

Министерство образования и науки Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

ЕФИМОВ И.Г., ВИКТОРОВ О.А.

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Лабораторный практикум

Санкт-Петербург
2020

УДК 62-83

Ефимов И.Г., Викторов О.А. Электропривод: Лабораторный практикум. - 2020 - 68с.

Изложены методические указания к лабораторным работам по курсу «Электропривод». В них содержатся сведения об учебных установках, рекомендации по подготовке и выполнению практикума, пояснения к расчетам и экспериментальным исследованиям, а также требования к содержанию и оформлению отчетов.

Предназначено для студентов электротехнических и неэлектротехнических направлений подготовки бакалавров, изучающих вопросы теории электропривода и выполняющих лабораторные работы по исследованию электромеханических и регулировочных свойств электроприводов постоянного и переменного тока.

Оглавление

Введение.....	5
Методические указания по выполнению работ, обработке экспериментальных данных и оформлению отчёта	6
1. Содержание отчета.....	6
2. Обработка экспериментальных данных.....	6
3. Рекомендации по оформлению отчёта.....	11
РАБОТА № 1. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при питании от нерегулируемого источника постоянного тока.	12
1. Программа работы.....	12
2. Паспортные данные установки.....	12
3. Расчет характеристик.....	14
4. Работа в лаборатории.....	18
5. Обработка результатов экспериментов и оформление отчета	25
РАБОТА № 2. Исследование механических характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.....	29
1. Программа работы.....	29
2. Паспортные данные установки.....	29
3. Расчет искусственных механических характеристик.....	31
4. Работа в лаборатории.....	35
5. Обработка результатов экспериментов и оформление отчета	41
РАБОТА №3. Исследование характеристик системы генератор-двигатель	44
1. Программа работы.....	44
2. Паспортные данные установки.....	44
3. Расчет характеристик.....	45
4. Работа в лаборатории.....	49
5. Обработка результатов экспериментов и оформление отчета	53
РАБОТА № 4. Исследование механических характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором при питании от сети ..	56
1. Программа работы.....	56

2.	Данные машин и сопротивлений.....	56
3.	Расчет характеристик.....	57
4.	Работа в лаборатории.....	61
5.	Обработка результатов экспериментов и оформление отчета	66

Введение.

В практикуме основное внимание уделено методикам теоретических и экспериментальных исследований электроприводов постоянного и переменного тока при питании двигателей от сети или регулируемых источников.

Теоретические исследования включают расчеты характеристик электроприводов по паспортным данным для указанных в задании схем включения, параметров и режимов работы. Все необходимые данные, электрические схемы, а также методики расчетов приведены в пособии.

Цель экспериментальных исследований состоит в приобретении студентами знаний и практического опыта по:

- методикам снятия характеристик приводов в двигательном и тормозных режимах и обработке данных эксперимента;
- работе с измерительными приборами и освоению методов измерения электрических и неэлектрических величин;
- анализу и качественной оценке полученных результатов;
- определению причин расхождения расчетных и экспериментальных характеристик.

Лабораторные установки, на которых выполняются работы, состоят из машинных агрегатов и стендов с силовыми преобразователями, измерительными приборами и электрическими аппаратами. В состав машинных агрегатов входят испытуемая машина, нагрузочная машина с инкрементным датчиком скорости. Электрические схемы стендов готовы к проведению экспериментов и требуют только сборки (конфигурации) с помощью пакетных переключателей, расположенных на стенде.

Методические указания по выполнению работ, обработке экспериментальных данных и оформлению отчёта

1. Содержание отчета

Отчет должен включать:

- принципиальную электрическую схему установки;
- данные машин;
- задание на работу;
- расчетные формулы с необходимой расшифровкой величин;
- примеры расчета, доведенные до числового результата, с указанием размерности;
- таблицы, в которых приведены результаты расчета характеристик и обработки экспериментальных данных;
- графики теоретических и экспериментальных характеристик;
- выводы с оценкой влияния параметров схемы на вид механических характеристик и обоснованием причин расхождения теоретических и экспериментальных характеристик.

2. Обработка экспериментальных данных

2.1. Расчет момента двигателя

Для сравнения расчетных и экспериментальных механических характеристик необходимо располагать не только значениями ω [рад/с] и момента двигателя M_d [Нм], но и их знаками.

Измерительное устройство скорости показывает не только ее величину, но и знак. Пересчет экспериментальных значений n [об/мин] в ω [рад/с] выполняется по формуле: $\omega = \pi \cdot n / 30$.

Момент двигателя M_D непосредственно не измеряется, устройство же указывает только значение тока нагрузочной машины I_{HM} , которое в дальнейшем используется для определения расчетным путем: $M_{HM} = K_M \cdot I_{HM}$.

Как известно, в установившемся режиме соблюдается баланс моментов: двигателя (M_D), нагрузочной машины (M_{HM}) и потерь холостого хода ($M_{ХХ}$), при котором их сумма равна нулю:

$$M_D + M_{HM} + M_{ХХ} = 0. \quad (1)$$

Знак момента нагрузочной машины зависит от способа ее включения: в направлении «Согласно» ($M_{HM} > 0$), а в направлении «Встречно» $M_{HM} < 0$.

Момент потерь холостого хода всегда препятствует движению независимо от направления вращения. Поэтому при изменении направления вращения он также меняет знак: $M_{ХХ} < 0$ при $\omega > 0$, а при $\omega < 0$ $M_{ХХ} > 0$. Величина $M_{ХХ}$ во всех работах определяется для измеренных значений скорости n по таблицам, приведенным в разделе «Данные машин и сопротивлений».

Момент нагрузочной машины M_{HM} рассчитывается по ее току I_{HM} , отображаемому на дисплее клавишной панели: $|M_{HM}| = K_M \cdot I_{HM}$. Необходимо учитывать, что у нагрузочной машины (переменного тока) измеряемый ток I_{HM} , *отражает только модуль момента*, а знак зависит от способа включения машин: встречном или согласном.

Первый и третий квадранты соответствуют двигательному режиму работы двигателя, второй и четвертый – тормозному. Знаки скорости и момента в *двигательном режиме одинаковы* и поэтому принимаются: в первом квадранте положительными, а в третьем – отрицательными. А в *тормозных режимах* (II и IV квадранты) – *противоположными*.

Несколько сложнее протекают процессы при переходе двигателя из двигательного режима в тормозной, что следует учитывать при обработке

экспериментальных данных. В качестве примера на Рис.1 приведены механические характеристики двигателя постоянного тока: естественная (зависимость 1) и искусственная с добавочным сопротивлением в цепи якоря (зависимость 2).

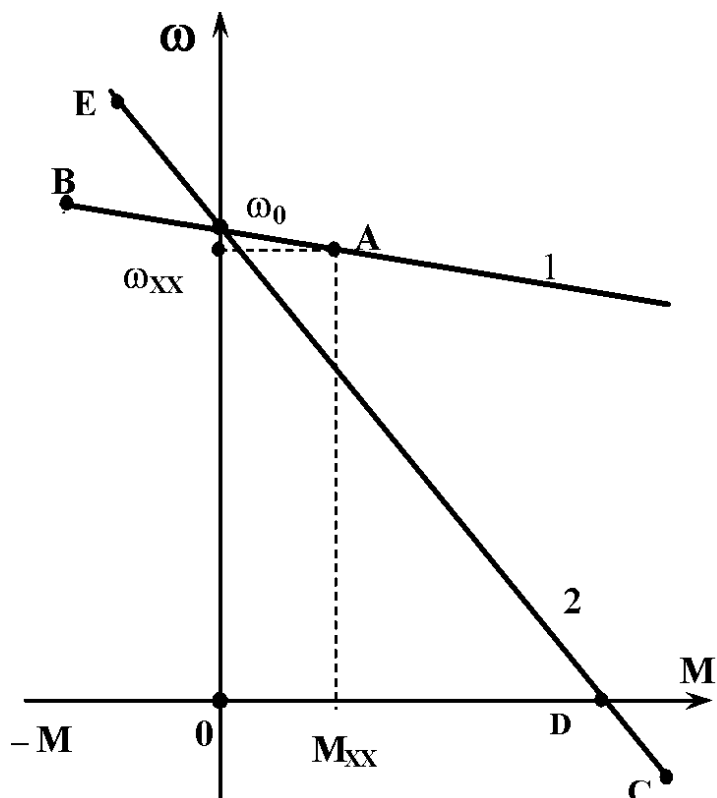


Рис.1. Механические характеристики двигателя постоянного тока

1) Переход из двигательного режима в режим рекуперативного торможения (на участки $\omega_0 B$ и $\omega_0 E$)

При выключенной нагрузочной машине, двигатель работает в режиме реального холостого хода (точка A), преодолевая потери холостого хода M_{xx} . Необходимо записать значение n_{xx} (ω_{xx}) и $I_{я}$. Если включить нагрузочную машину и увеличивать момент M_{HM} в направлении «согласно», то она начнет помогать двигателю преодолевать M_{xx} , благодаря чему ток якоря $I_{я}$ и $M_{д}$ на интервале от точки A до точки ω_0 будут уменьшаться. Это означает, что обе

машины работают в двигательном режиме, что затрудняет обработку данных.

Поэтому на интервале $(\omega_0 - A)$ следует записывать показания только в двух указанных точках: A и ω_0 .

При $I_{я} = 0$ ($M_{д} = 0$) потери полностью преодолеваются нагрузочной машиной наступает идеальный холостой ход ($M_{д} = 0$; $\omega = \omega_0$), который является границей между режимами. При дальнейшем увеличении $M_{НМ}$ (на отрезках ω_0B и ω_0E) двигатель работает в режиме рекуперативного торможения: $\omega > \omega_0$; $I_{я} < 0$; $M_{д} = -M_{НМ} + M_{ХХ} < 0$.

2) Переход в режим противовключения (на участок DC).

При $\omega = 0$ (в точке D) из-за изменения направления вращения $M_{ХХ}$ скачком меняет свой знак ($M_{ХХ} > 0$), что затрудняет определение $M_{д}$ в этой точке. Поэтому измерения следует производить только до и после нее. Рекомендуемые значения: $n = + 100$ об/мин и $n = - 100$ об/мин.

Этот режим возможен только при достаточно малых жесткостях механических характеристик.

С учетом изложенного, следует сделать вывод о том, что:

1. В двигательном режиме $M_{д} > M_{НМ}$ (по **абсолютным** значениям), т.к. он преодолевает $M_{ХХ}$. В тормозном режиме $M_{д} < M_{НМ}$, т.к. $M_{ХХ}$ преодолевается нагрузочной машиной, которая при этом работает в двигательном режиме.

Таким образом, **в любом случае момент будет больше у машины, работающей в двигательном режиме.**

2. $M_{д}$ необходимо определять следующим образом:

а) НМ отключена ($M_{НМ} = 0$; $\omega = \omega_{ХХ}$):

$$M_{д} = M_{ХХ}$$

- b) НМ включена в направлении «Согласно» и $\omega > \omega_0$: $M_{д} = -M_{нм} + M_{хх}$
- c) НМ включена в направлении «Встречно», $\omega > 0$: $M_{д} = M_{нм} + M_{хх}$
- d) НМ включена в направлении «Встречно», $\omega < 0$: $M_{д} = M_{нм} - M_{хх}$

Результаты расчетов сводятся в таблицу, приводимую в отчете:

Таблица 1

Экспериментальные данные				Результаты обработки			
U _я	I _я	n	I _{нм}	ω	M _{нм}	M _{хх}	M _д
В	А	об/мин	А	рад/с	Нм	Нм	Нм

3. Построение графиков

- 1) Расчетные характеристики для всех опытов рекомендуется строить на одном графике. В этом случае удобнее сравнивать и давать оценку влияния параметров и их вариации на вид механических характеристик, что является основной целью лабораторных работ. При большом числе характеристик их следует разместить на двух рисунках.
- 2) Экспериментальные характеристики для большей точности и удобства оценки расхождения рекомендуется строить попарно с расчетными для каждого опыта на отдельных графиках.
- 3) Все характеристики, включая расчетные, должны строиться в диапазонах изменения переменных, использованных в экспериментах, с учетом не только их численных значений, но и режимов работы двигателя.
На графиках назначать: по оси ординат - скорость, по оси абсцисс - момент.
- 4) Характеристики на графиках должны иметь обозначения (номера, цвет, тип линий или другие признаки), которые расшифровываются в надписи под рисунком или тексте. Графики не должны быть мелкими, для чего следует использовать всю ширину страницы.
- 5) Материал следует располагать для каждого пункта программы работы блоками, включающими:

- a. таблицу обработки экспериментальных данных;
- b. график;
- c. выводы.

3. Рекомендации по оформлению отчёта

1. Оформление отчета предпочтительно выполнять на компьютере, т.к. для этого можно использовать электронную версию учебного пособия: схему, паспортные данные, формулы и т.п. Представление отчета в электронном виде обязательно.
2. В расчетах для каждой характеристики необходимо привести пример для одной точки. В результатах расчетов необходимо указывать не только численные значения величин, но и их размерности.
3. Сравнение и анализ характеристик с точки зрения влияния внешних факторов, а также расхождение теоретических и экспериментальных механических характеристик должны проводиться отдельно по двум показателям: скорости идеального холостого хода и наклону механических характеристик. В зависимости от того, по какому из этих показателей характеристики отличаются, предполагаемую причину расхождения следует устанавливать, используя выражение механической характеристики.

РАБОТА № 1. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при питании от нерегулируемого источника постоянного тока.

1. Программа работы.

1.1. Подготовка к работе.

Рассчитать и построить следующие механические характеристики:

1.1.1. Естественную.

1.1.2. Искусственную при ослабленном магнитном потоке Φ' .

1.1.3. Искусственные с последовательными сопротивлениями в цепи якоря $R_{П1}$ и $R_{П2}$.

1.1.4. Искусственные для сложной схемы включения с последовательным сопротивлением $R_{П}$ и шунтированием якоря сопротивлением $R_{Ш}$.

1.1.5. Искусственные в режиме динамического торможения при $R_T = R_{Ш}$ для тех же значений сопротивления $R_{Ш1}$ и $R_{Ш2}$.

1.2. Работа в лаборатории

1.2.1. Ознакомление с устройством лабораторной установки, расположением и назначением оборудования.

1.2.2. Подготовка к работе.

1.2.3. Снятие механических характеристик, указанных в п.п. 1.1.1 ÷ 1.1.4.

1.3. Оформление отчета

2. Паспортные данные установки

2.1. Испытуемая машина (ИМ): Двигатель постоянного тока независимого возбуждения, тип: 4ПО100S1:

$P_H = 0,55$ кВт; $U_H = 220$ В; $I_{яH} = 3,5$ А; $n_H = 1000$ об/мин; $I_{вH} = 0,58$ А; $R_D = 11,0$ Ом;

Таблица 2 Зависимость коэффициента $c\Phi$ двигателя от тока возбуждения I_B

$c\Phi$	Вб	1,02	1,3	1,45	1,55	1,65	1,7	1,73	1,75	1,79
I_B	А	0,2	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,58	0,65

2.2. *Нагрузочная машина (НМ).* Тип: CFM 71S:

$$M_H = 5,0 \text{ Нм}; U_H = 380 \text{ В}; f_H = 100 \text{ Гц}; I_H = 2,2 \text{ А}; n_H = 2000 \text{ об/мин.}$$

2.3. *Приводной преобразователь:* MOVIDRIVE MDX61B0022-5A3:

$$P_H = 2,2 \text{ кВт}; U_H = 3 \times 380 \text{ В}, f_H = 50 \text{ Гц}; I_H = 5,5 \text{ А}; k_M = 2,27 \text{ Нм/А.}$$

2.4. *Механические потери* (момент холостого хода M_{XX}):

Таблица 3

Скорость ω, рад/с		20	40	60	80	100	120	140	150
Момент M_{XX}, Нм	ЛУ1	0,55	0,63	0,7	0,75	0,78	0,85	0,9	0,93
	ЛУ3	0,49	0,52	0,54	0,56	0,58	0,6	0,62	0,64

2.5. *Добавочные сопротивления R_{II} и R_T (R_{III}):*

Таблица 4

Положение переключателя $S1$	1	2	3	4	5	6	7	8
Сопротивление R_{II}, Ом	63,0	33,5	43,1	49,7	13,7	20,3	29,8	0

Таблица 5

Положение переключателя $S2$	1	2	3	4
Сопротивления $R_T = R_{III}$, Ом	∞	68,5	31,0	38,9

Таблица 6

Переключатель $S3$	1	2	3
Обозначение	СЕТЬ, ГД, УВД	R_{III} уст. $S2$	$R_{III} = 0$
	Питание от источника	Динамическое торможение	

3. Расчет характеристик

Основной статической характеристикой двигателя является его механическая характеристика $\omega = f(M)$, выражение которой для двигателя постоянного тока имеет вид:

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{R}{(c\Phi)^2} M, \quad (1)$$

где U – напряжение источника, Φ – магнитный поток, R – полное сопротивление якорной цепи, c – конструктивная постоянная двигателя; ω и M – текущие значения скорости [рад/с] и момента [Нм].

