

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИШЭ

_____ А.С. Матвеев
«__» _____ 2021 г.

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Практикум по курсу «Мехатронные системы летательных аппаратов»
для студентов IV курса, обучающихся по направлению
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Составитель Н.Ю. Сипайлова

Томский политехнический университет
2021

Мехатронные системы летательных аппаратов: практикум по курсу «Мехатронные системы летательных аппаратов» для студентов IV курса, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» / сост. Н.Ю. Сипайлова; Томский политехнический университет. – Томск: Томский политехнический университет, 2021. – 77 с.

Руководитель ОЭЭ _____ *А.С. Ивашутенко*

Руководитель ООП _____ *П.В. Тютева*

Рецензент

Доктор технических наук, профессор ОЭЭ ИШЭ
А.Г. Гарганеев

© Составление. ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2021
© Сипайлова Н.Ю., составление, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ.....	5
2. КЛАССИФИКАЦИЯ СТАТИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ	8
3. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА	10
4. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ	13
5. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	16
6. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ТАХОГЕНЕРАТОРА	19
7. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВОРОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	24
8. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЛЬСИНА.....	27
9. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ	30
10. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ	32
11. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК НЕУПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ	34
12. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ	39
13. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ИНВЕРТОРА	44
14. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИВодОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ..	50
15. АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К ЭЛЕКТРОПРИВОДАМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, И ПУТИ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ	56
16. АНАЛИЗ СХЕМ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА	71
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	74
ПРИЛОЖЕНИЕ I.....	76

ПРЕДИСЛОВИЕ

Решение задач и выполнение заданий по курсу «Мехатронные системы летательных аппаратов» способствует повышению качества усвоения теоретического материала, более глубокому пониманию параметров элементов и режимов работы мехатронных систем.

Приобретение навыков в расчетах элементов мехатронных систем позволяет студентам подготовиться к их проектированию.

Актуальность практикума обусловлена надобностью обеспечения практических занятий и необходимостью акцентировать внимание на формировании практических навыков и умений при обучении студентов.

Настоящий практикум предназначен как для аудиторных занятий, так и для организации самостоятельной работы студентов.

Практикум включает задачи и задания по темам, предусмотренным рабочей программой дисциплины, а также необходимые методические рекомендации.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Задание № 1.1

1. Ознакомиться с назначением, функциями и параметрами электромеханических преобразователей мехатронных систем.
2. Выявить классификационные основания.
3. Составить классификационные схемы электромеханических преобразователей мехатронных систем по различным основаниям.

Методические рекомендации

Для выполнения задания используйте многообразные информационные источники и приведенные ниже примеры, представляющие различные классификации электромеханических преобразователей.

Пример № 1.1

Классификация электрических машин

По назначению электрические машины разделяются на генераторы, двигатели и преобразователи. Электрический генератор преобразует механическую энергию приводного двигателя в электрическую энергию. Электрический двигатель, наоборот, преобразует подводимую к нему электрическую энергию в механическую энергию вала. Электромашинный преобразователь преобразует электрическую энергию одного вида в электрическую энергию другого вида, изменяя род тока, величину напряжения, частоту, число фаз. Примером преобразователя может служить трансформатор.

По роду тока различают электрические машины постоянного, переменного тока и универсальные. Машины переменного тока по принципу работы разделяются на синхронные и асинхронные. Машины переменного тока по числу фаз могут быть одно-, двух- и трехфазные.

Машины постоянного тока относятся к коллекторным машинам, машины переменного тока к бесколлекторным машинам, за исключением специального типа машин.

По мощности условно можно выделить следующие группы электрических машин:

- микромашины имеют мощность до 0,5 кВт;
- машины малой мощности – от 0,5 кВт до 10 кВт;
- машины средней мощности – от 10 кВт до 100 кВт;
- крупные машины имеют мощность свыше 100 кВт.

По применению различаются электромашины общепромышленного и специального применения.

Пример № 1.2
Классификация электродвигателей малой мощности общего применения [8]

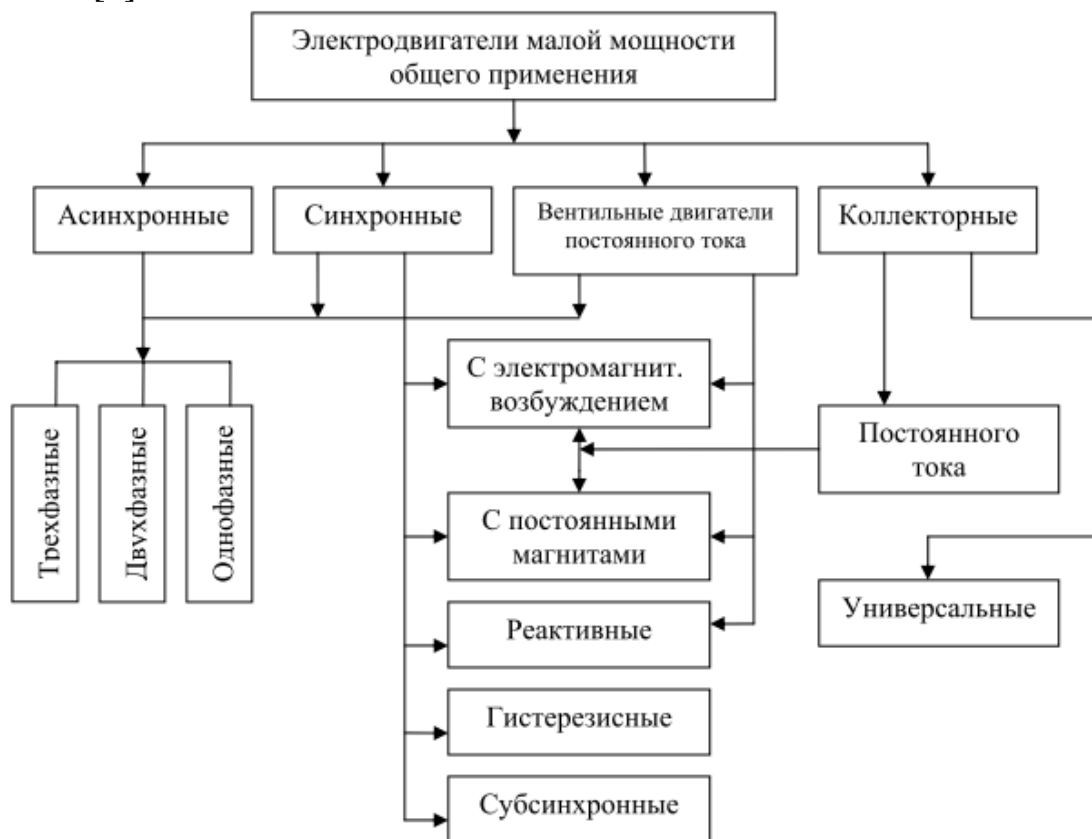


Рисунок 1.1. Классификация электродвигателей малой мощности общего применения

Пример № 1.3

Классификация электромашинных устройств автоматики

По назначению, которые выполняют электрические машины в схемах автоматики, телемеханики и вычислительной техники, можно выделить следующие группы:

- силовые двигатели автоматики;
- исполнительные или управляемые двигатели;
- информационные электромашинные устройства (тахогенераторы, вращающиеся трансформаторы, сельсины в трансформаторном режиме);
- электромашинные преобразователи;
- электромашинные усилители;
- электромашинные устройства гироскопических систем и т.д.

Известно, что системы автоматики могут осуществляться как разомкнутыми, так и замкнутыми. Последние представляют собой наиболее

распространенный вид систем. В них чаще всего используется принцип работы по отклонению, заключающийся в том, что регулируемая величина (например, частота вращения двигателя) сравнивается измерительным устройством с заданным значением и при отклонении от него система вырабатывает сигнал управления, который, после усиления поступает к исполнительному устройству (в данном случае – двигателю), возвращая регулируемую величину к заданному значению. Примером использования электромашинных элементов в разомкнутых системах могут служить шаговые двигатели, угол поворота которых строго пропорционален числу управляющих импульсов поданных в его обмотки.

В замкнутых системах электромашинные элементы находят применение в качестве любого из трех составляющих систему устройств: измерительного (тахогенераторы, сельсины, вращающиеся трансформаторы), усилительного (электромашинные усилители различных типов) и исполнительного (генераторы в источниках электроэнергии, двигатели различных типов в системах регулирования частоты вращения или угла поворота).

2. КЛАССИФИКАЦИЯ СТАТИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Задание № 2.1

1. Ознакомиться с назначением, функциями и параметрами полупроводниковых преобразователей мехатронных систем.
2. Выявить классификационные основания.
3. Составить классификационные схемы полупроводниковых преобразователей мехатронных систем по различным основаниям.

Методические рекомендации

Для выполнения задания используйте многообразные информационные источники и приведенные ниже примеры, представляющие различные классификации полупроводниковых преобразователей.

Пример № 2.1

Классификация полупроводниковых преобразователей

Устройство, предназначенное для преобразования энергии источника переменного тока в постоянный ток называется выпрямителем.

По числу фаз источника питания переменного напряжения различают выпрямители однофазные, трёхфазные и многофазные. По способу подключения вентилей ко вторичной обмотке трансформатора – нулевые схемы, с использованием нулевой (средней) точки вторичной обмотки трансформатора и мостовые схемы, в которых нулевая точка изолирована или вторичные обмотки трансформатора соединены в треугольник.

Выделяют выпрямители низкого (до 250 В), среднего (до 1000 В) и высокого (свыше 1000 В) напряжения.

Различают выпрямители маломощные (единицы кВт), средней мощности (десятки кВт) и большой мощности (более 100 кВт). Маломощные выпрямители, как правило однофазные, используют в системах управления, для питания отдельных узлов электронной аппаратуры, в измерительной технике и др. Выпрямители средней и большой мощности служат источниками питания установок.

Независимо от мощности выпрямителя все схемы делятся на одноконтурные (схемы, у которых ток протекает по вторичным обмоткам трансформатора один раз за период) или однополупериодные и двухконтурные (двухполупериодные). Все нулевые схемы являются одноконтурными.

Схемы выпрямления делятся на простые и сложные. К простым схемам относятся однофазные и трехфазные, нулевые и мостовые схе-

мы. В сложных (или составных схемах) несколько простых схем соединяются последовательно или параллельно.

Различают работу выпрямителя на активную, активно-индуктивную нагрузку, активную нагрузку и емкостный фильтр, на противо-ЭДС.

По способу управления различают неуправляемые и управляемые выпрямители.

3. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Задача № 3.1

Исполнительный микродвигатель постоянного тока с магнитоэлектрическим возбуждением и полым ротором имеет данные, приведенные в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Параметры двигателя постоянного тока

Вариант	Номинальное напряжение управления $U_{\text{ун}} = 27 \text{ В}$					
	$n_{\text{н}}$, об/мин	$M_{\text{н}}$, Нм	$I_{\text{ун}}$, А	$M_{\text{п}}$, Нм	$T_{\text{м}}$, сек	$T_{\text{э}}$, сек
1	9000	0,002	0,14	0,013	0,015	0,0030
2	6000	0,0025	0,12	0,01	0,018	0,0030
3	4500	0,0025	0,095	0,0075	0,020	0,0020
4	9000	0,005	0,29	0,036	0,016	0,0025
5	6000	0,005	0,20	0,022	0,019	0,0030
6	4500	0,005	0,16	0,017	0,020	0,0020
7	2500	0,005	0,11	0,0207	0,020	0,0020
8	9000	0,01	0,53	0,072	0,015	0,0025
9	6000	0,01	0,36	0,067	0,018	0,0030
10	4500	0,01	0,26	0,075	0,020	0,0020
11	2500	0,01	0,16	0,042	0,020	0,0020
12	9000	0,02	1,00	0,14	0,015	0,0025
13	6000	0,02	0,72	0,11	0,019	0,0030
14	4500	0,02	0,55	0,147	0,020	0,0025
15	2500	0,02	0,33	0,082	0,020	0,0020
16	6000	0,04	1,35	0,305	0,015	0,0025
17	4500	0,04	1,00	0,30	0,018	0,0030
18	2500	0,04	0,60	0,19	0,020	0,0030

Требуется:

1. Построить механическую характеристику $M=f(\omega)$ при напряжении управления равном половине номинального. Характеристику строить в именованных единицах.
2. Построить в именованных единицах зависимость механической мощности от частоты вращения $P_{\text{мех}}=f(\omega)$ при неизменном напряжении управления, равном половине номинального.
3. Определить коэффициент полезного действия при максимальной механической мощности, развиваемой микродвигателем, в случае, когда напряжение управление равно половине номинального.
4. Построить кривую разгона двигателя $\omega = f(t)$ при напряжении управления, равном половине номинального, и моменте инерции

исполнительного механизма, равном 1,5 момента инерции якоря двигателя ($K_j = 1,5$).

5. Построить кривую изменения тока управления двигателя во времени при разгоне двигателя по пункту 4.

Методические рекомендации

Для решения задачи рекомендуется использовать следующий алгоритм и математический аппарат.

К п.1. Механическая характеристика в именованных единицах

$$M = M_{\Pi} \left(\frac{U_y}{U_{yH}} - \frac{n}{n_o} \right) = M_{\Pi} \left(\frac{U_y}{U_{yH}} - \frac{\omega}{\omega_o} \right),$$

где M и n значения момента в Нм и частоты вращения в об/мин.

Частоту вращения n_o при идеальном холостом ходе определить по формуле

$$n_o = \frac{n_H}{1 - m_H}; m_H = \frac{M_H}{M_{\Pi}}.$$

Угловая частота вращения (рад/с)

$$\omega_o = \frac{2\pi \cdot n_o}{60}; \omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}.$$

К п.2. Полная механическая мощность, развиваемая двигателем

$$P_{\text{мех}} = M \cdot \omega = M_{\Pi} \left(\frac{U_y}{U_{yH}} - \frac{\omega}{\omega_o} \right) \omega = M_{\Pi} (\alpha - \nu) \omega = M_{\Pi} \cdot \omega_o (\alpha - \nu) \nu.$$

К п.3. Коэффициент полезного действия определяется по формулам

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{P_y} = \frac{P_{\text{мех}}}{U_y \cdot I_y},$$

где ток управления

$$\begin{aligned} I_y &= \frac{U_y - E_y}{R_y} = \frac{\alpha U_{yH} - \frac{\omega}{\omega_o} U_{yH}}{\frac{U_{yH}}{I_{yH}} m_H} = I_{yH} \frac{\alpha - \frac{\omega}{\omega_o}}{m_H} = \\ &= I_{yH} \frac{m}{m_H} = I_{yH} \frac{M}{M_H} = I_{yH} \frac{\alpha - \nu}{m_H}. \end{aligned}$$

Максимальная механическая мощность двигателя находится из условий:

$$\frac{dP_{\text{мех}}}{d\omega} = 0 \text{ или } \frac{dP_{\text{мех}}}{d\nu} = 0.$$

Тогда

$$P_{\text{мех max}} = M_{\text{п}} \cdot \omega_o \cdot \alpha^2 / 4,$$

или в относительных единицах $P^*_{\text{мех max}} = \frac{\alpha^2}{4}$.

Тогда коэффициент полезного действия при максимальной механической мощности $\eta_{\text{max}} = \frac{M_{\text{н}} \omega_o}{2U_{\text{ун}} I_{\text{ун}}}$.

К п.п. 4 и 5.

Система уравнений, описывающая поведение двигателя при пуске

$$U_y = R_y i_y + L_y \frac{di_y}{dt} + \frac{U_{\text{ун}}}{\omega_o} \omega \quad (1); \quad \frac{U_{\text{ун}}}{\omega_o} i_y = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

Здесь $\frac{U_{\text{ун}}}{\omega_o} = \psi$ – потокосцепление обмотки якоря, определяемое из условия пренебрежения реакцией якоря, В·с; $L_y = T_{\text{э}} \cdot R_y$ – индуктивность обмотки якоря, Ом·с; $J = J_{\text{мех}} + J_{\text{я}}$; $J_{\text{мех}}$ – момент инерции исполнительного механизма, кг·м²; $J_{\text{я}}$ – момент инерции якоря двигателя, кг·м²; $J_{\text{я}} = \frac{T_{\text{м}} M_{\text{п}}}{\omega_o}$; $T_{\text{м}}$ – постоянная времени протекания механических процессов.

Рассматриваем исполнительный двигатель как апериодическое звено в системах авторегулирования, решение системы уравнений (1) и (2) приобретает вид (при разных и действительных корнях P_1 и P_2):

$$\omega = \alpha \omega_o \left(1 + \frac{P_2}{P_1 - P_2} e^{P_1 t} - \frac{P_1}{P_1 - P_2} e^{P_2 t} \right),$$

$$i_y = \frac{\alpha U_{\text{ун}}}{L_y (P_1 - P_2)} (e^{P_1 t} - e^{P_2 t}), \quad P_{1,2} = -\frac{1}{2T_{\text{э}}} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4T_{\text{э}}}{K_J T_{\text{м}}}} \right),$$

где $\alpha = \frac{U_y}{U_{\text{ун}}}$ – коэффициент сигнала управления.

4. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Задача № 4.1

Для исполнительного асинхронного двигателя в соответствии с данными табл. 4.1 требуется в относительных единицах:

1. Построить механическую (при двух значениях эффективного коэффициента сигнала) и регулировочную характеристики (при двух значениях момента) при амплитудном управлении.
2. Построить зависимости мощности возбуждения, управления и механической мощности от частоты вращения (при заданных значениях эффективного коэффициента сигнала).
3. Для тех же значений эффективного коэффициента сигнала и относительного момента построить механическую и регулировочную характеристики при фазовом управлении.

Таблица 4.1

Параметры асинхронного двигателя

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Коэф. сигнала	1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,75	0,7
	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,25	0,3	0,35
Момент	0	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55
	0,75	0,7	0,65	0,55	0,75	0	0,3	0,25	0
Вариант	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Коэф. сигнала	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45	0,45	0,35	0,3	0,25
	1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6
Момент	0,6	0,65	0,7	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
	0,3	0,25	0	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0

Методические рекомендации

К п.1. Механическая характеристика при амплитудном управлении в относительных единицах

$$v = 2(\alpha_{\text{э}} - m)/(1 + \alpha_{\text{э}}^2),$$

где v и m текущие значения частоты вращения и момента в о.е, $\alpha_{\text{э}}$ – эффективный коэффициент управления.

