

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

---

# СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ № 1–3

Санкт-Петербург  
2006

Составитель: В. С. Акопов  
Рецензент: В. П. Платонов

Методические указания являются руководством к лабораторным работам по курсу «Системы управления приводами». Методика и объем выполнения лабораторных работ адаптированы под новые учебные планы. Введены элементы, направленные на использование современных пакетов MATLAB для анализа и синтеза систем управления. Исключена устаревшая элементная база.

Редактор *А. М. Смирнова*  
Верстальщик *А. Н. Колешко*

---

Сдано в набор 01.09.06. Подписано к печати 29.09.06. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,25. Уч. -изд. л. 2,25. Тираж 200 экз.  
Заказ № .

---

Редакционно-издательский центр ГУАП  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул. , 67

© ГУАП, 2006

Целью цикла лабораторных работ является изучение методов экспериментального определения передаточных функций следящих систем, их анализа с помощью современного пакета MATLAB и коррекции систем с помощью соответствующих корректирующих звеньев.

## **1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Экспериментальные исследования статических характеристик должны быть приведены в виде таблиц с цифровыми данными входных и выходных напряжений в вольтах, величин скорости для двигателя и тахогенераторов в 1/с, величин передаточных статических коэффициентов и графиков статических характеристик на миллиметровой бумаге с указанием их линейной части. Кроме того должны быть представлены:

- кривые переходных процессов отдельных звеньев на кальке или на миллиметровке с указанием масштаба времени и величины постоянной времени;
- логарифмические характеристики, иллюстрирующие динамический расчет;
- принципиальная электрическая схема системы вместе с корректирующим устройством с указанием необходимых соединений элементов;
- графики экспериментального переходного процесса.

Материалы по выполненной работе оформляются в соответствии с требованиями ЕСКД.

Все расчеты должны быть выполнены в системе СИ.

## **2. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

### **Занятие № 1**

1. Определить экспериментальным путем статические и динамические характеристики и отдельные параметры указанных в задании элементов следящего привода. Коэффициенты передаточных функ-

ций остальных элементов основной цепи рассчитать по паспортным данным. По результатам опыта и расчета следящей системы определить передаточную функцию разомкнутой цепи системы при отсутствии корректирующих устройств.

2. По передаточной функции разомкнутой системы построить в логарифмической системе координат амплитудную и фазовую частотные характеристики разомкнутой основной цепи следящего привода и определить устойчивость и показатели качества нескорректированной системы (в большинстве случаев следящая система без корректирующих устройств оказывается либо неустойчивой, либо ее показатели качества не удовлетворяют требованиям задания).

3. Собрать на лабораторной установке основную цепь следящей системы: измерительное устройство, усилитель, двигатель (исполнительный механизм), цепь главной обратной связи вместе с моделью нагрузки. Замкнуть систему и проверить ее показатели качества.

4. Выполнить расчет (моделирование) переходных процессов в рассматриваемой замкнутой системы с помощью соответствующего пакета программ (например, MATLAB, MATCAD). В случае несовпадения результатов опыта и расчета выяснить причину (ошибку в расчетах, погрешность эксперимента и др.).

5. Определить место включения корректирующего устройства заданного типа, рассчитать параметры этого устройства, обеспечивающего устойчивость следящей системы с заданными показателями качества. Выполнить моделирование привода с рассчитанным корректирующим звеном, используя возможности системы MATLAB+SIMULINK (или других подобных программ).

## Занятие № 2

1. Собрать рассчитанное корректирующее устройство и включить его в схему макета следящей системы, работающей на заданную нагрузку.

2. Определить показатели качества скорректированной замкнутой системы.

3. Найденные по результатам эксперимента показатели сравнить с требованиями задания и в случае несовпадения объяснить причины.

4. Произвести вариации параметров системы и внешних возмущений и дать оценку влияния параметров на качество системы.

5. Экспериментально определить запас устойчивости системы по модулю и сравнить с теоретическим расчетом.

### **Занятие № 3**

1. Обсуждение результатов.
2. Проверка отчета преподавателем.
3. Сдача зачета.

Примечание. Все расчетные и графические работы выполняются дома к следующему занятию. В начале каждого занятия они предъявляются преподавателю, после чего студенты могут быть допущены к работе.

## Лабораторная работа № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ СЛЕДЯЩЕЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

*Цель работы:* ознакомление с приводом радиолокационной системы (РЛС), аппаратурой и методами экспериментального исследования системы; получение навыков экспериментального снятия статических и динамических характеристик отдельных элементов и системы в целом; изучение влияния обратных связей на динамику следящей системы; расчет обратных связей методом логарифмических амплитудно-фазовых частотных характеристик, идентификация передаточной функции системы с помощью соответствующих пакетов прикладных программ.

#### Принцип действия следящей системы

Следящая система (рис. 1) предназначена для дистанционного вращения РЛС вокруг оси азимута. Входным задающим воздействием является угол поворота ротора сельсина-датчика *СД*, расположенного на штурманском пульте. На оси антенны жестко закреплен ротор сельсина-приемника *СП*. Сельсины работают в трансформаторном режиме. Сигнал переменного тока, пропорциональный их угловому рассогласованию, усиливается электронным усилителем напряжения *ЭУ* и через фазочувствительный выпрямитель *ФЧВ* поступает на обмотки управления магнитного усилителя мощности *МУ*. На выход *МУ* подключена обмотка управления двухфазного асинхронного двигателя *ДИ*, который через редуктор поворачивает антенну и связанный с ней ротор *СП* до тех пор, пока сигнал рассогласования между заданным направлением и направлением антенны не станет равным нулю.

С целью обеспечения возможности стабилизации системы и придания ей заданных динамических качеств путем введения обратных связей вал двигателя жестко соединен с валом тахогенератора постоянного тока. Кроме того, обмотка управления двигателя использована для построения тахометрического моста.

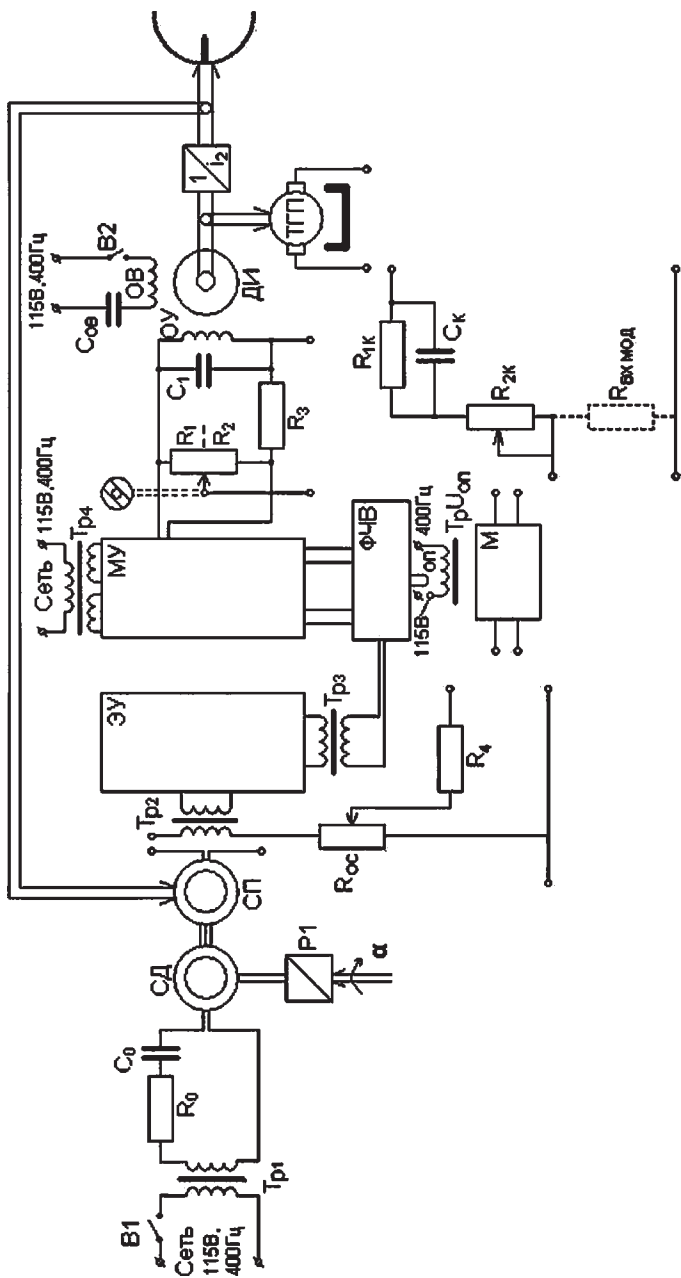


Рис. 1. Упрощенная принципиальная электрическая схема стенда

Из вспомогательных устройств макет системы содержит корректирующую  $RC$ -цепь и двухтактный ключевой транзисторный модулятор.

