

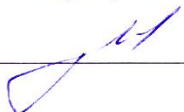
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им В.П. Грязева
Кафедра «Приборы управления»

Утверждено на заседании кафедры
«Приборы управления»
« 22 » января 20 24 г., протокол № 1

Заведующий кафедрой


В.В. Матвеев

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению лабораторных работ
по дисциплине (модулю)
«Электрический привод оптико-электронных систем»

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы бакалавриата

по направлению подготовки
12.03.03 Фотоника и оптоинформатика

с направленностью (профилем)
Интеллектуальные фотонные системы

Форма(ы) обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 120303-01-24

Тула 2024 год

Разработчик(и) методических указаний

Телухин С.В., доцент, к.т.н. _____
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)


_____ (подпись)

(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)

(подпись)

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Студенты должны являться на занятия, изучив необходимые разделы лекций по данной дисциплине, в часы, предусмотренные общеинститутским расписанием занятий. Вход в лабораторию, а также выход из нее разрешается лишь в течении перерыва между занятиями. В лаборатории студент изучает ту лабораторную работу, которая намечена по графику.

Прежде чем начать работу, он должен ознакомиться с описанием лабораторной работы. В ходе работы студент должен делать необходимые записи в ученической тетради. Расчеты должны быть выполнены в системе СИ и по ЕСКД.

По проделанным работам каждым студентом оформляется отчет. Отчет по лабораторной работе заверяется преподавателем, ведущим лабораторные работы. Сдача отчетов производится в индивидуальном порядке. При этом студент должен знать задачи и цель проведенной лабораторной работы, уметь объяснить результаты расчетов и ответить на контрольные вопросы. Отчет выполняется на листах формата А4. Образец титульного листа приведен в приложении.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторных работ необходимо соблюдать общую инструкцию по технике безопасности при проведении лабораторных работ на кафедре ПУ. Инструктаж по технике безопасности проводится перед началом лабораторных работ, о чем делается запись в журнале.

Работу следует проводить на своем рабочем месте, не отвлекая внимания студентов, выполняющих другие лабораторные работы.

Лабораторная работа №1

«Изучение конструкции двигателя постоянного и переменного тока»

1. Цель и задачи работы

Ознакомление с конструкцией двигателя постоянного и переменного тока. Изучение состава электродвигателя и принципа работы.

2. Основные теоретические положения

Двигатели постоянного тока различаются по типу возбуждения и конструкции якоря. Поток возбуждения создается либо обмотками на полюсах статора – это электромагнитное возбуждение, либо постоянными магнитами – это магнитоэлектрическое возбуждение.

По конструкции якоря двигатели подразделяются на:

1. С обычным зубцовым якорем.

Обмотка располагается в пазах ротора двигателя. Ток подвод осуществляется с помощью коллектора и щеток. Существует обратная конструкция, когда якорная обмотка находится на статоре, а вращается индуктор с постоянными магнитами (токоподвод через скользящие контакты).

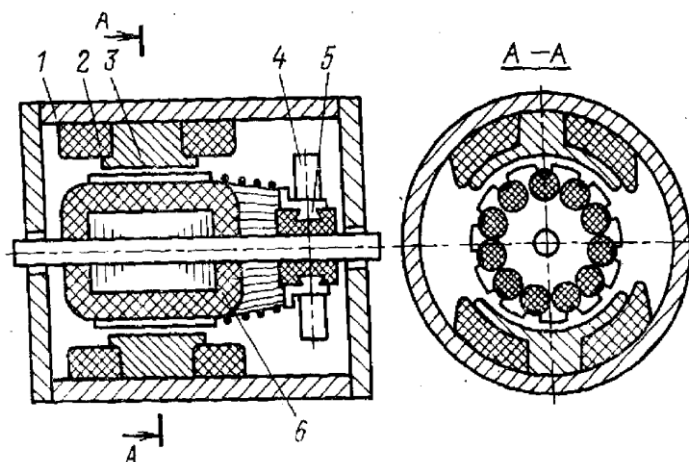


Рис. 1 ДПТ с якорем зубцовой конструкции

1 – ядро; 2 – обмотка возбуждения; 3 – полюс; 4 – щетки; 5 – коллектор; 6 – обмотка якоря

Примерами могут служить двигатели серии СД, ДП, ДПМ, МИ и др., а также коллекторные двигатели обратной конструкции.

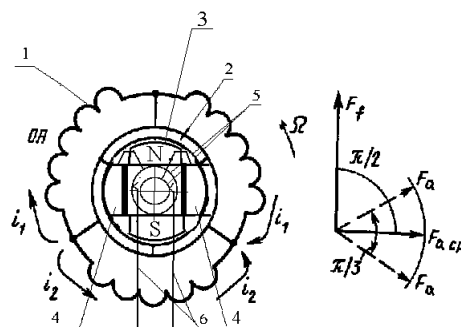


Рис. 2. ДПТ обратной конструкции

1- якорная обмотка; 2- система коллекторных пластин; 3- индуктор; 4- щетки; 5- контактные кольца; 6- скользящие контакты.

В отличие от двигателя обычной зубцовой конструкции якорная обмотка и система коллекторных пластин в двигателях обращенной конструкции неподвижны и расположены на статоре. Индуктор, который наиболее часто представляет собой постоянный магнит, и расположенные по его оси щетки выполнены вращающимися и образуют ротор двигателя. Питание к щеткам подводится через контактные кольца и скользящие контакты. В отличие от двигателей обычной конструкции эти двигатели обладают лучшими эксплуатационными и технологическими характеристиками, т.к. обмотка не вращается и лучше охлаждается.

В настоящее время в станкостроении большое распространение получили так называемые «высокомоментные» двигатели, в них используется зубцовая конструкция якоря и магнитоэлектрическое возбуждение.

В этих двигателях в качестве магнитного материала для постоянных магнитов возбуждения используются магнитотвердые ферриты и высокоэнергетические постоянные магниты на основе редкоземельных элементов.

Высокомоментные двигатели имеют следующие преимущества по сравнению с обычными двигателями:

- высокое значение развиваемого момента;
- равномерный ход при малой величине частоты вращения;
- способность выдерживать большую перегрузку по току без размагничивания постоянного магнита;
- имеют лучшие массогабаритные показатели.

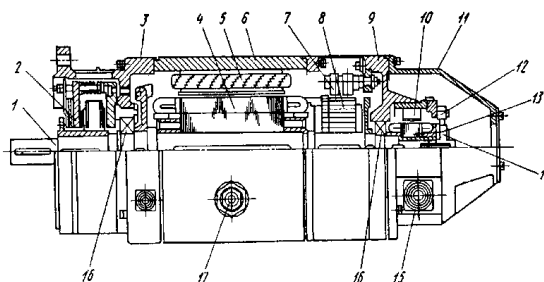


Рис. 3. Высокомоментный двигатель

1 – вал двигателя, 2 – электромагнитный тормоз, 3 – передний щит, 4 – якорь двигателя, 5 – постоянные магниты возбуждения двигателя, 6 – корпус двигателя, 7 – щетки двигателя в щеткодержателе, 8 – коллектор двигателя, 9 – задний щит, 10 – постоянные магниты возбуждения тахогенератора, 11 – кожух тахогенератора, 12 – щетки тахогенератора в щеткодержателе, 13 – якорь тахогенератора, 14 – коллектор тахогенератора, 15 – штепсельный разъем тахогенератора, 16 – подшипник, 17 – рым-болт

К ним относятся двигатели обычной конструкции серии ПВ и ДК отечественного производства, болгарские - МВН, чешские - 3SNAT. Существуют двигатели обращенной конструкции: российского производства - МВНДР; американского - ТТ45; болгарского - МВО.

2. С гладким якорем.

Обмотка располагается на поверхности якоря. Это ведет к увеличению габаритов из-за увеличения зазора и большего потока возбуждения. Однако, такой двигатель имеет меньшую электромагнитную постоянную времени, а увеличение длины и уменьшение диаметра ротора ведет к уменьшению механической постоянной времени, и с другой стороны приводит к улучшению условий коммутации.

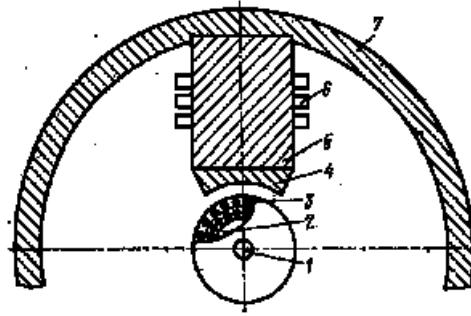


Рис. 4. ДПТ с гладким якорем

1 - вал; 2 - беззубцовый сердечник; 3 - обмотка якоря; 4 - полюсные наконечники; 5 - постоянные магниты; 6 – обмотка первоначального намагничивания; 7 – ярмо.