К п. 2. Мощность возбуждения в относительных единицах

$$p_B = 0,5(1 - \alpha_3 v).$$

Мощность управления в относительных единицах

$$p_y = 0,5\alpha_3(\alpha_3 - v).$$

Механическая мощность в относительных единицах

$$p_{\text{мех}} = mv = \alpha_3 v - 0,5(1 + \alpha_3^2)v^2.$$

К п. 3. Механическая характеристика при фазовом управлении в относительных единицах

$$v = \sin \beta - m.$$

Задача № 4.2

Для исполнительных асинхронных двигателей разных конструкций (табл. 4.2–4.3) в соответствии с вариантом задания (табл. 4.4) требуется:

Построить динамические характеристики разгона при амплитудном (при двух значениях эффективного коэффициента сигнала, см. задачу № 4.1) и фазовом управлении.

В табл. 4.2 представлены параметры асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (серия ДКИ – двигатель с короткозамкнутым ротором исполнительный, двухфазный, четырехполюсный, частота 400 Гц, напряжение питания ОВ – 115 В, напряжение питания ОУ двигателей до 10 Вт – 36 В, свыше 10 Вт – 80 В).

В табл. 4.3 представлены параметры асинхронных двигателей с полым немагнитным ротором (серия ДИД – электродвигатель индукционный двухфазный, частота 400 Гц, напряжение ОВ и ОУ – 36 В).

Таблица 4.2

Параметры асинхронных двигателей серии ДКИ

Номер Двигателя	Мощность, Вт	Пусковой момент, Гсм	Ном. скорость, об/мин	Момент инерции ротора, гсм ²
1	40	540	9000	147
2	1	27	5500	0,6
3	2,5	64	6000	1,8
4	6	120	6750	6,8
5	16	290	8000	19,6
6	25	370	7000	49

Таблица 4.3

Параметры асинхронных двигателей серии ДИД

Номер двигателя	Мощность, Вт	Пусковой момент, Гсм	Ном. скорость, об/мин	Момент инерции ротора, Гсм ²
7	0,1	2,5	12000	0,03
8	0,4	6,9	14000	0,05
9	0,5	9,8	16000	1
10	1	15,7	18000	0,08
11	2	33,3	8000	0,09
12	3	88,2	6000	0,25

Таблица 4.4

Варианты заданий

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номера двигателей	1	2	3	4	5	6	1	2	3
	7	8	9	10	11	12	8	9	10
Вариант	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Номера двигателей	4	5	6	5	1	2	3	4	5
	11	12	7	8	9	10	11	12	9

Методические рекомендации

Для идеализированного двигателя можно считать, что скорость изменяется по экспоненциальному закону:

$$\Omega = \Omega_0(1 - e^{-t/T_M}),$$

где Ω_0 – скорость идеального холостого хода, T_M – механическая постоянная времени, t – текущее время.

При амплитудном управлении

$$\Omega_0 = v_0 \Omega_1 = 2\alpha_3 \Omega_1 / (1 + \alpha_3^2); M_{\Pi} = \alpha_3 M_{\text{кр}}; T_M = 2\Omega_1 J / [M_{\text{кр}}(1 + \alpha_3^2)].$$

При фазовом управлении

$$\Omega_0 = \alpha_3 \Omega_1; M_{\Pi} = \alpha_3 M_{\text{кр}}; T_M = \Omega_1 J / M_{\text{кр}}.$$

Здесь Ω_1 – синхронная скорость, M_{Π} – пусковой момент, $M_{\text{кр}}$ – пусковой момент при круговом поле, J – момент инерции ротора.

5. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Задача № 5.1

Двухполюсный синхронный реактивный двигатель, обмотка статора которого соединена звездой, подключен к сети с частотой $f=400$ Гц.

Требуется:

1. Построить векторную диаграмму токов и напряжений для номинального режима.
2. Определить синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси и угол нагрузки.
3. Построить угловые характеристики без учета и с учетом активного сопротивления обмотки статора.
4. Определить мощность на валу двигателя (без учета потерь в стали и механических).
5. Определить статическую перегрузочную способность двигателя.
6. Определить во сколько раз снижается перегрузочная способность при учете активного сопротивления обмотки статора.

Данные для расчетов и построений приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Параметры синхронных двигателей

Наименование величин	Ед. изм.	Варианты									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Напряжение в сети, U_H (Л)	В	200	200	220	36	36	220	220	200	36	220
2. Потребляемый ток, I_H	А	2	4,6	2,2	0,8	2,5	2,3	3,6	2,9	0,75	3,1
3. Коэффициент мощности, $\cos\varphi_H$	о.е	0,45	0,5	0,47	0,53	0,46	0,42	0,41	0,45	0,40	0,46
4. Активное сопротивление фазы обмотки статора, r	Ом	6,5	4,6	6,1	4,0	1,07	10,0	5,5	4,3	3,5	7,1
5. Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси, X_q	Ом	60	36,3	30,2	13,5	4,55	34,6	21,6	41,2	16,2	24,2

Методические рекомендации

К п.1. Для построения векторной диаграммы необходимо выбрать масштабы напряжения и тока. Направление оси q (см. рис. 5.1) определяется следующим образом. Из конца вектора I_r опускается перпендикуляр к вектору тока I . На нем откладывается отрезок $av = IX_q$. Через точки 0 и v проводят прямую, которая является осью q . Дальнейшее построение ясно из рис. 5.1.

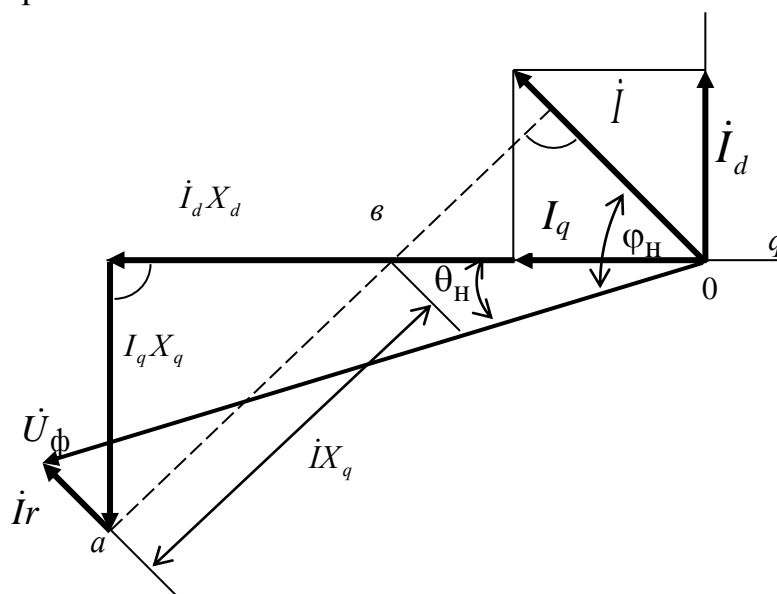


Рисунок 5.1. Векторная диаграмма токов и напряжений синхронного реактивного двигателя

К п.2. Возможен и другой способ построения диаграммы, когда по известным $r, X_q, U_H, I_H, \varphi_H$ определяют угол нагрузки θ_H

$$\operatorname{tg} \theta_H = \frac{I_H (X_q \cos \varphi_H - r \sin \varphi_H)}{U_{H\phi} - I_H (X_q \sin \varphi + r \cos \varphi_H)}.$$

Из векторной диаграммы следует, что

$$X_d = \frac{I_d X_d}{I_d} = \frac{U_{H\phi} \cos \theta_H - I_H r \cos(\varphi_H - \theta_H)}{I_H \sin(\varphi_H - \theta_H)}, \text{ Ом.}$$

К п.3. Угловые характеристики строятся по выражению $M =$

$$= \frac{p U_{H\phi}^2}{2\pi f} \frac{X_d - X_q}{(r^2 + X_d X_q)^2} \left[\sqrt{(r^2 + X_d^2)(r^2 + X_q^2)} \sin(2\theta + \varepsilon_2) - r(X_d - X_q) \right], \text{ Нм,}$$

где $\operatorname{tg}\varepsilon_2 = \frac{r(X_d + X_q)}{X_d X_q - r^2}$.

К п.5. Перегрузочная способность двигателя определяется как:

$$K = \frac{M_{m(r)}}{M_H},$$

где $M_{m(r)}$ – максимальный момент, развиваемый двигателем (с учетом r), M_H – номинальный момент, соответствующий углу нагрузки θ_H .

6. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ТАХОГЕНЕРАТОРА

Задача № 6.1

Для интегрирующего асинхронного тахогенератора с обмотками, расположенными на внутреннем магнитопроводе, и данными, представленными в табл. 6.1, выполнить следующие задания.

1. Рассчитать величины относительных параметров.
2. Рассчитать амплитудную и фазовую погрешности по скорости, температуре и частоте.
3. Исследовать влияние материала ротора на температурные погрешности, заменив исходный материал ротора на константан и манганин.
4. Построить зависимость амплитудной погрешности по скорости в диапазоне 0,2–0,7 относительной скорости.
5. Построить схемы генераторной обмотки и обмотки возбуждения.
6. Рассчитать коэффициент трансформации, используя данные по обеспечиваемой крутизне выходной характеристики.
7. Построить выходную характеристику для режима холостого хода.
8. Построить выходную характеристик для режима нагрузки (не менее 2-х значений).
9. По характеристикам определить величину амплитудной погрешности.

Частота сети для всех вариантов $f=400$ Гц, исходный материал ротора – спецманганин с удельным сопротивлением 0,000032 Омсм.

Примечания.

1. Не учитывать потери в стали (активное сопротивление намагничивающего контура).
2. Выражение для выходной характеристики в режиме холостого хода получить из общего выражения выходной характеристики, положив сопротивление нагрузки равным бесконечно большой величине.

Таблица 6.1

Параметры тахогенераторов

№ вари- анта	Напряжение возбуждения, В	Входное сопро- тивление, Ом	Синхронная скорость, об/мин	Максимальная скорость, об/мин	Индуктивное сопротивление намагничивающего контура, Ом	Сопротивление обмотки возбуждения, Ом
1	40	77	12000	6000	55	15
2	115	1900	12000	9000	1357	366
3	115	960	12000	4000	686	185
4	115	1150	12000	5000	821	222
5	110	370	12000	6000	264	71
6	127	900	3000	2400	643	174
7	110	550	12000	4000	393	188
8	110	315	12000	4000	225	61
9	110	440	12000	4000	314	85
10	220	900	8000	6000	642	173

Продолжение табл. 6.1

№ варианта	Активное сопротивление ротора, Ом	Сопротивление рассеяния обмотки возбуждения, Ом	Сопротивление нагрузки (не менее), Ом	Крутизна ЭДС е, мВ/(об/мин)	Изменение температуры, град	Изменение частоты питающей сети, %
1	462	19	1200	1	60	3
2	11399	475	1200	1,2	10	3
3	5762	240	50000	3	20	3
4	6896	287	2000	1	40	5
5	2218	92	2000	10	5	6
6	5401	225	2000	8	15	7
7	3301	141	2000	4	45	10
8	1890	79	1200	5,5	20	5
9	2638	110		5,3	30	5
10	5392	225		5	8	10

Методические рекомендации

Для выполнения заданий используйте следующие формулы.

К п.1. Величины относительных параметров

$$\psi = r_B / x_{mB}; \quad \xi = x_{BS} / x_{mB}; \quad \beta = r / x_{mB},$$

где r_B – сопротивление обмотки возбуждения; x_{BS} – индуктивность рассеяния обмотки возбуждения; x_{mB} – индуктивное сопротивление намагничивающего контура; r – активное сопротивление ротора.

К п.2. Величины погрешностей

по скорости:

$$\text{амплитудная } \varepsilon_{vm} = 25b_1 v^2, \% \text{ и фазовая } \varphi_{vm} = 0,6 \frac{b_2}{b_1} \varepsilon_{vm};$$

по температуре:

$$\text{амплитудная } \varepsilon_t \% = -\frac{\psi^2 + \psi/\beta}{(1+\xi)^2 + \psi^2} \alpha_1 \Delta t^0 100 \quad \text{и} \quad \text{фазовая}$$

$$\Delta\varphi_t = 57,3 \frac{(1+\xi)\psi}{(1+\xi)^2 + \psi^2} \alpha_1 \Delta t^0;$$

по частоте:

$$\text{амплитудная } \varepsilon_f \% = -\frac{\psi}{(1+\xi)^2 + \psi^2} \frac{\Delta f}{f} 100 \quad \text{и} \quad \text{фазовая}$$

$$\Delta\varphi_f = -57,3 \frac{(1+\xi)\psi}{(1+\xi)^2 + \psi^2} \frac{\Delta f}{f}.$$

$$\text{В этих выражениях } b_1 = \frac{\xi(1+\xi) + \psi^2}{((1+\xi)^2 + \psi^2)\beta^2} \text{ и } b_2 = -\frac{\psi}{((1+\xi)^2 + \psi^2)\beta^2};$$

α_1 – температурный коэффициент сопротивления обмотки возбуждения; Δt^0 и Δf соответственно диапазон изменения температуры и частоты.

К п.6. Коэффициент трансформации

$$k = \frac{6fe}{100Up|a|}, \quad |a| = \frac{1}{\sqrt{(\operatorname{Re} \frac{1}{a})^2 + (\operatorname{Im} \frac{1}{a})^2}},$$

$$\operatorname{Re} \frac{1}{a} = (1+\xi)\beta + 2\psi, \quad \operatorname{Im} \frac{1}{a} = 1 + 2\xi - \psi\beta$$

К п.7. Выходное напряжение

$$U_{\text{ВЫХ}} = - \frac{jU_{\text{В}} \cdot k \cdot v}{A - B \cdot v^2}$$

Здесь комплексы A и B рассчитываются по следующим формулам

$$A = \frac{k^2}{Z_{\text{H}}} \left(\frac{Z_1^2 C}{r} + 2Z_1 C + r \right) + \frac{Z_1 C^2}{r} + C;$$

$$C = (Z_{m\text{В}} + r) / Z_{m\text{В}}; \quad Z_{m\text{В}} = r_{m\text{В}} + jx_{m\text{В}}; \quad Z_1 = r_{\text{В}} + jx_{\text{В}};$$

$$B = \frac{Z_1}{r} \left(\frac{k^2 \cdot Z_1}{Z_{\text{H}}} + 1 \right).$$

7. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВОРОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Задача № 7.1

Для одинаковых поворотных трансформаторов, соединенных как показано на рис

. 7.1, необходимо:

1. Определить угол α_2 , на который следует повернуть ротор второго ПТ, чтобы напряжение U_{s2} на зажимах его синусной обмотки было максимальным.
2. Определить угол α_2 , при котором напряжения U_{s2} и U_{c2} на зажимах выходных обмоток одинаковы, определить эти напряжения.
3. Построить графически изменение напряжений на зажимах выходных обмоток второго ПТ за один оборот ротора.

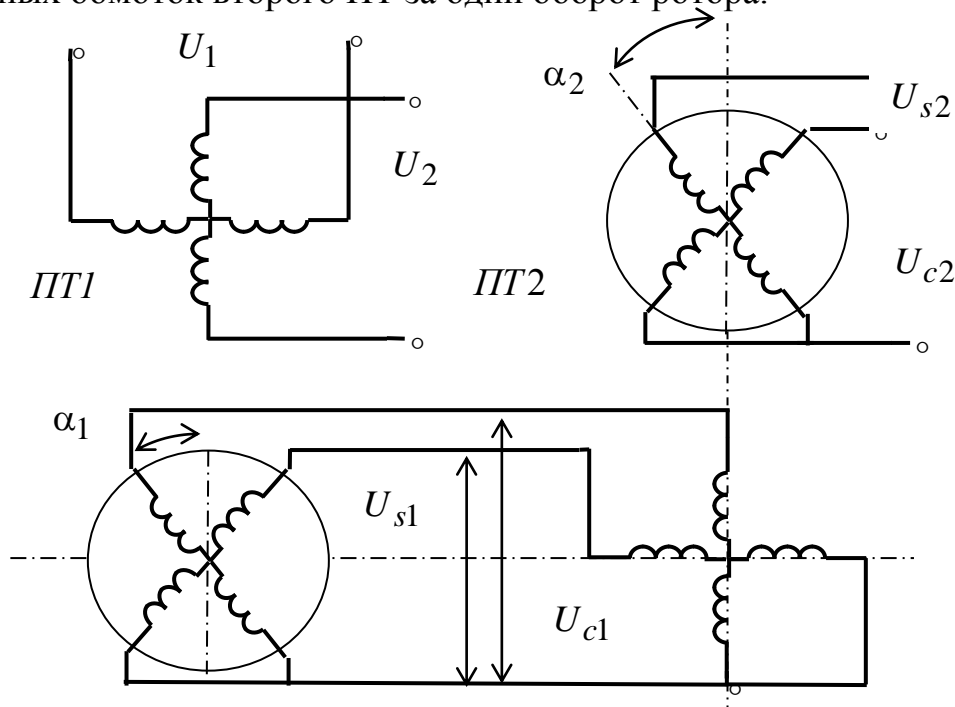


Рисунок 7.1. Схема включения поворотных трансформаторов

Данные для решения задачи приведены в табл. 7.1.

Методические рекомендации

К п.1. Напряжения на зажимах выходных обмоток первого ПТ;

$$U_{s1} = KU_1 \sin \alpha_1 + KU_2 \cos \alpha_1,$$

$$U_{c1} = KU_1 \cos \alpha_1 - KU_2 \sin \alpha_1;$$

второго ПТ

$$U_{s2} = KU_{s1} \sin \alpha_2 + KU_{c1} \cos \alpha_2,$$

$$U_{c2} = KU_{s1} \cos \alpha_2 - KU_{c1} \sin \alpha_2.$$

Когда напряжение $U_{s2} = U_{s2 \max}$, то $U_{c2} = 0$.

Из последнего условия и следует определить угол α_2 .