### Описание элементов системы

*Сельсинная пара* составлена из бесконтактных сельсинов типа СБМ-1. Однофазная обмотка  $СД$  запитывается от напряжения 36 В, 400 Гц. Трехфазные обмотки сельсинов соединены между собой, и с однофазной обмотки  $СП$  снимается напряжение с частотой 400 Гц. Амплитуда этого напряжения пропорциональна синусу угла рассогласования, и при малых углах можно приближенно считать, что она пропорциональна углу рассогласования. Фаза же напряжения имеет значения нуль и  $180^\circ$  по разные стороны от согласованного положения.

Сельсинная пара как динамический элемент представляет собой безынерционное звено, и передаточная функция его имеет следующий вид

$$W_{cc}(p) = K_{cc}.$$

*Электронный усилитель (ЭУ)*, переменного тока собран на лампе 6Н16Б по двухкаскадной реостатно-емкостной схеме.

Для того чтобы иметь возможность завести ОС, на вход ЭУ включен потенциометр  $R_{oc}$ .

Электронный усилитель можно приближенно считать безынерционным звеном.

*Фазочувствительный выпрямитель (ФЧВ) и магнитный усилитель (МУ)*. В данной следящей системе МУ мощности управляется постоянным током, поэтому сигнал управления с ЭУ напряжения поступает на МУ через ФЧВ.

Нагрузкой МУ является обмотка управления ОУ двухфазного асинхронного двигателя.

Передаточная функция МУ совместно с ФЧВ определяется отношением изображения огибающей сигнала на выходе МУ к изображению огибающей сигнала на входе ФЧВ:

$$W_{MY}(p) = \frac{K_{MY}}{T_{MY}p + 1},$$

где  $K_{MY}$  — коэффициент передачи МУ;  $T_{MY}$  — постоянная времени МУ, т. е. МУ представляет собой апериодическое звено первого порядка.

*Двигатель (Д)*. Исполнительным элементом системы является асинхронный двухфазный электродвигатель с полым ротором типа



ЭМ-25. Индуктивность обмотки управления компенсирована конденсатором  $C_1$ , подключенным параллельно. В результате чего обмотку управления можно считать чисто активной нагрузкой, величина которой равна эквивалентному сопротивлению этой обмотки  $R_{уэ}$ .

Передаточная функция двухфазного асинхронного двигателя от напряжения управления к углу поворота вала двигателя имеет вид [1, 2]:

$$W_D(p) = \frac{K_D}{p(T_{ЭМ}p + 1)},$$

где  $K_D$  — коэффициент передачи двигателя ( $\frac{\text{рад}}{\text{с} \cdot \text{в}}$ );  $T_{ЭМ}$  — электро-механическая постоянная времени.

*Тахометрический мост*, образован обмоткой управления двигателя и сопротивлениями  $R_1, R_2, R_3$  (рис. 2). Выходной сигнал моста при соответствующей балансировке [3] пропорционален скорости вращения вала двигателя.

Принцип действия моста понятен из способа его балансировки, которая производится в следующей последовательности. На обмотку управления подается сигнал от МУ при подключенных сопротивлениях моста. Затем вал двигателя затормаживают до полной остановки и путем изменения отношения  $R_1/R_2$  приводят напряжение на диагонали моста  $c-d$  к нулю или минимально достижимому значению, что будет соответствовать балансировке моста по первой четырехсотгерцевой гармонике. Теперь при отпуске вала ЭДС, возникающая в обмотке управления при вращении вала двигателя, создаст в диагонали  $c-d$  сигнал переменного тока. Так как величина ЭДС пропорциональна скорости вращения вала двигателя, то выходной сигнал моста, снимаемый с диагонали  $c-d$ , является тахометрическим.

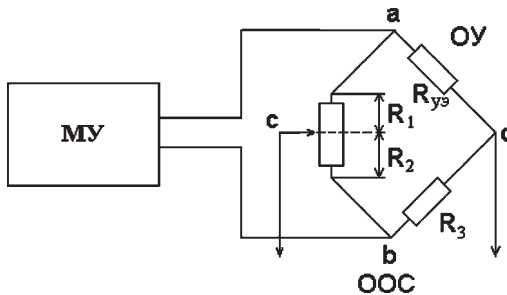


Рис. 2. Схема тахометрического моста

Сопротивление моста  $R_3$  выбирается достаточно малым, так как на нем расходуется мощность управления. Чтобы цепь, составленная из сопротивлений моста  $R_1$  и  $R_2$ , не нагружала магнитный усилитель, их выбирают существенно большими  $R_{y3}$  и  $R_1$ . Условия баланса с заторможенным валом двигателя и достаточно большим сопротивлением нагрузки на выходе моста имеет вид  $R_{y3}R_2 = R_1R_3$ . Для удобства балансировки сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  объединены одним потенциометром, как показано на рис. 2.

Снимаемый с диагонали моста  $c-d$  тахометрический сигнал переменного тока может быть непосредственно подан в качестве отрицательной обратной связи на вход ЭУ. Передаточная функция тахометрического моста от скорости вращения вала к выходному напряжению моста есть величина

$$W_{TM}(p) = K_{TM}$$

или от угла поворота двигателя

$$W_{TM}(p) = K_{TM}p.$$

*Тахогенератор (ТГ)*. Тахогенератор постоянного тока типа ТГП-3 – коллекторная микромашинка с магнитной системой, выполненной на постоянных магнитах. Вал его жестко соединен с валом двигателя.

Передаточная функция ТГ от угла поворота двигателя к выходному напряжению постоянного тока показывает, что он является дифференцирующим звеном:

$$W_{TG}(p) = K_{TG}p.$$

*Модулятором (М)*, является двухтактный ключевой транзисторный М, который служит для преобразования сигнала постоянного тока, снимаемого с тахогенератора в сигнал переменного тока с частотой 400 Гц.

Двухтактный модулятор можно считать безынерционным звеном с коэффициентом передачи, близким к единице:

$$W_M(p) = K_M.$$

*Редуктор (Р)*. Передаточная функция редуктора:

$$W_P(p) = K_P = \frac{1}{i},$$

где  $i$  – коэффициент редукции.

## Синтез корректирующих устройств системы

С помощью простейшей отрицательной ОС по скорости (рис. 3) можно стабилизировать систему и в некоторых пределах изменить ее динамические свойства. Схемы введения таких обратных связей от тахометрического моста и ТГ показаны на рис. 4 а, б. Сопротивление  $R_4$  включено для того, чтобы не перегружать тахометрический мост и тахогенератор. С помощью коэффициента потенциометра  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 10$ ) регулируется глубина ОС. Коэффициенты обратных связей определяются следующими выражениями:

$$K_{OC1} = K_{TM} \frac{\alpha R_{OC}}{R_4 + \alpha R_{OC}}; \quad K_{OC2} = K_{TM} K_M \frac{\alpha R_{OC}}{R_4 + \alpha R_{OC}}.$$

С помощью простейших отрицательных ОС по скорости не удается получить систему с достаточно высокими динамическими свойствами. Можно показать, что при увеличении глубины ОС по скорости система ведет себя как апериодическое звено, т. е. слишком «вялая».

Поэтому представляет интерес усложнить ОС, с тем чтобы обеспечить заданные динамические качества системы.

Предлагается с помощью включения в ОС дополнительной RC-цепи, показанной на рис. 5, получить заданные в методических указаниях показатели качества. Передаточная функция такой ОС имеет следующий вид:

$$W_{OC}(p) = K_{TG} K_M \frac{\bar{\alpha} \cdot R_{OC}}{R_4 + \bar{\alpha} \cdot R_{OC}} \cdot \frac{R_M}{R_{1K} + R_{2K} + R_M} \cdot \frac{p(T_1 p + 1)}{T_2 p + 1},$$

где  $T_1 = R_{1K} C_{1K}$ ;  $T_2 = \frac{(R_{2K} + R_M) T_1}{R_{1K} + R_{2K} + R_M}$ ;  $R_M$  – входное сопротивление модулятора.

