

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Уральский государственный университет путей сообщения
Кафедра «Электрическая тяга»

М. Г. Дурандин
И. А. Кузьминых
Я. А. Мишин

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Екатеринбург
УрГУПС
2016

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Уральский государственный университет путей сообщения
Кафедра «Электрическая тяга»

М. Г. Дурандин
И. А. Кузьминых
Я. А. Мишин

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Методические указания к выполнению
расчетно-графической работы по дисциплине
«Теория систем автоматического управления» для студентов всех форм
обучения специальности 23.05.03 – «Подвижной состав железных дорог»,
специализаций «Электрический транспорт железных дорог»,
«Высокоскоростной наземный транспорт», «Вагоны»

Екатеринбург
УрГУПС
2016

УДК 629.423

Д84

Дурандин, М. Г.

Д84 Исследование систем автоматического регулирования : метод. указания / М. Г. Дурандин, И. А. Кузьминых, Я. А. Мишин. – Екатеринбург : УрГУПС, 2016. – 34, [2] с.

Содержатся задания на расчетно-графическую работу и методические указания по ее выполнению для студентов всех форм обучения специальности 23.05.03 – «Подвижной состав железных дорог», специализаций «Электрический транспорт железных дорог», «Высокоскоростной наземный транспорт», «Вагоны».

К каждому разделу расчетно-графической работы даны методические указания к его выполнению, необходимые справочные данные и числовой пример выполнения расчетов.

Указания оформлены с соблюдением требований ГОСТ 2.105–95 «Общие требования к текстовым документам».

УДК 629.423

*Опубликовано по решению
редакционно-издательского совета университета*

Авторы: М. Г. Дурандин, доцент кафедры «Электрическая тяга»,
канд. техн. наук, УрГУПС

И. А. Кузьминых, ассистент кафедры «Электрическая тяга»
УрГУПС

Я. А. Мишин, ассистент кафедры «Электрическая тяга»
УрГУПС

Рецензент: В. А. Тихонов, доцент кафедры «Электрическая тяга»,
канд. техн. наук, УрГУПС

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение | 4 |
| 1 Исходные данные и задание на расчетно-графическую работу | 6 |
| 2 Исследование САР режима рекуперации ЭПС постоянного тока | 7 |
| 2.1 Исходные данные | 7 |
| 2.2 Принцип действия САР | 8 |
| 2.3 Функциональная схема САР | 8 |
| 2.4 Определение передаточных функций динамических звеньев САР | 10 |
| 2.5 Анализ устойчивости САР методом D-разбиения | 13 |
| 2.6 Синтез САР | 14 |
| 2.7 Оценка качества регулирования в статическом режиме работы САР | 17 |
| 2.8 Синтез последовательно корректирующим устройством | 18 |
| 2.9 Оценка качества регулирования в динамическом режиме работы САР | 20 |
| Рекомендуемая литература | 22 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А. Бланк задания на расчетно-графическую работу | 23 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Варианты заданий для РГР | 24 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В. Нормы показателей качества регулирования САР | 34 |

Введение

Расчетно-графическая работа на тему «Исследование систем автоматического регулирования» выполняется студентами всех форм обучения по дисциплине «Теория систем автоматического управления» в соответствии с учебным планом специальности 23.05.03 – «Подвижной состав железных дорог».

В ходе выполнения расчетно-графической работы студенты закрепляют теоретические знания по основам теории автоматического регулирования; овладевают методами чтения и составления принципиальных, функциональных и структурных схем САР; усваивают методики анализа устойчивости САР и их синтеза; получают практические навыки в описания типовых динамических звеньев и получении их передаточных функций; знакомятся с показателями качества регулирования САР и методами их получения.

При выполнении расчетно-графической работы у студентов формируется компетенция ПК-11 в части способности применять полученные знания для разработки и внедрения технологических процессов, технологического оборудования и технологической оснастки, средств автоматизации и механизации.

Цель расчетно-графической работы – подготовка специалистов в области подвижного состава по вопросам теории систем автоматического регулирования (САР) и автоматизации электроподвижного состава.

Задачи расчетно-графической работы:

- описание принципа действия САР и составление ее функциональной схемы;
- определение передаточных функций динамических звеньев и разработка структурной схемы САР;
- анализ САР на устойчивость по методу D-разбиения и логарифмическому критерию устойчивости;
- синтез САР;
- оценка качества регулирования САР в статическом режиме ее работы;
- оценка качества регулирования САР в динамическом режиме ее работы.

В соответствии с фондом оценочных средств дисциплины «Теория систем автоматического управления» требования к содержанию расчетно-графической работы входят в состав оценочных средств сформированности компетенций, а методом контроля является защита расчетно-графической работы. Срок проведения оценочной процедуры указывается в календарном плане изучения дисциплины.

Оценка за расчетно-графическую работу выставляется в соответствии со шкалой оценивания результатов освоения дисциплины:

| | | | | |
|--|---|--|---|--|
| Оценочное средство сформированности компетенций | Компетенция не сформирована, соответствует академической оценке «неудовлетворительно» | Уровень 1 (пороговый), соответствует академической оценке «удовлетворительно» | Уровень 2 (средний), соответствует академической оценке «хорошо» | Уровень 3 (высокий), соответствует академической оценке «отлично» |
| Требования к содержанию расчетно-графической работы и качеству ее выполнения | Минимальное соответствие требованиям | Содержание соответствует требованиям, имеются незначительные ошибки. Оформление не в полной мере соответствует требованиям | Содержание соответствует требованиям, имеются незначительные ошибки. Оформление в полной мере соответствует требованиям | Содержание соответствует требованиям, ошибки отсутствуют. Оформление в полной мере соответствует требованиям |

Методическая основа для выполнения расчетно-графической работы:

- лекционный курс по теории автоматического управления;
- рекомендуемая литература;
- методические рекомендации преподавателя на практических занятиях по дисциплине «Теория систем автоматического управления»;
- данное пособие, содержащее числовой пример выполнения разделов расчетно-графической работы.

1 Исходные данные и задание на расчетно-графическую работу

Исходными данными для выполнения работы являются принципиальные схемы систем автоматического регулирования и физические параметры составляющих элементов, приведенные в приложении Б.

Исследование систем автоматического регулирования предполагает последовательное выполнение следующих учебных задач:

- описание принципа действия САР;
- составление функциональной схемы САР;
- определение передаточных функций динамических звеньев;
- разработка структурной схемы САР;
- анализ САР на устойчивость по методу D-разбиения;
- анализ САР на устойчивость по логарифмическому критерию;
- синтез САР;
- оценка качества регулирования САР в статическом режиме ее работы;
- оценка качества регулирования САР в динамическом режиме ее работы;
- формирование выводов по выполненной работе.

Далее в пособии приведен пример выполнения типового задания по анализу и синтезу системы автоматического регулирования режима рекуперации ЭПС постоянного тока.

2 Исследование САР режима рекуперации ЭПС постоянного тока

2.1 Исходные данные

Для анализа САР тягового двигателя ЭПС постоянного тока даны исходные расчетные данные – таблица 2.1, а также принципиальная электрическая схема САР рисунок 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные

| $I_{M \text{ зад}},$ А | $K_{\Phi} = \frac{C\Phi}{I_B}$ | $L_B,$ мГн | $R_B,$ Ом | $V,$ км/ч | $R_a,$ Ом | $L_a,$ мГн | K_{UZ} | $K_{BI},$ В/А | $T_{BI},$ с | K_{np} | $U_{кв},$ В |
|---------------------------|--------------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|----------|------------------|----------------|----------|----------------|
| 200 | 0,13 | 25 | 0,0625 | 50 | 0,08 | 1,5 | 80 | 0,02 | 0,01 | 10 | 3000 |

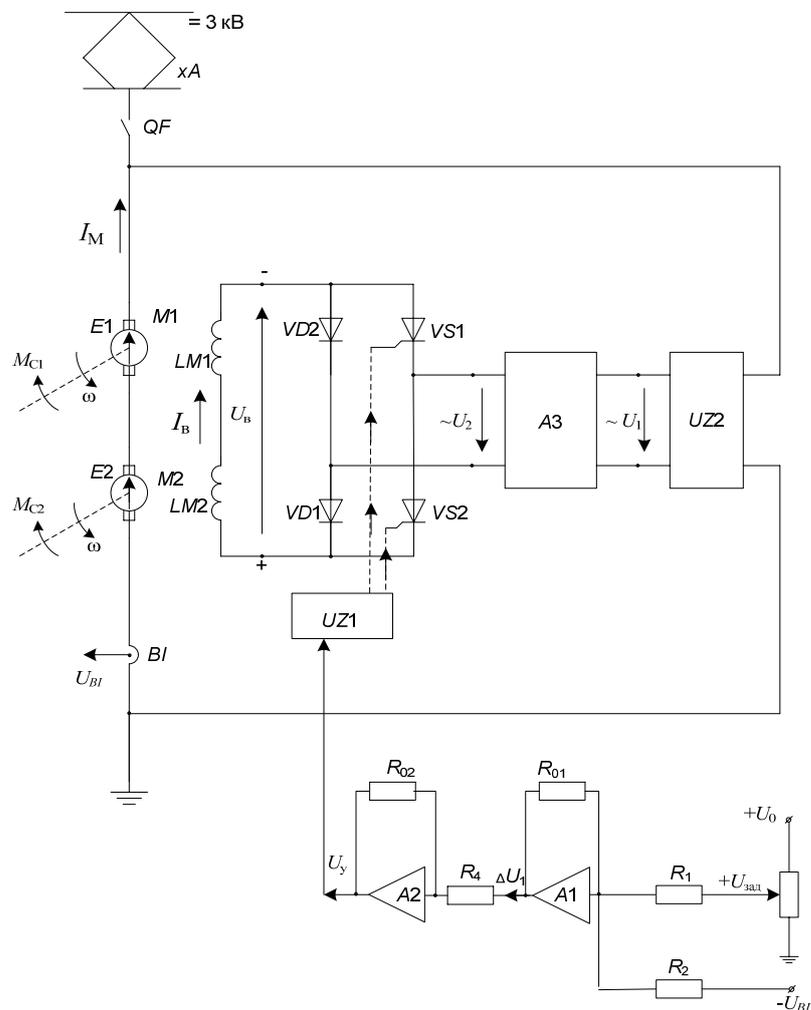


Рисунок 2.1 – Принципиальная электрическая схема САР

2.2 Описание принципа действия САР

Заданная система автоматического регулирования является САР стабилизации тока рекуперации ЭПС постоянного тока.

Она построена по принципу регулирования по ошибке: на элементе сравнения, сформированного на базе операционного усилителя $A1$, постоянно сравнивается заданное напряжение $U_{зад}$ с напряжением датчика тока U_{BI} . В результате на выходе элемента сравнения формируется сигнал рассогласования ΔU_1 , который поступает на П-регулятор на базе операционного усилителя $A2$, формирующий пропорциональный закон управления в виде управляющего напряжения U_y .

В зависимости от напряжения U_y управляемый выпрямитель (UZ) создает на обмотке возбуждения такое напряжение U_B , при котором генератор работает с заданным током рекуперации, но с какой-то ошибкой, зависящей от параметров САР и величины возмущения.