В двигателях постоянного тока независимого возбуждения магнитный поток не зависит от нагрузки, т.е. $c\Phi = \text{const}$, а его величина устанавливается током возбуждения $I_{вд}$ согласно заданию и кривой намагничивания, приведенной в паспортных данных двигателя (Таблица 2).

U и R для различных схем включения двигателя могут отличаться, но при изменении нагрузки остаются постоянными, т.е. для конкретной характеристики $U = \text{const}$ и $R = \text{const}$. Поэтому в координатах ω и M механические характеристики представляют собой прямые линии (Рис. 2).

Выражение (1) можно представить иначе:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_C, \quad (2)$$

где: $\omega_0 = \frac{U_H}{c\Phi_H}$ – скорость идеального холостого хода ($M = 0$), которая соответствует точке пересечения характеристик с осью ω ;

$\Delta\omega_C = \frac{R}{(c\Phi_H)^2} M$ – статическое падение скорости, обусловленное изменением нагрузки M , которое определяет наклон характеристики.

Так как M является аргументом функции ω , то угол наклона зависит только от величины множителя $\frac{R}{(c\Phi_H)^2}$. При его постоянстве падение

скорости $\Delta\omega_c$ пропорционально нагрузке M , а все механические характеристики представляют собой прямые линии и строятся по двум точкам:

$$1) M = 0, \omega = \omega_0;$$

$$2) M = M_H, \omega = \omega_0 - \Delta\omega_{CH},$$

$$\text{где: } M_H = c\Phi_H I_{ЯН}; \Delta\omega_{CH} = \frac{R}{(c\Phi_H)^2} M_H.$$

Характеристики строятся не только в первом, но и в других квадрантах, если двигатель работал в тормозных режимах (Рис. 2).

Расчет производится по паспортным данным двигателя. Величина $c\Phi_H$ определяется из Таблица 2, приведенной в п.2.1. При номинальном токе возбуждения $I_{ВН} = 0,58$ А она равна: $c\Phi_H = 1,75$ Вб. Далее рассчитываются значения: $\omega_0 = \frac{U_H}{c\Phi_H}$ и $M_H = c\Phi_H I_{ЯН}$. Величина R зависит от схемы включения и заданных значений $R_{П}$ и $R_{Ш}$.

Все механические характеристики строятся по двум точкам, но в расширенном интервале, который определится во время экспериментов.

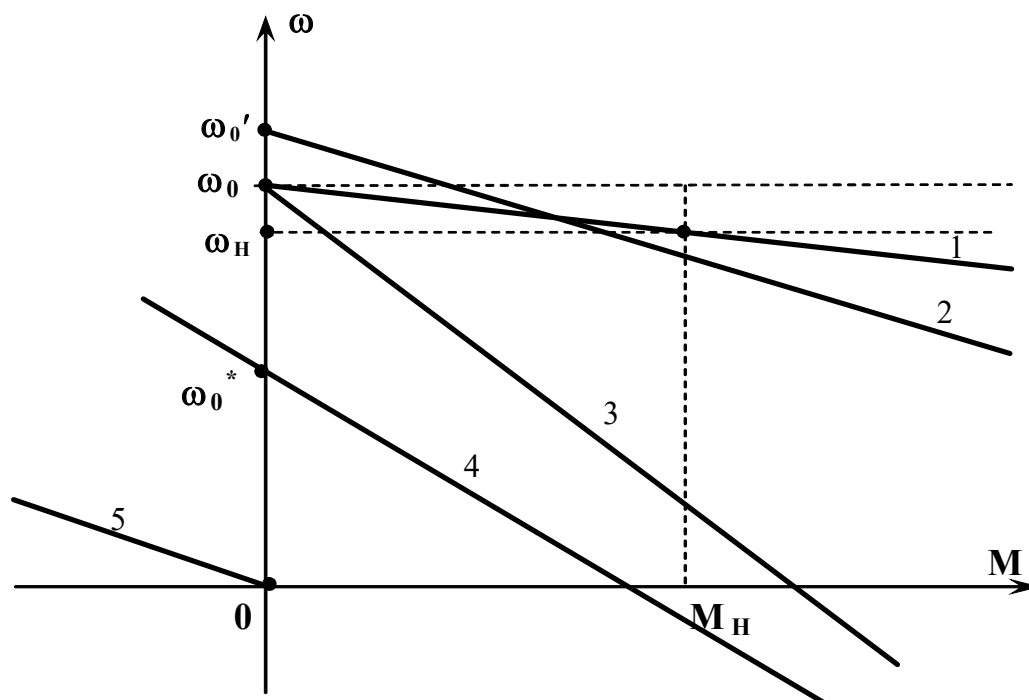


Рис. 2. Механические характеристики.

4.1. Расчет естественной механической характеристики.

При работе на естественной характеристике дополнительных сопротивлений в цепи якоря нет, поэтому построение естественной механической характеристики (линия 1 на Рис. 2) производится по двум точкам: 1) ω_0 , $M = 0$; 2) $\omega_H = \pi n_H / 30$, M_H .

3.2. Расчет искусственных механических характеристик при ослабленном магнитном потоке двигателя Φ' .

Так как магнитный поток двигателя $\Phi' < \Phi_H$, то по сравнению с естественной характеристикой в правой части выражений (1) и (2) обе составляющие увеличиваются. Для определения новых значений ω_0' и $\Delta\omega_c'$ необходимо из Таблица 2 для заданных значений тока I_B' найти новые значения $c\Phi'$ и провести расчеты.

Построение искусственной характеристики 2 производится по двум точкам:

$$1) \omega_0' = \frac{U_H}{c\Phi'}, M = 0;$$

$$2) M' = c\Phi' I_{яH}, \quad \omega' = \omega_0' - \Delta\omega_c', \quad \text{где: } \Delta\omega_c' = \frac{R_d}{(c\Phi')^2} M'.$$

3.3. Расчет искусственных механических характеристик при включении последовательного сопротивления в цепи якоря $R_{п}$.

Так как скорость ω_0 не зависит от сопротивления якорной цепи и характеристика снимается при номинальном магнитном потоке, то она будет такой же, как на естественной. Поэтому расчет ограничивается вычислением $\Delta\omega_{сH}$ при $M = M_H$ для заданных значений $R_{п1}$ и $R_{п2}$, учитывая, что $R = R_d + R_{п}$. Искусственная механическая характеристика 3 строится по двум точкам:

- 1) $M = 0, \omega = \omega_0;$
- 2) $M = M_H, \omega = \omega_0 - \Delta\omega_{CH}.$

При больших R_{Π} значение скорости может стать отрицательным, что свидетельствует о переходе двигателя в тормозной режим (противовключения).

4.4. Расчёт искусственных механических характеристик для сложной схемы включения с последовательным сопротивлением R_{Π} и шунтированием якоря сопротивлением $R_{Ш}$

Выполняется по формуле:

$$\omega = \omega_0 \frac{R_{Ш}}{R_{Ш} + R_{\Pi}} - \left(R_{Д} + \frac{R_{Ш} R_{\Pi}}{R_{Ш} + R_{\Pi}} \right) \frac{M}{(c\Phi)^2} = \omega_0^* - \Delta\omega_c^* \quad (4)$$

Из (4) следует, что при такой схеме включения двигателя изменятся обе составляющие выражения (2). Это объясняется тем, что напряжение сети приложено к включенным между собой последовательно сопротивлениям R_{Π} и $R_{Ш}$ и оно распределяется между ними. Таким образом, эта схема исполняет роль делителя напряжения. Так как якорь включен параллельно $R_{Ш}$, то напряжение на нем $U_{Я}$ определяется соотношением сопротивлений, оно меньше напряжения сети U и равно: $U_{Я} = U \frac{R_{Ш}}{R_{Ш} + R_{\Pi}}$

Скорость идеального холостого хода рассчитывается по формуле:

$$\omega_0^* = \omega_0 \frac{R_{Ш}}{R_{Ш} + R_{\Pi}}$$

Из-за сложной схемы включения сопротивлений изменяется эквивалентное сопротивление схемы и, как следствие, вторая составляющая выражения (4):

$$\Delta\omega_c^* = \left(R_{Д} + \frac{R_{Ш} R_{\Pi}}{R_{Ш} + R_{\Pi}} \right) \frac{M}{(c\Phi)^2} \quad (5)$$

Для определения степени влияния каждого из сопротивлений R_{Π} и $R_{Ш}$ необходимо рассчитать три характеристики для заданных значений $R_{\Pi 1}$; $R_{\Pi 2}$ и $R_{Ш 1}$; $R_{Ш 2}$ в разных сочетаниях, например, в следующих комбинациях:

Вариант 1: 1) $R_{\Pi 1}$ и $R_{Ш 1}$; 2) $R_{\Pi 2}$ и $R_{Ш 1}$; 3) $R_{\Pi 2}$ и $R_{Ш 2}$;

Вариант 2: 1) $R_{\Pi 2}$ и $R_{Ш 1}$; 2) $R_{\Pi 1}$ и $R_{Ш 1}$; 3) $R_{\Pi 1}$ и $R_{Ш 2}$.

Отличительной особенностью данной схемы включения является то, что ток I_{Π} , потребляемый от источника, разветвляется и равен сумме токов якоря и шунтирующей цепи: $I_{\Pi} = I_{я} + I_{Ш}$. Благодаря перераспределению токов, ток I_{Π} не меняет своего направления даже при отрицательных токах якоря. Поэтому двигатель может работать в трех режимах: двигательном, противовключения и даже рекуперативного торможения, и характеристики 4 следует строить не в одном, а в трех квадрантах.

Три характеристики рассчитываются и строятся для двух заданных значений R_{Π} и $R_{Ш}$ и их сочетания по двум точкам при: $M = +M_H$ и $M = -M_H$.

4.5. Расчёт характеристик в режиме динамического торможения

выполняется с учетом того, что они проходят через начало координат, так как якорь отключен от сети, из-за чего $U = 0$ и $\omega_0 = 0$. Скорость во второй точке механической характеристики 5 определяется по формуле:

$$\omega = -\Delta\omega_c = -\frac{R}{(c\Phi_H)^2} M$$

при $M = -M_H$ и сопротивлении $R = R_d + R_T$. Так как на стенде в качестве R_T используется сопротивление $R_{Ш}$, то $R_T = R_{Ш}$. Расчеты выполняются для двух значений $R_{Ш 1}$, $R_{Ш 2}$ и только положительных значений скорости.

4. Работа в лаборатории

5.1. Описание лабораторной установки, назначение оборудования.

Работа выполняется на одной из двух идентичных лабораторных установках ЛУ1(ЛУ3), схема которых приведена на Рис. 3. В центре стенда установлен агрегат, состоящий из двигателя постоянного тока независимого возбуждения ИМ (испытываемая машина) и нагрузочной машины (НМ).

Испытываемая машина. Питание якорной цепи ИМ осуществляется через автоматический выключатель АВ1 от установленного на стенде ЛУ2 нерегулируемого источника постоянного тока (полупроводниковый выпрямитель) напряжением 220В. По этой причине ток, потребляемый от источника, не может менять направление, а двигатель – переходить в режим рекуперации энергии в сеть.

В цепи обмотки возбуждения двигателя (ОВД) имеются амперметр ($I_{вд}$) и регулируемый источник напряжения (РИН), а также катушка реле РОП, выполняющего защиту двигателя при отсутствии возбуждения. Управление РИН осуществляется с помощью потенциометра «задание тока возбуждения двигателя». Хотя переключатель S3 позволяет подключать цепь якоря двигателя к источнику питания независимо от обмотки возбуждения, однако напряжение на якорь подается только при срабатывании магнитного пускателя К1, что возможно лишь при замкнутых контактах РОП. Магнитным пускателем называется устройство, у которого в одном корпусе смонтированы контактор и две кнопки. Контактор К1 используется для коммутации силовых цепей, а кнопки «Вкл» (зеленая) и «Выкл» (красная) для управления им.

Для получения требуемых характеристик используются сопротивления, включенные последовательно $R_{п}$ и параллельно якорю $R_{ш}$ (шунтирующее). Заданные значения сопротивления $R_{п}$ устанавливаются переключателем S1, а $R_{ш}$ – переключателем S2 согласно таблицам 3 и 4, приведенным в п.0.

Три амперметра необходимы для измерения токов $I_{я}$, $I_{п}$, $I_{ш}$ в схеме шунтирования, которые из-за разветвления цепей отличаются. В других опытах измеряется только ток якоря $I_{я}$.

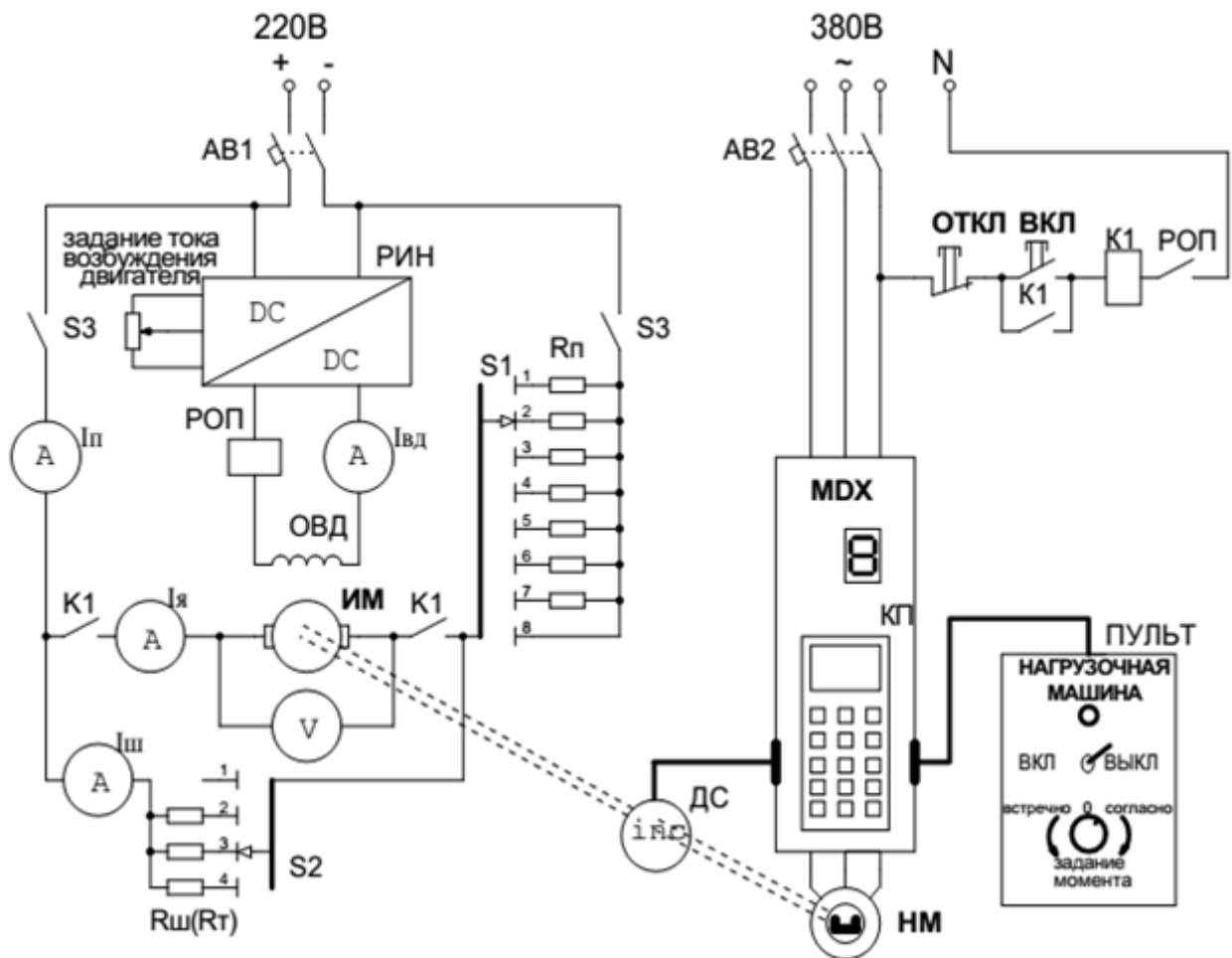


Рис. 3. Схема лабораторной установки.