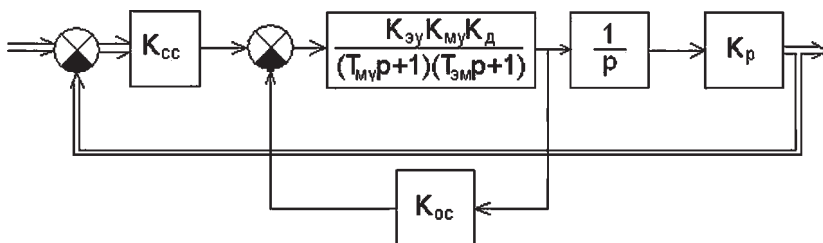
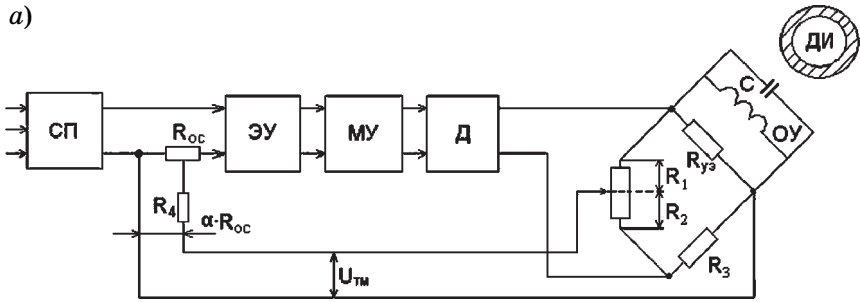
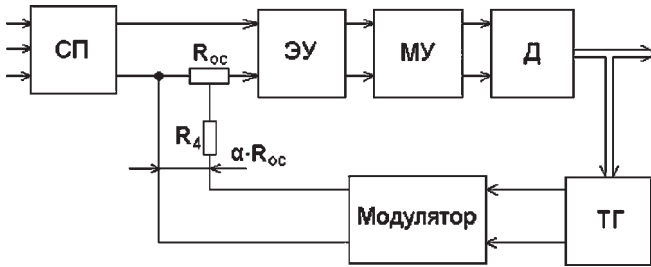


Рис. 3. Функциональная схема следящей системы с отрицательной обратной связью по скорости

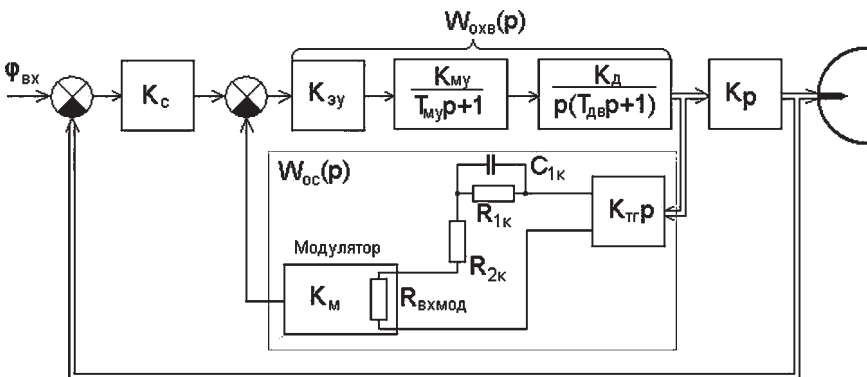
а)



б)



**Рис. 4.** Принципиальная схема отрицательной обратной связи от тахометрического моста (а); принципиальная схема отрицательной обратной связи от тахогенератора постоянного тока (б)



**Рис. 5.** Схема включения корректирующего звена

Расчет параметров обратной связи, сводящийся, в конечном счете, к определению сопротивления  $R_{1К}$  и  $R_{2К}$  следует произвести методом Федорова, изложенным в [4].

Методические указания к выполнению работы

*Исходные данные.* Параметры звеньев системы:

$$K_{МУ} \cdot K_{Д} = 1,8 \cdot 10^3 \frac{\text{рад}}{\text{в} \cdot \text{с}}; \quad K_{ТГ} = 4,14 \cdot 10^{-2} \frac{\text{в} \cdot \text{с}}{\text{рад}}; \quad K_{ТМ} = 1,13 \cdot 10^{-2} \frac{\text{в} \cdot \text{с}}{\text{рад}};$$

$K_M = 1,0$ ;  $K_P = 1/300$ ;  $T_{ЭМ} = 0,53$  с;  $T_{МУ} = 0,27$  с;  $T_{ИД} = 0,53$  с. Эквивалентное активное сопротивление обмотки управления двигателя:  $R_{УЭ} = 43,6$  Ом; Электрические элементы  $R_1 = 6$  Ом;  $R_2 + R_3 = 2,2$  Ом;  $R_4 = 1,8$  кОм;  $R_{ОС} = 560$  Ом;  $R_M = 2$  кОм;  $C_{1К} = 100$  мкФ.

*Данные для динамического расчета.* Максимальная скорость:

$$\Omega_{\max} = 0,28 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad \text{максимальное ускорение } \varepsilon_{\max} = 0,14 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \quad \text{макси-}$$

мальная динамическая ошибка:  $\Theta_{\max} = (1,25 \div 1,80) \cdot 10^{-2}$  рад; (уточняется преподавателем); показатель колебательности:  $M = (1,4 \div 1,5)$  (уточняется преподавателем).

### Порядок выполнения работы

1. Снять статические характеристики сельсинной пары и ЭУ и определить  $K_{СС}$  и  $K_{ЭУ}$ .

2. С помощью осциллографа определить постоянную времени магнитного усилителя  $T_{МУ}$ .

3. Рассчитать схему тахометрического моста и сбалансировать его экспериментально.

4. Составить структурную схему системы и исследовать ее устойчивость экспериментально, выполнив моделирование в пакете МАТЛАВ.

5. Методом логарифмических амплитудных характеристик (ЛАХ) определить параметры ОС, обеспечивающей заданные показатели качества.

6. Рассчитать переходный процесс.

7. Ввести требуемую обратную связь, снять осциллограмму переходного процесса и сравнить его с расчетным.

8. Установить влияние параметров ОС на переходный процесс.

9. Оформить отчет, в который включить расчетные, экспериментальные результаты и результаты математического моделирования.

## Контрольные вопросы

1. Как изменяется напряжение на выходе сельсина-приемника при рассогласовании его с сельсином-датчиком?
2. Для чего необходима фазовая коррекция сигнала и какими средствами она осуществляется?
3. Что произойдет со следящей системой, если концы обмотки возбуждения двигателя поменять местами?
4. Как балансируется тахометрический мост?
5. Какова форма сигнала на выходе модулятора?
6. Какова общая передаточная функция замкнутой системы до коррекции?
7. Какие пакеты программ и как они могут быть использованы для моделирования рассматриваемой системы?
8. Составьте имитационную модель привода РЛС.

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

*Цель работы:* ознакомление с аппаратурой и методами экспериментального исследования и анализа интегрирующего электропривода (ИП); получение навыков экспериментального определения статических и динамических характеристик отдельных элементов и системы в целом; приобретение навыков расчета системы ИП, схемы и параметров корректирующих устройств, развитие умения анализировать результаты компьютерного моделирования и опытного исследования.

#### Принцип действия системы

Схема ИП служит для получения угла поворота выходного вала (или напряжения, пропорционального этому углу), пропорционального интегралу по времени от входного напряжения.

Упрощенная принципиальная электрическая схема ИП приведена на рис. 6, структурная схема – на рис. 7.

Напряжение  $U_{\text{вТ}}$ , поступающее от датчика угла  $ДУ$  (задающей части привода – вращающегося трансформатора  $ВТ$ ), и являющееся входным сигналом привода  $U_{\text{вх}}$ , сопоставляется с напряжением  $U$ , снимаемым с генераторной обмотки  $ОГ$  тахогенератора  $ТГ$ . Результат сопоставления в виде напряжения рассогласования  $U_{\text{р}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{ТГ}}$ , подается на вход делителя напряжения  $ДН$ , предназначенного для изменения величины напряжения, поступающего на вход усилителя напряжения  $УН$  и в конечном итоге для изменения коэффициента передачи всей системы.

После делителя напряжения  $ДН1$  сигнал поступает на вход усилителя, состоящего из усилителя напряжения  $УН$ , фазочувствительного выпрямителя  $ФЧВ$  и усилителя магнитного  $УМ$ , для управления исполнительным двигателем  $Д$ , вал которого непосредственно соединен с валом тахогенератора  $ТГ$ . Скорость двигателя определяется величиной  $U_{\text{вх}}$ . При большом коэффициенте усиления усилителя автоматически устанавливается такая скорость, при которой  $U_{\text{р}} \ll U_{\text{вх}}$ , т. е.  $U_{\text{ТГ}} \approx U_{\text{вх}}$





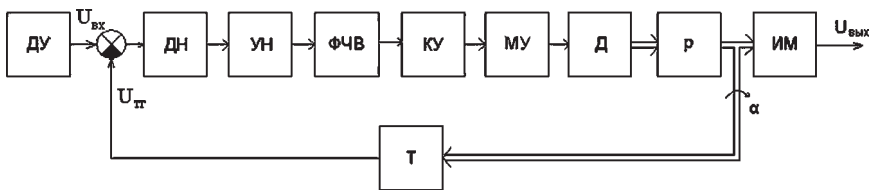


Рис. 7. Структурная схема

Напряжение ТГ определяется следующим выражением:

$$U_{\text{ТГ}} = K_{\text{ТГ}} \frac{d\alpha}{dt},$$

где  $\alpha$  – угол поворота вала Д и ТГ;  $K_{\text{ТГ}}$  – статический коэффициент передачи ТГ или коэффициент пропорциональности между напряжением и скоростью вращения его ротора.

