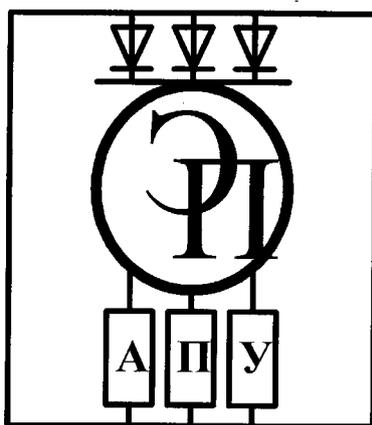


ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

# МЕХАТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА РОБОТОВ

*Методические рекомендации к практическим занятиям  
для студентов направления подготовки  
15.03.06 «Мехатроника и робототехника»  
дневной формы обучения*



Могилев 2018

УДК 62-83  
ББК 31.291  
М 17

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «10» февраля 2018 г.,  
протокол № 7

Составитель канд. техн. наук, доц. А. С. Коваль

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

Предназначены к практическим занятиям для студентов направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» дневной формы обучения по дисциплине «Мехатронные устройства роботов». Приведены основные теоретические положения, необходимые при расчетах и выборе элементов электрической подсистемы мехатронных модулей.

Учебно-методическое издание

## МЕХАТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА РОБОТОВ

Ответственный за выпуск	Г. С. Леневский
Технический редактор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	М. М. Дударева

Подписано в печать .Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. .Уч.-изд. л. .Тираж 46 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 24.01.2014.  
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский  
университет», 2018



## Содержание

1 Практическое занятие № 1. Выбор датчиков скорости и перемещения для мехатронных модулей.....	4
2 Практическое занятие № 2. Выбор двигателей для мехатронных модулей движения.....	14
3 Практическое занятие № 3. Расчет регуляторов в приводах постоянного тока мехатронных модулей движения.....	19
4 Практическое занятие № 4. Расчет регуляторов в приводах переменного тока мехатронных модулей движения.....	27
5 Практическое занятие № 5. Показатели интеграции мехатронных модулей и их расчет.....	32
Список литературы.....	34



## 1 Практическое занятие № 1. Выбор датчиков скорости и перемещения для мехатронных модулей

Локальные системы в своем составе содержат разные по своему функциональному назначению элементы и устройства, одними из которых являются датчики скорости (системы регулирования скорости) и перемещения (системы позиционирования).

На рисунке 1.1 показана структурная схема одноконтурной системы, где  $g(t)$  – задающее (управляющее) воздействие;  $y(t)$  – управляемая величина;  $f(t)$  – внешнее возмущение, вызывающее искажение управляемой величины;  $x_{вх}(t)$  и  $x_{вых}(t)$  – сигналы, передающие информацию о задающем воздействии и управляемой величине соответственно;  $u_e(t)$  – форма сигнала об отклонении, удобная для передачи по каналу управления регулятору;  $u(t)$  – сигнал управления;  $r(t)$  – регулирующее воздействие на входе объекта управления. Система, например, обеспечивает стабилизацию управляемой величины  $y(t)$  на заданном уровне.

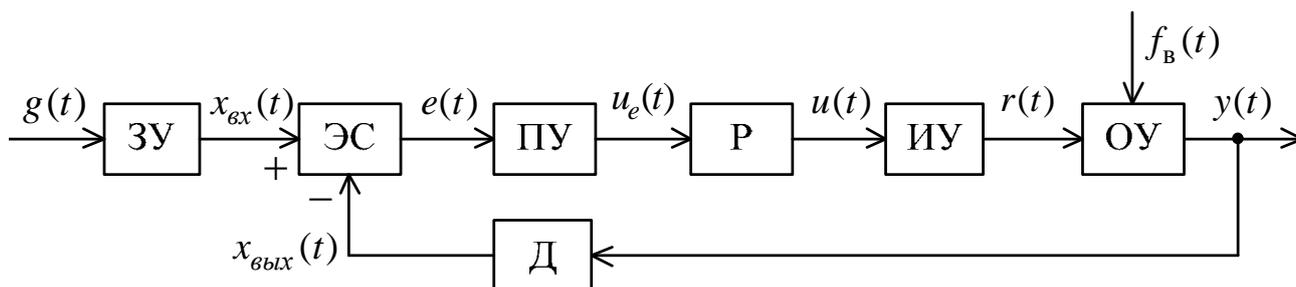


Рисунок 1.1 – Структурная схема одноконтурной системы регулирования

Обеспечивается эта задача при использовании датчика скорости (Д). Сигнал обратной связи по скорости участвует в формировании сигнала ошибки и регулятор  $P$  преобразует сигнал ошибки  $u_e(t)$  в управляющее воздействие  $u(t)$ , обеспечивающее динамические свойства локальной системы. При необходимости контроля перемещения объекта управления ОУ в структуру (см. рисунок 1.1) вводится на выходе датчик перемещения, позволяющий создать контур управления перемещением и получить требуемую точность позиционирования. В многообразии существующих типов датчиков скорости и перемещения в локальных системах можно выделить потенциометрические и фотоэлектрические датчики перемещения, осуществляющие преобразование

механической величины (например, угла поворота) в электрический сигнал, и фотоэлектрические и электромеханические датчики скорости.

Основные качественные показатели локальных систем не могут быть получены без согласования со свойствами обратной связи по скорости или положения. Чем выше требования к системе управления, тем более качественная должна быть форма выходных сигналов соответствующих датчиков, например, уровень пульсаций напряжения ТГ обратной связи по скорости, приводящий к колебаниям тока и скорости исполнительного двигателя. При выборе датчиков для локальных систем ориентируются на следующие их характеристики.

*Диапазон* измерений физической величины, например, рабочий угол поворота ( $\varphi_n$ ), или диапазон измеряемой скорости. *Точность* – характеристика, отражающая близость измеренного значения физической величины к его действительному значению. Она обычно характеризуется погрешностью измерений, о которой судят по классу точности измерительного средства (устанавливает пределы, в которых может находиться погрешность измерительного средства). Возможная погрешность измерения определяется следующим образом:

$$\delta = \sqrt{\delta_з^2 + \delta_n^2},$$

где  $\delta_з$  – допустимая погрешность задатчика;

$\delta_n$  – допустимая погрешность приемника.

*Чувствительность* – свойство измерительного устройства, определяемое отношением изменения сигнала на выходе устройства к вызвавшему его изменению измеряемой величины. Для датчиков с линейными статическими характеристиками чувствительность называют коэффициентом преобразования (передачи). Среди датчиков перемещения потенциометрические датчики перемещения (осуществляют преобразование угловых или линейных перемещений выходных звеньев кинематических цепей в электрический сигнал постоянного или переменного тока) отличаются простотой конструкции, малой мощностью потребляемой энергии, минимальными размерами и весом, удобством в эксплуатации.

Схема потенциометрического датчика управляемой величины  $\varphi_n$  показана на рисунке 1.2.



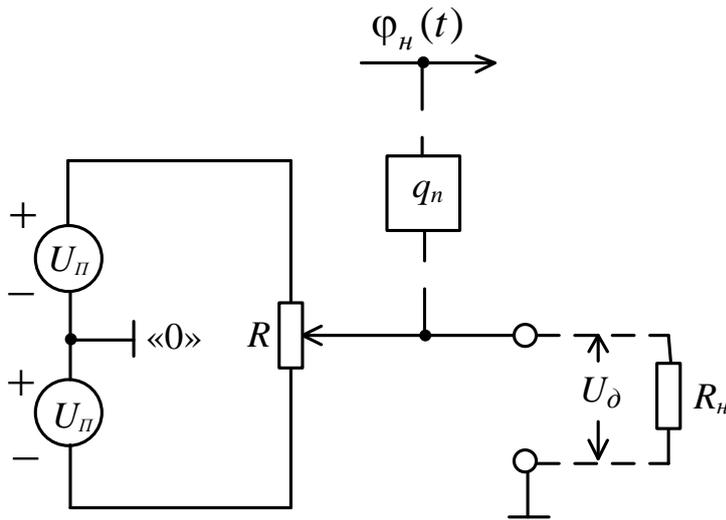


Рисунок 1.2 – Схема потенциметрического датчика

Входной величиной датчика является угол поворота нагрузки  $\varphi_n$ , например, регулирующего органа объекта управления, а выходной – напряжение  $U_{\text{д}}$ , снимаемое со щетки токосъемного элемента. Рабочий угол поворота датчиков этого типа составляет  $350^\circ$ :  $\varphi_p = 350^\circ$ . Реостат потенциметра, имеющий полное сопротивление  $R$ , запитывается от двух источников питания напряжением  $+U_{\text{П}}$  и  $-U_{\text{П}}$ , соединенных в точке «0». Максимальный угол перемещения щетки относительно середины потенциметра равен половине рабочего угла  $\varphi_p$ :  $\varphi_{\text{max}} = +\varphi_p/2$ . В режиме холостого хода ( $R_n = \infty$ ) выходное напряжение датчика

$$U_{\text{д}} = \frac{2q_1 U_{\text{П}} n}{\varphi_p} \left[ \varphi_n - \frac{\varphi_p}{2q_1} \right] = \kappa_{\text{д}} \left[ \varphi_n - \frac{\varphi_1}{2q_1} \right],$$

где  $q_1$  – передаточное число повышающего редуктора;

$\kappa_{\text{д}}$  – коэффициент передачи.