Примерами могут служить двигатели типа ПСТ, МИГ, ЭДМ. Отличительной особенностью конструкции этих двигателей является то, что якорь не имеет пазов, и обмотка якоря располагается на его цилиндрической поверхности.

3. С полым немагнитным ротором.

Якорь представляет собой полый цилиндр, в который запрессовывается обмотка (ДПР), либо наносится на него печатным способом. Такой двигатель обладает малой механической постоянной времени. Примерами этих двигателей могут служить двигатели серий: ДПУЯ, ДСПЯ, ДНПЯ.

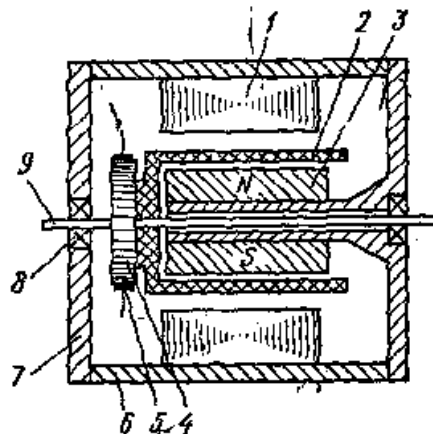


Рис. 5. ДПТ с полым ротором

1 – внешний статор; 2 – полый немагнитный якорь с запрессованной обмоткой; 3 – внутренний статор, представляющий собой постоянный магнит; 4 – коллектор; 5 - щетки; 6 – ярмо; 7 – подшипниковый щит; 8 – подшипники; 9 – вал.

4. С дисковым якорем.

Якорь имеет не цилиндрическую, а дисковую форму. В них рабочие зазоры не цилиндрические, а плоские и якорь представляет собой тонкий, пластмассовый диск.

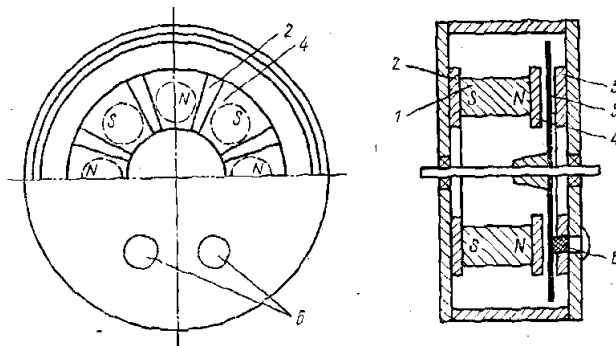


Рис. 6. ДПТ с дисковым якорем

1 – постоянные магниты; 2, 3 – кольца из магнитномягкой стали, которые служат ярмом; 4 – полюсные наконечники; 5 – полый дисковый немагнитный якорь с обмоткой, нанесенной на обе стороны диска; 6 – щетки.

Достоинства: высокие технологичность и быстродействие двигателей, безыскровая коммутация (вследствие малой само- и взаимоиндукции коммутируемых секций); хорошее охлаждение проводников.

Недостатки:

- большой немагнитный промежуток на пути магнитного потока;
- недостаточная механическая прочность якоря;
- малое число витков обмотки якоря.

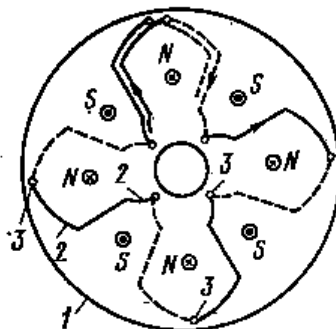


Рис. 7. Конструктивная схема якоря

1 – тонкий немагнитный диск; 2 – проводники печатной обмотки; 3 – сквозные металлизированные отверстия.

В электрических машинах переменного тока для создания вращающего момента применяется вращающееся поле. В трехфазных асинхронных двигателях оно создается подачей переменного напряжения на три обмотки статора, сдвинутые друг относительно друга на 120 градусов. При этом фазовые напряжения обмоток так же сдвинуты друг относительно друга на 120 градусов. Многополюсные машины получают, изменяя способ укладки проводников статора.

Ротор асинхронных двигателей так же содержит три фазы. Он имеет либо фазную конструкцию, либо представляет собой короткозамкнутую обмотку, которая получила наибольшее распространение. В короткозамкнутой обмотке ток ротора наводится магнитным полем статора. Эквивалентная модель асинхронной машины имеет вид, приведенный на рис. 1.

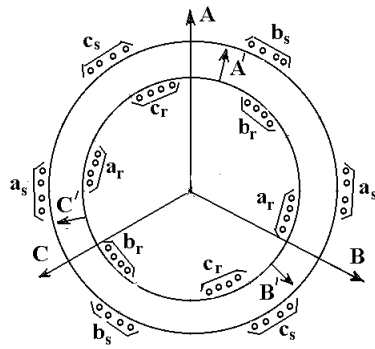


Рис. 1. Эквивалентная модель асинхронной машины

В синхронных машинах скольжение $s=0$, т.е. обеспечивается равенство угловой скорости ротора и угловой скорости вращения поля, создаваемого статорной обмоткой:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{P_n}$$

Из условия, что частота поля ротора

$$f_2 = f_1 s = 0,$$

следует, что якорь должен создавать постоянное магнитное поле. Это обеспечивается либо обмоткой, которая запитывается постоянным током или напряжением, либо постоянными магнитами. Поэтому ротор синхронных машин выполняется либо фазной конструкции, либо с постоянными магнитами.

Для надежного запуска синхронного двигателя используются короткозамкнутые контуры, расположенные в полюсных наконечниках. Это, так называемая, асинхронная схема пуска. В синхронном режиме короткозамкнутые обмотки обеспечивают дополнительное демпфирование колебаний ротора при скачках нагрузки. Также существуют самозапускающиеся двигатели, в них магнитное поле либо пульсирует, либо носит эллиптический характер.

Синхронные двигатели с постоянными магнитами изготавливаются двух исполнениях: с радиально- и аксиально-намагниченным ротором.

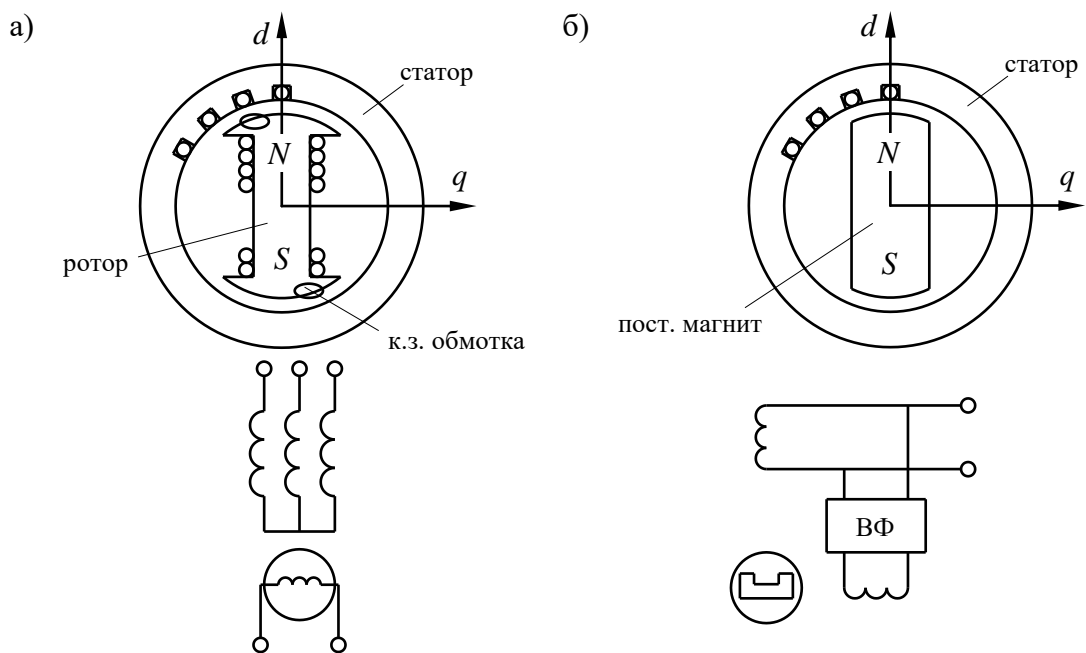


Рис. 2. Конструкция синхронной машины

3. Объекты и средства исследования

- Электродвигатель переменного тока;
- Электродвигатель переменного тока.

4. Задание на работу

Составить список основных элементов электродвигателя. Создать эскиз, поясняющий состав и принцип работы.

5. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки.
2. Указать вид двигателя. Составить список элементов.
3. Создать эскиз. Расставить позиционные обозначения.

6. Содержание отчета

1. Список элементов электродвигателя.
2. Эскиз электродвигателя.
3. Вид двигателя. Особенности конструкции. Описание принципа работы.