Следовательно,  $U_{\text{вх}} \approx K_{\text{ТГ}} \frac{d\alpha}{dt}$  и  $\alpha = \frac{1}{K_{\text{ТГ}}} \int_0^1 U_{\text{вх}}(t) dt$ .

Угол  $\alpha$  является выходной величиной ИП. С помощью ТГ осуществляется главная обратная связь.

### Описание элементов системы

**Делитель напряжения (ДН).** В качестве ДН используется потенциометр с сопротивлением  $R = 33$  кОм. Меняя положение его движка, т. е.  $\alpha^1$  от 0 до 1, можно изменять коэффициент передачи системы.

Передачный коэффициент ДН равен  $\alpha$ :

$$W_{\text{ДН}}(p) = K_{\text{ДН}} = \alpha^1.$$

**Усилитель напряжения (УН).** В качестве УН используется двухкаскадный полупроводниковый усилитель на трех транзисторах типа П-102. Передаточная функция УН определяется следующим выражением:

$$W_{\text{УН}}(p) = \frac{U_{\text{ввыхУН}}}{U_{\text{вхУН}}} = K_{\text{УН}},$$

где  $U_{\text{вхУН}}$  – напряжение на первичной обмотке трансформатора  $Tr_1$ ;  $U_{\text{ввыхУН}}$  – напряжение на выходе усилителя напряжения;  $K_{\text{УН}}$  – статический (передаточный) коэффициент усилителя напряжения.

**Фазочувствительный выпрямитель (ФЧВ).** Переменное напряжение с выхода: УН преобразуется в постоянное с помощью ФЧВ, выполненного по двухполупериодной схеме сдвоенного моста.

Передаточная функция ФЧВ определяется следующим выражением:

$$W_{\text{ФЧВ}}(p) = \frac{U_{\text{выхФЧВ}}}{U_{\text{вхФЧВ}}} = K_{\text{ФЧВ}},$$

где  $U_{\text{вхФЧВ}}$  – напряжение на входе усилителя мощности;  $U_{\text{выхФЧВ}}$  – напряжение на выходе ФЧВ,  $K_{\text{ФЧВ}}$  – статический коэффициент передачи напряжения ФЧВ.

*Магнитный усилитель МУ-50Б* – двухтактный двухкаскадный двухполупериодный магнитный усилитель мощности с выходом на переменном токе.

Передаточная функция МУ определяется по формуле:

$$W_{\text{МУ}}(p) = \frac{U_{\text{выхМУ}}}{U_{\text{вхМУ}}} = \frac{K_{\text{МУ}}}{T_{\text{МУ}}p + 1},$$

где  $U_{\text{вхМУ}}$  – входное напряжение МУ;  $U_{\text{выхМУ}}$  – напряжение на обмотке асинхронного двигателя, являющегося нагрузкой МУ;  $K_{\text{МУ}}$  – статический коэффициент усиления напряжения МУ;  $T_{\text{МУ}}$  – электромагнитная постоянная времени МУ, определяемая в эксперименте по кривой переходного процесса.

Исполнительный электродвигатель АДП-123. В качестве исполнительного электродвигателя в системе применен асинхронный двухфазный двигатель с полым ротором, конденсатором в цепи возбуждения  $C_{\text{об}}$ . Цепь возбуждения питается от сети 115 В 400 Гц, в цепь управления подается напряжение с выхода МУ от 0 до 90 В.

Электромеханические параметры двигателя приведены в исходных данных (см. Метод. указания к работе).

Передаточная функция электродвигателя определяется по следующей формуле:

$$W_{\text{Эл}}(p) = \frac{\omega_{\text{д}}}{U_{\text{у}}} = \frac{K_{\text{д}}}{T_{\text{ЭМ}}p + 1},$$

где  $\omega_{\text{д}}$  – скорость вращения двигателя;  $U_{\text{у}}$  – напряжение управления на ОУ двигателя;  $K_{\text{д}}$  – статический коэффициент передачи двигателя;  $T_{\text{ЭМ}}$  – электромеханическая постоянная времени двигателя, в эксперименте определяемая по кривой переходного процесса следующим выражением:

$$T_{\text{ЭМ}} = \frac{J\omega_{\text{н}}}{M_{\text{п}} - M_{\text{н}}},$$

где  $M_{\text{п}}$  – пусковой момент двигателя;  $M_{\text{н}}$  – номинальный момент двигателя;  $\omega_{\text{н}}$  – номинальная скорость вращения двигателя;  $J$  – момент инерции вращающихся частей, приведенный к валу двигателя.

*Асинхронный тахогенератор АТ-161.* В качестве главной обратной связи ИП применен асинхронный тахогенератор, параметры которого приведены в исходных данных. Передаточная функция АТ определяется следующим выражением:

$$W_{\text{ТГ}}(p) = \frac{U_{\text{ТГ}}}{\omega_{\text{ТГ}}} = K_{\text{ТГ}},$$

где  $U_{\text{ТГ}}$  – напряжение на выходе ТГ;  $\omega_{\text{ТГ}}$  – скорость вращения вала тахогенератора;  $K_{\text{ТГ}}$  – статический коэффициент передачи ТГ.

### Синтез корректирующих устройств системы

Для обеспечения требуемых показателей качества ИП необходимо осуществить синтез его корректирующих устройств. Сначала производится анализ динамики системы методом логарифмических амплитудно-фазовых частотных характеристик ЛАФЧХ. Для этого строятся прежде всего ЛАХ и ЛФХ разомкнутой нескорректированной системы, или, иными словами, располагаемые ЛАХ и ЛФХ (РЛАХ и РЛФХ) и по их взаимному расположению определяются наличие или отсутствие устойчивости в системе, а в случае устойчивости — запасы устойчивости по фазе и по амплитуде. Для улучшения динамических свойств привода предлагается произвести синтез последовательного корректирующего звена ПКЗ. Сначала требуется построить желаемую ЛАХ (ЖЛАХ) методом В. В. Солодовникова или В. А. Бесекерского[1].

ЛАХ ПКЗ определяется вычитанием РЛАХ из ЖЛАХ

$$L_{\text{ПКЗ}}(\omega) = L_{\text{Ж}}(\omega) - L_{\text{Р}}(\omega),$$

исходя из соотношения:

$$W_{\text{Ж}}(p) = W_{\text{Р}}(p)W_{\text{ПКЗ}}(p).$$

В результате получится ЛАХ, реализуемая интегро-дифференцирующим контуром, схему и параметры которого необходимо выявить по таблице [ 2, 3].

После расчета параметров и включения ПКЗ в схему ИП следует снять переходный процесс при единичном входном воздействии – скачке.

## Методические указания к выполнению работы

*Исходные данные:* максимальная скорость вращения привода:

$$\Omega_m = 400 \frac{1}{с}; \text{ коэффициент передачи тахогенератора: } K_{ТГ} = 40 \frac{мВ}{с};$$

статическая ошибка системы:  $X_C = 0,01\Omega_m$ ; время регулирования:  $t_m = 0.2 \div 0.3$  с; перерегулирование:  $s=20-40\%$ .

### Порядок выполнения работы

1. Определить параметры передаточных функций элементов системы: коэффициенты передачи ДН, УН, ФЧВ, МУ, электродвигателя и постоянные времени МУ и исполнительного двигателя.

2. Снять осциллограмму переходного процесса замкнутой нескорректированной системы.

3. Выполнить моделирование в пакете MATLAB рассматриваемой системы без корректирующего устройства. Сопоставить с осциллограммами переходных процессов, при необходимости уточнить параметры передаточной функции системы

4. Произвести анализ и синтез системы методом логарифмических частотных характеристик: построить желаемую ЛАХ по методам В. В. Солодовникова и В. А. Бесекерского; определить параметры последовательного корректирующего контура.

5. Выполнить моделирование в пакете MATLAB рассматриваемой системы с корректирующим устройством.