Статическая характеристика датчика практически линейная (при  $R_n \geq 600R$ ). В некоторых системах измерительное устройство осуществляют по схеме, показанной на рисунке 1.3, где  $U_{\text{ВХ}}$  – сигнал управления на входе локальной системы. Измерительное устройство обладает меньшей погрешностью:

$$\delta = \sqrt{\left( \frac{\delta_{\text{RE}}}{q_1} \right)^2 + \delta_p^2}.$$

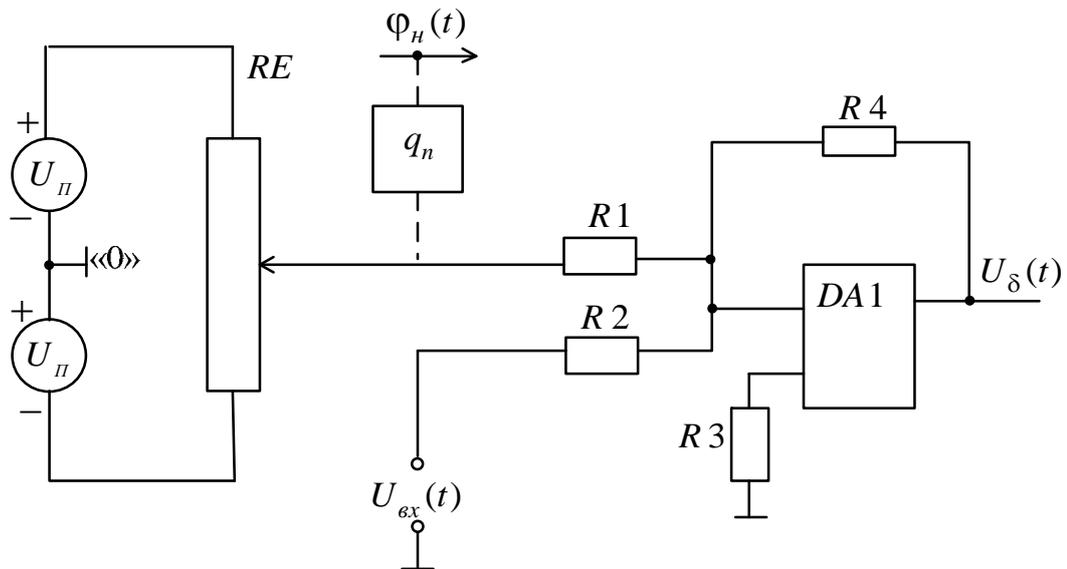


Рисунок 1.3 – Схема потенциметрического датчика

Независимо от схемы реализации потенциметрических датчиков их структурные схемы имеют один и тот же вид, показанный на рисунке 1.4.

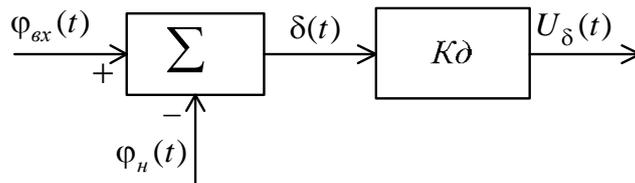


Рисунок 1.4 – Структурная схема потенциметрического датчика

Друг от друга они отличаются только коэффициентом преобразования и значением погрешности  $\delta$ , которые подлежат расчету при выборе.

**Пример 1** – Определим коэффициент преобразования и погрешность измерения однооборотного потенциметрического датчика перемещения (см. рисунок 1.3) (однооборотный потенциометр  $RE$  второго класса точности), имеющего сопротивление реостата  $R = 1,6$  кОм, мощность рассеивания  $P = 1$  Вт. Максимальный угол поворота исполнительной оси  $\varphi_p = \pm 30^\circ$ .

*Решение*

Передаточное число повышающего редуктора

$$q = \frac{\varphi_p}{2\varphi_n} = \frac{350}{2 \cdot 30} = 5,8;$$

принимаем  $q_n = 5$ .

Напряжение питания

$$U_n \leq \frac{1}{2} \sqrt{P \cdot R} = \frac{1}{2} \sqrt{1 \cdot 1600} = 20 \text{ В.}$$

Коэффициент преобразования

$$K_D = \frac{2q_1 \cdot U_n}{\varphi_p} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 20}{350} = 0,57 \text{ В/град,}$$

или  $K_D = 0,57 \cdot 57,3 = 32,7 \text{ В/рад.}$

Возможная погрешность измерительного устройства при  $\delta_{RE} = 30 \text{ угл. мин}$  и погрешности редуктора  $\delta_p = 1,5 \text{ угл. мин}$

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{\delta_{RE}}{q_1}\right)^2 + \delta_p^2} = \sqrt{\left(\frac{30}{5}\right)^2 + 1,5 \cdot 1,5} = 6,7 \text{ угл. мин}$$

Выбираем однооборотный потенциометр RE второго класса точности и имеющий электрические параметры по условию задания.

Известны два типа фотоэлектрического датчика угловых перемещений: абсолютного считывания значений и с суммированием приращений относительно некоторого начального отсчета – репера. Второй тип называют датчиком накапливающего типа. Благодаря простоте конструкции, меньшей массе и габаритам, высокой надежности он широко применяется в микропроцессорных локальных системах.

Структурная схема фотоэлектрического датчика накапливающего типа приведена на рисунке 1.5.

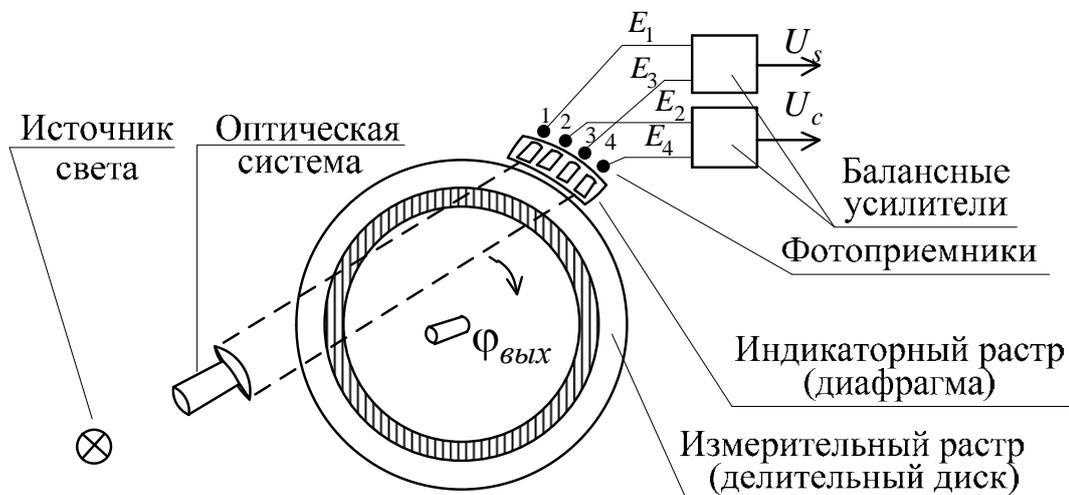


Рисунок 1.5 – Датчик накапливающего типа

Основной элемент этого датчика – фотоэлектрический преобразователь. В его состав входят следующие элементы: источник света; оптическая система, создающая параллельный пучок света; подвижный измерительный растр; неподвижный индикаторный растр; четыре фотоприемника и два балансных усилителя.

Подвижный измерительный растр представляет собой диск с равномерно чередующимися прозрачными и темными (светопоглощающими) элементами. Ось диска кинематически связана с осью выходного вала локальной системы.

Индикаторным растром является неподвижная диафрагма с четырьмя щелями, шаг которых на  $1/4$  меньше шага темных элементов измерительного растра. Растровое сопряжение со стороны фотоприемников показано на рисунке 1.6, где  $\omega$  – шаг штрихов (темных элементов) измерительного растра.

Такая конструкция растрового сопряжения позволяет сформировать четыре элементарных световых потока, которые фиксируются фотоприемниками и преобразуются в напряжения  $E_1, E_2, E_3, E_4$ .

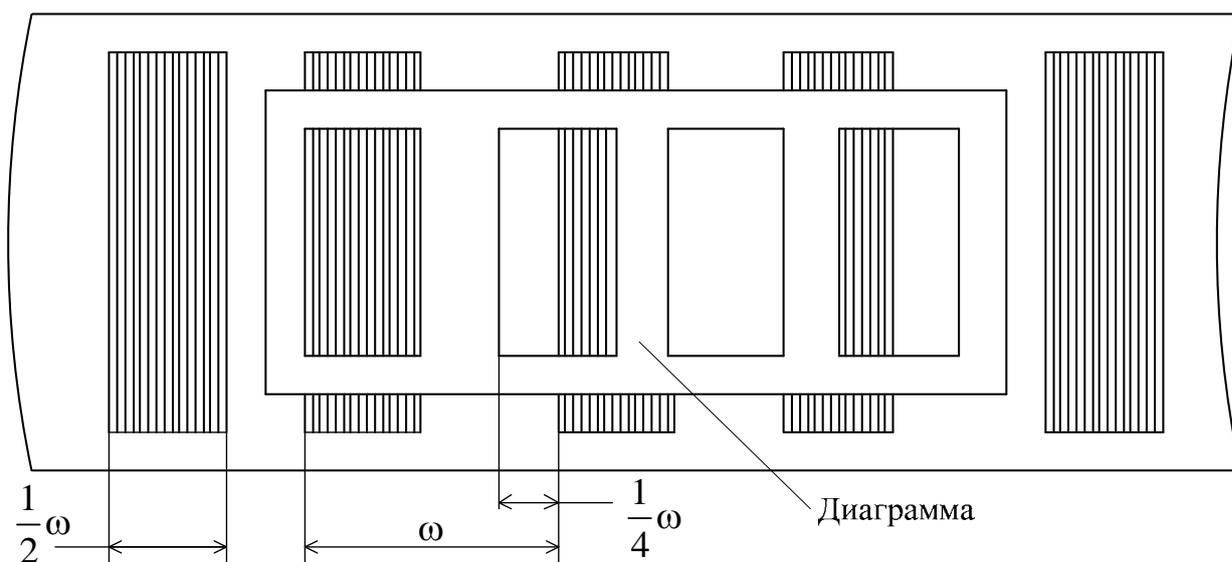


Рисунок 1.6 – Растровое сопряжение

На рисунке 1.7 показаны зависимости напряжений  $E_1, E_2, E_3, E_4$  на выходах фотоприемников при повороте измерительного растра на угол  $\varphi_{вых}$ , эквивалентный шагу решетки  $\omega$ .

