

Федеральное агентство по образованию
Российский государственный профессионально-педагогический
университет
Инженерно-педагогический институт
Кафедра электрооборудования и автоматизации промышленных
предприятий

Н.И. Томашевский, Д.Н. Томашевский,
А.А. Емельянов, В.В. Ипполитов

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Учебно-методическое пособие к лабораторному практикуму

Допущено Учебно-методическим объединением по профессионально-педагогическому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 050501.19 – Профессиональное обучение (электроэнергетика, электротехника и электротехнологии)

Екатеринбург
2006

Исследование статических характеристик электроприводов:
Учебно-методическое пособие. Екатеринбург. Росс. гос. проф.-пед. ун-т,
2006. 132 с.

Авторы:

Н.И. Томашевский, Д.Н. Томашевский,

А.А. Емельянов и В.В. Ипполитов.

Под редакцией канд. техн. наук, доцента Н.И. Томашевского.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. М.Л. Хазин (профессор кафедры
эксплуатации горного оборудования УГГУ);
д-р техн. наук, профессор Г.К. Смолин
(декан электроэнергетического факультета РГПШУ);
канд. техн. наук, доцент А.А. Карпов
(зав. кафедрой МТ РГПШУ).

Разработано совместно кафедрой ЭП РГПШУ и кафедрой ЭЭС
УГТУ-УПИ.

Излагаются соответствующие понятия и теоретические
положения дисциплины «Электрический привод», методика
экспериментального исследования статических характеристик
электроприводов постоянного и переменного тока в различных режимах
работы. Формулируются задания к лабораторным работам и
организационно-методические принципы их выполнения.

Пособие предназначено студентам заочной формы обучения
специальности 1460465 Электропривод и автоматика промышленных
установок и технологических комплексов, а также может использоваться
студентами всех форм обучения специальности 050501 Профессиональное
обучение (электроэнергетика, электротехника и электротехнологии)
(030500.19) специализации «Электротехника, электротехнологии и
технологический менеджмент» (030503.19).

Библиогр.: 25 назв., Рис. 77, Табл. 6, Приложение 1.

© Российский государственный
профессионально-педагогический
университет, 2006.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
Раздел первый	
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ К ИССЛЕДОВАНИЮ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ	8
<i>Глава первая. Решение прямых задач. Расчет и построение статических характеристик двигателей постоянного и переменного тока</i>	8
1.1. Основные понятия	8
1.2. Расчет и построение характеристик двигателей постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения (ДПТ НВ)	13
1.3. Расчет и построение основных характеристик двигателей постоянного тока с независимым возбуждением при питании цепи якоря от управляемых преобразователей электрической энергии (ШЭЭ)	20
1.4. Расчет и построение естественных характеристик двигателей постоянного тока последовательного (ДПТ ПВ) и смешанного (ДПТ СВ) возбуждения	23
1.5. Расчет и построение граничных характеристик электроприводов	25
1.6. Расчет и построение искусственных характеристик электроприводов с двигателями постоянного тока	28
1.6.1. Метод естественной характеристики	30
а) Расчет и построение искусственных характеристик при $U_a \neq U_{a_N}$ или $E_{nээ} \neq E_{nээ_N}$	30
б) Расчет и построение искусственных характеристик при $R_a = r_a + R_{a\text{доб}} + r_{онв}$	33
1.6.2. Метод граничной характеристики	34
1.6.3. Метод переходной характеристики	34
1.6.4. Графический метод	37
1.6.5. Построение искусственных характеристик при $\Phi \neq \Phi_{m_N}$	40

1.6.6. Расчёт и построение статических характеристик электроприводов постоянного тока в искусственных схемах включения	43
1.7. Статические характеристики асинхронных двигателей	53
1.7.1. Эквивалентная схема замещения, баланс электрической мощности и уравнения статических характеристик АД	53
1.7.2. Другая форма записи $M_{эм} = f(S)$, так называемая «формула Клосса»	57
1.7.3. Расчёт естественной механической характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	59
1.7.4. Расчёт естественной механической характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором (с кольцами)	63
1.7.5. Расчёт и построение естественной электромеханической характеристики $S = f(I_S)$ асинхронного двигателя по паспортным данным	65
1.8. Расчёт и построение статических характеристик асинхронных двигателей в режиме динамического торможения с независимым возбуждением	67
1.9. Построение пусковых диаграмм резисторных электроприводов	70
Глава вторая. Решение обратных задач. Определение параметров электрических цепей электроприводов по заданным координатам статических характеристик	74
2.1. Определение сопротивлений пусковых резисторов в электроприводах постоянного и переменного тока	74
2.1.1. Графический метод, используемый в электроприводах постоянного тока	74
2.1.2. Аналитический метод	75
2.1.3. Определение ступеней пускового резистора в цепи ротора асинхронного двигателя	77
2.1.4. Определение параметров цепей электропривода в схеме шунтирования ДПТ НВ (схема I)	78

2.1.5. Определение параметров цепей электропривода в схеме шунтирования якоря двигателя последовательного возбуждения (схема III)	80
2.1.6. Определение параметров цепей электропривода в схеме шунтирования якоря с внесением обмотки последовательного возбуждения в шунтирующую цепь (схема IV)	83
2.2. Определение параметров питающей сети	86
Раздел второй	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	
СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ	88
<i>Глава третья. Методика экспериментального определения координат статических характеристик электроприводов</i>	88
3.1. Цель и задачи лабораторного практикума	88
3.2. Условия обеспечения установившегося движения ($n = Const$) системы «ИМ-ВМ» при выполнении лабораторных работ	89
3.3. Используемые режимы работы ВМ для экспериментального определения координат статических характеристик ИМ	94
3.4. Лабораторные стенды экспериментальных установок	100
3.5. Организация выполнения лабораторных работ студентами	105
3.6. Калибровка вспомогательной машины	108
3.6.1. Определение $c\Phi_{тВМ}$	108
3.6.2. Определение $(I_{xx})_{ВМ} = f(n)$	109
3.7. Типовые задания к лабораторным работам	111
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Исследование статических характеристик электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения	111
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Исследование статических характеристик электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения	112

<i>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.</i> Исследование статических характеристик электропривода переменного тока с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором	113
<i>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.</i> Исследование статических характеристик электропривода переменного тока с асинхронным двигателем с фазным ротором	115
<i>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.</i> Исследование статических характеристик электропривода переменного тока с синхронным двигателем	116
3.8. Учебно-методические пояснения существа отдельных понятийно-смысловых фрагментов	116
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	124
ПРИЛОЖЕНИЕ. Экспериментальное определение активных и индуктивных сопротивлений	125

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее пособие призвано оказать необходимую теоретико-практическую, методическую и организационную помощь студентам заочной формы обучения при самоподготовке и в процессе выполнения лабораторных работ по исследованию статических характеристик в различных режимах работы двигателей электроприводов постоянного и переменного тока.

Материал пособия представлен двумя разделами “теоретическим” и “экспериментальным” с последующим разделением на главы, параграфы, подпараграфы, пункты. Первая цифра рисунков и формул ориентирует на главу с последующим (после точки) указанием порядкового номера внутри главы.

Лабораторный практикум проводится на учебных стендах (УЛС), оснащенных силовым электрооборудованием при стандартных величинах рабочих напряжений, а также необходимыми электроизмерительными приборами и коммутационной аппаратурой. Работа студентов проходит под наблюдением преподавателей, отличается самостоятельностью принятия студентами решений, то есть, приближена к реальным условиям профессиональной деятельности специалиста по электроприводу на производстве. Поэтому особое внимание уделяется организации работы и охране труда на электротехнических установках, а студенты проходят предварительный инструктаж и коллоквиум, которые определяют допуск к выполнению работ.

Изложенные соображения и вызвали необходимость разработки единого учебно-методического пособия, включающего необходимый материал теоретических положений и понятий, методов расчета и построения статических характеристик, определения параметров электрических цепей электроприводов и экспериментальное изучение заданных статических характеристик.

При подготовке настоящего пособия принимал участие студент-дипломник гр. ЗЭП-602 А.Н. Толмачев.

Глава первая

Решение прямых задач. Расчет и построение статических характеристик двигателей постоянного и переменного тока

1.1. Основные понятия

В теории и инженерной практике электропривода широко используются понятия статических характеристик. *Статической характеристикой называют геометрическое место точек в конкретной системе координат, выражающее установившуюся скорость движения электрической машины в двигательном или тормозных режимах работы электропривода как функцию величины и характера статического момента на валу электродвигателя (ЭД).*

Статический момент M_c со стороны рабочей машины (РМ) в установившемся режиме движения ($\omega = Const$) может противодействовать движению системы «ЭП-РМ», а может и поддерживать движение. В том и другом случае статический момент M_c и механический момент на валу, развиваемый со стороны электрической машины уравновешены: $M_c = M_{в.эд}$.

Как известно, по характеру статические моменты рабочих машин подразделяют на два вида:

- *реактивные* $M_{с.р}$, которые при любом направлении движения противодействуют движению, то есть всегда представляют собой статическую нагрузку на двигатель;

- *активные* $M_{с.а}$, которые *противодействуют движению* механической системы *только в направлении увеличения запаса*

потенциальной энергии, то есть осуществляют реактивную функцию, например, при подъёме груза; в обратном же направлении движения системы, *когда снижается запас потенциальной энергии, поддерживают движение*, то есть становятся действительно активными – движущими; не меняя знака момента изменяют своё отношение к направлению движения, см рис. 1.1.

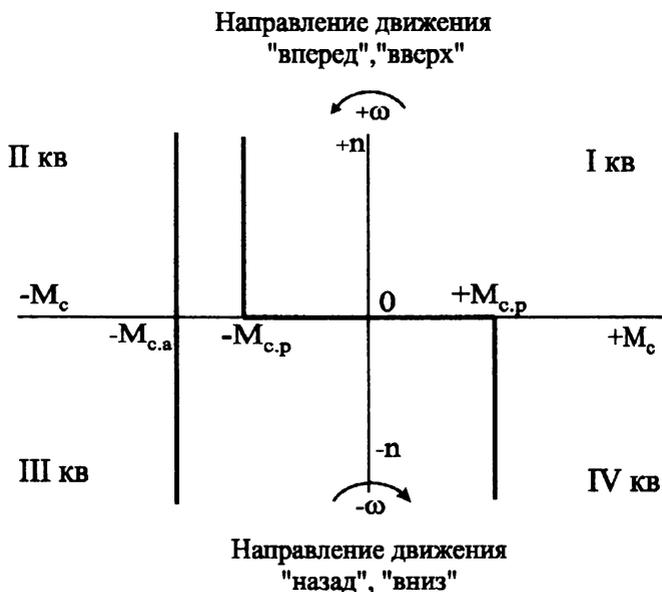


Рис. 1.1

При M_c реактивном, всегда противодействующем движению, *электрическая машина обеспечивает движение в двигательном режиме работы*. Если же активный $M_{c.a}$ обеспечивает движение, то *электрическая машина работает в одном из тормозных режимов*.

Нагрузка ЭД или ЭП может выражаться не только моментом на валу $M_{в.д}$, но и электромагнитным моментом $M_{эм}$, а также величинами токов в главных цепях (I_a, I_s, I_r – машин постоянного и переменного тока).

Решение разнообразных задач электрического привода связано с рассмотрением электромеханических процессов энергопреобразования внутри электрических машин, имеющих место как в установившихся, так и в неустановившихся режимах движения. При этом используются понятия электромагнитной мощности $P_{эм}$ и электромагнитного момента $M_{эм}$, которые развиваются внутри машины и физически определяются электрическими переменными и параметрами её электрических цепей. Здесь сразу следует обратить внимание на то, что баланс $P_{эм}$ в двигателях постоянного тока и в асинхронных двигателях неодинаков из-за принципиального отличия в физике их действия, см. гл. 1.2 и гл. 1.6:

$$P_{эм ДПТ} = M_{эм} \cdot \omega_D = \Delta P_{с.хх} + P_{в ДПТ},$$

где $\Delta P_{с.хх}$ – постоянные потери холостого хода;

$$P_{в ДПТ} = M_{в} \cdot \omega_D - \text{механическая мощность на валу.}$$

$$P_{эм АД} = M_{эм} \cdot \omega_0 = \Delta P_{г.в} + \Delta P_{с.хх} + P_{в АД}$$

где ω_0 – синхронная скорость вращения магнитного поля;

$$\Delta P_{г.в} = 3I_r^2 \cdot r_r - \text{мощность потерь на нагревание цепи ротора;}$$

$$P_{в АД} = M_{в} \cdot \omega_D - \text{механическая мощность на валу.}$$

Поскольку мощность на валу названных типов двигателей выражается одинаково, то, например, для двигательного установившегося режима можно записать:

- для АД, см. рис. 3.21,

$$M_c = M_{в АД} = \frac{P_{в}}{\omega_{в}} = M_{мех АД} - \Delta M_{с.хх}, \quad (1.1)$$

- для ДПТ вместо $M_{мех}$ берется $M_{эм}$,

$$M_c = M_{в ДПТ} = M_{эм ДПТ} - \Delta M_{с.хх}, \quad (1.2)$$

а покрытие $\Delta M_{c.ox} = \frac{\Delta P_{Fe.r} + \Delta P_{мех.тр}}{\omega_g}$ берёт на себя электрическая машина

или рабочая машина, – все определяется стороной, обеспечивающей движение системе «ЭП – РМ».

Движение может характеризоваться угловой скоростью вращения двигателя ω , рад/с, или числом оборотов в минуту n , об/мин. При теоретических исследованиях обычно используют понятие угловой скорости ω , рад/с, в практических задачах используют понятие частоты вращения n , выраженной через число оборотов в минуту, что допускает ГОСТ. Частота вращения указывается в каталогах и на паспортных табличках электрических машин. Соотношение угловой скорости и частоты вращения следующее:

$$\omega_D [\text{рад/с}] = \frac{2\pi}{60} \cdot n_D \cong 0,105 \cdot n_D [\text{об/мин}], \quad (1.3)$$

$$n_D [\text{об/мин}] = \frac{60}{2\pi} \cdot \omega_D \cong 9,55 \cdot \omega_D [\text{рад/с}], \quad (1.4)$$

В асинхронных электроприводах часто используют вместо ω и n понятие скольжения s :

$$s = \frac{\omega_0 - \omega_r}{\omega_0} = \frac{n_0 - n_r}{n_0}, \quad (1.5)$$

где ω_0 и n_0 – соответственно, синхронная угловая скорость и частота вращения магнитного поля;

ω_r и n_r – соответственно, угловая скорость и частота вращения ротора.

Статические характеристики двигателей электроприводов различных типов могут быть представлены следующими зависимостями:

$$\omega_D = f(M_g) \quad \text{или} \quad n_D = f(M_g),$$

$$\text{а также } \omega_D = f(M_{эм}) \quad \text{или} \quad n_D = f(M_{эм}),$$

которые называют *механическими характеристиками*.

Статическую нагрузку на двигатель отражают и так называемые **электромеханические характеристики**:

$\omega_D = f(I_a)$ или $n_D = f(I_a)$ – электромеханические характеристики машины постоянного тока, где I_a – величина тока в цепи якоря;

$\omega_D = f(I_s)$, $\omega_D = f(I_r)$ или $n_D = f(I_s)$, $n_D = f(I_r)$ – электромеханические характеристики в функции токов статора и ротора асинхронных машин переменного тока.

Статические характеристики изображаются в четырёх квадрантах системы координат, что создаёт удобство их восприятия как относительно направления движения, так и режима работы электропривода. В качестве примера на рис. 1.1 показаны упрощенные характеристики РМ: $\omega(M_{c.p})$ и $\omega(M_{c.a})$.

Различают статические характеристики рабочих машин (РМ), которые отличаются своей мягкостью, и статические характеристики двигателей электроприводов (ЭД или ЭП). Характеристики ЭП представлены далее в тексте пособия.