6. Снять осциллограмму переходного процесса замкнутой скорректированной системы. Сопоставить с переходным процессом, полученным при моделировании

### Рекомендации по экспериментальному определению параметров системы

1. Для снятия статических характеристик элементов ИП необходимо разомкнуть главную обратную связь, включить на вход и выход каждого элемента вольтметр, учитывая при этом род тока, протекающего в данной цепи, и задавая напряжение на входе делителя напряжения ДН<sub>1</sub>, замерить показания вольтметров.

2. Снять статические характеристики элементов и определить коэффициенты передачи по линейным участкам этих характеристик.

3. Скорость вращения двигателя следует измерять по напряжению ТГ.

## Контрольные вопросы

1. Что произойдет с замкнутой системой, если поменять местами концы задающего устройства?
2. Что произойдет с замкнутой системой, если поменять местами концы обмотки ОГ ТГ?
3. Как изменятся свойства системы при изменении положения потенциометра R3?
4. Системой какого типа является данный интегрирующий привод?
5. Как особенности данной системы отражаются на логарифмических характеристиках?
6. Какова методика анализа (моделирования) интегрирующего привода в пакете MATLAB?
7. Какова схема имитационной модели ИП?
8. Почему рассматриваемый привод называется интегрирующим?

### Лабораторная работа № 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОЙ МАЛОМОЩНОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ УСИЛИТЕЛЕМ

*Цель работы:* ознакомление с принципом работы маломощных следящих систем, аппаратурой и методами экспериментального исследования системы; получение навыков экспериментального определения статических и динамических характеристик отдельных элементов и системы в целом; изучение влияний корректирующих устройств (прямых и обратных связей) на динамику системы; расчет корректирующих устройств, изучение методов математического моделирования следящих систем с использованием пакета программ MATLAB.

### Принцип действия следящей системы

Упрощенная схема следящего привода представлена на рис. 8. В качестве измерителя рассогласования *ИР* использованы потенциометры.

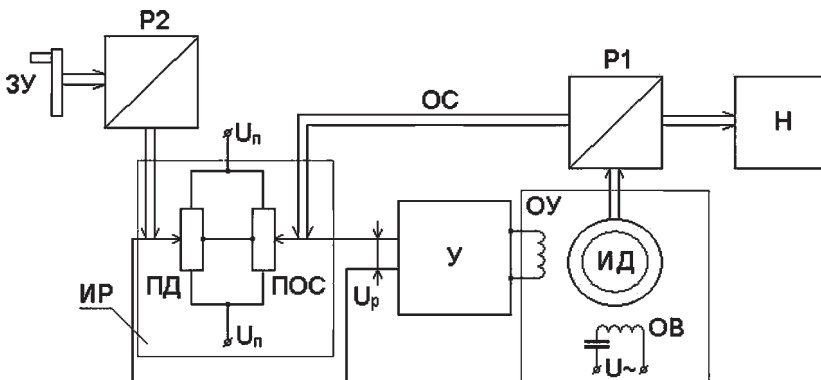


Рис. 8. Упрощенная схема следящего привода

Рукоятка задающего устройства  $ZУ$  через редуктор задающего устройства  $P2$  соединена с подвижным контактом потенциометра — датчика  $ПД$ . Вал обратной связи  $ОС$  связан с подвижным контактом потенциометра обратной связи  $ПОС$ .

Оба потенциометра включаются в одну сеть питания постоянного или переменного тока и образуют схему  $ИР$ .

Если подвижные контакты обоих потенциометров занимают одинаковые положения, то они находятся на точках одинакового потенциала и напряжение между ними равно нулю. При повороте входного вала на угол  $\Theta_{вх}$  на выходе  $ИР$  появляется напряжение  $U_p$ , пропорциональное углу рассогласования  $\Theta$  между подвижными контактами потенциометров, полярность этого напряжения (или его фаза при питании  $ИР$  переменным током) определится направлением угла рассогласования.

Напряжение  $U_p$ , усиленное усилителем  $У$ , подается на обмотку управления  $ОУ$  исполнительного асинхронного двухфазного двигателя  $ИД$ , обмотка возбуждения  $ОВ$  которого подсоединена к сети  $U$ . Исполнительный двигатель  $ИД$  через редуктор  $P1$  поворачивает нагрузку  $Н$ , вал обратной связи  $ОС$  и движок  $ПОС$  до тех пор, пока движки  $ПД$  и  $ПОС$  не займут согласованное положение, в котором напряжение рассогласования  $U_p = 0$ .

Таким образом, описанная схема осуществляет непрерывное слежение вала  $ОС$  и нагрузки за положением вала задающего устройства.

Электрическая схема стенда для исследования следящего привода приведена на рис. 9: задающее устройство  $ZУ$  с редуктором  $P2$ ; потенциометр-датчик  $ПД$ ; потенциометр обратной связи  $ПОС$ ; трансформатор  $Tr_1$  для питания  $ПД$ ,  $ПОС$ ; трансформатор  $Tr_2$  для питания обмоток возбуждения  $ОВ$  исполнительного двигателя  $ИД$  и тахогенератора  $ТГ$ ; трансформатор  $Tr_3$  для получения опорных напряжений для фазочувствительного выпрямителя  $ФЧВ$  и модулятора  $М$ ; усилитель  $У$  для усиления сигнала рассогласования, подающий сигнал управления на обмотку  $ОУ$  исполнительного двигателя; делитель напряжения  $ДН$ , состоящий из потенциометра  $R_{ПД}$ , калиброванного делителя и сопротивлений  $R_{Д1}$ ,  $R_{Д2}$ ,  $R_{Д3}$ ,  $R_{Д4}$ , с коэффициентам деления 1:10, 1:100, 1:1000.

Фазочувствительный выпрямитель  $ФЧВ$  и модулятор  $М$  служат для преобразования сигналов в схеме привода при включении различных корректирующих средств постоянного тока.

Включение стенда осуществляется выключателями напряжений 115 В, 400 Гц и постоянного тока 27 В. Напряжение переменного

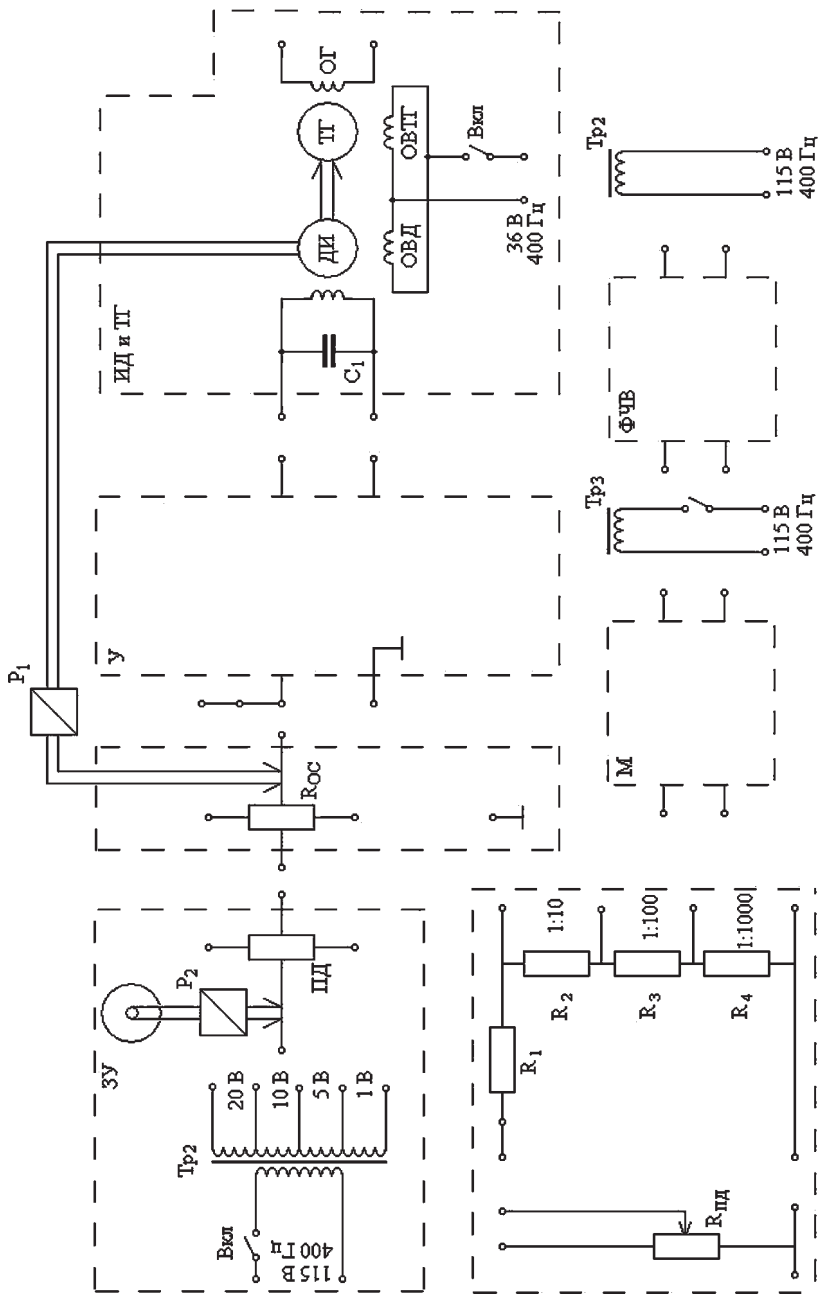


Рис. 9. Упрощенная электрическая схема стенда



тока питает возбуждение *ИД*, *ТГ*, создает опорные напряжения на *ФЧВ* и *М*, используется для подачи испытательных сигналов. Напряжение постоянного тока питает полупроводниковый усилитель *У*. Питание *ПД* и *ПОС* может осуществляться как переменным, так и постоянным током.