Таблица 7.1

Параметры поворотных трансформаторов

Наименование величин	Ед. изм.	Варианты									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Напряжение на обмотке возбуждения U_1	В	60	85	90	40	110	30	50	80	35	60
2. Напряжение на квадратурной обмотке U_2	В	100	70	45	60	100	50	80	80	70	30
3. Коэффициент трансформации K	—	0,565	0,8	0,96	0,54	0,102	0,575	0,95	0,565	0,54	0,1
4. Угол поворота ротора первого трансформатора α_1	град.	10	15	20	30	45	60	75	80	35	40

Задача № 7.2

1. Построить синусный трансформатор на базе данных первого трансформатора предыдущего задания (см. задачу № 7.1).

2. Для синусного трансформатора построить кривую выходного напряжения в пределах угла поворота ротора от 0 до 90 градусов для режимов холостого хода и нагрузки при двух значениях комплексного коэффициента (0,25 и 1,0).

3. Рассчитать и построить кривую относительной погрешности от угла поворота ротора синусного трансформатора. Определить угол, при котором погрешность достигает максимального значения.

4. Построить линейный трансформатор на базе данных первого трансформатора (вторичное симметрирование) предыдущего задания

(см. задачу № 7.1). Коэффициент трансформации принять в пределах 0,52–0,56.

5. Построить кривую выходного напряжения от угла поворота ротора (в пределах от 0 до 90 градусов) и определить зону линейности характеристики.

8. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЛЬСИНА

Задача № 8.1

В синхронной передаче использованы синхронизирующие датчик и приемник (сельсины). Обмотка индуктора – сосредоточенная катушечная, число полюсов $2p=2$. Обмотка якоря – двухслойная трехфазная, число пазов якоря $z=24$, число проводников в пазу якоря $s=82$, полное сопротивление фазы обмотки якоря $Z=80$ Ом. Частота сети $f=400$ Гц, максимальное значение ЭДС при разомкнутой обмотке якоря $E=43$ В.

Принять момент трения на валу $M_{тр} = 2,5 \cdot 10^{-5}$ Н·м.

Требуется

1. Определить минимальный угол рассогласования в статическом режиме, необходимый для преодоления сопротивления трения на валу приемника (момент сопротивления нагрузки приемника равен 0).

2. Определить угол рассогласования синхронной передачи в режиме вращения при $\omega/\omega_1 = 0,12$, где ω – частота вращения ротора, ω_1 – синхронная частота. Момент сопротивления на валу приемника равен $M_d = 0,6M_m$, где M_m – максимальный момент сельсина.

Методические рекомендации

Общее число проводников

$$N = s \cdot z.$$

Число витков обмотки

$$w = N / 2m,$$

где m – число фаз обмотки якоря.

Магнитный поток по продольной оси

$$\Phi = \frac{E}{4,44 f w k_{об}},$$

где $k_{об} \approx 0,9$ – обмоточный коэффициент.

Наибольшее значение эффективного тока

$$I = E / Z.$$

Наибольшее значение МДС обмотки якоря на два полюса

$$F_m = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} w k_{об} I.$$

Амплитуда составляющей МДС по поперечной оси

$$F_{qm} = 0,75 F_m.$$

Амплитуда синхронизирующего момента

$$M_m = 0,5 \cdot c \cdot F_{qm} \cdot \sin \nu,$$

где конструктивная постоянная $c = pN/60$; $\nu = 45^\circ$ – угол сдвига по фазе между током и напряжением (определяется параметрами обмотки).

Удельный синхронизирующий момент

$$M_{уд} = M_m \sin 1^\circ.$$

Угол рассогласования в статическом режиме

$$\Theta = \arcsin \frac{M_{тр}}{M_{уд}}.$$

Угол рассогласования в динамическом режиме

$$\Theta_d = \arcsin \frac{M_d}{M_m \cos(\omega/\omega_1)}.$$

Задача № 8.2

В синхронной передаче использованы двухполюсные однофазные сельсины. Данные сельсинов приведены в табл. 8.1.

Требуется:

1. Построить зависимость синхронизирующего момента M_c от угла рассогласования θ .
2. Определить статическую ошибку синхронной передачи в режиме поворота (угол рассогласования $\Delta\theta$, необходимый для преодоления момента трения возбужденного сельсина).
3. Определить угол рассогласования синхронной передачи, работающей в режиме вращения при скорости n и моменте M на валу.

Таблица 8.1

Параметры сельсинов

Наименование Величин	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Удельный синхронизирующий момент $M_{уд}$, Гсм/град	4	4,5	10	20	50	6	5	0,3	1,1	3,0
2. Момент трения возбужденного сельсина $M_{тр}$, Г см	7,5	8	14	22	30	8	10	0,5	3,5	8,0
3. Момент на валу сельсина-приемника в режиме непрерывного вращения M , Г см	110	150	275	900	1300	120	180	10	50	80
4. Частота вращения n , об/мин	60	200	300	150	360	120	90	12	60	120
5. Частота сети f , Гц	50	50	50	50	50	400	400	400	500	500

Методические рекомендации

Угол рассогласования синхронной передачи, работающий в режиме вращения, следует определить по эмпирической формуле Эйлера для динамического синхронизирующего момента

$$M_{\text{д}} = M_m \sin \theta \cos \frac{\pi n p}{120 f},$$

где M_m – максимальный статический синхронизирующий момент.

9. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Задача № 9.1

Для шагового микродвигателя с постоянными магнитами на роторе и данными, приведенными в табл. 9.1, требуется:

1. Изобразить алгоритм коммутации обмоток при управлении двигателем.
2. Определить величину шага в электрических и механических градусах.
3. Построить статическую угловую характеристику двигателя.
4. Вычислить предельный пусковой момент, частоту собственных колебаний ротора и номинальную частоту приемистости.
5. Рассчитать и построить механическую характеристику.

Таблица 9.1

Параметры шаговых двигателей

Номер варианта	Число фаз m	Число пар полюсов p	Тип коммутации	Максимальный синхронизирующий момент, Нсм	Номинальный вращающий момент, Нсм	Момент инерции ротора, кг · см ²
1	4	6	Однополярная симметричная	1,6	0,1	0,0025
2	4	6		4	0,4	0,009
3	4	6		10	1	0,02
4	4	6		25	4	0,047
5	4	6		50	6	0,13
6	4	6		100	10	0,33
7	3	4	Разнополярная симметричная	2	0,1	0,0025
8	3	4		4	0,4	0,0065
9	3	4		10	1	0,016
10	3	4		25	4	0,047

Методические рекомендации

Ознакомьтесь с основными параметрами, режимами работы шаговых двигателей и выполните задания, используя приведенные формулы.

К п.2. Величина шага ротора двигателя в электрических градусах

$$\gamma_{шэ} = \frac{360^0}{k_T}$$

Количество тактов схемы управления для шагового двигателя с активным ротором определяется по формуле

$$k_T = m \cdot n_1 \cdot n_2,$$

где $n_1 = 1$ при симметричной и $n_1 = 2$ при несимметричной коммутации; $n_2 = 1$ при однополярной и $n_2 = 2$ при разнополярной коммутации.

Величина шага ротора двигателя в механических градусах

$$\gamma_{\text{ш}} = \frac{360^0}{k_{\text{T}} \cdot p}.$$

К п.3. Уравнение статической угловой характеристики (зависимость синхронизирующего момента от угла рассогласования) определяется выражением

$$M_{\text{с}} = M_{\text{сmax}} \cdot \sin \gamma_{\text{э}}.$$

К п.4. Предельный пусковой момент

$$M_{\text{п}} = M_{\text{сmax}} \cdot \cos \frac{\pi}{k_{\text{T}}}.$$

Частота собственных угловых колебаний (частота, с которой ротор при отсутствии нагрузочного момента колеблется около устойчивого положения равновесия) определяется по формуле

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}; \omega_0 = \sqrt{\frac{M_{\text{сmax}} \cdot p}{J}}.$$

Номинальная частота приемистости (при номинальном вращающем моменте $M_{\text{н}}$)

$$f_{\text{пр}} = 2f_0 \cdot k_{\text{T}} \sqrt{1 - k_{\text{н}}(\pi - k_{\text{н}})/2}; k_{\text{н}} = M_{\text{н}} / M_{\text{сmax}}.$$

10. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Задача № 10.1

Для вентильного двигателя с активным ротором и соответствующей схемой соединения фаз (табл. 10.1) требуется выполнить следующие задания.

1. Изобразить схему обмотки.
2. Определить межкоммутационный интервал.
3. Определить критическое значение угла опережающей коммутации.
4. Построить механические характеристики и характеристики КПД для трех значений угла опережающей коммутации.
5. Построить кривые тока и момента в зависимости от угла поворота ротора для двух значений относительной скорости. Определить пульсации момента.

Таблица 10.1

Параметры вентильного двигателя

Вариант	Тип обмотки	Угол поворота ДПР (опережающая коммутация), β_0	Относительная скорость вращения, ω
1	Трехфазная разомкнутая	0, 20, 40	0, 0,7
2	Трехфазная замкнутая	0, 25, 45	0, 0,7
3	Четырехфазная разомкнутая	0, 10, 35	0, 0,7
4	Пятифазная разомкнутая	0, 30, 60	0, 0,7
5	Пятифазная замкнутая	0, 30, 60	0, 0,7
6	Трехфазная разомкнутая	0, 15, 35	0, 0,6
7	Трехфазная замкнутая	0, 10, 30	0, 0,6
8	Четырехфазная разомкнутая	0, 15, 45	0, 0,75
9	Пятифазная разомкнутая	0, 35, 65	0, 0,75
10	Пятифазная замкнутая	0, 45, 60	0, 0,75

Методические рекомендации

К п.2. Угол между магнитными осями обмоток для разомкнутых (лучевых) обмоток (угол равен величине межкоммутационного интервала θ_k):

при нечетном и четном числе фаз (лучей S) соответственно

$$\alpha_s = \pi / S = \theta_k; \alpha_s = 2\pi / S = \theta_k.$$

Для замкнутых обмоток межкоммутационный интервал θ_k :

при нечетном и четном числе секций S соответственно

$$\theta_k = \pi / S; \quad \theta_k = 2\pi / S.$$

К п.3. Критический угол опережающей коммутации (при таком угле двигатель запуститься не может) рассчитывается как

$$\beta_0 = (\beta_0)_{кр} = \frac{\pi}{2} - \frac{\theta_k}{2}.$$

К п.4. Уравнение усреднённой механической характеристики в относительных единицах выглядит следующим образом

$$\begin{aligned} m_{cp} &= \frac{1}{\theta_k} \int_0^{\theta_k} m d\theta = \\ &= \frac{\sin \frac{\theta_k}{2}}{\frac{\theta_k}{2}} \cos \beta_0 - \frac{1}{2} \omega \left(1 + \frac{\sin \theta_k}{\theta_k} \cos 2\beta_0 \right). \end{aligned}$$

Идеализированный КПД определяется как

$$\eta = \frac{(1 - \omega^*) \omega^*}{f(\theta_k, \beta_0) - \omega^*},$$

где $f(\theta_k, \beta_0) = \frac{1 + \frac{\sin \theta_k}{\theta_k} \cos 2\beta_0}{2 \left(\frac{\sin \theta_k}{\theta_k} \right)^2 \cos^2 \beta_0}$, $\omega^* = \omega / \omega_0$ – относительная частота

вращения.

К п.5. Уравнения для мгновенных значений токов и моментов в безразмерной форме

$$\begin{aligned} i &= 1 - \omega \cos \left(\theta - \frac{\theta_k}{2} - \beta_0 \right); \\ m &= \cos \left(\theta - \frac{\theta_k}{2} - \beta_0 \right) - \omega \cos^2 \left(\theta - \frac{\theta_k}{2} - \beta_0 \right). \end{aligned}$$

11. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК НЕУПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Задача № 11.1

Для неуправляемого выпрямителя (табл. 11.1) требуется выполнить следующие задания:

1. Изобразить схему неуправляемого выпрямителя без фильтра.
2. Определить параметры схемы неуправляемого выпрямителя без фильтра и выбрать по справочнику вентили и трансформатор.
3. Рассчитать и построить внешнюю характеристику.
4. Изобразить схему неуправляемого выпрямителя с емкостным фильтром.
5. Выполнить расчет параметров фильтра по заданному значению коэффициента пульсаций на выходе выпрямителя.
6. Рассчитать и построить внешнюю характеристику неуправляемого выпрямителя с фильтром.

Таблица 11.1

Параметры неуправляемого выпрямителя

Вариант	Напряжение источника питания U_1 , В	Частота источника питания f_1 , Гц	Напряжение нагрузки U_d , В	Мощность, выделяемая в нагрузке, Вт	Коэффициент пульсаций k_{Π}
1	115	400	27	200	0,2
2	115	400	24	430	0,1
3	115	400	36	530	0,15
4	200	400	28	1400	0,01
5	220	500	28,5	800	0,02
6	208	400	24	1000	0,03
7	115	400	27	1200	0,04
8	200	400	30	180	0,05
9	115	400	27	250	0,06
10	115	400	27	3000	0,07
11	115	400	27	2700	0,08
12	200	400	24	4800	0,09
13	115	400	36	1800	0,11
14	220	400	28	6000	0,12
15	380	50	28,5	15400	0,13
16	380	50	24	12000	0,14
17	380	50	27	14000	0,15
18	115	400	30	450	0,16
19	380	50	28	15000	0,17
20	200	200	27	5400	0,18

Примечания.

1. Схемы выпрямителя (кроме 15, 16, 17 и 19 вариантов) для нечетных вариантов – однофазная двухполупериодная (со средней точкой), для четных – однофазная мостовая. Схема выпрямителя – трехфазная мостовая для 15, 16, 17 и 19 вариантов.

2. Расчетное количество фаз для однофазных схем $m=2$, для трехфазной мостовой схемы $m=6$.

3. Нагрузка выпрямителя – чисто активная.

4. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки трансформатора принять равным нулю. При этом угол $\varphi=0$.

Методические рекомендации

Для расчетов используйте формулы, приведенные в табл. 11.2, 11.3 и графики (рис. 11.1, 11.2).

К п.2. Для выбора вентиля определяют значения среднего прямого тока вентиля, обратного напряжения на вентиле и максимальное значение тока через вентиль, которые находятся в зависимости от схемы выпрямителя и характера нагрузки. При этом используют точные или приближенные формулы, в последнем случае по ходу расчета эти значения уточняются. По результатам расчетов на основе полученных данных выбираются выпрямительные диоды.

При расчете выпрямителя большое значение имеет коэффициент использования трансформатора по мощности, который определяется как

$$k_{\text{исп}} = \frac{P_d}{S_{\text{габ}}} = \frac{2U_d I_d}{U_1 I_1 + U_2 I_2},$$

где I_d, U_d – средние значения выпрямленного тока и напряжения, I_1, U_1 – действующие значения первичного тока и напряжения, I_2, U_2 – действующие значения вторичного тока и напряжения.

По значениям $ST, U_{1ф}, U_{2ф}$ из каталога выбирается тип трансформатора (табл. 12.2, П.1, П.2) и определяются его параметры (активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора).

Для этого определяется активное сопротивление короткого замыкания $R_K = P_K / I_{\text{н}}^2$ (P_K – мощность короткого замыкания на одну фазу), приведенное $R_2' = R_K / 2$ и действительное $R_2 = R_2' / k_T^2$ сопротивление фазы вторичной обмотки. Здесь $k_T = U_{1ф} / U_{2ф}$ – коэффициент трансформации трансформатора.

Таблица 11.2

Формулы для расчета неуправляемого выпрямителя

Схема Выпрямителя	Однофазная двухполупериодная (со средней точкой)	Однофазная мостовая	Трехфазная мостовая
Нагрузка – активная, фильтр – отсутствует			
Средний ток через диод	$I_{VD} = I_d / 2$	$I_{VD} = I_d / 2$	$I_{VD} = I_d \cdot$
Максимальный ток через диод	$I_{VD \max} = \pi I_d / 2$	$I_{VD \max} = \pi I_d / 2$	$I_{VD \max} = I_d \cdot$
Максимальное обратное напряжение на вентиле	$U_{\max \text{ обр}} =$ $= 2\sqrt{2}U_2$	$U_{\max \text{ обр}} =$ $= \sqrt{2}U_2 = \frac{\pi}{2}U_d$	$U_{\max \text{ обр}} =$ $= \sqrt{3}\sqrt{2}U_{2\phi} =$ $= 1,045U_d$
Напряжение на вторичной обмотке трансформатора	$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}U_d =$ $= 1,11U_d$	$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}U_d =$ $= 1,11U_d$	$U_{2\phi} = U_d / 2,34$
Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора	$I_2 = \frac{\pi}{4}I_d =$ $= 0,785I_d$	$I_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}I_d$	$I_2 = I_d \cdot$
Габаритная мощность вторичных обмоток трансформатора	$S_2 = I_2U_2 =$ $= 1,74P_d$	$S_2 = S_1$	$S_1 = S_2 = S_T =$ $= 3 \cdot \frac{U_d}{2,34} =$ $= 1,045P_d$
Габаритная мощность первичной обмотки трансформатора	$S_1 = I_1U_1 =$ $= 1,23P_d$	$S_1 = I_1U_1 =$ $= 1,23P_d$	$S_1 = S_2 = S_T =$ $= 1,045U_d$
Коэффициент использования трансформатора по мощности при активной нагрузке	0,675	0,813	0,952

К п.3. Внешнюю (нагрузочную) характеристику выпрямителя, т.е. зависимость выпрямленного напряжения от тока нагрузки, рассчитывают по формуле

$$U_d = E_2 \cos \psi \sqrt{2}.$$

Задаваясь различными значениями I_d , определяют коэффициент

$$\gamma_0 = I_d \cdot r / (mE_2).$$

Значения $\cos\psi\sqrt{2}$ находят в зависимости от коэффициента γ_0 и угла φ по графику (рис. 11.2).

Значения величины E_2 определяют с использованием табл. 11.3 и рис. 11.1 ($A_0 = \frac{r}{mR_d}$).

