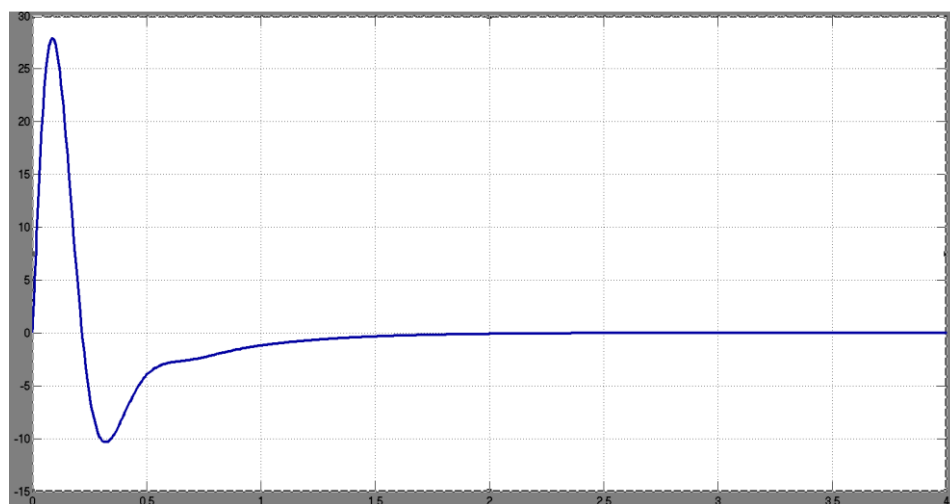


Рис. 3.12

Из графика переходной характеристики при отработке линейно возрастающего напряжения на якоре  $\Delta \dot{U}_{я} = 2$  В/с (рис. 3.13) видно, что за время 2,5 с составляющая ошибки также становится равной нулю.

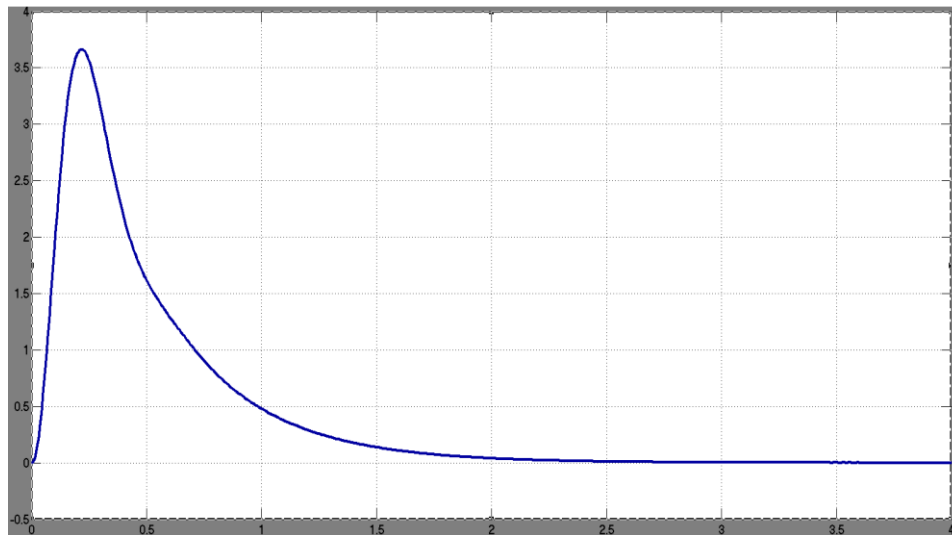


Рис. 3.13

Полученные результаты свидетельствует о том, что ССЧСГ, настроенная на СО, стала точнее по сравнению с системой, настроенной на ОМ.