В качестве примера работы САР рассмотрим реакцию системы на типовое для генератора независимого возбуждения возмущение – снижение напряжения U_{kc} в контактной сети.

Резкое уменьшение напряжения U_{kc} приведет к увеличению тока якоря, что вызовет повышение напряжения на выходе датчика тока. Увеличение напряжения датчика тока приведет к уменьшению напряжения рассогласования ΔU_1 , а значит к уменьшению напряжения U_y на выходе П-регулятора. В свою очередь, это вызовет уменьшение напряжения U_B обмотки возбуждения, уменьшение якорных ЭДС, и, в конечном счете, снижение тока якоря, чем и достигается эффект стабилизации.

2.3 Функциональная схема САР

В соответствии с принципиальной электрической схемой для заданной САР может быть составлена следующая функциональная схема – рисунок 2.2.

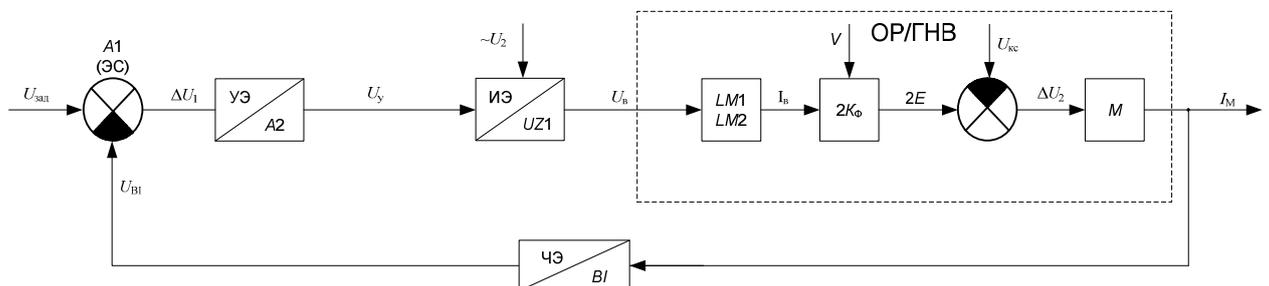


Рисунок 2.2 – Функциональная схема САР

В функциональной схеме, приведенной на рисунке 2.2, приняты следующие обозначения:

$ЭС$ – элемент сравнения. Выполнен на операционном усилителе $A1$ с единичным коэффициентом усиления ($R_1 = R_2 = R_{01}$). В ЭС производится срав-

нение заданного напряжения $U_{\text{зад}}$, пропорциональное заданному току рекуперации $I_{\text{Мзад}}$, с напряжением датчика тока U_{BI} , пропорционального действительному значению тока $I_{\text{М}}$ якоря. Тогда выходное напряжение элемента сравнения ΔU_1 (рассогласование)

$$\Delta U_1 = U_{\text{зад}} - U_{\text{BI}}. \quad (2.1)$$

УЭ – управляющий элемент. Выполнен на операционном усилителе А2, который работает в режиме пропорционального динамического звена и называется пропорциональным регулятором (П-Р). Выходное напряжение U_y П-регулятора

$$\Delta U = K_{\text{пр}} \cdot \Delta U_1, \quad (2.2)$$

где $K_{\text{пр}}$ – коэффициент передачи П-регулятора. $K_{\text{пр}} = 10$.

ИЭ – исполнительный элемент. Представляет собой статический преобразователь (управляемый выпрямитель), выходное напряжение $U_{\text{в}}$ которого определяется углом фазового регулирования и напряжением вторичной обмотки трансформатора U_2 и оценивается с помощью коэффициента передачи статического преобразователя K_{UZ} .

$$U_{\text{в}} = K_{\text{UZ1}} \cdot U_y, \quad (2.3)$$

где $K_{\text{UZ1}} = 80$.

ОР – объект регулирования. Объектом регулирования в данной САР выступают два тяговых электродвигателя, работающих в режиме рекуперации как генераторы независимого возбуждения (ГНВ). Регулируемая величина ОР – ток якоря $I_{\text{М}}$, значение которого зависит от величины напряжения $U_{\text{в}}$ обмотки возбуждения, как регулирующего воздействия, и величины скорости локомотива V , как возмущающего воздействия.

В статическом режиме:

– для обмотки возбуждения выполняется

$$I_{\text{в}} = \frac{1}{2 R_{\text{в}}} = K_{\text{в}} \cdot U_{\text{в}}, \quad (2.4)$$

где $K_{\text{в}}$ – коэффициент передачи обмотки возбуждения.

$$K_{\text{в}} = \frac{1}{2 R_{\text{в}}} = \frac{1}{2 \cdot 0,0625} = 8;$$

– для обмотки якоря

$$I_M = \frac{1}{2R_M} \cdot (2E - U_{KC}) = K_M \cdot (2E - U_{KC}), \quad (2.5)$$

где K_M – коэффициент передачи обмотки якоря генератора.

$$K_M = \frac{1}{2R_M} = \frac{1}{2 \cdot 0,08} = 6,25,$$

$$2E = 2K_\Phi \cdot I_B \cdot V. \quad (2.6)$$

Тогда коэффициент передачи генератора как ОР по возмущению

$$K_{op}^f = 2K_\Phi \cdot K_M = 2 \cdot 0,13 \cdot 6,25 = 1,625.$$

ЧЭ – чувствительный элемент. В качестве чувствительного элемента в данной САР выступает датчик тока BI . Он измеряет действительное значение тока якоря I_M . Выходное напряжение датчика тока

$$U_{BI} = K_{BI} \cdot I_M, \quad (2.7)$$

где K_{BI} – коэффициент передачи датчика тока. $K_{BI} = 0,02$.

2.4 Определение передаточных функций динамических звеньев САР

Передаточная функция генератора независимого возбуждения.

Составим уравнение электрического равновесия для якорной цепи генератора в переходном режиме

$$2E - U_{KC} = 2R_M \cdot i_M + 2L_M \frac{di_M}{dt}, \quad (2.8)$$

$$\frac{L_M}{R_M} \cdot \frac{di_M}{dt} + i_M = \frac{1}{2R_M} (2E - U_{KC}). \quad (2.9)$$

После принятых обозначений

$$T_M \cdot \frac{di_M}{dt} + i_M = K_M (2E - U_{KC}), \quad (2.10)$$

где $T_M = \frac{L_M}{R_M}$ – постоянная времени обмотки якоря генератора.

$$T_M = \frac{L_M}{R_M} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{0,08} = 0,01875 \text{ с.}$$

Переходя к операторной форме записи, уравнение (2.10) примет вид

$$T_M \cdot p \cdot I_M(p) + I_M(p) = K_M (2E(p) - U_{KC}(p)). \quad (2.11)$$

Тогда передаточная функция обмотки якоря генератора

$$W_M(p) = \frac{K_M}{T_M p + 1}. \quad (2.12)$$

Согласно исходным данным передаточная функция генератора

$$W_M(p) = \frac{6,25}{0,01875 \cdot p + 1}.$$

Передаточная функция обмотки возбуждения генератора.

Составим уравнение электрического равновесия для цепи обмотки возбуждения генератора в переходном режиме

$$U_B = I_B \cdot 2 \cdot R_B + 2 \cdot L_B \cdot \frac{di_B}{dt}, \quad (2.13)$$

$$\frac{L_B}{R_B} \cdot \frac{di_B}{dt} + i_B = \frac{1}{2 \cdot R_B} U_B, \quad (2.14)$$

$$T_B \cdot \frac{di_B}{dt} + i_B = K_B \cdot U_B, \quad (2.15)$$

где T_B – постоянная времени обмотки якоря генератора.

$$T_B = \frac{L_B}{R_B} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{0,0625} = 0,4 \text{ с.}$$

Переходя к операторной форме записи, уравнение (2.15) примет вид

$$T_B \cdot p \cdot I_B(p) + I_B(p) = K_B \cdot U_B(p). \quad (2.16)$$

Тогда передаточная функция обмотки возбуждения генератора

$$W_B(p) = \frac{K_B}{T_B \cdot p + 1}. \quad (2.17)$$

Согласно исходным данным передаточная функция генератора

$$W_B(p) = \frac{8}{0,4 \cdot p + 1}.$$

Передаточная функция П-регулятора

$$W_{\text{пр}}(p) = 10.$$

Передаточная функция датчика тока

$$W_{\text{BI}}(p) = \frac{K_{\text{BI}}}{T_{\text{BI}}p + 1}, \quad (2.18)$$

$$W_{\text{BI}}(p) = \frac{0,02}{0,01p + 1}.$$

Согласно функциональной схеме и полученным выражениям для передаточных функций всех звеньев можно составить следующую структурную схему САР (рисунок 2.3):

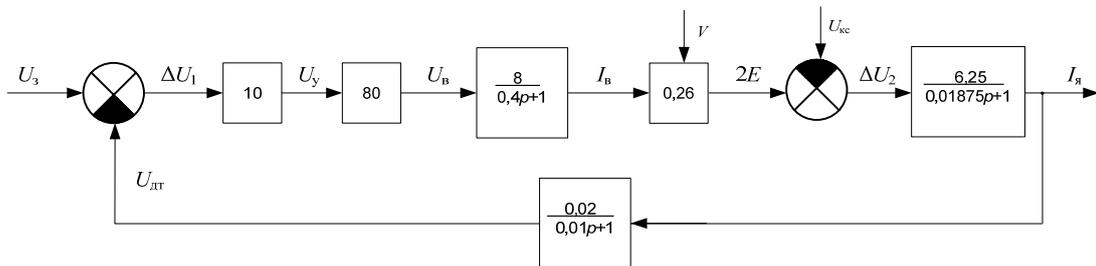


Рисунок 2.3 – Структурная схема САР

По структурной схеме рисунка 2.3 можно сделать вывод о том, что данная САР является статической третьего порядка.