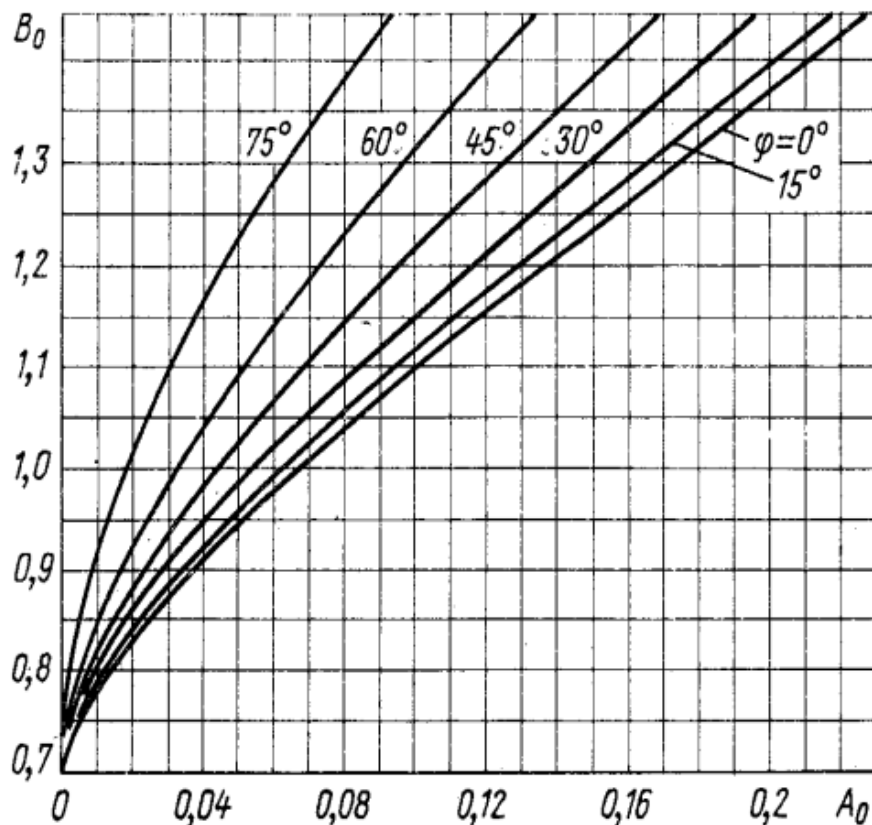


Рисунок 11.1. Зависимость B_0 от коэффициента A_0 при различных значениях φ

К п.5. Величину емкости фильтра можно определить по формуле

$$C = \frac{1}{2\pi m f_1 R_d k_{\Pi}}, \quad R_d = U_d / I_d.$$

При равных условиях, емкостной фильтр выгоднее применить при выпрямлении однофазных и двухфазных, а индуктивный при выпрямлении многофазных токов.

Таблица 11.3

Формулы для расчета неуправляемого выпрямителя с емкостным фильтром

Схема Выпрямителя	Однофазная двухполупериодная (со средней точкой)	Однофазная мостовая	Трехфазная мостовая
Средний ток через диод	$I_{VD} = I_d / 2$	$I_{VD} = I_d / 2$	$I_{VD} = I_d / 3$
Максимальное обратное напряжение	$U_{\max \text{ обр}} = 2\sqrt{2}E_2$	$U_{\max \text{ обр}} = \sqrt{2}E_2$	$U_{\max \text{ обр}} = \sqrt{6}E_2$
Максимальный прямой ток	$I_{\text{пр max}} = F_0 I_d / 2 \approx 3,5 I_d$	$I_{\text{пр max}} = F_0 I_d / 2 \approx 3,5 I_d$	$I_{\text{пр max}} = F_0 I_d / 6 \approx 1,15 I_d$
Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора	$I_2 = D_0 I_d / 2$	$I_2 = D_0 I_d / 2$	$I_2 = D_0 I_d / 6$
ЭДС на вторичной обмотке трансформатора	$E_2 = B_0 U_d$	$E_2 = B_0 U_d$	$E_2 = B_0 U_d / \sqrt{3}$
Активное сопротивление фазы	$r = R_2 + R_{VD}$	$r = R_2 + 2R_{VD}$	$r = 2R_2 + 2R_{VD}$

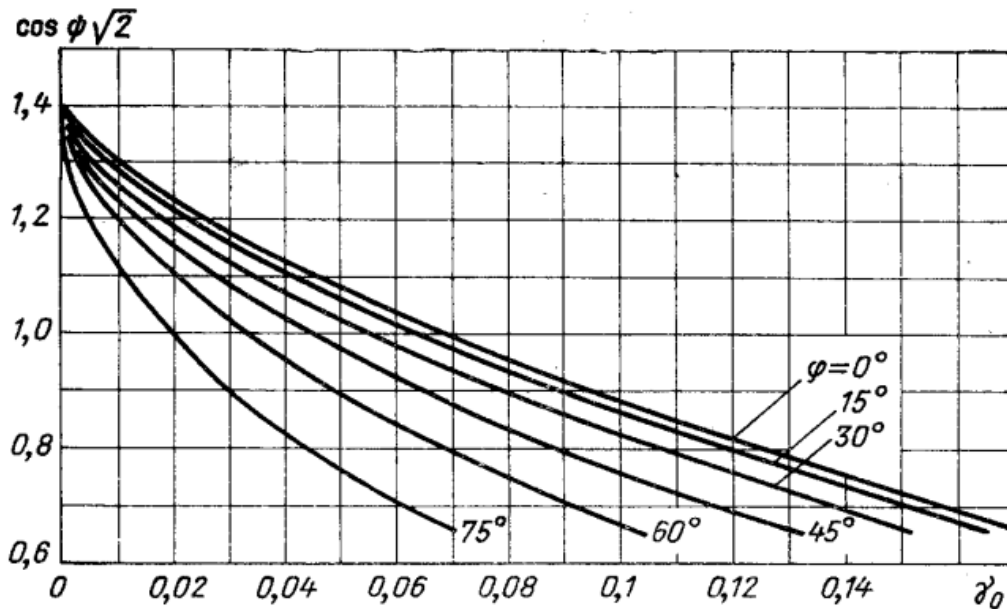


Рисунок 11.2. Зависимость $\cos \psi \sqrt{2}$ от коэффициента γ_0 при различных значениях φ

12. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Задача № 12.1

Для управляемого выпрямителя, собранного по схеме Ларионова, требуется выполнить следующие задания:

1. Изобразить принципиальную схему управляемого выпрямителя, включающую в себя трансформатор, трехфазный мостовой выпрямитель, индуктивно-емкостной фильтр и активно-индуктивную нагрузку.

2. По данным выпрямителя (табл. 12.1) определить мощность трансформатора и выбрать трансформатор.

3. Рассчитать индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки трансформатора.

4. Рассчитать и построить внешние характеристики управляемого выпрямителя при трех фиксированных значениях угла управления.

5. Рассчитать и построить регулировочную характеристику.

Принять следующие допущения.

1. Тиристоры выпрямителя идеальные.

2. Форма напряжения сети синусоидальна.

Методические рекомендации

К п.2. Расчетная мощность трансформатора определяется, исходя из заданной мощности нагрузки $P_d = U_{d\alpha} I_d$, схемы выпрямления, а также КПД и коэффициента мощности выпрямителя; при этом рекомендуется принимать коэффициент запаса по мощности, который учитывает возможные в эксплуатации перегрузки по мощности:

$$S_T = \frac{k_3 k_{исп} P_d}{\eta \lambda},$$

где k_3 – коэффициент запаса по мощности трансформатора (принимается в диапазоне $k_3=1,05-1,15$); $k_{исп}=1,05$ – коэффициент использования мощности трансформатора для трехфазных мостовых схем выпрямления; $\eta=0,95$ – КПД выпрямителя и трансформатора (для первоначального оценочного расчета); λ – коэффициент мощности выпрямителя.

Если запас мощности питающей сети достаточен, форма напряжения сети синусоидальна ($k_{и(u)}=1$), тогда для трехфазной мостовой схемы выпрямления коэффициент мощности можно определить по формуле

$$\lambda = k_{и(u)} \cdot \cos(\alpha + \gamma / 2),$$

где α – угол управления, соответствующий номинальной нагрузке; γ – угол коммутации тиристоров выпрямителя.

При первоначальном расчете мощности трансформатора для трехфазной мостовой схемы можно принять: $k_{н(i)}=0,955$; $\alpha=15^\circ-25^\circ$; $\gamma=5-15^\circ$.

Действующее значение фазной ЭДС вторичной обмотки трансформатора $E_{2ф}$ связано с выпрямленным напряжением $U_{d\alpha}$ управляемого выпрямителя соотношением (без учета явления коммутации тиристорov выпрямителя)

$$U_{d\alpha} = 2,34E_{2ф} \cos\alpha,$$

где $U_{d\alpha}$ – выпрямленное напряжение при номинальном угле управления α .

Таблица 12.1

Параметры управляемого выпрямителя

Вариант	Напряжение источника питания U_1 , В	Частота источника питания, f_1	Номинальный ток нагрузки, I_d	Номинальное напряжение нагрузки, U_d
1	200	400	20	27
2	200	400	50	24
3	200	400	60	36
4	200	400	175	28
5	220	500	80	28,5
6	380	50	600	24
7	200	400	95	27
8	200	400	150	30
9	220	400	180	27
10	220	400	65	27
11	220	400	85	27
12	200	400	50	24
13	200	400	190	36
14	380	50	500	28
15	380	50	550	28,5
16	208	200	60	24
17	220	400	75	27
18	200	400	170	30
19	200	200	75	28
20	380	50	450	27

По значениям S_T , U_1 , $E_{2ф}$ из каталога (табл. 12.2 при частоте питающей сети 50 Гц, П.2 – при частоте 400 Гц) выбирается тип трансформатора.

Таблица 12.2

Технические данные трехфазных преобразовательных трансформаторов

Обозначение трансформатора	Мощность S_T , кВА	Ток первичной обмотки I_1 , А	ЭДС вторичной обмотки $E_{2л}$, В	Ток вторичной обмотки I_2 , А	Напряжение короткого замыкания u_k , %	Потери короткого замыкания P_k , Вт
ТС(З)П-16/0,7-УЗ	16	24,3	83	111,4	5,5	550
			105	88,1		
			115			
			205	45,1		
			230	40,2		
			410	22,6		
ТС(З)П-25/0,7-УЗ	25	38	85	170	4,2	800
			105	137,6		
			160	90,3		
			205	70,5		
			230	62,8		
			410	35,2		
ТС(З)П-40/0,7-УЗ	40	60,8	85	272	3,6	1100
			105	220,2		
			160	144,5		
			205	112,8		
			230	100,5		
			410	56,4		
ТС(З)П-63/0,7-УЗ	63	95,8	85	428,4	3,6	1900
			105	346,8		
			205	177,6		
			230	158,3		
			350	104		
			410	88,8		
ТС(З)П-100/0,7-УЗ	100	152,1	85	680	3,3	2300
			105	550,5		
			170	340		
			205	282		
			230	251,3		
			350	165,2		

Примечание. Условное обозначение типа трансформатора ТСП-16/0,7-УЗ (ТСЗП-16/0,7-УЗ): Т – трансформатор трехфазный, С – естественное воздушное охлаждение при открытом исполнении (сухой); СЗ – естественное воздушное охлаждение при защищенном исполнении в кожухе (сухой, защищенный), П – преобразователь-

ный; 16 – номинальная (типовая) мощность, кВА; 0,7 – класс напряжения сетевой обмотки, кВ; УЗ – климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543.1-89.

Напряжение первичной обмотки $U_{1л}=380$ В, частота – 50 Гц, схема соединения обмоток – Y/Yo.

Исходя из заданного значения $U_{d\alpha}$ и значения $E_{2л}$ для выбранного типа трансформатора с учетом потери напряжения от коммутации вентилей определяется угол управления α , требуемый для реализации номинального режима

$$U_{d\alpha} = 1,35E_{2л} \cos\alpha - \frac{I_d X_s}{\pi/3},$$

где X_s – индуктивное сопротивление рассеяния фазы вторичной обмотки трансформатора.

К п.3. Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки трансформатора X_s определяется по данным опыта короткого замыкания.

1. Номинальная мощность фазы трансформатора

$$P_H = S_T / 3.$$

2. Номинальный фазный ток первичной обмотки

$$I_{1H} = P_H / U_{1ф}.$$

3. Номинальное напряжение короткого замыкания

$$U_K = u_K U_{1ф} / 100.$$

4. Полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_K = U_K / I_{1H}.$$

5. Активное сопротивление короткого замыкания

$$R_K = P_K / (3I_{1H}^2).$$

6. Приведенное индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки

$$X'_s = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} / 2.$$

7. Индуктивное сопротивление рассеяния фазы вторичной обмотки

$$X_s = X'_s / k_T^2,$$

где $k_T = U_{1ф} / E_{2ф}$ – коэффициент трансформации трансформатора.

К п.4. Управляемые выпрямители позволяют не только выпрямлять напряжение, но и изменять его величину. Для регулирования выпрямленного напряжения нужно изменять угол управления.

Внешние характеристики управляемого выпрямителя представляют собой зависимости среднего значения выпрямленного напряжения от

среднего выпрямленного тока при фиксированных значениях угла управления тиристорами.

Вид внешних характеристик управляемого выпрямителя определяется выражением (если пренебрегать падением напряжения на тиристорах)

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \cos\alpha - \frac{I_d \cdot X_s}{\pi/3}.$$

Внешние характеристики управляемого выпрямителя следует рассчитывать при трех фиксированных значениях угла управления $\alpha_1=0$, $\alpha_2=\alpha_{ном}$, $\alpha_{ном} < \alpha_3 < 80^\circ$, задаваясь при каждом α рядом значений выпрямленного тока от нуля до номинального.

К п.5. Зависимость выпрямленного напряжения от угла управления α называется регулировочной характеристикой $U_d=f(\alpha)$.

Вид регулировочной характеристики зависит от режима. В непрерывном режиме регулировочная характеристика идеального выпрямителя не зависит от вида нагрузки. В прерывистом режиме регулировочная характеристика зависит от схемы (пульсности) и величины индуктивности. С ростом индуктивности нагрузки замедляется спад анодных токов, и, поэтому растет граничный угол (угол управления, при котором меняется режим). Одновременно из-за появления отрицательных участков выпрямленного напряжения уменьшается угол управления, при котором среднее значение выпрямленного напряжения становится равным нулю.

Уравнение регулировочной характеристики выпрямителя в непрерывном режиме ($\alpha < \pi/3$) записывается следующим образом:

$$U_{d\alpha 0} = U_{d0} \cdot \cos\alpha.$$

Участок регулировочной характеристики на интервале $\pi/3 < \alpha \leq 2\pi/3$ находится по выражению

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot [1 + \cos(\pi/3 + \alpha)].$$

13. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ИНВЕРТОРА

Задача № 13.1

Для однофазного автономного инвертора напряжения (рис. 13.1): напряжение $E=27$ В; индуктивность дросселя $L=50$ мГн; сопротивление нагрузки $R=10$ Ом; коэффициент заполнения $\gamma=1/2$; частота переключения транзисторов $f=400$ Гц.

Требуется выполнить следующие задания:

1. Определить действующее значение и амплитуду основной гармоники напряжения на нагрузке.
2. Рассчитать мощность, потребляемую от источника.

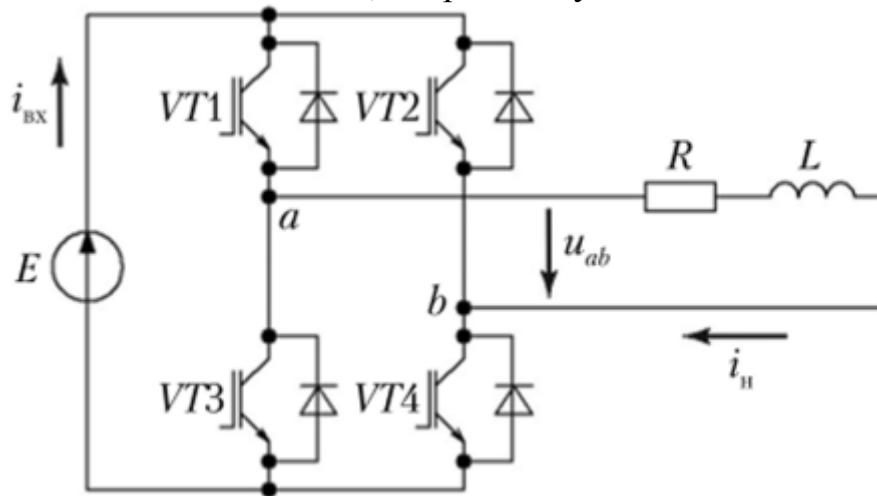


Рисунок 13.1. Автономный инвертор напряжения с активно-индуктивной нагрузкой

Методические рекомендации

Коэффициент заполнения определяет относительную длительность ненулевых интервалов выходного напряжения инвертора за полупериод при широтно-импульсном регулировании. На рис. 13.2 приведены импульсы управления транзисторами и диаграмма напряжения на нагрузке при заданном значении γ . При подаче импульсов управления на транзисторы VT1, VT4 к нагрузке прикладывается положительное напряжение (при этом ток может протекать и через обратные диоды VD1, VD4), а при включенном состоянии транзисторов VT2, VT3 или диодов VD2, VD3 — отрицательное. За счет смещения импульсов управления на четверть полупериода появляются интервалы, на которых в проводящем состоянии находятся ключи 1, 2 или 3, 4, что позволяет получить нулевое напряжение на нагрузке, которая шунтируется последовательно соединенными транзистором и диодом из верхней или из нижней группы ключей.