Статические характеристики ЭД подразделяют на следующие разновидности:

- **естественные**, когда электрическая машина непосредственно связана с электрической сетью и **основные**, когда она получает электроэнергию через преобразователь; на естественной и основной характеристиках располагаются координаты номинального режима;

- **искусственные**, соответствующие тем или иным параметрам источника электроэнергии и параметрам электрических цепей машины;

- **границные**, характеризующие идеализированную машину постоянного тока, отражающие её электромагнитное состояние.

К слову, электромагнитное состояние асинхронных машин характеризуется вид статической механической характеристики, а в синхронных на элек-

ромагнитное состояние позволяет влиять обмотка возбуждения постоянного тока, расположенная на полюсах ротора.

Вид статических характеристик определяется типом электропривода, параметрами его электрических цепей и источника электрической энергии. По виду статических характеристик можно оценить электромеханические свойства и энергетику электропривода, как в двигательном, так и в различных тормозных режимах.

1.2. Расчет и построение характеристик двигателей постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения (ДПТ НВ)

Общая электрическая схема включения двигателя независимого (параллельного) возбуждения представлена на рис. 1.2.

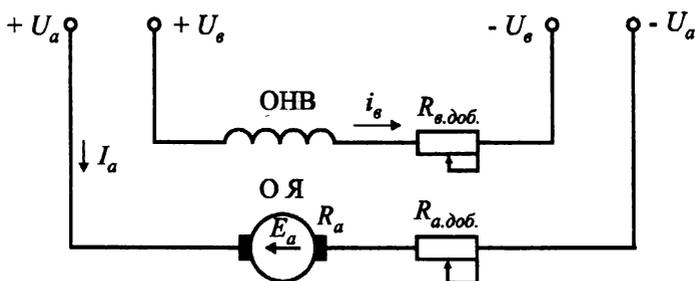


Рис. 1.2

Запишем баланс мощности, потребляемой цепью якоря из электрической сети $P_{1\text{эл}}$:

$$P_{1\text{эл}} = P_{\text{эм}} + \Delta P_{a.v} = E_a \cdot I_a + I_a^2 \cdot R_a = \omega_{\text{Д}} \cdot M_{\text{эм}} + I_a^2 \cdot R_a, \text{ Вт} \quad (1.6)$$

где $\Delta P_{a.v} = I_a^2 \cdot R_a$ – переменные потери электрической мощности в цепи якоря, которые определяются нагрузкой на валу и покрываются электрической сетью, Вт; (1.7)

$P_{эм} = E_a \cdot I_a = \omega_D \cdot M_{эм}$ – электромагнитная мощность, развиваемая внутри двигателя, которая может быть выражена как через механические, так и электрические переменные, Вт;

$$M_{эм} = c\Phi_m \cdot I_a \text{ – электромагнитный момент якоря, Нм;} \quad (1.9)$$

$I_a = \frac{M_{эм}}{c\Phi_m}$ – ток в цепи якоря, характеризует нагрузку на валу, А;

$E_a = c\Phi_m \cdot \omega_D$ – ЭДС вращения якоря, характеризует реакцию на его движение, В;

$\Phi_m = f(i_\sigma)$ – магнитный поток, создаваемый обмоткой независимого (параллельного) возбуждения, которая располагается на статоре, Вебер = В·с;

$c = \frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a}$ – безразмерный конструктивный коэффициент машины, здесь

p – число пар полюсов статора, N – число активных проводников, a – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Разделив (1.6) на I_a получим уравнение баланса приложенного к цепи якоря напряжения U_a

$$U_a = E_a + I_a \cdot R_a = c\Phi_m \cdot \omega_D + I_a \cdot R_a, \quad \text{В} \quad (1.11)$$

где $R_a = R_{a,доб.} + r_a$ – полное сопротивление цепи якоря, Ом;

$r_a = r_\text{я} + r_{\text{дн}} + r_{\text{к.о}} + r_\text{щ}$ – внутреннее сопротивление якорной цепи двигателя, Ом, здесь $r_\text{я}$ – сопротивление обмотки якоря, Ом, $r_{\text{дн}}$ – сопротивление обмотки дополнительных полюсов, Ом, $r_{\text{к.о}}$ – сопротивление компенсационной обмотки (обычно у крупных машин), Ом, $r_\text{щ}$ – сопро-

тивление щётчного контакта на коллекторе, Ом.

Переписав (1.11) относительно угловой скорости якоря ω получим уравнение электромеханической статической характеристики $\omega = f(I_a)$:

$$\omega = \frac{U_a}{c\Phi_m} - I_a \cdot \frac{R_a}{c\Phi_m} = \omega_0 - \Delta\omega_I, \quad \text{рад/с}, \quad (1.12)$$

а, выразив I_a через (1.9) получим уравнение статической механической характеристики $\omega = f(M_{эм})$:

$$\omega = \frac{U_a}{c\Phi_m} - M_{эм} \cdot \frac{R_a}{c^2\Phi_m^2} = \omega_0 - \Delta\omega_M, \quad \text{рад/с} \quad (1.13)$$

где $\omega_0 = \frac{U_a}{c\Phi_m}$ – угловая скорость идеального холостого хода, рад/с,;

$\Delta\omega_I$ и $\Delta\omega_M$ – падение угловой скорости под действием статической нагрузки на валу, соответственно, по электромеханической и механической характеристикам, рад/с;

Для построения естественных характеристик, в соответствии с (1.12) и (1.13), должны быть обеспечены следующие условия: $U_a = U_{aN}$ и $\Phi_m = \Phi_{mN}$, то есть $i_\delta = i_{\delta N}$, $R_{\delta,доб.} = 0$, $R_a = r_a$ – внутреннее сопротивление якорной цепи, когда $R_{a,доб.} = 0$. Для их построения ориентируются на каталожные или паспортные данные на заводской табличке машины. Однако не все необходимые данные там приводятся. В такой связи приходится изыскивать способы их определения.

Поскольку статические характеристики ДПТ НВ линейны, то для построения их естественных характеристик достаточно выбрать координаты двух точек. Рационально ориентироваться на режим идеального холостого хода с координатами

$$\omega_D = \omega_{oe}, \quad M_{эм} = I_a = 0,$$

и двигательный режим с номинальной нагрузкой, координаты которого

$$\omega_D = \omega_N, M_{эм} = M_{эм}, I_a = I_{aN}.$$

В паспортных данных указывается не угловая скорость ω_D [рад/с], а частота вращения n_D [об/мин]; для их пересчёта используется (1.3) и (1.4); но значение ω_{oe} или n_{oe} там отсутствуют, как и величина $M_{эмN}$. Рассмотрим практические приёмы определения названных переменных.

1. Скорость идеального холостого хода, выражаемая

$$\omega_{oe} = \frac{U_{aN}}{c\Phi_{mN}}, \quad \text{рад/с} \quad (1.14)$$

может быть представлена через физические переменные номинального режима движения, используя (1.11)

$$\omega_{DN} = \frac{U_{aN} - I_{aN} \cdot r_a}{c\Phi_{mN}} = \frac{E_{aN}}{c\Phi_{mN}}, \quad (1.15)$$

откуда

$$c\Phi_{mN} = \frac{U_{aN} - I_{aN} \cdot r_a}{\omega_{DN}} = \frac{E_{aN}}{\omega_{DN}}, \quad (1.16)$$

которые подставляются в (1.13). Либо из соотношения (1.13) и (1.14), получаем

$$\omega_{oe} = \omega_{DN} \cdot \frac{U_{aN}}{E_{aN}} = \omega_{DN} \frac{U_{aN}}{U_{aN} - I_{aN} \cdot r_a}. \quad (1.17)$$

Как видно, для определения ω_{oe} необходимо знать величину внутреннего сопротивления цепи якоря двигателя $r_a = r_{я} + r_{дн} + r_{ко} + r_{щ}$.

2. Где взять значение r_a ?

а) Если двигатель имеется в наличии, то при отключённой от сети машины необходимо измерить, например, методом амперметра – вольтметра, поворачивая якорь на некоторый угол;

б) Составляющие внутреннего сопротивления цепи якоря ($r_{я}$, $r_{дн}$, $r_{ко}$) могут быть взяты из каталогов или из справочной литературы. Сопротивление

щётчного контакта $r_{щ}$ определяют из предположения, что падение напряжения на щётках $\Delta U_{щ} = 2$ В при протекании в цепи номинального тока:

$$r_{щ} = \frac{\Delta U_{щ}}{I_{aN}} = \frac{2}{I_{aN}} \quad (1.18)$$

в) В некоторых справочниках могут приводиться кривые относительных значений сопротивления цепи якоря для серии машин в функции номинальной мощности на валу

$$\rho - \rho_0 = \frac{r_a}{R_{aN}} = f(P_{2N}) \quad (1.19)$$

где R_{aN} – номинальное сопротивление цепи якоря, Ом,

$$R_{aN} = \frac{U_{aN}}{I_{aN}} = r_a + R_{a.доб N} \quad (1.20)$$

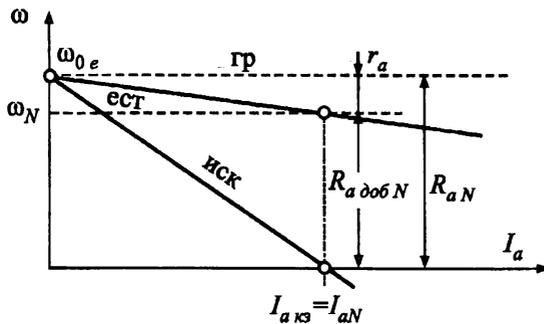


Рис. 1.3

Под номинальным сопротивлением цепи якоря R_{aN} понимается сопротивление цепи, включающей в себя, помимо r_a , внешнее добавочное сопротивление $R_{a.доб N}$, что соответствует искусственной ха-

рактеристике, проходящей через ось абсцисс в точке $I_{aN} = I_{акз}$, то есть R_{aN} ограничивает ток короткого замыкания до номинальной величины, рис. 1.3,

$$r_a = \frac{U_{aN}}{I_{aN}} - R_{a.доб}. \quad (1.21)$$

г) Приблизённо, с погрешностью около 10 %, величину r_a можно оп-

ределить через номинальные данные, если предположить равенство постоянных и переменных потерь в машине при номинальной нагрузке на валу. Рассмотрим это подробно.

Номинальный момент на валу можно определить через номинальную мощность P_{2N} [кВт] и номинальную угловую скорость вращения

$\omega_{DN} = \frac{60}{2\pi} n_{DN}$ [рад/с] или номинальную частоту вращения [об/мин], которая приводится в паспортных данных.

$$M_{eN} = \frac{1000 \cdot P_{2N}}{\omega_N} = \frac{60 \cdot 1000 \cdot P_{2N}}{2\pi \cdot n_N}, \quad \text{Нм} \quad (1.22)$$

Связь $M_{эМН}$ и M_{eN} в двигательном режиме работы ДПТ НВ известна:

$$M_{эМН} = M_{eN} + \Delta M_{xxN}, \quad \text{Нм} \quad (1.23)$$

откуда
$$\Delta M_{xxN} = M_{эМН} - M_{eN}, \quad \text{Нм} \quad (1.24)$$

где
$$M_{xxN} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{мех}}{\omega_{DN}} = \frac{\Delta P_{\Sigma xxN}}{\omega_{DN}} - \text{момент потерь холостого хода,} \quad (1.25)$$

ΔP_{Fe} – потери мощности в стали магнитопровода (на перемагничивание и вихревые токи);

$\Delta P_{мех}$ – потери мощности на трение в машине (в подшипниках и о воздух);

$\Delta P_{\Sigma xx}$ – суммарные потери мощности, которые не зависят от нагрузки на валу, потому и называются потерями холостого хода, но их величина может зависеть от скорости вращения якоря.

В соответствии с условием, которое сформулировано выше, постоянные потери при $\omega_D = \omega_{DN}$, равные суммарным потерям холостого хода, приравняем переменным электрическим потерям при номинальной нагрузке на валу, выражение которых возьмём из (1.7), когда $R_a = r_a$ для естественной харак-

теристики, при $R_{a,доб} = 0$ $\Delta P_{const} = \Delta P_{\Sigma x / \omega_N} \cong \Delta P_{v_N} = I_N^2 \cdot r_a$,

что позволяет записать:

$$P_{1элN} - P_{вN} = \Delta P_{const} + \Delta P_{rv_N} \cong 2I_{aN}^2 \cdot r_a, \quad (1.26)$$

где $P_{1элN} = U_{aN} \cdot I_{aN}$ – номинальная электрическая мощность, потребляемая из сети;

$P_{2вN} = P_{1элN} \cdot \eta_N = U_{aN} \cdot I_{aN} \cdot \eta_N$ – номинальная механическая мощность, развиваемая на валу.

После подстановки их выражений в (1.26) и разрешения относительно r_a , получим достаточно удобное расчётное выражение:

$$r_a \cong 0,5 \cdot (1 - \eta_N) \cdot \frac{U_{aN}}{I_{aN}} = 0,5 \cdot (1 - \eta_N) \cdot R_{aN}. \quad (1.27)$$

3. Выражение номинального электромагнитного момента, в соответствии с (1.8), запишется

$$M_{эмN} = \frac{P_{эм}}{\omega_{ДN}} = \frac{E_{aN} \cdot I_{aN}}{\omega_{ДN}} = c\Phi_{mN} \cdot I_{aN}, \quad \text{Нм} \quad (1.28)$$

используя (1.15) можно переписать

$$M_{эмN} = \frac{U_{aN} \cdot I_{aN} - I_{aN}^2 \cdot r_a}{\omega_{ДN}}, \quad \text{Нм} \quad (1.29)$$

Построение естественных характеристик показано на рис. 1.4. Обычно подбирают масштабы момента и тока таким образом, чтобы естественные электро-механическая $\omega(I_a)$ и механическая $\omega(M_{эм})$ совпадали, как изображено на рис. 1.4, хотя это совершенно не обязательно. Там же представлена механическая характеристика $\omega(M_в)$, которая сдвинута влево на величину ΔM_{xxN} .

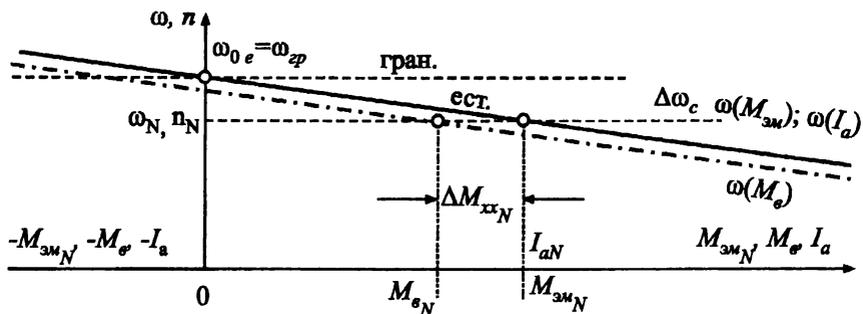


Рис. 1.4

Для получения уравнения граничной характеристики принимаем $r_a = 0$ в уравнениях (1.12) и (1.13), тогда

$$\omega_D = \omega_0 = \omega_{зр.} = \frac{U_{aN}}{c\Phi_{mN}} = f(I_a, M_{эм}), \quad (1.30)$$

что в ДПТ НВ выражает абсолютно жёсткую граничную характеристику, проходящую через точку ω_0 параллельно оси абсцисс.

1.3. Расчёт и построение основных характеристик двигателей постоянного тока с независимым возбуждением при питании цепи якоря от управляемых преобразователей электрической энергии (ПЭЭ)

Точка номинального режима работы, координаты которой определяются по данным каталога (паспорта машины) остаётся таковой в любой системе электропривода: при питании от сети (рис. 1.5, а), в системе «Г-Д» (рис. 1.5, б), в системе «УПВ-Д» (рис. 1.5, в) и пр.

