

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

ВЫБОР И РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Учебно-методические пособие

Казань

2024

УДК 681.51

ББК 32.965.8

С40

Выбор и расчет элементов электропривода: учебно-методическое пособие / составители: О.В. Козелков, Н.А.Малев, А.И. Мухаметшин – Казань : КГЭУ, 2024. – 48 с.

Изложены методические указания по выполнению курсового проекта по дисциплине «Проектирование мехатронных систем», которые определяют общие требования, предъявляемые к курсовому проекту, последовательность его подготовки и выполнения, а также требования к структуре, содержанию и оформлению пояснительной записки. Рассмотрены примеры выбора двигателя по изложенной методике, расчета параметров его передаточной функции в зависимости от соотношения постоянных времени. В примерах расчета тиристорных преобразователей производится выбор дросселей, тиристоров и определяется его передаточная функция. В качестве датчика положения выбирается вращающийся трансформатор с соответствующим коэффициентом передачи

Предназначено для обучающихся по образовательной программе направления подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника, направленность (профиль) «Мехатроника».

УДК 681.51

ББК 32.965.8

*Рекомендовано к изданию учебно-методическим советом
Института цифровых технологий и экономики*

© Козелков О.В., Малев Н.А., Мухаметшин А.И., составление, 2024

© КГЭУ, 2024

ВВЕДЕНИЕ

Процесс обучения по дисциплине «Проектирование мехатронных систем» в соответствии с государственным образовательным стандартом предполагает формирование у студентов способности к пониманию и оформлению элементов технической документации механических, электрических и электронных узлов мехатронных систем.

Изучение дисциплины направлено на формирование у студентов следующих компетенций:

УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач;

ПК-1 Способен участвовать в качестве исполнителя в научно-исследовательских разработках новых мехатронных систем;

ПК-2 Способен понимать и оформлять элементы технической документации механических, электрических и электронных узлов мехатронных систем;

Выполнение курсового проекта направлено на формирование у студентов следующих индикаторов компетенций:

УК-1.2 Использует системный подход для решения поставленных задач, владеет логическими методами обработки информации, отличает факты от мнений, гипотез и интерпретаций;

ПК-1.3 Формулирует предложения по внедрению результатов исследований;

ПК-2.1 Понимает и оформляет чертежи механических узлов мехатронных систем;

ПК-2.2 Понимает и оформляет электрические схемы электрических и электронных узлов мехатронных систем

Курсовой проект посвящен выбору и расчёту элементов электропривода. В данном пособии содержится теоретическое описание процесса расчетов и моделирования, а также конкретные примеры расчета.

В теоретической части описывается процесс расчет параметров элементов электропривода: электродвигателя, тиристорного преобразователя, датчика скорости и др.

В практической части курсового проекта представлены соответствующие примеры расчета и выбора элементов. Рассмотрены примеры выбора двигателя по изложенной методике. В примерах расчета тиристорных преобразователей производится выбор дросселей, тиристоров и определяется его передаточная функция. Для определения передаточной функции датчика скорости в соответствующих примерах производится выбор тахогенератора, и рассчитываются элементы RC-фильтра. В качестве датчика положения выбирается вращающийся трансформатор с соответствующим коэффициентом передачи.

1. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Курсовой проект посвящен расчету и моделированию электропривода с двигателем постоянного тока. Задание на курсовой проект включает в себя: систему исходных данных, согласно которой производятся расчеты.

Таблица 1.1

Система исходных данных

| № п/п | $J_H,$ кг·м ² | $M_c,$ Н·м | $\Omega_{max},$ $\frac{\text{град}}{\text{с}}$ | $\varepsilon_{max},$ $\frac{\text{град}}{\text{с}^2}$ | M | η | $\Delta\alpha_\Omega,$ мин | $\Delta\alpha_\varepsilon,$ мин |
|----------|-----------------------------|---------------|---|--|-----|--------|-------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 142 | 250 | 10 | 6 | 1,1 | 0,80 | 10 | 35 |
| 2 | 345 | 155 | 18 | 3 | 1,2 | 0,85 | 15 | 40 |
| 3 | 48 | 60 | 70 | 25 | 1,3 | 0,90 | 20 | 45 |
| 4 | 251 | 65 | 60 | 24 | 1,4 | 0,90 | 25 | 50 |
| 5 | 254 | 90 | 97 | 25 | 1,5 | 0,90 | 30 | 10 |
| 6 | 57 | 75 | 100 | 37 | 1,1 | 0,92 | 35 | 15 |
| 7 | 160 | 80 | 62 | 25 | 1,2 | 0,82 | 40 | 20 |
| 8 | 263 | 85 | 84 | 30 | 1,3 | 0,88 | 45 | 25 |
| 9 | 366 | 80 | 16 | 14 | 1,4 | 0,90 | 50 | 30 |
| 10 | 269 | 95 | 48 | 11 | 1,5 | 0,85 | 10 | 35 |

В данном пособии содержится теоретическое описание процесса расчетов и моделирования, а также конкретные примеры расчета. Студент должен предварительно изучив теоретическую часть, выполнить расчеты по приведенным примерам. Система исходных данных приведена в приложении. Система исходных данных выбирается по варианту, номер варианта определяется либо по номеру студента в списке группы, либо преподавателем.

На основании системы исходных данных студент осуществляет расчет требуемых параметров электродвигателя. Осуществляет выбор электродвигателя постоянного тока, которые соответствует вычисленным требованиям.

Технические данные двигателей серии 2П

| Тип двигателя | Мощность на валу $P_{ном}$, кВт | Напряжение питания $U_{ном}$, В | Частота вращения $n_{ном}$, мин ⁻¹ | Коэффициент полезного действия $\eta_{ном}$, % | Сопrotивление обмотки якоря $R_{я}$, Ом | Сопrotивление добавочных полюсов | Индуктивность цепи якоря $L_{я}$, мГн | Момент инерции $J_{дв} \cdot 10^{-4}$, кг·м ² |
|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|--|---|-------------------------------------|---|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 2ПН9 0МУХ | 0,25 | 110 | 1060 | 56,0 | 3,99 | 2,55 | 78,7 | 40 |

Осуществляет расчет и выбора других элементов электропривода таких как: тиристорный преобразователь, датчик скорости, вращающийся трансформатор. Необходимые данные для расчета и выбора этих элементов приведены в приложении.

Отчет по курсовому проекту должен содержать следующие разделы:

- Систему исходных данных;
- Расчет требуемых параметров электродвигателя;
- Выбор электродвигателя, соответствующих рассчитанным требованиям;
- Расчет параметров и выбор тиристорного преобразователя;
- Расчет параметров и выбор тахогенератора;
- Расчет параметров и выбор вращающегося трансформатора;
- Расчет параметров и выбор операционного усилителя.

2. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ НАД КУРСОВЫМ ПРОЕКТОМ

При выдаче задания на курсовой проект консультант формулирует тему проекта, исходные данные, рекомендует необходимую литературу. При необходимости консультант проводит вводную консультацию, во время которой детализирует содержание пояснительной записки и устанавливает график выполнения проекта с указанием времени на выполнение основных этапов проекта. Консультации по курсовому проекту проводятся еженедельно.

3. ВЫБОР И РАСЧЁТ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Для расчёта электропривода в приложении приведена система исходных данных:

- момент инерции нагрузки J_n , кг·м²;
- момент сопротивления нагрузки M_c^0 , Н·м;
- максимальная угловая скорость нагрузки Ω_{\max} , град/с;
- максимальное угловое ускорение нагрузки ε_{\max} , град/с²;
- максимальный угол поворота исполнительного вала α_{\max} , град;
- показатель колебательности M ;
- коэффициент полезного действия редуктора η ;
- ошибка по скорости $\Delta\alpha_{\Omega}$, угл. мин;
- ошибка по ускорению $\Delta\alpha_{\varepsilon}$, угл. мин.

3.1. Двигатель постоянного тока с якорным управлением

Динамические свойства якорной цепи двигателя с управлением от тиристорного преобразователя описываются уравнением электрического равновесия [1, 18]:

$$U_{\text{ТП}} = c\Omega_{\text{ДВ}} + I_{\text{я}}R + L \frac{dI_{\text{я}}}{dt}, \quad (1.1)$$

где $R = R_{\text{я}} + R_{\text{д.п.}}$, $L = L_{\text{я}} + L_{d1} + L_{d2}$;

$R_{\text{я}}$, $R_{\text{д.п.}}$ – сопротивления якоря и добавочных полюсов соответственно;

L – суммарная индуктивность якорной цепи;

$L_{\text{я}}$ – индуктивность якоря;

L_{d1} – индуктивность дросселя, обеспечивающего гранично-непрерывный режим;

L_{d2} – индуктивность сглаживающего дросселя;

$U_{\text{ТП}}$ – напряжение на выходе тиристорного преобразователя.

Коэффициент противо-ЭДС c вычисляется при номинальных значениях координат:

$$U_{\text{ТП}} = U_{\text{НОМ}}; I_{\text{Я}} = I_{\text{НОМ}}; \Omega_{\text{ДВ}} = \Omega_{\text{НОМ}}.$$

Поэтому

$$U_{\text{НОМ}} = c \Omega_{\text{НОМ}} + I_{\text{НОМ}} R,$$

откуда

$$c = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{НОМ}} R}{\Omega_{\text{НОМ}}}. \quad (1.2)$$

Для построения структурной схемы динамической модели (ССДМ) двигателя выражение (1.1) необходимо дополнить уравнением механического равновесия:

$$J \frac{d\Omega_{\text{ДВ}}}{dt} = c I_{\text{Я}} - \frac{M_c}{i \eta}, \quad (1.3)$$

где $J = J_{\text{ДВ}} + \frac{J_{\text{Н}}}{i^2}$ – суммарный момент инерции двигателя и нагрузки, приведенный к валу двигателя.

Преобразуем уравнения (1.1) и (1.3) и запишем их в операторной форме

$$U_{\text{ТП}} = c \Omega_{\text{ДВ}} + I_{\text{Я}} R (T_{\text{Э}} s + 1); \quad (1.4)$$

$$\Omega_{\text{ДВ}} = \frac{R}{c T_{\text{М}} s} \left(I_{\text{Я}} - \frac{M_c}{i c \eta} \right), \quad (1.5)$$

где электромагнитная постоянная времени $T_{\text{Э}} = \frac{L_{\text{Я}}}{R}$ и электромеханическая

постоянная времени $T_{\text{М}} = \frac{J R}{c^2}$.

Из (1.4) получим

$$I_{\text{Я}} = \frac{1/R}{T_{\text{Э}} s + 1} (U_{\text{ТП}} - c \Omega_{\text{ДВ}}). \quad (1.6)$$

На основании выражений (1.5) и (1.6) построим структурную схему динамической модели (ССДМ), изображенную на рис. 1.3.