Подтвердить результаты моделирования можно расчетным методом с помощью теоремы о конечном значении

$$\Delta f_{\text{СТ}}^{\Delta u} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \Phi_{\Delta f}^{\Delta u}(s) \cdot \frac{\Delta \dot{U}_{\text{Я}}}{s^2}.$$

Вычислим передаточную функцию разомкнутой ССЧСГ с учётом РЧ:

$$\begin{aligned} W(s) &= W_{\text{РЧ}}(s) \frac{K_{\text{ИУ}} K_u K_{\text{ДВ}} K_{\text{СГ}}}{(T_{\text{УСП}} s + 1)(T_{\text{М}} s + 1)(T_{\text{В}} s + 1)} = \\ &= \frac{(T_{\text{М}} s + 1)(4T_{\Sigma} s + 1)}{8T_{\Sigma}^2 K_{\text{ИУ}} K_u K_{\text{ДВ}} K_{\text{СГ}} s^2} \cdot \frac{K_{\text{ИУ}} K_u K_{\text{ДВ}} K_{\text{СГ}}}{(T_{\text{УСП}} s + 1)(T_{\text{М}} s + 1)(T_{\text{В}} s + 1)} = \quad (3.17) \\ &= \frac{(4T_{\Sigma} s + 1)}{8T_{\Sigma}^2 s^2 \cdot (T_{\text{УСП}} s + 1)(T_{\text{В}} s + 1)} = \frac{4(T_{\text{УСП}} + T_{\text{В}})s + 1}{8(T_{\text{УСП}} + T_{\text{В}})^2 s^2 \cdot (T_{\text{УСП}} s + 1)(T_{\text{В}} s + 1)}. \end{aligned}$$

Передаточная функция замкнутой ССЧСГ по ошибке относительно возмущающего воздействия равна

$$\begin{aligned}
\Phi_{\Delta f}^{\Delta u}(s) &= \frac{\Delta F(s)}{\Delta U_{\text{я}}(s)} = -\frac{W_u(s)W_{\Pi}(s)}{1+W(s)} = \\
&= -\frac{\frac{K_{\text{я}}K_{\text{СТ}}(T_{\text{Б}}s+1)}{(T_{\text{М}}s+1)(T_{\text{Б}}s+1)}}{1+\frac{(4T_{\Sigma}s+1)}{8T_{\Sigma}^2s^2(T_{\text{УСП}}s+1)(T_{\text{Б}}s+1)}}} = -\frac{\frac{K_{\text{я}}K_{\text{СТ}}}{(T_{\text{М}}s+1)}}{\frac{8T_{\Sigma}^2s^2(T_{\text{УСП}}s+1)(T_{\text{Б}}s+1)+(4T_{\Sigma}s+1)}{8T_{\Sigma}^2s^2(T_{\text{УСП}}s+1)(T_{\text{Б}}s+1)}}} \\
&= -\frac{8T_{\Sigma}^2K_{\text{я}}K_{\text{СТ}}(T_{\text{УСП}}s+1)(T_{\text{Б}}s+1)s^2}{(T_{\text{М}}s+1)[8T_{\Sigma}^2s^2(T_{\text{УСП}}s+1)(T_{\text{Б}}s+1)+(4T_{\Sigma}s+1)]} = \\
&= -\frac{8T_{\Sigma}^2K_{\text{я}}K_{\text{СТ}}(T_{\text{УСП}}s+1)(T_{\text{Б}}s+1)s^2}{8T_{\Sigma}^2s^2(T_{\text{УСП}}s+1)(T_{\text{Б}}s+1)+(4T_{\Sigma}s+1)+8T_{\Sigma}^2T_{\text{М}}s^3(T_{\text{УСП}}s+1)(T_{\text{Б}}s+1)+4T_{\Sigma}T_{\text{М}}s^2+T_{\text{М}}s}.
\end{aligned}$$