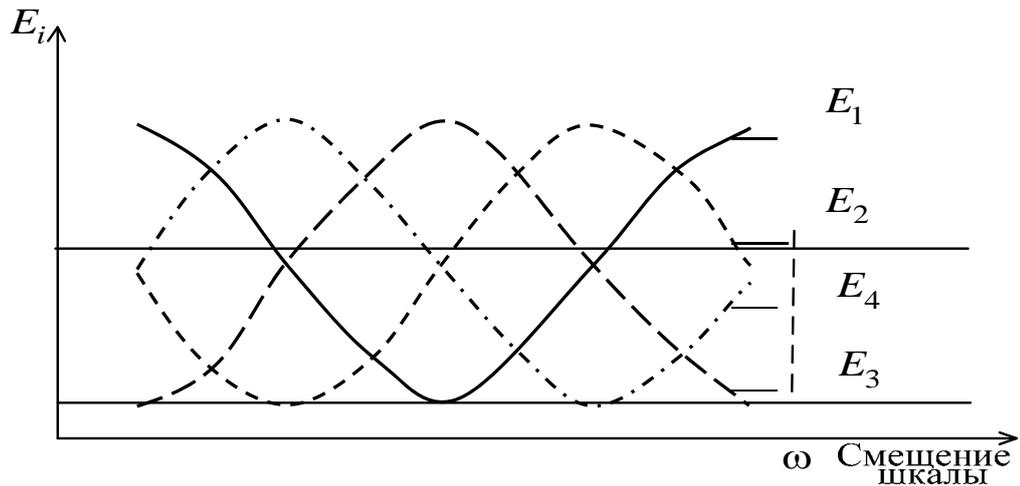


Рисунок 1.7 – Напряжения на выходах фотоприемников

Попарным вычитанием напряжений  $E_1$  и  $E_2$ ,  $E_3$  и  $E_4$  балансные усилители формируют гармонические сигналы на выходах  $U_s = U_m \sin \varphi_{\text{вых}}$  и  $U_c = U_m \cos \varphi_{\text{вых}}$ .

Структурная схема фотоэлектрического преобразователя угла поворота  $\varphi_{\text{вых}}$  в напряжения  $U_s$  и  $U_c$  показана на рисунке 1.8.

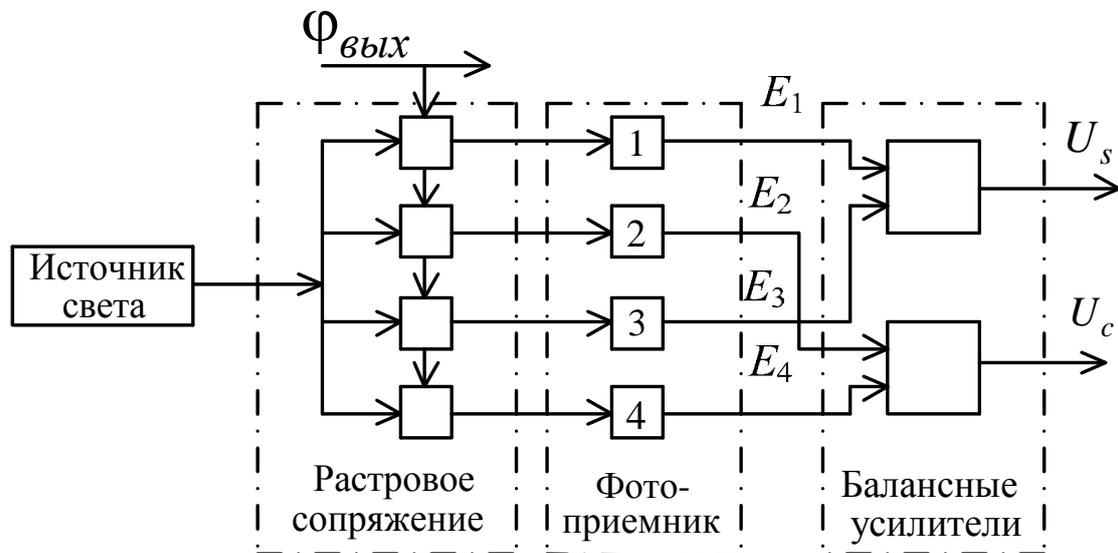


Рисунок 1.8 – Структурная схема фотоэлектрического преобразователя

При расчете и выборе фотоэлектрического датчика накапливающего типа ориентируются на диапазон изменения выходной переменной  $\varphi_{\text{вых}}$ , допустимую погрешность локальной системы  $\delta_{\text{max}}$  и наименьшее число дискрет датчика  $N$ . Причем при большом диапазоне изменения переменной, ограниченном, например, верхним пределом  $[\varphi_{\text{вых}}]_B = 90^\circ$ , этот диапазон разбивают на

поддиапазоны  $[\Delta\varphi_{\text{вых}}]$ , каждому из которых должен соответствовать один оборот делительного диска. Для локальных систем обычно принимают  $[\Delta\varphi_{\text{вых}}] = 18^\circ$ .

Для систем с прямолинейным перемещением нагрузки, например, в станочных приводах подач, поддиапазон  $[\Delta S]$  принимают равным 2 мм:  $[\Delta S] = 2$  мм.

Расчет проводят следующим образом.

Допустимая ошибка измерения  $\delta_{\text{изм}} = (0,3 \dots 0,5) \delta_{\text{max}}$ .

Шаг квантования по уровню  $h = k \cdot \delta_{\text{изм}}$  (где  $0 < k < 1$ ). Обычно полагают  $k = 1/3$ ).

Требуемое число дискрет на один оборот делительного диска датчика

$$N_{\text{тр}} \geq \frac{[\Delta\varphi_{\text{вых}}]}{h}.$$

Из ряда стандартных значений  $N$ , равных 1000, 2500 и 5000 дискрет/об, выбирают наименьшее значение  $N$ , удовлетворяющее условию  $N \geq N_{\text{тр}}$ .

Число разрядов реверсивного счетчика

$$n = \text{Ent} \left[ \log_2 \frac{\varphi_{\text{вых}}}{\varphi_{\text{ем}} \sqrt{12}} + 1 \right].$$

Средняя квадратическая погрешность

$$\delta_h = \frac{h}{\sqrt{12}}.$$

**Пример 2** – Технологический стол с четырьмя деталями нужно каждые 30 с поворачивать на угол  $90^\circ$ . Выбрать круговой фотоэлектрический датчик накапливающего типа, если допустимая погрешность  $\Delta$  позиционирования, отнесенная к наружному диаметру стола  $D$ , равному 2000 мм, составляет 2 мм.

*Решение*

Допустимая погрешность позиционирования, отнесенная к углу поворота

$$\delta_{\text{max}} = \frac{\Delta}{D/2} 3438 = \frac{2}{1000} 3438 = 6,9 \text{ угл. мин.}$$

Допустимая ошибка измерения

$$\delta_{\text{изм}} = (0,3 \dots 0,5) \delta_{\text{max}} = 0,48 \cdot 6,9 = 3,3 \text{ угл. мин.}$$



Шаг квантования по уровню (цена дискреты) при  $k = 1/3$

$$h = k \cdot \delta_{изм} = \frac{1}{3} \cdot 3,3 = 1,1 \text{ угл. мин.}$$

Требуемое число дискрет на один оборот делительного диска при  $[\Delta\varphi_{вых}] = 18^\circ$

$$N_{тр} \geq \frac{[\Delta\varphi_{вых}] \cdot 60}{h} = \frac{18 \cdot 60}{1,1} = 982 \text{ дискрет / об.}$$

Число разрядов реверсивного счетчика

$$n = Ent \left[ \log_{2^{эм}} \frac{\varphi_{вых}}{\varphi_{эм} \sqrt{12}} + 1 \right] = Ent \left[ \log_2 \frac{90 \cdot 60}{1,1} + 1 \right] = 13.$$

Средняя квадратическая погрешность

$$\delta_h = \frac{h}{\sqrt{12}} = \frac{1,1}{\sqrt{12}} = 0,32 \text{ угл. мин.}$$

По цене дискреты и требуемому числу дискрет выбираем датчик ВЕ-178 четвертого класса точности с числом  $N = 1000$  дискрет/об.

Электромеханические датчики скорости – тахогенераторы (ТГ) постоянного тока (наиболее используемые) и переменного тока формируют практически линейный сигнал напряжения на выходе от скорости  $\omega$ , определяемый как  $U_{вых} = k_{тг} \cdot \omega$ . Здесь  $k_{тг}$  – передаточный коэффициент тахогенератора (паспортные данные). Основные параметры, по которым выбираются тахогенераторы, следующие:  $P_{ном}$  – номинальная мощность на выходе при максимальной рабочей скорости и при которой погрешности не выходят за пределы гарантируемых;  $U_{вых}$  – напряжение при номинальной скорости;  $k_{тг}$  – коэффициент передачи;  $I_{max}$  – максимально допустимый ток нагрузки, ограничиваемый по сохранению класса точности;  $\omega_{max}$  – максимально допустимая скорость;  $I_{ном.воз}$  – номинальный ток возбуждения (для ТГ, имеющих обмотку возбуждения). Для прецизионных ТГ указываются устройство подсоединения и результирующие оборотные погрешности.



У фотоэлектрических датчиков скорости при вращении измерительного диска с угловой скоростью  $\omega$  фотоприемники формируют последовательности импульсов с частотой

$$f_u = \frac{\omega}{2\pi} N_i,$$

где  $N_i$  – число импульсов на один оборот диска.

Определение угловой скорости заключается в измерении частоты следования импульсов на выходе датчика либо по этой частоте в формировании цифрового кода. Выбор фотоэлектрических кодовых датчиков по точности измерения скорости фактически определяет разрядность формируемого цифрового кода. Основные параметры, по которым выбираются цифровые датчики, – диапазон измерения частоты вращения и точность (погрешность) измерения скорости в этом диапазоне.

Формирование цифрового кода на выходе датчика скорости с помощью счетчика выполняется двумя способами. На заданном периоде измерения  $T$  счетчик подсчитывает число импульсов, которое характеризует среднее значение скорости:  $N = \frac{\omega}{2\pi} N_i \cdot T$ .

Так как младшему разряду датчика соответствует один импульс, то разрешающая способность цифрового датчика  $N/1$ , а точность измерения  $\delta_{изм} = \frac{1}{N}$ . Дискретность измерения по скорости определяется величиной  $\Delta\omega_0 = \frac{1}{N_i T}$ . Таким образом, точность измерения тем выше, чем больше измеряемая скорость и период измерения. При другом способе измеряется цифровое значение мгновенного значения частоты за один период:

$$N = Ent \left[ \log_2 \frac{60}{n \cdot N_i T} + 1 \right].$$

Существуют технические решения, повышающие возможности этих методов измерения скорости.

## 2 Практическое занятие № 2. Выбор двигателей для мехатронных модулей движения

В локальных системах электропривода предпочтение отдается как электродвигателям постоянного тока с независимым возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов, так и двигателям переменного тока, благодаря целому ряду их преимуществ.

Для передачи вращательного движения электродвигателю регулирующему элементу технической системы используют различные редукторы, а для преобразования вращательного движения в поступательное применяют шарико-винтовые пары, пары шестерня – рейка и другие.