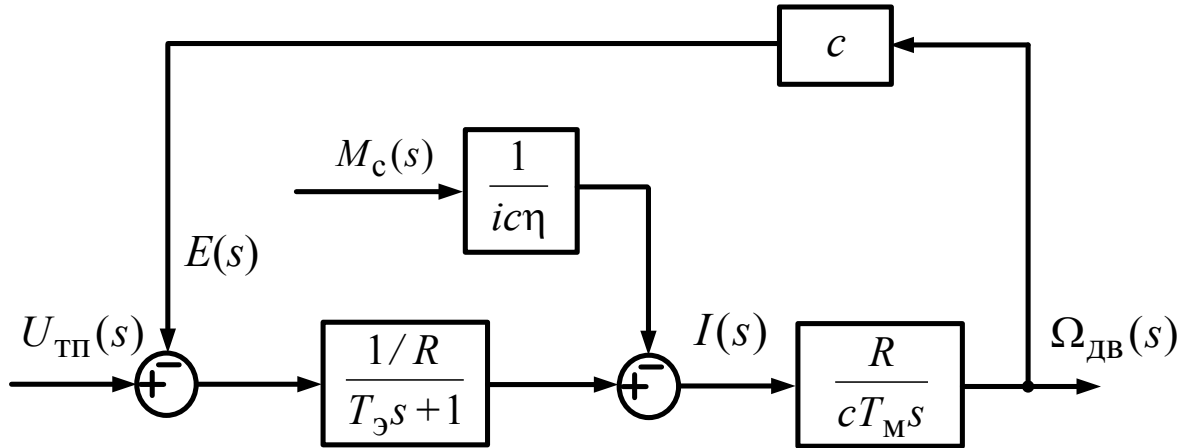


Рис. 1.3. Структурная схема динамической модели двигателя

На ССДМ двигателя отрицательная обратная связь образована противо-ЭДС $E = c\Omega_{\text{дв}}$.

Порядок выбора и расчёта двигателя постоянного тока. Требуемая мощность на исполнительном валу ЭП определяется по формуле

$$P_{\text{тр}} = M_{\text{вр}} \Omega_{\text{max}} i. \quad (1.7)$$

Требуемый вращающий момент, приведенный к валу двигателя:

$$M_{\text{вр}} = \left(J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{н}}}{i^2} \right) i \varepsilon_{\text{max}} + \frac{M_{\text{с}}^0}{i \eta}. \quad (1.8)$$

С учетом последнего выражения перепишем (1.7):

$$P_{\text{тр}} = \left[\left(J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{н}}}{i^2} \right) i \varepsilon_{\text{max}} + \frac{M_{\text{с}}^0}{i \eta} \right] i \Omega_{\text{max}}. \quad (1.9)$$

Неизвестными параметрами в (1.9) являются: требуемая мощность $P_{\text{тр}}$ и момент инерции двигателя $J_{\text{дв}}$.

Момент сопротивления M_c^0 , момент инерции нагрузки J_H и угловые параметры движения исполнительного вала Ω_{\max} , ε_{\max} и КПД редуктора η приведены в системе исходных данных.

Оптимальное передаточное число редуктора:

$$i_o = \sqrt{\frac{J_H \varepsilon_{\max} \eta + M_c^0}{J_{\text{дв}} \varepsilon_{\max} \eta}}. \quad (1.10)$$

Подстановка (1.9) в (1.7) даёт расчетную формулу для требуемой мощности:

$$P_{\text{тр}} = 2(J_H \varepsilon_{\max} + M_c^0 / \eta) \Omega_{\max}, \quad (1.11)$$

которая определяется на основании системы исходных данных.

Порядок расчета двигателя.

1. Расчёт требуемой мощности по формуле (1.11).
2. Выбор по табл. П.1 двигателя серии 2П и определение его технических данных:

- номинальной мощности на валу $P_{\text{НОМ}}$, кВт;
- номинального напряжения питания $U_{\text{НОМ}}$, В;
- номинальной частоты вращения $n_{\text{НОМ}}$, мин⁻¹;
- коэффициента полезного действия $\eta_{\text{НОМ}}$, %;
- сопротивления обмотки якоря $R_{\text{я}}$, Ом;
- сопротивления добавочных полюсов $R_{\text{д.п.}}$, Ом;
- индуктивности обмотки якоря $L_{\text{я}}$, мГн;
- момента инерции двигателя $J_{\text{дв}}$, кг · м².

3. Расчёт оптимального передаточного числа редуктора по формуле (1.10).

4. Расчет номинального момента $M_{\text{НОМ}}$ двигателя:

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\Omega_{\text{НОМ}}}, \quad (1.12)$$

где $\Omega_{\text{НОМ}} = \frac{\pi n_{\text{НОМ}}}{30}$.

5. Проверка выбранного двигателя на соответствие требований по угловой скорости:

$$\Omega_{\text{НОМ}} > i_0 \Omega_{\text{МАХ}}.$$

При невыполнении требований по угловой скорости необходимо рассчитать новое передаточное число редуктора:

$$i_1 = \frac{\Omega_{\text{НОМ}}}{\Omega_{\text{МАХ}}}.$$

6. Расчёт требуемого вращающего момента по формуле (1.8).

7. Проверка выбранного двигателя на соответствие требований по моменту:

$$\frac{M_{\text{ВР}}}{M_{\text{НОМ}}} \leq 2, \quad \frac{M_{\text{С}}^0}{i_0 \eta} \leq M_{\text{НОМ}}.$$

При невыполнении требований по моменту выбрать по таблице П.1. более мощный двигатель.

8. Расчет номинального тока якоря $I_{\text{НОМ}}$ производится по формуле

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}} \eta_{\text{НОМ}}}, \quad (1.13)$$

где $\eta_{\text{НОМ}}$ – номинальный КПД двигателя.

9. Определение коэффициента против-ЭДС c по формуле (1.2).

10. Определение электромеханической постоянной времени двигателя $T_{\text{М}}$, с:

$$T_{\text{М}} = \frac{\left(J_{\text{ДВ}} + \frac{J_{\text{Н}}}{i_0^2} \right) R}{c^2}. \quad (1.14)$$

11. Определение электромагнитной постоянной времени двигателя $T_{\text{Э}}$, с:

$$T_{\text{Э}} = \frac{L_{\text{Я}}}{R}, \quad (1.15)$$

После выбора дросселей электромагнитную постоянную времени T_9 необходимо будет скорректировать с учетом их индуктивностей.

ПРИМЕР 1. ($T_M \geq 4T_9$). Выбрать и рассчитать двигатель на основании исходных данных:

- момент инерции нагрузки $J_H = 460 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;
- момент сопротивления нагрузки $M_c^0 = 195 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- максимальная угловая скорость нагрузки $\Omega_{\max} = 65 \text{ град/с}$;
- максимальное угловое ускорение нагрузки $\varepsilon_{\max} = 19 \text{ град/с}^2$.
- коэффициент полезного действия редуктора $\eta = 0,92$.

Решение.

1. Рассчитываем требуемую мощность:

$$P_{\text{тр}} = 2(J_H \varepsilon_{\max} + M_c^0 / \eta) \Omega_{\max} =$$

$$= 2 \left(460 \frac{19}{57} + \frac{195}{0,92} \right) \frac{65}{57} = 833,1 \text{ Вт} = 0,8331 \text{ кВт}.$$

2. Выбираем по табл. П.1 двигатель, номинальная мощность которого $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{тр}}$.

Выбираем электродвигатель марки 2ПБ132МУХЛ4. Технические характеристики сводим в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Технические характеристики выбранного двигателя

| | | | | | | | | |
|---------------|---|---|--|--------------------------------------|---|--|--|---|
| Тип двигателя | Мощность на валу $P_{\text{ном}}, \text{ кВт}$ | Напряжение питания $U_{\text{ном}}, \text{ В}$ | Частота вращения $n_{\text{ном}}, \text{ МИН}^{-1}$ | Коэффициент полезного действия, % | Сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}, \text{ Ом}$ | Сопротивление добавочных полюсов $R_{\text{дп}}, \text{ Ом}$ | Индуктивность обмотки якоря $L_{\text{я}}, \text{ мГн}$ | Момент инерции $J_{\text{я}} \cdot 10^{-4}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ |
|---------------|---|---|--|--------------------------------------|---|--|--|---|

| | | | | | | | | |
|-------------|-----|-----|-----|----|------|------|----|-----|
| 2ПБ132МУХЛ4 | 1,1 | 110 | 750 | 64 | 0,56 | 0,34 | 13 | 380 |
|-------------|-----|-----|-----|----|------|------|----|-----|

3. Рассчитываем оптимальное передаточное число редуктора:

$$i_0 = \sqrt{\frac{J_H \varepsilon_{\max} \eta + M_c^0}{J_{\text{дв}} \varepsilon_{\max} \eta}} = \sqrt{\frac{460 \frac{19}{57} 0,92 + 195}{380 \cdot 10^{-4} \frac{19}{57} 0,92}} = 169,8.$$

4. Рассчитываем номинальный момент $M_{\text{НОМ}}$ двигателя:

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\Omega_{\text{НОМ}}} = \frac{1100}{78,5} = 14,013 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где

$$\Omega_{\text{НОМ}} = \frac{\pi n_{\text{НОМ}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,5 \text{ рад/с}.$$

5. Проверяем выбранный двигатель на соответствие требованиям по угловой скорости. Определяем приведенную к валу двигателя угловую скорость поворота нагрузки:

$$i_0 \Omega_{\max} = 170 \cdot \frac{65}{57} = 193,65 \text{ рад/с}.$$

Так как $78,5 \text{ рад/с} < 193,65 \text{ рад/с}$, то требования по скорости не выполняются.

Рассчитываем новое передаточное число редуктора:

$$i_1 = \frac{\Omega_{\text{НОМ}}}{\Omega_{\max}} = \frac{78,5 \cdot 57}{65} = 69.$$

6. Рассчитываем значение требуемого вращающего момента при $i_0 = i_1$:

$$\begin{aligned} M_{\text{вр}} &= \left(J_{\text{дв}} + \frac{J_H}{i_1^2} \right) i \varepsilon_{\max} + \frac{M_c^0}{i_1 \eta} = \\ &= \left(380 \cdot 10^{-4} + \frac{460}{69^2} \right) 69 \frac{19}{57} + \frac{195}{69 \cdot 0,92} = 6,178 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

7. Проверяем выбранный двигатель на соответствие требований по моменту:

$$\frac{M_{\text{вр}}}{M_{\text{НОМ}}} = \frac{6,178}{14,013} = 0,44 \leq 2,$$

$$\frac{M_{\text{с}}^0}{i_1 \eta} = \frac{195}{69 \cdot 0,92} = 3,07 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Проверяем условие:

$$\frac{M_{\text{с}}^0}{i_1 \eta} \leq M_{\text{НОМ}}$$

$$3,07 \text{ Н} \cdot \text{м} \leq 14,013 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Расчеты показали, что требования по моменту выполняются.

8. Рассчитываем номинальный ток якоря:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}} \eta_{\text{НОМ}}} = \frac{1100}{110 \cdot 0,64} = 15,62 \text{ А}.$$

9. Определяем коэффициент противо-ЭДС:

$$c = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{НОМ}} R}{\Omega_{\text{НОМ}}} = \frac{110 - 15,62 \cdot 0,9}{78,5} = 1,222 \text{ В} \cdot \text{с/рад},$$

$$\text{где } R = R_{\text{я}} + R_{\text{д.п.}} = 0,56 + 0,34 = 0,9 \text{ Ом}.$$

10. Определяем электромеханическую постоянную времени двигателя:

$$T_{\text{М}} = \frac{\left(J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{н}}}{i_1^2} \right) R}{c^2} = \frac{\left(380 \cdot 10^{-4} + \frac{460}{69^2} \right) 0,9}{1,222^2} = 0,081 \text{ с}.$$

11. Определяем электромагнитную постоянную времени двигателя:

$$T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{я}}}{R} = \frac{0,013}{0,9} = 0,014 \text{ с}.$$

3.2. Тиристорный преобразователь

Схема силовой части тиристорного преобразователя представлена на рис. 1.4 и содержит силовой трансформатор $TM1$, трёхфазный выпрямитель, выполненный по симметричной мостовой схеме, уравнивающие $L1 - L4$ и сглаживающий дроссель $L5$. Каждый мост состоит из шести тиристоров ($VS1 - VS6$). Реверс выходного напряжения осуществляется переключением силовых мостов.