Нагрузочная машина предназначена для снятия механических характеристик ИМ не только в двигательном, но и в тормозных режимах, и поэтому с ее помощью необходимо создавать и регулировать моменты, направленные не только встречно с моментом ИМ, но и согласно с ним.

С этой целью управление НМ осуществляется от специального приводного преобразователя MOVIDRIVE, работающего в режиме регулирования момента. НМ имеет встроенный датчик скорости (ДС), показания которого (в [об/мин]) используются при снятии характеристик. НМ питается от сети переменного тока через выключатель АВ2.

Преобразователь MOVIDRIVE, работающий в режиме регулирования момента, позволяет изменять момент, развиваемый нагрузочной машиной, пропорционально ее току $I_{НМ}$: $M_{НМ} = k_M \cdot I_{НМ}$, где: $k_M = 2,27 \text{ Нм/А}$.

На экране дисплея клавишной панели (КП), расположенной на корпусе преобразователя, отображается информация: текущие значения частоты вращения n в [об/мин] (rpm) и тока I_{HM} в [А] (Amp), а также режим работы – регулирование момента (TORQUE OPERATION), как это показано на Рис. 4

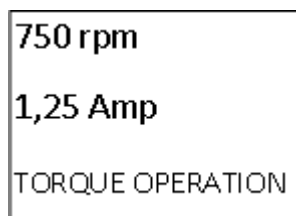


Рис. 4

После включения АВ2 преобразователь производит внутреннее тестирование и установку параметров, что отображается цифрами «8» и затем «0» на его семисегментном индикаторе, а после их окончания появляется цифра «1». Управление преобразователем осуществляется от отдельного пульта, на котором установлены тумблер включения и выключения привода нагрузочной машины и потенциометр «Задание момента». При выключенном тумблере преобразователь заблокирован и момент $M_{HM} = 0$. После включения он готов к работе, и потенциометром задаются величина и направление момента M_{HM} : встречное или согласное.

Переключатели S1, S2, S3 предназначены для установки заданных значений сопротивлений и переключений в схеме. Для ограничения пусковых токов подача напряжения при пуске без R_{Π} заблокирована, если рукоятка переключателя S1 находится в положении 8 ($R_{\Pi} = 0$).

Для пуска двигателя и всех повторных пусках необходимо установить S1 в любое другое положение.

4.2. Подготовка к работе.

1. На пульте управления преобразователем тумблер установить в положение «ВЫКЛ».

2. Включить автоматические выключатели АВ1 и АВ2;
3. С помощью потенциометра «Задание тока возбуждения двигателя» установить номинальное значение тока возбуждения $I_{вн} = 0,58A$;
4. Установить: 1) переключатель S1 в положение «7» (в цепь якоря вводится сопротивление $R_{п}$ для ограничения пускового тока); 2) переключатель S2 в положение «1»; 3) переключатель S3 в положение 1 («Сеть»);
5. Нажатием кнопки «Вкл» (зеленая) пускателя К1 запустить двигатель.

Лабораторная установка готова к проведению экспериментов.

4.3. Снятие механических характеристик (общие правила)

Первыми снимаются точки холостого хода двигателя:

- 1) «реального» $\omega_{хх}$, когда он при отключенной НМ ($M_{НМ} = 0$) преодолевает механические потери агрегата. Для этого тумблер включения нагрузочной машины должен находиться в положении «ВЫКЛ»;
- 2) «идеального» ω_0 , когда механические потери преодолевает НМ: $M_{д} = 0$; $M_{НМ} = M_{хх}$. Для этого, переведя тумблер в положение «ВКЛ» и поворачивая ручку потенциометра в направлении «СОГЛАСНО», установить ток якоря $I_{я} = 0$.

На интервале ($\omega_0 - \omega_{хх}$) следует записывать показания только в двух крайних точках ($\omega_{хх}$ и ω_0).

Далее, поворачивая ручку потенциометра в направлении «ВСТРЕЧНО» и задавая току якоря целые значения 1, 2, ..., 5А, снять остальные точки.

На искусственных характеристиках при больших значениях $R_{п}$ скорость может снизиться до нуля и даже изменить свое направление.

Характеристики по п.п. 1.1.1, 1.1.1 и 1.1.2 снимать при положительных значениях тока якоря. И только в схеме шунтирования (п.1.1.3) ток якоря следует изменять в обоих направлениях. Измерения следует проводить в

пределах: ток якоря в обоих направлениях – не более 5А, скорость от +1300 до –500 об/мин.

Точки при $n = 0$ не снимать.

4.3.1. Естественная механическая характеристика.

Переключатель S1 установить в положение «8» – скорость двигателя возрастет, что говорит о том, что двигатель перешел на естественную характеристику. Записывать значения скорости (n) и тока НМ ($I_{НМ}$) с дисплея КП, а также по приборам – тока $I_{я}$ и напряжения $U_{я}$ якоря двигателя. Следует обратить внимание на то, что напряжение остается неизменным. Данные опыта заносятся в таблицу (см. Таблица 7):

Таблица 7

$U_{я}$	$I_{я}$	n	$I_{НМ}$
В	А	об/мин	А

4.3.2. Искусственная механическая характеристики при ослабленном магнитном потоке Φ' .

С помощью потенциометра «ЗАДАНИЕ ТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ» установить заданное значение тока возбуждения $I_{В}' < I_{ВН}$ и повторить эксперимент по той же методике.

4.3.3. Искусственные механические характеристики с добавочным последовательным сопротивлением в цепи якоря $R_{П}$.

Установить переключатель S1 в положение, соответствующее заданному значению сопротивления $R_{П}$. В зависимости от величины $R_{П}$ при увеличении нагрузки скорость может не только уменьшиться до нуля, но и изменить направление, что соответствует переходу двигателя в тормозной режим

противовключения. Обратит внимание на то, что в этом и последующих экспериментах напряжение $U_{\text{я}}$ при изменении нагрузки меняется. Опыт выполнить для двух заданных значений $R_{\text{П1}}$ и $R_{\text{П2}}$ по методике, описанной в п.1. *Точку при $n = 0$ не снимать.*

4.3.4. Искусственные механические характеристики для сложной схемы включения с последовательным сопротивлением $R_{\text{П}}$ и шунтированием якоря сопротивлением $R_{\text{ш}}$

Установить переключатель S1 в положение, соответствующее заданному значению сопротивления $R_{\text{П}}$, а переключатель S2 в положение, соответствующее заданному значению сопротивления $R_{\text{ш}}$.

Особенностью данной схемы включения является то, что ток $I_{\text{П}}$, потребляемый от источника разветвляется и равен сумме токов якоря и шунтирующей цепи: $I_{\text{П}} = I_{\text{я}} + I_{\text{ш}}$. Поэтому, благодаря перераспределению токов, ток $I_{\text{П}}$ не меняет своего направления даже при отрицательных $I_{\text{я}}$.

Поэтому ток якоря в этом опыте следует изменять в обоих направлениях, не превышая $\pm 5\text{А}$.

При снятии характеристик следует обратить внимание на:

- 1) уменьшение значения ω_0 и наклона механической характеристики по сравнению с п.4.3.3 при тех же $R_{\text{П}}$;
- 2) возможность работы двигателя в режиме рекуперативного торможения;
- 3) перераспределение токов в отдельных цепях ($I_{\text{я}}$, $I_{\text{П}}$, $I_{\text{ш}}$) и их соотношение, для чего необходимо их записать хотя бы для одного опыта.

Для определения степени влияния каждого из сопротивлений $R_{\text{П}}$ и $R_{\text{ш}}$ необходимо снять три характеристики для заданных значений $R_{\text{П1}}$; $R_{\text{П2}}$ и $R_{\text{ш1}}$; $R_{\text{ш2}}$ в разных сочетаниях, например, в следующих комбинациях:

Вариант1: 1) $R_{П1}$ и $R_{Ш1}$; 2) $R_{П2}$ и $R_{Ш1}$; 3) $R_{П2}$ и $R_{Ш2}$;

Вариант2: 1) $R_{П2}$ и $R_{Ш1}$; 2) $R_{П1}$ и $R_{Ш1}$; 3) $R_{П1}$ и $R_{Ш2}$,

или других по указанию преподавателя по методике п.1, но в таблице необходимо добавить два столбца для записи значений токов $I_{П}$ и $I_{Ш}$.

4.3.5. Искусственные механические характеристики в режиме динамического торможения.

Установить переключатель S3 в положение 2 (отключив тем самым якорь от сети), а переключатель S2 в положение, соответствующее заданному значению $R_T = R_{Ш}$. Опыт выполнять для тех же заданных значений $R_{Ш}$ по методике, описанной в п.1. Характеристики снимать только для одного направления вращения – «СОГЛАСНО».

4.4. Отключение установки.

После снятия всех требуемых механических характеристик необходимо:

- 1) Установить тумблер включения нагрузочной машины в положение «ВЫКЛ»;
- 2) Нажатием кнопки на корпусе пускателя K1 отключить его;
- 3) Выключить автоматические выключатели АВ1 и АВ2.

5. Обработка результатов экспериментов и оформление отчета

5.1. Расчет M_d

При обработке результатов экспериментов следует руководствоваться указаниями, приведенными в разделе «Методические указания по выполнению работ, обработке экспериментальных данных и оформлению отчёта». **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

Расчет момента M_d необходимо выполнять следующим образом, учитывая, какая из машин преодолевает механические потери:

- a) НМ отключена ($M_{HM} = 0$; $\omega = \omega_{XX} > 0$): $M_D = M_{XX}$
- b) НМ включена в направлении «Согласно» ($M_{HM} > 0$): $M_D = -M_{HM} + M_{XX}$
- идеальный холостой ход: $I_{Я} = 0$; $M_D = 0$; $\omega = \omega_0$: $M_{HM} = M_{XX}$
- с) НМ включена в направлении «Встречно» ($M_{HM} < 0$):
- при $\omega > 0$ момент потерь $M_{XX} < 0$: $M_D = M_{HM} + M_{XX}$
- при $\omega < 0$ момент потерь $M_{XX} > 0$: $M_D = M_{HM} - M_{XX}$

Момент M_{HM} рассчитывается по формуле:

$$M_{HM} = k_M \cdot I_{HM},$$

где: $k_M = 2,27 \text{ Нм/А}$,

а значения M_{XX} определяются соответственно скорости (см. Таблица 3 п.2.4).

Результаты расчетов сводятся в таблицу (Таблица 8).

Таблица 8

Экспериментальные данные				Результаты обработки			
$U_{Я}$	$I_{Я}$	n	I_{HM}	ω	M_{HM}	M_{XX}	M_D
В	А	об/мин	А	рад/с	Нм	Нм	Нм

5.2. Построение графиков

1. Расчетные характеристики для всех опытов рекомендуется строить на одном графике. В этом случае удобнее сравнивать и давать оценку влияния параметров и их вариации на вид механических характеристик, что является основной целью лабораторных работ.

При большом числе характеристик их следует разместить на двух рисунках. Например, на одном – характеристики 1; 2; 3 (см. Рис. 2) для всех заданных значений параметров, а на другом – характеристики 4; 5, но на каждом из них должна быть построена для сравнения естественная характеристика.

2. Для большей точности и удобства оценки расхождения расчетных и экспериментальных характеристик их рекомендуется строить попарно для каждого опыта на отдельных графиках.
3. Все характеристики, включая расчетные, должны строиться в диапазоне изменения переменных, использованных в экспериментах, т.е. не более: для тока $\pm 5\text{А}$, для скорости от $+1200$ до -500 об/мин.
4. Характеристики на графиках должны иметь обозначения (номера, цвет, тип линий или другие признаки), которые расшифровываются в надписи под рисунком или тексте. Графики не должны быть мелкими, каждый должен занимать всю ширину страницы.

5.3. Рекомендации по оформлению отчёта

1. Обязательно ознакомиться с разделом «Методические указания по выполнению работ, обработке экспериментальных данных и оформлению отчёта», где изложены рекомендации по оформлению отчёта. Отчет выполняется и представляется в электронном виде. При этом можно использовать электронную версию учебного пособия: схему, паспортные данные, формулы и др.
2. В расчетах для каждой характеристики необходимо привести пример для одной точки. В результатах расчетов необходимо указывать не только численные значения величин, но и их размерность.
3. Рекомендуется материал по каждому пункту исследований, указанных в программе работы, представлять в виде блоков, в состав которых входят:
 - 1) расчет;
 - 2) таблица обработки экспериментальных данных;
 - 3) график расчетных и экспериментальных характеристик;
 - 4) анализ полученных результатов и выводы.

4. В выводах необходимо дать оценку влияния исследуемого параметра на вид механической характеристики и указать предполагаемую причину расхождения расчетных и экспериментальных характеристик.

Сравнение и анализ характеристик с точки зрения влияния внешних факторов, а также расхождение расчетных и экспериментальных механических характеристик должны проводиться отдельно по двум показателям: скорости идеального холостого хода и наклону механических характеристик. В зависимости от того, по какому из этих показателей характеристики отличаются, предполагаемая причина расхождения устанавливается, используя выражение механической характеристики.

РАБОТА № 2. Исследование механических характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

1. Программа работы.

1.1. Подготовка к работе:

1.1.1. Рассчитать переходную характеристику для всех значений тока I_B , указанных в п. 2.1 для естественной электромеханической характеристики.

1.1.2. Рассчитать искусственные механические характеристики для двух заданных значений добавочных сопротивлений в цепи якоря $R_{П1}$ и $R_{П2}$

1.1.3. Рассчитать искусственные характеристики для схемы шунтирования якоря ИМ сопротивлением $R_{Ш}$ при двух значениях $R_{Ш1}$ и $R_{Ш2}$ и одном значении последовательного сопротивления $R_{П1}$, заданном в п. 1.1.1.

1.1.4. Рассчитать механические характеристики в режиме динамического торможения с самовозбуждением для двух значений добавочных сопротивлений в цепи якоря $R_{Т1} = R_{Ш1}$ и $R_{Т1} = R_{Ш2}$.

1.2. Работа в лаборатории.

1.2.1. Ознакомление с устройством лабораторной установки, расположением и назначением оборудования.

1.2.2. Подготовка к работе.

1.2.3. Снятие естественной и искусственных механических характеристик, указанных в п.п. 1.1.1 ÷ 1.1.3.