Если сравнить эквивалентные схемы замещения названных электроприводов (рис. 1.5), то следует обратить внимание на неодинаковость величин эквивалентных сопротивлений их главных цепей:

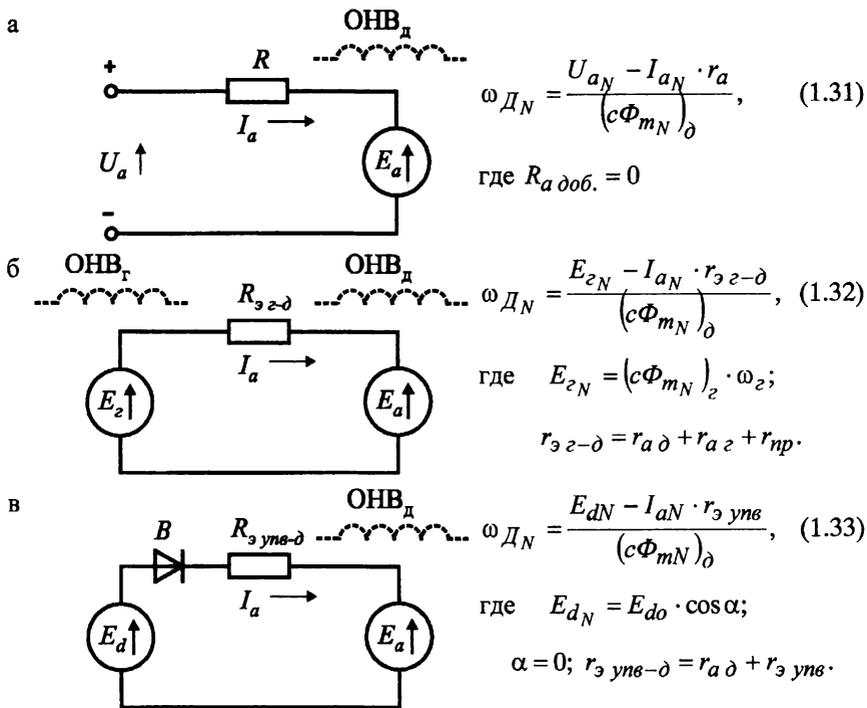


Рис. 1.5

Оказывается, что $r_{a \delta} < r_{\text{э з-д}} < r_{\text{э унв-д}}$ и для обеспечения возможности работы двигателя в точке номинального режима сопоставленных типов электропривода требуется при выборе преобразователя удовлетворить следующему неравенству:

$$U_{aN} < E_{zN} < E_{dN}.$$

Это отражено в уравнениях статических характеристик (1.31), (1.32) и (1.33) соответствующих электроприводов. При таком условии естественная характеристика двигателя при питании от сети (рис. 1.5, а) не будет совпадать как с характеристикой системы «Г-Д» при $\Phi_{m zN}$ и $\Phi_{m \delta N}$ (рис. 1.5, б), так и с характеристикой системы «УПВ-Д» при $\alpha = 0$ и $\Phi_{m \delta N}$ (рис. 1.5, в).

Поэтому в отличие от естественной, последние называют основными. Для одного и того же двигателя естественная и основные характеристики пересекаются в точке номинального режима (рис. 1.6).

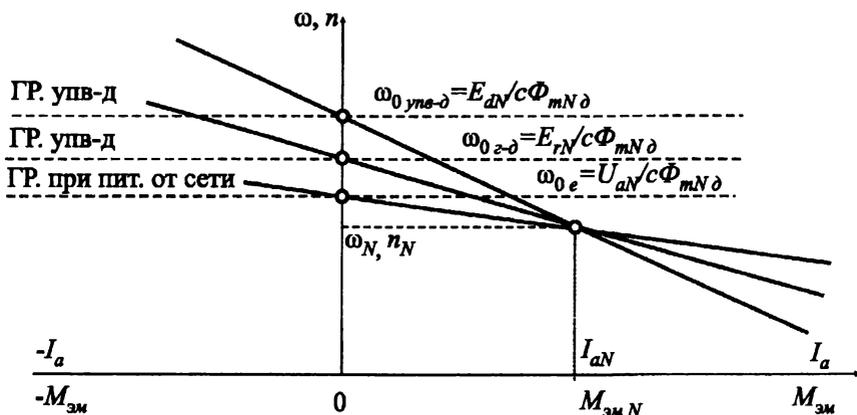


Рис. 1.6

Координаты точки номинального режима используются для построения основных характеристик, аналогично показанному в § 1.2. В качестве другой точки здесь также рационально принять скорость идеального холостого хода ω_0 или n_0 .

В системе «Г-Д» при выборе генератора постоянного тока с независимым возбуждением необходимо обращать внимание на величину его номинальной ЭДС E_{2N} , указанную в каталоге выбранного или заданного двигателя $E_{2N} > U_{aN}$. Например, E_{2N} равно 230 В; 460 В, чему соответствует номинальные напряжения двигателя U_{aN} 220 В; 440 В, отсюда и исходят при расчёте искомой координаты

$$\omega_{0\text{з-д}} = \frac{E_{2N}}{c\Phi_{mN}\delta} \quad \text{или} \quad n_{0\text{з-д}} = \frac{E_{2N}}{c_e \cdot \Phi_{m\delta N}}. \quad (1.34)$$

В системе «УПВ-Д» при выборе полупроводникового преобразователя

обращают внимание на величину номинальной средневыпрямленной ЭДС, необходимое значение которой обеспечено параметрами согласующего трансформатора или дросселя, входящих в комплект преобразователя. В данных каталога на преобразователи обычно приводят значение номинальных средневыпрямленных напряжений на выходе U_{dN} , которые в табл. 1 показаны в соответствии с номинальными напряжениями на якоре двигателей:

Таблица 1

U_{dN} , В	115	230	460	700	825	1050
U_{aN} , В	110	220	440	660	750	930

Искомая координата точки идеального холостого хода определяется:

$$\omega_{o \text{ ynw} - \delta} = \frac{U_{dN}}{c \cdot \Phi_m \partial_N} \quad \text{или} \quad n_{o \text{ ynw}} = \frac{U_{dN}}{c_e \cdot \Phi_m \partial_N}, \quad (1.35)$$

где U_{dN} соответствует $\alpha = 0$;

$$c_e = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} \left[\frac{\text{мин}}{\text{об} \cdot \text{с}} \right] - \text{конструктивный коэффициент машины, имеющий размерность, см. гл. 1.6, (1.38).}$$

1.4. Расчёт и построение естественных характеристик двигателей постоянного тока последовательного (ДПТ ПВ) и смешанного (ДПТ СВ) возбуждения

Общие электрические схемы включения ДПТ ПВ (рис. 1.7) и ДПТ СВ (рис. 1.8) указывают на принципиальное отличие в создании материальной среды энергопреобразования ($c\Phi_m$) в сравнении с ДПТ НВ (рис. 1.2), где $\Phi_m = f(i_e)$ в скомпенсированном двигателе не зависит от нагрузки на валу.

У ДПТ ПВ электромагнитное состояние среды энергопреобразования полностью определяется зависимостью $\Phi_m = f(I_a)$, где I_a – характеризует

нагрузку на валу двигателя; при отсутствии нагрузки на валу $\omega \rightarrow \infty$, как говорят, «двигатель пошёл вразнос». ДПТ СВ обладает зависимостью $\Phi_m = f(i_\theta, I_a)$ поэтому при отсутствии нагрузки на валу устремляется к скорости ω_0 .

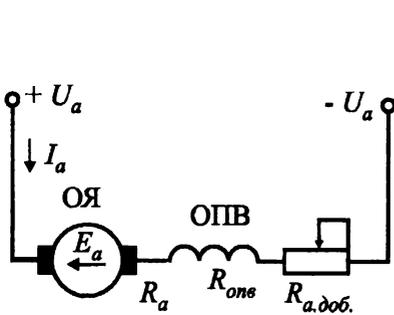


Рис. 1.7

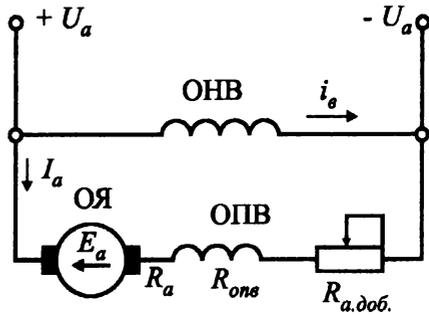


Рис. 1.8

Уравнение баланса потребляемой электрической мощности $P_{1(эл)}$ и статических характеристик рассматриваемых двигателей внешне аналогичны таковым для ДПТ НВ, однако зависимость $\Phi_m = f(I_a)$ приводит к нелинейности их статических характеристик.

Для названных машин *характеристики называются естественными, если они соответствуют номинальному напряжению U_{aN} , внутреннему сопротивлению цепи якоря, которое выражается суммой $r_a + r_{ons}$, а также естественному изменению магнитного потока в функции нагрузки на валу.* Последнее, как выше упоминалось, приводит к нелинейному виду этих характеристик, особенно в области нагрузок, не превышающих номинальную. В этой связи в каталогах на машины последовательного и смешанного возбуждения, помимо номинальных значений n_{DN} , P_{eN} , U_{aN} , η_N и др., для каждой серии двигателей приводятся так называемые универсальные характеристики v , $\mu = f(i)$, которые в относительных единицах пред-

ставляют собой зависимость $n_D = f(I_a)$, $M_e = f(I_a)$, рис. 1.9:

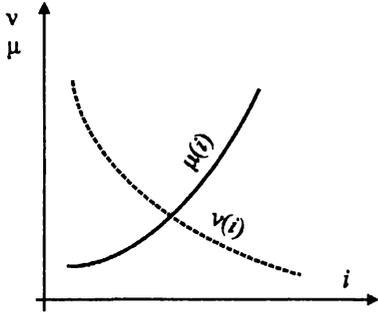


Рис. 1.9

$$v = \frac{n}{n_N}; \quad \mu = \frac{M_e}{M_{eN}}; \quad i = \frac{I}{I_{aN}}$$

Аналогичные кривые проводятся в [10, с. 127, 171].

С помощью универсальных строятся статические характеристики $n = f(M_e)$ и $n = f(I_a)$ обычно в пределах изменения нагрузки до $2,5 \div 3$ –

кратной по отношению к номинальной, см. рис. 1.10: а – при последовательном возбуждении; б – при смешанном возбуждении.

Для вычисления электромагнитного момента удобно воспользоваться переходной характеристикой (см. § 1.5.3).

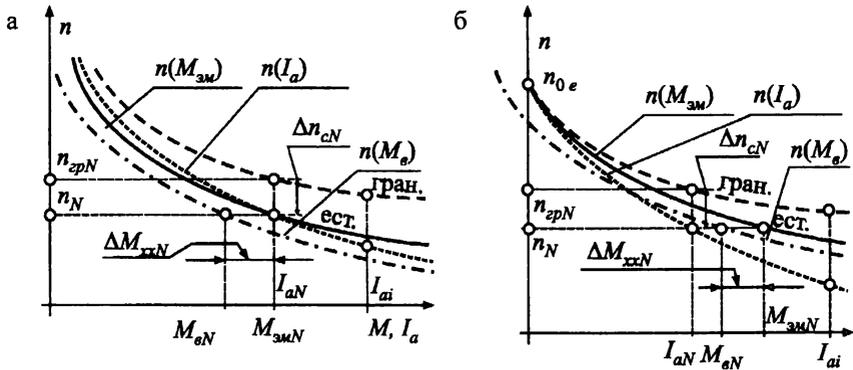


Рис. 1.10

1.5. Расчёт и построение граничных характеристик электроприводов

Понятие граничной характеристики связано с двигателями постоянного тока и используется с чисто вспомогательной целью. Это характеристика

идеализированного двигателя, у которого якобы отсутствуют потери на нагревание сопротивлений цепи якоря. Такая абстракция возможна, если принять $r_a = 0$. При этом в уравнениях механической и электромеханической характеристик падения скорости под нагрузкой становится равным нулю:

$$\Delta\omega = \frac{M_{эм} \cdot r_a}{c^2 \cdot \Phi_m^2} = \frac{I_a \cdot r_a}{c \cdot \Phi_m} = 0,$$

и уравнение граничной характеристики получает вид:

$$\omega_{зр} = \frac{U_a}{c \cdot \Phi_m(I_\theta)} = f(I_a \text{ или } M_{эм}), \quad (1.36)$$

где $I_a = \frac{M_{эм}}{c \cdot \Phi_m(I_\theta)} = \frac{M_c}{c \cdot \Phi_m(I_\theta)} = I_c$ – «статический» ток якоря.

В электроприводах с двигателями независимого возбуждения (ДПТ НВ), при условии компенсации размагничивающего действия реакции якоря, величина $c \cdot \Phi_m = f(i_{онв})$ остаётся неизменной при изменении нагрузки на валу. Поэтому $\omega_{зр} = \omega_0 = f(I_a, M_{эм})$ – граничная характеристика оказывается абсолютно жёсткой, то есть проходит параллельно оси абсцисс через точку с координатами $M_{эм} = I_a = 0$; $\omega = \omega_{зр} = \omega_0$ (см. рис. 1.3, 1.4 и 1.6); отсюда понятно её построение.

В электроприводах с двигателями последовательного возбуждения (ДПТ ПВ) в выражении (1.36), необходимо учитывать зависимость $c \cdot \Phi_m = f(I_a)$ – тока якоря, который, отражая нагрузку на валу, одновременно является током возбуждения I_θ . Зависимость эта нелинейная, в результате граничная характеристика также оказывается нелинейной и проходит выше естественной, не пересекаясь с осью ординат (рис. 1.10, а).

В электроприводах с двигателями смешанного возбуждения (ДПТ СВ) главный магнитный поток обеспечивается двумя обмотками:

- обмоткой независимого (или параллельного возбуждения) возбужде-

ния с $i_{онв}$, которая создаёт часть основного потока, не зависящего от нагрузки;

- обмоткой последовательного возбуждения с $I_e = I_a$, которая обеспечивает добавку в основной поток машины, всецело связанную с нагрузкой на валу. В результате граничная характеристика двигателя смешанного возбуждения оказывается нелинейной; располагается в двигательном режиме выше естественной и совпадает с ней только в точке идеального холостого хода (рис. 1.10, б).

Построение граничных характеристик ДПТ НВ и ДПТ ПВ производят по координатам естественных характеристик, задаваясь теми же точками тока якоря I_{ai} . Далее, исходя из того, что при каждом заданном токе I_{ai} электромагнитное состояние машины, выраженное $c \cdot \Phi_m(I_{ai})$ будет одинаковым как при скорости ω_{zpi} на граничной характеристике, так и при скорости ω_{ei} на естественной характеристике. Из соотношения уравнений для скоростей вращения при заданных токах на граничной и естественной характеристиках (см. рис. 1.9)

$$\omega_{zpi} = \frac{U_{aN}}{c \cdot \Phi_m(I_{ai})}; \quad \omega_{ei} = \frac{U_{aN} - I_{ai} \cdot r_a}{c \cdot \Phi_m(I_{ai})};$$

получают расчётное выражение:

$$\omega_{zpi} = \omega_{ei} \frac{U_{aN}}{U_{aN} - I_{ai} \cdot r_a}; \quad n_{zpi} = n_{ei} \frac{U_{aN}}{U_{aN} - I_{ai} \cdot r_a}. \quad (1.37)$$

В инженерной практике понятие граничной характеристики обеспечило удобство при определении ступеней пускорегулировочных резисторов различными методами (см. гл. 2.1).

Другое практическое удобство заключается в возможности по виду граничной характеристики оценить электромагнитное состояние машины в функции нагрузки на валу в различных системах электропривода, особенно с

двигателями последовательного возбуждения.