7. Контрольные вопросы

1. Какие существуют конструкции двигателей постоянного тока?
2. Из какого материала выполняются полые роторы?
3. Из каких материалов выполняется коллекторный узел?
4. Какие существуют конструкции двигателей переменного тока?
5. В чем заключается отличие асинхронного и синхронного двигателей?
6. Как изменяется количество полюсов?

Лабораторная работа №2

«Исследование статических характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением»

1. Цель и задачи работы

Ознакомление со статическими характеристиками двигателя постоянного тока. Определение параметров и построение характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

2. Основные теоретические положения

На рис. 1 схематически показан двигатель постоянного тока с независимым возбуждением.

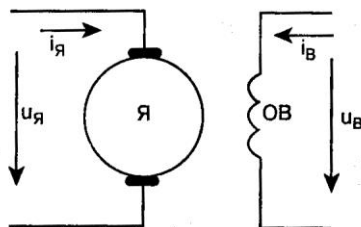


Рис. 1. ДПТ с независимым возбуждением

Уравнения, которыми описываются электромагнитные и электромеханические процессы в этом двигателе имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} u_B &= L_B \frac{di_B}{dt} + r_B i_B, \\ u_{Я} &= L_{Я} \frac{di_{Я}}{dt} + r_{Я} i_{Я}, \\ J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_H, \\ \Phi_B &= k_{\Phi} i_B, \\ e_{Я} &= k_E \omega_m \Phi_B, \\ M &= k_M i_{Я} \Phi_B. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В уравнениях (1) индексом «В» отмечены переменные и параметры, относящиеся к обмотке возбуждения, индексом «Я» – переменные и параметры, относящиеся к якорю, коэффициенты k_{Φ} , k_E , k_M , являются конструктивными постоянными.

Приведем уравнения (1) к безразмерному виду, приняв в качестве базовых единиц номинальные значения переменных двигателя:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_B &= T_B \frac{d\bar{i}_B}{dt} + \bar{i}_B, \\ \bar{u}_Я &= T_Я \frac{d\bar{i}_Я}{dt} + \bar{i}_Я + \bar{\Phi}_B \bar{\omega}_m, \\ T_m \frac{d\bar{\omega}_m}{dt} &= \bar{\Phi}_B \bar{i}_Я - \bar{M}_H, \\ \bar{\Phi}_B &= k'_\Phi \bar{i}_B. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где:

$$\bar{u}_B = \frac{u_B}{U_{B.HOM}}, \quad \bar{u}_Я = \frac{u_Я}{U_{Я.HOM}}, \quad \bar{i}_B = \frac{i_B r_B}{U_{B.HOM}}, \quad \bar{i}_Я = \frac{i_Я r_Я}{U_{Я.HOM}},$$

$$\bar{\Phi}_B = \frac{\Phi_B}{\Phi_{B.HOM}}, \quad \bar{\omega}_B = \frac{\omega_B}{\omega_{O.HOM}}, \quad \bar{M}_H = \frac{M_H}{M_{K.HOM}} \text{ – относительные переменные состояния}$$

двигателя,

$$T_B = \frac{L_B}{r_B}, \quad T_Я = \frac{L_Я}{r_Я}, \quad T_m = \frac{J \omega_{O.HOM}}{M_{K.HOM}}, \quad k'_\Phi = k_\Phi \frac{U_{B.HOM}}{r_B \Phi_{B.HOM}} \text{ – параметры двигателя.}$$

Уравнения (2) могут быть представлены в операторной форме

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_B &= (sT_B + 1) \cdot \bar{i}_B, \\ \bar{u}_Я &= (sT_Я + 1) \cdot \bar{i}_Я + \bar{\Phi}_B \bar{\omega}_m, \\ sT_m \bar{\omega}_m &= \bar{\Phi}_B \bar{i}_Я - \bar{M}_H, \\ \bar{\Phi}_B &= k'_\Phi \bar{i}_B. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В приводах постоянного тока с двигателем независимого возбуждения иногда используется так называемое двухзонное регулирование. В этом случае двигатель управляется и по цепи якоря, и по цепи возбуждения. Обычно эти процессы разнесены. По цепи якоря при постоянном потоке возбуждения управление осуществляется при значительных моментах на валу, а управление по цепи возбуждения – при малых моментах.

3. Объекты и средства исследования

Объектом исследования является имитационная модель, которая представлена на рис. 2.

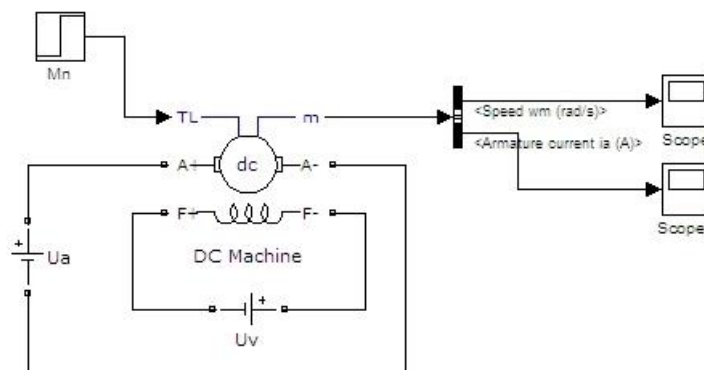


Рис. 2а. Модель ДПТ с независимым возбуждением

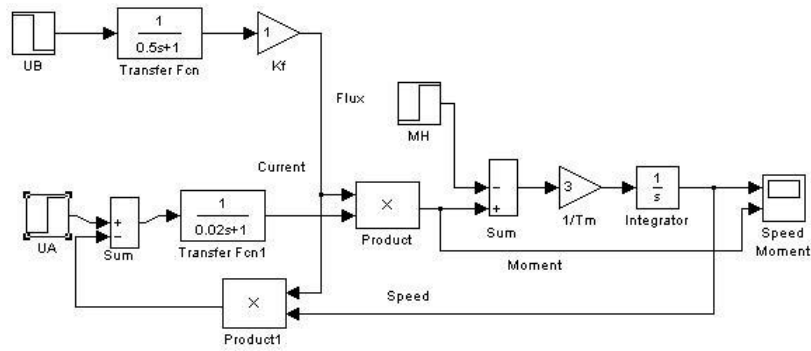


Рис. 26. Модель ДПТ с независимым возбуждением

Модель имеет два входа управления: (U_a) – управление по цепи якоря, (U_v) – управление по цепи возбуждения и один вход по возмущению (M_n) – момент нагрузки.

Момент нагрузки необходимо прилагать после того, как потоки возбуждения и управления установились (через 5 постоянных времени цепи возбуждения или управления).

4. Задание на работу

Построить механическую и регулировочную характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

5. Порядок выполнения работы.

1. Собрать модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.
2. Построить механические характеристики двигателя постоянного тока для ряда напряжений якоря (см. варианты заданий).

При построении характеристик сначала определить скорость холостого хода Ω_{xx} (при $M_n = 0$). Затем найти значение момента (пусковой момент), при котором $\Omega = 0$. Найденный диапазон по моменту разбить на четыре интервала, и определить значения угловой скорости в промежуточных точках.

Исходя из параметров двигателя, рассчитать значения скорости холостого хода, пусковой момент, жесткость механической характеристики, постоянные времени цепи возбуждения и якорной цепи, механическую постоянную времени:

$$\Omega_{xx} = \frac{U_a}{C_e}; T_{\phi} = L_{\phi}/R_{\phi}; T_{\Sigma M} = L_{\Sigma}/R_{\Sigma}; T_M = \frac{J_{\partial\phi} R_{\Sigma}}{C_e C_M}; f_{\partial\phi} = \frac{C_e C_M}{R_{\Sigma}}; M_n = f_{\partial\phi} \Omega_{xx},$$

где $C_e = C_M = k_f i_{\phi}$, $i_{\phi} = U_v / R_{\phi}$.

Построить расчетную механическую характеристику

$$\Omega_{\partial\phi}(M) = \Omega_{xx} - \frac{M}{f_{\partial\phi}},$$

и сравнить ее с полученной экспериментально. Построение характеристик двигателя постоянного тока вести в MS Excel или Mathcad.

3. Построить регулировочные характеристики двигателя для ряда моментов нагрузки. При построении характеристик взять следующий ряд моментов нагрузки: 0 , $M_{nmax}/4$, $M_{nmax}/2$. M_{nmax} – пусковой момент, соответствующий максимальному напряжению якоря. Диапазон напряжений якоря от 0 до $U_{яmax}$ разбить на четыре интервала.

Построить расчетную регулировочную характеристику

$$\Omega_{\partial\theta}(U_{\text{я}}) = \frac{U_{\text{я}} - M_{\text{н}}}{C_e f_{\partial\theta}},$$

и сравнить ее с полученной экспериментально.

4. Построить графики переходных процессов по угловой скорости и току в якорной цепи для режимов разгона, приложения нагрузки, снятия нагрузки, останова.

Для режима разгона принять $U_{\text{я}} = U_{\text{яmax}}$.