1.3. Оформление отчета.

2. Паспортные данные установки

2.1. Испытуемая машина (ИМ): Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения, тип: ДП100L.

$P_H = 0,55$ кВт (S1); $U_H = 220$ В; $I_H = 3,7$ А; $n_H = 1000$ об/мин; $R_{Я} = 12,0$ Ом;
 $R_B = 4,8$ Ом.

Таблица 9 Естественная электромеханическая характеристика двигателя

n_e	об/мин	2650	2100	1750	1470	1250	1100	980	890	800	760
I_B	А	1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5

2.2. *Нагрузочная машина (НМ):* Вентильный двигатель, тип CFM 71S.

$M_H = 5,0$ Нм; $U_H = 380$ В; $f_H = 100$ Гц; $I_H = 2,2$ А; $n_H = 2000$ об/мин.

2.3. *Приводной преобразователь:* MOVIDRIVE MDX61B 0022 - 5A3.

$U_H = 3 \times 380$ В, $f_H = 50$ Гц; $P_{H\text{ВЫХ}} = 2,2$ кВт; $I_{H\text{ВЫХ}} = 5,5$ А; $k_M = 2,27$ Нм/А.

2.4. *Механические потери* (момент холостого хода M_{XX}):

Таблица 10

ω	рад/с	5	10	20	40	60	80	100	120	140
M_{XX}	Нм	0,25	0,37	0,40	0,45	0,48	0,51	0,53	0,54	0,55

2.5. *Добавочные сопротивления:*

Таблица 11

Положение переключателя S1	1	2	3	4	5	6	7	8
Сопротивление R_{II}, Ом	66	36	45	51	15	21	30	0

Таблица 12

Положение переключателя S2	1	2	3	4
Сопротивление R_{II}, Ом	откл	70	30	40

2.6. *Способ шунтирования*

Таблица 13

Положение переключателя S2	1	2
Наименование схемы шунтирования	двигателя	якоря

3. Расчет искусственных механических характеристик.

В электрических машинах с последовательным соединением обмоток якоря и возбуждения ток якоря I_A является одновременно и током возбуждения I_B . Так как магнитный поток Φ нелинейно зависит от I_B , то уравнение механической характеристики $\omega = f(M)$, выражение которой для всех двигателей постоянного тока имеет вид:

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{R}{(c\Phi)^2} M \quad (1)$$

и представляет собой сложную нелинейную зависимость ω от M . Поэтому их естественная механическая характеристика приводится в каталожных данных (Таблица 9), а все искусственные характеристики рассчитываются методом переходной характеристики (Рис. 5), определяемой выражением:

$$(E/\omega)_e = f(I_B) = c\Phi. \quad (2)$$

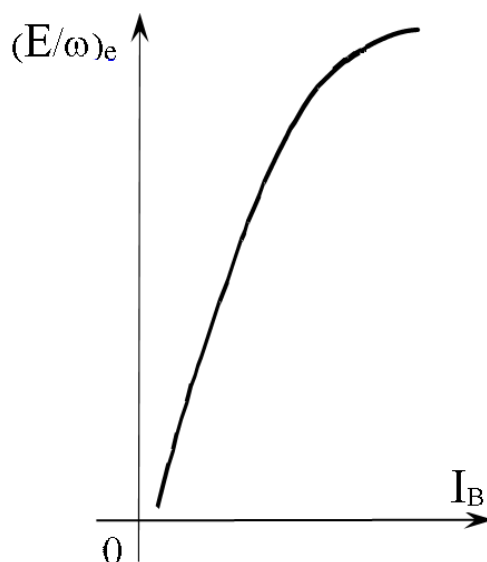


Рис. 5 Переходная характеристика

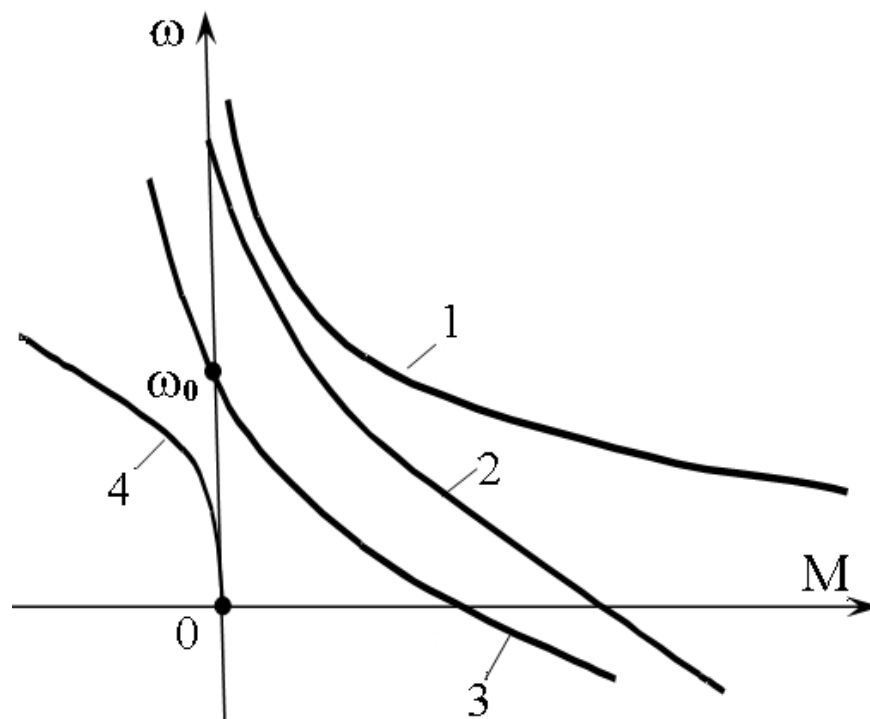


Рис. 6 Механические характеристики.

Для расчета переходной характеристики используется электромеханическая характеристика $n_e = f(I_B)$ (Таблица 9), взятая из каталога, с учетом того, что: $E_e = U_H - I_B R_d$, где $R_d = R_{я} + R_B$. Нужно также пересчитать частоту вращения n_e [об/мин] в угловую скорость ω_e [рад/с]: $\omega_e = \pi n_e / 30$.

Для построения *естественной механической характеристики* (кривая 1 на Рис. 6) необходимо, кроме того, задаваясь значениями $I_{я} = I_B$, рассчитать момент двигателя $M_e = (E / \omega)_e \cdot I_{я}$. Результаты расчетов сводятся в таблицу:

Таблица 14

Исходные данные		Переходная характеристика			Момент
$I_B = I_{я}$	ω_e	$I_{я} R_d$	E_e	$(E / \omega)_e$	M_e
А	рад/с	В	В	В·с	Нм

Значения $(E / \omega)_e$ и M_e в дальнейшем используются в качестве исходных данных для расчета и построения всех искусственных характеристик.

Момент двигателя на искусственных характеристиках $M_{и}$ для нормальных схем включения двигателя, у которых $I_{я} = I_{в}$ такой же, как и на естественной, а расчет скоростей выполняется с помощью переходной характеристики, используя выражения:

$$M_{и} = M_{е}; \quad E_{и} = U_{н} - I_{н}R; \quad \omega_{и} = \frac{E_{и}}{(E/\omega)_{е}}.$$

Величина R зависит от схемы включения двигателя.

Для расчета *механических характеристик с сопротивлением* $R_{п1}$ в цепи якоря (п.1.1.1) необходимо подставлять $R = R_{д} + R_{п1}$ для заданных значений $R_{п1}$ и $R_{п2}$, а результаты представлять в форме таблицы:

Таблица 15

Исходные данные			Искусственная характеристика с $R_{п1}$			Искусственная характеристика с $R_{п2}$		
$I_{я} = I_{в}$	$(E/\omega)_{е}$	$M_{е}$	$I_{я}R$	$E_{и}$	$\omega_{и}$	$I_{я}R$	$E_{и}$	$\omega_{и}$
A	Bc	Hm	B	B	рад/с	B	B	рад/с

Расчёт характеристик для режима динамического торможения с самовозбуждением (п.1.1.3) выполняется с учетом того, что в этом режиме напряжение $U = 0$, и поэтому $E_{и} = - I_{я} R$, где $R = R_{д} + R_{т}$ – полное сопротивление замкнутой цепи якоря двигателя, $R_{т}$ – заданные значения тормозного сопротивления $R_{т1}$ и $R_{т2}$. Результаты расчетов следует представить в форме таблицы:

Таблица 16

Исходные данные			Искусственная характеристика с R_{T1}		Искусственная характеристика с R_{T2}	
$I_{Я}=I_B$	$(E/\omega)_e$	M_e	$E_{И}$	$\omega_{И}$	$E_{И}$	$\omega_{И}$
А	Вс	Нм	В	рад/с	В	рад/с

Расчёт характеристик в схеме шунтирования якоря сопротивлением $R_{Ш}$ с последовательным сопротивлением $R_{П}$ (кривая 3) связан с особым способом вычисления $E_{И}$, т.к. в этой схеме токи якоря и возбуждения не равны: $I_{Я} \neq I_B$, а ток возбуждения является током последовательной цепи: $I_B = I_{П}$.

Так как $R_{Ш}$ включено между обмотками якоря и возбуждения, то $R_{Я}$ и R_B в схеме разделяются и в расчетах должны учитываться отдельно (но не R_D).

Баланс напряжений последовательной цепи: $U_H - I_B (R_B + R_{П}) = U_{Ш} = U_D$

Другие соотношения: $I_{Я} = I_B - I_{Ш}$; $I_{Ш} = U_{Ш} / R_{Ш}$; $E_{И} = U_{Ш} - I_{Я} R_{Я}$.

Далее, задаваясь значениями тока возбуждения I_B :

- 1) определить падения напряжений в последовательном и параллельном контурах;
- 2) рассчитать токи в указанных контурах и в цепи якоря;
- 3) рассчитать $E_{И}$;
- 4) определить, соответственно, $\omega_{И}$ и $M_{И}$, как это показано в таблице:

Таблица 17

Исходные данные			Расчетные величины							
$I_{Я}=I_B$	$(E/\omega)_e$	M_e	$I_B (R_B + R_{П})$	$U_{Ш}=U_H - I_B (R_B + R_{П})$	$I_{Ш} = U_{Ш} / R_{Ш}$	$I_{Я} = I_B - I_{Ш}$	$I_{Я} R_{Я}$	$E_{И} = U_{Ш} - I_{Я} R_{Я}$	$\omega_{И} = E_{И} / (E/\omega)_e$	$M_{И} = M_e (I_{Я}/I_B)$
А	Вс	Нм	В	В	А	А	В	В	рад/с	Нм

Для определения степени влияния каждого из сопротивлений R_{Π} и $R_{Ш}$ необходимо рассчитать три характеристики для заданных значений $R_{\Pi 1}$; $R_{\Pi 2}$ и $R_{Ш 1}$; $R_{Ш 2}$ в разных сочетаниях, например, в следующих комбинациях:

Вариант1: 1) $R_{\Pi 1}$ и $R_{Ш 1}$; 2) $R_{\Pi 2}$ и $R_{Ш 1}$; 3) $R_{\Pi 2}$ и $R_{Ш 2}$;

Вариант2: 1) $R_{\Pi 2}$ и $R_{Ш 1}$; 2) $R_{\Pi 1}$ и $R_{Ш 1}$; 3) $R_{\Pi 1}$ и $R_{Ш 2}$.

Необходимо обратить внимание на то, что в этой схеме ток возбуждения равен сумме токов якоря $I_{я}$ и шунтирующей цепи $I_{ш}$. Благодаря этому, ток возбуждения всегда больше нуля, даже при $I_{я} = 0$, следовательно, могут быть получены не только скорость идеального холостого хода, но и режим рекуперативного торможения ($I_{я} < 0$). В двигателях последовательного возбуждения это возможно только для данной схемы включения.

4. Работа в лаборатории.

4.1. Описание лабораторной установки, назначение оборудования

Схема лабораторной установки, приведенная на Рис. 7, аналогична схеме Рис. 3 в РАБОТЕ №1, где она описана более подробно.

Питание двигателя последовательного возбуждения (ИМ) осуществляется от нерегулируемого источника постоянного тока 220В через автоматический выключатель АВ2, а нагрузочная машина (НМ) через автоматический выключатель АВ1 – от сети переменного тока 380В. Отличие схемы Рис. 7 от Рис. 3 состоит в том, что обмотка возбуждения включена последовательно с якорем и изменен способ подключения сопротивления $R_{Ш}$ переключателем S3.

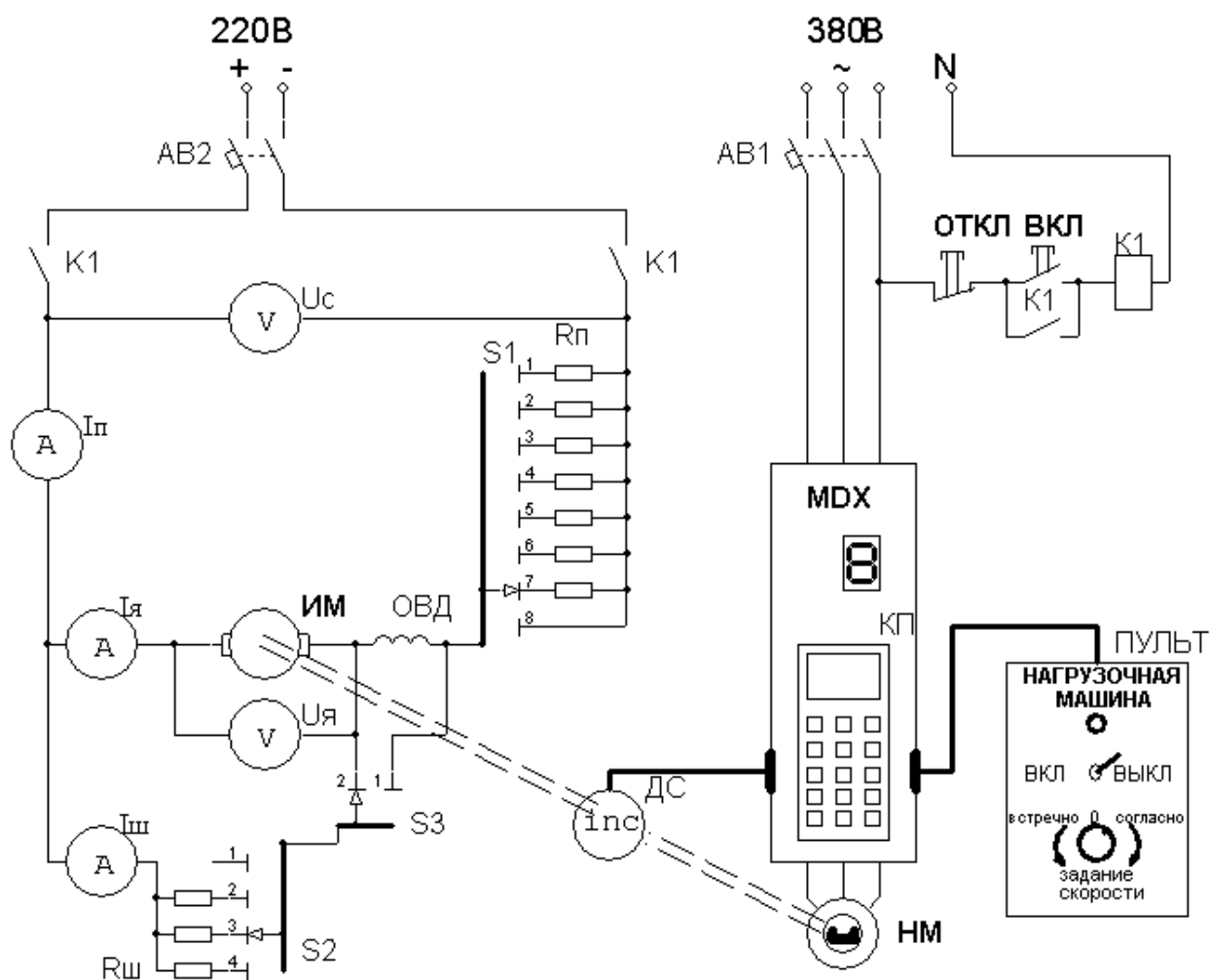


Рис. 7 Схема лабораторной установки

Испытуемая машина. Напряжение на якорь двигателя подается через контакты магнитного пускателя К1 после его срабатывания. Для снятия характеристик используются сопротивления, включаемые последовательно – R_{Π} и параллельно якорю – $R_{\text{Ш}}$ (шунтирующее). Заданные значения сопротивлений R_{Π} и $R_{\text{Ш}}$ устанавливаются соответственно переключателями S1 и S2 согласно таблицам 3 и 4, приведенным в п.2.5. Переключателем S3 задается способ шунтирования – якоря или двигателя. Три амперметра необходимы для измерения токов в схемах шунтирования, когда они становятся разными. В других опытах измеряется только ток якоря $I_{\text{я}}$.