Передаточная функция разомкнутой САР

$$W_p(p) = 10 \cdot 80 \cdot \frac{8}{0,4p + 1} \cdot 0,26 \cdot \frac{6,25}{0,01875p + 1} \cdot \frac{0,02}{0,01p + 1} = \frac{K_p}{P(p)},$$

где K_p – коэффициент передачи разомкнутой САР,

$P(p)$ – характеристический многочлен разомкнутой САР.

$$K_p = 10 \cdot 80 \cdot 8 \cdot 0,26 \cdot 6,25 \cdot 0,02 = 208,$$

$$P(p) = (0,4p + 1) \cdot (0,01875p + 1) \cdot (0,01p + 1).$$

Передаточная функция замкнутой САР

$$W_3(p) = \frac{W_p(p) / W_{oc}(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{\frac{K_p}{P(p)} \cdot W_{дг}(p)}{1 + \frac{K_p}{P(p)}} = \frac{K_3}{A(p)}, \quad (2.19)$$

где $A(p)$ – характеристический многочлен замкнутой САР.

$$A(p) = P(p) + K_p = (0,4 p + 1) \cdot (0,01875 p + 1) \cdot (0,01 p + 1) + 208,$$

$$A(p) = 0,000075 p^3 + 0,0116875 p^2 + 0,42875 p + 1 + 208.$$

2.5 Анализ устойчивости САР методом D-разбиения

Характеристический многочлен $A(p)$ замкнутой САР приравняем к нулю, произведем формальную замену оператора Лапласа (p) на ($j\omega$), из свободного члена выделим $K_{ПР}(j\omega)$ и полученное уравнение разрешим относительно $K_{ПР}(j\omega)$.

$$A(p) = 0,000075 p^3 + 0,0116875 p^2 + 0,42875 p + 208 \cdot K_{ПР}(p) + 1 = 0, \quad (2.20)$$

$$K_{ПР}(p) = -\frac{0,000075 p^3 + 0,0116875 p^2 + 0,42875 p + 1}{20,8}, \quad (2.21)$$

$$K_{ПР}(j\omega) = -0,000003605 \cdot (j\omega)^3 - 0,0005619 \cdot (j\omega)^2 - 0,020613 \cdot j\omega - 0,04808, \quad (2.22)$$

$$K_{ПР}(j\omega) = -0,04808 + 0,0005619 \cdot \omega^2 + j \left(0,000003605 \omega^3 - 0,020613 \cdot \omega \right). \quad (2.23)$$

Приравняем мнимую часть $K_{ПР}(j\omega)$ к нулю и определяем частоту $\omega_{кр}$, на которой коэффициент передачи П-регулятора принимает критическое значение

$$0,000003605 \cdot \omega^3 - 0,020613 \cdot \omega = 0.$$

Откуда

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{0,020613}{0,000003605}} = 75,62.$$

Тогда

$$K_{\text{ПРкр}} = -0,04808 + 0,0005619 \cdot \omega_{\text{кр}}^2 = 3,165.$$

Так как $K_{\text{ПР исх}} = 10$, то $K_{\text{ПР исх}} \geq K_{\text{ПР кр}}$ и, следовательно, САР неустойчива.

Критическое значение коэффициента передачи разомкнутой САР, при котором она находится на грани устойчивости

$$K_{\text{ркр}} = 3,165 \cdot 80 \cdot 8 \cdot 0,26 \cdot 6,25 \cdot 0,02 = 65,832.$$

2.6 Синтез САР

Для синтеза САР сначала необходимо построить логарифмические характеристики исходной разомкнутой САР:

а) *построение ЛАЧХ исходной САР.*

Из выражения передаточной функции разомкнутой САР определим сопрягающие частоты, как точки перегибов ее ЛАЧХ

$$\omega_{\text{сп}i} = \frac{1}{T_i}, \quad (2.24)$$

$$\omega_{\text{сп}1} = \frac{1}{0,4} = 2,5 \text{ Гц}; \quad \omega_{\text{сп}2} = \frac{1}{0,01875} = 53,33 \text{ Гц}; \quad \omega_{\text{сп}3} = \frac{1}{0,01} = 100 \text{ Гц};$$

$$\lg \omega_{\text{сп}1} = \lg 2,5 = 0,397 \text{ дек}; \quad \lg \omega_{\text{сп}2} = \lg 53,33 = 1,73 \text{ дек}; \quad \lg \omega_{\text{сп}3} = \lg 100 = 2 \text{ дек}.$$

Начальный уровень ЛАЧХ исходной САР

$$20 \cdot \lg K_{\text{р исх}} = 20 \cdot \lg 208 = 46,36 \text{ дБ}.$$

Порядок построения ЛАЧХ исходной САР $L_{\text{р исх}}(\omega)$ (рисунок 2.4):

- на оси $\lg(\omega)$ откладываем найденные логарифмы сопрягающих частот;
- отмечаем точку с координатами $(0; 20 K_{\text{р исх}})$ – точка A_1 ;
- через точку A_1 проводим прямую линию с наклоном 0 дБ/дек до первой сопрягающей частоты $\omega_{\text{сп}1}$, так как исходная САР относится к статическому типу. Затем меняем наклон на -20 дБ/дек и проводим прямую линию до следующей сопрягающей частоты $\omega_{\text{сп}2}$. После $\omega_{\text{сп}2}$ проводим прямую линию с наклоном -40 дБ/дек до сопрягающей частоты $\omega_{\text{сп}3}$ и далее ведем линию ЛАЧХ с наклоном -60 дБ/дек;

б) *построение ЛФЧХ исходной САР.*

Для структурной схемы рассматриваемой САР ее ЛФЧХ представляет собой сумму ЛФЧХ трех апериодических звеньев 1-ого порядка

$$\varphi_p(\omega) = \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) + \varphi_3(\omega), \quad (2.25)$$

$$\varphi_p(\omega) = -\arctg 0,4\omega - \arctg 0,01875\omega - \arctg 0,01\omega. \quad (2.26)$$

Результаты расчетов $\varphi_{p \text{ исх}}(\omega)$ сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – ЛФЧХ исходной разомкнутой САР

| ω | 0 | 1 | 10 | 30 | 56,23 | 100 | 200 |
|---------------------------|---|-------|-----|---------|---------|------|------|
| $\lg \omega$ | - | 0,0 | 1 | 1,48 | 1,75 | 2 | 2,3 |
| $\varphi_1(\omega)$ | 0 | -22,0 | -76 | -85,00 | -87,50 | -89 | -89 |
| $\varphi_2(\omega)$ | 0 | -1,1 | -11 | -29,00 | -46,50 | -62 | -75 |
| $\varphi_3(\omega)$ | 0 | -0,6 | -6 | -17,00 | -29,00 | -45 | -63 |
| $\Sigma\varphi_i(\omega)$ | 0 | -23,7 | -93 | -131,00 | -163,00 | -196 | -227 |

Согласно логарифмическому критерию система является устойчивой, если ЛФЧХ разомкнутой САР пересекает линию $(-\pi)$ справа от частоты среза.

Как видно из рисунка 2.4, ЛФЧХ пересекает линию $(-\pi)$ (точка B) слева от частоты среза (точка C) из чего следует, что исследуемая САР неустойчива;

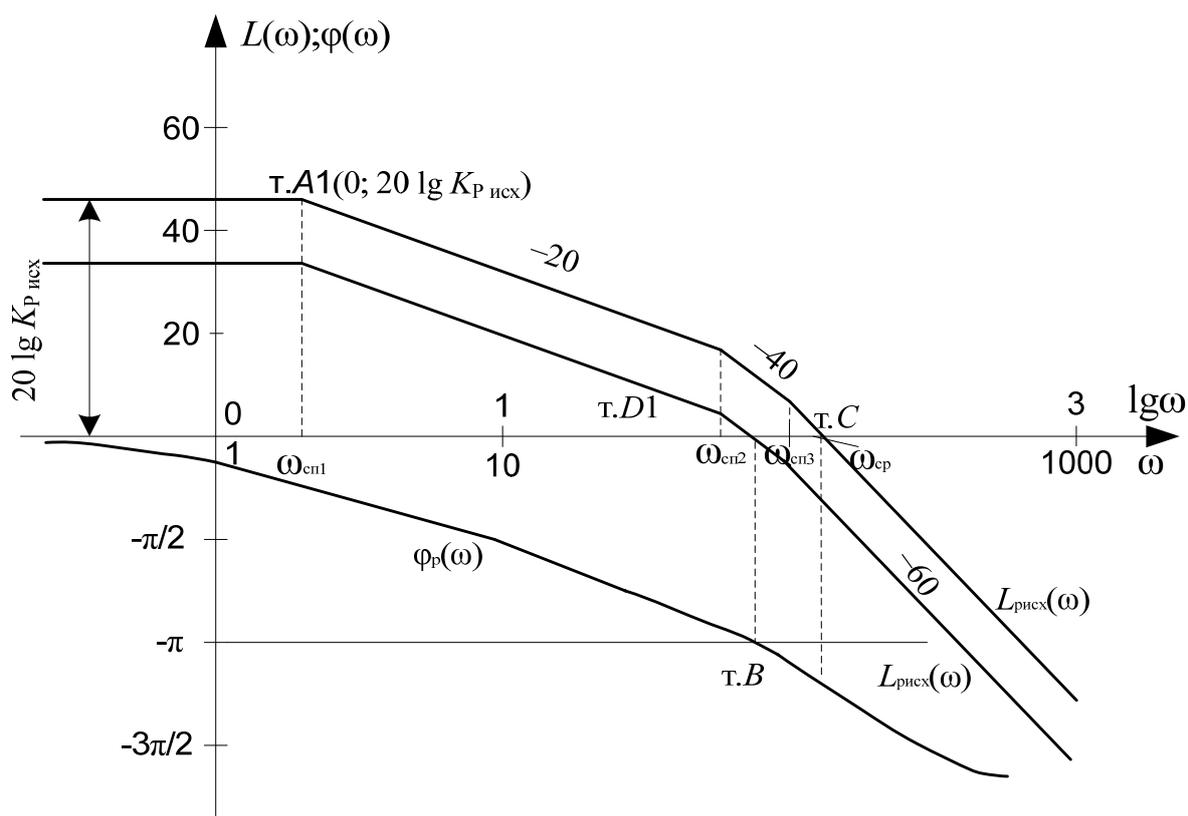


Рисунок 2.4 – ЛАЧХ и ЛФЧХ исходной САР

в) проверка правильности построения ЛАЧХ и ЛФЧХ.

По точке B найдем частоту среза $\omega_{cp \text{ кр}}$ (точка D_1) для САР, находящейся на границе устойчивости. Через точку D_1 построим ЛАЧХ $L_{p \text{ кр}}(\omega)$. Тогда по ор-

динате точки $A_2 (0; 20 \lg K_{P_{кр}})$ можно определить критическое значение коэффициента передачи разомкнутой САР, находящейся на грани устойчивости

$$20 \lg K_{P_{кр}} = 36,4 \text{ дБ.}$$

Откуда $K_{P_{кр}} \approx 65,8$, что сходится с результатом, полученным по методу D-разбиения;

г) *построение ЛАЧХ скорректированной САР.*

При синтезе САР необходимо обеспечить устойчивость САР с определенным запасом. Зададимся запасом устойчивости по фазе $\gamma_c^\circ = 45^\circ$, что соответствует высокому уровню качества регулирования.

По ординате $(-\pi + 45^\circ)$ по $\varphi_{P_{исх}}(\omega)$ (точка E на рисунке 2.5) определяем новое значение частоты среза для скорректированной САР (точка F).