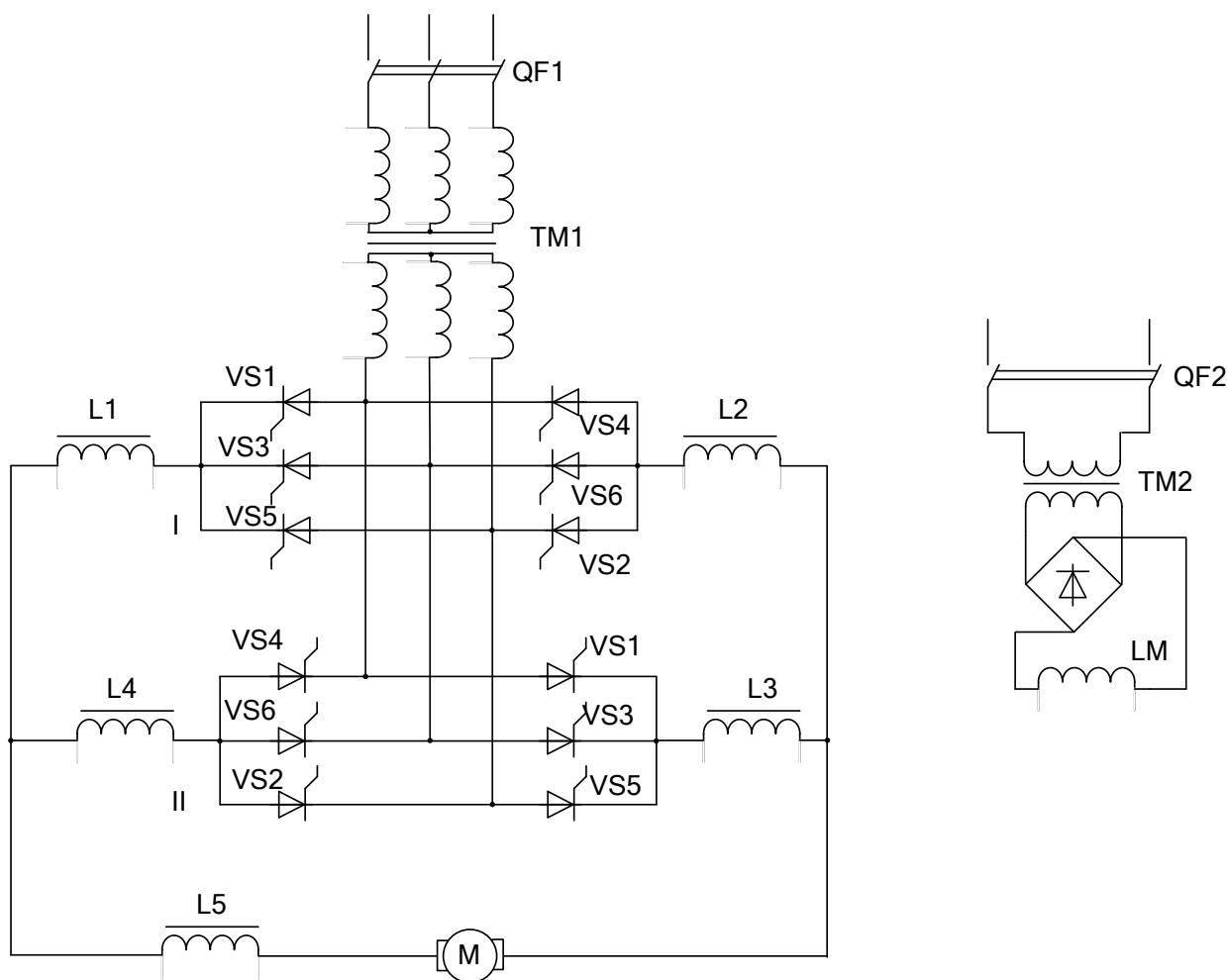


Рис. 1.4. Схема силовой части тиристорного преобразователя

Магнитопроводы уравнивающих дросселей рассчитываются на уравнивающие токи. Если ток нагрузки насыщает сердечники дросселей, то их индуктивность резко падает и необходимо включать четыре дросселя. При протекании тока нагрузки по преобразователю I уравнивающие дроссели $L1$ и $L2$

насыщаются, а $L3$ и $L4$ остаются ненасыщенными и ограничивают токи между соответствующими трёхфазными коммутирующими группами тиристорov. Если уравнивательные дроссели не насыщаются током нагрузки, достаточно применения двух дросселей, например, $L1$ и $L3$. В этом случае дроссели служат и для сглаживания пульсаций тока нагрузки. Индуктивность уравнивательных дросселей обычно достаточна для этой цели, поэтому необходимость в специальном сглаживающем дросселе $L5$ отпадает.

Для управления тиристорами используется система импульсно-фазного управления (СИФУ), выполняющая следующие функции [1, 4, 12]:

- определение моментов времени открывания тиристорov, в соответствии с сигналами, поступающими с выходов суммирующих усилителей, формирующих сигнал рассогласования;
- формирование открывающих импульсов, передаваемых в нужные моменты времени на управляющие электроды тиристорov.

По способу получения сдвига открывающих импульсов относительно точки естественного отпирания тиристорov различают горизонтальный, вертикальный и интегрирующий принципы управления. Преимущественно применяется вертикальный принцип управления, суть которого заключается в следующем: момент подачи открывающих импульсов U_{VS} определяется при равенстве поступающего управляющего напряжения U_y с пилообразным опорным напряжением $U_{пил}$. Отсчеты угла открывания γ для каждого тиристора производятся в собственном канале многоканальной СИФУ.

Уравнение электрического равновесия якорной цепи в соответствии с выражением (1.1):

$$U_{ТП} - E = R I_{я} + L \frac{dI_{я}}{dt}, \quad (1.16)$$

Среднее значение выпрямленного напряжения $U_{ТП}$ определяется по формуле:

$$U_{ТП} = \sqrt{2}U_2 \sin \frac{\rho}{\pi} \sin \frac{\pi}{\rho} \cos \gamma = U_{ТП0} \cos \gamma,$$

где U_2 – действующее значение фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора (или напряжение сети в бестрансформаторных схемах); p – число пульсаций выпрямленного напряжения; $U_{тп0}$ – максимальное значение среднего выпрямленного напряжения при $\gamma = 0$.

При раздельном управлении комплектами вентиляей, а также в области малых нагрузок и при больших значениях угла отпирания тиристоров системе ТП-ДПТ возникает режим прерывистых токов, причем зона прерывистых токов тем больше, чем больше угол γ . Появление зоны прерывистых токов обусловлено тем, что в определенные промежутки времени мгновенное значение выпрямленного напряжения преобразователя $U_{тп}$ становится меньше встречно действующей ЭДС двигателя E , и как следует из уравнения (1.16) разность $U_{тп} - E$ становится отрицательной. Ток должен изменить направление на противоположное. Но поскольку вентили обладают односторонней проводимостью, ток становится равным нулю. Вентили закрываются, и ток появляется вновь при условии $U_{тп} > E$.

При больших нагрузках ток является непрерывным. Объясняется это тем, что запас электромагнитной энергии в цепи выпрямленного тока значительный.

Возникающая при исчезновении тока ЭДС самоиндукции $L \frac{dI_{я}}{dt}$ складывается с мгновенным выпрямленным напряжением $U_{тп}$ и в сумме они превышают ЭДС двигателя E . При малых нагрузках ЭДС самоиндукции оказывается недостаточной для поддержания тока.

Для того чтобы исключить режим прерывистых токов применяются дополнительные дроссели с индуктивностью L_d . Для выбранной трёхфазной мостовой симметричной схемы (см. рис. 1.4) принимаем: количество пульсаций $p = 6$; угол отпирания тиристоров $\gamma = 30^\circ$; индуктивное сопротивление фазы $x_{а.ф.} \approx 0$.

Ограничение зоны прерывистых токов. Требование ограничения зоны прерывистых токов вызвано тем, что при протекании прерывистых токов

существенно изменяются статические и динамические характеристики системы управления электропривода с тиристорным преобразователем. Прерывистый ток возникает в том случае, когда ток нагрузки и индуктивность цепи выпрямленного тока малы по величине.

Для получения гранично-непрерывного режима при заданном значении угла регулирования γ в цепь выпрямленного тока необходимо включить дроссель с индуктивностью L_{d1} значение которой можно определить из формулы для трехфазной мостовой симметричной схемы:

$$L_{d1} = \frac{1}{2\pi f} \left(0,126 \frac{U_{2л}}{I_{d,гр}} \sin\gamma - 2x_{а.ф.} \right), \quad (1.17)$$

где $I_{d,гр} = (0,1 \div 0,2) I_{ном}$; $U_{2л}$ – действующее значение линейного напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Если при расчетах $L_{d1} \geq L_{я}$, то для ограничения прерывистых токов необходимо выбрать дроссель с индуктивностью $L_{др} = L_{d1} - L_{я}$.

Сглаживание пульсаций выпрямленного тока. Пульсации выпрямленного напряжения приводят к пульсации выпрямленного тока, которые ухудшают коммутацию двигателя и увеличивают его нагрев.

В симметричной мостовой и нулевой схемах амплитудные значения гармонических составляющих выпрямленного напряжения $U_{d,n,m}$ связаны с его средним значением U_{d0} и углом регулирования преобразователя γ следующим выражением

$$\frac{U_{d,n,m}}{U_{d0}} = \frac{2\cos\gamma}{k^2 p^2 - 1} \sqrt{1 + k^2 p^2 \operatorname{tg}^2 \gamma}$$

где $k = 1$ – кратность гармоники, то есть отношение порядкового номера гармоники к числу пульсаций; $p = 6$ – число пульсаций выпрямленного напряжения.

При известной амплитуде основной составляющей $U_{d,n,m}$ и допустимому действующему значению основной гармоники тока $p(1)\%$ необходимая индуктивность цепи выпрямленного тока может быть определена по формуле:

$$L_{d2} = \frac{100U_{d,n,m}}{\sqrt{2kp\omega p(1)\%I_{d,n}}}, \quad (1.18)$$

где $p(1)\% = 10$, $I_{d,n} = I_{\text{ном}}$.

Если при расчетах $L_{d2} \geq L_{я}$, то для ограничения прерывистых токов необходимо выбрать дроссель с индуктивностью $L_{др} = L_{d2} - L_{я}$.

Управление тиристорами осуществляется с помощью программируемого микропроцессорного контроллера, обеспечивающего также контроль и защиту тиристорных секций.