В электроприводах с двигателями независимого или параллельного возбуждения при отсутствии размагничивающего действия реакции якоря граничная характеристика отражает независимость электромагнитного состояния от нагрузки на валу. Оказывать влияние на электромагнитное состояние машины возможно либо через изменение управляющего воздействия по цепи возбуждения – $c \cdot \Phi_m = f(U_\theta)$, либо изменением параметров цепи возбуждения – $c \cdot \Phi_m = f(r_\theta)$. То и другое внешнее воздействие направленно на изменение тока возбуждения $I_\theta = f(U_\theta, r_\theta)$, изменится и вид $\omega_{зр} = f(I_a)$ (см. § 1.6.5).

В электроприводах с двигателями последовательного возбуждения граничная характеристика указывает на номинальное электромагнитное состояние только в точке с номинальной нагрузкой, при недогрузках оно ослабевает, а при перегрузках – усиливается, вплоть до достижения насыщения.

Формирование электромагнитного состояния возможно при использовании так называемых искусственных схем включения (см. § 1.6.6).

Двигатели смешанного возбуждения обладают промежуточными электромеханическими свойствами, поэтому для воздействия на их электромагнитное состояние возможно использование любого из названных выше способов.

1.6. Расчёт и построение искусственных характеристик электроприводов с двигателями постоянного тока

Статические характеристики $n(M)$ и $n(I_a)$ называют искусственными при следующих условиях:

- если $U_a \neq U_{aN}$ (или $E_{пзэ} \neq E_{пзэN}$);
- если $r_a < R_a$ ($R_{a\text{доб}} \neq 0$);

- если $\Phi_m \neq \Phi_{mN}$ – в двигателях с независимым возбуждением или $\Phi_m(I_a) \neq \Phi_{me}(I_a)$ – в двигателях с последовательным и смешанным возбуждением из-за $I_a \text{ отв} \neq I_a$.

То есть характеристики, которые из-за изменения параметров источника электроэнергии или электрических цепей самого двигателя не совпадают с естественной или основной характеристикой и называют искусственными.

Для расчёта координат искусственных характеристик используются различные методы, при обосновании которых исходной является ранее построенная естественная характеристика, представленная в зависимостях $\omega = f(I_a)$ и $\omega = f(M_{эм})$, раскрытыми для ДПТ НВ в (1.12) и (1.13), где ω [рад/с]. В практических задачах, как выше говорилось, для обозначения скорости двигателя используют n [об/мин]; соотношение между ω и n дано в (1.3) и (1.4), что легко пересчитать.

Здесь же поставим задачу получить удобные универсальные уравнения естественных и искусственных характеристик для любого типа машины постоянного тока $n_{e.u} = f(I_a)$ и $n_{e.u} = f(M_{эм})$. Для этого необходимо раскрыть в уравнении $E_a = c\Phi_m \cdot \omega$ величину $c = \frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a}$ и выразить $\omega = \frac{2\pi}{60} \cdot n$. В результате получим:

$$E_a = c\Phi_m \cdot \omega = \frac{pN}{2\pi \cdot a} \cdot \Phi_m \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n = \frac{pN}{60 \cdot a} \cdot \Phi_m \cdot n = c_e \cdot \Phi_m \cdot n, \text{ В, (1.38)}$$

где $c_e = \frac{pN}{60 \cdot a} \left[\frac{\text{мин}}{\text{об.с}} \right]$ – конструктивный коэффициент машины, имеющий размерность, что необходимо учитывать в новом выражении E_a .

В выражении электромагнитного момента используются прежний безразмерный коэффициент (1.9): $M_{эм} = c\Phi_m \cdot I_a = \frac{pN}{2\pi \cdot a} \cdot \Phi_m \cdot I_a$.

1.6.1. Метод естественной характеристики

С учётом изложенного выше, уравнения искусственной и естественной характеристик $n = f(I_a)$ получают следующую запись:

$$n_u = \frac{U_a - I_{ai}(r_a + r_{онс} + R_{a.доб.})}{c_e \Phi_m(I_{ai})}; \quad n_e = \frac{U_{aN} - I_{ai}(r_a + r_{онс})}{c_e \Phi_m(I_{ai})}, \quad (1.39)$$

которые позволяют получить следующее расчётное выражение для скорости:

$$n_u = n_e \frac{U_a - I_{ai}(r_a + r_{онс} + R_{a.доб.})}{U_{aN} - I_{ai}(r_a + r_{онс})}, \quad (1.40)$$

где r_a – внутреннее сопротивление цепи якоря;

$r_{онс}$ – сопротивление обмотки последовательного возбуждения, включённой в цепь якоря ДПТ НВ;

$R_{a.доб.}$ – внешнее добавочное сопротивление реостата, включённого в цепь якоря;

$I_{ai} = I_a = I_{возб.}$ – ток в цепи якоря, определяющий нагрузку на валу; одновременно является током возбуждения ДПТ ПВ – учитывается в зависимости от типа двигателя.

Электромагнитный момент определяется также с использованием уравнения естественной характеристики

$$M_{эм} = c \Phi_m(I_{ai}) \cdot I_{ai} = \frac{U_a - I_{ai}(r_a + r_{онс} + R_{a.доб.})}{\omega_{ei}}. \quad (1.41)$$

Метод широко используется для построения искусственных характеристик при $U_a \neq U_{aN}$ и при $R_a = r_a + R_{a.доб.}$ для всех типов двигателей постоянного тока.

а) Расчёт и построение искусственных характеристик

при $U_a \neq U_{aN}$ или $E_{нээ} \neq E_{нээN}$

В случае двигателя с независимым возбуждением задача упрощается, поскольку подводимое к якорю напряжение U_a (или ЭДС преобразователя)

оказывает влияние на величину скорости идеального холостого хода и не влияет на величину:

$$n_{0u} = \frac{U_a}{c_e \Phi_m} - I_{ai} \frac{r_a}{c_e \Phi_m} = n_{0e} - \Delta n; \quad (1.42)$$

или

$$n_{0u} = \frac{E_{нээ}}{c_e \Phi_{mN}} - I_a \frac{r_\varepsilon}{c_e \Phi_{mN}} = n'_{0\text{осн}} - \Delta n. \quad (1.43)$$

Из соотношения выражений для искусственной и естественной (основной) характеристик $n_{0u} = \frac{U_a}{c_e \Phi_{mN}}$ и $n_{0e} = \frac{U_{aN}}{c_e \Phi_{mN}}$

или

$$n'_{0u} = \frac{E_{нр}}{c_e \Phi_{mN}} \quad \text{и} \quad n_{0\text{осн}} = \frac{E_{нр}}{c_e \Phi_{mN}}$$

получают удобные выражения для расчёта n_{0u} искомой искусственной ха-

рактеристики: $n_{0u} = n_{0e} \frac{U_a}{U_{aN}}$ или $n'_{0u} = n_{0\text{осн}} \cdot \frac{E_{нр}}{E_{нрN}}$ (1.44)

Через найденную координату проходит искомая искусственная характеристика, располагаясь параллельно естественной или основной (рис.1.11).

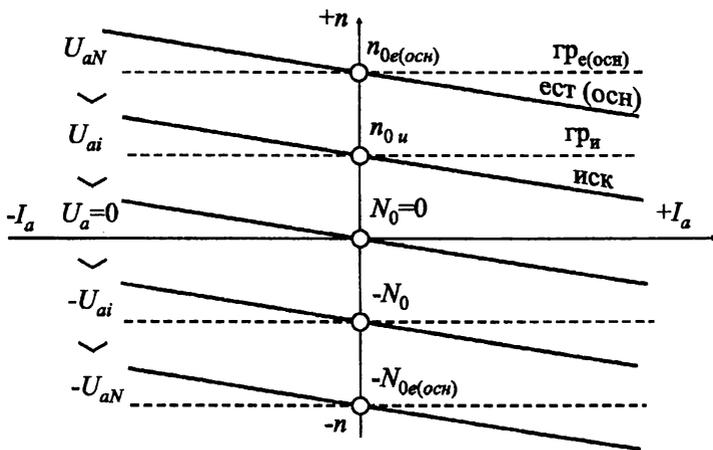


Рис. 1.11

В приводах с двигателями последовательного и смешанного возбуждения следует использовать соотношение между скоростями вращения на искусственной и естественной характеристиках при заданном токе в цепи якоря I_{ai}

$$n_{ui} = \frac{U_a}{c_e \Phi_{m_N}(I_{ai})} - I_{ai} \frac{r_a}{c_e \Phi_{m_N}(I_{ai})} = n_{zp,ui} - \Delta n_i$$

$$\text{и } n_{ei} = \frac{U_{a_N}}{c_e \Phi_m(I_{ai})} - I_{ai} \frac{r_a}{c_e \Phi_m(I_{ai})} = n_{zp,ei} - \Delta n_i.$$

Для ординаты заданного тока I_{ai} электромагнитное состояние двигателя, выражаемое

$$c_e \Phi_m(I_{ai}) = \frac{U_a}{n_{zp,ui}} = \frac{U_{a_N}}{n_{zp,ei}},$$

остаётся величиной постоянной для всех характеристик $n_{zp} = f(I_a)$; $n_e = f(I_a)$; $n_u = f(I_a)$, что позволяет определить соответствующие граничные скорости

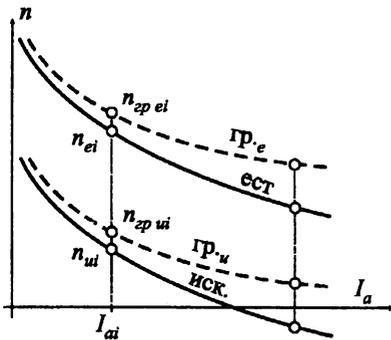


Рис. 1.12

$$n_{zp,ui} = n_{zp,ei} \cdot \frac{U_a}{U_{a_N}}, \quad (1.45)$$

и скорости на искомой искусственной характеристике

$$n_{ui} = n_{ei} \frac{U_a - I_{ai} \cdot r_a}{U_{a_N} - I_{ai} \cdot r_a}. \quad (1.46)$$

И здесь искомые искусственные характеристики ДПТ ПВ (рис. 1.12) и ДПТ СВ (рис. 1.13) располагаются параллельно естественной.

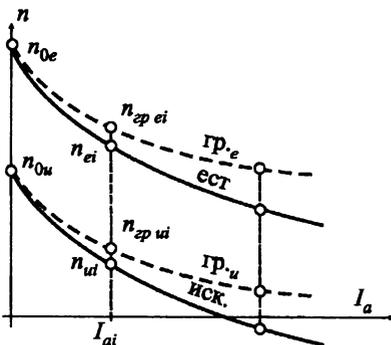


Рис. 1.13

Величина электромагнитного момента, соответствующего I_{ai} и n_{ui} определяется:

$$M_{эм} = c\Phi_m(I_{ai}) \cdot I_{ai}.$$

б) Расчёт и построение искусственных характеристик двигателей постоянного тока при $R_a = r_a + R_{доб} + r_{онв}$

Путём включения в цепь якоря добавочных резисторов изменяют величину R_a , что не отражается на величине $n_{зр}$ или n_0 , а изменяет величину Δn . Для расчёта координат используют уравнения (1.39) и (1.40).

Задаются значения I_{ai} , определив по ним соответствующие ω_e и n_e , вычисляют искомые $M_{эм i}$ и n_{ui} ; по найденным координатам строят необходимую характеристику (рис. 1.14).

Для построения искусственных характеристик, соответствующих добавочным сопротивлениям в цепи якоря используют и другие методы (см. §§ 1.6.2, 1.6.3, 1.6.4).

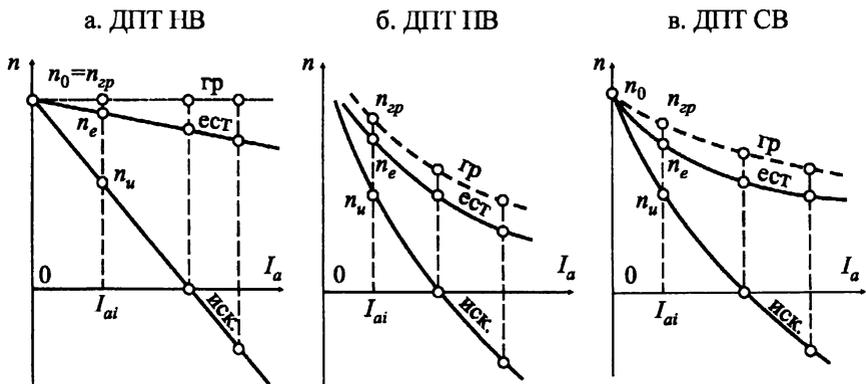


Рис. 1.14

1.6.2. Метод граничной характеристики

Для вывода расчётных выражений искомым координат используют уравнения искусственной и граничной характеристик:

$$n_u = \frac{U_{a_N} - I_{ai} \cdot R_a}{c_e \Phi_m(I_{ai})} \quad \text{и} \quad n_{zp} = \frac{U_{a_N}}{c_e \Phi_m(I_{ai})}.$$

Расчётное выражение для скорости получают в следующей записи:

$$n_u = n_{zp} \cdot \frac{U_{a_N} - I_{ai} \cdot R_a}{U_{a_N}} = n_{zp} \cdot \left(1 - \frac{I_{ai} \cdot R_a}{U_{a_N}} \right), \quad (1.47)$$

где $U_{a_N} = I_{a_N} \cdot R_{a_N}$ [В], а $i_{ai} = \frac{I_{ai}}{I_{a_N}}$ и $\rho = \frac{R_a}{R_{a_N}}$ - в [о.е.].

Для определения электромагнитного момента также используется уравнение граничной характеристики:

$$M_{эм} = c \cdot \Phi_m(I_{ai}) \cdot I_{ai} = \frac{U_{a_N}}{\omega_{zp}(I_{a_N})} \cdot I_{ai}. \quad (1.48)$$

Этот метод применяется в тех же задачах, что и предыдущий. Задаются значениями I_{ai} , определив по ним n_{zpi} и ω_{zpi} , вычисляют искомые n_{ui} и $M_{эмi}$, по найденным координатам строят искомую характеристику (см. рис. 1.14).

1.6.3. Метод переходной характеристики

Переходная характеристика непосредственно выражает зависимость электромагнитного состояния машины постоянного тока как функцию тока возбуждения:

$$c_e \cdot \Phi_m = f(I_g) \quad \text{или} \quad c \cdot \Phi_m = f(I_g).$$

Связь тока возбуждения I_g с рабочим током в цепи якоря I_a различна в разных типах машин постоянного тока.

В двигателях с независимым возбуждением (при условии компенсации размагничивающего действия реакции якоря) полагают, что Φ_m не зависит от тока в цепи якоря, и использование переходной характеристики позволяет производить расчёт и построение искусственных механических и электро-механических характеристик, соответствующих $\Phi_m \neq \Phi_{mN}$, непосредственно по их уравнениям (см. § 1.6.5, рис. 1.18 и 1.19).

В двигателе с последовательным возбуждением (в его естественной схеме включения) током возбуждения является рабочий ток цепи якоря, то есть $I_\theta = I_a$, например, при шунтировании обмотки последовательного возбуждения (см. § 1.6.5, рис. 1.20, а) I_θ может быть определён через I_a и параметры цепи.

$$I_\theta = \frac{I_a R_{ш}}{r_{онв} + R_{ш}}. \quad (1.49)$$

В искусственных схемах включения ДПТ ПВ также ток возбуждения выражается в функции тока якоря, см. § 1.6.6, рис. 1.21, уравнения (1.59) и (1.60): в схеме III (см. § 1.6.6, рис. 1.21)

$$I_\theta = I_n = \frac{U_a + I_a R_{ш}}{R_{ш} + R_n},$$

а в схеме IV (рис. 1.21)

$$I_\theta = I_{ш} = \frac{U_a - I_a R_n}{R_{ш} + R_n},$$

то есть, как убеждаемся, ток возбуждения оказывается связанным с током в цепи якоря различными соотношениями, что в итоге приводит к различному виду искусственных характеристик.