Предварительно двигатель выбирают по необходимой мощности  $P_{мех}$ :

– при вращательном движении

$$P_{мех} = (M_{ст} + Jd\omega/dt) \omega_{ном} ;$$

– при поступательном движении

$$P_{мех} = (F_{ст} + m_{ном} a_{ном}) V_{ном} .$$

По необходимой мощности из каталогов выбирают близкий по мощности двигатель:

$$P_{дв} = k_{зан} P_{мех} , \quad (2.1)$$

где  $k_{зан}$  – коэффициент запаса, учитывающий возможное увеличение потребной мощности для динамических режимов движения, а также КПД двигателя и редуктора; при расчетах коэффициент рекомендуется выбирать из диапазона значений  $k_{зан} = 1,2 \dots 2,5$ .

При прочих равных условиях лучшим из двигателей данной мощности считается тот, у которого наибольший номинальный вращающий момент  $M$  и минимальный момент инерции ротора  $J$ .

По номинальной скорости вращения ротора двигателя  $\omega_{дв}$  и максимальной скорости вращения нагрузки  $\Omega_{н\max}$  определяют необходимое передаточное число редуктора:

$$i = \omega_{ном} / \Omega_{н} \quad \text{или} \quad i = \omega_{\max} / \Omega_{н} .$$



Передаточное число для поступательного движения нагрузки с максимальной скоростью  $V_{H \max}$  рассчитывают по формуле

$$i = \omega_{\text{ном}} / V_H \text{ или } i = \omega_{\text{дв. max}} / V_H . \quad (2.2)$$

При расчете исполнительного механизма используют дополнительные данные: КПД редуктора  $\eta = 0,8 \dots 0,9$ ; момент инерции вращающихся частей редуктора, приведенный к оси вала двигателя,  $J_p = (0,05 \dots 0,25) J_{\text{дв.}}$ .

Для окончательного выбора двигателя его проверяют по максимальному моменту, обеспечивающему заданные скорости и ускорения нагрузки.

Максимальный момент:

– при вращательном движении

$$M = M/i \eta + (J_{\text{дв.}} + J_p + J_H / i^2) \varepsilon_H i; \quad (2.3)$$

– при поступательном движении

$$M = F/i \eta + (J_{\text{дв.}} + J_p + m/i^2) a_H i. \quad (2.4)$$

Двигатель выбран правильно, если соблюдаются условия

$$M_{\text{max дв.}} \geq M ; M_{\text{ном}} \geq M / i \eta. \quad (2.5)$$

В противном случае следует заменить двигатель на более мощный.

**Пример 1** – Рассчитать параметры исполнительного механизма работа при вращательном перемещении по следующим данным:

- момент инерции нагрузки  $J_H = 2 \dots 10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;
- статический момент сопротивления  $M_{\text{ст}} = 15 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;
- допустимая угловая скорость поворота нагрузки  $\Omega_H = 1,2 \text{ рад/с}$ ;
- допустимое угловое ускорение  $\varepsilon_H = 1,5 \text{ рад/с}^2$ .

*Решение*

Необходимая мощность при  $J_H = 10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

$$P_{\text{дв.}} = (M_{\text{ст}} + J_H \varepsilon_H) \Omega_H = (15 + 10 \cdot 1,5) \cdot 1,2 = 30 \text{ Вт.}$$

Мощность двигателя при  $k_{\text{зан}} = 2$

$$P_{\text{дв. ном.}} = k_{\text{зан}} P_{\text{дв.}} = 2 \cdot 30 = 60 \text{ Вт.}$$



Ориентируясь на двигатели постоянного тока, выбираем двигатель СЛ-521.

Данные двигателя:  $P_{ном} = 77$  Вт;  $\omega_{ДВ} = 315$  с<sup>-1</sup>;  $M_{ДВ ном} = 0,245$  Н·м;  
 $M_{ДВ max} = 0,637$  Н·м;  $J_{ДВ} = 1,67 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup>.

Проверка двигателя по моменту.

Необходимое передаточное число редуктора  $i = \omega_{дв} / \Omega_n = 315 / 1,2 = 262$ .

Момент при  $\eta = 0,85$

$$M_{дв} = M_{см} / i \eta + (J_{дв} + J_p + J_n / i^2) \varepsilon_n i;$$

$$M_{дв} = 15 / 262 \cdot 0,85 + (1,67 + 0,2 \cdot 1,67 + 10 / 262^2) 10^{-4} 1,52 \cdot 262 = 0,2 \text{ Н·м.}$$

Используя неравенства (2.5), находим следующее:

$$M_{max.дв.} \geq M = 2 \cdot 0,245 = 0,49 \text{ Н·м;}$$

$$M_{ном} \geq M_{см} / i \eta = 10 / 262 \cdot 0,85 = 0,045 \text{ Н·м;}$$

$$M_{дв.ном.} \geq 0,045 \text{ Н·м.}$$

Двигатель выбран правильно.

Выбор исполнительного двигателя и передаточного числа редуктора из условия воспроизведения исполнительным механизмом заданного перемещения за заданный временной интервал.

Для решения задачи обычно задают следующие данные:

- величину перемещения (углового  $\varphi_n$  или линейного  $S_n$ );
- допустимую длительность перемещения  $t_n$ ;
- массу перемещаемых грузов  $m_{гр}$ ;
- допустимое ускорение (угловое  $\varepsilon_n$  или линейное  $a_n$ ).

Необходимы также технические данные устройства, осуществляющего перемещение грузов: масса устройства  $m_{устр}$  и диаметр  $D$  элемента перемещения, например, поворотного стола, приводной шестерни подъемно-транспортного механизма, колес транспортной тележки и другие данные; точность остановки  $\delta_{ост}$ .

Механические величины исходных данных могут быть определены по известным соотношениям.

Угловая скорость вращательного движения

$$\Omega_n = \frac{1}{2} [\varepsilon_n t - \sqrt{(\varepsilon_n t_n)^2 - 4\varepsilon_n \varphi_n}].$$



Скорость прямолинейного движения

$$V_n = \frac{1}{2} [a_n t_n - \sqrt{(a_n t_n)^2 - 4a_n S_n}]$$

Сила ускорения  $F = m_n \cdot a_n$ .

Сила тяжести (веса)  $F = m_n g$ .

Сила трения  $F_{тр} = m_n \cdot g$ .

Вращающий момент через окружное усилие  $M = FR$ .

Вращающий момент через момент инерции  $M = J\varepsilon_n$ .

**Пример 2** – В соответствии с технологическим циклом работы стол с четырьмя заготовками (рисунок 2.1) нужно каждые 30 с поворачивать на угол  $90^\circ$ . Процесс движения должен заканчиваться за 5 с; максимальное ускорение, отнесенное к наружному диаметру стола, не должно превышать  $0,5 \text{ м/с}^2$ . Требуется рассчитать исполнительный механизм локальной системы.

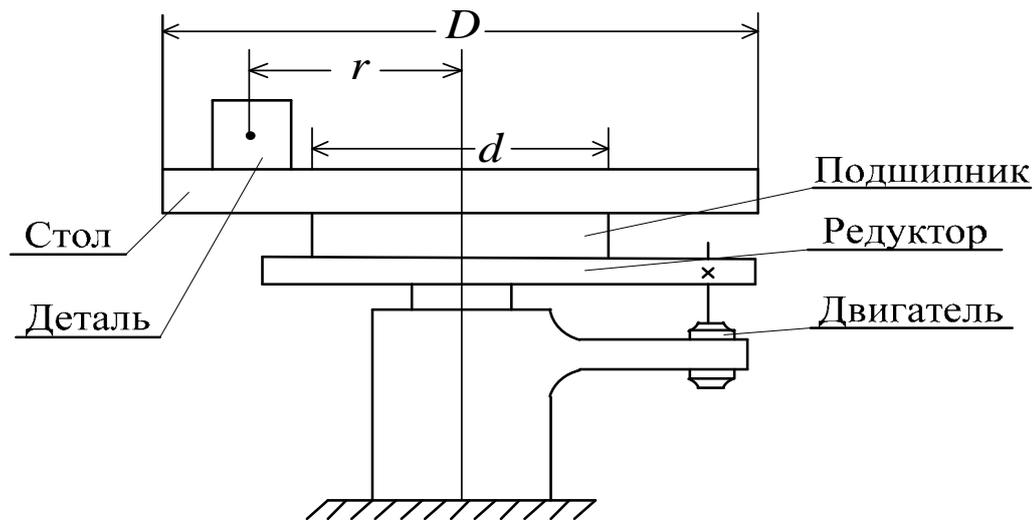


Рисунок 2.1 – Кинематическая схема стола

**Технические данные:**

- диаметр стола  $D = 2 \text{ м}$ ;
- масса стола  $m_{ст} = 400 \text{ кг}$ ;
- масса детали  $m_{дет} = 70 \text{ кг}$ ;
- расстояние от центра тяжести детали до оси вращения стола  $r = 0,85 \text{ м}$ ;
- диаметр подшипника  $d = 0,9 \text{ м}$ ;
- коэффициент трения качения  $\mu = 0,01$ .

Расчеты проводим для движения относительно оси вращения стола.

Угловое ускорение вращения стола  $\varepsilon_{cm} = \frac{2_a}{D} = \frac{2 \cdot 0,5}{2} = 0,5$  рад/с.

Угол поворота стола  $\varphi_n = \frac{90^\circ}{57,3} = 1,57$  рад.