Нагрузочная машина. Вентильный двигатель (НМ) имеет встроенный датчик скорости (ДС), показания которого используются при снятии

характеристик (выводятся на экран кнопочного пульта (КП) в [об/мин]). Благодаря приводному преобразователю MOVIDRIVE момент, развиваемый нагрузочной машиной, пропорционален току статора I_{HM} , отображаемому на экране КП: $M = k_M \cdot I_{HM}$, где: $k_M = 2,27 \text{ Нм/А}$.

Приводной преобразователь MDX 61B. Управление преобразователем выполняется от отдельного пульта. Для начала работы необходимо разблокировать преобразователь включением тумблера, после чего на индикаторе преобразователя появляется цифра «5», соответствующая режиму работы – «регулирование скорости».

Величина скорости устанавливается потенциометром «задание скорости». Он имеет среднее положение «0», а при повороте его рукоятки задается изменение скорости в направлениях «ВСТРЕЧНО» или «СОГЛАСНО». Перед пуском его нужно установить в положение «0».

4.2. Подготовка к работе.

1. Включить автоматические выключатели АВ1 и АВ2.
2. Установить переключатели: S1 – в положение 7 «30 Ом»; S2 – в положение 1 « R_{III} ОТКЛ»; S3 – в положение 2 «Шунтирование якоря».
3. Пуск машин выполняется в следующей последовательности.

Первой запускается нагрузочная машина, для чего тумблер на пульте управления установить в положение «ВКЛ», а затем, поворачивая ручку потенциометра в направлении «СОГЛАСНО», установить скорость примерно $800 \div 900$ об/мин. После этого нажатием кнопки «ВКЛ» (зеленая) контактора К1 запустить двигатель с добавочным сопротивлением R_{II} для ограничения пускового тока.

Лабораторная установка готова к проведению экспериментов.

4.3. Снятие механических характеристик.

На искусственных характеристиках при больших значениях $R_{П}$ скорость может снизиться до нуля и даже изменить свое направление, а в схеме шунтирования, кроме того, ток якоря может протекать в обоих направлениях. Измерения следует проводить в пределах: ток якоря – не более 5А, скорость от +1500 до –500 об/мин, задавая целые значения тока $I_{я}$. **Точку при $n = 0$ не снимать.**

4.3.1. Естественная механическая характеристика.

После пуска двигателя переключатель S1 установить в положение «0 0м» – двигатель переходит на естественную характеристику. Потенциометром «задание скорости» уменьшая скорость от 1500 об/мин, записывать значения скорости (n) и тока ($I_{НМ}$) НМ с дисплея КП, а также тока якоря двигателя $I_{я}$.

На данной характеристике двигатель работает на высоких скоростях, поэтому в заданных пределах достаточно снять три ÷ четыре точки. Данные всех опытов заносятся в таблицу:

Таблица 18

Экспериментальные данные			
$U_{я}$	$I_{я}$	n	$I_{НМ}$
В	А	об/мин	А

4.3.2. Искусственные характеристики с добавочным сопротивлением в цепи якоря.

Заданные значения сопротивлений $R_{П1}$ и $R_{П2}$ устанавливаются переключателем S1. В процессе снятия характеристик при больших нагрузках возможен переход ИМ из двигательного режима в режим противовключения,

что сопровождается изменением направления вращения якоря. При этом скорость достаточно изменять до $n = - 500$ об/мин.

4.3.3. Искусственные механические характеристики схемы с шунтированием якоря сопротивлением $R_{Ш}$ и последовательным сопротивлением $R_{П}$.

Необходимо снять три механические характеристики, согласно заданию. Для этого следует установить: переключателем S1 – заданное значение сопротивления $R_{П}$, переключателем S2 – заданное значение сопротивления $R_{Ш}$, переключателем S3 – схему «шунтирование якоря». Снимать механические характеристики нужно как при встречном, так и при согласном включении ИМ и НМ. При согласном включении ток якоря ИМ может достичь значения $I_{я} = 0$, которое соответствует скорости идеального холостого хода – границе между двигательным режимом и режимом рекуперативного торможения. При дальнейшем увеличении скорости ИМ перейдет в режим рекуперативного торможения, что сопровождается изменением направления тока якоря. В двигателях последовательного возбуждения работа в этом режиме возможна только в схеме шунтирования. При встречном включении ИМ может работать не только в двигательном, но и в тормозном режиме (противовключения).

При снятии характеристик следует обратить внимание на:

- 1) наличие скорости идеального холостого хода ω_0 и уменьшение наклона механической характеристики по сравнению с п.4.3.2 при тех же $R_{П}$;
- 2) возможность работы двигателя при отрицательных токах якоря;
- 3) перераспределение токов в отдельных цепях ($I_{я}$, $I_{П}$, $I_{Ш}$) и их соотношение, для чего необходимо их записать хотя бы для одного опыта. Для этого при снятии хотя бы одной характеристики кроме тока якоря $I_{я}$ нужно записывать токи возбуждения $I_{В} = I_{П}$ и шунтирующей цепи $I_{Ш}$.

Для определения степени влияния каждого из сопротивлений R_{II} и R_{III} необходимо снять три характеристики для заданных значений R_{II1} ; R_{II2} и R_{III1} ; R_{III2} в разных сочетаниях, например, в следующих комбинациях:

Вариант 1: 1) R_{II1} и R_{III1} ; 2) R_{II2} и R_{III1} ; 3) R_{II2} и R_{III2} ;

Вариант 2: 1) R_{II2} и R_{III1} ; 2) R_{II1} и R_{III1} ; 3) R_{II1} и R_{III2} ,

или других по указанию преподавателя.

4.3.4. Режим динамического торможения.

Для перевода двигателя в этот режим необходимо:

- 1) нажатием красной кнопки на пускателе К1 отключить двигатель от источника питания;
- 2) переключатель S3 установить в положение 1 «шунтирование двигателя»;
- 3) переключателем S2 установить заданное значение сопротивления (сначала $R_{T1} = R_{III1}$, а затем $R_{T2} = R_{III2}$).

Так как двигатель отключен от сети, то для создания потока и момента необходимо, чтобы произошел процесс его самовозбуждения. Он возникает за счет остаточного магнитного потока при вращении якоря и *происходит только при таком направлении вращения, когда знак ЭДС и направление тока возбуждения таковы, что создаваемый этим током поток совпадает по направлению с остаточным магнитным потоком.* При другом направлении вращения напряжение и ток якоря не увеличиваются – самовозбуждения не происходит. Поэтому сначала необходимо по вольтметру убедиться в том, что оно произошло – напряжение в процессе увеличения скорости будет возрастать. Для этого можно разогнать двигатель до максимальной скорости (не более 1500 об/мин), а затем, уменьшая скорость, снимать характеристику.

4.4. Выключение установки.

После снятия всех требуемых механических характеристик необходимо:

- 1) Установить тумблер включения нагрузочной машины в положение «ВЫКЛ»;
- 2) Нажатием кнопки на корпусе пускателя К1 отключить его;
- 3) Выключить автоматические выключатели АВ1 и АВ2.

5. Обработка результатов экспериментов и оформление отчета

5.1. Расчет M_d

При обработке результатов экспериментов следует руководствоваться указаниями, приведенными в разделе «Методические указания по выполнению работ, обработке экспериментальных данных и оформлению отчёта».

Для расчета момента M_d необходимо учитывать, какая из машин преодолевает механические потери, следующим образом:

- a) НМ отключена ($M_{НМ} = 0$; $\omega = \omega_{ХХ} > 0$): $M_d = M_{ХХ}$
- b) НМ включена в направлении «Согласно» ($M_{НМ} > 0$): $M_d = -M_{НМ} + M_{ХХ}$
- c) НМ включена в направлении «Встречно» ($M_{НМ} < 0$):

при $\omega > 0$ момент потерь $M_{ХХ} < 0$: $M_d = M_{НМ} + M_{ХХ}$

при $\omega < 0$ момент потерь $M_{ХХ} > 0$: $M_d = M_{НМ} - M_{ХХ}$

Момент $M_{НМ}$ рассчитывается по формуле: $M_{НМ} = k_M \cdot I_{НМ}$, где: $k_M = 2,27$ Нм/А, а значения $M_{ХХ}$ определяются в зависимости от скорости по Таблица 10. Результаты расчетов сводятся в таблицу, приводимую в отчете:

Таблица 19

Экспериментальные данные				Результаты обработки			
$U_{я}$	I	n	$I_{НМ}$	ω	$M_{НМ}$	$M_{ХХ}$	M_d
В	А	об/мин	А	рад/с	Нм	Нм	Нм

5.2. Построение графиков

1. Для оценки расхождения расчетных и экспериментальных характеристик их необходимо строить попарно. При большом числе характеристик их следует разместить на двух рисунках. Например, на одном – характеристики 1; 2; 4 (см. Рис. 6), а на другом – характеристики 3, но на каждом из них должна быть построена для сравнения естественная характеристика.
2. Все характеристики, включая расчетные, должны строиться в диапазоне изменения переменных, использованных в экспериментах, т.е. не более: для тока $\pm 5\text{А}$, для скорости от $+1500$ до -500 об/мин.
3. Характеристики на графиках должны иметь обозначения (номера, цвет, тип линий или другие признаки), которые расшифровываются в надписи под рисунком или тексте. Графики не должны быть мелкими, каждый должен занимать всю ширину страницы.

5.3. Рекомендации по оформлению отчёта

1. Отчет выполняется и представляется в электронном виде. При этом можно использовать электронную версию учебного пособия: схему, паспортные данные, формулы и др.
2. Расчеты необходимо представить в форме таблиц.
3. Рекомендуются материал по каждому пункту исследований, указанных в программе работы, представлять в виде блоков, в состав которых входят:
 - 1) расчет;
 - 2) таблица обработки экспериментальных данных;
 - 3) график расчетных и экспериментальных характеристик;
 - 4) анализ полученных результатов и выводы.
4. В выводах необходимо дать оценку влияния исследуемого параметра на вид механической характеристики и указать предполагаемую причину расхождения расчетных и экспериментальных характеристик.

Сравнение и анализ характеристик с точки зрения влияния внешних факторов, а также расхождение расчетных и экспериментальных механических характеристик должны проводиться отдельно по двум показателям: скорости идеального холостого хода и наклону механических характеристик. В зависимости от того, по какому из этих показателей характеристики отличаются, предполагаемая причина расхождения устанавливается, используя выражение механической характеристики.

РАБОТА №3. Исследование характеристик системы генератор-двигатель

1. Программа работы

1.1. Подготовка к работе.

Рассчитать и построить:

1.1.1. Естественную механическую характеристику двигателя.

1.1.2. Искусственные механические характеристики при питании якоря двигателя от генератора для заданных значений ЭДС генератора E_G .

1.1.3. Характеристики $P_d = f(\omega)$ и $M_d = f(\omega)$ при $I_a = I_n = \text{const}$ для двух зон:

- 1) При изменении ЭДС генератора от 0 до максимального значения $U_{G\text{макс}}$ и номинальном потоке возбуждения двигателя ($I_{вдн} = 0,58\text{А} = \text{const}$);
- 2) При $U_G = U_{G\text{макс}} = \text{const}$ и уменьшении тока возбуждения двигателя.

1.2. Работа в лаборатории.

1.2.1. Ознакомление с устройством лабораторной установки, расположением и назначением оборудования.

1.2.2. Подготовка к работе.

1.2.3. Снятие характеристики холостого хода генератора $E_G = f(I_{вг})$.

1.2.4. Снятие характеристик, указанных в п.п. 1.1.1 ÷ 1.1.2.

1.3. Оформление отчёта.

2. Паспортные данные установки

2.1. Генератор. Тип: 4ПО100S.

$P_n = 1,1 \text{ кВт}$; $U_n = 220 \text{ В}$; $I_n = 6,5 \text{ А}$; $n_n = 1500 \text{ об/мин}$; $R_G = 6,2 \text{ Ом}$;

2.2. Двигатель. Тип: 4ПО100S1.

$P_n = 0,55 \text{ кВт}$; $U_n = 220 \text{ В}$; $I_n = 3,5 \text{ А}$; $n_n = 1000 \text{ об/мин}$; $I_{вдн} = 0,58 \text{ А}$; $R_d = 11,0 \text{ Ом}$;

Таблица 20. Зависимость коэффициента $c\Phi_D$ от тока возбуждения $I_{ВД}$

$c\Phi_D$	Вб	1,02	1,3	1,45	1,55	1,65	1,7	1,73	1,75	1,79
$I_{ВД}$	А	0,2	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,58	0,65

Нагрузочная машина. Тип: CFM 71S.

$P_H = 5,0$ Нм; $U_H = 380$ В; $f_H = 100$ Гц; $I_H = 2,2$ А; $n_H = 2000$ об/мин.

2.4. Асинхронный двигатель. Тип: АИР 80А4 В1.

$P_H = 1,1$ кВт; $U_H = 380$ В; $I_H = 3,2$ А; $n_H = 1335$ об/мин.

2.5. Приводной преобразователь: MOVIDRIVE MDX61B0022-5A3:

$P_H = 2,2$ кВт; $U_H = 3 \times 380$ В; $f_H = 50$ Гц; $I_H = 5,5$ А; $k_M = 2,27$

2.6. Механические потери (момент холостого хода $M_{ХХ} = f(\omega)$):

Таблица 21

Скорость ω, рад/с		20	40	60	80	100	120	140	150
Момент $M_{ХХ}$, Нм	ЛУ1	0,55	0,63	0,7	0,75	0,78	0,85	0,9	0,93
	ЛУ3	0,49	0,52	0,54	0,56	0,58	0,6	0,62	0,64

3. Расчет характеристик

В данной работе исследуется электропривод постоянного тока при регулировании скорости изменением напряжения якоря и магнитного потока.

Система электропривода, в которой для регулирования напряжения якоря двигателя используется генератор постоянного тока, ЭДС которого E_G регулируется в широких пределах, называется системой генератор–двигатель (Г – Д). Генератор предназначен для преобразования механической энергии в электрическую. Роль источника механической энергии выполняет асинхронный двигатель, ротор которого вращается с постоянной скоростью.

Общим для всех машин постоянного тока является выражение: $E = c\Phi\omega$.

При постоянной скорости вращения якоря генератора ω_{Γ} регулирование его ЭДС производится изменением магнитного потока Φ_{Γ} , создаваемого током обмотки возбуждения генератора $I_{\text{ВГ}}$. Связь между ними определяется кривой намагничивания $\Phi_{\Gamma} = f(I_{\text{ВГ}})$. Однако на практике используется зависимость ЭДС генератора E_{Γ} от тока возбуждения $I_{\text{ВГ}}$ (Рис. 8), называемая характеристикой холостого хода генератора $E_{\Gamma} = f(I_{\text{ВГ}})$. По форме она алогична кривой намагничивания, не рассчитывается, а снимается экспериментально.