Ошибка по возмущающему воздействию равна

$$\begin{aligned}
\Delta f_{\text{СТ}}^{\Delta u} &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \Phi_{\Delta f}^{\Delta u}(s) \cdot \frac{\Delta \dot{U}_{\text{я}}}{s^2} = \\
&= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{-8T_{\Sigma}^2K_{\text{я}}K_{\text{СТ}}(T_{\text{УСП}}s+1)(T_{\text{Б}}s+1)s^2}{8T_{\Sigma}^2s^2(T_{\text{УСП}}s+1)(T_{\text{Б}}s+1)+(4T_{\Sigma}s+1)+8T_{\Sigma}^2T_{\text{М}}s^3(T_{\text{УСП}}s+1)(T_{\text{Б}}s+1)+4T_{\Sigma}T_{\text{М}}s^2+T_{\text{М}}s} \cdot \frac{\Delta \dot{U}_{\text{я}}}{s^2} = \\
&= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{-8T_{\Sigma}^2K_{\text{я}}K_{\text{СТ}}(T_{\text{УСП}}s+1)(T_{\text{Б}}s+1)}{8T_{\Sigma}^2s^2(T_{\text{УСП}}s+1)(T_{\text{Б}}s+1)+(4T_{\Sigma}s+1)+8T_{\Sigma}^2T_{\text{М}}s^3(T_{\text{УСП}}s+1)(T_{\text{Б}}s+1)+4T_{\Sigma}T_{\text{М}}s^2+T_{\text{М}}s} \cdot \Delta \dot{U}_{\text{я}} = 0
\end{aligned}$$



## Построение ЛЧХ разомкнутой ССЧСГ

В полученном выражении для передаточной функции ССЧСГ с учётом РЧ (3.17) раскроем скобки и вместо постоянных времени и коэффициентов передачи подставим соответствующие значения. Таким образом, получим окончательное выражение для передаточной функции разомкнутой ССЧСГ с учётом РЧ:

$$W(s) = \frac{4(T_{\text{УСП}} + T_{\text{В}})s + 1}{8(T_{\text{УСП}} + T_{\text{В}})^2 T_{\text{УСП}} T_{\text{В}} s^4 + 8(T_{\text{УСП}} + T_{\text{В}})^3 s^3 + 8(T_{\text{УСП}} + T_{\text{В}})^2 s^2} =$$
$$= \frac{0,13s + 1}{2,1125 \cdot 10^{-6} s^4 + 2,74625 \cdot 10^{-4} s^3 + 8,45 \cdot 10^{-3} s^2}.$$

Для построения ЛЧХ в MATLAB Simulink составим следующую программу:

```
num = [0.13 1];  
den = [2.1125e-6 2.74625e-4 8.45e-3 0 0];  
sys = tf(num, den);  
bode(sys)
```

Результат выполнения программы представлен на рис. 3.14.