### Описание элементов системы

Потенциометрический измеритель рассогласования (*ИР*).

В качестве *ПД* и *ПОС* использованы потенциометры типа ЕУ-46855073 со следующими данными: диаметр каркаса  $d_k = 64$  мм; общее число витков  $w = 2000$  витк; число витков между точками А и Г подключения потенциометра к сети  $w_{AG} = 1000$  витк.

Сопротивление потенциометра между точками А и Г  $R_{AG} = 1800$  Ом. Допустимая мощность 1 Вт.

Так как в схеме привода использованы одинаковые потенциометры, то легко определить параметры *ИР* по схеме соединений потенциометров, показанной на рис. 8.

Коэффициент передачи ненагруженного *ИР* в согласованном положении

$$K_{\Pi} = \frac{U_{\Pi}}{\varphi_{\Pi}}, \quad (1)$$

где  $U_{\Pi}$  – напряжение питания *ИР*;  $\varphi_{\Pi}$  – угол намотки потенциометра (в нашем случае потенциометр подключен к сети выводами А и Г, т. е.  $\varphi_{\Pi} = \pi$ ).

Внутреннее сопротивление *ИР*

$$R_{\Pi\text{вн}} = 2R_{\Pi} \frac{\alpha_{\Pi\text{Д}}}{\varphi_{\Pi}} \left( 1 - \frac{2\alpha_{\Pi\text{Д}}}{\varphi_{\Pi}} \right), \quad (2)$$

где  $R_{\Pi}$  – сопротивление потенциометра;  $\alpha_{\Pi\text{Д}}$  – угол отклонения потенциометра датчика.

Наибольшее значение  $R_{\Pi\text{вн}} = \frac{R_{\Pi}}{4}$  достигается при угле поворота  $\alpha_{\Pi\text{Д}} = \frac{\varphi_{\Pi}}{4}$  (заметим, что если разомкнуть неподвижные средние точки потенциометров, схема упрощается, но внутреннее сопротивление увеличивается вдвое).

Обычно потенциометрические *ИР* считают безынерционным звеном:

$$W_{\Pi}(p) = K_{\Pi}. \quad (3)$$

Более подробные данные о потенциометрических *ИР* приведены в [11].

*Полупроводниковый усилитель (У)* служит для усиления сигнала рассогласования до амплитуды и мощности, достаточных для управления двигателем. Полупроводниковый усилитель практически можно считать безынерционным звеном с передаточной функцией

$$W_y(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)} = K_y. \quad (4)$$

*Исполнительный двигатель (ИД) и тахогенератор (ТГ).* В качестве ИД использована электрическая машина ДГ-0,5 конструктивно объединяющая в одном корпусе асинхронный двухфазный двигатель и асинхронный ТГ, роторы которых имеют общий вал.

Паспортные данные ДГ-0,5 можно найти в справочниках по электрическим машинам или в [13].

Индуктивность обмотки управления (ОУ) двигателя скомпенсирована, параллельно ей подключенным конденсатором  $C_1$ . В результате чего параллельное соединение конденсатора и ОУ можно считать чисто активной нагрузкой для выходного каскада усилителя. Конденсатор  $C_1$  совместно с индуктивностью  $L_{\text{ОУ}}$  ОУ обуславливает ограничение частотной полосы пропускания в этой цепи. При настройке в резонанс воздействие на огибающую сигнала можно учесть, вводя дополнительное апериодическое звено с постоянной времени [18]:

$$T_{\text{ОУ}} \approx \frac{2L_{\text{ОУ}}}{r_{\text{ОУ}} + r_{\text{ВЫХ}}}, \quad (5)$$

где  $r_{\text{ОУ}}$  – активное сопротивление обмотки управления;  $r_{\text{ВЫХ}}$  – внутреннее (выходное сопротивление усилителя), которое может быть определено экспериментально снятием внешней характеристики усилителя.

Передаточная функция двухфазного асинхронного двигателя от напряжения управления к углу поворота вала двигателя, если линеаризировать механические характеристики двигателя, имеет следующий вид:

$$W_{\text{Д}}(p) = \frac{\Theta_{\text{Д}}(p)}{U_{\text{У}}(p)} = \frac{K_{\text{Д}}}{p(T_{\text{Д}}p + 1)(T_{\text{ОУ}}p + 1)}, \quad (6)$$

где  $K_{\text{Д}}$  – коэффициент передачи двигателя, *сек*;  $T_{\text{Д}} = 0,4$  с – электрическая постоянная времени двигателя;  $\Theta_{\text{Д}}$  – угол поворота двигателя, рад;  $U_{\text{У}}$  – напряжение на обмотках управления, В;  $T_{\text{ОУ}} = 0,01$  с – постоянная времени обмотки управления двигателя.

Тахогенератор имеет передаточную функцию

$$W_{\text{ТГ}}(p) = \frac{U_{\text{ТГ}}(p)}{\Theta_{\text{Д}}(p)} = K_{\text{ТГ}}p, \quad (7)$$

т. е. является чисто дифференцирующим звеном по отношению к углу поворота двигателя.

*Модулятор (М).* Двухтактный ключевой транзисторный модулятор служит для преобразования сигнала постоянного тока в сигнал переменного тока с частотой 400 Гц, модулированный по амплитуде сигналом постоянного тока. Двухтактный модулятор можно считать безынерционным звеном с передаточным коэффициентом, близким к единице:

$$W_M(p) = K_M. \quad (8)$$

*Фазочувствительный выпрямитель (ФЧВ).* Двухполупериодный полупроводниковый ФЧВ предназначен для выделения огибающей амплитудно-модулированного сигнала.

Амплитуда напряжения постоянного тока на выходе ФЧВ пропорциональна амплитуде сигнала переменного тока на входе, а полярность определяется фазой входного сигнала по отношению к опорному напряжению. ФЧВ можно считать безынерционным звеном с передаточной функцией

$$W_{\text{ФЧВ}}(p) = K_{\text{ФЧВ}}. \quad (9)$$

### Синтез корректирующих устройств системы

Следящая система (см. рис. 10) практически оказывается неработоспособной без включения корректирующих средств, несмотря на то что она приближенно описывается характеристическим уравнением второго порядка. Из-за наличия неучтенных малых постоянных времени, люфтов в механической передаче и нелинейностей потенциометрического датчика рассогласования (напряжение выдается дискретно при изменении угла поворота с шагом, равным витковому напряжению) в системе возникают автоколебания, т. е. в линейном рассмотрении систему надо считать обладающей малым запасом устойчивости. На рис. 10 показана функциональная схема нескорректированной системы.

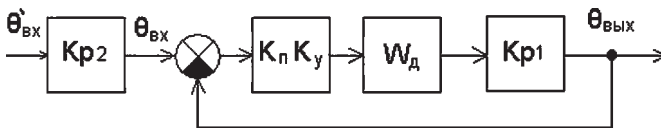


Рис. 10. Функциональная схема нескорректированной системы

Увеличением запасов устойчивости автоколебания могут быть ликвидированы либо сведены до ничтожно малой величины. Поэтому необходимым является включение корректирующих средств.

Введение жесткой обратной связи (ЖОС) является простейшим вариантом стабилизации системы при наличии ТГ, причем ввиду низкого порядка уравнения, описывающего поведение системы, расчет легко производится аналитически. Синтез ЖОС описан в [3, 4].

Функциональная схема системы с ЖОС (рис. 11).