Тиристорный преобразователь является существенно нелинейным устройством. Силовая часть и система импульсно-фазового управления описываются передаточной функцией преобразователя. При высокой частоте входного сигнала дискретностью можно пренебречь. Тогда с учетом инерционности СИФУ передаточную функцию тиристорного преобразователя можно записать в виде:

$$W_{\text{ТП}}(s) \approx \frac{K_{\text{ТП}}}{(T_{\text{T}} + \tau)s + 1} = \frac{K_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}}s + 1}, \quad (1.19)$$

где $\tau = \frac{1}{2\pi f}$ – постоянная времени запаздывания; $T_{\text{T}} = \frac{1}{2\pi f m}$ – постоянная времени СИФУ; $T_{\text{ТП}} = T_{\text{T}} + \tau$ – постоянная времени тиристорного преобразователя; $K_{\text{ТП}}$ – коэффициент передачи тиристорного преобразователя; m – число фаз.

Тиристоры выбираются исходя из условий

$$I_{\text{п}} \geq I_{\text{max}}; \quad (1.20)$$

$$U_{\Pi} \geq U_{\text{м.обр}},$$

где I_{Π} – средний ток тиристора в открытом состоянии;

I_{max} – максимальный ток;

U_{Π} – напряжение тиристора;

U_{max} – максимальное напряжение в закрытом состоянии;

$$I_{\text{max}} = K_I K_B I_{\text{ном}}, \quad (1.21)$$

где $K_B = 0,33$ – коэффициент среднего тока вентиля для трехфазной мостовой схемы; $K_I = 2,5$ – коэффициент перегрузки по току.

Выбор дросселей тиристорного преобразователя. 1. Определение индуктивностей L_{d1} по формуле (1.17), L_{d2} по формуле (1.18). Если значения L_{d1} или L_{d2} оказались больше, чем $L_{\text{я}}$, то суммарная индуктивность L будет равна:

$$L = L_{\text{я}} + L_{d1} + L_{d2};$$

если значения L_{d1} или L_{d2} меньше, чем $L_{\text{я}}$, то

$$L = L_{\text{я}}.$$

1. Выбор дросселей по табл. П.2 для выбранного типа двигателя.

2. Расчет и выбор тиристорov по табл. П.3 для выбранного типа двигателя из условий (1.20).

3. Определение параметров передаточной функции тиристорного преобразователя (1.19).

ПРИМЕР 2 ($T_M \geq 4T_3$). Рассчитать индуктивности L_{d1} , L_{d2} и при необходимости выбрать дроссели для электропривода с двигателем типа 2ПБ132МУХЛ4 по примеру 1.1а. Произвести выбор тиристорov. Определить параметры передаточной функции тиристорного преобразователя.

Решение.

1. Определяем индуктивности L_{d1} , L_{d2} и сравниваем их с индуктивностью якоря $L_{\text{я}}$

$$L_{d1} = \frac{1}{2\pi f} \left(0,126 \frac{U_{2Л}}{I_{d,гр}} \sin\gamma - 2x_{a.ф.} \right) =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \left(0,126 \frac{\sqrt{3} \cdot 100}{0,2 \cdot 15,62} \sin 30^\circ - 2 \cdot 0 \right) = 0,012 \text{ Гн},$$

где $f = 50 \text{ Гц}$; $I_{d,гр} = (0,1 \div 0,2) I_{\text{НОМ}}$; $\gamma = 30^\circ$; $x_{a.ф.} = 0$.

Так как $L_{d1} = 0,012 \text{ Гн} < L_{я} = 0,013 \text{ Гн}$, то потребности в дросселе для ограничения прерывистых токов нет.

Индуктивность сглаживающего дросселя:

$$L_{d2} = \frac{100U_{d,n,m}}{\sqrt{2}kp\omega p_{(1)}\% I_{d,н}} =$$

$$= \frac{100 \cdot 19,536}{\sqrt{2} \cdot 1 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10 \cdot 15,62} = 0,005 \text{ Гн},$$

где $k = 1$, $p = 6$, $\omega = 2\pi f$, $p_{(1)}\% = 10$, $I_{d,н} = I_{\text{НОМ}}$.

$$U_{d,n,m} = U_{d0} \frac{2\cos\gamma}{k^2 p^2 - 1} \sqrt{1 + k^2 p^2 \text{tg}^2 \gamma} =$$

$$= 110 \cdot \frac{2 \cdot \cos 30^\circ}{1^2 \cdot 6^2 - 1} \sqrt{1 + 1^2 \cdot 6^2 \cdot \text{tg}^2 30^\circ} = 19,536 \text{ В}.$$

Так как $L_{d2} = 0,005 \text{ Гн} < L_{я} = 0,013 \text{ Гн}$, то потребности в дросселе для ограничения пульсаций выпрямленного тока нет.

2. Расчет и выбор тиристорov для выбранного типа двигателя.

Определяем значение I_{max} по формуле (1.21)

$$I_{\text{max}} = K_I K_B I_{\text{НОМ}} = 2,5 \cdot 0,33 \cdot 15,62 = 12,89 \text{ А}.$$

По табл. П.3 выбираем тиристор марки 16TTS12. Технические характеристики сводим в табл. 1.3.

Технические характеристики выбранного тиристора

| Наименование | Максимальное напряжение в закрытом состоянии, В | Средний ток в открытом состоянии, А | Тип корпуса |
|--------------|---|-------------------------------------|-------------|
| 16TTS12 | 1200 | 16 | ТО209АВ |

3. Определяем параметры передаточной функции тиристорного преобразователя:

– расчет постоянной времени запаздывания

$$\tau = \frac{1}{2\pi f} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,003 \text{ с};$$

– расчет постоянной времени СИФУ

$$T_T = \frac{1}{2\pi f m} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 3} = 0,001 \text{ с}.$$

Тогда постоянная времени тиристорного преобразователя:

$$T_{\text{ТП}} = T_T + \tau = 0,003 + 0,001 = 0,004 \text{ с}.$$

Рассчитываем коэффициент передачи тиристорного преобразователя:

$$K_{\text{ТП}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\Delta U_{\Omega}} = \frac{110}{10} = 11.$$

Определяем передаточную функцию тиристорного преобразователя по формуле (1.19):

$$W_{\text{ТП}}(s) = \frac{K_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}}s + 1} = \frac{11}{0,004s + 1}.$$

3.3. Тахогенератор

Тахогенераторы преобразуют частоту вращения вала двигателя в электрический сигнал (выходное напряжение) [17]. Зависимость выходного напряжения тахогенератора $U_{\text{ТГ}}$ от частоты вращения ротора (якоря) n определяется выходной характеристикой. Уравнение идеальной выходной характеристики тахогенератора:

$$U_{\text{ТГ}} = C_u n, \quad (1.22)$$

где C_u , мВ/(об/мин) – крутизна выходной характеристики, определяющая чувствительность тахогенератора к изменениям частоты вращения. Чем больше крутизна C_u , тем чувствительнее и точнее тахогенератор.

По принципу действия и устройству тахогенераторы бывают постоянного и переменного тока. В системе представлен тахогенератор постоянного тока – коллекторная машина постоянного тока с независимым возбуждением, работающая в генераторном режиме. На рис. 1.5 показана электрическая схема тахогенератора постоянного тока с электромагнитным возбуждением. На выходе тахогенератора устанавливается фильтр нижних частот с конденсатором C_1 и делитель напряжения с сопротивлениями $R_{д1}$, $R_{д2}$.

Обмотка возбуждения тахогенератора подключается к источнику постоянного тока. Если якорь возбужденного тахогенератора привести во вращение с частотой n , то на его выходе появится постоянное напряжение

$$U_{\text{ТГ}} = \frac{c_e \Phi n}{1 + r_a / R_H},$$

где r_a – сопротивление обмотки якоря, Ом; R_H – сопротивление нагрузки; Φ – магнитный поток; c_e – конструктивная постоянная. Для больших значений R_H выражение приводится к виду (1.22).

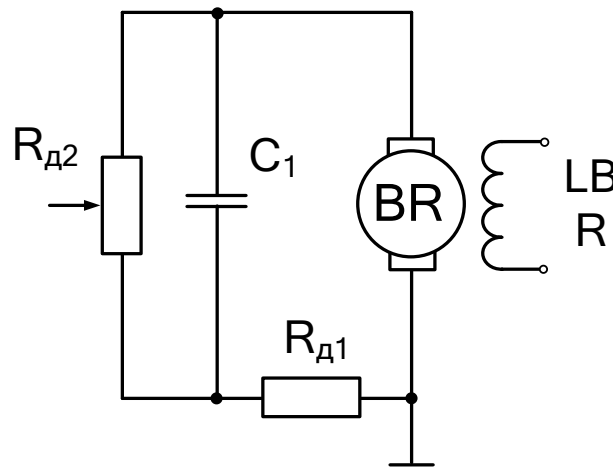


Рис. 1.5. Тахогенератор постоянного тока

Коэффициент передачи обратной связи контура скорости определяется по формуле:

$$K_{oc} = \frac{U_{oc}}{\Omega_{ном}}, \quad (1.23)$$

где U_{oc} – сигнал обратной связи, равный напряжению суммирующего усилителя контура скорости.

С учетом коэффициента передачи делителя K_d коэффициент обратной связи определяется по формуле

$$K_{oc} = C_u K_M K_d,$$

где $K_M = \frac{\Omega_{тг}}{\Omega_{ном}}$ – коэффициент передачи мультипликатора (q_2), служащего для согласования скоростей двигателя и тахогенератора.

Тогда $K_d = \frac{K_{oc}}{C_u K_M}$ – коэффициент передачи делителя напряжения.

Необходимое значение коэффициента K_d устанавливается переменным резистором R_{d2} . Передаточная функция фильтра нижних частот с делителем напряжения определяется на основании схемы (см. рис.1.5):

$$W_{\Phi}(s) = \frac{\left(R_{д2} \cdot \frac{1}{Cs}\right) / \left(R_{д2} + \frac{1}{Cs}\right)}{R_{д1} + \left(R_{д2} \cdot \frac{1}{Cs}\right) / \left(R_{д2} + \frac{1}{Cs}\right)} = \frac{R_{д2} / (R_{д2}Cs + 1)}{R_{д1} + R_{д2} / (R_{д2}Cs + 1)} =$$

$$= \frac{R_{д2}}{R_{д1}R_{д2}Cs + R_{д1} + R_{д2}} = \frac{R_{д2}}{R_{д1} + R_{д2}} \cdot \frac{1}{R_{д1}R_{д2}Cs / (R_{д1} + R_{д2}) + 1}.$$

Обозначив постоянную времени фильтра

$$T_{\Phi} = \frac{R_{д1}R_{д2}}{R_{д1} + R_{д2}} C_{\Phi}$$

и коэффициент передачи делителя

$$K_{д} = \frac{R_{д2}}{R_{д1} + R_{д2}},$$

получим

$$W_{\Phi}(s) = \frac{K_{д}}{T_{\Phi} s + 1}.$$

ПРИМЕР 3 ($T_{м} \geq 4T_{\Phi}$). Выбрать тахогенератор для электропривода с двигателем типа 2ПБ132МУХЛ4 по примеру 1.1а. Рассчитать и выбрать RC-элементы фильтра. Определить параметры передаточной функции датчика скорости.