Время поворота  $t_n$  принимаем равным  $0,9t_{don}$ :

$$t_n = 0,9 \cdot t_{don} = 0,9 \cdot 5 = 4,5 \text{ с.}$$

Расчет угловой скорости

$$\Omega_n = \frac{1}{2} [\varepsilon_n t_n - \sqrt{(\varepsilon_n t_n)^2 - 4\varepsilon_n \varphi_n}] = \frac{1}{2} [0,5 \cdot 4,5 - \sqrt{(0,5 \cdot 4,5)^2 - 4 \cdot 0,5 \cdot 1,57}] = 0,43 \text{ рад/с.}$$

Расчет момента инерции стола

$$J_{cm} = \frac{1}{2} \cdot m_{cm} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{1}{2} \cdot 400 \cdot \left(\frac{2}{2}\right)^2 = 200 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Расчет момента инерции деталей на столе

$$J_{дет} = 4 m_{дет} \cdot r^2 = 4 \cdot 70 \cdot 0,85^2 = 202,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Суммарный момент на оси вращения

$$J_n = J_{cm} + J_{дет} = 200 + 202,3 = 402,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Расчет номинальной мощности

$$P_{ном} = (M_{cm} + J_n \varepsilon_n) \Omega_n = (30 + 402,3 \cdot 0,5) \cdot 0,43 = 99,4 \text{ Вт.}$$

Расчет статического момента сопротивления

$$M_{ст.} = (m_{cm} + 4 \cdot m_{дет}) \cdot \mu \cdot g \cdot \frac{d}{2} = (400 + 4 \cdot 70) \cdot 9,81 \cdot 0,01 \cdot \frac{0,9}{2} = 30 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальная мощность двигателя

$$P_{двиг.} = k_{зап.} P_{ном.} = 1,7 \cdot 99,4 = 169 \text{ Вт.}$$

По мощности подходят два двигателя: СЛ-569 с номинальной мощностью  $P_{дв} = 175$  Вт и СЛ-621 с номинальной мощностью  $P_{дв} = 172$  Вт. Выбираем двигатель СЛ-621, так как у него в полтора раза больший номинальный момент, хотя он и уступает двигателю СЛ-569 по моменту инерции ротора.



Технические данные двигателя СЛ-621:  $\omega_{ДВ\ ном} = 250$  рад/с;  $M_{ДВ\ ном} = 0,687$  Н·м;  $M_{ДВ\ max} = 1,23$  Н·м;  $J_{ДВ} = 6,62 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup>.

Расчет передаточного числа редуктора  $i = \omega_{ДВ.ном.} / \Omega_n = 250/0,43 = 582$ .

Максимальный момент при  $\eta = 0,85$

$$M_{дв} = M_{см}/i \eta + (J_{дв} + J_p + J_n/i^2) \varepsilon_n i = 13,5/582 \cdot 0,85 + (6,62 + 0,2 \cdot 6,62 + 402,3/582^2) 10^{-4} 0,5 \cdot 582 = 0,6 \text{ Н·м.}$$

Используя неравенства (2.5), находим следующее:

$$M_{max.} \geq M_{дв.} \quad \text{или} \quad 1,374 \geq 0,6;$$

$$M_{двиг.ном.} \geq M_{дв.} / i \eta \quad \text{или} \quad 0,687 \geq 13,5/582 \cdot 0,85.$$

Следовательно, двигатель выбран правильно.

### 3 Практическое занятие № 3. Расчет регуляторов в приводах постоянного тока мехатронных модулей движения

В настоящее время основной принцип построения систем автоматического управления в электроприводах и постоянного, и переменного токов – это последовательная коррекция регулируемых координат электропривода или принцип подчиненного регулирования координат. Сущность принципа подчиненного регулирования координат состоит в том, что для регулирования каждой координаты электропривода используется отдельный регулятор, образующий с объектом управления контур, замкнутый соответствующей обратной связью. При этом каждый внутренний контур управляется сигналом от внешнего контура, т. е. является подчиненным по отношению к внешнему контуру. Такое построение позволяет произвести оптимальную настройку каждого контура. Оптимизация заключается в выборе передаточной функции регулятора, обеспечивающего с учетом возможных ограничений требуемые показатели качества переходного процесса. Передаточная функция регулятора  $W_{рег}(p)$  при единичной обратной связи контура определяется из соотношения

$$W_{рег}(p) = \frac{W_{жс}(p)}{W_o(p)},$$

где  $W_{жс}(p)$  – желаемая передаточная функция разомкнутого контура;  
 $W_o(p)$  – передаточная функция объекта регулирования (управления).

Для получения переходного процесса с перерегулированием меньше 5 % и с минимальным временем переходного процесса контур настраивается на «технический» оптимум (оптимум по модулю).

Желаемая передаточная функция контура в разомкнутом состоянии

$$W_{\text{жс}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)},$$

где  $T_{\mu}$  – некомпенсированная малая постоянная времени контура.

Переходный процесс характеризуется следующими показателями: перерегулированием  $\sigma = 4,3\%$  и быстродействием  $t_p = 4,7 T_{\mu}$ ;  $t_n = T_{\mu}$ ;  $t_{\max} = 6,3 T_{\mu}$ . Если к контуру предъявляются более высокие требования по точности регулирования, контур настраивается на «симметричный» оптимум. Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{жс}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} \cdot \frac{4T_{\mu}p + 1}{4T_{\mu}p} = \frac{4T_{\mu}p + 1}{8T_{\mu}^2 p^2 (T_{\mu}p + 1)}. \quad (3.1)$$

Переходный процесс при этом характеризуется перерегулированием  $\sigma = 43\%$  и быстродействием  $t_p = 3,1 T_{\mu}$ ,  $t_n = 16,5 T_{\mu}$ ,  $t_{\max} = 6,3 T_{\mu}$ .

Рассмотрим расчет регуляторов при синтезе САУ угловой скорости двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Структурная схема электропривода изображена на рисунке 3.1. Данные двигателя 2ПБМ132М04 и параметры электропривода, необходимые для расчета регуляторов, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры, необходимые для расчета регуляторов

Параметры	Численное значение
Номинальная мощность $P$ , кВт	1,6
Номинальная скорость, об/мин	1030
Напряжение, В	220
Ток, А	9
$T_{\Sigma}$ , с	0,121
$T_m$ , с	0,212
$T_{\mu T}$ , с	0,012



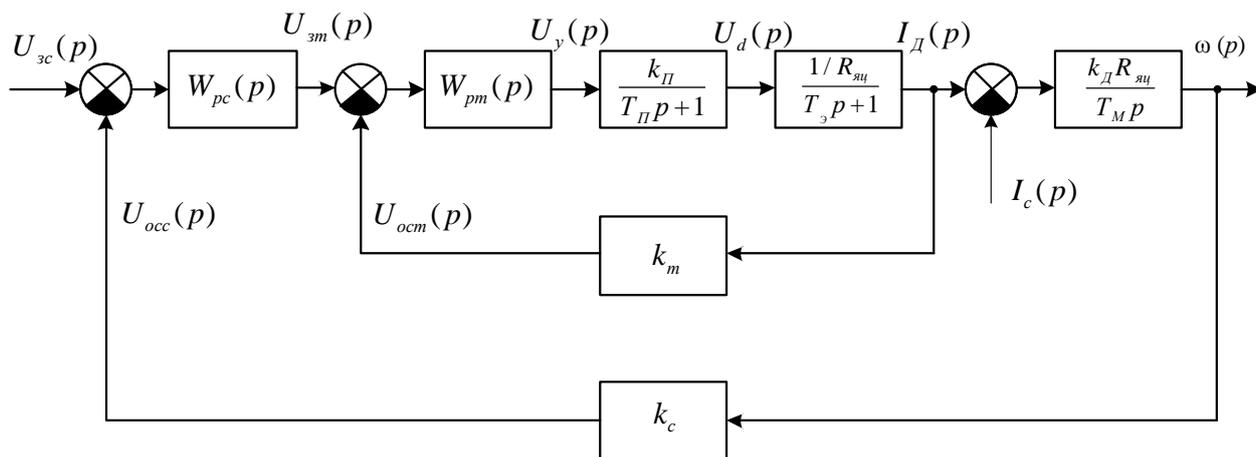


Рисунок 3.1 – Структурная схема электропривода

В состав системы входят: регуляторы скорости и тока; объект управления, состоящий из электродвигателя с вентильным преобразователем и датчиков обратной связи по току и угловой скорости с коэффициентами передачи  $k_m$  и  $k_c$ .

Электродвигатель на структурной схеме представлен двумя типовыми звеньями:

$$W'_o(p) = \frac{1}{R_{яц}(T_эp + 1)} = \frac{1}{10,66(0,121p + 1)};$$

$$W''_o(p) = \frac{k_дR_{яц}}{T_мп} = \frac{0,53 \cdot 10,66}{0,212p} = 26,65 \frac{1}{p}.$$

При синтезе не учитываем действие внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя. Управляемый вентильный (тиристорный) преобразователь представлен апериодическим звеном с передаточной функцией

$$W_{\Pi}(p) = \frac{k_{\Pi}}{T_{\Pi}p + 1} = \frac{28,1}{0,008p + 1}.$$

*Расчет контура тока.* Структурная схема контура тока изображена на рисунке 3.2.

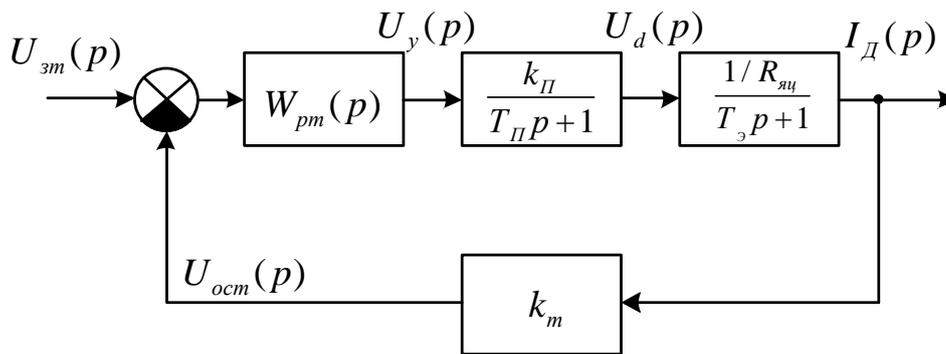


Рисунок 3.2 – Структурная схема контура тока

Токовый контур настраиваем на «технический» оптимум. Передаточная функция объекта управления

$$W_o(p) = \frac{k_n}{T_n p + 1} \cdot \frac{1}{R_{яц} (T_э p + 1)} k_T = \frac{28,1}{(0,008 p + 1)} \cdot \frac{1 \cdot 0,444}{10,66(0,121 p + 1)} = \frac{1,17}{(0,008 p + 1)(0,121 p + 1)}$$

Передаточная функция регулятора тока  $W_{рм}(p)$  находится из условия равенства передаточной функции разомкнутого оптимизируемого контура желаемой передаточной функции  $W_{жс}(p)$ :

$$W_p(p) = W_{рТ}(p) \cdot W_o(p) = W_{жс}(p);$$

$$\begin{aligned} W_p(p) &= W_{рТ}(p) \cdot \frac{k_n k_T}{R_{яц} (T_э p + 1)(T_n p + 1)} = \frac{1}{2 T_{\mu T} p (T_{\mu T} p + 1)} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot 0,012 p (0,012 p + 1)} = \frac{1}{0,024 p (0,012 p + 1)}, \end{aligned}$$

где  $T_{\mu T}$  – малая некомпенсируемая постоянная времени токового контура.