Если не учитывать постоянную времени обмотки управления двигателя  $T_{ou}$ , передаточную функцию скорректированной замкнутой системы можно записать в следующем виде:

$$\Phi(p) = \frac{\Theta_{\text{вых}}(p)}{\Theta_{\text{вх}}(p)} = \frac{1}{1 + \frac{KK_{\text{ЖОС}}}{K_{\Pi}K_{p1}} \frac{T_{\text{д}}}{K} p^2 + \frac{K_{\Pi}K_{p1}}{K} p + 1}, \quad (10)$$

где  $K = K_{\Pi}K_{y}K_{\text{д}}K_{p1}$  – коэффициент усиления нескорректированной системы;  $K_{\text{ЖОС}} = K_1K_{\text{ТГ}}$  – коэффициент отрицательной обратной связи по скорости.

Коэффициент затухания замкнутой системы, рассматриваемой как колебательное звено, равен:

$$\zeta = \frac{1 + \frac{KK_{\text{ЖОС}}}{K_{\Pi}K_{p1}}}{2\sqrt{T_{\text{д}}K}}. \quad (11)$$

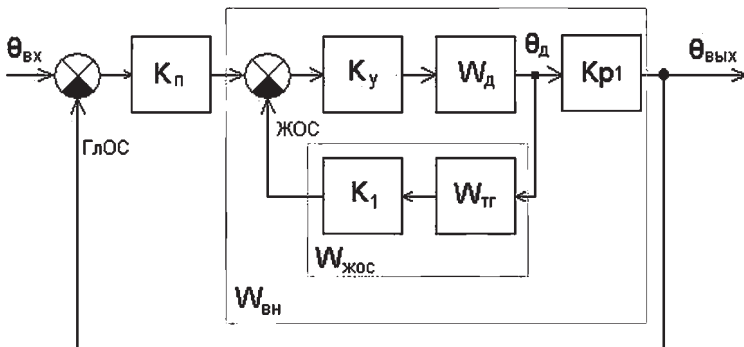


Рис. 11. Функциональная схема системы с жесткой обратной связью по скорости

Если коэффициент затухания  $\zeta$  задан, то можно рассчитать коэффициент ЖОС по скорости

$$K_{\text{ЖОС}} = \frac{K_{\text{П}} K_{\text{р1}}}{K} (2\zeta \sqrt{T_{\text{д}} K} - 1). \quad (12)$$

Коэффициент затухания  $\zeta$  связан с показателем колебательности  $M$  соотношением:

$$M = \frac{1}{2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2}}, \quad (13)$$

откуда при  $M < 1.4$ ;  $\zeta > 0.4$ .

Если ИР питается переменным напряжением, суммирование сигналов рассогласования и ЖОС производится на входе усилителя по переменному току.

Для регулировки коэффициента ОС сигнал на вход системы подается через делитель напряжения с коэффициентом передачи  $K_1$  (см. рис. 11).

Для согласования фаз сигнала рассогласования и сигнала ОС необходимо включить фазосдвигающую схему либо в цепь задающего сигнала, либо в цепь ОС, так как ТГ сдвигает фазу выходного сигнала по отношению к сети. В системы невысокой точности фазосдвигающие цепи не включают

Добротность по скорости системы с ЖОС обычно оказывается малой при сильной ОС. При динамическом расчете системы мы вынуждены, обеспечивая требования к заданному запасу устойчивости (показатель колебательности  $M$  или коэффициент затухания  $\zeta$ ), игнорировать требования к точности. Это приводит к тому, что точность системы обычно оказывается неудовлетворительной и приходится применять более сложные методы коррекции.

Для расчета характеристик корректирующих устройств получил распространение графический метод, использующий логарифмические частотный амплитудные и фазовые характеристики. Метод предполагает, что показатели качества системы в переходных режимах заданы в частотной форме (показатель колебательности  $M$ , частота среза  $\omega_{\text{ср}}$  и допустимая ошибка при синусоидальном воздействии). Если заданы временные показатели качества (перерегулирование  $s$ , время переходного процесса  $t_{\text{п}}$ ), то необходимо перейти к частотным критериям.

При использовании метода логарифмических частотных характеристик (ЛЧХ) расчет выполняется в следующей последовательности:

- построение ЛЧХ нескорректированной системы;

- построение желаемой ЛЧХ по заданным требованиям;
- определение вида и параметров корректирующего устройства;
- техническая реализация корректирующего устройства;
- проверочный расчет и построение переходного процесса.

Наиболее распространенным является применение последовательных корректирующих устройств и включение корректирующих обратных связей.

В нашем случае удобным местом включения коррекции является участок между ИР и У. При использовании корректирующих средств постоянного тока необходимо измеритель рассогласования питать постоянным током, а на входе усилителя У включить модулятор М, что следует учесть при построении характеристик нескорректированной системы. При использовании коррекции в цепи обратной связи сигнал обратной связи от ТГ предварительно пропускается через ФЧВ.

Функциональная и структурная схемы следящей системы с корректирующей обратной связью (КОС) показаны на рис. 12.

Метод ЛЧХ подробно изложен в учебниках и руководствах, например [1]. Расчет параметров обратной связи удобно производить методом Федорова, изложенным в [4, 6].

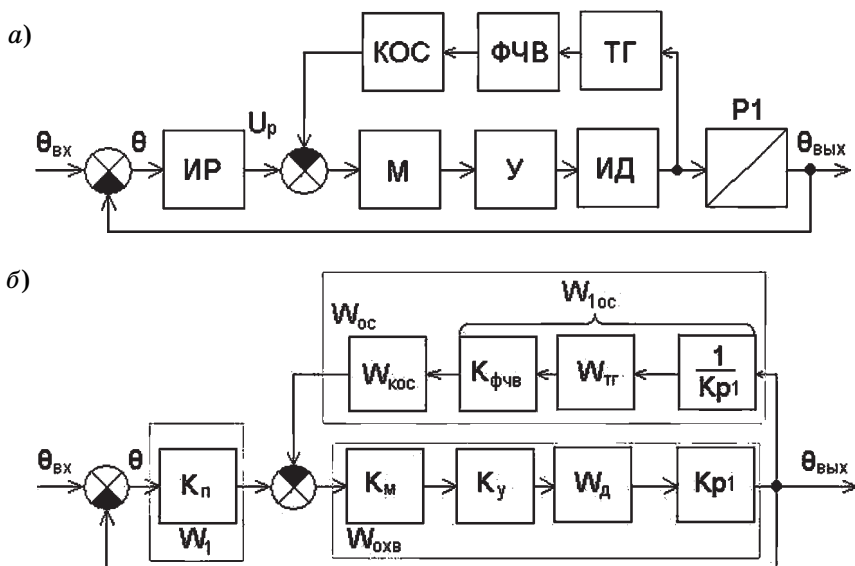


Рис. 12. Функциональная (а) и структурная (б) схемы системы с корректирующей обратной связью

Напомним, что расчет параметров корректирующего контура необходимо производить, учитывая величины внутренних и входных сопротивлений  $IP, TГ, У, M$ .

### Методические указания к выполнению работы

*Исходные данные:* скоростная ошибка системы:  $x_{ск} = 0,005 \div 0,01$  рад; синусная ошибка системы:  $x_S = 0,005 \div 0,02$  рад; скорость изменения входного сигнала:  $\Omega_{вхм} = 0.4 \div 1.0$  рад/с; ускорение входного сигнала:  $\varepsilon_{вхм} = 0,2 \div 0,6$  рад/с<sup>2</sup>; показатель колебательности:  $M = 1,2 \div 1,3$ ; частота среза:  $\omega_{ср} \leq 10 \div 25$  1/с коэффициент передачи тахогенератора:  $K_{ТГ} = 5,5 \cdot 10^{-3}$  В·с.

Из указанного диапазона исходных данных преподавателем выбирается вариант задания на расчет.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить принцип действия системы и назначение всех ее элементов и паспортных данных.

2. Составить блок-схему и электрическую схему нескорректированной системы.

3. Включением системы убедиться, что нескорректированная система практически неустойчива.

4. Экспериментально определить параметры элементов системы и сравнить с расчетными (для ТГ, ИД, ИР). Особое внимание следует обратить на схему измерений и подбор измерительных приборов.

5. Рассчитать частотные характеристики, выбрать схему и место включения корректирующих средств:

- жесткой обратной связи,
- последовательного корректирующего устройства,
- корректирующего устройства в цепи ОС.

Рассчитываются параметры корректирующего устройства с учетом согласования его с элементами системы, и осуществляется проверка обратным расчетом.

6. Любым способом (можно приближенно) оценить переходную характеристику системы.

7. Произвести сравнение последовательного корректирующего устройства и корректирующих устройств в ОС. Выбрать наиболее целесообразный вариант коррекции и включением его в систему экспериментально проверить правильность расчетов.