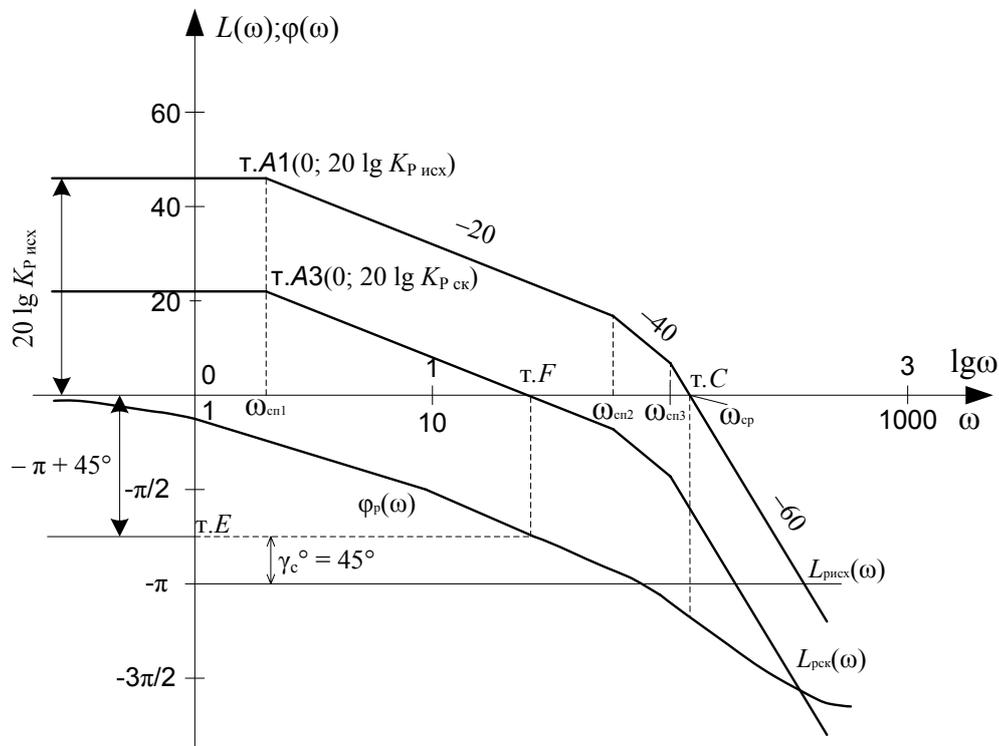


Рисунок 2.5 – ЛАЧХ и ЛФЧХ исходной и скорректированной САР

Через найденную точку F строится ЛАЧХ скорректированной САР $L_{P_{рск}}(\omega)$ по тем же правилам, что и исходная ЛАЧХ. Тогда по ординате точки $A_3 (0; 20 \lg K_{P_{рск}})$ можно определить требуемое значение коэффициента передачи скорректированной САР

$$20 \lg K_{P_{рск}} = 22,31 \text{ дБ,}$$

$$K_{P_{рск}} = 13,04.$$

Откуда коэффициент передачи П-регулятора, обеспечивающий запас устойчивости САР по фазе $\gamma_c^\circ = 45^\circ$, должен быть отрегулирован на уровне

$$K_{\text{пр ск}} = \frac{13,04}{80 \cdot 8 \cdot 0,26 \cdot 6,25 \cdot 0,02} = 0,627.$$

2.7 Оценка качества регулирования в статическом режиме работы САР

Ошибка регулирования по заданию для статической САР определяется

$$\Delta I_{\text{ст}}^g = \frac{I_{\text{мзад}}}{1 + K_{\text{р ск}}}, \quad (2.27)$$

$$\Delta I_{\text{ст}}^g = \frac{200}{1 + 13,04} = 14,22 \text{ А},$$

$$\Delta I_{\%} = \frac{14,22}{200} \cdot 100\% = 7,11 \text{ \%}.$$

Ошибка регулирования по возмущению для статической САР

$$\Delta I = \frac{K_{\text{ор}}^f}{1 + K_{\text{р ск}}} \cdot V, \quad (2.28)$$

$$\Delta I = \frac{1,625}{1 + 13,04} \cdot 50 = 5,78 \text{ А},$$

$$\Delta I_{\%} = \frac{5,78}{200} \cdot 100\% = 2,89 \text{ \%}.$$

Из вышеизложенного делаем вывод, что скорректированная статическая САР третьего порядка имеет ошибку регулирования равную 10 %, что находится в допустимых пределах. Следовательно, структуру САР изменять не требуется. На рисунке 2.6 представлена статическая характеристика САР.

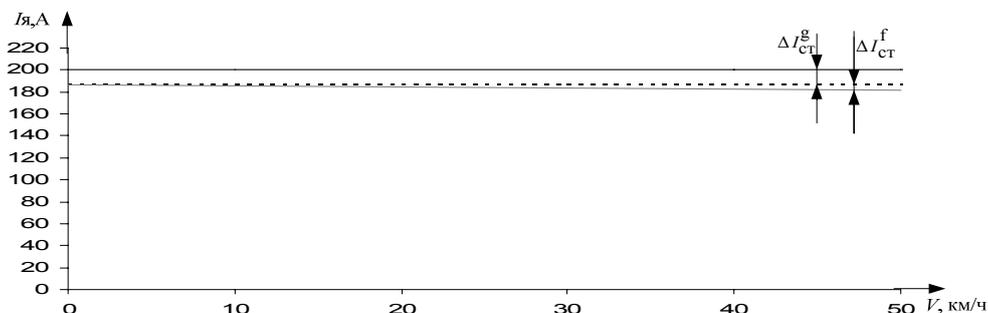


Рисунок 2.6 – Статическая характеристика САР

В случае если ошибка регулирования окажется больше 10 %, необходимо выполнить синтез САР с использованием корректирующего устройства.

2.8 Синтез последовательно корректирующим устройством

По нормам запаса устойчивости (таблица В.1 приложение В) определяем запас устойчивости по фазе $\gamma_c^0 = 45^\circ$, соответствующий высокому уровню качества регулирования.

По ординате $(-\pi + 45^\circ)$ $\varphi_{p\text{ исх}}(\omega)$ (точка *G*) определяем значение частоты среза типовой желаемой ЛАЧХ (точка *H* на рисунке 2.7).

Через точку *H* с наклоном (-20 дБ/дек) строится среднечастотная часть желаемой ЛАЧХ, которая слева сопрягается с низкочастотной, а справа с высокочастотной частями ЛАЧХ исходной САР отрезками прямых, наклон которых отличается от соответствующих участков исходной ЛАЧХ $L_{p\text{ исх}}$ не более, чем на 20 дБ/дек (рисунок 2.7).

По разности исходной и желаемой ЛАЧХ определяется ЛАЧХ корректирующего устройства $L_{ку}$ путем графического вычитания ($L_{\text{жел}} - L_{p\text{ исх}}$).

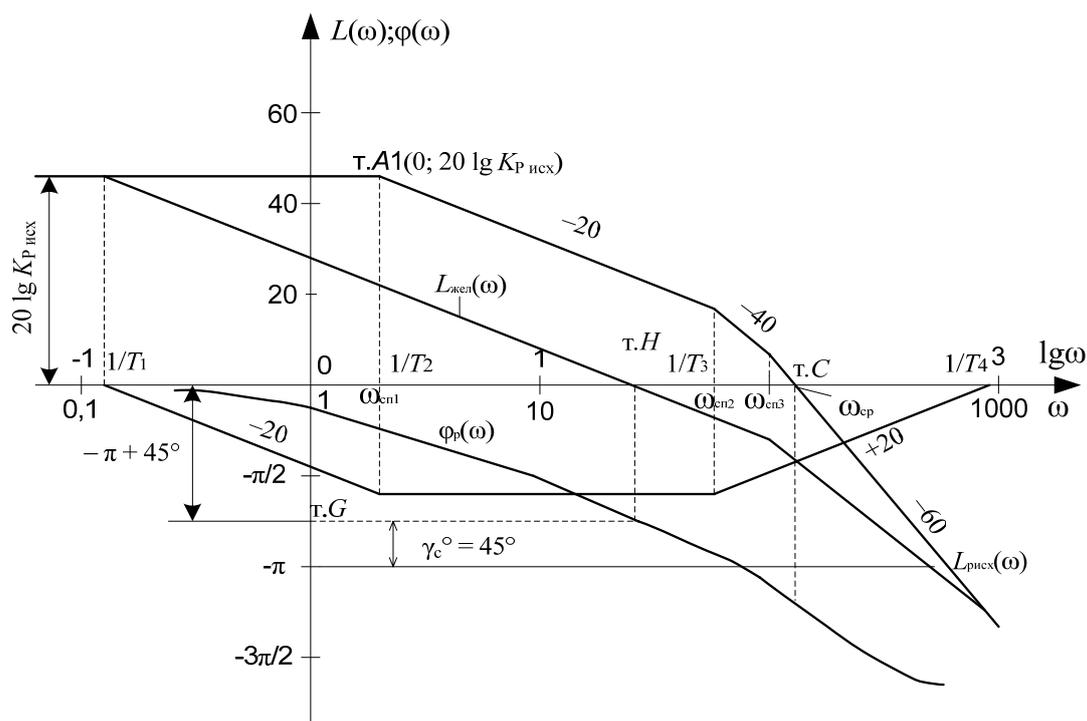


Рисунок 2.7 – Логарифмические характеристики исходной, скорректированной САР и КУ

По форме ЛАЧХ корректирующего устройства и справочным данным [5, С. 300] выбираем соответствующее типовое корректирующее устройство и по частотам изломов его ЛАЧХ определяем постоянные времени.

Форма ЛАЧХ корректирующего устройства на рисунке 2.7 соответствует интегрально-дифференцирующему звену (рисунок 2.8).

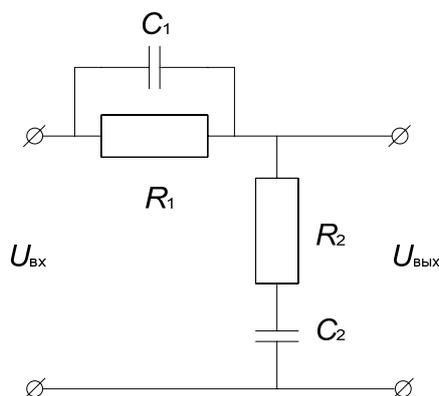


Рисунок 2.8 – Интегрально-дифференцирующее КУ

Передаточная функция КУ равна

$$W_{\text{ку}}(p) = \frac{(T_2 \cdot p + 1) \cdot (T_3 \cdot p + 1)}{(T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_4 \cdot p + 1)}, \quad (2.29)$$

где $T_1 = 5,2$ с; $T_2 = 0,4$ с; $T_3 = 0,01875$ с; $T_4 = 0,001037$ с (из $L_{\text{ку}}$ рисунка 2.7).

Так как корректирующее устройство включается последовательно в цепь прямого канала САР, то передаточная функция скорректированной разомкнутой САР находится

$$W_{\text{ск}}(p) = W_{\text{исх}}(p) \cdot W_{\text{ку}}(p). \quad (2.30)$$

Отсюда

$$W_{\text{ск}}(p) = \frac{208}{(0,4 \cdot p + 1) \cdot (0,01875 \cdot p + 1) \cdot (-0,01 \cdot p + 1)} \cdot \frac{(0,4 \cdot p + 1) \cdot (0,01875 \cdot p + 1)}{(5,2 \cdot p + 1) \cdot (0,001037 \cdot p + 1)} =$$

$$= \frac{208}{(5,2 \cdot p + 1) \cdot (0,001037 \cdot p + 1) \cdot (0,01 \cdot p + 1)}.$$

ЛФЧХ скорректированной разомкнутой САР

$$\varphi_{\text{р}}(\omega) = -\arctg 5,2\omega - \arctg 0,001037\omega - \arctg 0,01\omega. \quad (2.31)$$

Результаты расчетов $\varphi_{\text{р ск}}(\omega)$ сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – ЛФЧХ скорректированной разомкнутой САР

| ω , Гц | 0 | 1 | 10 | 30 | 56,23 | 100 | 200 |
|--------------------------|---|-------|-------|--------|--------|--------|------|
| $\lg \omega$, дек | - | 0,0 | 1 | 1,48 | 1,75 | 2 | 2,3 |
| $\varphi_{р.ск}(\omega)$ | 0 | -79,7 | -95,2 | -108,1 | -122,5 | -140,8 | -165 |

ЛАЧХ и ЛФЧХ скорректированной САР представлены на рисунке 2.9.