Найдем передаточную функцию регулятора тока:

$$W_{рТ}(p) = \frac{T_э p + 1}{T_{ИТ} p} = K_{рТ} + \frac{1}{T_{ИТ} p} = 4,32 + \frac{1}{0,028 p}.$$

Полученная передаточная функция соответствует пропорционально-интегральному регулятору (ПИ-регулятору). Коэффициент пропорциональной части ПИ-регулятора

$$K_{pT} = \frac{T_э}{T_{ИТ}} = \frac{0,121}{0,028} = 4,32.$$

Постоянная интегрирования регулятора тока

$$T_{ИТ} = \frac{2T_{\mu T} k_n k_T}{R_{яц}} = \frac{2 \cdot 0,012 \cdot 28,1 \cdot 0,444}{10,66} = 0,028 \text{ с.}$$

При расчете контура регулирования скорости оперируют упрощенной передаточной функцией замкнутого контура по току

$$\Phi_T(p) = \frac{1}{k_T(2T_{\mu T}p + 1)} = \frac{1}{0,444(2 \cdot 0,012p + 1)} = \frac{1}{0,444(0,024p + 1)}.$$

Расчет регулятора тока. Передаточная функция регулятора тока

$$W_{pT}(p) = \frac{T_э p + 1}{T_{ИТ} p} = \frac{0,121p + 1}{0,028p}.$$

Схема ПИ-регулятора тока, построенного на операционном усилителе, изображена на рисунке 3.3.

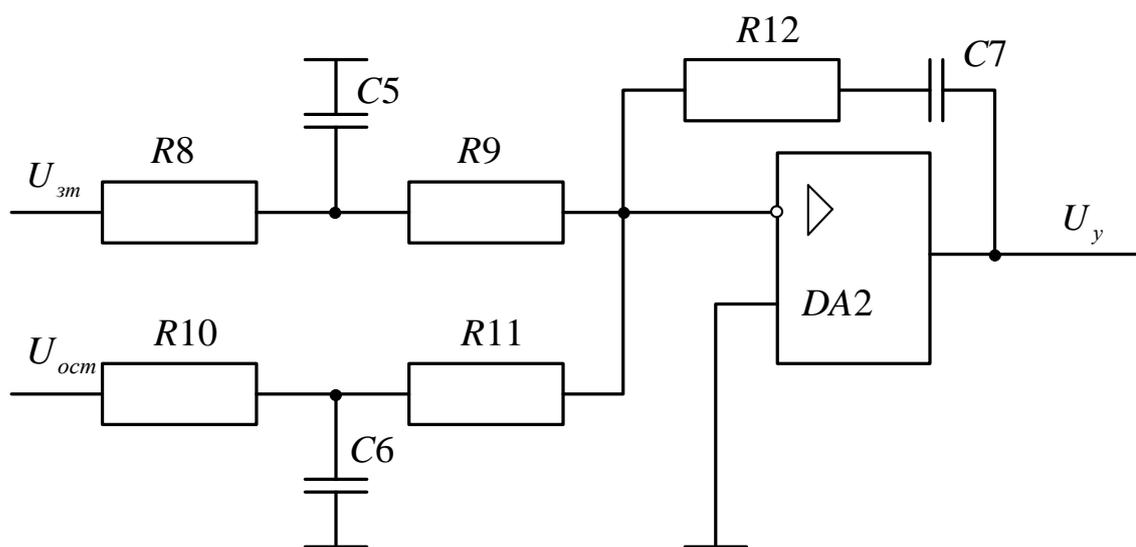


Рисунок 3.3 – Регулятор тока

Параметры регулятора могут быть определены из следующих соотношений:

$$T_{ИТ} = (R8 + R9) \cdot C7; \quad T_3 = R12 \cdot C7.$$

Задаваясь емкостью конденсатора  $C7 = 2$  мкФ, найдем сопротивление суммы резисторов  $R8 + R9$  на входе регулятора:

$$R8 + R9 = \frac{T_{ИТ}}{C7} = \frac{0,028}{2 \cdot 10^{-6}} = 14000 \text{ Ом};$$

$$R8 = R9 = \frac{R8 + R9}{2} = \frac{14000}{2} = 7000 \text{ Ом}.$$

Сопротивление резистора  $R12$  в цепи обратной связи регулятора тока

$$R12 = \frac{T_3}{C7} = \frac{0,121}{2 \cdot 10^{-6}} = 60500 \text{ Ом}.$$

Для исключения перерегулирования тока двигателя выше расчетного значения  $\sigma = 4,3$  % в цепь задающего сигнала включают фильтр с постоянной времени фильтра  $T_\phi$ .

Емкость конденсатора фильтра

$$C5 = T_\phi \frac{R8 + R9}{R8 \cdot R9} = \frac{2T_\phi}{R8} = \frac{2 \cdot 4 \cdot T_{ИТ}}{97750} = \frac{8 \cdot 0,012}{7000} = 13,7 \text{ мкФ}.$$

Для реализации фильтра в цепи обратной связи по току якоря с постоянной времени  $T_{осм} = 0,002 - 0,04 = 0,03$  с в цепь обратной связи по току необходимо включить конденсатор емкостью

$$C6 = \frac{2T_{осм}}{R10} = \frac{2 \cdot 0,03}{7565} = 7,9 \text{ мкФ}.$$

Величина сопротивления в цепях операционных усилителей электропривода обычно составляет 10...100 кОм и не должна превышать 500 кОм. Расчет контура скорости. Передаточная функция оптимизированного контура тока с учетом неединичной обратной связи



$$\Phi_T(p) = \frac{1}{k_T(2T_{\mu T}p + 1)} = \frac{1}{0,444(0,024p + 1)}.$$

Структурная схема контура скорости изображена на рисунке 3.4. Передаточная функция объекта управления разомкнутого контура скорости

$$\begin{aligned} W_o(p) &= \Phi_T(p) \cdot W_D''(p) \cdot k_c = \frac{1}{k_T(2T_{\mu T}p + 1)} \cdot \frac{k_D R_{яц}}{T_M p} \cdot k_c = \frac{1}{0,444(0,024p + 1)} \cdot \frac{0,53 \cdot 10,66}{0,212p} = \\ &= 60 \cdot \frac{1}{p(0,024p + 1)}. \end{aligned}$$

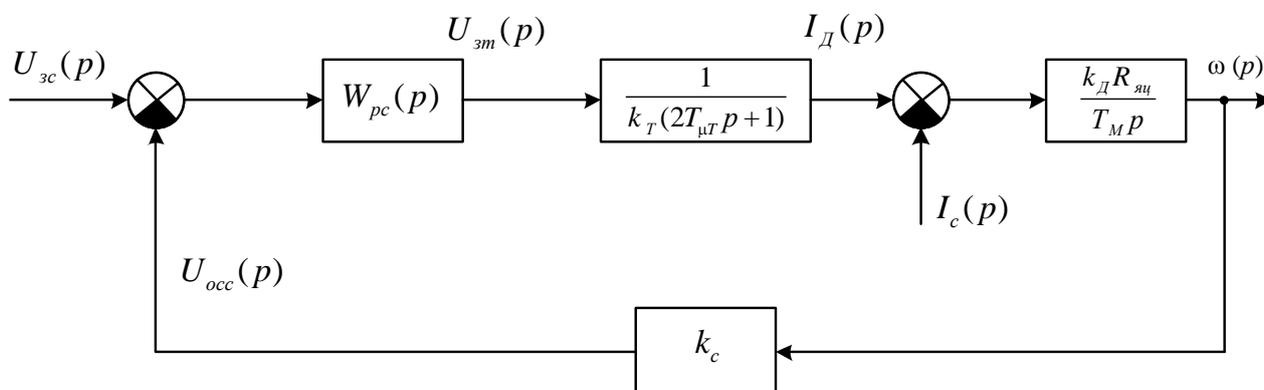


Рисунок 3.4 – Структурная схема контура скорости

Передаточная функция регулятора скорости  $W_{pc}(p)$  находится из условия равенств передаточной функции разомкнутого оптимизируемого контура  $W_p(p)$  желаемой передаточной функции  $W_{жс}(p)$ :

$$W_p(p) = W_{pc}(p) \cdot W_o(p) = W_{жс}(p).$$

Желаемая передаточная функция при настройке контура скорости на «технический» оптимум

$$W_{жс}(p) = \frac{1}{2T_{\mu c}p(2T_{\mu c}p + 1)} = \frac{1}{2 \cdot 0,025p(2 \cdot 0,025p + 1)} = \frac{1}{0,05p(0,05p + 1)}$$

и при настройке на «симметричный» оптимум

$$W_{жс}(p) = \frac{4T_{\mu c} p + 1}{8T_{\mu c}^2 p^2 (T_{\mu c} p + 1)} = \frac{4 \cdot 0,025 p + 1}{8 \cdot 0,025^2 p^2 (0,025 p + 1)} = \frac{0,1 p + 1}{0,005 p^2 (0,025 p + 1)},$$

где  $T_{\mu c}$  – малая некомпенсированная постоянная времени контура скорости,  
 $T_{\mu c} = 2T_{\mu m} + T_{fme} = 2 \cdot 0,012 + 0,001 = 0,025$  с.

Скоростной контур настраивается на «симметричный» оптимум.

Передаточная функция регулятора скорости

$$W_{pc}(p) = \frac{4T_{\mu c} p + 1}{T_{ис} p} = K_{pc} + \frac{1}{T_{ис} p} = 3,4 + \frac{1}{0,0294 p}.$$

Коэффициент пропорциональной части ПИ-регулятора

$$K_{pc} = \frac{k_T T_M}{2T_{\mu c} k_c k_D R_{яц}} = \frac{0,444 \cdot 0,212}{2 \cdot 0,025 \cdot 0,098 \cdot 0,53 \cdot 10,66} = 3,4.$$

Постоянная интегрирования регулятора скорости

$$T_{ис} = \frac{8T_{\mu c}^2 k_c k_D R_{яц}}{k_T T_M} = \frac{8 \cdot 0,025^2 \cdot 0,098 \cdot 0,53 \cdot 10,66}{0,444 \cdot 0,212} = 0,0294 \text{ с.}$$

*Расчет регулятора скорости.* Схема ПИ-регулятора скорости, выполненного на операционном усилителе, изображена на рисунке 3.5.