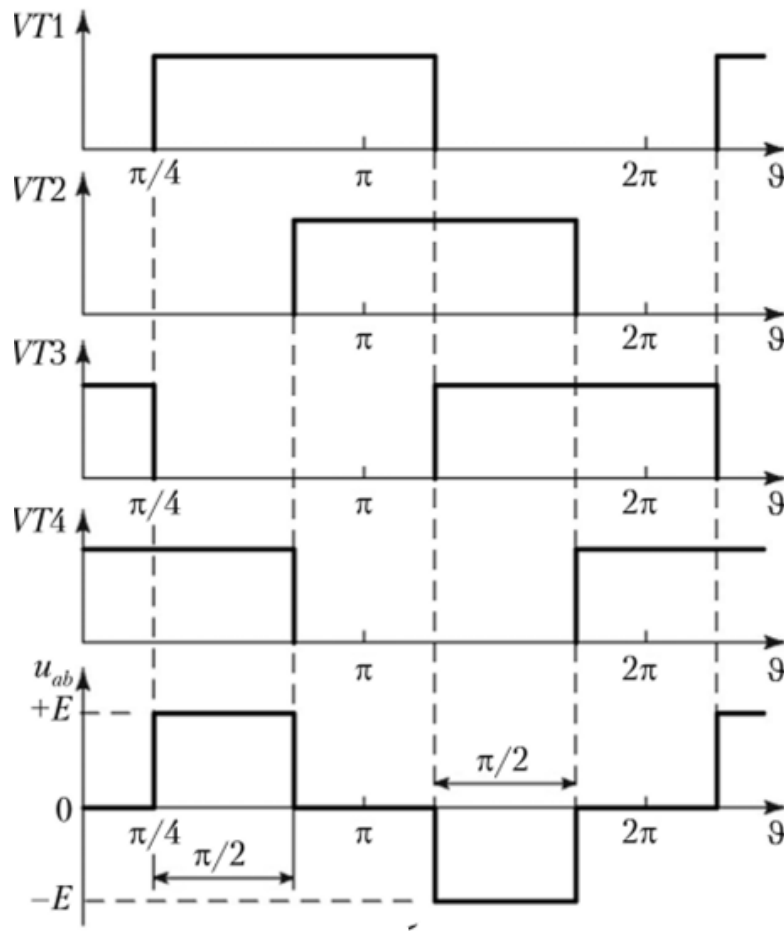


Рисунок 13.2. Диаграммы импульсов управления и напряжения на нагрузке

К п.1. Действующее значение напряжения, имеющего форму меандра с нулевыми интервалами (рис. 13.2), рассчитывается как

$$U_{ab} = E\sqrt{\gamma}.$$

Согласно разложению меандра в ряд Фурье можно вычислить амплитуду первой гармоники выходного напряжения

$$U_{ab1m} = \frac{4E}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot \gamma}{2}.$$

Ток нагрузки, экспоненциально меняющийся на каждом из четырех интервалов, которым соответствует включенное состояние различных ключей схемы, определяется как:

на интервале $\pi/4 < \vartheta < 3\pi/4$

$$i_H = \frac{E}{R} - \left(I_0 + \frac{E}{R}\right) \cdot e^{-(\vartheta - \pi/4)/(\omega\tau)},$$

на интервале $3\pi/4 < \vartheta < 5\pi/4$

$$i_H = I_m \cdot e^{-(\vartheta - 3\pi/4)/(\omega\tau)},$$

где I_0 — значение тока, до которого он снижается при отсутствии напряжения на нагрузке; I_m — максимальное значение тока нагрузки; $\tau = L/R$ — постоянная времени нагрузки; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота напряжения и тока.

Таким образом, при положительном напряжении u_{ab} (открыты ключи 1, 4) происходит накопление энергии в индуктивности нагрузки, а ток увеличивается от начального значения I_0 в момент $\vartheta = \pi/4$ до максимального I_m в момент $\vartheta = 3\pi/4$. А при нулевом напряжении ток протекает через транзистор $VT1$ и диод $VD2$, и снижается до уровня $+I_0$. На двух последующих интервалах ток изменяется аналогично: при открытом состоянии ключей 2, 3 происходит сначала возврат энергии в источник (проводят $VD2, VD3$), а затем накопление энергии в дросселе (включены $VT2, VT3$) до максимального значения; далее — снижение тока нагрузки, который протекает через $VT3$ и $VD4$, минуя источник. В установившемся режиме работы среднее значение тока-нагрузки за период равно нулю.

К п.2. Можно найти I_0 и I_m :

$$I_m = \frac{E}{R} - (I_0 + \frac{E}{R}) \cdot e^{-(3\pi/4 - \pi/4)/(\omega\tau)} = \frac{E}{R} - (I_0 + \frac{E}{R}) \cdot e^{-\pi/(2\omega\tau)}.$$

$$I_0 = I_m \cdot e^{-(5\pi/4 - 3\pi/4)/(\omega\tau)} = I_m + \frac{E}{R} \cdot e^{-\pi/(2\omega\tau)}.$$

Используя эти выражения, получим

$$I_m = \frac{E}{R} - (I_m \cdot e^{-\pi/(2\omega\tau)} + \frac{E}{R}) \cdot e^{-\pi/(2\omega\tau)} = \frac{E}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\pi/(2\omega\tau)}}{1 + e^{-\pi/(2\omega\tau)}};$$

$$I_0 = 5,6e^{-1}.$$

Диаграмма тока нагрузки представлена на рис. 13.3. На нем также показана диаграмма тока источника, который равен сумме токов транзисторов верхней или нижней группы за вычетом токов соответствующих диодов.

Мощность, потребляемая от источника, определяется как произведение входного напряжения и среднего значения входного тока ($I_{ВХ}$):

$$P_{ВХ} = EI_{ВХ} = E \frac{1}{\pi} \int_{\pi/4}^{3\pi/4} i_H(\vartheta) d\vartheta = \frac{E}{\pi} \int_{\pi/4}^{3\pi/4} [\frac{E}{R} - (I_0 + \frac{E}{R}) \cdot e^{-(\vartheta - \pi/4)/(\omega\tau)}] d\vartheta.$$

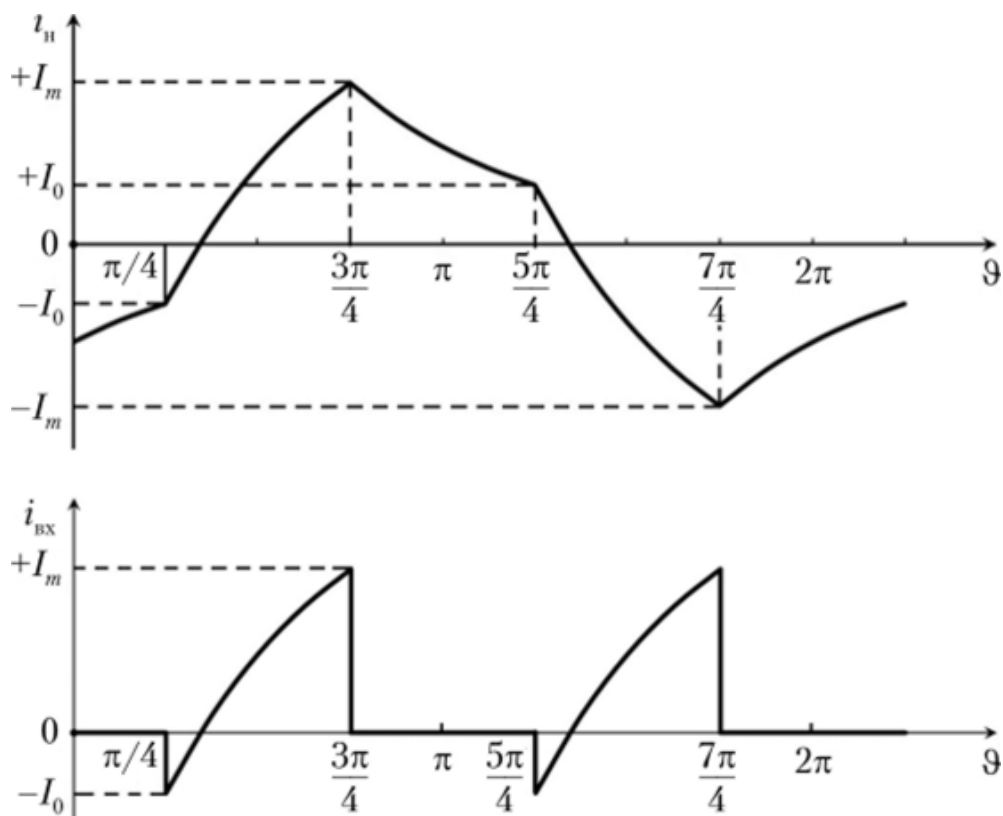


Рисунок 13.3. Диаграммы входного и выходного токов

Задача № 13.2

Для автономного инвертора напряжения (АИН), выполненного по трехфазной мостовой схеме, требуется выполнить следующие задания.

1. Изобразить схему трёхфазного мостового инвертора.
2. Рассчитать для заданного варианта напряжения источника питания максимальные действующие значения первой гармоники линейного и фазного напряжений на нагрузке при разных способах модуляции (вентили принять идеальными).
3. Рассчитать при заданном способе и коэффициенте модуляции действующие значения первой гармоники фазного напряжения и тока, принимая во внимание, что источник питания и вентили идеальны.
4. Рассчитать для заданного варианта действующие значения первой гармоники линейного и фазного напряжений на нагрузке при неидеальном источнике питания и ключах.
5. Рассчитать и построить внешнюю характеристику при постоянстве коэффициента мощности.
6. Рассчитать зависимость КПД АИН от глубины регулирования.

Исходные данные представлены в табл. 13.1.

Таблица 13.1

Варианты заданий

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Напряжение источника E_d, В	200	220	240	250	200	220	240	250	230
Активное сопротивление фазы $r_{нф}$, Ом	25	30	30	32	20	25	32	35	30
Вариант	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Напряжение источника E_d, В	200	220	240	250	200	220	240	250	230
Активное сопротивление фазы $r_{нф}$, Ом	27	32	28	35	22	26	31	33	28

Примечание.

- Для всех вариантов принять:
 - коэффициент модуляции $\mu = 0,9$;
 - $\cos\varphi = 0,8$;
 - внутреннее сопротивление источника питания $r_{ип} = 1$ Ом;
 - падение напряжение на транзисторе $U_0 = 2$ В;
 - дифференциальное сопротивление транзистора во включенном состоянии $r_d = 0,5$ Ом;
 - несущая частота $f_{нес} = 5000$ Гц;
 - суммарное время включения-выключения транзистора $t_{вкл} + t_{выкл} = 2$ мкс.;

- Число включений (коммутаций) в секунду одного транзистора зависит способа модуляции: $n_{ком} = f_{нес}$ при формировании напряжений на выводах относительно средней точки источника питания; $n_{ком} = 0,66 f_{нес}$ при формировании фазных напряжений с помощью пространственного вектора.

Методические рекомендации

К п.1. Максимальные действующие значения первой гармоники фазного и линейного напряжений на нагрузке при разных способах модуляции (вентили приняты идеальными) рассчитываются следующим образом:

– при формировании напряжений на выводах относительно средней точки источника питания

$$U_{\phi(1)\max} = U_d \cdot k_{\mu}; \quad U_{л(1)\max} = \sqrt{3}U_d \cdot k_{\mu}.$$

– при формировании напряжений с помощью пространственного вектора

$$U_{\phi(1)\max} = U_d \cdot k_{\mu}; \quad U_{л(1)\max} = U_d / \sqrt{2}.$$

Коэффициент модуляции $k_{\mu} = \frac{1}{2\sqrt{2}}$ при формировании напряжений на выводах относительно средней точки источника питания, $k_{\mu} = \frac{1}{\sqrt{6}}$ при формировании напряжений с помощью пространственного вектора.

К п.2. Действующие значения первой гармоники фазного напряжения и тока (источник питания и вентили идеальны) рассчитываются как

$$U_{\phi(1)\text{ид}} = \mu U_{\phi(1)\max}; \quad I_{\phi(1)} = U_{\phi(1)\text{ид}} / z_{\text{нф}}; \quad z_{\text{нф}} = r_{\text{нф}} / \cos\varphi_{\text{н}}.$$

К п.3. Действующие значения первой гармоники линейного и фазного напряжений на нагрузке при неидеальном источнике питания и, неидеальных ключах, определяются по формулам

$$U_{\phi(1)} = \mu U_{\phi(1)\max} - I_{\phi(1)} \cos\varphi_{\text{н}} (3\mu^2 k_{\mu}^2 r_{\text{ип}} + r_{\text{к}}); \quad U_{л(1)} = \sqrt{3}U_{\phi(1)}.$$

Сопротивления транзистора и диода в проводящем состоянии приняты равными $r_{\text{к}} = U_0 / I_{\phi(1)}$.

К п.4. Внешняя характеристика АИН описывается уравнением

$$U_{л(1)} = \sqrt{3}(\mu U_{\phi(1)\max} - I_{\phi(1)} \cos\varphi_{\text{н}} (3\mu^2 k_{\mu}^2 r_{\text{ип}} + r_{\text{к}})).$$

К п.5. Зависимость КПД АИН от глубины регулирования μ при рассчитанном токе $I_{\phi(1)}$ и постоянстве $\cos\varphi$ определяется уравнением

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1}{\mu k_{\mu} \cos\varphi_{\text{н}}} \left(\frac{2\sqrt{2}U_0}{\pi U_d} + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} (t_{\text{вкл}} + t_{\text{выкл}}) \cdot n_{\text{ком}} + \frac{I_{\phi(1)} r_{\text{д}}}{U_d} \right)}.$$

14. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИВОДОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Задание № 14.1

1. Ознакомиться с назначением, функциями и параметрами приводов летательных аппаратов.
2. Выявить основные показатели качества различных приводов и количественные характеристики этих показателей.
3. Составить таблицу для сравнения различных приводов летательных аппаратов (ЛА) в соответствии с выбранными показателями качества.
4. Выработать рекомендации по применению различных приводов на ЛА.

Методические рекомендации

Изучите информационные источники по теме и представленные тексты с описаниями различных типов приводов.

Гидравлический и электрогидравлический привод

Принцип действия гидравлических приводов основан на преобразовании потенциальной энергии давления потока жидкости в механическую энергию движения. Гидропривод состоит из источника гидравлической энергии – гидронасоса, создающего поток жидкости высокого давления, и потребителя гидравлической энергии – гидродвигателя (ГД).

Достоинства.

1. ГД обладают самой высокой удельной плотностью развиваемых усилий или моментов, которая определяется давлением, равным $10 \div 35$ МПа.
2. ГД обеспечивает большее быстроедействие, т.к. у него отношение развиваемого усилия (или момента) к массе (или моменту инерции) его подвижных частей наибольшее.
3. Привод прост по конструкции, не требует редуктора и обладает высокой надежностью.
4. Простота управления и автоматизации.
5. Простота предохранения приводного двигателя и исполнительных органов машин от перегрузок. Например, если усилие на штоке гидроцилиндра становится слишком большим (такое возможно, в частности, когда шток, соединённый с рабочим органом, встречает препятствие на своём пути), то давление в гидросистеме достигает больших значений – тогда срабатывает предохранительный клапан в гидросистеме, и после этого жидкость идёт на слив в бак, и давление уменьшается.

6. Широкий диапазон бесступенчатого регулирования скорости выходного звена. Например, диапазон регулирования частоты вращения гидромотора может составлять от 2500 об/мин до 30–40 об/мин, а в некоторых случаях, у гидромоторов специального исполнения, достигает до 1–4 об/мин, что для электромоторов трудно реализуемо.

7. Большая передаваемая мощность на единицу массы привода. В частности, масса гидравлических машин примерно в 10–20 раз меньше массы электрических машин такой же мощности.

8. Самосмазываемость трущихся поверхностей при применении минеральных и синтетических масел в качестве рабочих жидкостей.

9. Возможность получения больших сил и мощностей при малых размерах и весе передаточного механизма.

10. Простота осуществления различных видов движения – поступательного, вращательного, поворотного.

11. Возможность частых и быстрых переключений при возвратно-поступательных и вращательных прямых и реверсивных движениях.

12. Возможность равномерного распределения усилий при одновременной передаче на несколько приводов.

13. Упрощённость компоновки основных узлов гидропривода внутри машин и агрегатов, в сравнении с другими видами приводов.

Недостатки:

1. Высокая стоимость, т.к. для изготовления отдельных элементов ГП требуется высокая точность (единицы микрометров).

2. Функционирование электрогидропривода (ЭГП) подразумевает наличие двух силовых систем: системы электропитания и гидросистемы, что увеличивает стоимость оборудования и усложняет обслуживание. Наличие двух систем снижает надежность. Практически невозможно обеспечить дублирование систем управления, ответственных за живучесть ЛА.

3. Для своего функционирования ЭГП все равно использует электросистему. Поэтому, если задачу управления можно решить с помощью электросистемы, то гидросистема становится лишней.

4. Утечки рабочей жидкости через уплотнения и зазоры, особенно при высоких значениях давления в гидросистеме, что требует высокой точности изготовления деталей гидрооборудования.

5. Нагрев рабочей жидкости при работе, что приводит к уменьшению вязкости рабочей жидкости и увеличению утечек, поэтому в ряде случаев необходимо применение специальных охлаждающих устройств и средств тепловой защиты.

6. Более низкий КПД чем у сопоставимых механических передач.

7. Необходимость обеспечения в процессе эксплуатации чистоты рабочей жидкости, поскольку наличие большого количества абразивных частиц в рабочей жидкости приводит к быстрому износу деталей гидрооборудования, увеличению зазоров и утечек через них, и, как следствие, к снижению объёмного КПД.

8. Необходимость защиты гидросистемы от проникновения в неё воздуха, наличие которого приводит к нестабильной работе гидропривода, большим гидравлическим потерям и нагреву рабочей жидкости.

9. Зависимость вязкости рабочей жидкости, а значит и рабочих параметров гидропривода, от температуры окружающей среды, или дороговизна масел на основе ПАО.

10. Пожароопасность в случае применения горючих рабочих жидкостей.

11. В сравнении с пневмо– и электроприводом – невозможность эффективной передачи гидравлической энергии на большие расстояния вследствие больших потерь напора в гидролиниях на единицу длины.

Электропневматический привод [19]

Электропневматический привод (ЭПП) – это замкнутая система, где электрический сигнал управления приводом преобразуется в механическое перемещение клапана, управляющего величиной энергии давления сжатого газа, поступающего в качестве рабочего тела в пневматический двигатель, перемещающий органы управления летательного аппарата. Т.е. в ЭПП происходит преобразование потенциальной энергии давления сжатого воздуха (газа) в механическую энергию давления.

Принципиальные возможности ЭПП.

1. Для изготовления элементов ЭПП требуется меньшая точность, чем для гидропривода, поэтому стоимость ЭПП ниже.

2. ЭПП достаточно прост и надежен.

Оценка ЭПП в сравнении с ЭГП:

1. Развивает меньшее давление (до 1–8 МПа), что снижает его быстродействие.

2. Не обладает смазывающими свойствами, поэтому всегда присутствует сухое трение. Кроме него, имеет место сжимаемость газа. Все это существенно влияет на динамику привода.

ЭПП может быть использован в том случае, когда величина инерционной нагрузки на их выходе мала.

3. Так же, как и в случае с ЭГП на борту ЛА присутствуют минимум две силовые системы, что снижает надежность его функционирования.