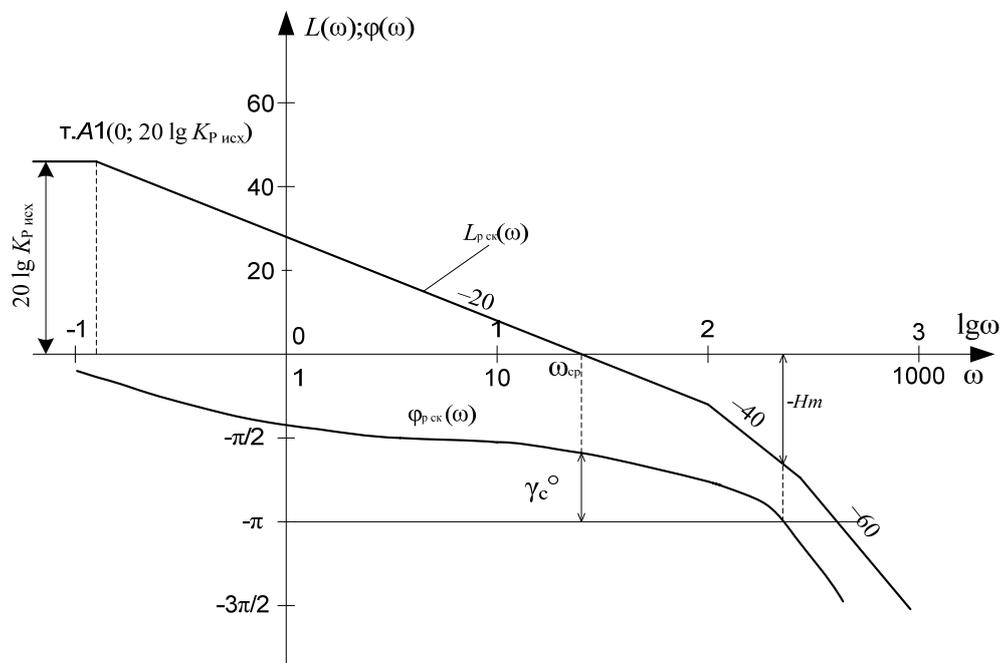


Рисунок 2.9 – ЛАЧХ и ЛФЧХ скорректированной САР

Из рисунка 2.9 видно, что скорректированная САР приобрела устойчивость с требуемыми запасами по фазе γ_c^0 и амплитуде H_m для высокого уровня качества регулирования.

2.9 Оценка качества регулирования в динамическом режиме работы САР

Для оценки качества работы САР в динамическом режиме необходимо определить кривую переходного процесса регулируемой величины в виде переходной характеристики САР.

Расчет переходной характеристики САР производился методом структурного математического моделирования. В результате была получена кривая переходной характеристики, представленная на рисунке 2.10.

В результате были получены следующие критерии качества регулирования скорректированной САР:

– *перерегулирование*

$$\sigma_m = \frac{I_{\max} - I_{уст}}{I_{уст}} \cdot 100 \% , \quad (2.32)$$

$$\sigma_m = \frac{200,11 - 182,46}{182,46} \cdot 100 \% = 9,7 \% ;$$

– время регулирования $t_p = 0,06$ с, т. е. $\omega_{cp} \cdot t_p \leq 2,5\pi$.

Можно сделать вывод, что в результате синтеза САР качество регулирования исследуемой САР соответствует высокому уровню.

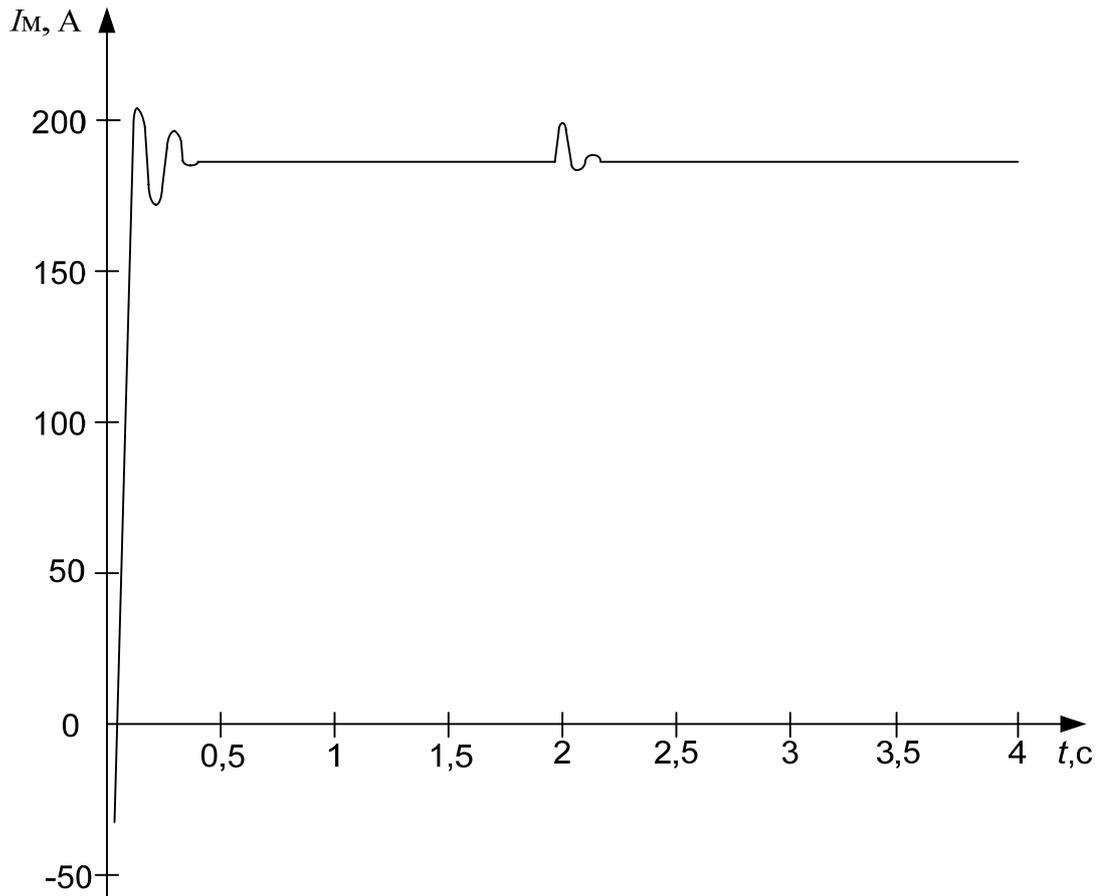


Рисунок 2.10 – График переходной характеристики $h(t)$ скорректированной САР

Рекомендуемая литература

1 Космодамианский А. С. Автоматические системы управления локомотивов: учеб. для студентов вузов ж.-д. транспорта / А. С. Космодамианский, Н. М. Луков. – М. : УМЦ ЖДТ, 2007. – 428 с.

2 Бегагоин Э. И. Автоматизация электроподвижного состава / Э. И. Бегагоин, И. А. Кузьминых. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. – 27 с.

3 Бесекерский В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Профессия, 2003. – 747 с.

4 Автоматизация электроподвижного состава : учеб. для вузов ж.-д. транспорта / А. Н. Савоськин [и др.] ; под ред. А. Н. Савоськина. – М. : Транспорт, 1990. – 311 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Бланк задания на расчетно-графическую работу

Студент _____

Форма обучения _____

Группа _____

Тема расчетно-графической работы: _____

Общие исходные данные:

Индивидуальные исходные данные:

Задание выдал:

« ____ » _____ 20 ____ г.

Подпись: _____ (_____)

Задание получил:

« ____ » _____ 20 ____ г.

Подпись: _____ (_____)

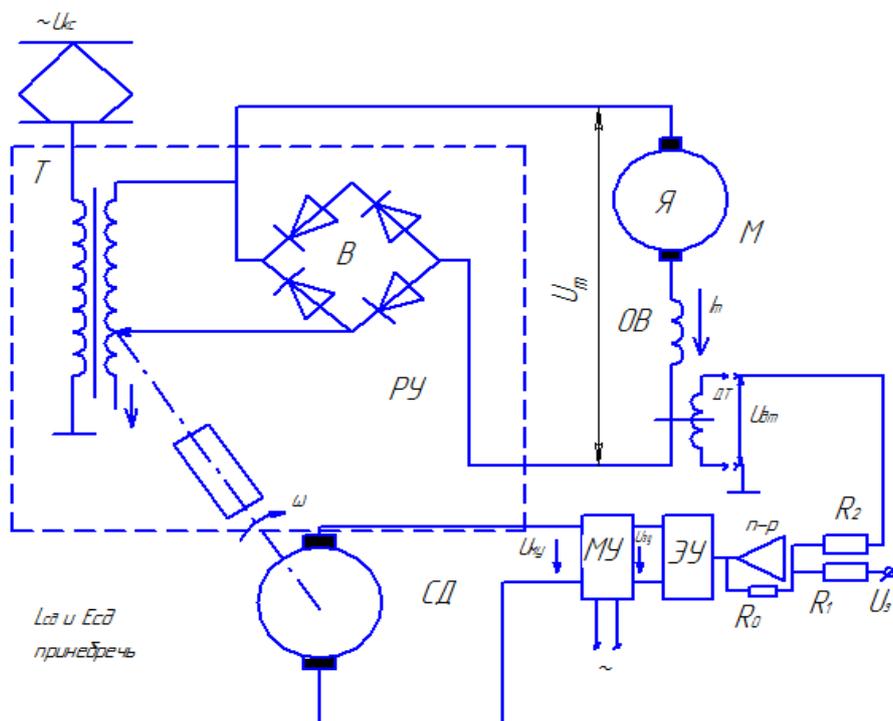
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Варианты заданий для расчетно-графической работы