Для режима приложения нагрузки принять $M_{\text{н}} = M_{\text{нmax}}/4$.

При построении переходных процессов сначала прилагается напряжение возбуждения, затем (после окончания переходных процессов) напряжение управления, а затем приложение и снятие момента нагрузки.

6. Содержание отчета.

В отчете привести: схему включения двигателя, уравнения движения, таблицы результатов экспериментов, параметры двигателя, графики механической и регулировочной характеристик, переходные процессы.

7. Контрольные вопросы

1. Какие зоны выделяют на механической характеристике двигателя постоянного тока?
2. Что такое пусковой момент?
3. Чему равен момент, развиваемый двигателем, при скорости вращения вала равной половине скорости холостого хода?

Варианты заданий

№ Варианта	U_{θ} , В	R_{θ} , Ом	L_{θ} , Гн	$R_{\text{я}}$, Ом	$L_{\text{я}}$, Гн	k_f	$J_{\partial\theta}$, кг·м ²	$U_{\text{я}}$, В
1	10	100	10	100	1	0,125	$1,5 \cdot 10^{-7}$	10; 8; 5
2	8	80	8	80	0,64	0,08	$6,4 \cdot 10^{-8}$	8; 6; 4
3	6	60	3	60	0,36	0,05	$2,5 \cdot 10^{-8}$	6; 5; 3
4	4	40	2	40	0,2	0,032	$1,3 \cdot 10^{-8}$	4; 3; 2

Лабораторная работа №3

«Исследование статических характеристик двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением»

1. Цель и задачи работы

Ознакомление со статическими характеристиками двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением. Определение параметров и построение характеристик электродвигателя.

2. Основные теоретические положения

В двигателе постоянного тока с параллельным возбуждением обмотка возбуждения включена параллельно якорю (рисунок 1). В этом случае $\bar{u}_B = \bar{u}_R = \bar{u}$, и имеем:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} &= (sT_B + 1) \cdot \bar{i}_B, \\ \bar{u} &= (sT_A + 1) \cdot \bar{i}_A + \bar{\Phi}_B \bar{\omega}_m, \\ sT_m \bar{\omega}_m &= \bar{\Phi}_B \bar{i}_A - \bar{M}_H, \\ \bar{\Phi}_B &= k'_\phi \bar{i}_B. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

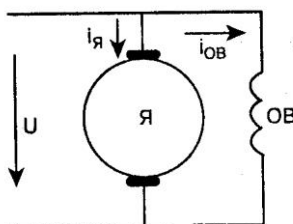


Рисунок 1. ДПТ с параллельным возбуждением

3. Объекты и средства исследования

Имитационная модель двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

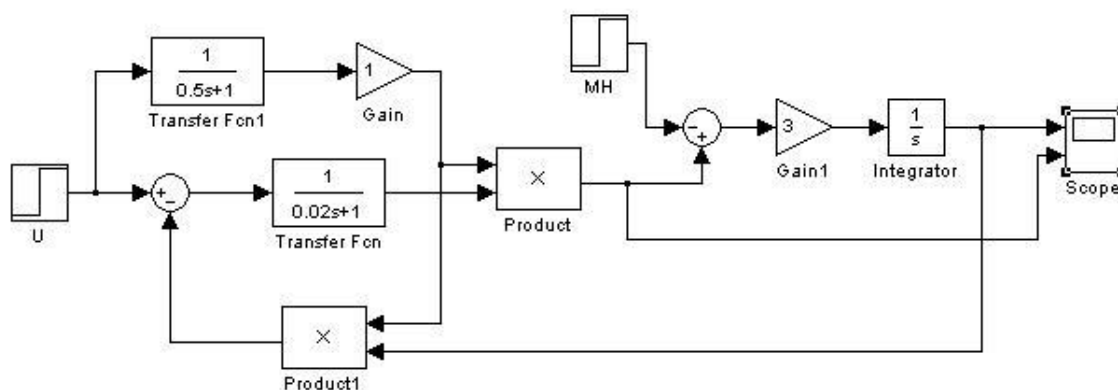


Рисунок 2. Модель ДПТ с параллельным возбуждением.

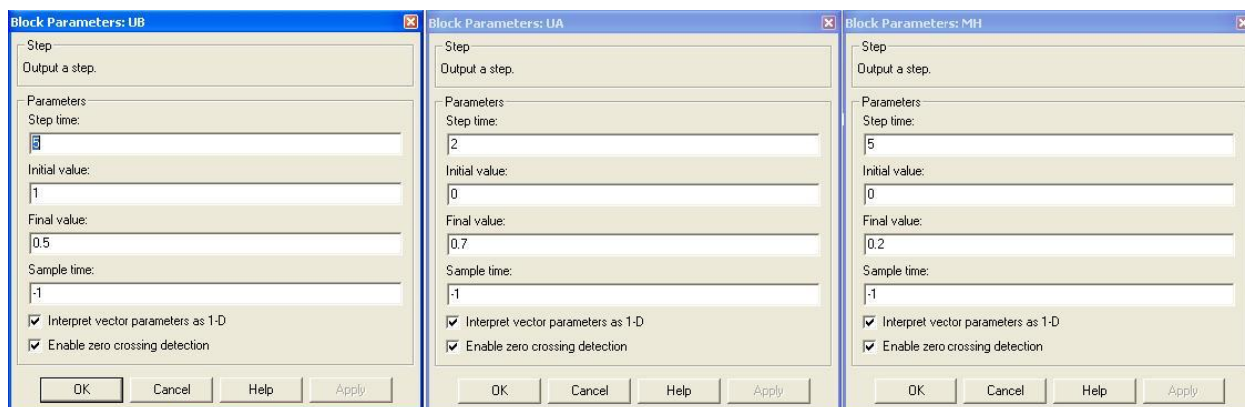


Рисунок 3. Окна настройки параметров задающих сигналов.

4. Задание на работу

Построить механическую и регулировочную характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.

5. Порядок выполнения работы.

1. Построить механическую и регулировочные характеристики электродвигателя аналогично лабораторной работе №3.

6. Содержание отчета.

В отчете привести: схему включения двигателя, уравнения движения, таблицы результатов экспериментов, параметры двигателя, графики механической и регулировочной характеристик, переходные процессы.

7. Контрольные вопросы

1. Какова особенность механической характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением?
2. Как зависит скорость холостого хода от тока возбуждения?
3. Чему равен момент, развиваемый двигателем, при скорости вращения вала равной половине скорости холостого хода?

Лабораторная работа №4

«Исследование статических характеристик двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением»

1. Цель и задачи работы

Ознакомление со статическими характеристиками двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением. Определение параметров и построение характеристик электродвигателя.

2. Основные теоретические положения

Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением показан на рис. 1. Уравнения динамики двигателя имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} u &= (L_B + L_{\text{Я}}) \frac{di}{dt} + (r_B + r_{\text{Я}})i + e_{\text{Я}}, \\ J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_H, \\ \Phi_B &= k_{\Phi} i_B, \\ e_{\text{Я}} &= k_E \omega_m \Phi_B, \\ M &= k_M i_{\text{Я}} \Phi_B. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

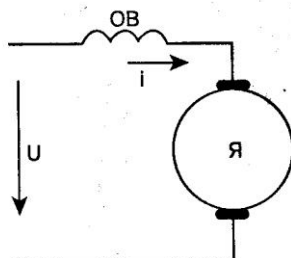


Рис. 1. ДПТ с последовательным возбуждением.

Введением базовых значений переменных

$$U_{\text{НОМ}}, \Phi_{\text{НОМ}}, \omega_{0,\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{k_R \Phi_{\text{НОМ}}}, M_{\text{к.НОМ}} = k_M \Phi_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}}{r_{\text{Я}} + r_B}$$

уравнения (1) приводятся к безразмерному виду:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} &= T \frac{d\bar{i}}{dt} + \bar{i} + k_l \bar{i} \bar{\omega}_m, \\ T_m \frac{d\bar{\omega}_m}{dt} &= k_l \bar{i}^2 - \bar{M}_H. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где: $T = \frac{L_{\text{Я}} + L_B}{r_{\text{Я}} + r_B}$, $k_l = \frac{U_{\text{НОМ}}}{(r_{\text{Я}} + r_B) \cdot I_{\text{НОМ}}}$ - параметры двигателя.

В операторном виде уравнения (2) имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} &= (Ts + 1) \cdot \bar{i} + k_l \bar{i} \bar{\omega}_m, \\ T_m s \bar{\omega}_m &= k_l \bar{i}^2 - \bar{M}_H. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

3. Объекты и средства исследования

Имитационная модель двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.