В двигателях смешанного возбуждения при отсутствии нагрузки на валу $I_a = 0$ и электромагнитное состояние всецело определяется током в цепи обмотки параллельного (или независимого) возбуждения. При наличии нагрузки на валу $I_a \neq 0$ обмотка последовательного возбуждения обеспечивает

изменение электромагнитного состояния машины в функции нагрузки, что отражается на виде переходной характеристики.

Таким образом, использование переходной характеристики обеспечивает особые удобства при расчёте координат любых искусственных характеристик электроприводов с двигателями последовательного и смешанного возбуждения по их уравнениям:

$$n_{ei} = \frac{U_a - I_{ai} \cdot R_a}{c_e \Phi_m(I_{ei})};$$

$$M_{эм} = c \Phi_m(I_{ei}) \cdot I_{ai}.$$

Переходная характеристика двигателя последовательного или смешанного возбуждения может быть построена по универсальной $v = f(i_a)$ или естественной электромеханической $n = f(I_a)$. Порядок её построения следующий:

- задаются значениями токов I_{ai} , по которым вычисляют противо э.д.с. естественной характеристики

$$E_{a1} = U_{aN} - I_{a1} \cdot r_a;$$

$$E_{a2} = U_{aN} - I_{a2} \cdot r_a;$$

$$E_{a3} = U_{aN} - I_{a3} \cdot r_a;$$

и т.д.

- для тех же значений I_a из $n_{ei}(I_{ai})$ определяют соответствующие n_{e1} , n_{e2} , n_{e3} и так далее;

$$\text{- рассчитывают } c_e \Phi_{mi} = \frac{E_{ai}}{n_{ei}} = f \left(I_{ai} = I_{онв} \right) \quad (1.50)$$

и строят переходную характеристику (см. рис. 1.15).

При наличии машины переходная характеристика может быть получена

экспериментально. На рис. 1.16 показана схема эксперимента для машины последовательного возбуждения. Гонный двигатель обеспечивает скорость вращения $n \cong n_N$. Изменяя ток в цепи обмотки последовательного возбуждения, включённой независимо через регулировочный резистор, фиксируют n_i и E_{ai} ; искомое значение $c_e \Phi_m$ рассчитывают

$$c_e \Phi_m = \frac{E_{ai}}{n_i} = f(I_a) = f\left(\begin{matrix} I_a \\ \text{с.м.сх.} \end{matrix} \right), \quad (1.51)$$

в пределах изменения I_a в естественной схеме включения и строят переходную характеристику.

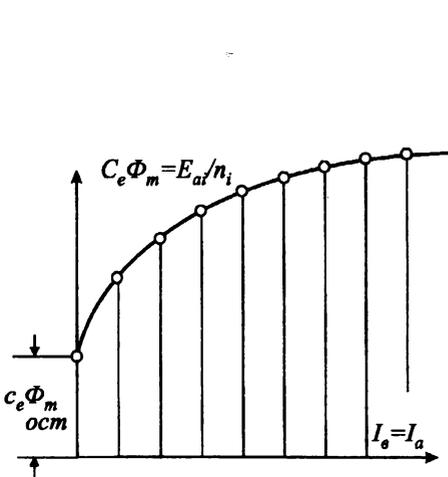


Рис. 1.15

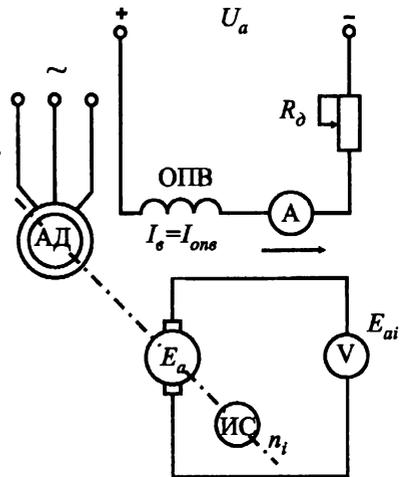


Рис. 1.16

1.6.4. Графический метод

Используется для построения искусственных характеристик, соответствующих различным сопротивлениям цепи якоря двигателей последовательного и смешанного возбуждения. Обоснование этого метода заключается в следующем: если сравнить уравнения электромеханических характеристик для

различных $R_a = r_a + R_a \text{ доб.}$

$$n_i = \frac{U_a}{c_e \Phi_m(I_{ai})} - \frac{I_{ai}}{c_e \Phi_m(I_{ai})} \cdot R_a, \quad (1.52)$$

то можно утверждать, что при всех значениях R_a определённому моменту на валу M_{c1}, M_{c2}, M_{c3} и так далее будет соответствовать определённый ток в цепи якоря I_{a1}, I_{a2}, I_{a3} и так далее, а следовательно, и определённый магнитный поток $\Phi_{mi} = f(I_{ai})$, создаваемый обмоткой последовательного возбуждения $\Phi_{m1}, \Phi_{m2}, \Phi_{m3}$ и так далее. В этой связи уравнение (1.52) можно переписать:

$$n_i = a - b \cdot R_a, \quad (1.53)$$

обозначив: $a = \frac{U_{aN}}{c_e \Phi_m(I_{ai})} = n_{zp},$

$$b = \frac{I_{ai}}{c_e \Phi_m(I_{ai})},$$

которые для определенного значения тока якоря I_a являются константами при всех значениях R_a . Полученное уравнение (1.53) отражает линейную зависимость $n = f(R_a)$, что обеспечивает удобство построения искусственных характеристик двигателей последовательного и смешанного возбуждения при различных сопротивлениях в цепи якоря.

Порядок построения рассмотрим на примере двигателя последовательного возбуждения (см. рис. 1.17):

- по номинальным данным и универсальной характеристике строится естественная электрохимическая характеристика. Задаваясь ординатами токов якоря в интересующих пределах нагрузки на валу, рассчитывают величины сопротивлений, ограничивающих токи короткого замыкания до $I_{акзи} = I_{ai}$:

$$R_{a\kappa 1} = \frac{U_{aN}}{I_{a\kappa 1}}; \quad R_{a\kappa 2} = \frac{U_{aN}}{I_{a\kappa 2}}; \quad R_{a\kappa 3} = \frac{U_{aN}}{I_{a\kappa 3}} \quad \text{и} \quad \text{т.д.};$$

- влево по оси абсцисс (второй квадрант) в масштабе откладываются вычисленные значения $R_{a\kappa i}$, там же откладывается величина внутреннего сопротивления машин r_a , через которую проводится вертикальная линия и на неё сносятся точки пересечения заданных токов с естественной характеристикой;

- через полученные точки на ординате r_a и соответствующие тем же же токам I_{ai} точки R_{ai} на оси абсцисс проводят прямые до пересечения с осью ординат, которые и представляют семейство характеристик по уравнению (1.52). На этом завершаются вспомогательные построения.

Искусственная характеристика для заданного сопротивления цепи якоря R_{ax} строится следующим образом:

- влево от оси $R_{a\kappa}$ в масштабе откладывается величина R_{ax} , и через полученную точку проводится вертикальная линия, пересекающая все характеристики $n = f(R_a)$;

- полученные точки пересечения сносят в первый-четвёртый квадранты на ординаты соответствующих токов I_{ai} ;

- искомая характеристика получается соединением этих точек плавной кривой (см. рис. 1.17), где $R_{ax2} = R_{a\kappa 2} = R_{a2}$.

Аналогично строится граничная характеристика. Для этого на соответствующие ординаты токов сносят точки пересечения характеристики $n = f(R_a)$ с осью ординат, что соответствует $r_a = 0$. По граничной характеристике определяют $c_e \cdot \Phi_m$ для заданных токов якоря I_{ai}

$$c_e \cdot \Phi_{mi} = \frac{U_{aN}}{n_{zpi}} = f(I_{ai} = I_e),$$

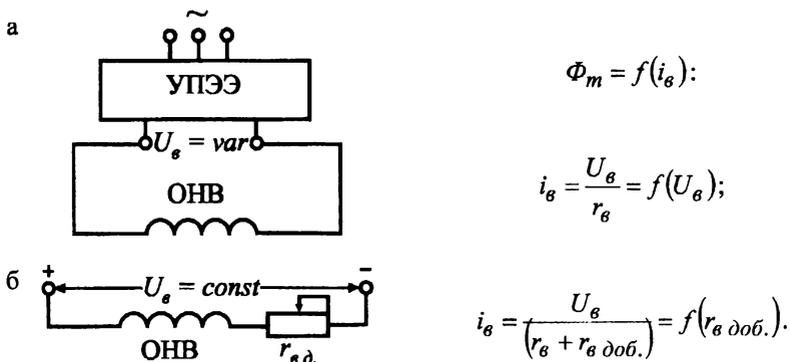


Рис. 1.18.

Исходя из уравнений (1.12) и (1.13), изменение магнитного потока влияет на величину n_0 , так и на величину падения скорости под нагрузкой, причём влияние на Δn_M оказывается большим, чем на Δn . Это связано с тем, что ток короткого замыкания не зависит от Φ_m (рис. 1.19)

$$I_{a \text{ кз}} = \frac{U_a}{R_a}, \quad (1.54)$$

а момент короткого замыкания определяется произведением тока короткого замыкания на магнитный поток и снижается с ослаблением последнего:

$$M_{\text{эмкз}} = c \Phi_m \cdot I_{a \text{ кз}} = c \Phi_m \cdot \frac{U_a}{R_a}. \quad (1.55)$$

Построение искусственных характеристик, соответствующих магнитному потоку, отличающемуся от номинального, рационально производить по точкам идеального холостого хода и короткого замыкания (см. рис. 1.19)

$$n'_{0u} = \frac{U_{aN}}{c_e \Phi'_m}; \quad n_{0e} = \frac{U_{aN}}{c_e \Phi_{mN}},$$

откуда

$$n'_{0u} = n_{0e} \cdot \frac{c_e \Phi_m}{c_e \Phi'_m}. \quad (1.56)$$

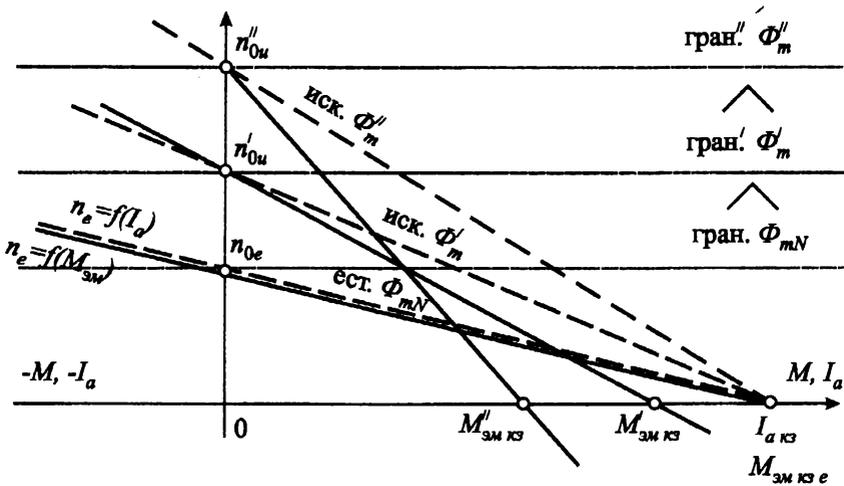


Рис. 1.19

Отношением $c_e \Phi_m / c_e \Phi'_m$ задаются, например, 1,05; 1,10 и т.д. Момент короткого замыкания определяется выражением

$$M_{эм кз} = c \Phi'_m \cdot I_{a кз} = \frac{U^2}{\omega'_0 \cdot R_a} \cdot \frac{a_N}{a_N} \quad (1.57)$$

В двигателях с последовательным возбуждением используют ослабление магнитного потока с целью повышения скорости вращения в области нагрузки на валу, превышающей номинальную (см. рис. 1.20, в). Наиболее просто это реализуется шунтированием обмотки последовательного возбуждения силовым резистором (см. рис. 1.20, а).

Расчёт координат искусственных характеристик необходимо производить с помощью переходной характеристики (§ 1.6.3), используя уравнения статических характеристик $\omega(I_a)$ или $n(I_a)$. Шунтирующее сопротивление должно быть учтено в выражении R_a .

В тяговых двигателях для ослабления магнитного потока используется изменение числа витков ОПВ (рис. 1.20, б)

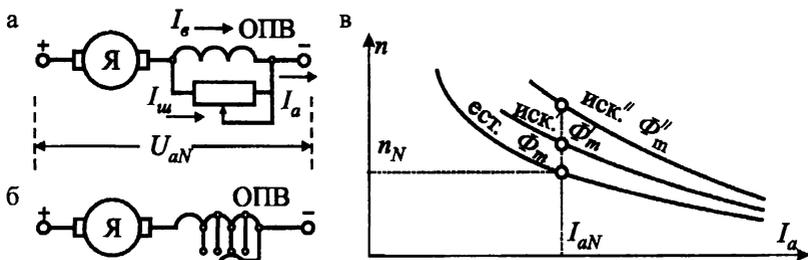


Рис. 1.20

1.6.6. Расчёт и построение статических характеристик электроприводов постоянного тока в искусственных схемах включения

В искусственной схеме включения цепь якоря двигателя включается на неизменное напряжение сети через делитель напряжения. Наличие потенциометра в силовой цепи, безусловно связано с потерями электрической энергии. Однако в некоторых технологических процессах, когда отсутствует необходимость в плавном изменении скорости движения, но требуется достаточно устойчивая работа на пониженной скорости, например в позиционных механизмах перед точной остановкой исполнительного органа, использование таких схем оказывается рациональным.

Искусственные схемы включения обычно используются в электроприводах с двигателями независимого и последовательного возбуждения. Если с первым возможна одна схема (см. рис. 1.21, схема I), так называемая схема шунтирования якоря ДПТ НВ, то при использовании двигателя последовательного возбуждения появляется возможность включения обмотки возбуждения, которая является токовой, не только последовательно с якорём, но и в ту или иную цепь делителя напряжения. Здесь получается три варианта искусственных схем включения с принципиальным отличием в электромехани-

ческих свойствах электроприводов, поскольку магнитный поток становится функцией токов в различных силовых цепях электропривода. Отсюда и название этих схем: схема II – шунтирование двигателя последовательного возбуждения; схема III – шунтирование цепи якоря двигателя последовательного возбуждения; схема IV – шунтирование якоря с внесением обмотки возбуждения в шунтирующую цепь (рис. 1.21).

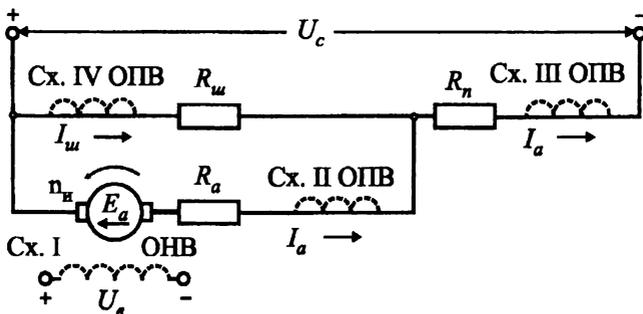


Рис. 1.21

На основании законов Кирхгофа для схемы рис. 1.21 математическое описание главной цепи можно представить следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} U_c = U_a = E_a + I_a \cdot R_a + I_n \cdot R_n; \\ U_a = I_w \cdot R_w + I_n \cdot R_n; \\ I_n = I_a + I_w, \end{aligned} \right\} \quad (1.58)$$

откуда токи I_n и I_w на различных участках делителя напряжения определяются как функции тока в цепи якоря:

$$I_n = \frac{U_a + I_a \cdot R_w}{R_w + R_n}; \quad (1.59)$$

$$I_w = \frac{U_a - I_a \cdot R_n}{R_w + R_n}. \quad (60)$$

В зависимости от искусственной схемы (сх. III или сх. IV) *эти токи являются токами возбуждения*. В этих случаях сопротивление обмотки возбуждения соответственно входит в значение R_n или R_w .