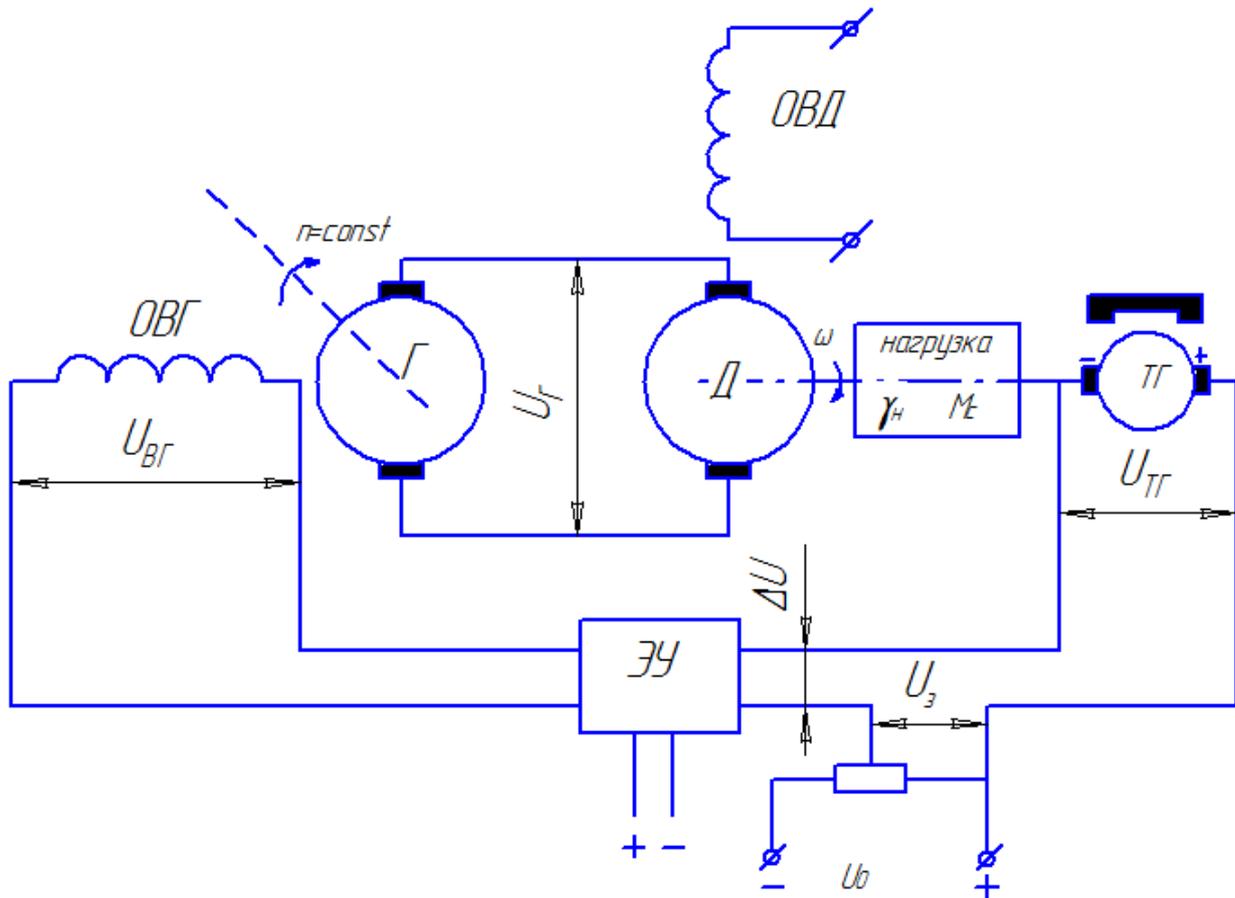
Схема № 1

САР тока тягового двигателя



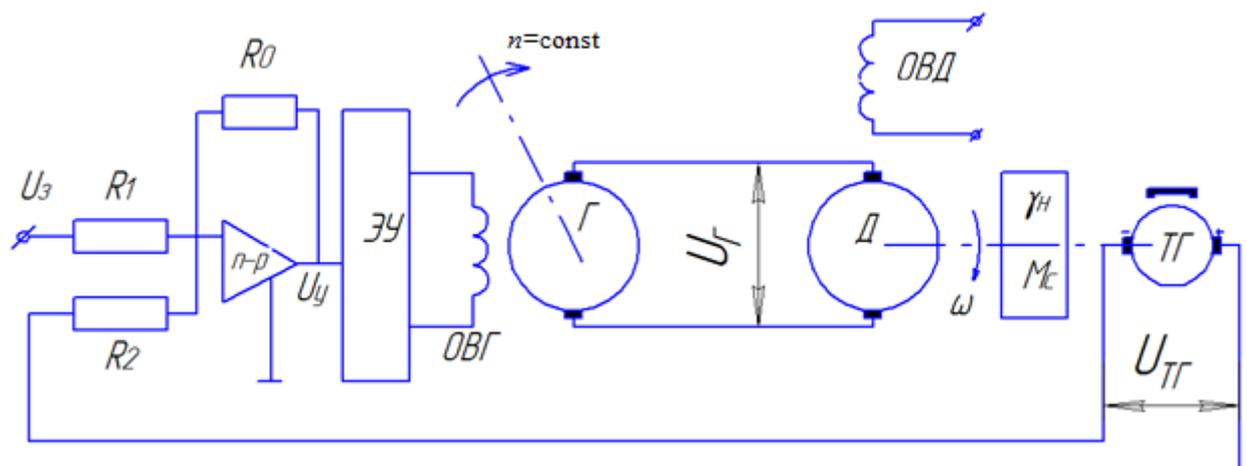
| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------------------------|------|------|------|-------|------|------|------|
| $R_M, \text{ Ом}$ | 0,35 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,25 | 0,15 | 0,4 |
| $K_{дт}$ | 0,2 | 0,01 | 0,05 | 0,025 | 0,03 | 0,04 | 0,06 |
| $K_{сд}, (\text{об/сек})/\text{В}$ | 1,5 | 2,0 | 0,8 | 0,6 | 5 | 1,0 | 6 |
| $K_{рy}, \text{ В}/(\text{об/сек})$ | 0,3 | 2,5 | 0,5 | 7,4 | 2,5 | 4,5 | 8,3 |
| $K_{му}$ | 3,1 | 28 | 35 | 1,8 | 2,0 | 5,0 | 30 |
| $C_e \Phi_n = E/V_s$ | 34 | 30 | 20 | 25 | 15 | 18 | 15 |
| T_M | 0,3 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,22 |
| $T_{му}$ | 0,12 | 0,1 | 0,18 | 0,2 | 0,15 | 0,13 | 0,05 |
| $a, (\text{км/ч})/\text{с}$ | 0,4 | 0,8 | 0,6 | 0,5 | 1,1 | 0,3 | 0,9 |
| $I_{M \text{ пуск}}, \text{ А}$ | 125 | 200 | 750 | 400 | 750 | 110 | 300 |
| $K_{эу}$ | 10 | 12 | 8 | 6 | 5 | 3 | 7 |
| $K_{пр}$ | 40 | 2 | 3 | 5 | 0,6 | 0,7 | 2 |

Схема № 2
САР скорости двигателя



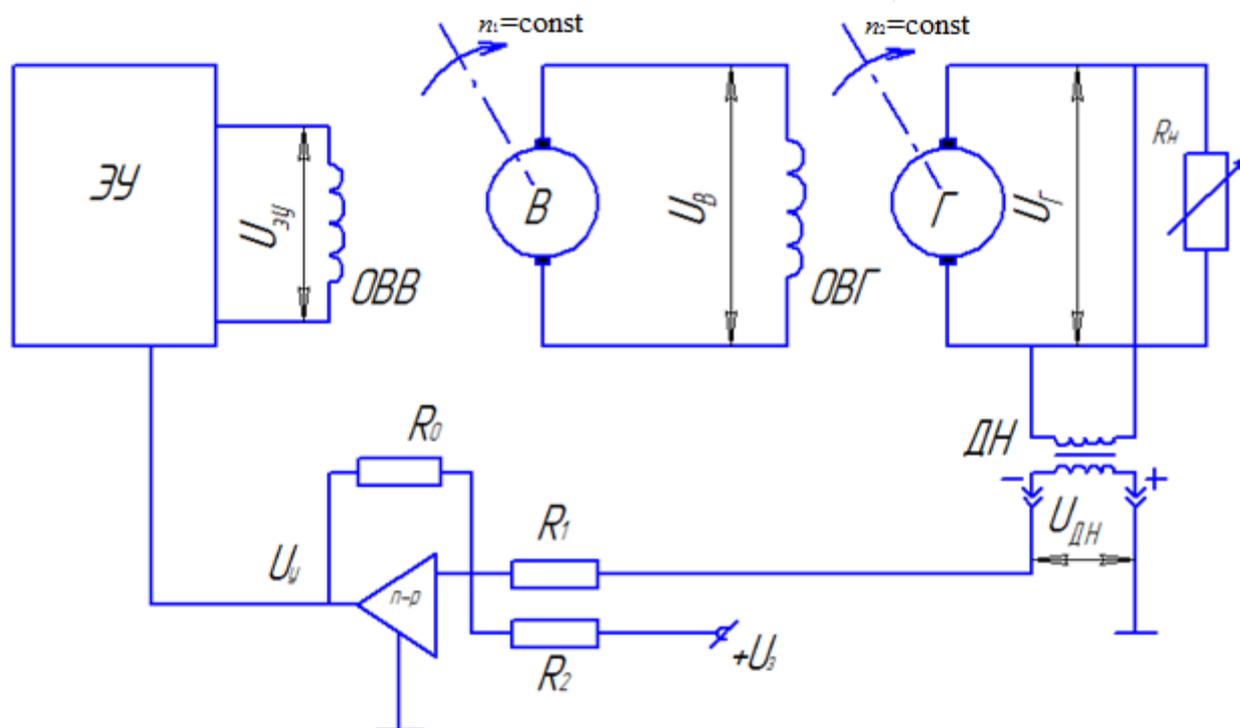
| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------------------------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|
| $C\Phi_{дв} = E_{дв}/\omega$ | 2 | 1,4 | 0,7 | 0,3 | 1,5 | 0,8 | 0,6 |
| $K_{Г} = U_{Г} / U_{ВГ}$ | 12 | 20 | 24 | 25 | 3 | 4,2 | 37 |
| $K_{ЭУ}$ | 150 | 25 | 100 | 200 | 50 | 15 | 12 |
| $K_{ТГ}, В \cdot с$ | 0,1 | 0,2 | 0,15 | 0,08 | 0,25 | 0,4 | 0,3 |
| $R_{яд}, Ом$ | 0,12 | 0,2 | 0,05 | 0,08 | 0,15 | 0,1 | 0,30 |
| $T_{ВГ}, с$ | 0,05 | 0,2 | 0,5 | 0,1 | 0,6 | 0,7 | 1,5 |
| $\gamma_H, Н \cdot М \cdot с^2$ | 10 | 14 | 20 | 5 | 18 | 9 | 16 |
| $M_c, кН \cdot с$ | 2,0 | 8,0 | 3,0 | 2,0 | 5,0 | 8,0 | 1,5 |
| $L_{яд}, Г$ | 0,024 | 0,01 | 0,007 | 0,005 | 0,012 | 0,02 | 0,03 |
| $\omega_{НОМ}, с^{-1}$ | 750 | 710 | 240 | 400 | 554 | 485 | 464 |