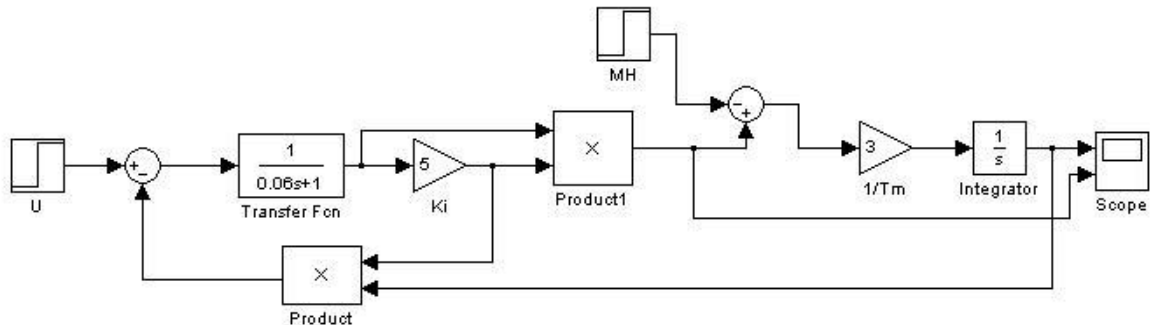


Рисунок 2. Модель ДПТ с последовательным возбуждением.

4. Задание на работу

Построить механическую и регулировочную характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.

5. Порядок выполнения работы.

1. Построить механическую и регулировочные характеристики электродвигателя аналогично лабораторной работе №3.

6. Содержание отчета.

В отчете привести: схему включения двигателя, уравнения движения, таблицы результатов экспериментов, параметры двигателя, графики механической и регулировочной характеристик, переходные процессы.

7. Контрольные вопросы

1. Какова особенность механической характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением?
2. Как зависит пусковой момент от тока возбуждения?
3. Чему равен момент, развиваемый двигателем, при скорости вращения вала равной половине скорости холостого хода?

Лабораторная работа №5

«Исследование статических характеристик асинхронного трехфазного двигателя»

1. Цель и задачи работы

Исследование функционирования асинхронного трехфазного двигателя переменного тока. Построение механических характеристик асинхронного трехфазного двигателя.

2. Основные теоретические положения

Обобщенная асинхронная машина показана на рис. 1. Она содержит трехфазную обмотку на статоре и трехфазную обмотку на роторе. Обмотки статора и ротора подключены к симметричным источникам напряжения. Математическое описание такой машины базируется на известных законах.

Уравнения равновесия ЭДС на обмотках статора и ротора базируется на втором законе Кирхгофа.

<p>Для статора:</p> $\left. \begin{aligned} u_A &= R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\ u_B &= R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \\ u_C &= R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt} \end{aligned} \right\}$	<p>Для ротора:</p> $\left. \begin{aligned} u_a &= R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\ u_b &= R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\ u_c &= R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$
---	--

В уравнениях (10.1) фигурируют мгновенные напряжения, токи и потокосцепления статора и ротора, а также активные сопротивления обмоток. Обычно обмотки выполняются симметричными, и поэтому $R_A = R_B = R_C = R_S$ – активное сопротивление статорной обмотки, $R_a = R_b = R_c = R_R$ – активное сопротивление роторной обмотки.

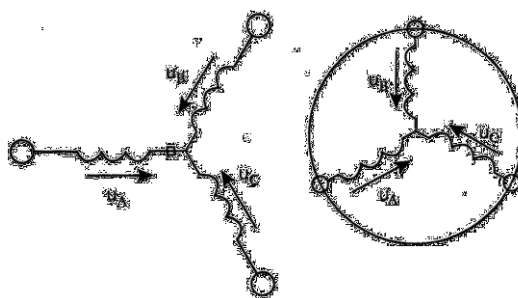


Рис. 1. Обобщенная асинхронная машина.

Вторым используемым законом является закон Ампера, который связывает потокосцепления обмоток с токами, протекающими по обмоткам.

Для статора

$$\left. \begin{aligned} \psi_A &= L_{AA} i_A + L_{AB} i_B + L_{AC} i_C + L_{Aa} i_a + L_{Ab} i_b + L_{Ac} i_c \\ \psi_B &= L_{BA} i_A + L_{BB} i_B + L_{BC} i_C + L_{Ba} i_a + L_{Bb} i_b + L_{Bc} i_c \\ \psi_C &= L_{CA} i_A + L_{CB} i_B + L_{CC} i_C + L_{Ca} i_a + L_{Cb} i_b + L_{Cc} i_c \end{aligned} \right\} \quad (2a)$$

Для ротора

$$\left. \begin{aligned} \Psi_a &= L_{AA}i_A + L_{aB}i_B + L_{aC}i_C + L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c \\ \Psi_b &= L_{bA}i_A + L_{bB}i_B + L_{bC}i_C + L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c \\ \Psi_c &= L_{cA}i_A + L_{cB}i_B + L_{cC}i_C + L_{ca}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Симметричные уравнения для определения потокосцеплений показывают, что потокосцепление каждой обмотки зависит от токов во всех обмотках; эти зависимости проявляются через взаимную индукцию. В уравнениях (2) L_{AA} , L_{BB} , L_{CC} , L_{aa} , L_{bb} , L_{cc} являются собственными индуктивностями соответствующих обмоток, все остальные – взаимными индуктивностями между соответствующими обмотками.

Третьим законом, лежащим в основе анализа, является второй закон Ньютона – закон равновесия моментов на валу машины:

$$J \frac{d\vec{\omega}_m}{dt} = \vec{M} - \vec{M}_H, \quad (3)$$

где J ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$) – момент инерции, приведенный к валу машины, учитывающий инерционность как самой машины, так и нагрузки и редуктора, $\vec{\omega}_m$ – угловая скорость вала машины, \vec{M}_H (Нм) – статический момент рабочего механизма, приведенный к валу, в общем случае он может быть функцией скорости и угла поворота.

Четвертым законом, лежащим в основе анализа машины, является закон, сформулированный Ленцем, как правило левой руки. Этот закон связывает векторные величины момента, потокосцепления и тока:

$$\vec{M} = k(\vec{\Psi} \times \vec{i}) \quad (4)$$

Схема асинхронной машины с короткозамкнутым ротором (АКЗ) получается из обобщенной схемы (рис. 1), если обмотки ротора замкнуть накоротко. При этом в общих уравнениях следует положить $\vec{u}_R = 0$. Тогда эти уравнения примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \vec{u}_S &= r_S \vec{i}_S + \frac{d\vec{\Psi}_S}{dt} + j\alpha_k \vec{\Psi}_S \\ 0 &= r_R \vec{i}_R + \frac{d\vec{\Psi}_R}{dt} + j(\alpha_k - p\nu) \vec{\Psi}_R \\ \vec{\Psi}_S &= x_S \vec{i}_S + x_m \vec{i}_R \\ \vec{\Psi}_R &= x_m \vec{i}_S + x_R \vec{i}_R \\ m &= k \text{Mod}(\vec{\Psi}_i \times \vec{i}_k) \\ \vec{T}_m \frac{d\nu}{dt} &= m - m_H \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Управление АД может осуществляться следующими способами: изменение амплитуды питающего напряжения, изменение частоты питающего напряжения, амплитудно-частотное (векторное) управление. При векторном управлении обеспечивают поддержание потокосцепления статора, изменяя амплитуду питающего напряжения пропорционально частоте. Для электромагнитного момента, создаваемого на валу двигателя, используют следующее упрощенное выражение:

$$M = \frac{2M_{кр}}{(1 + T_\nu p)(1 + T_\nu p) \frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}, \quad (6)$$

где $M_{кр} = \frac{p_n (u_{1\max} / \omega_0)^2 \omega_{0ном}}{2(x_1 + x'_2)}$ – критический момент,

$u_{1\max}$ – амплитуда питающего напряжения,

$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_{НОМ}}$ – скольжение (отношение разности частот вращения поля статора и ротора к номинальной частоте вращения поля статора),

s_k – критическое скольжение, соответствующее максимальному моменту,

$T_g = \frac{1}{\omega_{НОМ} s_k}$ – электромагнитная постоянная времени,

$\omega_{НОМ} = 2\pi f_{НОМ}$ – круговая номинальная частота питающего напряжения,

$\omega_0 = 2\pi f_0$ – круговая частота питающего напряжения при частоте f_0 ,

$\omega = 2\pi f$ – частота вращения ротора двигателя.

В статическом режиме работы зависимость для электромагнитного момента переходит в формулу Клосса:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_k + s}{s} + \frac{s}{s_k}}$$

Уравнения (3), (6) представляют собой упрощенную модель асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором. В начальный момент запуска скольжение $s = 1$, в рабочем режиме $s = 0 \dots s_k$.

3. Объекты и средства исследования

Объектом исследования является имитационная модель асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором, изображенная на рис. 2. Модель состоит из источника трехфазного напряжения, составленного из трех источников переменного синусоидального напряжения и трехфазного двигателя. Параметры питающего напряжения и асинхронной машины приведены на рис. 3.