Достоинства пневмопривода в сравнении с гидро– и электроприводом [19].

1. Простота конструкции и технического обслуживания. Изготовление деталей пневмомашин и пневмоаппаратов не требует такой высокой точности изготовления и герметизации соединений, как в гидроприводе, т.к. возможные утечки воздуха не столь существенно снижают эффективность работы и КПД системы. Внешние утечки воздуха экологически безвредны и относительно легко устраняются. Затраты на монтаж и обслуживание пневмопривода несколько меньше из-за отсутствия возвратных пневмолиний и применения в ряде случаев более гибких и дешевых пластмассовых или резиновых (резинотканевых) труб. В этом отношении пневмопривод не уступает электроприводу. Кроме того, пневмопривод не требует специальных материалов для изготовления деталей, таких как медь, алюминий и т.п., хотя в ряде случаев они используются исключительно для снижения веса или трения в подвижных элементах.

2. Возможность воспроизведения движения без каких-либо передаточных механизмов (в отличие от электрических).

3. Простота регулирования скорости вращения и крутящего момента.

4. Наличие неограниченного запаса воздуха в качестве рабочего.

5. Пожаро– и взрывобезопасность.

6. Надежность работы в широком диапазоне температур, в условиях пыльной и влажной окружающей среды. В таких условиях гидро– и электропривод требуют значительно больших затрат на эксплуатацию, т.к. при температурных перепадах нарушается герметичность гидросистем из-за изменения зазоров и изолирующих свойств электротехнических материалов, что в совокупности с пыльной, влажной и нередко агрессивной окружающей средой приводит к частым отказам.

7. Значительно больший срок службы, чем гидро– и электропривода. Срок службы оценивают двумя показателями надежности: гамма-процентной наработкой на отказ и гамма-процентным ресурсом. Для пневматических устройств циклического действия ресурс составляет от 5 до 20 млн. циклов в зависимости от назначения и конструкции, а для устройств нециклического действия около 10–20 тыс. часов. Это в 2–4 раза больше, чем у гидропривода, и в 10–20 раз больше, чем у электропривода.

8. Высокое быстродействие. Здесь имеется в виду не скорость передачи сигнала (управляющего воздействия), а реализуемые скорости

рабочих движений, обеспечиваемых высокими скоростями движения воздуха. Поступательное движение штока пневмоцилиндра возможно до 15 м/с и более, а частота вращения выходного вала некоторых пневмомоторов (пневмотурбин) до 100000 об/мин. Реализация больших скоростей в гидроприводе и электроприводе ограничивается их большей инерционностью (масса жидкости и инерция роторов) и отсутствием демпфирующего эффекта, которым обладает воздух.

9. Возможность передачи пневмоэнергии на относительно большие расстояния по магистральным трубопроводам и снабжение сжатым воздухом многих потребителей. В этом отношении пневмопривод уступает электроприводу, но значительно превосходит гидропривод, благодаря меньшим потерям напора в протяженных магистральных линиях. Электрическая энергия может передаваться по линиям электропередач на многие сотни и тысячи километров без ощутимых потерь, а расстояние передачи пневмоэнергии экономически целесообразно до нескольких десятков километров.

10. Отсутствие необходимости в защитных устройствах от перегрузки давлением у потребителей. Требуемый предел давления воздуха устанавливается общим предохранительным клапаном, находящимся на источниках пневмоэнергии. Пневмодвигатели могут быть полностью заторможены без опасности повреждения и находиться в этом состоянии длительное время.

11. Безопасность для обслуживающего персонала при соблюдении общих правил, исключающих механический травматизм. В гидро- и электроприводах возможно поражение электрическим током или жидкостью при нарушении изоляции или разгерметизации трубопроводов.

12. Улучшение проветривания рабочего пространства за счет отработанного воздуха.

13. Нечувствительность к радиационному и электромагнитному излучению. В таких условиях электрогидравлические системы практически непригодны.

Недостатки.

1. Высокая стоимость пневмоэнергии. Если гидро- и электропривод имеют КПД, соответственно, около 70 % и 90 %, то КПД пневмопривода обычно 5–15 % и очень редко до 30 %. Во многих случаях КПД может быть 1 % и менее. По этой причине пневмопривод не применяется в машинах с длительным режимом работы и большой мощности, кроме условий, исключающих применение электроэнергии.

2. Относительно большой вес и габариты пневмомашин из-за низкого рабочего давления. Если удельный вес гидромашин, приходящийся на единицу мощности, в 5–10 раз меньше веса электромашин, то

пневмомашины имеют примерно такой же вес и габариты, как последние.

3. Трудность обеспечения стабильной скорости движения выходного звена при переменной внешней нагрузке и его фиксации в промежуточном положении. Вместе с тем мягкие механические характеристики пневмопривода в некоторых случаях являются и его достоинством.

4. Высокий уровень шума, достигающий 95–130 дБ при отсутствии средств для его снижения. Наиболее шумные гидроприводы (к ним относятся приводы с шестеренными машинами) создают шум на уровне 85–104 дБ, а обычно уровень шума значительно ниже, примерно как у электромашин, что позволяет работать без специальных средств шумопонижения.

5. Малая скорость передачи сигнала (управляющего импульса), что приводит к запаздыванию выполнения операций. Скорость прохождения сигнала равна скорости звука и, в зависимости от давления воздуха, составляет примерно от 150 до 360 м/с. В гидроприводе и электроприводе, соответственно, около 1000 и 300000 м/с.

6. Сложность выполнения заданных законов движения (по сравнению с механическими).

7. Неизбежные утечки воздуха из системы значительно понижают КПД пневмоустройств.

Таким образом, пневмоустройства следует применять в тех случаях, когда требуется обеспечить высокие скорости движения рабочего органа при относительно небольших рабочих усилиях.

15. АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К ЭЛЕКТРОПРИВОДАМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, И ПУТИ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ

Задание № 15.1

1. Ознакомиться с условиями работы электроприводов (ЭП) ЛА.
2. Определить негативное влияние условий работы на электроприводы ЛА.
3. Изучить требования, предъявляемые к электроприводам ЛА.
4. Провести сопоставительный анализ условий работы, их негативных последствий для электропривода ЛА и предъявляемых к нему требований.
5. Определить возможные пути и меры по выполнению предъявляемых к электроприводу ЛА требований.
6. Результаты работы представить в виде таблицы.

Методические рекомендации

Ниже представлены тексты по теме занятия. Изучив информацию и наметив 5–6 требований, составьте таблицу для наглядного представления результатов проделанной работы, отражающей связь условий работы, негативных последствий для ЭП с предъявляемыми требованиями и мерами по их обеспечению.

Условия работы электропривода ЛА [4, 6, 21]

Специфичность условий работы ЭП ЛА, как и всего электрооборудования ЛА, определяется широким изменением параметров окружающей среды, обусловленным как различной высотой полета, так и временем года и климатической зоной, в которых происходит эксплуатация ЛА.

Характер изменения параметров окружающей среды с ростом высоты различен для разных широт, времен года, для суши и моря. Для проведения расчетов самолетных систем были введены усредненные характеристики атмосферы – параметры так называемой международной стандартной атмосферы (ГОСТ 4401-73).

Наиболее значимыми с позиций влияния на электропривод ЛА являются следующие условия работы:

1. *Широкий диапазон изменения температуры окружающей среды от -60°C до $+50^{\circ}\text{C}$.*

Характер изменения температуры окружающей среды в зависимости от высоты над уровнем моря сложен и неоднозначен.

В тропосфере (до высоты 11 км) температура убывает в среднем на $6,5^{\circ}\text{C}$ на 1 км (характер изменения температуры обусловлен тем, что

нагрев воздуха осуществляется в основном отраженными от земной поверхности солнечными лучами).

В стратосфере (до высоты 30–35 км) температура постоянна и равна $-56,5^{\circ}\text{C}$, затем повышается и на высоте 50–55 км достигает до $+75^{\circ}\text{C}$, что обусловлено повышенным содержанием озона, который обладает способностью поглощать ультрафиолетовое излучение. На еще больших высотах температура вновь понижается вследствие уменьшения содержания озона в атмосфере. На высоте 82–83 км температура воздуха достигает -35°C .

На высотах более 90 км температура повышается, достигая 1300 К на высоте 300–400 км, и продолжает расти с высотой до 2000–3000 К. Однако, вследствие сильной разреженности воздуха физическое понятие температуры среды в термосфере носит условный характер. Температура определяется кинетической энергией частиц (скоростью движения молекул). В космосе на больших высотах температура принимается равной 0 К. Вследствие малой плотности газа на больших высотах эти температуры на работу электрооборудования не влияют.

Также влияние на температуру частей обшивки самолета и температуру воздуха, который через воздухозаборник подается для охлаждения машин с продувом, вносит аэродинамический нагрев (вызванный адиабатическим сжатием воздуха в пограничном слое), зависящий от скорости полета. При скорости 2500 км/ч температура обшивки достигает $+130^{\circ}\text{C}$, а в ряде случаев и до 400°C .

При размещении оборудования в непосредственной близости от авиадвигателей температура воздуха будет еще выше и определяется характеристиками силовых установок. При размещении оборудования в гермоотсеках в кабинах экипажа температура окружающей среды будет соответствовать условиям в отсеках и кабинах.

Отметим, что общие температурные условия определяет также и тепловое излучение соседних агрегатов и тепло, связанное с потерями самого агрегата.

В космосе температура тела определяется не окружающей средой, а лучистым равновесием, т.е. количеством поглощаемой и излучаемой энергии.

Изменение температуры агрегата, вызванное изменением температуры окружающей среды и выделением потерь агрегата при его работе, влечет изменение свойств материалов и, как следствие, может привести к изменению свойств агрегата в целом.

Выделим следующие негативные воздействия температуры:

– Изменение линейных размеров деталей агрегатов.

Вследствие температурных колебаний линейных размеров деталей в конструкции могут возникать внутренние напряжения.

– Изменение зазоров в сопрягаемых деталях.

Колебания величины зазоров создают периодические прослабления и натяги, что способствует увеличению трения в подшипниках и разрушению деталей.

– Изменение свойств смазочных материалов.

При снижении температуры смазка густеет и вследствие этого увеличивается момент сопротивления. При температуре свыше 150°C также ухудшается смазка подшипников.

– Изменение свойств диэлектриков.

При повышении температуры свойства диэлектриков ухудшаются.

– Изменение свойств конденсаторов.

Изменение температуры на 20°C влечет изменение емкости бумажных конденсаторов на 5–8%, а слюдяных на 1–1,5%.

– Изменение свойств проводников.

При изменении температуры изменяется сопротивление проводников. При изменении температуры от –50°C до +100°C сопротивление медного провода увеличится почти в 2 раза.

– Ограничения по температуре для полупроводников.

Германиевый диод теряет свои выпрямляющие свойства при температуре +100°C, а кремниевый – при +250–300°C.

– Изменение свойств магнитов.

При изменении температуры изменяются значения остаточной индукции и коэрцитивной силы

Магниты тех или иных марок недопустимо использовать при температуре выше определенного значения. Например, для магнитов, изготавливаемых из сплава Nd–Ge–В, максимальная рабочая температура (в зависимости от марки магнита) составляет от 80 до 240 °C, а Sm-Co – до 320 °C.

– Магнитные свойства сталей в пределах рабочего диапазона температур изменяются незначительно.

У стали 1411 индукция насыщения кривой намагничивания снижается на 20–22% при нагреве до +600 °C. Нагрев до «температуры Кюри» (для железа примерно – 750 °C) может привести к полной потере ферромагнитных свойств материала.

– Значительное ухудшение свойств щеток и процессов коммутации (при температурах более 220–250°C), поскольку заметное снижение сопротивления переходного контакта в этом случае увеличивает ток в короткозамкнутой секции и повышает искрение на коллекторе.

– Влияние температуры на свойства аккумуляторов.

2. Широкий диапазон изменения давления.

Атмосферным давлением называется давление, вызываемое весом вышележащих слоев воздуха и ударами его хаотически движущихся молекул. Атмосферное давление объясняется тем, что воздух подобно всем другим веществам обладает весом и притягивается землей.

На поверхности Земли стандартное давление равно приблизительно 10^5 Па (760 мм рт.ст). С ростом высоты оно снижается по экспоненциальному закону. На высоте 12 км давление в 5 раз меньше, а на высоте 35 км – в 180 раз меньше, чем на поверхности Земли. Давление окружающей среды в космосе падает до 10^{-11} Па.

С увеличением высоты на 12 метров давление падает на 1 мм рт.ст.

Для герметичных машин пониженное давление окружающей среды приводит к дополнительным требованиям ко всем герметизирующим уплотнениям и прокладкам.

3. Широкий диапазон изменения плотности воздуха.

Плотность воздуха – это количество воздуха (т.е. масса воздуха), содержащееся в 1 м^3 объема. В нормальных условиях плотность воздуха $1,225 \text{ кг/ м}^3$.

Высота атмосферы Земли составляет более 2000 км. Геокорона Земли, где еще обнаруживаются следы атмосферы, расположена на расстоянии 25000 км.

В пределах околоземного пространства до высоты 20 км находится около 95% всей массы атмосферного воздуха; остальная часть атмосферы – разреженный ионизированный газ.

Плотность воздуха прямо пропорциональна давлению и обратно пропорциональна температуре.

С увеличением высоты плотность воздуха уменьшается, что объясняется тем, что давление уменьшается в большей степени, чем уменьшается температура. По сравнению с плотностью воздуха у поверхности Земли, на высоте 12 км плотность воздуха меньше в 4 раза, на высоте 20 км – меньше в 14 раз, на высоте 35 км – меньше в 140 раз, на высоте 100 км – меньше в 1000 раз.

С уменьшением плотности воздуха:

– Снижается эффективность воздушного охлаждения (уменьшается способность воздуха отводить тепло). На высотах до 11 км одновременное снижение температуры окружающего воздуха несколько компенсирует уменьшение плотности, но на больших высотах это компенсирующее влияние отсутствует. Это приводит к необходимости снижать нагрузки и увеличивать вес ЭП.

– Возрастает электропроводность (снижается диэлектрическая прочность) воздуха. Наряду с уменьшением плотности это обуславлива-

ется и увеличением интенсивности ионизации воздуха космическими и ультрафиолетовыми лучами. Это влияет на электрическую прочность воздушных промежутков между токоведущими частями, а также на время горения дуги при размыкании электрических контактов и увеличение искры на коллекторах ЭМ. Приходится предусматривать большие изоляционные промежутки и увеличивать вес изделий. В большей степени это относится к высоковольтным машинам при рабочих напряжениях свыше 200 В и работе на высотах свыше 20 км, где этот фактор становится определяющим.

4. Высокая влажность.

Под абсолютной влажностью подразумевается количество (масса) водяного пара в 1 м³ воздуха. Она резко уменьшается, начиная с высоты 6 км. Это влечет увеличение трения и износа щеток ЭМ. Практически на высотах около 20 км работа щеточно–коллекторного узла становится невозможной.

Относительной влажностью называется отношение имеющейся абсолютной влажности к максимальной абсолютной влажности, возможной при данной температуре и давлении, выраженное в процентах. При температуре 20°С и стандартном давлении в одном кубическом метре воздуха максимально может «раствориться» 17,3 граммов воды; при – 15°С эта величина составит около 1,5 г/м³. Больше содержание влаги в воздухе при названных условиях невозможно – избыток влаги выпадает в виде росы.

Таким образом, при неизменной абсолютной влажности воздуха относительная влажность при снижении температуры возрастает и при превышении содержания парообразной влаги выше максимально возможного значения часть ее конденсируется и выпадает в виде росы (соответствующая температура называется точкой росы). Это происходит при быстром наборе высоты. Влага может попасть на агрегаты самолета и непосредственно из окружающего воздуха. Влага приводит к коррозии металлов и образованию токопроводящих дорожек на электрической изоляции.

5. Механические воздействия.

Механические воздействия характеризуются частотой и амплитудой вибрационных нагрузок, ускорениями и ударными нагрузками.

Вибрация – это длительные, знакопеременные колебания. Такие колебания возбуждаются вращающимися частями машин: валами и турбинами авиадвигателей, лопастями винтов, роторами электрических машин и насосов. Вибрация также вызывается нестабильностью процесса горения в авиадвигателях и турбулентностью обтекания воздухом корпуса самолета. Источником вибраций могут быть и другие самолет-

ные агрегаты, если они попадают в резонанс с собственной частотой колебаний.

Ударные нагрузки отличаются кратковременностью и большой начальной амплитудой колебаний, которые со временем затухают. Эти нагрузки возникают при взлете и посадке самолета, изменении его скорости и направления полета и т.д.

На ЛА частота вибрации находится в диапазоне от 0,5 до 500 Гц и выше с амплитудами до 2,5 мм, перегрузка может достигать 10 g.

Механические силы, действующие на электромеханические системы, могут привести к обрыву проводов, особенно в местах их пайки, появлению трещин и порче электроизоляционных материалов, ускоренному износу осей и подшипников в электромеханизмах, к ослаблению затяжки винтов, болтов, гаек и их самоотвинчиванию. На элементах с малой жесткостью при вибрационных нагрузках могут наблюдаться явления резонанса, которые приводят к механическим разрушениям. В этом отношении особенно критичными являются длинные трубопроводы, тонкие валы, пружины щеткодержателей.

6. Влияние внешних воздействий.

К внешним воздействиям можно отнести пары топлива, масла, радиацию и др. Сильные внешние электромагнитные поля способны вызвать сбой в системе управления ЭП. В ряде случаев ЭП работает в условиях повышенной радиации, изменяющей химико-физические свойства материалов.

7. Практически любое положение самолета в пространстве.

Особое влияние положение в пространстве оказывает при масляном распылительном охлаждении электропривода.

Требования к электроприводу ЛА [4]

Область применения и условия работы электропривода определяют требования, предъявляемые к нему. В их число входят общие требования, предъявляемые к электрооборудованию ЛА, общие требования, предъявляемые к авиационному электроприводу и специальные требования к электроприводу, определяемые его конкретным назначением. Перечислим общие требования.

1. Высокая надежность в работе.

Надежность авиационного электропривода должна существенно превышать надежность наземных электроприводов, так как последствия его отказа в работе очень опасны

Надежность задается определенной вероятностью безотказной работы в течение определенного времени при температуре окружающей среды от -60°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

Для выполнения этого требования ЭП должен обладать высокой механической, электрической, климатической и химической стойкостью и устойчивостью.