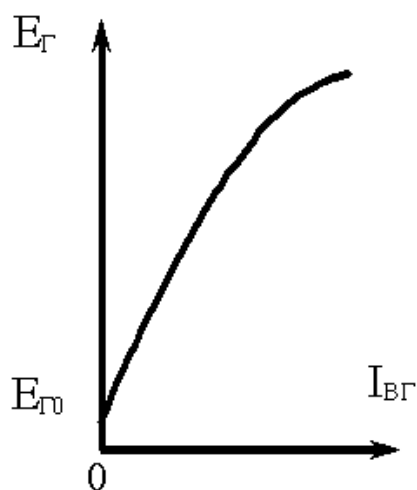


Рис. 8. Характеристика холостого хода генератора.

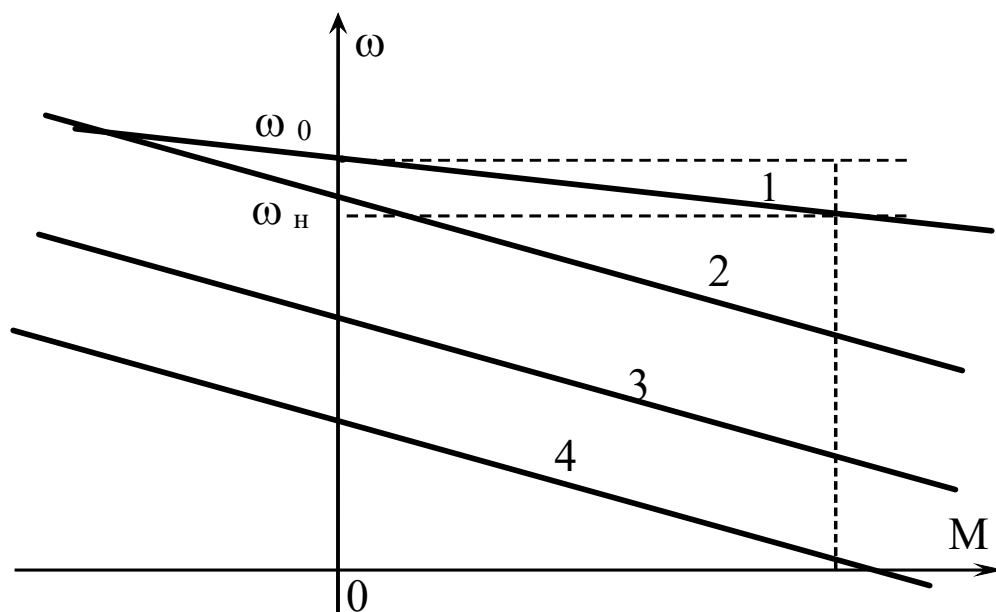


Рис. 9. Механические характеристики двигателя в системе Γ – Д.

3.1. Расчет естественной характеристики (линия 1 на Рис. 9)

Выполняется так же, как в п.4 РАБОТЫ №1. Если РАБОТА №1 уже была выполнена ранее, то можно воспользоваться ее результатами, т.к. двигатель используется тот же.

3.2. Расчёт искусственных механических характеристик двигателя для трех заданных значений ЭДС генератора E_{Γ} .

Уравнение механической характеристики применительно к системе Γ–Д:

$$\omega = \frac{E_{\Gamma}}{c\Phi_{\text{Д}}} - \frac{R_{\Gamma\text{Д}}}{(c\Phi_{\text{Д}})^2} M = \omega_{0\Gamma\text{Д}} - \Delta\omega_{\text{СГД}}, \quad (1)$$

где $R_{\Gamma\text{Д}} = R_{\text{Д}} + R_{\Gamma}$ – полное сопротивление цепи якорей генератора и двигателя.

Скорости идеального холостого хода для заданных значений ЭДС генератора E_{Γ} и номинальном потоке двигателя рассчитываются по формуле:

$$\omega_{0\Gamma\text{Д}} = \frac{E_{\Gamma}}{c\Phi_{\text{ДН}}}, \quad (2)$$

а статическое падение скорости $\Delta\omega_{\text{СГДН}}$ при $M_{\text{Н}} = c\Phi_{\text{ДН}} I_{\text{Н}}$ по формуле:

$$\Delta\omega_{\text{СГДН}} = \frac{R_{\Gamma\text{Д}}}{(c\Phi_{\text{ДН}})^2} M_{\text{Н}}. \quad (3)$$

Статическое падение скорости $\Delta\omega_{\text{СГДН}}$ и жесткость характеристик (линии 2,3,4 на Рис. 9) меньше, чем у естественной (линия 1), так как $R_{\text{ГД}} > R_{\text{д}}$.

Механические характеристики строятся в I и II квадрантах (Рис. 9) и рассчитываются по двум точкам:

- 1) $\omega = \omega_{0\text{ГД}}; M = 0;$
- 2) $\omega_{\text{СГДН}} = \omega_{0\text{ГД}} - \Delta\omega_{\text{СГДН}}; M = M_{\text{Н}}$

Механические характеристики системы Г-Д (2, 3, 4) располагаются на графике параллельно друг другу, так как $\Delta\omega_{\text{СГДН}}$ для них одинаковы.

3.3. Расчёт регулировочных характеристик двигателя $P_{\text{д}} = f(\omega)$ и

$M_{\text{д}} = f(\omega)$ выполняют для двух зон регулирования скорости (Рис. 10).

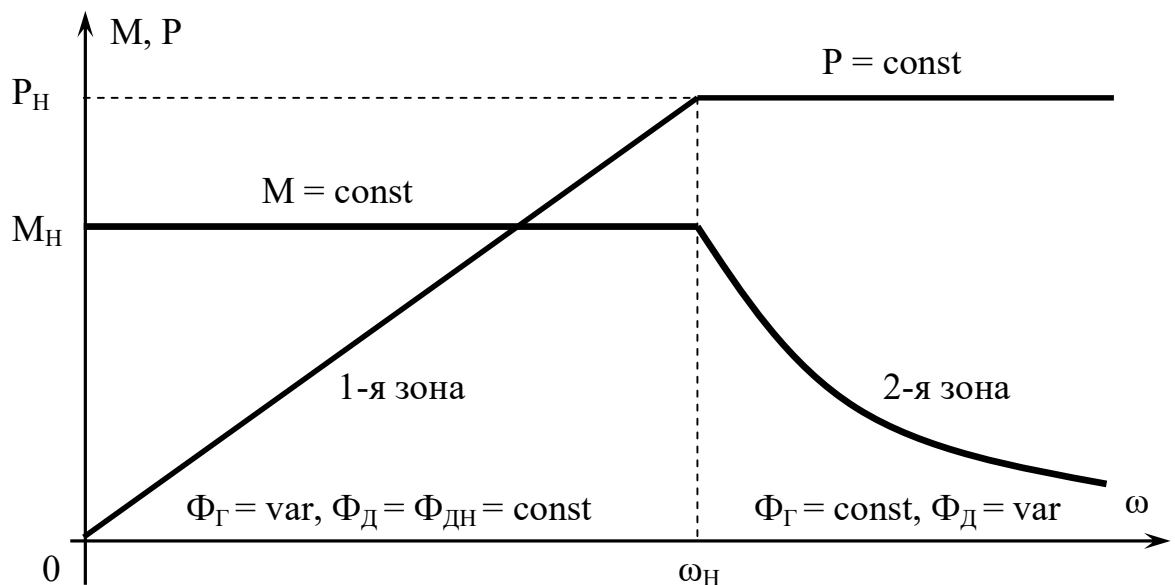


Рис. 10 Регулировочные характеристики.

В первой зоне регулирование скорости двигателя осуществляют изменением ЭДС генератора ($\Phi_{\text{Г}} = \text{var}$) до максимального напряжения, создаваемого генератором при номинальном потоке двигателя ($\Phi_{\text{ДН}} = \text{const}$), а

во второй зоне – изменением магнитного потока двигателя ($\Phi_{\text{д}} = \text{var}$) при неизменном напряжении якоря, т.е. ЭДС генератора ($\Phi_{\text{г}} = \text{const}$). Полное использование двигателя по нагреву достигается при неизменном токе якоря, равном номинальному: $I_{\text{я}} = I_{\text{ян}} = \text{const}$. При выполнении этого условия в первой зоне двигатель работает в режиме постоянства момента, т.к.

$M_{\text{н}} = c\Phi_{\text{н}} I_{\text{ян}}$, а во второй – в режиме постоянства мощности, потребляемая мощность $P_{\text{д}} = E_{\text{г}} \cdot I_{\text{я}}$ при неизменных $E_{\text{г}}$ и $I_{\text{я}}$ также не меняется. При этом момент изменяется обратно пропорционально скорости: $M = P/\omega$.

В первой зоне зависимость $P_{\text{д}} = f(\omega)$ строится по двум точкам. Одна из них – начало координат ($\omega = 0, P = 0$). Во второй точке – границе первой зоны – мощность рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{д}} = (E_{\text{г макс}} - I_{\text{ян}} R_{\text{гд}}) \cdot I_{\text{ян}}, \quad (4)$$

а скорость по (1) для фактического максимального значения $E_{\text{г}}$. Так как в первой зоне токи якоря и возбуждения поддерживаются постоянными ($I_{\text{я}} = I_{\text{ян}}$; $I_{\text{вд}} = I_{\text{вдн}}$), то момент тоже постоянен и равен: $M_{\text{н}} = c\Phi_{\text{н}} I_{\text{ян}}$.

Во второй зоне $\Phi_{\text{г}} = \text{const}$; $\Phi_{\text{д}} = \text{var}$. Регулирование скорости двигателя осуществляют ослаблением магнитного потока двигателя, уменьшая ток возбуждения двигателя. Так как $E_{\text{г}}$ и $I_{\text{я}}$ постоянны, то регулирование скорости при ослаблении магнитного потока двигателя происходит при постоянстве мощности $P_{\text{д}}$, рассчитанной по (4). Для расчёта зависимости $M = f(\omega)$ нужно задаваться значениями тока возбуждения двигателя: 0,55; 0,5; 0,45; 0,4; 0,35 А. Для них из п.2.2 (Таблица 20) определить значения $c\Phi'$ и рассчитать при $I_{\text{я}} = I_{\text{н}}$ момент: $M' = c\Phi' I_{\text{ян}}$ и скорость: $\omega = (E_{\text{г}} - I_{\text{ян}} R_{\text{гд}}) / c\Phi'$.

4. Работа в лаборатории

4.1. Описание лабораторной установки, назначение оборудования

В данной работе исследуются характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при регулировании его скорости изменением напряжения якоря и магнитного потока. Лабораторная установка, схема которой приведена на Рис. 11, расположена на двух стендах: ЛУ2 и ЛУ1(ЛУ3).

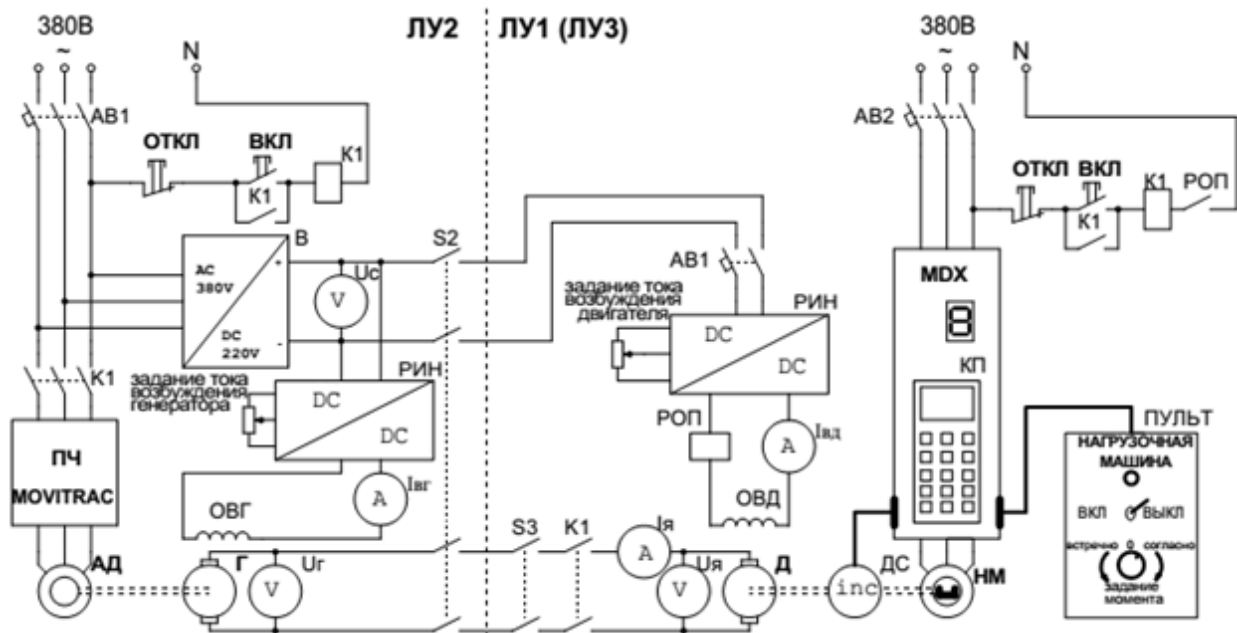


Рис. 11. Схема лабораторной установки

В качестве источника регулируемого напряжения используется генератор, ЭДС которого регулируется изменением его тока возбуждения $I_{вг}$. Для этого в цепь обмотки возбуждения включен регулируемый источник напряжения (РИН), управляемый потенциометром «задание тока возбуждения генератора». Все необходимое для этого оборудование смонтировано на лабораторной установке ЛУ2. В его состав входят: агрегат, состоящий из генератора (Г) и приводного асинхронного двигателя (АД), нерегулируемый источник постоянного тока (НВ) для питания напряжением постоянного тока 220В всех лабораторных установок, автоматический выключатель АВ1 для питания установки ЛУ2 переменным током 380В, магнитный пускатель К1 для пуска АД, регулятор тока возбуждения $I_{вг}$ и амперметр в цепи обмотки возбуждения с тем же обозначением $I_{вг}$.

ЭДС генератора измеряется вольтметром $U_{г}$.

Напряжение на двигатель подается через установленный на ЛУ2 переключатель S2, **положение которого задается преподавателем.**

Испытуемый двигатель тот же, что был использован в РАБОТЕ №1, где и приводится описание оборудования стенда (ЛУ1 или ЛУ3).

4.2. Подготовка к работе.

На ЛУ2:

- 1) включить АВ1 и с помощью потенциометра «задание тока возбуждения генератора» установить $I_{ВГ} = 0$;
- 2) кнопкой Вкл (зеленая) на корпусе магнитного пускателя К1 включить его и запустить АД.

На ЛУ1 (ЛУ3):

- 1) включить АВ1 и с помощью потенциометра «задание тока возбуждения двигателя» установить $I_{ВДН} = 0,58А$;
- 2) включить АВ2 – подается напряжение на преобразователь MOVIDRIVE.

4.3. Снятие характеристик

4.3.1. Характеристика холостого хода генератора $E_G = f(I_{ВГ})$.

Установить $I_{ВГ} = 0$. Ему соответствует значение остаточной ЭДС $E_{Г0}$. Затем, увеличивая $I_{ВГ}$ и ЭДС генератора до $E_{Г\text{макс}}$, записывать значения $I_{ВГ}$ и E_G . Достаточно снять $E_{Г0}$ и 5÷6 значений E_G , из которых три задаются преподавателем для снятия механических характеристик.