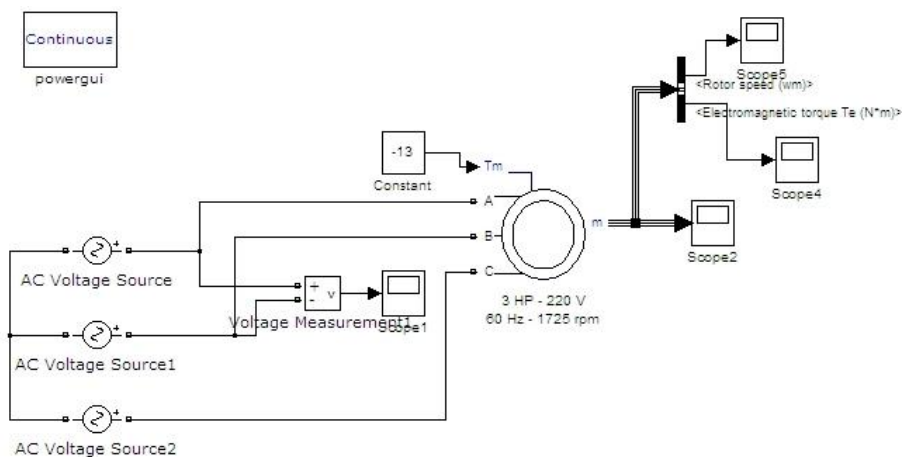


Рис. 2. Модель АД с КЗ ротором

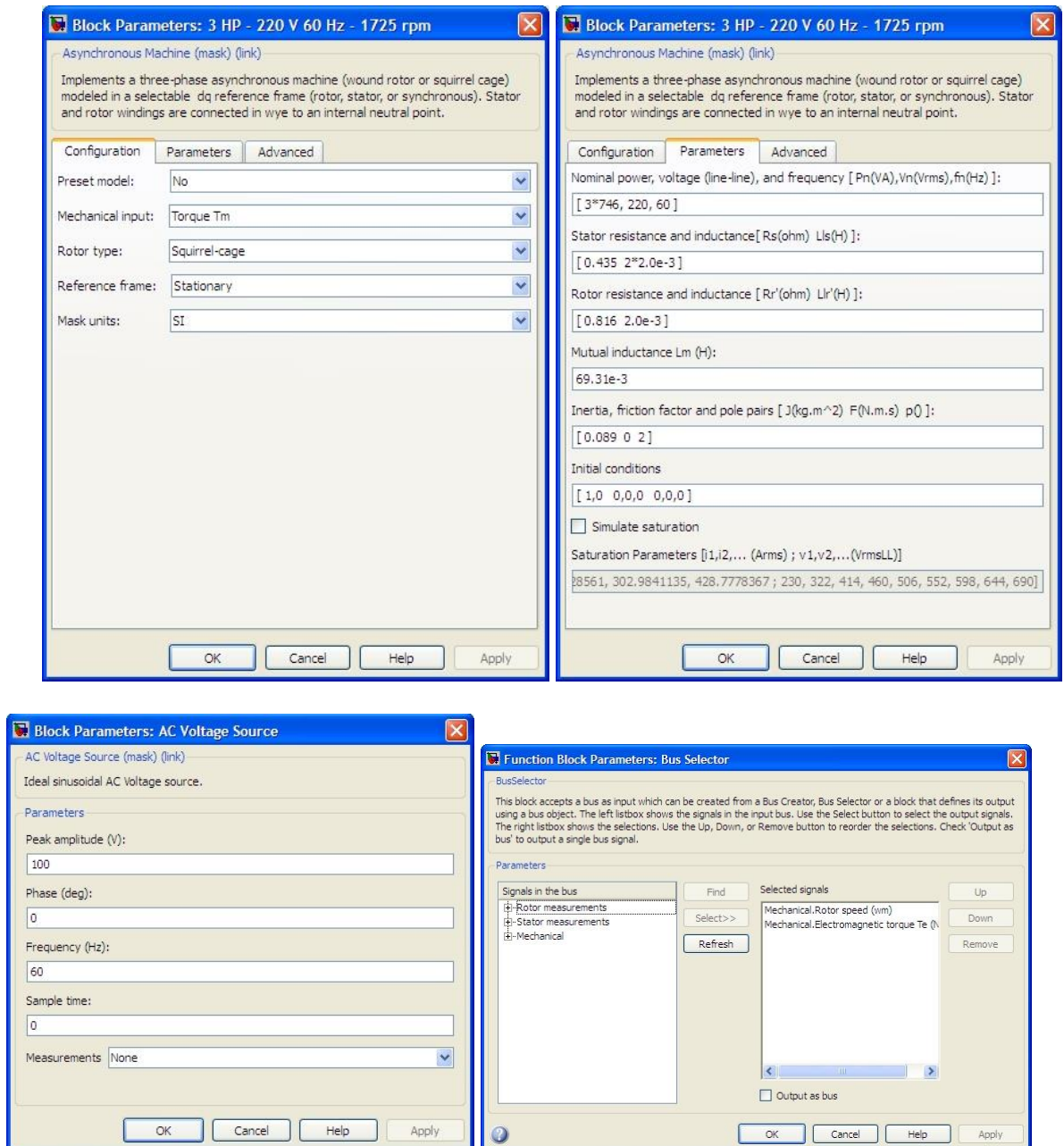


Рис. 3. Параметры блоков

Измерение характеристик питающего напряжения производится блоком multimeter. На вход асинхронной машины подается питающее напряжение и момент нагрузки. Вектор выходных координат асинхронной машины содержит токи статора и ротора во вращающейся и неподвижной системах координат, а также угловую скорость вращения вала двигателя и электромагнитный момент.

На рис. 4 изображена модель асинхронного двигателя, соответствующая уравнениям (3), (6), который имеет следующие параметры:

$$M_{кр} = 25 \text{ Нм}; s_k = 0,7; J = 0,02 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; \omega_{ном} = 3000 \text{ об/мин}, T_j = 0,02 \text{ с.}$$

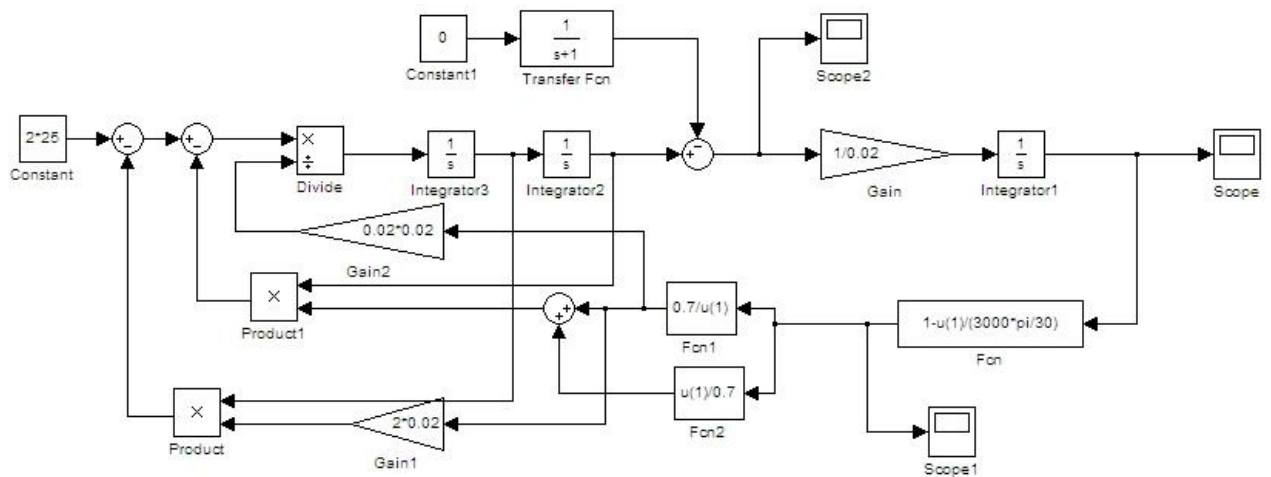


Рис. 4. Упрощенная модель асинхронного двигателя

4. Задание на работу

1. Построить механические характеристики асинхронного трехфазного двигателя

5. Порядок выполнения работы

1. Собрать имитационную модель асинхронного трехфазного двигателя переменного тока с короткозамкнутым ротором. Параметры блоков указаны на рис. 3.

Задать параметры моделирования:

Время моделирования – 2 с, шаг интегрирования – 10^{-5} с.

Диапазон момента на валу двигателя, от 0 до $M_{кр}$, разбить на 6 интервалов, в районе $M_{кр}$ шаг между точками уменьшить. Найденные значения угловой скорости записать в таблицу.

Построить механическую характеристику для двух других значений амплитуды и частоты напряжения питания статора. Построить механическую характеристику $M(s)$.

Варианты

№	$U_1, В / f_1, Гц$	$U_2, В / f_2, Гц$	$U_3, В / f_3, Гц$
1	100 / 60	90 / 56	80 / 48
2	100 / 60	80 / 48	65 / 39
3	100 / 60	75 / 45	60 / 36

Построение механической характеристики вести в MS Excel.