Стойкость – характеризует способность материала и электромеханизма выдерживать эксплуатационные воздействия без изменения своих свойств. Устойчивость характеризует наряду со стойкостью способность сохранять свои номинальные параметры в указанных условиях.

Общие виды механических нагрузок и климатических условий, при воздействии которых электрооборудование должно сохранять свои параметры и нормально функционировать, установлены ГОСТ 19962-71. Они в обобщенной форме отражают возможные условия эксплуатации.

Оборудование должно выдерживать механические нагрузки одного направления, возникающие при пикировании, резком изменении скорости, разворотах, фигурах высшего пилотажа, нагрузки переменных направлений, возникающие при вибрациях и перегрузки до 10g. В технических требованиях одним из показателей устойчивости является допустимая частота колебаний.

В зависимости от действующих механических нагрузок и климатических условий к разрабатываемым изделиям стандартом предусмотрены требования по степени жесткости.

Самолетное электрооборудование должно надежно работать при относительной влажности 95–98 %, замеренной при температуре +40 °С, а для тропических условий работы – до 100 %.

Изоляция должна быть механически прочной при низких температурах и иметь необходимый срок службы при высоких температурах. Критерием электрической прочности изоляции проводов является обеспечение напряжений 300 В, для электродвигателей – 500 В. Должно обеспечиваться сопротивление изоляции не менее 1Мом.

Смазка не должна быть слишком жидкой при высоких температурах, чтобы не терять своих смазочных свойств, не должна разлагаться и коксоваться. При низких температурах смазка не должна быть слишком вязкой, чтобы не увеличивать потерь, например, на трение в подшипниках.

Серийный авиационный электропривод должен иметь не менее 50–100 тысяч часов наработки на отказ.

2. Минимальная масса и габариты.

Экономия в массе оборудования позволяет уменьшить расход горючего, т.е. увеличить длительность полета, максимальную высоту и скорость набора высоты, полезную нагрузку, броню самолета или боекомплект, а также уменьшить посадочную скорость и разбег при взлете.

Требование по минимизации габаритов обусловлено ограничением места на самолете для размещения тех или иных устройств.

Показателями электропривода, характеризующими его массу, является удельная мощность – отношение мощности на валу к массе электропривода и удельный момент – отношение развиваемого длительно момента к массе двигателя. Для лучших бортовых электроприводов удельная мощность достигает 0,5–1,0 кВт/кг.

3. *Энергетическая эффективность.* Это требование задается минимальным допустимым КПД электропривода.

Экономия в расходе электроэнергии позволяет уменьшить массу генераторов или других источников электроэнергии.

4. *Удобство в обращении, минимальные затраты на обслуживание* в течение всего периода эксплуатации, *безопасность в отношении пожара и взрыва.*

5. *Агрегаты электрооборудования должны надежно работать* независимо от положения в пространстве, скорости полета, ускорений, наличия силы тяжести, от присутствия паров топлива, масла и прочих примесей.

6. *Совместимость работы электропривода с работой системы электроснабжения и другими устройствами,* находящимися на борту ЛА. Электропривод не должен снижать качество электрической энергии в бортовой сети и не вызывать помех в работе радиоустановок, магнитных компасов, контрольно–измерительных приборов и другой бортовой электронной аппаратуры.

7. *Быстродействие и хорошее качество переходных процессов.* Это требование отражает динамические качества электропривода. Требование по быстродействию задается обычно в виде времени регулирования, либо определяется в частотной области шириной полосы пропускания. Качество переходного процесса определяют его вид (апериодический, колебательный), максимальная величина перерегулирования, коэффициент затухания колебаний и т.д.

8. *Взаимозаменяемость* отдельных устройств.

9. *Технологичность.*

10. *Точность выполнения заданного движения* исполнительного механизма. Для количественной оценки этого требования задается максимальное значение ошибки.

11. *Минимальная стоимость* при выполнении всех перечисленных требований.

Наряду с этими основными требованиями, к приводам отдельных исполнительных механизмов предъявляются и более специфические требования.

Пути выполнения требований, предъявляемых к электроприво- ду

Надежность электропривода ЛА должна существенно превышать надежность наземных электроприводов.

По статистическим данным из-за большого количества аварий и низкого качества защиты срок службы электродвигателей наземного применения составляет 3–5 лет при общей наработке до отказа 500–2000 часов.

В электрических машинах надежность и срок службы определяются в основном тремя факторами: качеством электрической изоляции (20 % отказов), качеством подшипниковых узлов (32 % отказов) и надежностью щеточно–контактных устройств (25 % отказов).

Повышение надежности, в частности, может быть обеспечено с использованием следующих приемов:

1. Срок службы электрооборудования на ЛА задается меньше, чем у подобных систем общепромышленного назначения. Срок службы (ресурс агрегата) – гарантируемое заводом–изготовителем время, выраженное в часах работы агрегата. Авиационные электрические машины имеют срок службы 2500–3000 часов (срок службы пассажирского самолета – 25–30 тысяч часов).

2. Высокое качество разработки, изготовления, проведения испытаний и уровня эксплуатации ЭП.

Качество разработки электропривода определяется качеством разработки конструкции и схемотехники, использованием современной элементной базы, прогрессивными технологиями сборки, монтажа и испытаний.

Качество изготовления обеспечивается применением высококачественных материалов, совершенствованием технологии производства, методов контроля качества продукции, испытаниями в условиях, близким к действительным, автоматизацией производства и контроля

Наряду с проведением испытаний в условиях раздельного действия внешних факторов, проводятся и испытания при комбинированных воздействиях окружающих факторов, при которых возможно появление отказов, которые не выявляются в других условиях.

Высокий уровень эксплуатации определяется строгим выполнением инструкций по эксплуатации, проведением регламентных работ, использованием современных методов контроля.

Каждый из перечисленных объектов отказа не имеет прямого текущего информационного параметра и его техническое состояние приходится определять косвенным образом, т.е. по изменению других контролируемых параметров.

Постепенное старение или механический износ изоляции контролируется периодической (со сравнительно большим периодом) подачей на обмотку короткого калиброванного импульса повышенного напряжения с одновременным измерением токов утечки. Явные повреждения электрической изоляции можно контролировать по изменению температуры обмотки.

Износ щеточно–коллекторного узла рекомендуют контролировать либо оптическим способом (по интенсивности искрения), либо по вторичному признаку – по интенсивности образования озона в области искрения.

Износ подшипников, а также качество сборки чаще всего оценивают по изменению спектра вибраций. При этом разделение электромагнитных (эксцентриситет ротора по отношению к статору – на двойной частоте питания), механических (дисбаланс ротора – на частоте вращения) и подшипниковых вибраций производят на основе статистического спектрально–корреляционного анализа.

3. Использование современных средств защиты от аварийных режимов работы.

Одним из способов защиты от аварийных режимов работы является резервирование. При этом наиболее ответственный агрегат имеет такой же резервный, способный заменить его при отказе.

К резервированию можно также отнести использование сдвоенных электромеханизмов («двухмоторные» механизмы). Повышенная живучесть таких систем обеспечивается двумя независимыми силовыми каналами, в каждом из которых имеется двигатель, электромагнитная муфта сцепления–торможения и редуктор. Движение обоих каналов суммируется в дифференциальном редукторе и передается на общее выходное устройство через фрикционную муфту. При выходе из строя одного из каналов второй обеспечивает работу выходного устройства, но со скоростью, в 2 раза меньшей, чем при работе обоих каналов.

4. Отказ от использования двигателей с щеточно–коллекторными узлами и замена контактных переключателей на бесконтактные полупроводниковые элементы.

Суммарная интенсивность отказов щеточно–коллекторного узла, якоря с вращающейся обмоткой, фрикционной муфты торможения и контактной аппаратуры составляет 70–85 % от общей интенсивности отказов электропривода.

5. Рациональный выбор режимов работы ЭД, при которых снижаются предельные тепловые и механические нагрузки. Тем самым обеспечивается повышение срока службы шарикоподшипниковых узлов, изоляции, элементов механических передач.

6. Выбор структуры ЭП с минимальным количеством и простых по конструкции промежуточных преобразователей и силовых регулирующих устройств без ущерба для характеристик системы и конструкции.

7. Разработка систем и конструкций с ограниченными последствиями отказов. Применение защитных автоматов, предотвращающих опасные последствия при возникновении повреждений. Использование сигнализации отказов и состояния систем.

8. Замена механического редуцирования частоты вращения на электромагнитное.

Требование по надежности связано и с другими требованиями, такими как высокая механическая, электрическая, термическая прочность, безопасность в отношении пожара и взрыва, независимость работы от положения в пространстве, скорости полета, ускорений и наличия силы тяжести.

Температурная устойчивость.

При изменении температуры меняются линейные размеры деталей, возникают механические напряжения, что может привести к поломке конструкции. Для повышения температурной устойчивости в сопряжениях применяют детали из материалов, у которых минимальна разница температурных коэффициентов расширения. В частности, это особенно важно при посадке на накатку пакета на вал.

От внешних источников тепла агрегаты изолируют теплоустойчивыми материалами, помещают в герметичные кабины или отсеки. Для защиты от низких температур – подогревают. Агрегаты, нагревающиеся собственными потерями – охлаждают. Простейшим является естественное охлаждение – конвекция. Для этого корпус агрегата делают из материала хорошо проводящего тепло (дюралюминий), окрашивают в черный цвет, искусственно увеличивают поверхность охлаждения при помощи гофров или ребер на корпусе или делают отверстия в корпусе для вентиляции.

Снижение степени зависимости температуры агрегата от температуры окружающей среды может быть достигнуто при использовании более интенсивных способов охлаждения. Например, при жидкостном распылительном охлаждении изменение температуры окружающей среды на 200°С влечет за собой изменение температуры машины лишь на несколько градусов.

Для уменьшения влияния негативных воздействий, связанных с уменьшением плотности воздуха, применяют принудительный отвод тепла. Коммутационную и защитную аппаратуру помещают в герметичный корпус, в котором сохраняется нормальное давление и плот-

ность. Для работы в условиях сильно ухудшающейся коммутации двигателей постоянного тока применяются специальные сорта щеток.

Решение проблем повышенных вибраций и ударов.

Наиболее опасное сечение находится в местах крепления, где создаются максимальные концентрации напряжений. Агрегаты располагают так, чтобы направление их максимальной динамической устойчивости совпадало с направлением максимальной силы, возникающей при вибрации или ударах.

Для всех винтовых соединений предусматривают средства против самоотвинчивания. Обеспечивается надежная контровка всех крепежных элементов путем установки отгибных шайб с усом. Для болтов и винтов с цилиндрической головкой используется мягкая контровочная проволока, для винтов – керновка и постановка на клей.

Действующие механические нагрузки учитываются при выборе прессовых посадок деталей.

Посадки пакетов на валы, особенно у машин средней и малой мощности, производятся с использованием шпонок, исключающих проворот при механических перегрузках. Осевое крепление пакетов осуществляется гайками, стопорными пружинными кольцами или массивными стопорными кольцами, насаженными на вал с большим натягом.

При пайке всех проводников применяется дополнительное механическое крепление.

Лобовые части неподвижных обмоток наряду с пропиткой лаком и компаундом, стягиваются бандажировочными шнурами.

Для *снижения динамических усилий*, действующих на агрегат, применяют резиновые или пружинные амортизаторы. Они имеют упругий элемент, благодаря которому энергия вибраций в течение полупериода действия не успевает полностью передаться на агрегат, так как за импульсом одного знака следует импульс другого. Кроме того, часть энергии вибрации расходуется на преодоление упругости материала.

В резиновых амортизаторах затухание колебаний происходит в результате внутреннего трения в материале резины. Резиновые амортизаторы дешевы, просты по конструкции. Недостатком их является ограниченный интервал допустимых рабочих температур, слабое поглощение ударных перегрузок и то, что резина электрически изолирует агрегат от корпуса самолета, в связи с чем для металлизации необходимо ставить гибкие перемычки.

В пружинных амортизаторах затухание колебаний происходит в результате упругости пружины. В амортизаторах такого типа возможно нарастание амплитуды колебаний, которая достигает максимальной величины при равенстве частот собственных и вынужденных колебаний.

Такие амортизаторы должны быть рассчитаны на условия работы, при которых не может наступить резонанс колебаний.

Химическая (климатическая) стойкость.

Для уменьшения коррозии металлических частей применяют материалы, устойчивые против имеющихся вредных воздействий, например, кадмированное железо, покрытие алюминиевых деталей специальными антикоррозионными красками, лаками и т.п.

Взрывобезопасность.

Агрегаты, соприкасающиеся с горючими материалами и их парами, например, двигатели топливных насосов, должны иметь герметичное исполнение, исключающее возможность появления открытой дуги или искры.

Огнестойкость.

Агрегаты, работа которых необходима в аварийных условиях, должны быть огнестойкими. Они должны сохранять свою работоспособность в течение 5 минут при воздействии на их поверхность пламени с температурой 1100 °С. Скорость горения материалов в горизонтальном направлении не должна превышать 100 мм/мин.

Отсутствие помех радиоприему.

Источниками радиопомех являются искры в контактах аппаратов, щеточных узлах электрических машин и в системе зажигания, переменные магнитные и электрические поля машин и аппаратов. Защита от помех осуществляется при помощи фильтра и экранов. Провода с большими токами, которые могут образовывать местные магнитные поля и влиять на показания приборов и магнитных компасов, следует удалять от таких приборов на возможно большее расстояние.

Минимизация массы и габаритов.

Уменьшение массы и габаритов может быть достигнуто следующим образом.

1. Использование, где это возможно, легких материалов (например, алюминия, магния и сплавов на их основе); замена металлов легкими пластмассами; увеличение жесткости без утолщения детали; применение высококачественных конструкционных материалов; замена медных проводников алюминиевыми.

2. Переход на питание током повышенного напряжения.

3. Разумный выбор запаса прочности и надежности.

4. Совмещение нескольких функций в одном агрегате, рациональность кинематической схемы. Пример совмещения функций: деталь, изготовленная из диэлектрика, имеющего как конструкционное, так и изоляционное назначение; пружина, служащая упругим и токоведущим элементом.

5. Увеличение электромагнитных нагрузок на активные материалы.

При фиксированной мощности уменьшение массы и габаритных размеров может быть достигнуто при увеличении электромагнитных нагрузок: магнитной индукции в воздушном зазоре и линейной нагрузки.

Повышенные линейные нагрузки достигаются повышением плотности тока в обмотке якоря (и как следствие увеличением электрических потерь). У авиационных электрических машин плотность тока составляет 6–15 А/мм²; у электроприводов общего назначения – 3–8 А/мм².

Увеличение потерь, вызванное повышением электромагнитных нагрузок, приводит к повышению температуры элементов электродвигателя и снижению КПД. Таким образом, габаритные размеры электродвигателя заданной мощности в значительной степени определяются допустимой температурой.

Повышение индукции в воздушном зазоре возможно при применении магнитных материалов с высокими магнитными свойствами. Повышение электромагнитных нагрузок в целом возможно при применении теплостойких изоляционных материалов и эффективных систем охлаждения или при сокращенном сроке службы электродвигателя.

У авиационных электрических машин допустимые температуры нагрева для одних и тех же классов изоляции в 1,5–2 раза выше, чем у машин общего назначения. Это приводит к более напряженным тепловым режимам работы, ускоряет процесс старения изоляции, сокращая ее срок службы.

6. Использование электроприводов, спроектированных на высокие частоты вращения.

При заданной мощности масса и габаритные размеры электродвигателя снижается с увеличением номинальной частоты вращения.

Для авиационных электрических машин номинальные частоты вращения в среднем составляют 4000–10 000 об/мин, у двигателей гироагрегатов – до 30000 об/мин. Для сравнения, у электродвигателей общего назначения частоты вращения 800–3000 об/мин.

Негативные стороны повышения номинальной частоты вращения двигателя.

При высокой номинальной скорости двигателя скорость движения исполнительного механизма оказывается намного меньше, чем у электропривода. Для согласования частот вращения используются редукторы с большим передаточным отношением. Как известно, с повышением передаточного отношения возрастают масса и габариты редуктора, а с увеличением размеров растут потери на трение.

Как показывает практика, электромеханизм, состоящий из быстроходного электродвигателя и редуктора, получается, как правило, по массе и размерам меньше, чем тихоходный электродвигатель той же мощности, непосредственно сочлененный с приводимым агрегатом.

Увеличение частоты вращения (и связанной с ней частоты перемагничивания и частоты тока в обмотках) приводит:

- к увеличению потерь в стали;
- к росту проявления эффекта вытеснения тока, вызывающего увеличение активного сопротивления обмотки;
- к увеличению механических потерь;
- к увеличению длительности переходных процессов ЭД;
- к ухудшению коммутации;
- к росту механических напряжений и снижению срока службы подшипников.

Перечисленные негативные факторы обуславливают необходимость применения высококачественных конструкционных материалов и подшипников, тщательной проработки конструкции, точной балансировки ротора. Все это усложняет технологию и увеличивает стоимость двигателя.

При фиксированной частоте питающего напряжения предел повышения частоты вращения определяется минимальным числом пар полюсов ($p=1$). Для бытовой сети ($f_1=50$ Гц) максимальная синхронная частота вращения равна 3000 об/мин. Для авиационных электрических машин этого оказывается недостаточно. Необходимо повышать стандартный уровень частоты.

Отметим, что с ростом частоты тока при прочих равных условиях снижаются размеры (и масса) дросселей насыщения, трансформаторов, магнитных усилителей, конденсаторов. Однако рост реактивных сопротивлений в длинных линиях, который наблюдается при повышении частоты напряжения, приводит к повышению потерь. Кроме того, в трехфазных системах при повышении частоты напряжения повышается негативное влияние несимметричности нагрузки по фазам, ухудшающая эффективность работы ЭП.

Исследования показали, что минимум удельного веса лежит в пределах 300–600 Гц. При этих частотах получается минимальная масса большей части агрегатов электрооборудования, чувствительных к частоте, обеспечивается достаточная быстроходность двигателей и мало сказывается поверхностный эффект в проводах.

В итоге для самолетных электрических установок была выбрана система переменного тока с частотой 400 Гц. Для ряда космических аппаратов выбрана частота 1000 Гц.