Решение. 1. По табл. П4 в приложении выбираем тахогенератор типа ТП20-6-0,5 со значением крутизны характеристики $C_u = 6,0$ мВ/(об/мин). Технические характеристики сведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Технические характеристики тахогенератора

| Типоразмер | C_u , мВ/(об/мин) | $R_{нг}$, 10^3 Ом | $n_{тг}$, об/мин |
|------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| ТП20-6-0,5 | 6,0 | 10 | 3000 |

Переведем значение крутизны выходной характеристики в В·с/рад:

$$C_u = 6 \cdot \frac{10^{-3} \cdot 60}{2\pi} = 0,057 \text{ В} \cdot \text{с/рад.}$$

1. Производим расчет и выбор RC-элементов фильтра.

Определяем передаточное число мультипликатора q_2 :

$$K_M = \frac{\Omega_{ТГ}}{\Omega_{НОМ}} = \frac{314}{78,5} = 4,$$

где $\Omega_{ТГ} = \pi n_{ТГ} / 30$.

Определяем коэффициент передачи делителя:

$$K_D = \frac{K_{ос}}{C_u K_M} = \frac{0,127}{0,057 \cdot 4} = 0,56,$$

где коэффициент передачи датчика скорости

$$K_{ос} = \frac{U_{ос}}{\Omega_{НОМ}} = \frac{10}{78,5} = 0,127 \text{ В} \cdot \text{с/рад.}$$

Так как K_D меньше единицы, то необходимо выбрать делитель напряжения с коэффициентом:

$$K_D = \frac{R_{д2}}{R_{д1} + R_{д2}},$$

откуда

$$R_{д2} = \frac{K_D R_{д1}}{1 - K_D}.$$

Значение сопротивления $R_{д1}$ принимаем 10 кОм, тогда:

$$R_{д2} = \frac{K_D R_{д1}}{1 - K_D} = \frac{0,56 \cdot 10 \cdot 10^3}{1 - 0,56} = 12,5 \text{ кОм.}$$

Приводим значение сопротивления $R_{д2}$ к номиналу по табл. П.5:

$$R_{д2} = 12,6 \text{ кОм.}$$

Примем предварительно значение постоянной фильтра $T_\phi = 0,01 \text{ с}$ и

определим емкость конденсатора C_{ϕ} :

$$C_{\phi} = \frac{T_{\phi}(R_{д1} + R_{д2})}{R_{д1}R_{д2}} = \frac{0,01(10 + 12,6)10^3}{10 \cdot 12,6 \cdot 10^6} = 1,8 \text{ мкФ.}$$

Приводим значение емкости к номиналу по табл. П.6:

$$C_{\phi} = 2,2 \text{ мкФ.}$$

Выбираем конденсатор Panasonic серии NHG на рабочее напряжение 50 В и пересчитываем постоянную времени фильтра:

$$T_{\phi} = \frac{R_{д1}R_{д2}}{R_{д1} + R_{д2}} C_{\phi} = \frac{10 \cdot 12,6 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3 + 12,6 \cdot 10^3} 2,2 \cdot 10^{-6} = 0,012 \text{ с.}$$

2. Передаточная функция датчика скорости:

$$W_{oc}(s) = \frac{K_{oc}}{T_{\phi}s + 1} = \frac{0,127}{0,012s + 1}.$$

3.4. Вращающийся трансформатор

В следящих позиционных ЭП широкое применение получили вращающиеся трансформаторы, представляющие собой электрические индукционные микромашины [3]. Прецизионные вращающиеся трансформаторы обеспечивают точностные характеристики в пределах $\pm(2 \div 10)$ угловых минут.

Для пояснения принципа действия рассмотрим схему включения ВТ в режиме измерителя рассогласования (рис.1.6), пропорционального разности углов поворота задающего и исполнительного валов ЭП

$$\Delta\alpha = \alpha_3 - \alpha.$$

Ротор датчика ТС кинематически связан с задающим, а ротор приемника ТЕ – с исполнительным валом ЭП.

При повороте задающего вала на угол α_3 переменный ток, протекающий в статорной обмотке возбуждения (В1, В2) создает пульсирующий магнитный поток, который наводит в обмотках ротора ЭДС. Тогда выражения для напряжений на косинусной (К1, К2) и синусной (С1, С2) обмотках,

соответственно, ротора датчика ТС, запишутся в виде тригонометрических соотношений

$$U_x = U_{\Pi} K_T \cos \alpha_3;$$

$$U_y = U_{\Pi} K_T \cos(90^\circ - \alpha_3) = U_{\Pi} K_T \sin \alpha_3,$$

где K_T – коэффициент трансформации между обмоткой возбуждения и вторичной обмоткой.

Напряжения U_x и U_y , благодаря трехпроводной цепи синхронизации создают переменный магнитный поток, возбуждающий приемник ТЕ. На выходной статорной обмотке ТЕ формируется электрический сигнал рассогласования

$$\Delta U_\alpha = U_y \cos \alpha - U_x \sin \alpha.$$

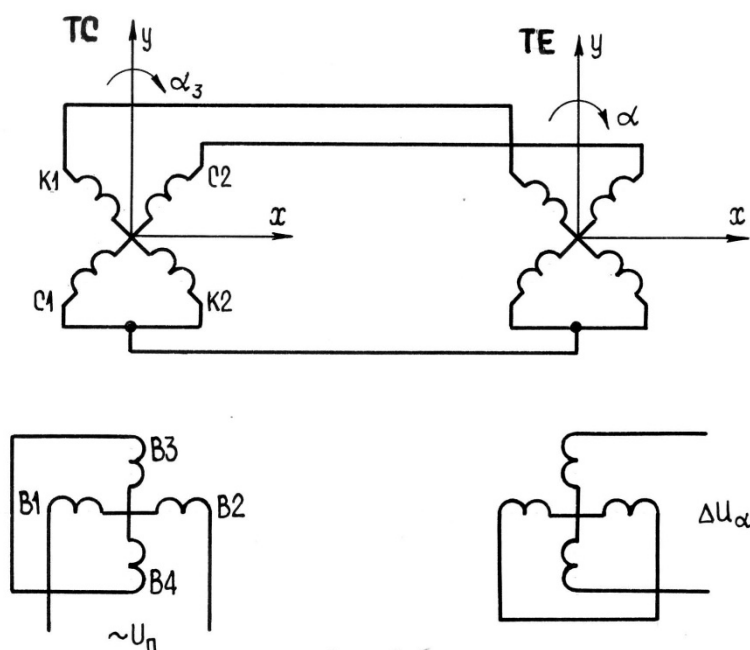


Рис. 1.6. Схема включения вращающихся трансформаторов

Преобразуем к виду:

$$\Delta U_\alpha = U_{\Pi} K_T \sin(\alpha - \alpha_3) = U_{\Pi} K_T \sin \Delta \alpha.$$

Произведение $U_{\Pi} K_T$ определяет чувствительность измерителя или крутизну его характеристики.

Введем обозначение:

$K_{\text{ВТ}} = U_{\text{П}} K_{\text{T}}$ – коэффициент передачи ВТ, тогда

$$\Delta U_{\alpha} = K_{\text{ВТ}} \sin \Delta \alpha. \quad (1.23)$$

Статическая характеристика измерителя рассогласования на ВТ показана на рис. 1.7 и имеет нелинейный характер, что приводит к нежелательному изменению крутизны его характеристики при больших значениях рассогласования $\Delta \alpha$.

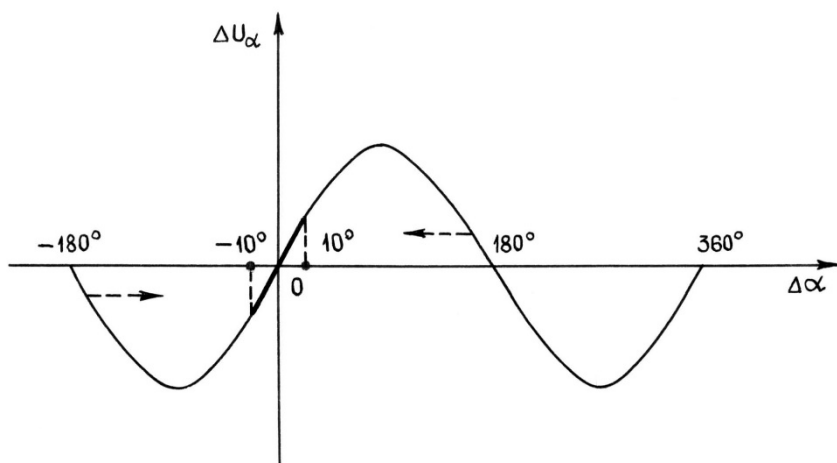


Рис. 1.7. Статическая характеристика измерителя рассогласования на вращающихся трансформаторах

Следует отметить, что рассматриваемая схема обладает свойством самосинхронизации и при отклонениях $\Delta \alpha < 180^\circ$ измеритель автоматически устраняет рассогласование (в направлении, показанном стрелками, рис.1.7) и привод приходит в состояние устойчивого равновесия (начало координат). Режим слежения характеризуется малыми отклонениями ($\pm 10^\circ$) $\Delta \alpha$.

Заменяя в выражении (1.23) $\sin \Delta \alpha \cong \Delta \alpha$, получим

$$\Delta U_{\alpha} = K_{\text{ВТ}} \Delta \alpha.$$

При малых значениях рассогласования измеритель будет функционировать на линейном участке статической характеристики, обеспечивая, тем самым, требуемые точностные характеристики. Кроме того для снижения искажений полезного сигнала применяют так называемое «симметрирование» ВТ, которое заключается в определенном подборе сопротивлений нагрузок квадратурной

обмотки статора ВЗВ4 (первичное симметрирование) и косинусной обмотки ротора К1К2 (вторичное симметрирование).

ПРИМЕР 4 ($T_M \geq 4T_\Omega$). Выбрать СКВТ для электропривода с двигателем типа 2ПБ132МУХЛ4 и рассчитать его коэффициент передачи. Угол поворота исполнительного вала электропривода $\alpha_{\max} = 20$ град.

Решение. По табл. П7 выбираем СКВТ типа ВТМ-4А с параметрами: напряжение возбуждения $U_{\Pi} = 60$ В; частота тока возбуждения $f_{\Pi} = 400$ Гц; коэффициент трансформации $K_T = 1,0$; частота вращения $n_{\text{ВТ}} = 2000$ об/мин.

При малом отклонении исполнительного вала электропривода сигнал на выходе вращающегося трансформатора:

$$U_{\alpha} = K_{\text{ВТ}} \alpha.$$

Максимальный угол поворота исполнительного вала электропривода:

$$\alpha_{\max} = 20 \frac{\pi}{180} = 0,35 \text{ рад.}$$

Коэффициент передачи вращающегося трансформатора:

$$K_{\text{ВТ}} = \frac{U_{\alpha}}{\alpha_{\max}} = \frac{10}{0,35} = 28,5 \text{ В/рад.}$$

3.5. Операционные усилители

Операционные усилители (ОУ) – это усилители постоянного тока, предназначенные для осуществления как линейных, так и нелинейных преобразований сигналов, причем вид преобразования (операция) определяется лишь структурой внешней по отношению к усилителю сменной цепи обратной связи. При этом один и тот же ОУ, в зависимости от подключаемой к нему цепи обратной связи, может производить инвертирование, интегрирование, нелинейное функциональное преобразование входного сигнала, суммирование нескольких сигналов с разными весами и знаками, перемножение мгновенных значений двух сигналов и др.