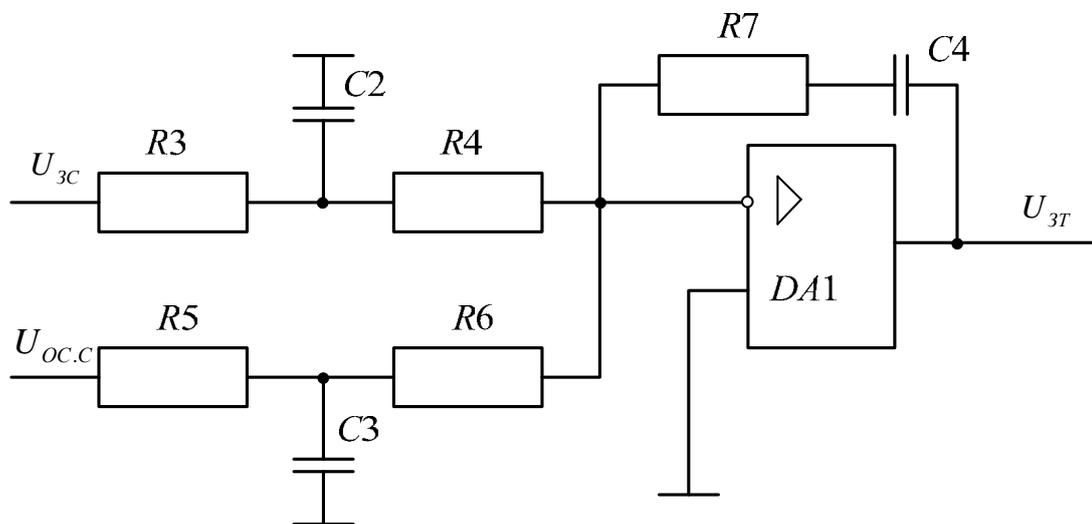


Рисунок 3.5 – Регулятор скорости



Параметры регулятора определяются из соотношений

$$4T_{\mu c} = R7 \cdot C4; K_{pc} = \frac{R7}{R3 + R4}.$$

Определим величину сопротивления  $R7$ , задавшись емкостью  $C4 = 2,2$  мкФ:

$$R7 = \frac{4T_{\mu c}}{C4} = \frac{4 \cdot 0,025}{2,2 \cdot 10^{-6}} = 45454,5 \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление резисторов на входе регулятора скорости

$$R3 + R4 = \frac{R7}{K_{pc}} = \frac{45454}{3,4} = 13368 \text{ Ом;}$$

$$R3 = R4 = \frac{R3 + R4}{2} = \frac{13368}{2} = 6684 \text{ Ом.}$$

Принимаем  $R5 = R6 = R3 = R4$ .

Емкость конденсаторов фильтров в канале управления и в цепи обратной связи по угловой скорости составит:

$$C3 = \frac{2T_{\phi TG}}{R5} = \frac{2 \cdot 0,004}{6684} = 1,19 \text{ мкФ.}$$

Для снижения перерегулирования до  $\sigma = 8$  % на вход системы включают фильтр с передаточной функцией (постоянная времени  $T_{\phi} = 4T_{\mu c}$ )

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{T_{\phi}p + 1} = \frac{1}{4 \cdot 0,012p + 1} = \frac{1}{0,048p + 1}.$$

#### 4 Практическое занятие № 4. Расчет регуляторов в приводах переменного тока мехатронных модулей движения

Основной тип регулируемого электропривода переменного тока, используемого в том числе и в мехатронных модулях движения, – это асинхронный электропривод с частотным регулированием угловой скорости.



А основной принцип построения системы автоматического регулирования в нем – последовательная коррекция регулируемых координат электропривода или принцип подчиненного регулирования координат. Базовая настройка регуляторов, как и в приводах постоянного тока, – «технический» и «симметричный» оптимумы. Блок-схема привода с частотным скалярным регулированием представлена на рисунке 4.1.

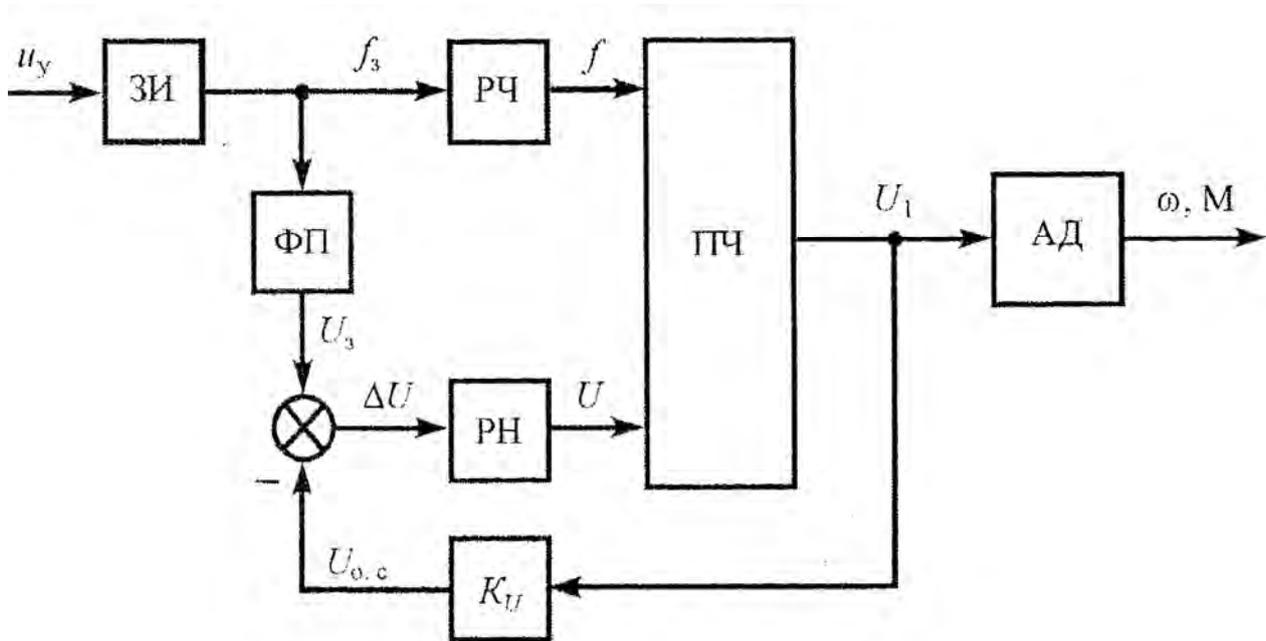


Рисунок 4.1 – Блок-схема электропривода с частотным регулированием

На рисунке 4.1: ЗИ – задатчик интенсивности разгона привода; РЧ – регулятор частоты; ПЧ – преобразователь частоты; ФП – функциональный преобразователь; РН – регулятор напряжения.

ФП обеспечивает поддержание определенной зависимости между формируемыми с помощью ПЧ напряжением и частотой на двигателе.

Так как асинхронный двигатель при частотном регулировании работает на линейной части механической характеристики, то приближенно оценить его динамические характеристики можно по упрощенной структурной схеме на рисунке 4.2.

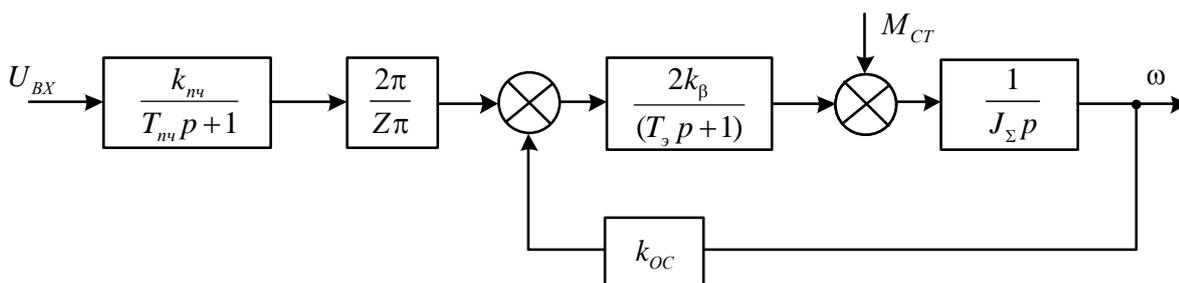


Рисунок 4.2 – Структурная схема электропривода переменного тока

Структурная схема электропривода «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» с отрицательной обратной связью по скорости приведена на рисунке 4.3.

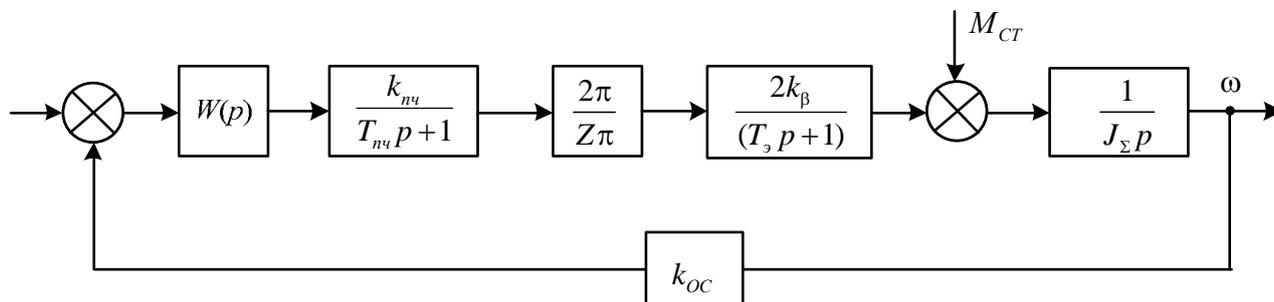


Рисунок 4.3 – Структурная схема электропривода с обратной связью по скорости

Передаточная функция разомкнутого контура скорости рассматриваемой системы определяется следующим образом:

$$W_{кc}(p) = W(p) \frac{k}{1 + T_{нч} p} \cdot \frac{2\pi}{z_p} \cdot \frac{2k_{\beta}}{1 + T_{\beta} p} \cdot \frac{1}{J_{\Sigma} p} \cdot \frac{k_c}{1 + T_{д} p}.$$

Если обозначить как  $T_{\mu}$  некомпенсируемую постоянную времени и равную сумме постоянных времени  $T_{нч}$ ,  $T_{\beta}$  и  $T_{дс}$ , то выражение преобразуется к виду

$$W_{кc}(p) = W(p) \frac{k_{нч}}{1 + T_{\mu} p} \cdot 2k_{\beta} \cdot \frac{1}{J_{\Sigma} p} \cdot k_c.$$

Определим передаточную функцию регулятора скорости  $W(p)$ .