Схема № 4
САР скорости двигателя



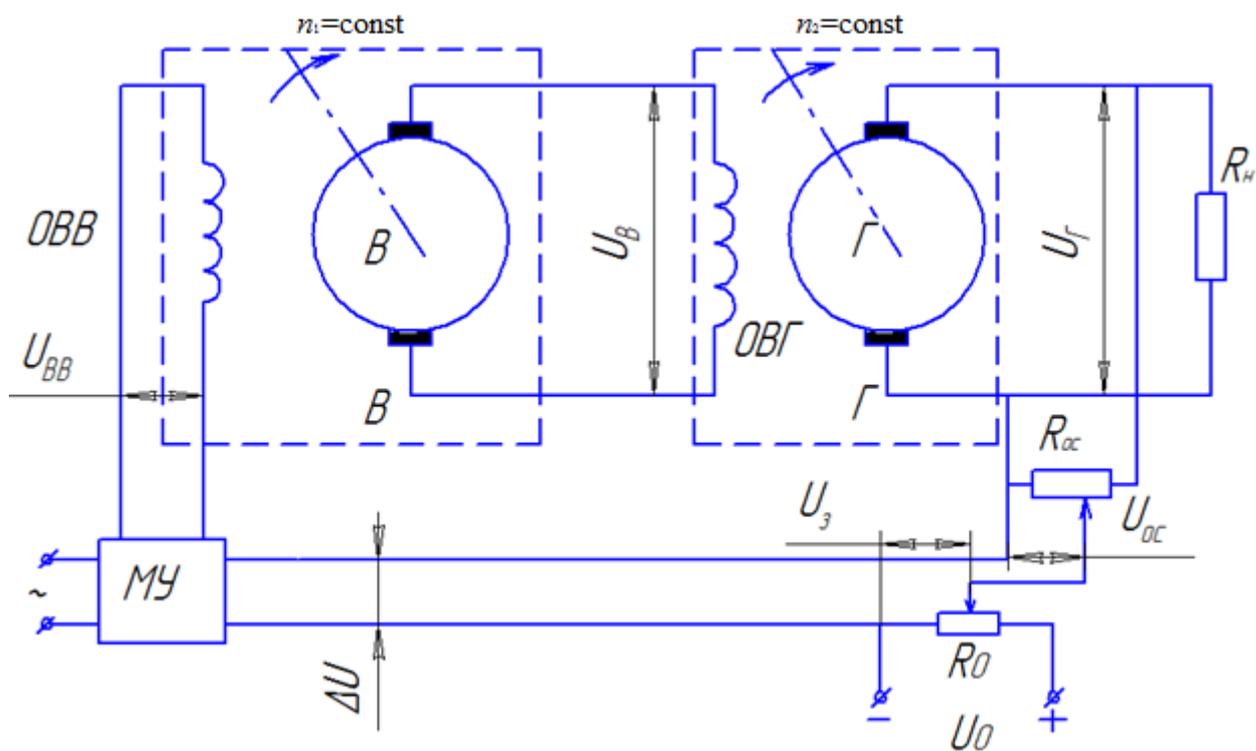
| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|------|------|-------|------|------|------|------|
| $C\Phi_{дв} = E_{дв}/\omega$ | 0,8 | 1,3 | 0,9 | 1,4 | 0,7 | 1,2 | 0,5 |
| $K_{Г}$ | 1,5 | 1,8 | 2 | 2,8 | 2,4 | 30 | 1,4 |
| $K_{п-р}$ | 12,0 | 8,0 | 100 | 20 | 10 | 4 | 50 |
| $K_{ТГ}$ | 0,5 | 0,4 | 0,55 | 0,4 | 1,5 | 0,8 | 0,1 |
| $R_{яд}, \text{ Ом}$ | 0,05 | 0,08 | 0,09 | 0,7 | 0,18 | 0,14 | 0,04 |
| $T_{яд}, \text{ с}$ | 0,02 | 0,05 | 0,018 | 0,11 | 0,09 | 0,04 | 0,03 |
| $\gamma_{н}, \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$ | 28 | 33 | 19 | 5,1 | 18 | 26 | 10 |
| $M_{с}, \text{ кН}\cdot\text{м}$ | 1,2 | 2,0 | 1,3 | 1,1 | 0,08 | 2,1 | 1,5 |
| $K_{ЭУ}$ | 2,2 | 33 | 36 | 4,5 | 0,82 | 1,66 | 52 |
| $\omega_{н}, \text{ с}^{-1}$ | 420 | 274 | 135 | 210 | 195 | 96 | 100 |
| $T_{вГ}, \text{ с}$ | 0,6 | 0,55 | 0,8 | 1,1 | 0,94 | 0,45 | 0,8 |
| $T_{яГ}, \text{ с}$ | 0,15 | 0,05 | 0,2 | 0,3 | 0,25 | 0,03 | 0,4 |

Схема № 5
САР напряжения генератора



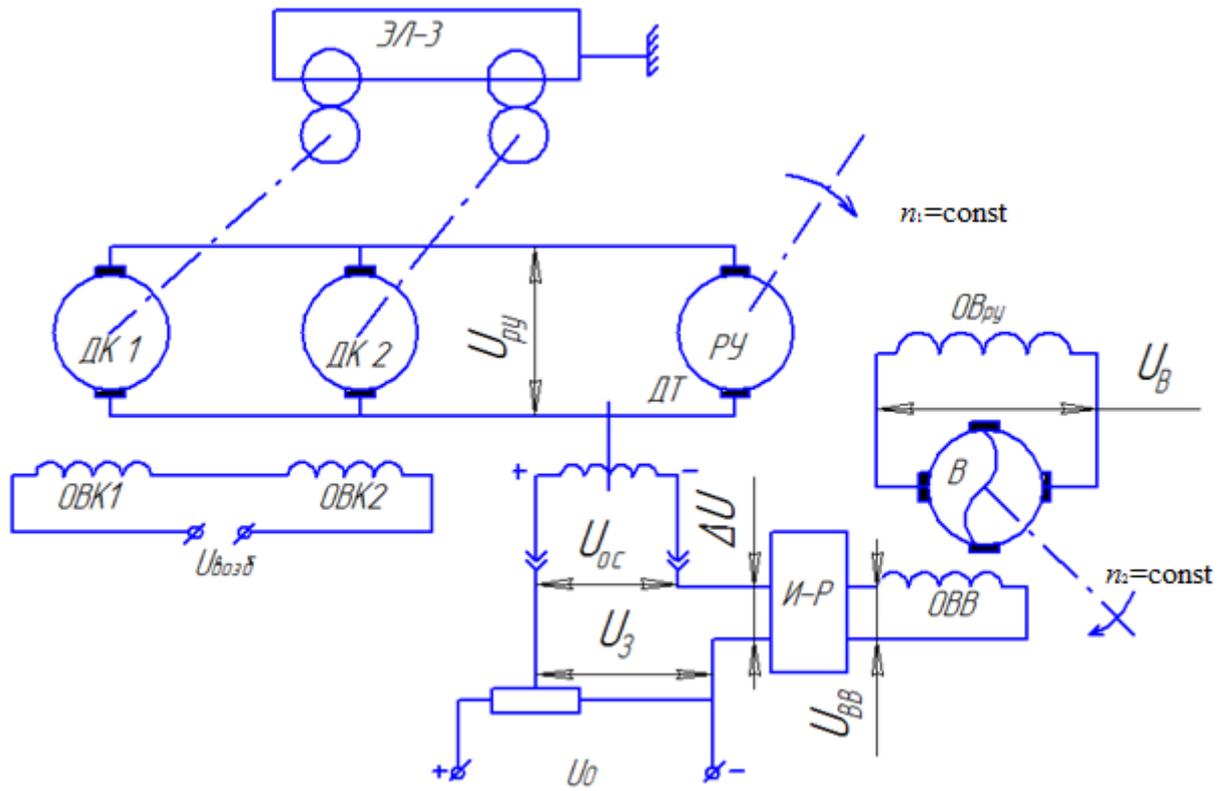
| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| $K_{г}$ | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 5 | 4 | 1,2 |
| $K_{дн}$ | 0,05 | 0,08 | 0,04 | 0,1 | 0,06 | 0,008 | 0,021 |
| $K_{возб}$ | 1,6 | 2,5 | 2 | 3 | 1,8 | 3 | 5 |
| $R_{яд}, \text{ Ом}$ | 0,31 | 1,1 | 2,3 | 0,2 | 1,5 | 0,5 | 0,2 |
| $T_{вв}, \text{ с}$ | 0,1 | 0,12 | 0,08 | 0,1 | 0,05 | 0,15 | 0,18 |
| $T_{вг}, \text{ с}$ | 0,45 | 0,73 | 0,8 | 0,52 | 0,75 | 0,99 | 0,6 |
| $I_{г \text{ ном}}, \text{ А}$ | 100 | 200 | 50 | 80 | 400 | 600 | 150 |
| $U_{г}, \text{ В}$ | 220 | 110 | 220 | 110 | 1500 | 1500 | 380 |
| $K_{пр}$ | 16 | 14 | 18 | 25 | 10 | 8,6 | 5 |
| $K_{эу}$ | 40 | 60 | 50 | 80 | 100 | 120 | 70 |
| $T_{дн}, \text{ с}$ | 0,05 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,15 | 0,04 | 0,06 |

Схема № 6
САР напряжения генератора



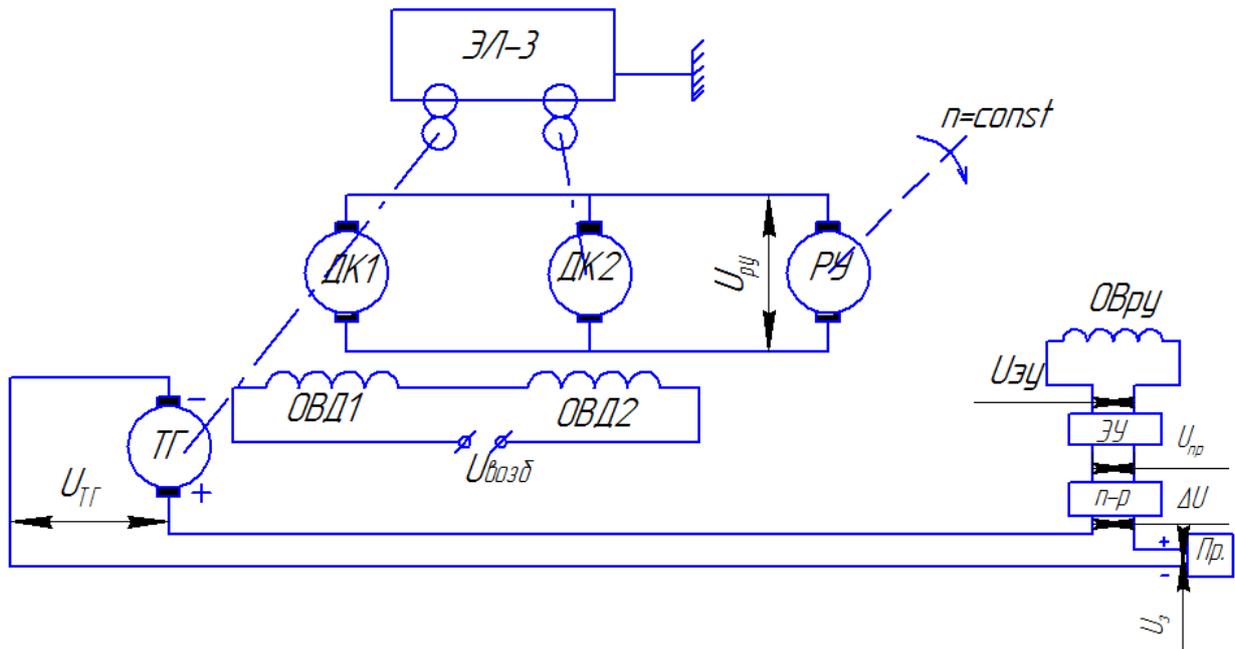
| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $R_{\text{ял}}, \text{ Ом}$ | 0,35 | 0,8 | 0,65 | 0,7 | 0,5 | 0,24 | 0,4 |
| K_{Γ} | 3,5 | 4,6 | 3,8 | 5,7 | 4,4 | 5 | 3,9 |
| $K_{\text{В}}$ | 11,1 | 5 | 4,6 | 2,3 | 1,8 | 1,6 | 2 |
| $K_{\text{МУ}}$ | 100 | 15,0 | 260 | 80 | 23 | 30 | 27 |
| K_{OC} | 0,1 | 0,1 | 0,05 | 0,05 | 0,38 | 0,1 | 0,05 |
| $T_{\text{ВГ}}, \text{ с}$ | 0,4 | 1,3 | 1,5 | 0,8 | 1,4 | 1,2 | 0,9 |
| $T_{\text{ВВ}}, \text{ с}$ | 0,12 | 0,4 | 0,8 | 0,3 | 0,8 | 0,5 | 0,14 |
| $T_{\text{МУ}}, \text{ с}$ | 0,04 | 0,1 | 0,08 | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,05 |
| $I_{\Gamma \text{ ном}}, \text{ А}$ | 50 | 200 | 300 | 100 | 150 | 180 | 80 |
| $U_{\Gamma \text{ ном}}, \text{ А}$ | 50 | 1500 | 560 | 650 | 127 | 220 | 700 |