Для расчёта координат статических характеристик используются следующие уравнения:

$$n_u = n_{зр е} \cdot k - n_{зр е}^2 \cdot \frac{M_{эм}}{U_c^2} (R_a + R_n \cdot k), \quad (1.61)$$

$$n_u = n_{зр е} \cdot k - n_{зр е} \cdot \frac{I_a}{U_c} (R_a + R_n \cdot k), \quad (1.62)$$

$$M_{эм u} = \frac{U_c}{\omega_{зр е}} \cdot I_a = M_c, \quad (1.63)$$

где $k = \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_n} < 1$ – коэффициент потенциометра;

$\omega_{зр е} = \frac{2\pi}{60} \cdot n_{зр е} = f(I_a = I_{е u})$ – граничная скорость в естественной схеме включения, определяется через соответствующий ток возбуждения в искусственной схеме;

$$\frac{U_c}{n_{зр е}} = (c_e \cdot \Phi_m)_{ест. сх. вкл.}$$

Записанные уравнения показывают, что расчёт и построение характеристик электроприводов в искусственных схемах включения удобно производить при наличии соответствующих граничных характеристик в естественных схемах включения (см. гл. 1.5).

Полагая искусственную схему включения и параметры её цепей R_a , R_n , $R_{ш}$ заданными, а граничную характеристику в естественной схеме включения построенной, расчёт координат характеристик в искусственных схемах включения рационально выполнять в изложенной ниже последовательности.

1. Задаются значениями токов в цепи якоря $I_a \gg 0$, то есть в интересующей области нагрузок, и вносят в табл. 2.
2. Рассчитывают по уравнениям (1.59 – 1.60) $I_n = (I_a)$ или $I_{ш} = (I_a)$.

3. Определяют n_{zpe} , ω_{zpe} , входящие в уравнения (1.61, 1.62 и 1.63) из

$n_{zpe}(I_a)$ в естественной схеме включения:

а) для схемы I, где I_e не зависит от тока якоря и Φ_m остаётся неизменным, $n_{zpe} = n_{oe} = U_c / c_e \cdot \Phi_m - const$;

б) для схемы II, где $I_e = I_a$ и $\Phi_m = f(I_a)$, n_{zpe} определяется непосредственно из $n_{zpe}(I_a)$ в естественной схеме включения по значениям I_a в искусственной схеме;

в) для схемы III, где $I_e = I_n$ и $\Phi_m = f(I_n)$, n_{zpe} определяется из $n_{zpe}(I_a)$ в естественной схеме включения по значениям I_n рассматриваемой искусственной схемы и численно приравненным I_a ;

$$c_e \cdot \Phi_m = U_c / n_{zpe} = f(I_n);$$

г) для схемы IV, где $I_e = I_u$ и $\Phi_m = f(I_u)$, n_{zpe} определяется из $n_{zpe}(I_a)$ в естественной схеме включения по значениям I_u рассматриваемой искусственной схемы и численно приравненным I_a ;

$$c_e \cdot \Phi_m = U_c / n_{zpe} = f(I_u).$$

4. Вычисляют значения электромагнитного момента $M_{эм}$:

а) проще использовать (1.63), соответствующие I_a и

$$\omega_{zpe} = \frac{2\pi}{60} \cdot n_{zpe}, \text{ тогда } M_{эмu} = U_c \cdot I_a / \omega_{zpe};$$

б) при отсутствии заранее построенной $\omega_{zpe} = f(I_a)$, $M_{эм}$ определяется для схем II, III, IV, в которых он представляется функцией тока якоря и тока возбуждения $M_{эмu}(I, I_e)$ составляющими

$$M_{эмu} = c\Phi_{mu} \cdot I_a; \quad M_{возб.} = c\Phi_{mu} \cdot I_e,$$

$$\text{из соотношения } M_{эм u} = M_{возб.} \cdot I_a / I_e, \quad (1.64)$$

где $M_{возб.}$ берётся из универсальной характеристики $\mu(i)$ по I_e рассматриваемой схемы (см. гл. 1.4, рис. 1.9).

5. Вычисляют n_u по уравнениям (1.61) или (1.62) и строят характеристики $n_u(M_{эм}); n_u(I_a); n_u(I_n); n_u(I_u)$ и др., см. (рис. 1.22 – 1.27).

6. Представление о влиянии нагрузки на электромагнитное состояние в той или иной искусственной схеме включения дают соответствующие граничные характеристики. Для их расчёта используют уравнение

$$n_{зр u} = \frac{n_{зр e} \cdot R_{ш}}{R_{ш} + R_n} = f(I_a), \quad (1.65)$$

где $n_{зр e}$ соответствует значениям токов возбуждения рассматриваемой искусственной схемы включения.

7. При построении характеристик в искусственных схемах I, III, IV следует *внимательно относиться к определению координат характерных точек.*

Точке идеального холостого хода соответствует

$$I_a = M_{эм} = 0; n_{0 u} = n_{0 e} \cdot k = n_{зр u 0},$$

где $I_{ш 0} = I_{n 0} = U_c / (R_{ш} + R_n).$ (1.66)

В схеме I: $\Phi_m - const,$

$$n_{0 u} = \frac{U_c}{c_e \Phi_m} \cdot \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_n} \quad \text{или} \quad \omega_{0 u} = \frac{U_c}{c \Phi_m} \cdot \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_n}; \quad (1.67)$$

в схеме III: $\Phi_m = f(I_e = I_n),$

$$n_{0 u} = \frac{U_c}{c_e \Phi_m(I_{n 0})} \cdot \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_n} \quad \text{или} \quad \omega_{0 u} = \frac{U_c}{c \Phi_m(I_{n 0})} \cdot \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_n}; \quad (1.68)$$

в схеме IV: $\Phi_m = f(I_e = I_u),$

$$n_{0u} = \frac{U_c}{c_e \Phi_m(I_{u0})} \cdot \frac{R_{\mu}}{R_{\mu} + R_n} \quad \text{или} \quad \omega_{0u} = \frac{U_c}{c \Phi_m(I_{u0})} \cdot \frac{R_{\mu}}{R_{\mu} + R_n}. \quad (1.69)$$

Точка «А» реальна для схем I и III, характеризуется независимостью работы привода от величины R_{μ} , где $I_{\mu} = 0$, $I_n = I_a$, машина находится в режиме торможения противовключением (см. рис. 1.22, 1.24 и 1.25), её координаты:

$$I_{aA} = \frac{U_c}{R_n}; \quad M_{эмА} = c \Phi_m(I_{\theta}) \cdot \frac{U_c}{R_n}; \quad -n_{uA} = \frac{U_c}{c_e \Phi_m(I_{\theta})} \cdot \frac{R_a}{R_n}. \quad (1.70)$$

Точка «Б» реальна для схем I и IV, характеризуется независимостью работы привода от величины R_n , где $I_n = 0$, $I_{\mu} = -I_a$, машина находится в режиме динамического торможения (см. рис. 1.22, 1.24 и 1.27), её координаты:

$$-I_{aB} = \frac{U_c}{R_{\mu}}; \quad M_{эмБ} = c \Phi_m(I_{\theta}) \cdot \frac{U_c}{R_{\mu}}; \quad n_{uB} = \frac{U_c}{c_e \Phi_m(I_{\theta})} \cdot \frac{R_a + R_{\mu}}{R_{\mu}}. \quad (1.71)$$

Влияние R_n и R_{μ} на относительное положение характеристик показано на рис. 1.24 и 1.27, полученных при $I_{\theta} = I_{\theta N}$; $I_{n0} = I_{u0} = I_{aN}$.

Схема II не нашла практического применения, так как её электро-механические свойства не отличаются от таковых в естественной схеме включения (см. рис. 1.23).

Таблица 2

I_a	-	-	-	-	0	+	+	+	+	+
I_n										
I_{μ}										
$n_{зр e}$										
$M_{эм}$										
n_u										
$n_{зр u}$										

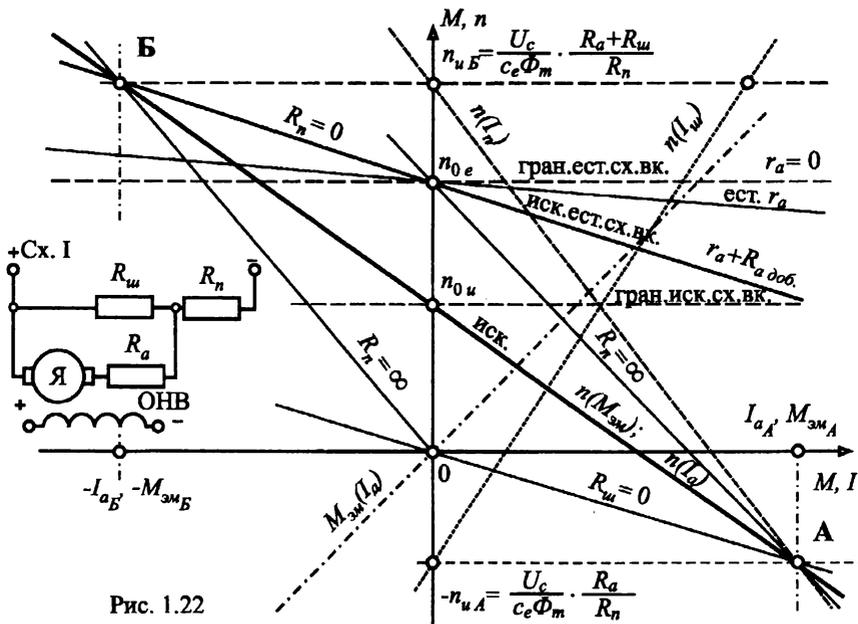


Рис. 1.22

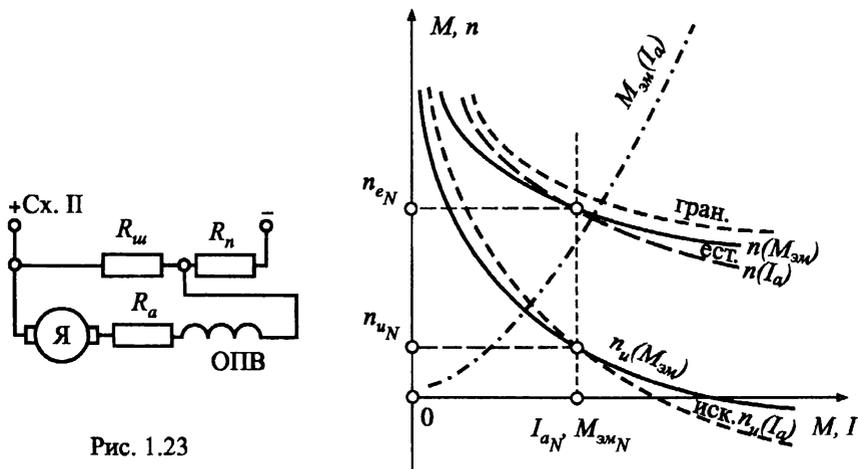


Рис. 1.23

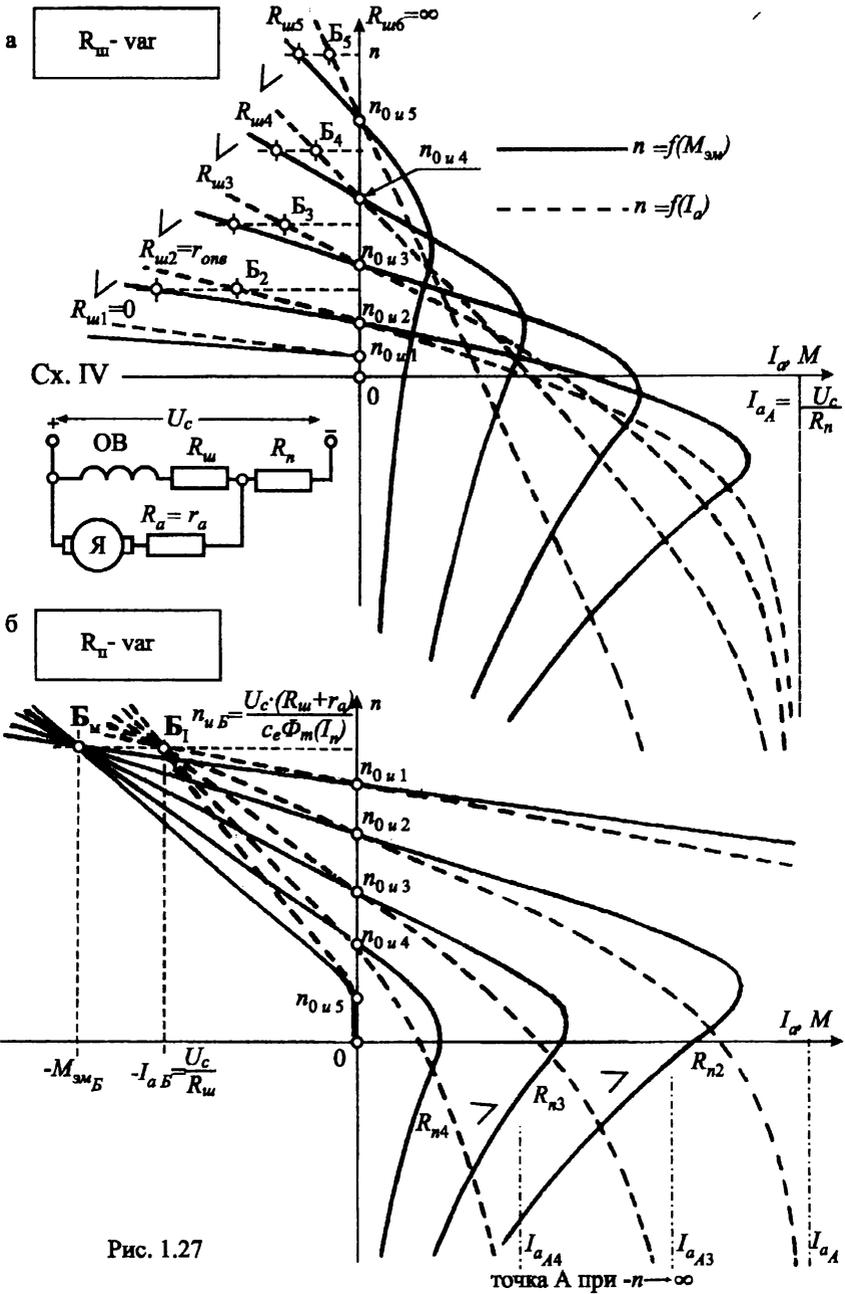


Рис. 1.27

1.7. Статические характеристики асинхронных двигателей

1.7.1. Эквивалентная схема замещения, баланс электрической мощности и уравнения статических характеристик АД

Когда $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$ не изменяется, исходят из Г-образной эквивалентной схемы замещения с вынесением цепи намагничивающего контура на зажимы фазы, полагая её подключенной к источнику напряжения бесконечно большой мощности, рис. 1.28,

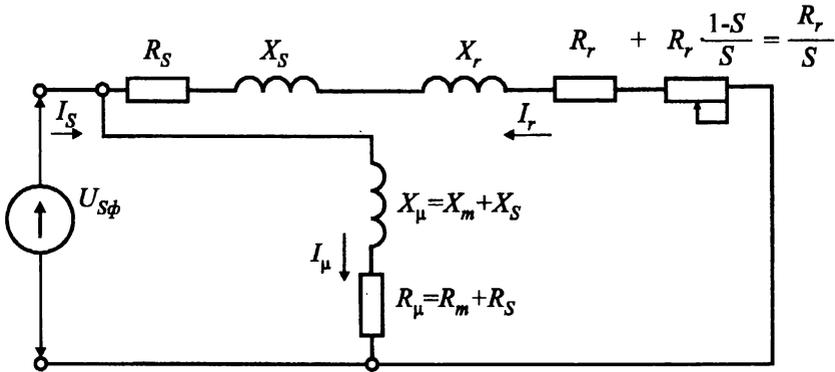


Рис. 1.28

где R_S , R_r , X_S , X_r , X_μ - параметры электрических цепей, приведенные к обмотке статора, что при переходе от Т-образной схемы замещения, как известно из дисциплины «Электрические машины», осуществляется через так называемый коэффициент рассеяния;

$$\frac{R_r}{S} = R_r + R_r \cdot \frac{1-S}{S} \text{ — отражает в схеме замещения факт энергетического}$$

взаимодействия между статором и ротором: первое слагаемое пропорционально переменным потерям мощности в цепи ротора, а второе — передаваемой механической мощности;

$R_{\mu} \cong 0$ – активное сопротивление контура намагничивания, обычно его не учитывают из-за малой величины.