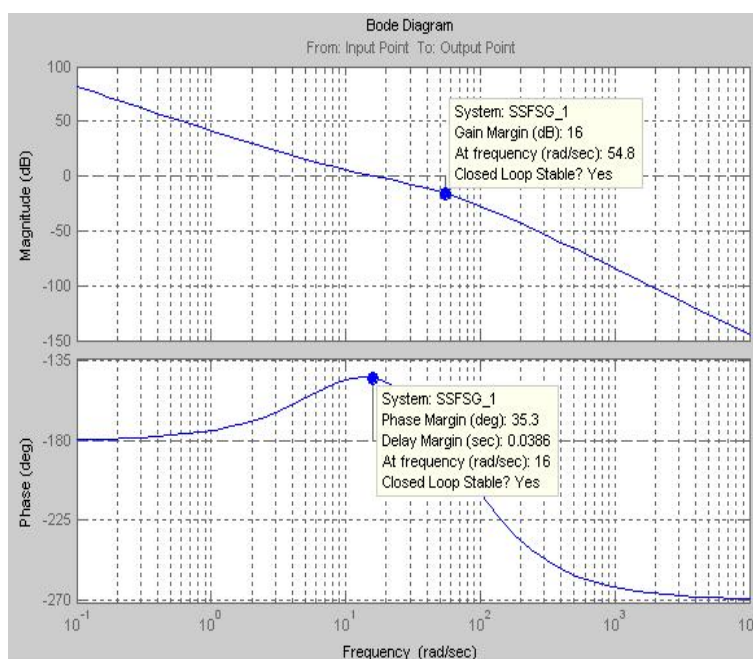


Рис. 3.14

## Анализ ЛЧХ и оценка устойчивости ССЧСГ с определением запасов устойчивости по фазе и амплитуде

Значения запасов устойчивости по фазе  $\theta_3 = 35,3^\circ$  (разница между значением фазы в точке 1 и значением минус  $180^\circ$ ) и амплитуде  $L_3 = 16$  дБ (разница между значением амплитуды в точке 2 и уровнем нуля) подтверждают правильность расчёта параметров РС.

### 3.5. Сравнительный анализ результатов настройки ССЧСГ на ОМ и СО

ССЧСГ, настроенная на ОМ, имеет следующие показатели качества переходного процесса, запасы устойчивости и установившиеся ошибки:

- ошибка регулирования при линейно возрастающем возмущающем воздействии  $\Delta f_{\text{ст}}^{\Delta u} = 14,16$  Гц.
- время нарастания 0,15 с,
- перерегулирование 4,6%,
- запас устойчивости по фазе  $63,5^\circ$ ,
- запас устойчивости по амплитуде 18,5 дБ,

ССЧСГ, настроенная на СО, имеет следующие показатели качества переходного процесса, запасы устойчивости и установившиеся ошибки:

- ошибка регулирования при линейно возрастающем возмущающем воздействии  $\Delta f_{\text{ст}}^{\Delta u} = 0$  Гц.
- время нарастания 0,1 с,
- перерегулирование 46%,
- запас устойчивости по фазе  $35,3^\circ$ ,
- запас устойчивости по амплитуде 16 дБ,

Настройка на СО улучшает быстродействие системы, сводит к нулю ошибку регулирования при линейно возрастающем возмущающем воздействии. Однако существенно увеличивается перерегулирование и уменьшаются запасы устойчивости по фазе и амплитуде.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы автоматического регулирования и управления : практикум : в 2 частях / сост.: В. М. Бутаков [и др.]. - 2-е изд., перераб. и доп. - Казань : КГЭУ, 2022. - Текст : электронный.

Ч. 1. - 2022. - 79 с. - URL: <https://lib.kgeu.ru/> 426эл

2. Системы автоматического регулирования и управления : практикум : в 2 частях / сост. В. М. Бутаков [и др.]. - Казань : КГЭУ, 2022. - Текст : электронный.

Ч. 2. - 2022. - 84 с. - URL: <https://lib.kgeu.ru/>. - ~Б. ц. 448эл

3. Кудинов, Ю. И. Теория автоматического управления (с использованием MATLAB — SIMULINK) : учебное пособие для вузов / Ю. И. Кудинов, Ф. Ф. Пащенко. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 308 с. — ISBN 978-5-8114-5520-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/176901> (дата обращения: 17.05.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Задание и исходные данные для выполнения курсового проекта .....	4
2. Требования к содержанию и оформлению курсового проекта .....	8
2.1. Структура пояснительной записки.....	8
2.2. Оформление пояснительной записки.....	8
2.3. Графическая часть.....	10
3. Разработка системы стабилизации частоты синхронного генератора .....	10
3.1. Разработка структурной схемы динамической модели системы стабилизации частоты синхронного генератора .....	10
3.2. Синтез РЧ для настройки ССЧСГ на ОМ .....	12
3.3. Моделирование настроенной на ОМ ССЧСГ системе MATLAB Simulink .....	14
3.4. Синтез РЧ для настройки ССЧСГ на СО .....	14
3.5. Моделирование настроенной на СО ССЧСГ в системе MATLAB Simulink .....	14
3.6. Сравнительный анализ результатов настройки ССЧСГ на ОМ и СО ...	26
Список рекомендуемой литературы.....	27
Приложение 1. Бланк задания для выполнения курсового проекта .....	30