2. Собрать упрощенную модель асинхронного трехфазного двигателя переменного тока с короткозамкнутым ротором.

Разбить диапазон момента нагрузки на валу двигателя, от 0 до 25 Нм, на 6 интервалов (блок «Constant1»). В районе $M_{кр}$ шаг между точками уменьшить.

Найденные значения угловой скорости записать в таблицу.

По формуле Клосса построить теоретический график механической характеристики. Провести сравнение графиков теоретической и экспериментальной механических характеристик.

6. Содержание отчета.

Имитационная модель, уравнения движения, диаграммы моментов и токов, таблицы результатов моделирования, графики экспериментальной и теоретической механических характеристик.

7. Контрольные вопросы

1. Как изменяется критический момент при изменении напряжения статора?
2. Чему равно скольжение в момент пуска?
3. Какой участок механической характеристики является неустойчивым?

Лабораторная работа №6

«Исследование статических характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением с импульсным управлением»

1. Цель и задачи работы

Исследование функционирования двигателя постоянного тока с независимым возбуждением с ШИМ-управлением. Построение характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в режиме прерывистых токов.

2. Основные теоретические положения

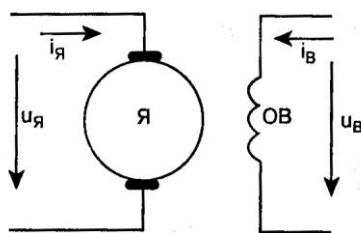


Рис. 1. ДПТ с независимым возбуждением

Уравнения, описывающие процессы в двигателе постоянного тока с независимым возбуждением, имеют вид:

$$\begin{cases} u_в = L_в \frac{di_в}{dt} + R_в i_в; \\ u_я = L_я \frac{di_я}{dt} + R_я i_я; \\ J_{\partial в} \frac{d\omega_{\partial в}}{dt} = M_{\partial в} - M_n; \\ M_{\partial в} = C_m i_я. \end{cases} \quad (1)$$

В электроприводах постоянного тока широкое применение получило импульсное управление. Сущность импульсного управления состоит в том, что изменение частоты вращения достигается не за счет изменения величины напряжения, а путем изменения времени, в течение которого к двигателю подводится номинальное напряжение. Для реверсивного управления двигатель включается в мостовую схему (см. рис. 2).

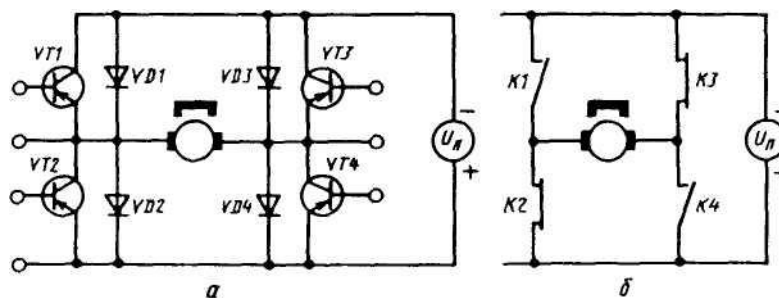


Рис. 2. Мостовая схема включения

Наибольшее применение получили два вида коммутации:

– симметричная; включение и выключение ключей происходит по диагонали моста, т.е. ключи К1, К4 и К2, К3 работают в противофазе; на двигатель подаются двуполярные импульсы;

– несимметричная; в этом случае ключи переключаются по стойкам, при этом один из ключей другой стойки замкнут, а другой разомкнут; на двигатель подаются однополярные импульсы.

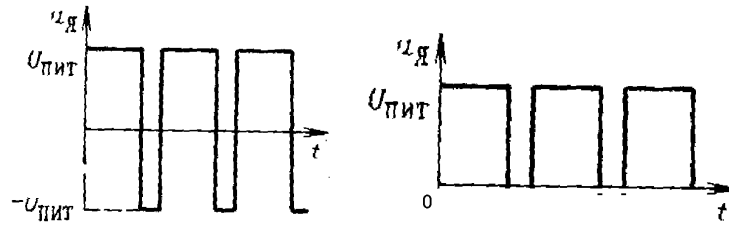


Рис. 3. Диаграммы импульсов

Диаграмма напряжения и тока якоря приведена на рис. 4.

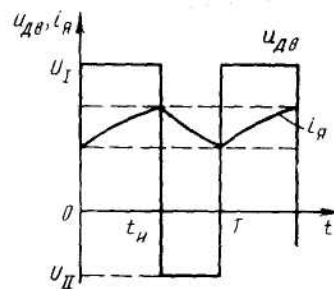


Рис. 4. Диаграмма напряжения и тока

Если период импульсов и параметры электрических компонентов таковы, что ток якоря успевает спадать до нуля, то наступает режим прерывистых токов (см. рис. 5).

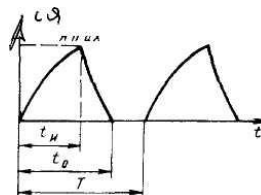


Рис. 5. Режим прерывистых токов

Этот режим возникает в зависимости от угловой скорости двигателя и момента на валу. Ширина области прерывистых токов зависит от частоты импульсов. При стремлении частоты к бесконечности ширина области стремится к нулю, а характеристика будет полностью линейной. При наличии режима прерывистых токов механическая характеристика имеет вид, приведенный на рис. 6.

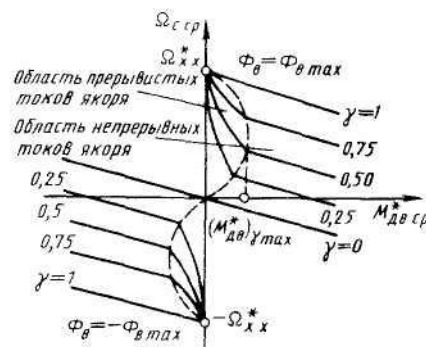


Рис. 6. Механическая характеристика

3. Объект исследования.

Объектом исследования является имитационная модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением с ШИМ-управлением, схема которой представлена на рис. 7.