Из схемы замещения можно записать выражение для приведённого к статору значения тока ротора

$$I_r = \frac{U_{s\phi}}{\sqrt{\left(R_s' + \frac{R_r}{S}\right)^2 + (X_s + X_r)^2}}, \text{ А} \quad (1.72)$$

которое представляет собой зависимость $I_r = f(S)$, называемую *уравнением электромеханической характеристики тока ротора*.

Для получения уравнения механической характеристики АД используют математические выражения баланса активной электрической мощности.

$$P_{1эл} = 3U_{s\phi} \cdot I_{s\phi} \cdot \cos \varphi = P_{эм} + \Delta P_{sv} + \Delta P_{Fe,s}, \quad (1.73)$$

где $\Delta P_{Fe,s} \cong 0$ – потери в стали статора; не учитывается из-за малой величины;

$\Delta P_{sv} = 3 \cdot I_{s\phi}^2 \cdot R_s$ – мощность переменных потерь на нагревание сопротивлений трёхфазной обмотки статора; (1.74)

$P_{эм} = M_{эм} \cdot \omega_0 = P_{мех} + \Delta P = \Delta P_{rv} + \Delta P_{c,xx} + P_{\theta}$ – электромагнитная мощность индукционно передаваемая от статора к ротору; (1.75)

$\Delta P_{rv} = 3I_r^2 \cdot R_r$ – мощность переменных потерь на нагревание сопротивлений обмотки ротора; (1.76)

$P_{мех} = M_{эм} \cdot \omega_{эд} = P_{2вал} + \Delta P_{c,xx}$ – механическая мощность, развиваемая на роторе, см. рис. 3.21; (1.77)

$\Delta P_{c,xx} = \Delta P_{Fe,r} + \Delta P_{мех} = \Delta M_{xx} \cdot \omega_{эд}$ – мощность потерь холостого хода; не зависит от нагрузки на валу, но может быть функцией скорости; (1.78)

$P_{2\theta} = M_{\theta} \cdot \omega_{эд}$ – механическая мощность, отдаваемая с вала АД. (1.79)

Из разности (1.75) и (1.77) получают **переменные потери в роторе**

$$\Delta P_{rv} = P_{эм} - P_{мех} = M_{эм}(\omega_0 - \omega_{эд}) \cdot \frac{\omega_0}{\omega_0} = M_{эм} \cdot \omega_0 \cdot S = 3I_r^2 \cdot R_r, \quad (1.80)$$

откуда $M_{эм} = \frac{3}{\omega_0} \cdot I_r^2 \cdot \frac{R_r}{S}$, в которое ток ротора подставляют из (1.72)

$$\begin{aligned} M_{эм} &= \frac{3}{\omega_0} \cdot \frac{U_{s\phi}^2 \cdot \frac{R_r}{S}}{\left(R_s + \frac{R_r}{S}\right)^2 + (X_s + X_r)^2} = \frac{3 \cdot p}{2\pi \cdot f_1} \cdot \frac{U_{s\phi}^2 \cdot \frac{R_r}{S}}{\left(R_s + \frac{R_r}{S}\right)^2 + (X_s + X_r)^2} = \\ &= \frac{3 \cdot 60}{2\pi \cdot n_0} \cdot \frac{U_{s\phi}^2 \cdot \frac{R_r}{S}}{\left(R_s + \frac{R_r}{S}\right)^2 + (X_s + X_r)^2}, \quad \text{Нм} \end{aligned} \quad (1.81)$$

Полученные выражения $M_{эм} = f(S)$ представляют собой варианты **записи уравнений механической характеристики**, записанные через параметры электрических цепей АД,

$3 \cdot p$ – число фаз и пар полюсов, которое определяется из шифра типа машины, например, 4Ф112МА – 6, где $6 = 2p$ – число полюсов, а $p = 3$;

ω_1 ; f_1 – круговая частота, эл.рад/с, и циклическая частота, Гц, напряжения питающей сети;

ω_0 ; n_0 – соответственно, угловая скорость, геом.рад/с; частота, об./мин., вращения магнитного поля АД;

$S = \frac{\omega_0 - \omega_{эд}}{\omega_0} = \frac{n_0 - n_{эд}}{n_0}$ – скольжение ротора.

Известные соотношения:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} = \frac{2\pi}{60} \cdot n_0, \quad (1.82)$$

откуда
$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p}; \quad (1.83)$$

$$\omega_D = \omega_0 \cdot (1 - S), \quad (1.84)$$

$$n_D = n_0 \cdot (1 - S). \quad (1.85)$$

В каталогах на АД параметры электрических цепей не приводятся, дают лишь номинальные данные электромеханических и энергетических переменных, а также:

- для АД КЗР приводятся:

$$\mu_n = \frac{M_n}{M_{eN}} \text{ – кратность пускового момента на валу;}$$

$$i_n = \frac{I_{sn}}{I_{sN}} \text{ – кратность пускового тока статора;}$$

- для АД ФР приводятся:

$$I_{rN} = I_{rN, \text{насн}} \frac{E_{r\phi N}}{E_{s\phi N}} \approx I_{rN, \text{насн}} \frac{E_{rл0}}{\sqrt{3}U_{s\phi N}} \text{ – номинальный ток рото-}$$

ра, А;

$E_{rл0}$ – линейное напряжение, В, между кольцами разомкнутой вторичной цепи неподвижного ротора, $\omega_D = 0$;

$$E_{rл0} \cong E_{r\phi N} \cdot \sqrt{3} \cong U_{s\phi N} \cdot \sqrt{3}.$$

В справочной литературе, например, для серии 4А [9] можно найти информацию о параметрах электрических цепей.

Используя уравнения статических характеристик (1.72) и (1.81), задаются S в интересующем диапазоне и рассчитывают значения I_r и $M_{эм}$. Характеристика $S = f(I_1)$, наиболее значимая для АД КЗР, строится путём смещения вправо характеристики $S = f(I_r)$ на величину $I_r = I_{s0}$.

Естественные статические характеристики АД, построенные через параметры электрических цепей представлены, рис. 1.29.

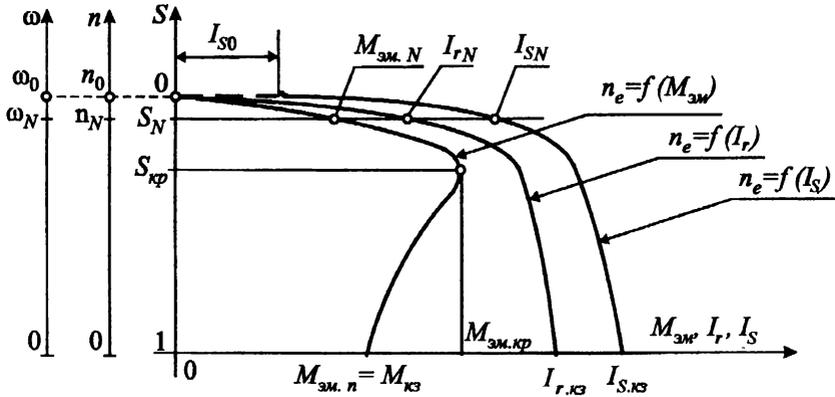


Рис. 1.29

1.7.2. Другая форма записи $M_{эм} = f(S)$,
так называемая «формула Клосса»

При невозможности использовать выражение $M_{эм}$ через параметры электрических цепей (1.81), названное уравнение преобразуют к другой форме записи. Для этого берут производную от (1.81) и приравнивают её нулю: $\frac{dM_{эм}}{dS} = 0$; используя из математики $\left(\frac{U}{V}\right)' = \frac{V \cdot U' - V' \cdot U}{V^2}$ и помня, что при любом конечном значении знаменателя дробь будет равна нулю, если числитель равен нулю, то есть $V \cdot U' - U \cdot V' = 0$. После преобразования получают выражение критического скольжения:

$$S_k = \pm \frac{R_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2}}, \quad (1.86)$$

где $X_s + X_r = x_k$ — называют реактанцем короткого замыкания;

знак (+) указывает на двигательный режим работы;

знак (-) – на рекуперативное торможение;

$S_K \equiv R_r$ – в прямой зависимости от активного сопротивления цепи ротора.

После подстановки (1.86) в (1.81) получают выражение $M_{эмк}$ через параметры электрических цепей

$$M_{эмк} = \frac{3 \cdot p}{2\pi \cdot f_1} \cdot \frac{U_{s\phi}^2}{2 \left[R_s \pm \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2} \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 60}{2\pi \cdot n_0} \cdot \frac{U_{s\phi}^2}{2 \left[R_s \pm \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2} \right]}, \quad (1.87)$$

где $M_{эмк}$ – не зависит от активного сопротивления ротора, находится в прямой зависимости от квадрата величины фазного напряжения питающего напряжения $M_{эмк} \equiv U_{s\phi}^2$.

Для получения удобной формы записи $M_{эм}(S)$, берётся отношение $M_{эм}/M_{эм.к}$, используя (1.81) и (1.87). После преобразования получают:

$$\frac{M_{эм}}{M_{эм.к}} = \frac{R_r}{S} \cdot \frac{2 \left[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2} \right]}{\left(R_s + \frac{R_r}{S} \right)^2 + (X_s + X_r)^2} = \frac{2 \cdot (1 + \varepsilon)}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S} + 2 \cdot \varepsilon},$$

откуда
$$M_{эм} = \frac{2 \cdot M_{эм.к} \cdot (1 + \varepsilon)}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S} + 2 \cdot \varepsilon}, \quad \text{Нм}, \quad (1.88)$$

где обозначены:
$$\frac{R_s}{R_r} = \alpha; \quad \alpha \cdot S_K = \varepsilon, \quad \text{откуда} \quad \varepsilon = \frac{R_s}{R_r} \cdot S_K \quad (1.89)$$

Для машин большой мощности $S_K = 0,1 \div 0,2$, полагая α стремящимся к

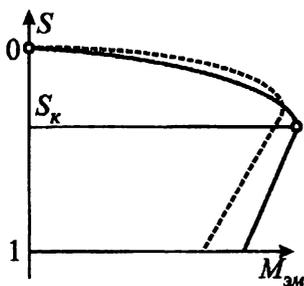


Рис. 1.30

единице, возникает возможность пренебречь величиной ε и получить так называемую упрощённую формулу Клосса:

$$M_{эм} \cong \frac{2 \cdot M_{эм,к}}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S}}, \quad (1.90)$$

На рис. 1.30 представлены механические характеристики рассчитанные по (1.88) сплошной линией и по (1.90) – пунктиром.

1.7.3. Расчёт естественной механической характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

а) При использовании уравнения (1.88)

Неизвестными являются S_K и ε . Для их определения записывают уравнение (1.88) для точки номинального режима

$$M_{эмN} = \frac{2 \cdot \lambda \cdot M_{эмN} \cdot (1 + \varepsilon)}{\frac{S_N}{S_K} + \frac{S_K}{S_N} + 2 \cdot \varepsilon}, \quad (1.91)$$

и точки пускового режима, если использовать (1.88), приравняв $M_{эмN} \cong M_{вN}$, что, безусловно, вносит определённую неточность

$$M_n = \mu_n \cdot M_{вN} = \frac{2 \cdot \lambda \cdot M_{вN} (1 + \varepsilon)}{\frac{1}{S_K} + \frac{S_K}{1} + 2 \cdot \varepsilon}. \quad (1.92)$$

После сокращения в них M_N получают систему из двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\left. \begin{aligned} 1 &= \frac{2 \cdot \lambda \cdot (1 + \varepsilon)}{\frac{S_N}{S_K} + \frac{S_K}{S_N} + 2 \cdot \varepsilon} \\ \mu_n &= \frac{2 \cdot \lambda \cdot (1 + \varepsilon)}{\frac{1}{S_K} + S_K + 2 \cdot \varepsilon} \end{aligned} \right\} \quad (1.93)$$

позволяющую определить S_K и ε .

Далее используют уравнение (1.88) для расчёта искоемых координат: задаются S (с учётом области интересующего режима) и определяют соответствующие $M_{эм} \cong M_{\theta}$.

Если отсутствуют сведения о кратности пускового момента μ_n , второе уравнение необходимо заменить. Для этого выражают уравнение (1.87), записанное для двигательного режима, через перегрузочную способность $\lambda = \frac{M_{вк}}{M_{\theta N}} \cong \frac{M_{эм.к}}{M_{эмN}}$, приняв $M_{эм.к} \cong \lambda \cdot M_{\theta N} = \lambda \cdot \frac{P_{2(\theta)N}}{\omega_N} \cong \frac{M_{эм.к}}{M_{эмN}}$:

$$\lambda \cdot \frac{P_{2(\theta)N}}{\omega_N} \cong M_{эм.к} = \frac{3}{\omega_0} \cdot \frac{U_{сф}^2}{2 \left[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2} \right]}, \quad (1.94)$$

для преобразования (1.94) используют выражения (1.86) и (1.89), где

$$\varepsilon = \frac{R_s}{R_r} \cdot S_K, \quad \text{откуда} \quad \frac{R_r}{S_K} = \frac{R_s}{\varepsilon};$$

$$S_K = \pm \frac{R_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2}}, \quad \text{откуда} \quad \frac{R_r}{S_K} = \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2},$$

которые используют для преобразования знаменателя (1.94):

$$2 \cdot \left[R_s + \sqrt{R_s^2 + (x_s + x_r)^2} \right] = 2 \cdot \left(R_s + \frac{R_r}{S_K} \right) = 2 \cdot \left(R_s + \frac{R_s}{\varepsilon} \right) = 2 \cdot R_s \cdot \left(\frac{1 + \varepsilon}{\varepsilon} \right).$$

Преобразованное уравнение (1.94) приобретает вид:

$$\lambda \cdot \frac{P_{2(\theta)N}}{\omega_N} \cong \frac{3}{\omega_0} \cdot \frac{U_{s\phi}^2 \cdot \varepsilon}{2 \cdot R_s \cdot (1 + \varepsilon)}, \quad (1.95)$$

которое переписывают относительно R_s :

$$R_s = \frac{3}{2} \cdot \frac{\omega_N \cdot U_{s\phi N}^2 \cdot \varepsilon}{\omega_0 \cdot \lambda \cdot P_{2(\theta)N} \cdot (1 + \varepsilon)} \quad (1.96)$$

Допустим, в номинальном режиме работы потребляемая из сети мощность $P_{1(\text{эл})N}$, расходуется на преобразование в механическую на валу $P_{2(\theta)N}$, а также на покрытие потерь на нагревание цепей статора ΔP_{svN} , ротора ΔP_{rvN} , и постоянных потерь $\Delta P_{cN} = \Delta P_{FeN} + \Delta P_{mechN}$, которые принимают равными между собой, то есть $\Delta P_{svN} = \Delta P_{rvN} = \Delta P_{cN}$. Это создает удобство, хотя и с определенной погрешностью, выражать суммарные потери $\Delta P_{\Sigma АД}$ при номинальной нагрузке на валу либо через утроенные ΔP_{svN} , либо через утроенные ΔP_{rvN} .