Универсальность ОУ и высокая точность выполнения операций, задаваемых структурой цепи обратной связи, обеспечиваются высоким коэффициентом усиления ОУ (K_U без обратной связи достигает 10^5 и выше), высоким входным и низким выходным сопротивлениями, а также малым дрейфом нуля. Для обеспечения устойчивости ОУ при работе с разнообразными цепями обратной связи (возможно с комплексным коэффициентом передачи) осуществляется тщательный выбор его амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик (АЧХ и ФЧХ) и принимаются меры, гарантирующие их стабильность.

На рис. 1.8. показана схема операционного усилителя и его 5 выводов:

1. U_1 – сигнал на неинвертирующем входе;
2. U_2 – сигнал на инвертирующем входе;
3. $U_{\text{вых}}$ – выходной сигнал;
4. $+U_{\text{пит}}$ – положительный вывод питания;
5. $-U_{\text{пит}}$ – отрицательный вывод питания.

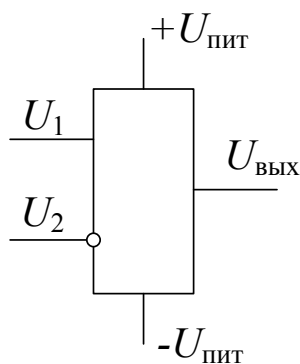


Рис. 1.8. Схема операционного усилителя

При подаче сигнала на неинвертирующий вход приращение выходного сигнала совпадает по знаку (фазе) с приращением входного сигнала. Если же сигнал подан на инвертирующий вход, то приращение выходного сигнала имеет обратный знак (противоположный по фазе) по сравнению с приращением входного сигнала.

Двуполярное питание обеспечивает возможность инверсии знака

напряжения на инвертирующем входе U_2 , то есть при подаче на вход U_2 положительного сигнала на выходе сигнал будет отрицательным. Напряжение питания ОУ обычно +15 В/-15В.

В ОУ без обратной связи коэффициент усиления K_U сильно зависит от частоты (K_U падает с увеличением частоты как показано на (рис. 1.9, кривая 1), поэтому для создания плоской АЧХ вводят корректирующие RC-цепи (кривые 2 и 3). Для балансировки нуля также используют внешний переменный резистор.

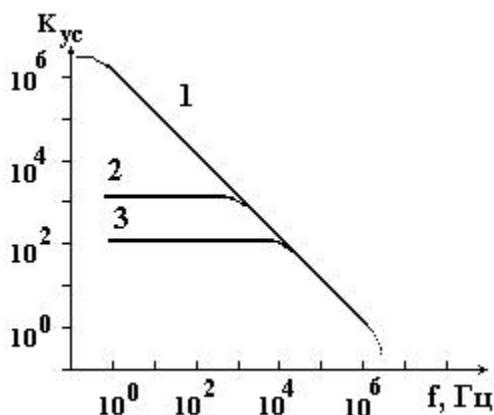


Рис. 1.9. Графики АЧХ

Кроме того, при высоком значении коэффициента усиления трудно управлять усилителем и удерживать его от насыщения. Если часть выходного сигнала направить обратно на вход в противофазе с входным сигналом, то есть создать отрицательную обратную связь, то усилитель будет более стабильным, но это приведет к снижению коэффициента усиления. Типичные схемы включения ОУ с отрицательной обратной связью имеют коэффициент усиления от 10 до 1000, тогда как коэффициент усиления ОУ без обратной связи находится в диапазоне от 10^5 до 10^7 . Если обратная связь положительна, усилитель переходит в режим генерации, то есть становится автогенератором.

Для питания ОУ применяются блоки питания со стабилизацией напряжения, позволяющие получить стабильные параметры и точность регулирования. Для построения блока питания можно применить специализированные микросхемы, имеющие в своем составе сложные

стабилизаторы напряжения и устройства защиты нагрузки и сети от аварийных режимов, позволяющие максимально упростить конструкцию и размеры схемы. На рис. 1.10 приведен пример построения блока питания операционных усилителей на базе микросхем LM317 и LM337 производства National Semiconductor, выпускаемые в корпусах ТО-220. Данные микросхемы имеют всего 3 вывода (вход, выход и коррекция, см. рис. 1.10) и требуют для своей работы минимум элементов. В зависимости от мощности, питаемой нагрузки, микросхемы могут устанавливаться на теплоотводящих радиаторах, при этом максимальная нагрузка составляет 1,5А.

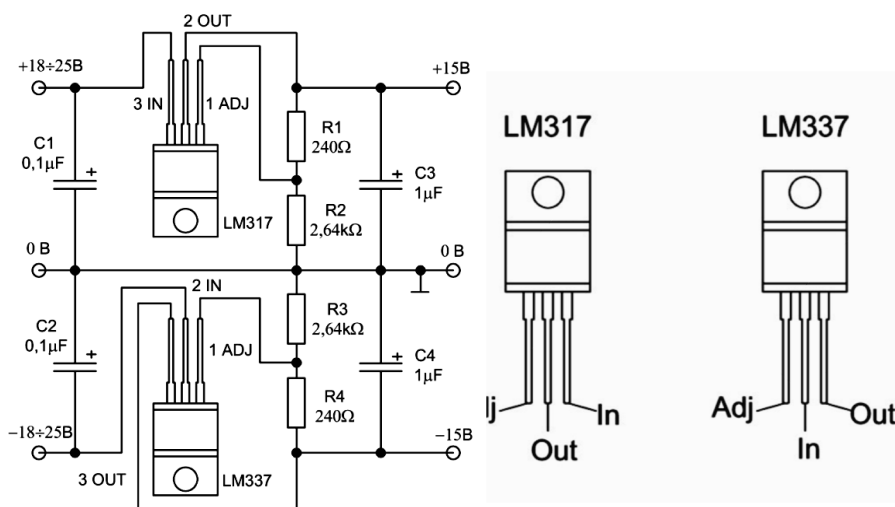


Рис. 1.10. Схема блока питания на стабилизаторах и назначение выводов микросхем в корпусе ТО-220

На схеме блока питания представлены конденсаторы C_1 и C_2 , образующие фильтр на входе.

Фильтр предназначен для сглаживания напряжения после выпрямителя. Обычно используется электролитический конденсатор достаточно большой емкости.

Выбор конденсаторов производится в соответствии с его рабочим напряжением. Необходимо выбирать конденсаторы с запасом по напряжению примерно 41%. Например, в блоке питания на 5 В вторичная обмотка трансформатора будет на 7 - 10 В. С учетом повышения напряжения на 41%

необходимо выбрать конденсатор на напряжение не менее 14 В, для стандартного ряда – 25 В.

На выходе фильтра установлен стабилизатор напряжения (LM317, LM337). Данная микросхема служит для стабилизации диапазона напряжений.

Мощность, выделяемая на микросхеме (рассеиваемая микросхемой), определяется так:

$$P_{\text{макс}} = (U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}) \cdot I_{\text{нагр}}.$$

Если мощность получается больше, чем 0,5-0,7 Вт, то нужно использовать теплоотводящий радиатор.

Выходное напряжение блока питания может быть выбрано в диапазоне от 1,25 до 30 вольт и зависит от соотношения сопротивлений R_1 и R_2 (R_3 и R_4), причем величина $R_1 = 240 \text{ Ом}$ рекомендуется производителем:

$$U_{\text{вых}} = 1,25 \cdot (1 + R_2 / R_1).$$

Отсюда можно найти значение сопротивления R_2 для получения требуемого напряжения на выходе:

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot U_{\text{вых}}}{1,25} - R_1$$

В нашем случае, для работы операционных усилителей требуется ± 15 вольт, значит величина R_2 должна быть равна:

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot U_{\text{вых}}}{1,25} - R_1 = \frac{240 \cdot 15}{1,25} - 240 = 2640 \text{ Ом} = 2,64 \text{ кОм}.$$

Выбираем сопротивление MPR2400 с номиналом соответствующим номинальному ряду E192, то есть 2,64 кОм по табл. П.5.

После стабилизаторов на выходе блока питания установлены конденсаторы C_3 и C_4 для предотвращения самовозбуждения микросхем стабилизаторов. Для каждой микросхемы используют два конденсатора: один на вход, другой на выход. Если проводник, соединяющий эти конденсаторы с микросхемой, имеет длину более 7 см, то необходимо дополнительно установить конденсаторы возле микросхемы стабилизатора. Емкости C_3 и C_4 должны выбираться в диапазоне от 0,1 мкФ до 4,7 мкФ.

4. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА ПО КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

В состав отчетных документов по курсовому проекту входит пояснительная записка (ПЗ) объемом 20..30 страниц формата А4 (210x297мм).

Расчетно-пояснительная записка должна содержать следующие разделы:

- титульный лист;
- задание на курсовой проект;
- оглавление;
- основная часть, которая содержит следующие пункты:
 - Расчет требуемых параметров электродвигателя;
 - Выбор электродвигателя, соответствующих рассчитанным требованиям;
 - Расчет параметров и выбор тиристорного преобразователя;
 - Расчет параметров и выбор тахогенератора;
 - Расчет параметров и выбор вращающегося трансформатора;
 - Расчет параметров и выбор операционного усилителя.
- заключение;

Пояснительная записка должна показать умение студента логично и аргументировано излагать материал, а ее оформление должно соответствовать требованиям ЕСКД.

Текст ПЗ должен быть набран на компьютере в текстовом редакторе Microsoft Word и распечатан на одной стороне листа белой бумаги формата А4 с соблюдением следующих размеров полей: левое – 30 мм, правое – 15 мм, верхнее и нижнее – 20 мм. Для набора текста ПЗ следует использовать: гарнитуру шрифта – Times New Roman; размер шрифта (кегля) основного текста – 14 пт, подрисуночных подписей – 12 пт, в таблицах – 10–12 пт; цвет шрифта – черный. Абзацный отступ выполняется одинаковым по всему

тексту и равен 1,25 см, межстрочный интервал – полуторный, выравнивание текста – по ширине. Каждый структурный элемент и раздел следует начинать с новой страницы. Все математические расчет следует выделять из текста в отдельную строку. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation 3.0 или MathType шрифтом тех же гарнитуры и кегля, что и основной текст, к которому они относятся

5. ЗАЩИТА КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект, подписанный студентом, сдается на проверку консультанту. Если курсовой проект удовлетворяет, предъявляемым к нему требованиям, студент допускается к защите курсового проекта.

Для приема защиты курсового проекта кафедра формирует комиссию, в состав которой должно входить не менее трех преподавателей кафедры. Курсовые проекты защищают публично в присутствии студентов, желающих послушать защиту.

На доклад по курсовому проекту студенту отводится 5-7 минут. Для защиты студенту необходимо подготовить презентацию, в которой будут продемонстрированы проведенные расчеты и выбранные элементы электропривода. В процессе доклада студент должен описать проведенные расчеты и выбранные элементы электродвигателя.

По окончании доклада студенту могут быть заданы вопросы по выполненному курсовому проекту. Общее время на вопросы и ответы не должно превышать – 5 мин.

Курсовой проект оценивается по системе принятой в вузе (по 100 балльной шкале) с записью положительной оценки в зачетную книжку. При оценке учитывается правильность и качество пояснительной записки, качество сделанного доклада, правильность и краткость ответов на вопросы. В случае неудовлетворительной оценки по одному из критериев, курсовой проект может быть оценен неудовлетворительно. Студенты, не защитившие ее, считаются имеющими академическую задолженность,

В случае неудовлетворительной оценки курсового проекта комиссия может:

— указать на необходимость доработки проекта без конкретизации допущенных ошибок и установить срок представления проекта к защите после доработки;

— предложить проведение дополнительной проработки отдельных вопросов и установить срок представления проекта к защите после

доработки.