Дальнейшая работа проводится, в основном, на стенде двигателя

4.3.2. Пуск двигателя. На ЛУ2 задать $I_{ВГ} = 0$. На ЛУ1 (ЛУ3) переключатель S3 установить в положение «1» и, включив магнитный пускатель К1, замкнуть цепь якорей. Затем плавным увеличением напряжения от $E_{Г0}$ до первого заданного значения $E_{Г1}$ разогнать двигатель. Тем самым достигается

ограничение тока якоря двигателя при пуске при питании его от источника с регулируемым напряжением.

4.3.3. Искусственные механические характеристики двигателя для заданных значений ЭДС генератора E_g .

Механические характеристики снимаются так же, как в РАБОТЕ №1, изменяя нагрузку, создаваемую нагрузочной машиной, с той лишь разницей, что при питании от генератора ток якоря может протекать в обоих направлениях. Поэтому характеристики нужно снимать и в двигательном, и в тормозном режимах в пределах до $I_{я} = \pm 5A$.

4.3.4. Характеристики $P_d = f(\omega)$ и $M_d = f(\omega)$.

Зависимости $P = f(\omega)$ и $M = f(\omega)$ снимают в двух зонах при номинальном значении тока якоря $I_{ян} = 3,5A$, который был принят при расчетах. Он устанавливается и поддерживается постоянным с помощью НМ.

а) Регулирование скорости изменением подводимого к якорю двигателя напряжения (зона 1) выполняют при $I_{вдн} = 0,58A = const$. Опыт начинают с установки током возбуждения генератора небольшой скорости двигателя (при напряжении на якоре $50 \div 70V$) и задания с помощью НМ номинального значения тока $I_{я} = 3,5A$. Эксперимент выполнять, задавая те же значения тока $I_{вг}$, что и в п.4.3.3 и поддерживая постоянными $I_{вдн}$ и $I_{ян}$.

Записывать $U_{я}$, n и $I_{нм}$.

б) Регулирование скорости ослаблением тока возбуждения двигателя (зона 2) выполнять при напряжении двигателя, максимальном в первой зоне.

С помощью регулятора возбуждения двигателя $I_{вд}$ последовательно уменьшать ток возбуждения $I_{вд}$ (0,55; 0,5; 0,45; 0,4; 0,35 A) и посредством НМ поддерживать ток якоря $I_{я} = 3,5A$. Записывать $I_{вд}$, n и $I_{нм}$.

5. Обработка результатов экспериментов и оформление отчета

5.1. Расчет M_d и P_d

При обработке результатов экспериментов следует руководствоваться указаниями, приведенными в разделе «Методические указания по выполнению работ, обработке экспериментальных данных и оформлению отчёта».

Для расчета момента M_d необходимо учитывать, какая из машин преодолевает механические потери, следующим образом:

- а) НМ отключена ($M_{HM} = 0$; $\omega = \omega_{XX} > 0$): $M_d = M_{XX}$
- б) НМ включена в направлении «Согласно» ($M_{HM} > 0$): $M_d = -M_{HM} + M_{XX}$
идеальный холостой ход: $I_{я} = 0$; $M_d = 0$; $\omega = \omega_0$: $M_{HM} = M_{XX}$
- в) НМ включена в направлении «Встречно» ($M_{HM} < 0$):
при $\omega > 0$ момент потерь $M_{XX} < 0$: $M_d = M_{HM} + M_{XX}$
при $\omega < 0$ момент потерь $M_{XX} > 0$: $M_d = M_{HM} - M_{XX}$

Момент M_{HM} рассчитывается по формуле: $M_{HM} = k_M \cdot I_{HM}$, где $k_M = 2,27 \text{ Нм/А}$, а значения M_{XX} определяются соответственно скорости по Таблица 21.

Результаты обработки, необходимые для построения механических характеристик, сводятся в следующую таблицу, приводимую в отчете:

Таблица 22

Экспериментальные данные				Результаты обработки			
$U_{я}$	$I_{я}$	n	I_{HM}	ω	M_{HM}	M_{XX}	M_d
В	А	об/мин	А	рад/с	Нм	Нм	Нм

При построении характеристик $P_{д} = f(\omega)$ и $M_{д} = f(\omega)$ рассчитываются момент и мощность: момент $M_{д}$ – как описано выше и представлено в Таблица 22, а мощность по формуле: $P_{д} = M_{д} \cdot \omega$. Результаты расчетов, необходимых для построения характеристик $P_{д} = f(\omega)$ и $M_{д} = f(\omega)$ сводят в следующую таблицу.

Таблица 23

Экспериментальные данные				Результаты обработки				
$U_{я}$	$I_{я}$	n	$I_{нм}$	ω	$M_{нм}$	$M_{хх}$	$M_{д}$	$P_{д}$
В	А	об/мин	А	рад/с	Нм	Нм	Нм	Вт

5.2. Построение графиков

1. Графики следует выполнять для всех опытов отдельно согласно: Рис. 8 – экспериментальную кривую, Рис. 9 и Рис. 10 – расчетные и опытные. На Рис. 9 должна быть построена для сравнения естественная характеристика.
2. Все характеристики, включая расчетные, должны строиться в диапазоне изменения переменных, использованных в экспериментах, т.е. не более: для тока $\pm 5\text{А}$, для скорости от +1200 до – 500 об/мин.
3. Характеристики на графиках должны иметь обозначения (номера, цвет, тип линий или другие признаки), которые расшифровываются в надписи под рисунком или тексте. Графики не должны быть мелкими, каждый должен занимать всю ширину страницы.

5.3. Рекомендации по оформлению отчёта

1. Отчет выполняется и представляется в электронном виде. При этом можно использовать электронную версию учебного пособия: схему, паспортные данные, формулы и др.

2. В расчетах для каждой характеристики необходимо привести пример для одной точки. В результатах расчетов необходимо указывать не только численные значения величин, но и их размерность.

3. Рекомендуется материал по каждому пункту исследований, указанных в программе работы, представлять в виде блоков, в состав которых входят:

- 1) расчет;
- 2) таблица обработки экспериментальных данных;
- 3) график расчетных и экспериментальных характеристик;
- 4) анализ полученных результатов и выводы.

4. В выводах необходимо дать оценку влияния исследуемого параметра на вид механической характеристики и указать предполагаемую причину расхождения расчетных и экспериментальных характеристик.

Сравнение и анализ характеристик с точки зрения влияния внешних факторов, а также расхождение расчетных и экспериментальных механических характеристик должны проводиться отдельно по двум показателям: скорости идеального холостого хода и наклону механических характеристик. В зависимости от того, по какому из этих показателей характеристики отличаются, предполагаемая причина расхождения устанавливается, используя выражение механической характеристики.

Кроме того, следует пояснить характер изменения момента и скорости для двух способов регулирования скорости. Отметить, почему не следует включать в цепь якорей добавочные сопротивления для регулирования скорости двигателя.

РАБОТА № 4. Исследование механических характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором при питании от сети

1. Программа работы

1.1. Подготовка к работе.

Рассчитать и построить механические характеристики:

1.1.1. Естественную.

1.1.2. Две искусственные с добавочными сопротивлениями $R_{П1}$ и $R_{П2}$ в цепи ротора.

1.1.3. Три характеристики динамического торможения: для двух добавочных сопротивлений в цепи ротора $R_{П1}$ и $R_{П2}$ и постоянном токе статора $I_{ДТ1}$, а также характеристику при сопротивлении $R_{П2}$ и токе $I_{ДТ2}$.

1.2. Работа в лаборатории.

1.2.1. Ознакомление с устройством лабораторной установки, расположением и назначением оборудования.

1.2.2. Подготовка к работе.

1.2.3. Снятие механических характеристик, указанных в п.п. 1.1.1 ÷ 1.1.3.

1.3. Оформление отчета.

2. Данные машин и сопротивлений

2.1. Испытуемая машина (ИМ). асинхронный двигатель с фазным ротором, тип: МТФ 011-6У1.

$P_H = 1,4$ кВт; $U_H = 380/220$ В; $I_H = 5,3/9,2$ А; $n_H = 880$ об/мин; $p = 3$; $R_1 = 6,0$ Ом; $R_2 = 0,7$ Ом; $X_1 = 4,0$ Ом; $X_2 = 0,57$ Ом; $X_\mu = 62,5$ Ом; $k_\epsilon = 3,05$.

2.2. Нагрузочная машина (НМ). Тип: DFY 90 МВ/ТН SM30

$U_H = 380$ В; $f_H = 150$ Гц; $n_H = 3000$ об/мин; $M_H = 12$ Нм; $I_H = 7,9$ А.

2.3. Приводной преобразователь (MDX): MOVIDRIVE MDX61B0040 - 5A3.

$$U_C = 3 \times 380 \text{ В}, \quad f_H = 50 \text{ Гц}; \quad P_H = 6,6 \text{ кВа}; \quad I_H = 9,5 \text{ А}; \quad k_M = 1,52 \text{ Нм/А}.$$

2.4. Механические потери (момент холостого хода M_{XX}):

Таблица 24

ω	рад/с	10	20	40	60	80	100	120	140
M_{XX}	Нм	1	1	1	1	1,05	1,15	1,3	1,65

2.5. Добавочное сопротивление в цепи ротора $R_{П}$:

Таблица 25

Положение переключателя S3	4	3	2	1
Величина $R_{П}$, Ом	0	2,5	6,0	10,5
Обозначение сопротивлений	-	R_1	$R_1 + R_2$	$R_1 + R_2 + R_3$

3. Расчет характеристик

3.1. Расчёт механических характеристик асинхронного двигателя – естественной и искусственных с добавочными сопротивлениями $R_{П}$ в цепи ротора

Выполняется по формуле:

$$M = \frac{2M_K(1+\varepsilon)}{s/s_K + s_K/s + 2\varepsilon}, \quad (1)$$

где M_K , s_K – критические момент и скольжение, которые являются координатами критической точки – граничной между рабочим и пусковым участками механической характеристики двигателя. Их значения в двигательном (Д) и генераторном (Г) режимах определяются выражениями:

$$M_{\text{КД}} = \frac{mU_{\Phi}^2}{2\omega_0(\sqrt{R_1^2 + X_K^2 + R_1})}; \quad M_{\text{КГ}} = \frac{mU_{\Phi}^2}{2\omega_0(\sqrt{R_1^2 + X_K^2 - R_1})} \quad (2)$$

$$S_{\text{КД}} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}}; \quad S_{\text{КГ}} = -\frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} \quad (3)$$

ε – коэффициент, учитывающий активное сопротивление обмотки статора:

$$\varepsilon = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} \quad (4)$$

R_1, X_1 и R_2, X_2 – активные и реактивные сопротивления обмоток статора (*₁) и ротора (*₂). Их значения приведены в п.2.1. Обмотки статора и ротора электрически между собой не связаны, а формула (1) получена для так называемой схемы замещения, в которой эти сопротивления включены последовательно. Поэтому сопротивления обмотки ротора необходимо привести к цепи статора: $R_2' = R_2 \cdot k_e^2$, $X_2' = X_2 \cdot k_e^2$, где k_e – коэффициент трансформации, указанный, как и величины всех сопротивлений, в п. 2.1.

Для сокращения записи обозначено: $X_K = X_1 + X_2'$ - полное реактивное сопротивление схемы замещения.

На естественной характеристике $R_2' = R_2 \cdot k_e^2$, на искусственной – при введении в цепь ротора добавочного сопротивления R_{Π} – приведенное сопротивление ротора равно: $R_2' = (R_2 + R_{\Pi}) \cdot k_e^2$. В формулах (2): $m = 3$ – число фаз двигателя; $U_{\Phi} = 220$ В – напряжение фазы обмотки статора

Скольжение S характеризует отставание ротора от вращающегося со скоростью ω_0 магнитного поля, создаваемого обмоткой статора:

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}; \quad \omega_0 = \frac{2\pi f}{p} \quad (5)$$

ω_0 - называется скоростью идеального холостого хода или синхронной, при которой $\omega = \omega_0$ и $M = 0$, т.е. ротор вращается синхронно с полем статора и

$S=0$. Частота напряжения сети $f = 50$ Гц, а число пар полюсов двигателя $p=3$.

Следовательно, скорость идеального холостого хода $n_0 = 1000$ об/мин.

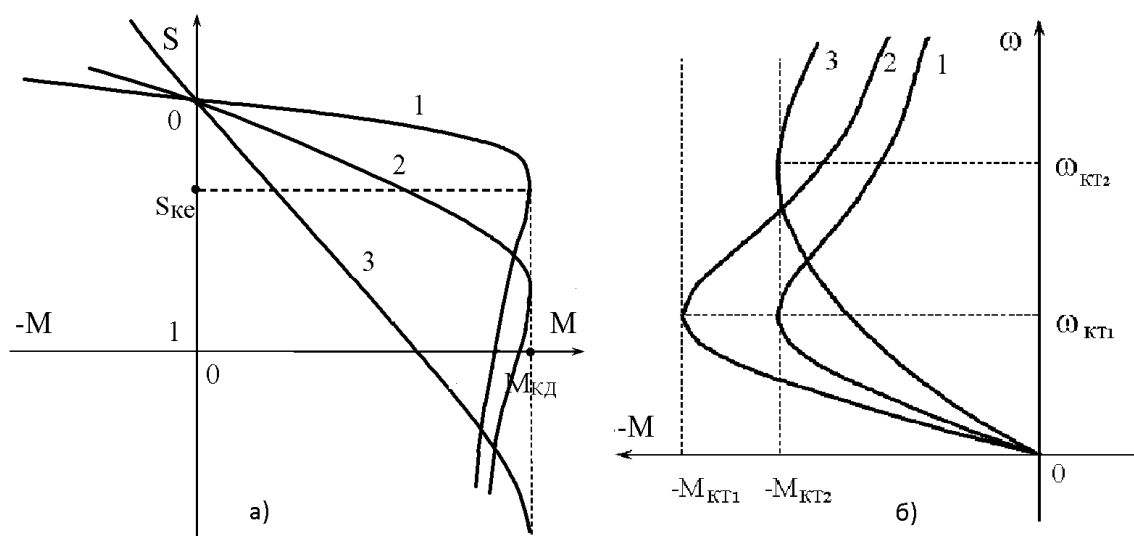


Рис. 12. Механические характеристики асинхронного двигателя:
а) Естественная (1) и искусственные (2 и 3)
б) динамического торможения

Для расчета механических характеристик по (1) нужно рассчитать: $M_{кд}$, $M_{кГ}$, $S_{кд}$, $S_{кГ}$. При расчете характеристик для режимов двигательного ($S>0$) и противовключения ($S>1$) используются значения $M_{кд}$ и $S_{кд}$, а для генераторного ($S<0$): $M_{кГ}$ и $S_{кГ}$. Для естественной и искусственной характеристик $M_{к}$ и ϵ , а, следовательно, и числитель выражения (1), одинаковы, отличие только в величине $S_{к}$.

При расчетах необходимо задавать значения S в пределах от $S = -0,2$ до $S = + 1,5$ (с интервалами $0,1$), что соответствует реальному диапазону работы на лабораторной установке. Расчеты сводятся в Таблица 26, в которой обозначено: ЗН – знаменатель выражения (1). Для построения на одном графике и сравнения расчетных и экспериментальных характеристик необходимо пересчитать задаваемые значения скольжений S на угловую скорость ω по формулам: $\omega = \omega_0 (1 - S)$ и $\omega = \pi \cdot n/30$, строя их в осях ω и M .