16. АНАЛИЗ СХЕМ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Задание № 16.1

1. Изучить назначение и функции следящего электропривода ЛА.
2. Ознакомиться с описанием следящего электропривода ЛА, представленного на рис. 16.1.
3. Составить описание следящего электропривода ЛА, представленного на рис. 16.2.
4. Привести свой пример следящего электропривода ЛА.
5. Провести анализ представленной схемы (примера) на предмет её соответствия предъявляемым к электроприводам ЛА требованиям.

Методические рекомендации

Следящий электропривод постоянного тока релейного действия [9]

В этой схеме электропривода (рис. 16.1) используется двигатель постоянного тока последовательного возбуждения M , имеющий две обмотки возбуждения $OB1$ и $OB2$. Управление двигателем осуществляется с помощью силовых транзисторов $VT1$ и $VT2$. Каждый из транзисторов работает при определенной полярности сигнала согласования U_{Δ} , обеспечивая одно из направлений вращения двигателя. Если открыт транзистор $VT1$, ток проходит по $OB2$ и двигатель вращается в одном направлении, если же открыт транзистор $VT2$, ток проходит по $OB1$ и он вращается в другом направлении. Направление тока якоря в обоих случаях остается неизменным.

Разрядные диоды $VD3$ и $VD4$ служат для снятия перенапряжений, возникающих при отключении обладающих значительной индуктивностью обмоток возбуждения и якоря. В рассматриваемом следящем электроприводе в качестве датчиков входной и выходной величин используются кольцевые потенциометры $П1$ и $П2$, которые образуют так называемый потенциометрический измеритель рассогласования.

Движок потенциометра $П1$ (датчика входной величины) связан с выходным валом задающего устройства $ЗУ$, который представляет собой в данном случае редуктор с ручным приводом. Движок потенциометра $П2$ (датчика выходной величины) связан с валом редуктора P , расположенного на валу двигателя и рабочей машины PM . Редукторы $ЗУ$ и P имеют одинаковое передаточное число. Питание потенциометров $П1$ и $П2$ осуществляется напряжением постоянного тока U_n .

Сигнал рассогласования U'_Δ снимается с движков потенциометров $П1$ и $П2$. При их одинаковом угловом положении, что соответствует нулевому углу рассогласования $U'_\Delta = \varphi_{ВХ} - \varphi_{ВЫХ} = 0$. При этом равен нулю и сигнал U_Δ на выходе усилителя $У$, оба транзистора закрыты и двигатель неподвижен.

При возникновении рассогласования между угловыми положениями движков потенциометров $П1$ и $П2$, вызванного поворотом рукоятки $ЗУ$, сигналы U'_Δ и U_Δ становятся отличными от нуля. В зависимости от полярности сигнала U_Δ , которая определяется знаком угла рассогласования (ошибки) U'_Δ , сигнал U_Δ подается на транзистор $VT1$ (по цепи диод $VD10$ — стабилитрон $VD5$ — резистор $R3$ — диод $VD7$) или $VT2$ (по цепи диод $VD9$ — стабилитрон $VD6$ — резистор $R4$ — диод $VD8$). Если этот сигнал превышает порог срабатывания стабилитронов $VD5$ или $VD6$, то соответствующий транзистор откроется, подключая двигатель к источнику питания с напряжением U . Двигатель начнет вращаться, поворачивая вал рабочей машины PM и ось движка потенциометра $П2$ в направлении, при котором возникшее рассогласование в системе будет уменьшаться и стремиться к нулю. Когда сигнал U_Δ станет меньше напряжения открывания стабилитронов $VD5$ или $VD6$, работающий транзистор ($VT1$ или $VT2$) закроется и отключит двигатель от источника питания.

Таким образом, электропривод в данной схеме обрабатывает заданное перемещение $\varphi_{ВХ}$ с некоторой погрешностью, обусловленной нечувствительностью системы из-за порога срабатывания стабилитронов $VD5$, $VD6$. Зону нечувствительности системы стараются сделать возможно меньшей в пределах $2-3^\circ$ угла рассогласования. Однако снижение зоны нечувствительности может привести к возникновению нежелательного колебательного режима работы электропривода около положения равновесия. Эффективным средством устранения такого режима является введение в систему дополнительных сигналов по первой и второй производным сигнала рассогласования, а также использование электрического торможения после отключения двигателя.

Достоинствами следящих электроприводов релейного принципа действия являются их простота, надежность и возможность получения оптимальных траекторий движения исполнительных органов рабочих машин. К недостаткам таких систем следует отнести их склонность к колебаниям и наличие определенной нечувствительности (неточности) при слежении.

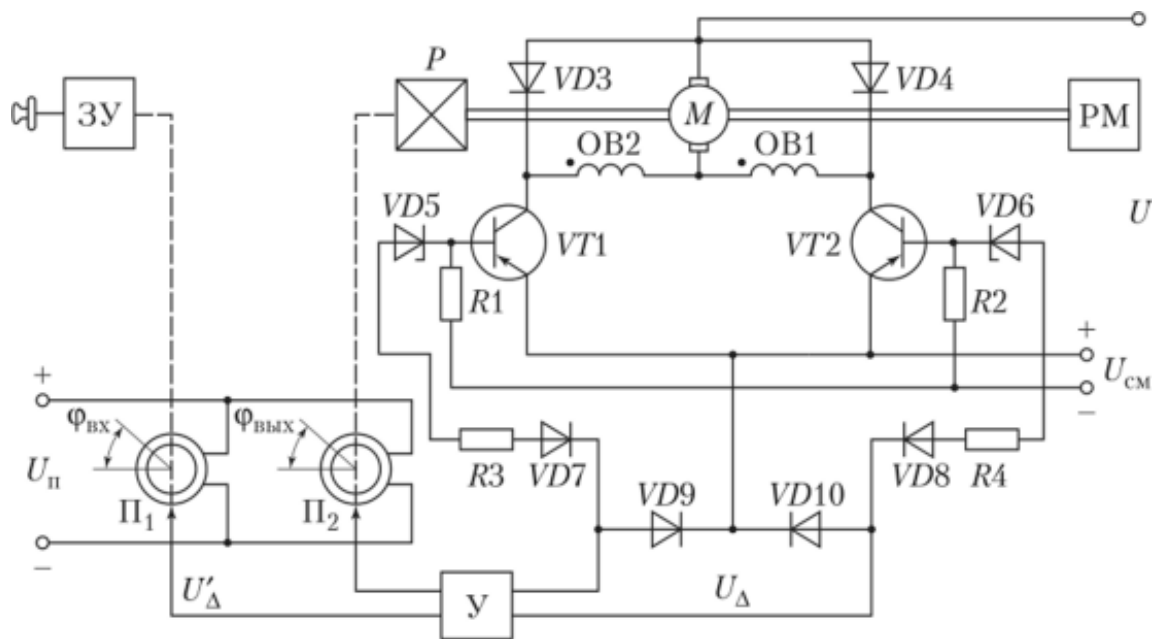


Рисунок 16.1. Схема следящего электропривода постоянного тока

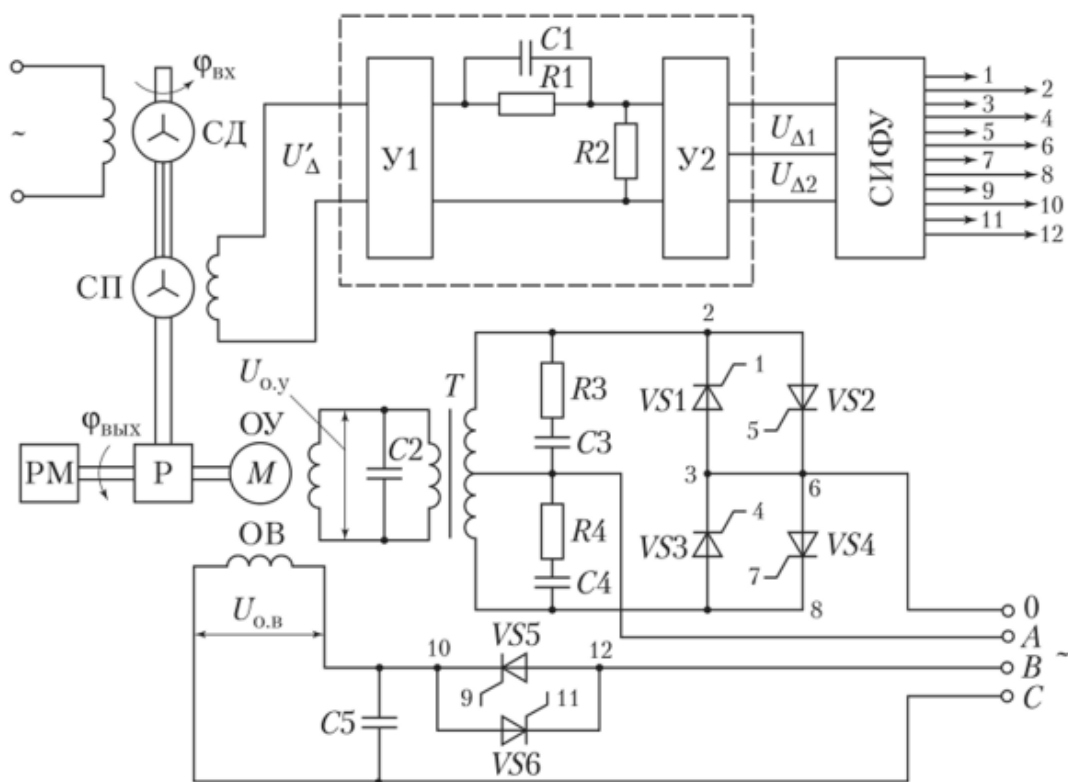


Рисунок 16.2. Схема следящего электропривода переменного тока

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арменийский Е. В., Фалк Г. В. Электрические микромашины. – М., Высш. шк., 1985. – 230 с.
2. Брандина Е. П. Электрические машины. Письменные лекции. Примеры решения задач. – СПб.: СЗТУ, 2004. – 152 с.
3. Брылина О. Г. Силовая электроника: учебное пособие к виртуальным лабораторным работам / О. Г. Брылина, М. В. Гельман, М. М. Дудкин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – 144 с.
4. Кириллов А. А. Основы электропривода летательных аппаратов: учебное пособие / В. Г. Стеблецов, А. А. Кириллов. – М.: БИБЛИО-ГЛОБУС, 2013. – 208 с.
5. Конспект лекций по дисциплине «Потребители электрической энергии. Ч.1. Преобразовательные устройства (силовые преобразователи)» для студентов дневной и заочной форм обучения специальности 6.090603 – Электротехнические системы электропотребления / Составитель Л. И. Коляда. – Мариуполь: ПГТУ, 2009. – 100 с.
6. Коптев А. Н. Авиационное и радиоэлектронное оборудование воздушных судов гражданской авиации. Кн. 1 [Электронный ресурс]: [учеб. пособие] / Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), А. Н. Коптев. – Самара : Изд-во СГАУ, 2011 – 248 с.
7. Лифанов В. А. Расчет электрических машин малой мощности: учебное пособие/ В. А. Лифанов, Г. В. Помогаев, Н. П. Ермолин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 127 с.
8. Лифанов В. А. Электрические машины систем автоматики и бытовой техники/ В. А. Лифанов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 238 с.
9. Москаленко В. В. Системы автоматизированного управления электропривода: учебник. – М.: ИНФРА-М, 2007. – 208 с.
10. Никитин В. В. Расчет электронных устройств: методические указания к выполнению расчетно-графических работ / В. В. Никитин, Е. Г. Середя, Б. А. Трифонов. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВПО ПГУПС. – 2014.
11. Номенклатурный каталог / Выпуск 1. – М.: Открытое Акционерное Общество Холдинговая Компания «Электрозавод». – 2008.
12. Расчет неуправляемого выпрямителя с фильтром и управляемого выпрямителя в режиме стабилизации выходного напряжения: метод. указания к выполнению расчет.-граф. задания и контрол. работы / сост. И. А. Патракова, С. В. Бутаков. – Архангельск: Изд-во

ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». – 2011. – 43 с.

13. Расчет основных параметров и выбор элементов управляемых выпрямителей: методические указания / Е. В. Тумаева, Д. В. Горбунова. – Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2014. – 16 с.

14. Специальные электрические машины. Источники и преобразователи энергии: Учеб. пособие для вузов. – в 2-х книгах/ А. И. Бертинов, Д. А. Бут, С. Р. Мизюрин и др.; Под ред. Б. Л. Алиевского. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 320 с.

15. Степанковский Ю. В. Преобразующие устройства приборов. Т.1. Электродвигатели. – К.: «Корнійчук», 2002. – 204 с.

16. Томашевский, Д. Н. Автономные инверторы: учебное пособие / Д. Н. Томашевский. — Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2019. — 120 с.

17. Усольцев А. А. Электрические машины автоматических устройств /Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011, – 213 с.

18. Хрущев В. В. Электрические машины систем автоматики. – Л., Энергоатомиздат, 1985 – 363 с.

19. Шахматов Е. В. Пневмопривод и средства автоматики: учеб. пособие / Н. Д. Быстров, А. А. Пголкин, В. Н. Плюхни, С. А. Петренко, Е. В.Шахматов. – Самара: Изд-во Самар, гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 112 с.

20. Электрические машины автоматических устройств: рабочая программа, методические указания и контрольные задания для студентов специальности 140601 «Электромеханика» ИДО /Сост. В. И. Попов, А. Б. Цукублин – Томск: Изд. ТПУ, 2005. – 41 с.

21. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов. В двух томах / под редакцией С.А. Грузкова. – 2-е изд., стереотип. – М. : Издательский дом МЭИ, 2018. – 568 с.

22. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств / Ф. М. Юферов. – М.: Высшая школа, 1988. – 480 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Таблица П.1

*Трансформаторы однофазные сухие частоты 400 Гц
многоцелевого назначения*

Тип	Номинальная мощность, кВА	Номинальные напряжения обмоток, В	
		первичной	вторичной (при холостом ходе)
<u>ОСМ-0,25-0,4-ОМ5</u>	0,25	127; 220; 380	26-28,5
<u>ОСВМ-0,25-0,4-ОМ5</u>	0,25	127 220 380 660	26-28,5 26-28,5; 36; 133-115; 230 26-28,5; 133-115; 230; 400 133-115; 230; 400
<u>ОСВМ-0,63-0,4-ОМ5</u>	0,63	220	26-28,5; 36; 133-115; 230
<u>ОСВМ-1-0,4-ОМ5</u>	1,0	380	26-28,5; 133-115; 230; 400
<u>ОСВМ-1,6-0,4-ОМ5</u>	1,6	660	133-115; 230; 400
<u>ОСВМ-2,5-0,4-ОМ5</u>	2,5	200 220 380 660	120 26-28,5; 36; 133-115; 230 26-28,5; 120; 133-115; 230; 400 133-115; 230; 400
<u>ОСВМ-4-0,4-ОМ5</u>	4,0	200 220 380 660	120 133-115 120; 133-115; 230 133-115; 230; 400
<u>ОСВМ-6,3-0,4-ОМ5</u>	6,3	220 380 660	133-115 133-115; 230 133-115; 230; 400
<u>ОСВМ-10-0,4-ОМ5</u>	10,0	220 380; 660	133-115; 230 133-115; 230 400
<u>ОСЗМ-16-0,4-ОМ5</u>	16,0	220	133-115
<u>ОСЗМ-25-0,4-ОМ5</u>	25,0	380 660	133-115; 230 230; 400
<u>ОСЗМ-40-0,4-ОМ5</u>	40,0	220; 660	380 133-115 230; 400

Таблица П.2

*Трансформаторы трехфазные сухие частоты 400 Гц
многоцелевого назначения*

Тип	Ном. мощ- ность, кВА	Номинальные напряжения обмоток, В *)		Схема и группа соединения обмоток
		первичной	вторичной (при х.х.)	
<u>ТСВМ-1,6-0,4-ОМ5</u>	1,6	380-220 380	230-133 400	У-Д/У _Н -Д-0-11-1-0 У/У _Н -0
<u>ТСВМ-2,5-0,4-ОМ5</u>	2,5	200 380-220 380 380	36 230-133 36 400	Д/Д-0 У-Д/У _Н -Д-0-11-1-0 У/Д-11 У/У _Н -0
<u>ТСВМ-4-0,4-ОМ5</u>	4,0	380-220 660 660-380	230-133 230-133 400	У-Д/У _Н -Д-0-11-1-0 У/У-Д-0-11 У-Д/У _Н -0-1
<u>ТСВМ-6,3-0,4-ОМ5</u>	6,3	200 380-220 380 660 660-380	36 230-133 36 230-133 400	Д/Д-0 У-Д/У _Н -Д-0-11-1-0 У/Д-11 У/У-Д-0-11 У-Д/У _Н -0-1
<u>ТСВМ-10-0,4-ОМ5</u>	10,0	380-220 660 660-380	230-133; 208-120 230-133 400	У-Д/У _Н -Д-0-11-1-0 У/У-Д-0-11 У-Д/У _Н -0-1
<u>ТСЗМ-16-0,4-ОМ5</u>	16,0	380-220 660 660-380	230-133 230-133 400	У-Д/У _Н -Д-0-11-1-0 У/У-Д-0-11 У-Д/У _Н -0-1
<u>ТСЗМ-25-0,4-ОМ5</u>	25,0	380-220 660 660-380	208-120; 230-133 230-133 400	У-Д/У _Н -Д-0-11-1-0 У/У-Д-0-11 У-Д/У _Н -0-1
<u>ТСЗМ-40-0,4-ОМ5</u>	40,0	220	230	У/У _Н -0
<u>ТСЗМ-63-0,4-ОМ5</u>	63,0	380	133	У/Д-11
		380	208	У/У _Н -0
		380	230	У/У-0
		380	400	У/У _Н -0
		660 660	133 230; 400	У/Д-11 У/У-0
<u>ТСЗМ-100-0,4-74.ОМ5</u>	100,0	220	230	У/У _Н -0
		380	208	У/У _Н -0
		380	230	У/У-0
		380	400	У/У _Н -0
		660	230; 400	У/У-0

Учебное издание

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Практикум

по курсу «Мехатронные системы летательных аппаратов»
для студентов IV курса, обучающихся по направлению
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Составитель

СИПАЙЛОВА Надежда Юрьевна