В случае повторной неудовлетворительной оценки проекта комиссия вправе сменить тематику проекта и назначить срок ее представления к защите. Повторная защита на повышенную оценку допускается только в том случае, если автор провел ее доработку.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П.1

Система исходных данных

| № п/п | $J_H,$ кг·м ² | $M_c,$ Н·м | $\Omega_{\max},$ град с | $\varepsilon_{\max},$ град с ² | M | η | $\Delta\alpha_{\Omega},$ мин | $\Delta\alpha_{\varepsilon},$ мин |
|----------|-----------------------------|---------------|-------------------------------|---|-----|--------|---------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 142 | 250 | 10 | 6 | 1,1 | 0,80 | 10 | 35 |
| 2 | 345 | 155 | 18 | 3 | 1,2 | 0,85 | 15 | 40 |
| 3 | 48 | 60 | 70 | 25 | 1,3 | 0,90 | 20 | 45 |
| 4 | 251 | 65 | 60 | 24 | 1,4 | 0,90 | 25 | 50 |
| 5 | 254 | 90 | 97 | 25 | 1,5 | 0,90 | 30 | 10 |
| 6 | 57 | 75 | 100 | 37 | 1,1 | 0,92 | 35 | 15 |
| 7 | 160 | 80 | 62 | 25 | 1,2 | 0,82 | 40 | 20 |
| 8 | 263 | 85 | 84 | 30 | 1,3 | 0,88 | 45 | 25 |
| 9 | 366 | 80 | 16 | 14 | 1,4 | 0,90 | 50 | 30 |
| 10 | 269 | 95 | 48 | 11 | 1,5 | 0,85 | 10 | 35 |
| 11 | 172 | 100 | 80 | 42 | 1,1 | 0,90 | 15 | 40 |
| 12 | 375 | 105 | 23 | 5 | 1,2 | 0,92 | 20 | 45 |
| 13 | 78 | 10 | 100 | 80 | 1,3 | 0,88 | 25 | 50 |
| 14 | 81 | 15 | 72 | 20 | 1,4 | 0,85 | 30 | 10 |
| 15 | 184 | 120 | 33 | 15 | 1,5 | 0,90 | 35 | 15 |
| 16 | 187 | 125 | 86 | 15 | 1,1 | 0,92 | 40 | 20 |
| 17 | 100 | 130 | 38 | 9 | 1,2 | 0,80 | 45 | 25 |
| 18 | 205 | 135 | 41 | 8 | 1,3 | 0,85 | 50 | 30 |
| 19 | 110 | 140 | 52 | 11 | 1,4 | 0,82 | 10 | 35 |
| 20 | 115 | 145 | 54 | 18 | 1,5 | 0,90 | 15 | 40 |
| 21 | 120 | 150 | 56 | 16 | 1,1 | 0,80 | 20 | 45 |
| 22 | 126 | 160 | 60 | 12 | 1,2 | 0,87 | 25 | 50 |
| 23 | 132 | 170 | 58 | 17 | 1,3 | 0,80 | 30 | 10 |
| 24 | 138 | 180 | 53 | 6 | 1,4 | 0,85 | 10 | 35 |
| 25 | 144 | 190 | 50 | 23 | 1,5 | 0,90 | 15 | 40 |
| 26 | 151 | 200 | 47 | 22 | 1,1 | 0,95 | 20 | 45 |
| 27 | 155 | 190 | 44 | 21 | 1,2 | 0,90 | 25 | 50 |
| 28 | 159 | 185 | 40 | 20 | 1,3 | 0,92 | 30 | 10 |
| 29 | 163 | 180 | 42 | 8 | 1,4 | 0,82 | 35 | 15 |
| 30 | 160 | 170 | 38 | 10 | 1,5 | 0,88 | 40 | 20 |

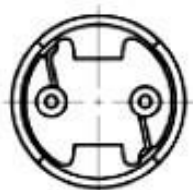
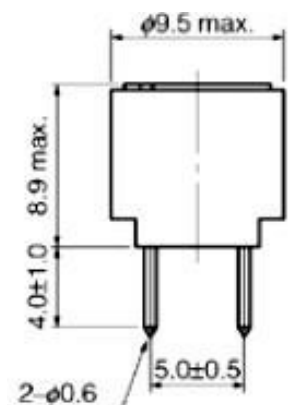
Технические данные двигателей серии 2П

| Тип двигателя | Мощность на валу $P_{\text{ном}}$, кВт | Напряжение питания $U_{\text{ном}}$, В | Частота вращения $n_{\text{ном}}$, мин ⁻¹ | Коэффициент полезного действия $\eta_{\text{ном}}$, % | Сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$, Ом | Сопротивление добавочных полюсов $R_{\text{д.п.}}$, Ом | Индуктивность цепи якоря $L_{\text{я}}$, мГн | Момент инерции $J_{\text{дв}} \cdot 10^{-4}$, кг·м ² |
|---------------------|--|--|--|---|--|---|--|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | 6 | 7 | 8 |
| 2ПН9 0МУХ Л4 | 0,25 | 110 | 1060 | 56,0 | 3,99 | 2,55 | 78,7 | 40 |
| | 0,37 | | 1500 | 61,5 | 2,52 | 1,47 | 48,0 | |
| 2ПН9 0ЛУХ Л4 | 0,20 | 220 | 800 | 54,5 | 17,5 | 13,13 | 430,0 | 50 |
| | 0,34 | 110 | 1060 | 60,0 | 2,85 | 1,73 | 64,5 | |
| | | 220 | 1000 | | 12,20 | 7,96 | 264,0 | |
| | 0,55 | 110 | 1500 | 67,5 | 1,30 | 0,93 | 33,0 | |
| | | 220 | | | 5,44 | 3,89 | 132,0 | |
| 0,90 | 110 | 2000 | 73,0 | 0,65 | 0,40 | 14,6 | | |
| 2ПБ90 МУХ Л4 | 0,18 | 110 | 1000 | 54,5 | 5,41 | 3,47 | 122,0 | 40 |
| | | 220 | | 55,5 | 21,77 | 13,31 | 490,0 | |
| | 0,28 | 220 | 1500 | 63,5 | 11,70 | 7,35 | 267,0 | |
| 0,40 | 110 | 2360 | 69,5 | 1,46 | 0,87 | 34,0 | | |
| 2ПБ90 ЛУХЛ 4 | 0,25 | 110 | 1000 | 58,5 | 4,01 | 2,30 | 96,0 | 50 |
| | 0,37 | 110 | 1500 | 66,0 | 2,10 | 1,30 | 54,0 | |
| | | 220 | | 67,5 | 7,74 | 5,17 | 199,0 | |
| 0,75 | 110 | 3000 | 78,5 | 0,64 | 0,40 | 17,0 | | |
| 2ПН1 00МУ ХЛ4 | 0,5 | 110 | 1000 | 65,0 | 1,79 | 0,93 | 53,0 | 110 |
| | | 220 | | 66,0 | 7,05 | 4,62 | 222,0 | |
| | 0,75 | 110 | 1500 | 71,0 | 0,81 | 0,57 | 26,0 | |
| | | 220 | | 71,5 | 3,40 | 2,05 | 104,0 | |
| | 2,0 | 110 | 3000 | 78,5 | 0,21 | 0,14 | 6,6 | |
| | | 220 | | 79,0 | 0,81 | 0,57 | 26,0 | |

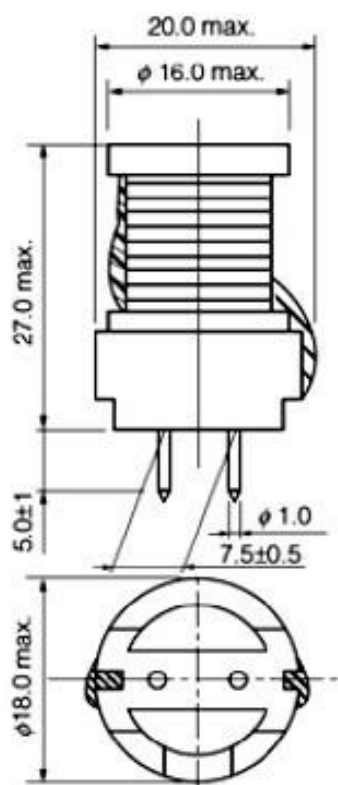
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | 6 | 7 | 8 |
|---------------------|------|------|------|------|-------|------|-------|-----|
| 2ПН1 00ЛУ ХЛ4 | 0,42 | 220 | 750 | 61,5 | 7,87 | 6,20 | 286,0 | 120 |
| | 1,1 | | 1500 | 74,0 | 2,20 | 1,57 | 83,0 | |
| 2ПБ10 0МУХ Л4 | 0,26 | 220 | 800 | 60,6 | 12,76 | 8,35 | 461,0 | 110 |
| | 0,6 | 110 | 1500 | 72,0 | 1,08 | 0,66 | 40,0 | |
| 2ПН1 12МУ ХЛ4 | 0,6 | 220 | 800 | 60,5 | 5,07 | 4,50 | 58,0 | 150 |
| | 1,5 | 110 | 1500 | 70,0 | 0,42 | 0,36 | 4,8 | |
| 220 | | 1,77 | | | 1,55 | 19,5 | | |
| 2ПБ11 2МУХ Л4 | 0,34 | 110 | 800 | 60,5 | 1,91 | 1,65 | 26,0 | 150 |
| | 0,75 | 220 | 1500 | 71,0 | 2,48 | 2,13 | 31,0 | |
| 2ПБ11 2ЛУХ Л4 | 0,5 | 220 | 800 | 65,5 | 4,74 | 3,79 | 74,0 | 180 |
| | 1,0 | | 1500 | 75,0 | 1,66 | 1,45 | 26,0 | |
| 2ПН1 32МУ ХЛ4 | 2,5 | 220 | 1000 | 73,5 | 1,08 | 0,76 | 22,9 | 380 |
| | 4,0 | | 1500 | 79,0 | 0,56 | 0,34 | 11,0 | |
| 2ПН1 32ЛУ ХЛ4 | 3,0 | 220 | 1000 | 75,5 | 0,88 | 0,64 | 18,1 | 480 |
| | 5,5 | | 1500 | 80,0 | 0,32 | 0,27 | 7,0 | |
| 2ПБ13 2МУХ Л4 | 1,1 | 110 | 750 | 64,0 | 0,56 | 0,34 | 13,0 | 380 |
| | 1,6 | 220 | 1000 | 70,5 | 1,38 | 1,00 | 32,0 | |
| | 2,4 | | 1600 | 77,0 | 0,74 | 0,49 | 16,7 | |
| | 3,7 | 110 | 2200 | 79,5 | 0,10 | 0,06 | 2,4 | |
| 2ПБ13 2ЛУХ Л4 | 1,3 | 220 | 800 | 72,0 | 1,98 | 1,38 | 43,0 | 480 |
| | 5,3 | | 3000 | 85,5 | 0,17 | 0,12 | 4,0 | |
| 2ПО1 32МУ ХЛ4 | 1,8 | 110 | 1000 | 70,0 | 0,35 | 0,22 | 7,9 | 380 |
| | | 220 | | 64,5 | 1,38 | 1,00 | 32,0 | |
| | 2,8 | 110 | 1500 | 75,5 | 0,14 | 0,09 | 4,2 | |
| | | 220 | | 76,5 | 0,60 | 0,45 | 15,0 | |
| 2ПБ16 0МУХ Л4 | 2,5 | 110 | 1000 | 80,5 | 0,14 | 0,10 | 4,6 | 830 |
| | | 220 | | 80,0 | 0,59 | 0,43 | 18,0 | |