## ОБРАЗЕЦ БЛАНКА ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

### БЛАНК ЗАДАНИЯ

1. Разработайте регуляторы для системы стабилизации частоты синхронного генератора (ССЧСГ) с применением стандартных настроек и исследуйте ее динамическую модель в системе MATLAB Simulink:

- 1) изучите и опишите структурную схему ССЧСГ;
- 2) синтезируйте регулятор частоты (РЧ), обеспечивающий настройку ССЧСГ на ОМ;
- 3) проведите моделирование ССЧСГ с РЧ в системе Simulink;
- 4) Постройте графики переходных характеристик:
  - по задающему воздействию  $f_0$ ;
  - по моменту сопротивления нагрузки  $M_H$ ;
  - по ступенчато изменяющемуся напряжению на якоре  $\Delta U_{я}$ ;
  - по линейно возрастающему напряжению на якоре  $\Delta \dot{U}_{я}$ ;
- 5) выполните анализ графиков переходных характеристик и оцените установившиеся ошибки системы;
- 6) постройте графики ЛЧХ разомкнутой ССЧСГ в программе MATLAB;
- 7) проведите анализ ЛЧХ и оцените устойчивость ССЧСГ с определением запасов устойчивости по фазе и амплитуде;
- 8) синтезируйте регулятор частоты (РЧ), обеспечивающий настройку ССЧСГ на СО;
- 9) проведите моделирование ССЧСГ с РЧ в системе Simulink;
- 10) Постройте графики переходных характеристик:
  - по задающему воздействию  $f_0$ ;
  - по моменту сопротивления нагрузки  $M_H$ ;
  - по ступенчато изменяющемуся напряжению на якоре  $\Delta U_{я}$ ;
  - по линейно возрастающему напряжению на якоре  $\Delta \dot{U}_{я}$ ;
- 11) выполните анализ графиков переходных характеристик и оцените установившиеся ошибки системы;
- 12) постройте графики ЛЧХ разомкнутой ССЧСГ в программе MATLAB;
- 13) проведите анализ ЛЧХ и оцените устойчивость ССЧСГ с определением запасов устойчивости по фазе и амплитуде;
- 14) проведите сравнительный анализ результатов настройки ССЧСГ на ОМ и СО и сделайте соответствующие выводы.

2. Оформите расчетно-пояснительную записку.

### Исходные данные для расчета

$K_{иу},$ В/Гц	$K_u$	$T_{усп},$ с	$K_{дв},$ $\frac{\text{рад}}{\text{В} \cdot \text{с}}$	$T_m,$ с	$T_v,$ с	$K_{сг},$ $\frac{\text{Гц} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$	$K_1,$ $\frac{1}{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}$	$K_я,$ $\frac{\text{рад}}{\text{В} \cdot \text{с}}$	$M_n,$ Н · м	$f_0,$ Гц	$\Delta U_я,$ В
3	3,11	0,0105	1,205	0,2	0,01	0,41	5	200	0,1	300	1

Руководитель \_\_\_\_\_  
   
 Ф.И.О. руководителя подпись

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Выполнил \_\_\_\_\_  
   
 Ф.И.О. студента, № группы подпись

*Учебное издание*

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
И УПРАВЛЕНИЯ**

Учебно-методическое пособие

**Составители: Бутаков Валерий Михайлович,  
Павлов Павел Павлович,  
Киснеева Лейля Нургалиевна**

Кафедра электротехнических комплексов и систем КГЭУ

Редактор  
Компьютерная верстка

Подписано в печать  
Формат 60×84×16. Усл. печ. Уч.изд л. .  
Заказ № /эл.

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