Схема № 8
 САР нагрузки при испытании электровоза на катковой станции



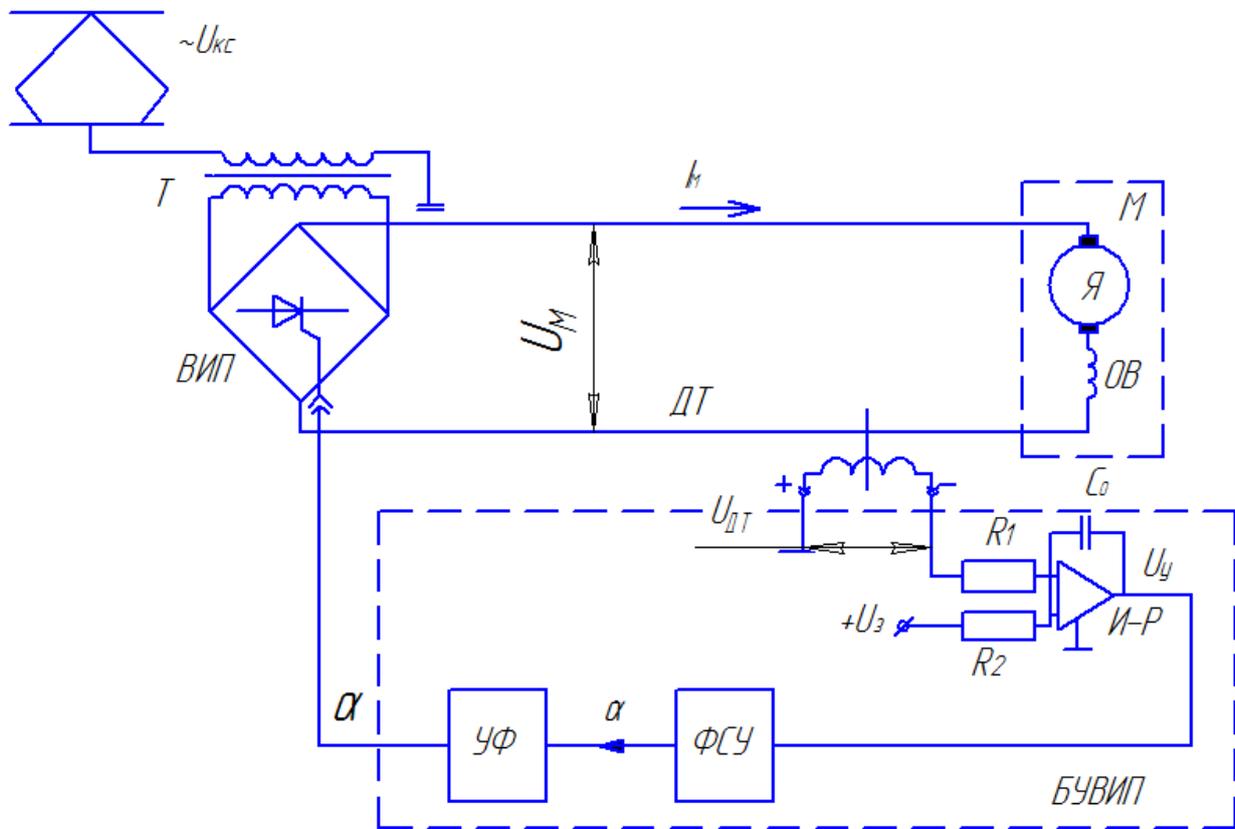
| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| $C\Phi$, (В/км)/ч | 1,5 | 2 | 1 | 2,5 | 5 | 1,2 | 0,8 |
| $K_{ру}$ | 7 | 5 | 1,2 | 7,8 | 4,7 | 9 | 4 |
| K_B | 1,1 | 2 | 3 | 1 | 1,9 | 1,5 | 1,1 |
| $K_{и-р}$ | 10 | 0,8 | 32 | 22 | 28 | 40 | 0,6 |
| $K_{дт}$, В/А | 0,01 | 0,5 | 0,5 | 0,12 | 0,025 | 0,084 | 0,15 |
| $\sum L_{яу}$, Ом | 0,08 | 0,06 | 0,02 | 0,09 | 0,064 | 0,16 | 0,01 |
| $\sum R_{яу}$, Ом | 0,1 | 0,12 | 0,25 | 0,2 | 0,08 | 0,05 | 0,09 |
| $T_{вв}$, с | 0,4 | 0,16 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,04 | 0,5 |
| $T_{врy}$, с | 0,20 | 0,55 | 0,38 | 0,8 | 1,1 | 1,5 | 0,9 |
| Q , (км/ч)/с | 0,08 | 0,5 | 0,25 | 0,4 | 0,09 | 0,3 | 0,6 |
| I_{max} , А | 500 | 200 | 400 | 250 | 800 | 600 | 400 |

Схема № 9
САР скорости катковой станции при испытании электровоза



| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------------|-------|------|------|------|------|------|------|
| $C\Phi$, (В/км)/ч | 2,3 | 3 | 2 | 1,3 | 1,5 | 8 | 8 |
| $m_{пр}$, Н/(км/ч) | 113 | 800 | 110 | 255 | 37,4 | 400 | 500 |
| $\sum L_{яв}$, Ом | 0,048 | 0,1 | 0,01 | 0,07 | 0,05 | 0,06 | 0,04 |
| $\sum R_{яв}$, Ом | 0,12 | 0,09 | 0,8 | 0,19 | 0,4 | 0,37 | 0,07 |
| $K_{рв}$ | 15 | 8,8 | 4,1 | 2,2 | 20 | 6,85 | 5,5 |
| $K_{эв}$ | 4 | 12 | 26 | 31 | 11 | 10 | 40 |
| $K_{п-р}$ | 1,4 | 4,7 | 1,5 | 10 | 2 | 12 | 5 |
| $K_{тг}$ | 1,6 | 0,55 | 2,4 | 0,3 | 0,7 | 0,2 | 0,1 |
| $T_{в рв}$, с | 0,7 | 0,25 | 1,4 | 0,4 | 0,6 | 0,3 | 1,1 |
| F_c , кН | 3 | 40 | 2,5 | 1,5 | 2 | 3,5 | 4,5 |
| V , км/ч | 40 | 55 | 70 | 80 | 60 | 86 | 61 |

Схема № 10
САР тока тягового двигателя



| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| L_M, Γ | 0,05 | 0,08 | 0,03 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | 0,04 |
| $R_M, \text{Ом}$ | 0,8 | 0,4 | 0,6 | 0,3 | 0,2 | 0,6 | 0,5 |
| $K_{\text{max}}, \text{В}/(\text{км}/\text{ч})$ | 23 | 25 | 24 | 20 | 21 | 30 | 28 |
| $K_{\text{ДТ}}, \text{В}/\text{А}$ | 0,1 | 0,15 | 0,12 | 0,2 | 0,07 | 0,3 | 0,23 |
| $K_{\text{ВИП}}$ | 40 | 15 | 40 | 35 | 20 | 25 | 30 |
| $T_{\text{ДТ}}, \text{с}$ | 0,01 | 0,04 | 0,06 | 0,05 | 0,02 | 0,07 | 0,03 |
| $T_{\text{ВИП}}, \text{с}$ | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,01 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
| $a, (\text{км}/\text{ч})/\text{с}$ | 0,42 | 0,6 | 0,8 | 0,5 | 0,41 | 0,4 | 0,35 |
| $I_{\text{М ном}}, \text{А}$ | 400 | 750 | 800 | 400 | 300 | 250 | 220 |
| $K_{\text{и-р}}$ | 10 | 32 | 12 | 1,4 | 2 | 23 | 5 |

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

Нормы показателей качества регулирования САР

Таблица В.1 – Нормы запасов устойчивости

| Уровень качества регулирования | Показатели запаса устойчивости | Нормы запасов устойчивости при $\omega_{ср}$, Гц | | | |
|---|--------------------------------|---|------------|--------------|--------|
| | | 0.01...100 | 100...1000 | 1000...10000 | >10000 |
| Высокий $\sigma_m \leq 22\%$ $\omega_{ср}t_p \leq 2.5\pi$ | γ_c^0 | 45 | 50 | 55 | 60 |
| | H_m , дБ | 16 | 18 | 20 | 22 |
| | $-H_m$, дБ | 14 | 16 | 11 | 20 |
| Удовлетвор. $\sigma_m \leq 35\%$ $\omega_{ср}t_p \leq 5\pi$ | γ_c^0 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| | H_m , дБ | 12 | 14 | 16 | 18 |
| | $-H_m$, дБ | 10 | 12 | 14 | 16 |

Учебное издание

Дурандин Михаил Гелиевич
Кузьминых Иван Александрович
Мишин Ярослав Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Методические указания
к выполнению расчетно-графической работы по дисциплине
«Теория систем автоматического управления» для студентов всех форм
обучения специальности 23.05.03 – «Подвижной состав железных дорог»,
специализаций «Электрический транспорт железных дорог»,
«Высокоскоростной наземный транспорт», «Вагоны»

Редактор С. В. Пилюгина

Подписано в печать 26.12.16. Формат 60x84/16
Усл. печ. л. 2,1. Электронная версия. Заказ 249

УрГУПС
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66