Технические характеристики дросселей

| Наименование | Индуктивность, мГн | Точность, % | Тестовая частота, кГц | Сопротивление пост. току, Ом | Пост. ток, А |
|--------------|--------------------|-------------|-----------------------|------------------------------|--------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| ELC09D3R3F | 3,3 | 20 | 10 | 0,015 | 3,2 |
| ELC09D4R7F | 4,7 | | | 0,018 | 3,0 |
| ELC09D8R2F | 8,2 | 10 | | 0,024 | 2,6 |
| ELC09D330F | 33 | | | 0,081 | 1,4 |
| ELC09D470F | 47 | | | 0,11 | 1,2 |
| ELC18B101L | 100 | | | 0,057 | 3,2 |
| ELC09D151F | 150 | 10 | 10 | 0,32 | 0,74 |
| ELC09D221F | 220 | | | 0,41 | 0,59 |
| ELC09D471F | 470 | | | 0,98 | 0,39 |
| ELC09D681F | 680 | | | 1,4 | 0,34 |



ELC09

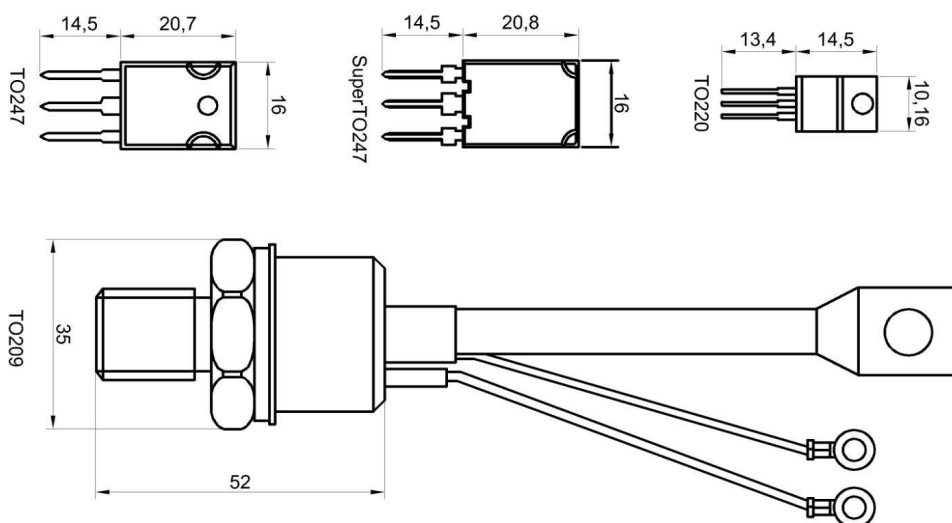


ELC18B

Типы корпусов дросселей

Технические характеристики силовых тиристоров

| Наименование | Максимальное напряжение в закрытом состоянии, В | Средний ток в открытом состоянии, А | Тип корпуса |
|--------------|---|-------------------------------------|-------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 110RKI40 | 400 | 110 | TO209AC |
| 180RKI40 | 400 | 080 | TO209AB |
| 10TTS08 | 800 | 6.5 | TO220AB |
| 12TTS08 | 800 | 8 | TO220AB |
| 16TTS08 | 800 | 10 | TO220AB |
| 30TPS08 | 800 | 20 | TO247AC |
| 40TPS08 | 800 | 35 | TO247AC |
| 80RIA80 | 800 | 80 | TO209AC |
| 110RKI120 | 1200 | 110 | TO209AC |
| 16TTS12FP | 1200 | 10 | TO209AB |
| 16TTS12 | 1200 | 16 | TO209AB |
| 25TTS12FP | 1200 | 16 | TO220FP |
| 25TTS12 | 1200 | 16 | TO220 |
| 25TTS12S | 1200 | 16 | D2PAK |
| 30TTS12 | 1200 | 20 | TO247AC |
| 40TTS12 | 1200 | 35 | TO247AC |
| 70TTS12 | 1200 | 70 | Super TO247 |
| 110RKI120 | 1200 | 110 | TO209AC |
| 40TPS16 | 1600 | 35 | TO209AC |
| 70TPS16 | 1600 | 70 | Super TO247 |



Типы корпусов тиристоров

Таблица П.5

Технические характеристики тахогенераторов постоянного тока

| Типоразмер | C_u , мВ/(об/мин) | $R_{нг}$, 10^3 Ом | n , об/мин | Класс точности | Масса, кг |
|------------|------------------------|-------------------------|--------------|-------------------|--------------|
| 1,6ТПП-2 | 2,5 | 10 | 3000 | 0,5 | 0,025 |
| 2,5ТПП-4 | 4,0 | 6 | 3000 | 1,0 | 0,09 |
| ТПП-5 | 4,0 | 10 | 6000 | 0,2 | 0,09 |
| ТП20-6-0,5 | 6,0 | 10 | 3000 | 0,5 | 0,05 |
| ТП20-4-0,2 | 4,0 | 10 | 6000 | 0,2 | 0,05 |
| ТП20-4-1 | 4,0 | 6 | 3000 | 1,0 | 0,05 |

Таблица П.6

Номинальные сопротивления по ряду E192

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 100 | 127 | 162 | 205 | 261 | 316 | 402 | 511 | 649 | 825 |
| 101 | 129 | 164 | 208 | 264 | 320 | 407 | 517 | 657 | 835 |
| 102 | 130 | 165 | 210 | 267 | 324 | 412 | 523 | 665 | 845 |
| 104 | 132 | 167 | 213 | 271 | 328 | 417 | 530 | 673 | 856 |
| 105 | 133 | 169 | 215 | 274 | 332 | 422 | 536 | 681 | 866 |
| 106 | 135 | 172 | 218 | 277 | 336 | 427 | 542 | 690 | 876 |
| 107 | 137 | 174 | 221 | 280 | 340 | 432 | 549 | 698 | 887 |
| 109 | 138 | 176 | 223 | 284 | 344 | 437 | 556 | 706 | 898 |
| 110 | 140 | 178 | 226 | 287 | 348 | 442 | 562 | 715 | 909 |
| 111 | 142 | 180 | 229 | 291 | 352 | 448 | 569 | 723 | 920 |
| 113 | 143 | 182 | 232 | 294 | 357 | 453 | 576 | 732 | 931 |
| 114 | 145 | 184 | 234 | 298 | 361 | 459 | 583 | 741 | 942 |
| 115 | 147 | 187 | 237 | 301 | 365 | 464 | 590 | 750 | 953 |
| 117 | 149 | 189 | 240 | 305 | 370 | 470 | 597 | 759 | 965 |
| 118 | 150 | 191 | 243 | 309 | 374 | 475 | 604 | 768 | 976 |
| 120 | 152 | 193 | 246 | 312 | 379 | 481 | 612 | 777 | 988 |
| 121 | 154 | 196 | 249 | 316 | 383 | 487 | 619 | 787 | |
| 123 | 156 | 198 | 252 | 320 | 388 | 493 | 626 | 796 | |
| 124 | 158 | 200 | 255 | 324 | 392 | 499 | 634 | 806 | |
| 126 | 160 | 203 | 258 | 328 | 397 | 505 | 642 | 816 | |

Номинальные сопротивления должны соответствовать числам, указанным в П.5 или числам, полученным их умножением или делением на 10^n , где n – целое положительное или отрицательное число.

Таблица П.7

Технические данные конденсаторов Panasonic NHG на напряжение 50 В

| Емкость, мкФ | Размеры | | Рабочая температура, °С |
|--------------|-------------|-----------|-------------------------|
| | Диаметр, мм | Длина, мм | |
| 0,1 | 5 | 11 | -55 ÷ +105 |
| 0,22 | 5 | 11 | -55 ÷ +105 |
| 0,33 | 5 | 11 | -55 ÷ +105 |
| 0,47 | 5 | 11 | -55 ÷ +105 |
| 1,0 | 5 | 11 | -55 ÷ +105 |
| 2,2 | 5 | 11 | -55 ÷ +105 |
| 3,3 | 5 | 11 | -55 ÷ +105 |
| 4,7 | 5 | 11 | -55 ÷ +105 |
| 10 | 5 | 11 | -55 ÷ +105 |
| 22 | 5 | 11 | -55 ÷ +105 |
| 33 | 5 | 11 | -55 ÷ +105 |
| 47 | 6,3 | 11,2 | -55 ÷ +105 |
| 100 | 8 | 11,5 | -55 ÷ +105 |
| 220 | 10 | 12,5 | -55 ÷ +105 |
| 330 | 10 | 16 | -55 ÷ +105 |
| 470 | 10 | 20 | -55 ÷ +105 |
| 1000 | 12,5 | 25 | -55 ÷ +105 |
| 2200 | 16 | 31,5 | -55 ÷ +105 |
| 3300 | 18 | 35,5 | -55 ÷ +105 |

Таблица П.8

Технические данные вращающихся трансформаторов

| Типоразмер | Напряжение возбуждения $U_{п}$, В | Частота тока возбуждения, Гц | Коэффициент трансформации | Частота вращения, об/мин |
|---------------|------------------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 4МВТ-1 | 30 | 400 | 0,6 | – |
| 5МВТ-2-10Э-01 | 30 | 400 | 1,0 | 60 |
| 10МВТ-2В-5П | 28 | 400 | 0,56 | 60 |
| 10МВТ-2В-10П | 28 | 400 | 1,0 | 60 |
| 5МВТ-2-5Э-0Д | 30 | 400 | 0,56 | 60 |
| ВТ-60 | 12 | 2000 | 0,16 | 5000 |
| ВТМ-4А | 60 | 400 | 1,0 | 2000 |
| ВТМ-5А | 5,4 | 400 | 1,0 | 3000 |
| ВТМ-6М | 60 | 2000 | 1,0 | 3000 |

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----------|
| Введение | 3 |
| 1.Задание на курсовой проект..... | 5 |
| 2.Организация работы над курсовым проектом..... | 7 |
| 3. Выбор и расчет элементов электропривода..... | 8 |
| 3.1. Двигатель постоянного тока с якорным управлением..... | 8 |
| 3.2. Тиристорный преобразователь..... | 16 |
| 3.3. Тахогенератор..... | 24 |
| 3.4. Вращающийся трансформатор..... | 28 |
| 3.5. Операционные усилители..... | 31 |
| 4. Требования к оформлению отчета по курсовому проекта..... | 37 |
| 5. Защита курсового проекта..... | 39 |
| Приложения..... | 41 |

Учебное издание

ВЫБОР И РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Учебно-методическое пособие

Составители: **Козелков Олег Владимирович**,
Малев Николай Анатольевич,
Мухаметшин Азат Ильдусович.

Кафедра приборостроения и мехатроники КГЭУ

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

Подписано в печать 19.12.2024.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,86. Уч.изд л. 0,79.
Заказ № 544/эл.

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