Таблица 26. Расчет естественной механической характеристики

Естественная характеристика					
S	$S_{ке}/S$	$S/S_{ке}$	ЗН	M_e	ω
				Нм	рад/с

Таблица 27. Расчет искусственных механических характеристик

		Искусственная характеристика ($R_{\Pi 1}$)				Искусственная характеристика ($R_{\Pi 2}$)			
S	ω	$S_{ки1}/S$	$S/S_{ки1}$	ЗН	$M_{и1}$	$S_{ки2}/S$	$S/S_{ки2}$	ЗН	$M_{и2}$
	рад/с				Нм				Нм

3.2. Расчет механических характеристик для режима динамического торможения

Выполняется по упрощенной формуле:

$$M = \frac{2M_{КТ}}{\omega/\omega_{КТ} + \omega_{КТ}/\omega} \quad (7)$$

Координаты критической точки:

$$M_{КТ} = \frac{mI_{\Pi}^2 X_{\mu}^2}{2\omega_0(X_{\mu} + X_2')}; \quad \omega_{КТ} = \omega_0 \frac{R_2'}{X_{\mu} + X_2'} \quad (8)$$

Реактивное сопротивление контура намагничивания X_{μ} , определяемое по начальной части характеристики холостого хода, указано в паспортных данных (п.2.1). Расчетное значение переменного тока I_{Π} , эквивалентное по создаваемой им МДС статора заданному значению постоянного тока $I_{ДТ}$, зависит от схемы включения обмоток статора. При соединении обмоток статора звездой: $I_{\Pi} = 0,816 I_{ДТ}$. Из (8) следует, что величина R_{Π} влияет только на $\omega_{КТ}$, а $M_{КТ}$ от него не зависит. От величины тока $I_{ДТ}$ зависит только $M_{КТ}$.

$\omega_{КТ}$ и $M_{КТ}$ рассчитываются для каждой кривой и сводятся в таблицу.

Таблица 28

Номер кривой		1	2	3
$I_{ДТ}$	А	$I_{ДТ1}$	$I_{ДТ2}$	$I_{ДТ1}$
$R_{П}$	Ом	$R_{П1}$	$R_{П1}$	$R_{П2}$
$M_{КТ}$	Нм			
$\omega_{КТ}$	рад/с			

Таблица 29. Расчет характеристик режима динамического торможения

№	1				2	3			
ω	$\omega/\omega_{КТ}$	$\omega_{КТ}/\omega$	ЗН	$M_{Т1}$	$M_{Т2}$	$\omega/\omega_{КТ}$	$\omega_{КТ}/\omega$	ЗН	$M_{Т3}$

4. Работа в лаборатории

4.1. Описание лабораторной установки, назначение оборудования

Схема лабораторной установки приведена на Рис. 13. Электромашинный агрегат состоит из испытуемой машины ИМ (асинхронный двигатель с фазным ротором) и нагрузочной машины НМ. Для измерения скорости на валу НМ имеется инкрементный датчик скорости (ДС). Питание обеих машин осуществляется от сети переменного тока 380В через автоматический выключатель АВ1: ИМ – через понижающий трансформатор Т1, а НМ – через приводной преобразователь MOVIDRIVE.

Отличительной особенностью механических характеристик асинхронного двигателя является то, что они имеют участок не только с отрицательным наклоном, как у двигателей постоянного тока, но и в отличие от них – участок с положительным наклоном. Снимать механические характеристики на этом участке можно только при выполнении определенных условий. По этой причине управление НМ осуществляется от преобразователя MOVIDRIVE, работающего в *режиме регулирования скорости*. При этом

момент, развиваемый нагрузочной машиной, пропорционален ее току статора I_{HM} : $M_{HM} = k_M \cdot I_{HM}$, где $k_M = 1,52 \text{ Нм/А}$.

Напряжение на трансформатор Т1 подается через магнитный пускатель К. Подаваемое напряжение меньше номинального, что позволяет уменьшить мощность нагрузочной машины, необходимую для снятия механических характеристик двигателя вплоть до критического момента. Катушка контактора К подключается к сети 220 В через кнопки «Откл» (красная), «Вкл» (зеленая) и контакт переключателя S2. Переключателем S2 задается схема подключения обмотки статора в зависимости от вида проводимых работ согласно таблице:

Таблица 30

Положение S2	Питание статора
1	Переменным током
2	Постоянным током

В цепи обмоток статора включены амперметр I_C и вольтметр U_C , по которым производится контроль напряжения и тока статора ИМ.

Аналогично следует поступать и при снятии характеристик в режимах динамического торможения.

Для снятия искусственных механических характеристик с добавочным сопротивлением R_{Π} в цепи ротора используются сопротивления R1, R2, R3, включенные в цепи его обмотки. Заданная величина R_{Π} устанавливается переключателем S3, согласно п.2.5 (Таблица 25).

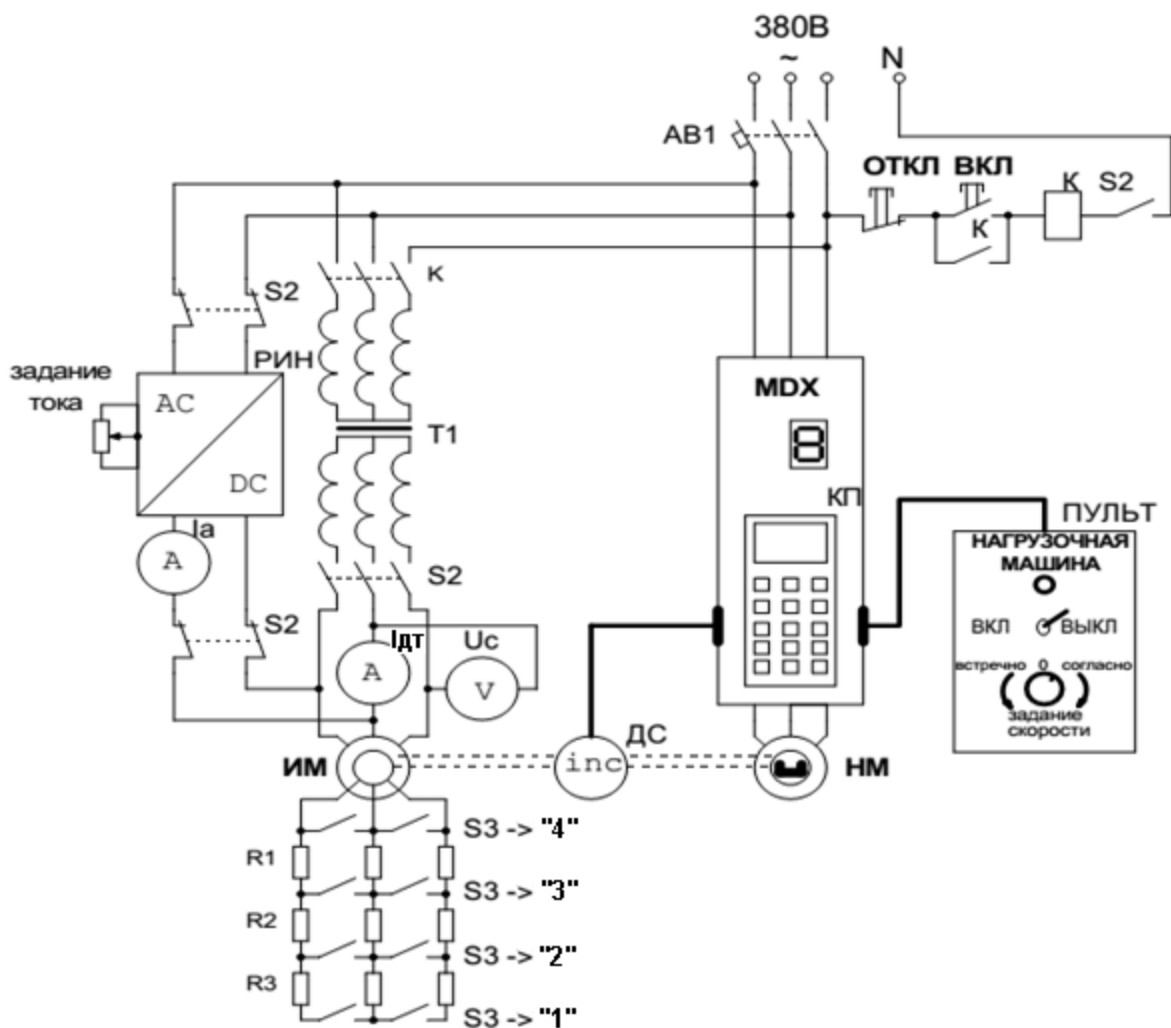


Рис. 13. Схема лабораторной установки.

Напряжение постоянного тока, которое необходимо подавать в цепь статора при работе ИМ в режиме динамического торможения, поступает от регулируемого источника напряжения (РИН) через контакты S2, если он находится в положении «2». При этом обмотка статора другими контактами S2 одновременно отключается от сети переменного тока. Заданное значение величины постоянного тока $I_{дт}$ устанавливается потенциометром «задание тока динамического торможения» по амперметру $I_{дт}$.

Управление приводным преобразователем осуществляется, как и в других работах с помощью пульта управления нагрузочной машиной.

4.2. Подготовка к работе

Установить переключатели: S2 в положение «1», а S3 – в положение «1». Включением АВ1 подать напряжение 380 В.

Пуск машин выполняется в следующей последовательности. Первой запускается нагрузочная машина. Для этого тумблер на ее пульте установить в положение «ВКЛ» и вращением ручки потенциометра в направлении «согласно» задать скорость $800 \div 900$ об/мин. Затем нажатием зеленой кнопки на корпусе пускателя К запустить асинхронный двигатель с добавочным сопротивлением $R_{\text{п}}$ в цепи ротора.

4.3. Снятие механических характеристик

Характеристики снимаются при пониженном напряжении статора (150...170)В. Фактическое значение $U_{\text{с}}$ потребуется при обработке экспериментальных данных.

Работу следует выполнять в следующей последовательности.

Сначала, учитывая, что в районе критической точки происходит излом естественной характеристики, она имеет сложную форму, из-за чего измерения необходимо выполнять с меньшими шагами, требуется определить ее координаты. Для этого нужно, не записывая показаний, увеличивать нагрузку и следить за значениями тока нагрузочной машины $I_{\text{нм}}$ и скорости. До критической точки ток растет, а скорость снижается. В критической точке ток перестает расти, а после нее начинает уменьшаться. Значение скорости, при котором прекратился рост тока, является координатой критической точки. На искусственных характеристиках, особенно при больших значениях сопротивления $R_{\text{п}}$, критическая точка чаще всего находится в области отрицательных скоростей и ее можно не определять.

Все механические характеристики следует снимать в диапазоне от +1200 до – 500 об/мин.

Рекомендуется:

- 1) отключив НМ, записать значение скорости холостого хода $\omega_{\text{хх}}$ ($M_{\text{нм}} = 0$);

- 2) включить НМ в направлении «Согласно», записать данные при синхронной скорости $n = 1000$ об/мин (точка идеального холостого хода) и при $n = 1150$ об/мин;
- 3) включить НМ в направлении «Встречно» и снижать скорость до критической точки, выбирая интервалы в зависимости от формы кривой. После критической точки характеристика почти прямая, поэтому достаточно $3 \div 4$ точек. Точку $n = 0$ не записывать.

4.3.1. Для снятия *естественной характеристики* переключатель S3 нужно установить в положение «4» ($R_{П1} = 0$). Измеряются и записываются скорость n и ток $I_{НМ}$ нагрузочной машины.

4.3.2. Для снятия *искусственных характеристик* переключатель S3 нужно устанавливать в положения, соответствующие заданным значениям $R_{П1}$ и $R_{П2}$ (Таблица 25).

4.3.3. Для перевода двигателя в *режим динамического торможения* необходимо переключатель S2 установить в положение «2». При этом обмотки статора отключаются от сети переменного тока и подключаются к регулируемому источнику постоянного напряжения РИН. Потенциометром «задание тока динамического торможения» установить заданное значение постоянного тока $I_{ДТ1}$ по амперметру $I_{ДТ}$. Переключателем S3 установить заданное значению $R_{П1}$.

Для каждой характеристики необходимо сначала определить скорость в критической точке. Увеличивая скорость нагрузочной машины, следить за изменением тока нагрузочной машины – он постепенно нарастает соответственно росту момента до критического значения, после чего начинает уменьшаться. Зафиксировать значение скорости в критической точке, чтобы затем снять механические характеристики более точно.

При токе $I_{ДТ1}$ снять механические характеристики с сопротивлениями $R_{П1}$ и $R_{П2}$, после чего установить ток $I_{ДТ2}$ и снять характеристику с $R_{П2}$.

В этом режиме характеристики симметричны относительно начала координат, поэтому скорость следует изменять только в одном направлении, как показано на Рис. 12.

5. Обработка результатов экспериментов и оформление отчета

5.1. Расчет моментов

При обработке результатов экспериментов следует руководствоваться указаниями, приведенными в разделе «Методические указания по выполнению работ, обработке экспериментальных данных и оформлению отчёта».

Для расчета момента M_d необходимо учитывать, какая из машин преодолевает механические потери, следующим образом:

- | | |
|---|--------------------------|
| a) НМ отключена ($M_{HM} = 0$; $\omega > 0$): | $M_d = M_{XX}$ |
| b) НМ включена в направлении «Согласно»: | $M_d = -M_{HM} + M_{XX}$ |
| c) НМ включена в направлении «Встречно», $\omega > 0$: | $M_d = M_{HM} + M_{XX}$ |
| d) НМ включена в направлении «Встречно», $\omega < 0$: | $M_d = M_{HM} - M_{XX}$ |

В данной работе естественная и искусственные характеристики снимаются при пониженном напряжении статора U_C . Поэтому, чтобы сравнить расчетные и экспериментальные характеристики момент двигателя M_d необходимо пересчитать на номинальное напряжение, которое использовалось в теоретических расчетах механических характеристик, по формуле:

$$M_{им} = M_d (380/U_C)^2, \quad (9)$$

где $M_{им}$ – момент двигателя, пересчитанный на номинальное напряжение; 380В и U_C – номинальное и фактическое линейные напряжения двигателя.

Результаты сводятся в таблицу, которая дополнена столбцом $M_{им}$:

Экспериментальные данные			Результаты обработки				
n	I_{HM}	U_C	ω	M_{HM}	M_{XX}	M_D	M_{IM}
об/мин	A	B	рад/с	Hм	Hм	Hм	Hм

В режиме динамического торможения двигатель отключен от сети переменного тока, и в цепь статора подается постоянный ток. Поэтому для этого опыта **расчет M_{IM} не выполняется** и столбец M_{IM} не нужен.

5.2. Построение графиков

1. Для оценки расхождения расчетных и экспериментальных характеристик их необходимо строить попарно для каждого опыта: на одном графике – для естественной и искусственных характеристик, на другом – для режима динамического торможения.
2. Все характеристики, включая расчетные, должны строиться в диапазоне измерения переменных, использованных в экспериментах, т.е. по скорости от +1200 до – 500 об/мин.
3. Характеристики на графиках должны иметь обозначения (номера, цвет, тип линий или другие признаки), которые расшифровываются в надписи под рисунком или тексте. Графики не должны быть мелкими, каждый должен занимать всю ширину страницы.

5.3. Рекомендации по оформлению отчёта

1. Отчет выполняется и представляется в электронном виде. При этом можно использовать электронную версию учебного пособия: схему, паспортные данные, формулы и др.
2. В расчетах для каждой характеристики необходимо привести пример для одной точки. В результатах расчетов необходимо указывать не только численные значения величин, но и их размерность.

3. Рекомендуется материал по каждому пункту исследований, указанных в программе работы, представлять в виде блоков, в состав которых входят:

- 1) расчет;
- 2) таблица обработки экспериментальных данных;
- 3) график расчетных и экспериментальных характеристик;
- 4) анализ полученных результатов и выводы.

4. В выводах необходимо дать оценку влияния исследуемого параметра на вид механической характеристики и указать предполагаемую причину расхождения расчетных и экспериментальных характеристик.

Сравнение и анализ характеристик с точки зрения влияния внешних факторов, а также расхождение расчетных и экспериментальных механических характеристик должны проводиться отдельно по двум показателям: скорости идеального холостого хода и наклону механических характеристик. В зависимости от того, по какому из этих показателей характеристики отличаются, предполагаемая причина расхождения устанавливается, используя выражение механической характеристики.