8. Сделать выводы по выполненной работе.

## Рекомендации по экспериментальному определению параметров

1. Определение коэффициентов усиления элементов системы осуществляется снятием статической зависимости между входом и выходом элемента.

а. Измеритель рассогласования *ИР*.

Коэффициент передачи  $K_{\Pi}$  определяется по зависимости между изменением напряжения на выходе ИР и изменением угла поворота задающего устройства ЗУ. При экспериментальном определении  $K_{\Pi}$  следует учесть передаточное число понижающего редуктора между рукояткой ЗУ и осью ПД.

Кроме того, можно воспользоваться расчетной формулой (1).

б. Передаточные коэффициенты  $K_{\gamma}$ ,  $K_{\text{Д}}$ ,  $K_{\text{М}}$  целесообразно определять снятием статической зависимости между напряжением тахогенератора и напряжением на входе усилителя и зависимости между тахогенератором и напряжением на входе модулятора, включенного на входе усилителя. Для подачи сигнала используется потенциометрический делитель напряжения ДН.

Из зависимостей  $U_{\text{ТГ}}(U_{\text{вхУ}})$  и  $U_{\text{ТГ}}(U_{\text{вхМ}})$  определяются произведения коэффициентов усиления  $K_{\gamma}$ ,  $K_{\text{Д}}$ ,  $K_{\text{ТГ}}$  и  $K_{\gamma}$ ,  $K_{\text{Д}}$ ,  $K_{\text{М}}$ ,  $K_{\text{ТГ}}$ .

Зная  $K_{\text{ТГ}}$ , легко определить интересующие нас произведения коэффициентов усиления  $K_{\gamma} K_{\text{Д}}$  и  $K_{\text{М}} K_{\gamma} K_{\text{Д}}$ .

в. Коэффициент передачи ненагруженного ТГ определяется при подаче на ОУ двигателя неизменного напряжения. Измерив напряжение  $U_{\text{ТГ}}$  на выходе ТГ и подсчитав число оборотов выходного вала  $\Delta\Omega$  и за известное время  $\Delta t$ , с, определим  $K_{\text{ТГ}}$ :

$$K_{\text{ТГ}} = \frac{U_{\text{ТГ}}}{\frac{\Delta\Omega}{\Delta t K_{\text{р1}}}},$$

где  $K_{\text{р1}} = \frac{1}{1270}$  – коэффициент передачи редуктора между двигателем

и выходным валом. Результаты эксперимента сравниваем с паспортными данными ТГ.

г. Коэффициент передачи ФЧВ, включенного на выходе ТГ, определяется снятием зависимости между напряжением холостого хода тахогенератора и напряжением на выходе ненагруженного ФЧВ  $U_{\text{выхФЧВ}}(e_{\text{ТГХХ}})$ .

2. Определение входных и внутренних сопротивлений элементов.



Для того чтобы правильно рассчитать корректирующие контуры, необходимо знать входные и внутренние сопротивления элементов, включение которых необходимо согласовать.

а. Внутреннее сопротивление ИР может быть измерено любым измерителем сопротивлений (комбинированным прибором типа «тестер») при отключении ИР от сети и замыканием клемм потенциометров, подключаемых к сети накоротко. Фиксируется диапазон изменений внутреннего сопротивления ИР при изменении угла рассогласования. Результат измерений сравнивается с расчетом по формуле (2) и паспортными данными,

б. Входное сопротивление усилителя  $U$  и модулятора  $M$ , нагруженного на усилитель, определяется снятием вольтамперных характеристик  $U_{\text{вх}U}(I_{\text{вх}U})$  и  $U_{\text{вх}M}(I_{\text{вх}M})$ .

в. Внутреннее сопротивление ФЧВ определяется при подключении его к тахогенератору и снятием внешней характеристики  $U_{\text{выхФЧВ}}(I_{\text{нФЧВ}})$  при постоянном значении напряжения холостого хода ТГ.

3. Определение электромеханической постоянной времени двигателя производится осциллографированием выходного напряжения ТГ при включении и разгоне исполнительного двигателя. Производится сравнение  $T_{\text{Дэксп}}$  с постоянной времени, определенной по паспортным данным.

### Контрольные вопросы

1. Какие достоинства и недостатки присущи потенциометрическим измерителям рассогласования?
2. В чем заключается принцип действия следящей системы?
3. В чем заключается физический смысл действия корректирующей обратной связи по скорости и почему она приводит к уменьшению добротности системы?
4. Как преобразуется управляющий сигнал при прохождении через элементы системы?
5. Какие преимущества и недостатки присущи различным способам коррекций?
6. Каково назначение элементов схемы следящей системы?
7. Каков порядок расчета частотных характеристик корректирующих устройств?
8. Как производится построение желаемой ЛЧХ из условий требований по точности и быстродействию?
9. Каким образом по ЛЧХ можно приближенно оценить параметры переходной характеристики системы?

10. Почему при расчете параметров корректирующего контура необходимо учитывать входное сопротивление следующего за контуром элемента?

11. Как строится имитационная модель данной системы и какова она?

### Библиографический список

1. *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического регулирования. Наука, 1966.

2. *Васильев Д. В.* и др. Проектирование и расчет следящих систем. Судостроение, 1967.

3. *Котченко Ф. Ф.* Следящие системы автоматических компенсаторов. Недра, 1965.

4. *Скворцов Г. В.* Синтез корректирующих устройств судовых следящих систем. Судостроение, 1968.

5. *Кузовков Н. Т.* Теория автоматического регулирования, основанная на частотных методах. Оборонгиз, 1960.

6. *Бесекерский В. А.* и др. Проектирование следящих систем малой мощности. Судпромгиз, 1957.

7. *Фабрикант Е. А.* и др. Интегрирующий привод переменного тока. Энергия, 1966.

7. *Розенблат М. А.* Магнитные усилители с самонасыщением. Госэнергоиздат, 1963.

8. *Миловзоров В. П.* Электромагнитная техника. Высш. шк., 1966.

9. *Львов Е. Л.* Магнитные усилители в технике автоматического регулирования. Энергия, 1972.

10. *Красовский А. А., Поспелов Г. С.* Основы автоматики и технической кибернетики. ГЭИ, 1962.

11. *Кочубиевский И. Д., Стражмейстер В. А.* Измерители рассогласования следящих систем. ГЭИ, 1963.

12. *Рабинович Л. В.* Электроавтоматика авиационных электромеханических установок. Оборонгиз, 1957.

13. *Герман О. Г., Земляков Н. Д.* Автоматизированные приводы летательных аппаратов. Выбор электродвигателя: Учеб. пособие /ЛИАП. 1991.

14. *Розенблат М. А.* Магнитные усилители с самонасыщением. Госэнергоиздат, 1963.

15. *Ломов В. С., Андрущенко В. А.* Проектирование авиационных следящих электроприводов (линеаризованные системы). ЛИАП, 1970.

16. *Гузенко А. И.* Основы теории автоматического регулирования. Высш. шк., 1967.

17. *Потапов А. М.* Настройка испытания следящих приводов. Л.: Энергия, 1970.

18. *Бесекерский В. А., Фабрикант Б. А.* Динамический синтез систем гироскопической стабилизации. Л.: Судостроение, 1968.

19. *Дорф Р., Бишоп Р.* Современные системы управления. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие требования к выполнению лабораторных работ .....	3
2. Порядок проведения лабораторных работ .....	3
Занятие № 1 .....	3
Занятие № 2 .....	4
Занятие № 3 .....	5
Лабораторная работа № 1. Исследование следящей радиолокационной системы .....	6
Принцип действия следящей системы .....	6
Описание элементов системы .....	8
Синтез корректирующих устройств системы .....	11
Порядок выполнения работы .....	13
Контрольные вопросы .....	14
Лабораторная работа № 2. Исследование интегрирующего электропривода .....	15
Принцип действия системы .....	15
Описание элементов системы .....	17
Синтез корректирующих устройств системы .....	19
Методические указания к выполнению работы .....	20
Порядок выполнения работы .....	20
Рекомендации по экспериментальному определению параметров системы .....	20
Контрольные вопросы .....	21
Лабораторная работа № 3. Исследование потенциометрической малоомощной следящей системы с полупроводниковым усилителем .....	22
Принцип действия следящей системы .....	22
Описание элементов системы .....	25
Синтез корректирующих устройств системы .....	27
Методические указания к выполнению работы .....	31
Порядок выполнения работы .....	31
Рекомендации по экспериментальному определению параметров .....	32
Контрольные вопросы .....	33
Библиографический список .....	34