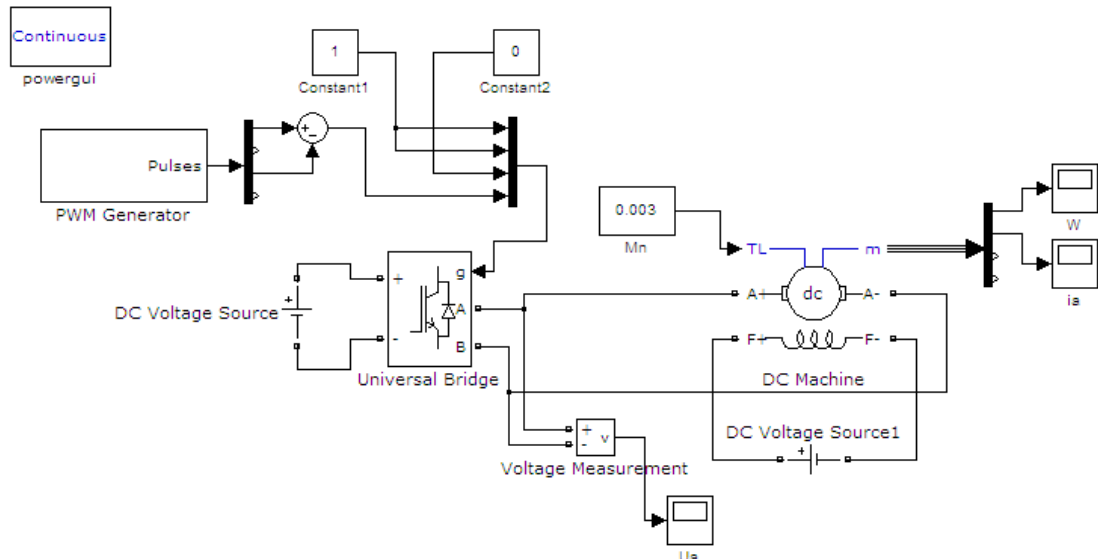


Рис. 7. Модель ДПТ с независимым возбуждением с ШИМ-управлением

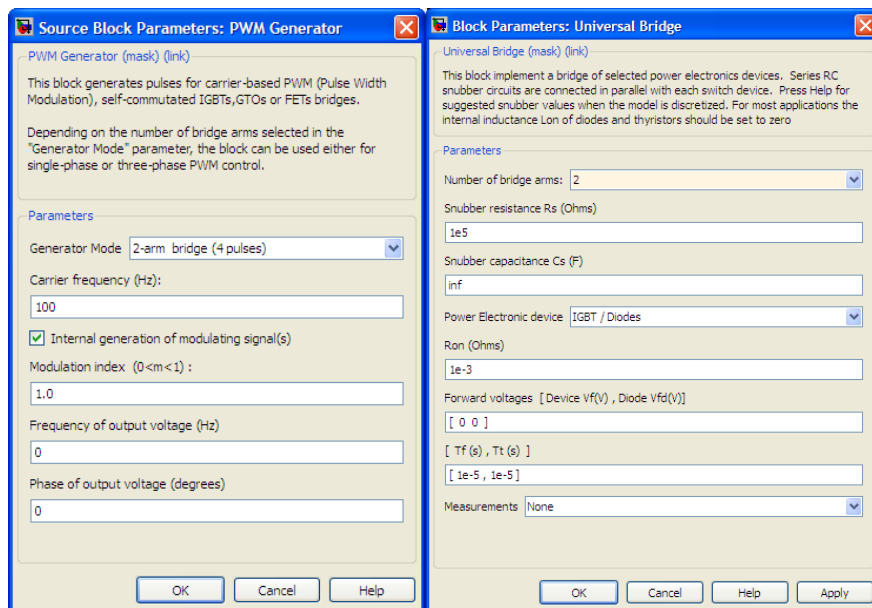


Рис. 8. Параметры ШИМ-генератора и мостовой схемы

Модель имеет два напряжения: U_2 – напряжение ШИМ-генератора, U_6 – напряжение цепи возбуждения; к двигателю приложен момент нагрузки M_n . Блок «Универсальный мост (Universal Bridge)» представляет собой мостовую схему. Для генерации ШИМ-импульсов в модель включен блок «ШИМ-генератор (PWM Generator)». Параметры двигателя и цепи возбуждения назначаются согласно работе №1.

Напряжение генератора задать как

$$U_2 = 2U_n,$$

частоту импульсов задать как

$$f_u = 1/T_{эм},$$

$T_{эм}$ – электромагнитная постоянная времени двигателя.

4. Задание на работу

Построить механическую и регулировочную характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением с импульсным управлением.

5. Порядок выполнения работы

1. Собрать имитационную модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением с ШИМ-управлением.

Механическую характеристику двигателя построить для скважностей $\gamma = 0,25; 0,5; 1$ (параметр «modulation index»). Диапазон момента на валу двигателя, от 0 до M_n , разбить на 6 интервалов.

Регулировочную характеристику снимать в точках скважностей $\gamma = 0,125; 0,25; 0,375; 0,5; 0,625; 0,75; 0,875; 1$ (параметр «modulation index») и для ряда моментов на валу: 0, $M_n/4$, $M_n/2$, $3M_n/4$.

Построение характеристик вести в MS Excel или Mathcad.

2. Построить теоретические графики механической и регулировочной характеристик.

Провести сравнение с характеристиками, полученными экспериментально, сделать выводы.

6. Содержание отчета.

Схема включения двигателя, уравнения движения, таблицы результатов моделирования, диаграммы токов и напряжений якорной цепи для одного из сочетаний напряжения на якоре и момента нагрузки, графики теоретической и расчетной механической и регулировочной характеристик.

7. Контрольные вопросы

1. Когда возникает режим прерывистых токов?
2. От чего зависит ширина зоны прерывистых токов?
3. Как выглядят характеристики при двуполярном управлении?

Лабораторная работа №7

«Исследование частотных характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением»

1. Цель и задачи работы

Исследование функционирования двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при подаче на якорь напряжения синусоидальной формы. Построение частотных характеристик двигателя постоянного тока.

2. Основные теоретические положения

При подаче на вход системы (или отдельного звена) синусоидального (гармонического) воздействия с постоянными амплитудой и частотой

$$f(t) = A_{\text{вх}} \sin \omega t$$

по окончании переходных процессов на выходе звена также установятся синусоидальные колебания

$$x(t) = A_{\text{вых}} \sin(\omega t + \varphi).$$

той же частоты, но с другой амплитудой и сдвинутые по фазе относительно входных колебаний.

Входное и выходное воздействие можно представить в комплексной тригонометрической форме:

$$f(t) = A_{\text{вх}} e^{j\omega t}; \quad x(t) = A_{\text{вых}} e^{j\omega t + \varphi}.$$

Частотной передаточной функцией называется отношение выходной величины к входной, выраженное в комплексной форме. Ее можно получить также, произведя замену p на $j\omega$ в выражении для передаточной функции:

$$W(j\omega) = \frac{X(j\omega)}{F(j\omega)} = U(\omega) + jV(\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}.$$

Отношение

$$A(\omega) = \frac{A_{\text{вых}}}{A_{\text{вх}}} = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} = |W(j\omega)|$$

связывает амплитуды входного и выходного сигналов и называется амплитудной частотной характеристикой.

Зависимость сдвига фаз выходного сигнала от частоты входного воздействия называется фазовой частотной характеристикой и определяется как:

$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega).$$

Откладывая по оси абсцисс значения входного сигнала, а по оси ординат – выходного, по окончании переходного процесса получим фигуру Лиссажу, представленную на рис. 1.

По фигуре Лиссажу амплитудная и фазовая характеристики определяются следующим образом:

$$A(\omega) = \frac{B}{A}; \quad \varphi(\omega) = -\arcsin \frac{b}{B}.$$

При непрерывном изменении сдвига фаз конфигурация эллипса меняется. При $\varphi=0$ эллипс вырождается в прямую. По мере приближения φ к $-\pi/2$ эллипс «расширяется» и при $\varphi=-\pi/2$ превращается из наклонного в прямой, так что его большая и малая оси совпадают с осями координат. Если амплитуды входных и выходных колебаний равны, то при $\varphi=-\pi/2$ эллипс превращается в окружность. При дальнейшем увеличении φ большая и

малая оси эллипса меняются квадрантами и эллипс как бы «переворачивается» вокруг одной из осей. При $\varphi = -\pi$ эллипс снова вырождается в прямую.

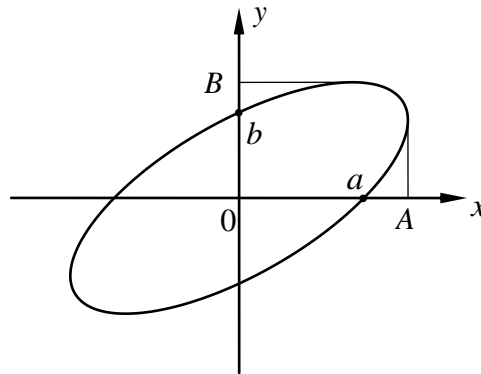


Рис. 1. Фигура Лиссажу

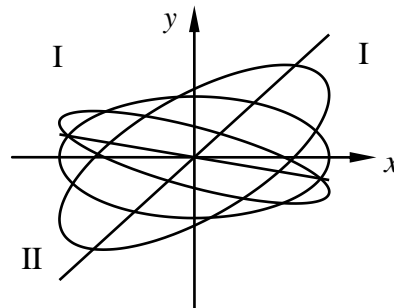


Рис. 2. Изменение эллипса с увеличением частоты

В зависимости от конфигурации эллипса сдвиг фаз определяется:

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} -\arcsin \frac{b}{B}, & \text{для I;} \\ -\pi + \arcsin \frac{b}{B}, & \text{для II;} \\ -\pi - \arcsin \frac{b}{B}, & \text{для III.} \end{cases}$$

Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика строится в логарифмическом масштабе: по оси абсцисс откладывается $\lg \omega$, а по оси ординат – $L(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)|$ – логарифмическая амплитудная характеристика, и $\varphi(\omega)$.

Передаточная функция двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, полученная по уравнениям движения (см. лабораторную работу №3) имеет вид

$$W_{\text{дв}}^{\varphi}(p) = \frac{\varphi_c(p)}{U_{\text{дв}}(p)} = \frac{1/C_e}{p(T_{\text{эм}}T_{\text{м}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1)}.$$

3. Объект исследования.

Объектом исследования является имитационная модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (см. лабораторную работу №3).

4. Задание на работу

Построить экспериментальную и теоретическую амплитудно-фазовую частотную характеристику двигателя постоянного тока.

5. Порядок выполнения работы

1. Определить параметры передаточной функции двигателя постоянного тока.
2. Найти границы диапазона частот: $0,1/T_m \dots 10/T_m$. Разбить диапазон на 10 интервалов.
3. Подавая на якорь напряжение с амплитудой равной напряжению питания и изменяя частоту напряжения, определить амплитуду колебаний вала. Результаты свести в таблицу.
4. В эту же таблицу записать теоретически рассчитанное значение амплитуды.
5. Построить в логарифмическом масштабе теоретический и экспериментальный график частотной характеристики. Провести сравнение, сделать выводы.

6. Содержание отчета

Схема снятия частотной характеристики, теоретическое выражение для частотной характеристики, таблица и графики результатов.

7. Контрольные вопросы

1. На каких частотах происходят изломы частотной характеристики?
2. Каков наклон низкочастотной асимптоты в децибелах?
3. Какое значение имеет сдвиг фаз на частоте $1/T_m$?