Разомкнутый контур скорости, настроенный на модульный оптимум, должен иметь передаточную функцию

$$W_{кc}(p) = \frac{1}{a_{\mu c} T_{\mu c} p (T_{\mu c} p + 1)},$$

где  $a_{\mu c}$  – коэффициент настройки на модульный оптимум скорости (стандартное значение 2).

Приравнявая правые части выражений для разомкнутого контура скорости, настроенного на «модульный» оптимум, и разомкнутого контура

скорости исходной системы, получаем уравнение, из которого находится передаточная функция регулятора скорости. Она имеет вид:

$$W(p) = \frac{1}{4a_{\mu c} T_m k_c k_{nч} k_{\beta} \pi} = k_c.$$

Таким образом, при настройке контура скорости на «модульный» оптимум регулятор скорости для системы (см. рисунок 4.3) будет пропорционального типа с коэффициентом передачи  $k_c$ .

В тех случаях, когда электропривод с ПИ-регулятором не обеспечивает заданных показателей статической погрешности в принятом диапазоне регулирования скорости, контур скорости следует настраивать на «симметричный» оптимум.

Так, разомкнутый контур скорости, настроенный на «симметричный» оптимум, должен иметь следующую передаточную функцию:

$$W_{кc}(p) = \frac{4T_{\mu} + 1}{a_{cc} T_{\mu c}^2 p^2 (T_{\mu c} p + 1)},$$

где  $a_{cc}$  – коэффициент настройки контура скорости на «симметричный» оптимум (стандартное значение 8),  $a_{cc} = 4...16$ .

Аналогично находим передаточную функцию регулятора скорости. Она имеет вид:

$$W(p) = k_{pc} + \frac{1}{T_{pc} p},$$

где  $k_{pc}$  – коэффициент усиления регулятора скорости,  $k_{pc} = \frac{2J_{\Sigma}}{a_{cc} T_m k_c k_{nч} k_{\beta} k_{nч}}$ ;

$T_{pc}$  – постоянная времени интегрирования регулятора скорости,

$$T_{pc} = \frac{2a_{cc} k_{nч} k_{\beta} k_c T_m^2}{J_{\Sigma}}.$$

*Расчет регулятора скорости.* Схема ПИ-регулятора скорости, выполненного на операционном усилителе, изображена на рисунке 4.4.



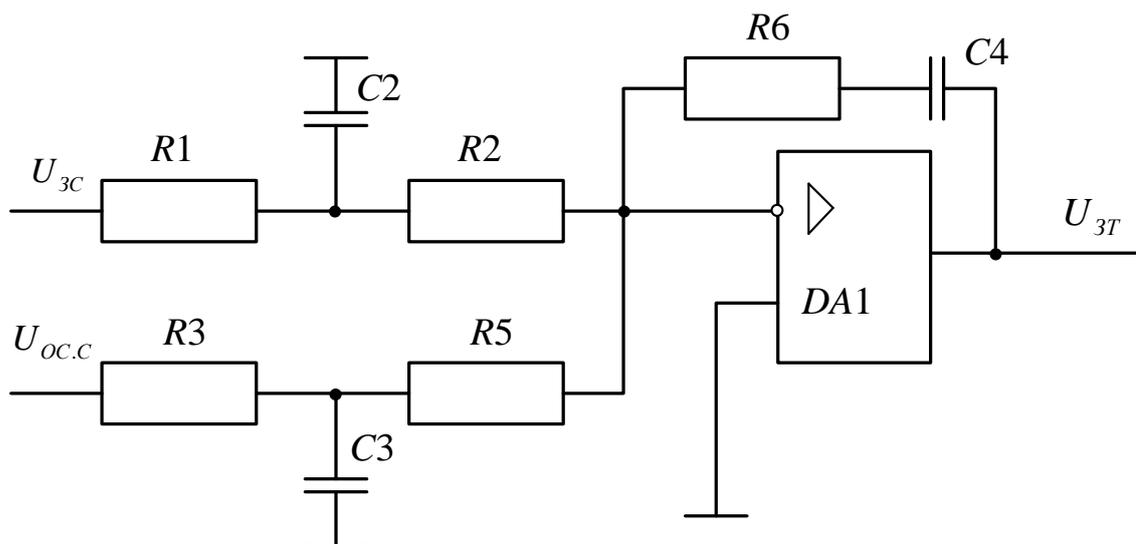


Рисунок 4.4 – Регулятор скорости

Параметры регулятора определяются из соотношений

$$4T_{\mu\text{с}} = R6 \cdot C4; \quad K_{pc} = R6 / (R1 + R2).$$

Определим величину сопротивления  $R6$ , задавшись емкостью  $C4 = 2,2 \text{ мкФ}$ :

$$R6 = \frac{4T_{\mu\text{с}}}{C4} = \frac{4 \cdot 0,025}{2,2 \cdot 10^{-6}} = 45454,5 \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление резисторов на входе регулятора скорости

$$R1 + R2 = \frac{R6}{K_{pc}} = \frac{45454}{3,4} = 13368 \text{ Ом;}$$

$$R1 = R2 = \frac{R1 + R2}{2} = \frac{13368}{2} = 6684 \text{ Ом.}$$

Принимаем  $R3 = R5 = R1 = R2$ .

Емкость конденсаторов фильтров в канале управления и в цепи обратной связи по угловой скорости

$$C3 = \frac{2T_{\text{фТГ}}}{R3} = \frac{2 \cdot 0,004}{6684} = 1,19 \text{ мкФ.}$$



## 5 Практическое занятие № 5. Показатели интеграции мехатронных модулей и их расчет

Процесс проектирования интегрированных мехатронных модулей и их систем требует численных мер для оценки уровня интеграции элементов для обоснованного выбора из вариантов решений.

В качестве таких мер используются показатель функционально-структурной интеграции (ФСИ) и показатель распределения функциональной нагрузки (РФН). Показатель функционально-структурной интеграции позволяет количественно оценивать функционально-структурный уровень интеграции, сравнивать и классифицировать различные мехатронные структуры на этапах разработки.

Показатель РФН позволяет оценить объём функциональной нагрузки, которую несет каждый из структурных элементов или блоков исследуемой системы. Рассмотрим алгоритм и пример расчета показателя ФСИ.

Показатель ФСИ имеет вид:

$$I^s = \frac{N_1}{N_2} - 1,$$

где  $N_1$  – число функциональных преобразователей в системе (число вершин функционального графа, соответствующего рассматриваемой мехатронной системе);

$N_2$  – количество функциональных преобразований в системе.

### *Алгоритм анализа мехатронной системы на основе показателя ФСИ*

1 Структурная модель исследуемой системы представляется в виде связанного ориентированного графа  $G_s = G_s(U_s, V_s)$ , где множество вершин  $V_s$  составляет структурные элементы системы, а множество ребер  $U_s$  отражает связи между ними. Для геометрического представления ориентированное ребро показывают в виде дуги со стрелкой, направление которой совпадает с направлением потока энергии или информации между соединяемыми вершинами.

2 Для построенной структурной модели  $G_s$  определяют число вершин графа  $N_s$  равное числу сепаратных блоков, используемых в данном структурном варианте.

3 Функциональная модель мехатронной системы также строится в виде связанного ориентированного графа  $G_{FO} = G_{FO}(U_{FO}, V_{FO})$ , где множество вершин графа  $V_{FO}$  образует функциональные преобразователи, а множество ребер  $U_{FO}$  отображает связи между ними.

4 Если в исходной функциональной модели две соседние вершины соответствуют одинаковым по типу функциональным преобразованиям, то они объединяются в одну вершину. В результате этой операции получаем сжатый



функциональный граф  $G_F = G_F(U_F, V_F)$ , который содержит только оригинальные преобразователи.

5 Для сжатого функционального графа  $G_F$  определяют число вершин  $N_F$ , равное числу оригинальных функциональных преобразователей в исследуемой мехатронной системе.

6 Рассчитывается показатель ФСИ для данной мехатронной системы:

$$I^{Fs} = \frac{N_F}{N_S} - 1 .$$

При проектировании интегрированных мехатронных систем необходимо стремиться к повышению показателя ФСИ, т. е. реализовывать наибольшее количество функциональных преобразований минимально возможным числом структурных элементов. Выгодно исключать промежуточные структурные преобразователи и самостоятельные интерфейсы, а также создавать многофункциональные мехатронные модули.

Рассмотрим расчет показателя ФСИ на примере электропривода с компьютерным управлением (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Блок-схема электропривода

На основе этой блок-схемы может быть построена блок-схема (рисунок 5.2), в которой выделены функциональные преобразования сигналов в виде соответствующих интерфейсов ( $I$ ) и которая фактически является графом рассматриваемой системы (блоки схемы – вершины графа, обозначенные интерфейсы – ориентированные ребра графа).



Рисунок 5.2 – Блок-схема электропривода с выделением интерфейсов

Электропривод содержит семь основных структурных блоков и восемь интерфейсов (I0...I8), которые выполняют семь функциональных преобразований. Следовательно, если все интерфейсы встроить в основные блоки, то имеем нулевое значение показателя ФСИ:

$$I^s = \frac{N_1}{N_2} - 1 = 7/7 - 1 = 0.$$

В случае, когда хотя бы один интерфейс представляет отдельный блок, получаем отрицательные значения показателя.

В общем случае показатель ФСИ будет отрицательным для избыточных структур, где число отдельных структурных элементов в системе превышает число заданных функциональных преобразований. Для мехатронных решений целесообразно принять за базовую степень интеграции значение ФСИ равным 0.

Базовая степень интеграции достигается при равенстве между числом требуемых функциональных преобразований и выполняющих их структурных блоков.

## Список литературы

- 1 Подураев, Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение: учебное пособие / Ю. В. Подураев. – Москва: Машиностроение, 2007. – 256 с.
- 2 Шичков, Л. П. Электрический привод: учебник и практикум для академического бакалавриата / Л. П. Шичков. – Москва : Юрайт, 2018. – 330 с.
- 3 Ключев, В. И. Теория электропривода: учебник для вузов / В. И. Ключев. – Москва : Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.