В настоящем параграфе примем допущение, **что суммарные потери мощности в АД КЗР равны утроенным переменным потерям мощности в цепи статора:**

$$\Delta P_{\Sigma АД} = P_{1N} - P_{rN} = P_{rN} \cdot \left(\frac{1 - \eta_N}{\eta_N} \right) \cong 3 \cdot \Delta P_{svN} = 3 \cdot 3 \cdot I_{sN}^2 \cdot R_s, \quad (1.97)$$

где $P_{1(\text{эл})N}$ – активная электрическая номинальная мощность, потребляемая из сети, Вт;

$P_{2(\theta)N}$ – механическая номинальная мощность, развиваемая на валу, Вт;

$\Delta P_{svN} = 3 \cdot I_{sN}^2 \cdot R_s$ – переменные потери в цепи обмотки статора при

номинальной нагрузке на валу, где «3» указывает на число фаз, Вт;

$$\frac{P_{2(\varepsilon)N}}{P_{1(\text{эл})N}} = \eta_{\text{ад}N} = \eta_{\text{эл}} \cdot \eta_{\text{эм}} \cdot \eta_{\text{мех}} - \text{номинальный КПД, с учётом трёх}$$

этапов энергопреобразования внутри АД.

Из (1.97) выражают R_s

$$R_s = \frac{P_{2(\varepsilon)N} \cdot (1 - \eta_N)}{3^2 \cdot I_{sN}^2 \cdot \eta_N}. \quad (1.98)$$

Приравняв (1.96) и (1.98) избавляются от R_s , а из полученного равенства выражают $\frac{1+\varepsilon}{\varepsilon}$ и получают искомое уравнение.

$$\left. \begin{aligned} 1 &= \frac{2 \cdot \lambda \cdot (1 + \varepsilon)}{\frac{S_N}{S_K} + \frac{S_K}{S_N} + 2 \cdot \varepsilon} \\ \frac{1 + \varepsilon}{\varepsilon} &= \frac{3^3 \cdot \omega_N \cdot U_{sN}^2 \cdot I_{sN}^2 \cdot \eta_N}{2 \cdot \omega_0 \cdot \lambda \cdot P_{2(\varepsilon)N} \cdot (1 - \eta_N)} \end{aligned} \right\} \quad (1.99)$$

Полученная система уравнений (1.99) позволяет определить S_K и ε . Расчёт координат естественной механической характеристики АД КЗР выполняют по уравнению (1.88): задается S и вычисляется $M \cong M_{\text{эм}}$.

б) При использовании уравнения (1.90)

Необходимо предварительно определить S_K ; для этого уравнение (1.90) записывается для точки номинальной нагрузки на валу, при этом полагают, что

$$\lambda = \frac{M_{\text{вк}}}{M_{\text{вN}}} \cong \frac{M_{\text{эмк}}}{M_{\text{эмN}}}, \quad M_{\text{эмN}} = \frac{2 \cdot \lambda \cdot M_{\text{эмN}}}{\frac{S_N}{S_K} + \frac{S_K}{S_N}}$$

откуда находят S_K следующим образом:

$$\frac{S_N}{S_K} + \frac{S_K}{S_N} = 2\lambda; \Rightarrow S_N^2 + S_K^2 = 2\lambda \cdot S_N \cdot S_K; \Rightarrow S_K^2 - 2\lambda \cdot S_N \cdot S_K + S_N^2 = 0;$$

$$S_K = \frac{2\lambda \cdot S_N}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{2\lambda \cdot S_N}{2}\right)^2 - S_N^2} = \lambda \cdot S_N \pm \sqrt{(\lambda \cdot S_N)^2 - S_N^2};$$

$$S_K = S_N \cdot \left(\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1}\right) \quad (1.100)$$

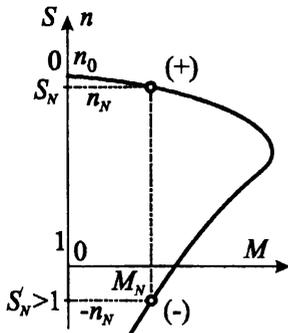


Рис. 1.31

При вычислении S_K в полученном уравнении (1.100) используется знак (+), характеризующий точку S_N , соответствующую номинальной скорости ротора, указанной в паспорте двигателя (рис. 1.31).

Следует отметить, что выражение (1.100) имеет ограниченное использование, так как оно справедливо для асинхронных короткозамкнутых двигателей большой мощности, то есть при $R_s \approx R_r$. Определив S_K , используют уравнение (1.90) для расчёта искоемых координат: задаются S и вычисляют соответствующие $M \cong M_{\text{эм}}$.

1.7.4. Расчёт естественной механической характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором (с кольцами)

Здесь можно использовать только уравнение (1.88), а, следовательно, прежде всего, требуется определить неизвестные S_K и ϵ .

Поступают следующим образом: преобразуют знаменатель уравнения (1.94), чтобы выразить в нём R_r :

$$2 \cdot \left[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2} \right] = 2 \cdot \left(R_s + \frac{R_r}{S_k} \right) = \frac{2}{S_k} \cdot (R_s \cdot S_k + R_r) = \frac{2 \cdot R_r}{S_k} \cdot (1 + \varepsilon);$$

и преобразуют (1.94) к следующему виду:

$$\lambda \cdot \frac{P_{2(\varepsilon)N}}{\omega_N} \cong \frac{3}{\omega_0} \cdot \frac{U_{s\phi}^2 \cdot S_k}{2 \cdot R_r \cdot (1 + \varepsilon)} \quad (1.101)$$

которое переписывают относительно R_r

$$R_r = \frac{3}{2} \cdot \frac{\omega_N \cdot U_{s\phi N}^2 \cdot S_k}{\omega_0 \cdot \lambda \cdot P_{2(\varepsilon)N} \cdot (1 + \varepsilon)} \quad (1.102)$$

Далее принимают допущение, что в номинальном режиме работы АД ФР суммарные потери мощности выражаются через утроенные переменные потери в цепи ротора ΔP_{rvN}

$$P_{1N} - P_{2N} = P_{2(\varepsilon)N} \cdot \left(\frac{1 - \eta_N}{\eta_N} \right) \cong 3 \cdot \Delta P_{rvN} = 3^2 \cdot I_r^2 \cdot R_r, \quad (1.103)$$

откуда

$$R_r \cong \frac{P_{2(\varepsilon)N}}{3^2 \cdot I_{rN}^2} \cdot \left(\frac{1 - \eta_N}{\eta_N} \right). \quad (1.104)$$

Приравняв (1.102) и (1.104) избавляются от R_r , а из полученного равенства выражают $(1 + \varepsilon)$ и получают искомое уравнение

$$1 + \varepsilon = \frac{3^3}{2} \cdot \frac{\omega_N \cdot U_{s\phi N}^2 \cdot S_k \cdot \eta_N}{\omega_0 \cdot \lambda \cdot P_{2(\varepsilon)N} \cdot (1 + \eta_N)} \cdot I_{rN}^2, \quad (1.105)$$

в котором приведённый ток ротора I_{rN} при номинальной нагрузке выражают через паспортные данные:

$$I_{rN} = I_{rN \text{ начн.}} \cdot \frac{E_{r\phi N}}{E_{s\phi N}} \cong I_{rN \text{ начн.}} \cdot \frac{E_{r \text{ л о}}}{\sqrt{3} \cdot U_{s\phi N}}, \quad (1.106)$$

где принято для схемы ротора (Y):

$$E_{r\phi N} \cong \frac{E_{r \text{ л о}}}{\sqrt{3}}; \quad E_{s\phi N} \cong U_{s\phi N}.$$

После подстановки (1.105) и (1.106) получают искомое выражение и записывают систему уравнений (1.107), решение которой даёт определение искомых S_K и ε :

$$\left. \begin{aligned} (1+\varepsilon) &= \frac{3^2}{2} \cdot \frac{\omega_N \cdot S_K \cdot I_{rN \text{ начн.}}^2 \cdot E_{r \text{ л о}} \cdot \eta_N}{\omega_0 \cdot \lambda \cdot P_{2(\varepsilon)N}^2 \cdot (1-\eta_N)}; \\ 1 &= \frac{2 \cdot \lambda \cdot (1+\varepsilon)}{\frac{S_N}{S_K} + \frac{S_K}{S_N} + 2 \cdot \varepsilon}. \end{aligned} \right\} \quad (1.107)$$

Расчёт координат естественной механической характеристики выполняют по уравнению (1.88): задаются S и вычисляют искомые значения $M \cong M_{эм}$.

1.7.5. Расчёт и построение естественной электромеханической характеристики $S = f(I_s)$ асинхронного двигателя по паспортным данным

В практике асинхронного электропривода, особенно для широко распространённого двигателя с короткозамкнутым ротором, возникает задача иметь удобное, пусть приближённое выражение тока статора в функции скольжения, когда исходными для расчёта оказываются лишь паспортные данные и построенная по ним механическая характеристика.

Такое выражение можно получить, если пренебречь R_s , то есть предположить отсутствие электрических потерь в цепи статора $\Delta P_{sv} = 3I_s^2 \cdot R_s \cong 0$. Соответственно упрощится эквивалентная Г-образная схема замещения и векторная диаграмма (см. рис. 1.32 а, б)

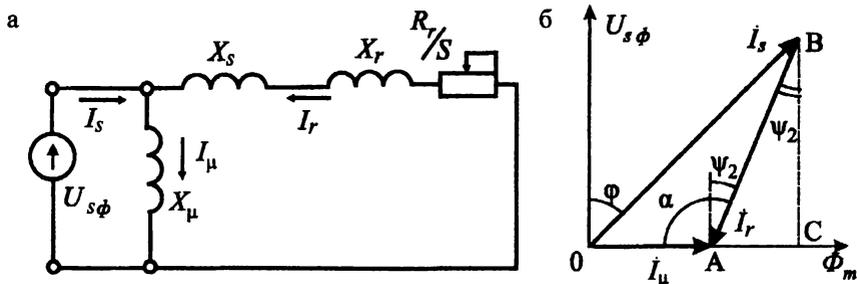


Рис. 1.32

Применив теорему косинусов записывают выражение для тока статора, которое подвергают преобразованию, используя переход от треугольников токов к треугольникам сопротивлений, а также соотношение электрических потерь в цепи ротора при любой и номинальной нагрузке. В результате получают искомое уравнение:

$$I_s \cong \sqrt{I_{s0}^2 + (I_{sN}^2 - I_{s0}^2) \cdot \frac{M \cdot S}{M_N \cdot S_N}} \quad (1.108)$$

или, поделив всё на I_s получают его в относительных единицах:

$$i_s \cong \sqrt{i_{s0}^2 + (1 - i_{s0}^2) \cdot m \cdot \frac{S}{S_N}}$$

Задаются значениями S в пределах исследуемых режимов, по ним из $S = f(M)$, определяют соответствующее значение M ; по (1.108) вычисляют $I_s = f(S; M)$, затем строится электромеханическая характеристика $S = f(I_s)$.

Значения тока холостого хода I_{s0} в асинхронных машинах колеблется в широких пределах - $(0,2 + 0,6) I_{sN}$, поэтому желательно, пусть приближен-

ное, но достаточно однозначное его определение для конкретного двигателя. Из анализа упрощённой векторной диаграммы при номинальной нагрузке получают удобное расчётное выражение:

$$I_{s0} = I_{sN} \cdot \left(\sin \varphi_N - \cos \varphi_N \cdot \frac{S_N}{S_K} \right), \quad (1.109)$$

или, поделив его на I_{sN} , записывают его в относительных единицах:

$$i_{s0} = \sin \varphi_N - \cos \varphi_N \cdot \frac{S_N}{S_K}.$$

Отметим, что выражения (1.88), (1.90), (1.108) и (1.109) обеспечивают достаточную для практики точность, как при определении уставок защитной аппаратуры, так и при оценке теплового состояния асинхронного двигателя при условии отсутствия эффекта вытеснения тока в цепи ротора на поверхность проводников при повышении его частоты. Выражения неприемлемы для двигателей с двойной беличьей клеткой и с глубоким пазом. Поэтому, прежде чем использовать названные уравнения, требуется выполнить проверку на степень вытеснения тока в цепи ротора при пуске. Для этого используется следующее неравенство:

$$\rho_n = \frac{R_{rn}}{R_r(N)} = \frac{I_{sN}^2 - I_{s0}^2}{I_{sn}^2 - I_{s0}^2} \cdot \frac{M_n}{M_N} \cdot \frac{1}{S_N} = \frac{1 - i_{s0}^2}{i_{sn}^2 - i_{s0}^2} \cdot \frac{\mu_n}{S_N} < 1,4 \quad (1.110)$$

1.8. Расчёт и построение статических характеристик асинхронных двигателей в режиме динамического торможения с независимым возбуждением

Для включения АД в режим динамического торможения его отключают от сети переменного напряжения, в две фазы статора подают постоянный ток от отдельного источника или через выпрямительное устройство. По отношению к источнику постоянного тока фазы обмотки статора будут представлять

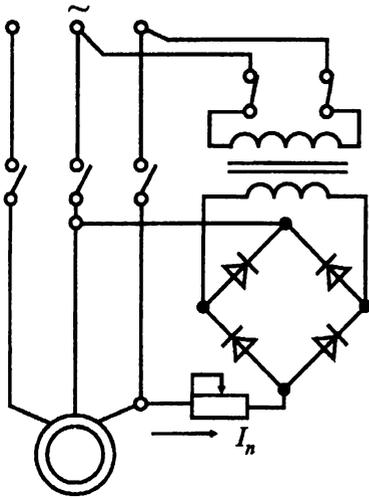


Рис. 1.33

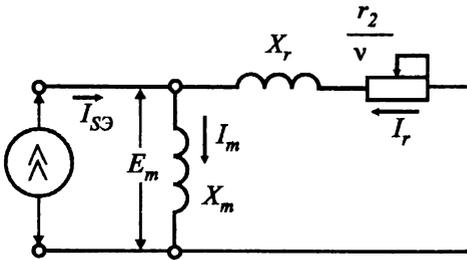


Рис. 1.34

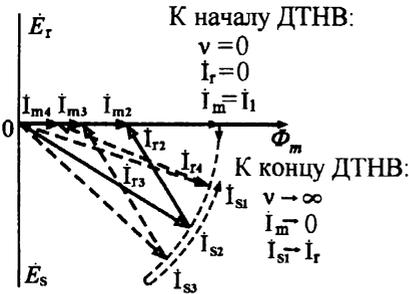


Рис. 1.35

чисто активное сопротивление R_s , которое значительно меньше полного сопротивления Z_{AD} , рассмотренного выше для двигательного режима. Если АД ФР, то в цепь ротора могут включаться внешние добавочные сопротивления. Схема включения представлена на рис. 1.33. Вращающийся ротор пересекает неподвижное постоянное поле статора в обратном направлении и в проводниках обмотки ротора индуцируется ЭДС E_m , под действием которой по замкнутой цепи ротора

протекает ток I_r , создающий своим полем тормозной момент.

В отличие от § 1.7, где асинхронная машина представлялась включенной в сеть источника напряжения бесконечно большой мощности, в режиме

динамического торможения асинхронная машина эквивалентно представляется включенной в цепь источника тока также бесконечно большой мощности (см. рис. 1.34).

Векторная диаграмма АД в режиме ДТ НВ показана на рис. 1.35.

Реально в цепи статора протекает

постоянный ток I_n . В схеме замещения и в

расчётных выражениях ему соответствует фиктивный, эквивалентный по намагничивающей силе, трёхфазный переменный ток, фазное значение которого определяется через I_n и коэффициент, характеризующий схему включения фаз обмотки статора, см. рис. 1.36 и уравнение (1.111)

$$I_{s\varnothing} = K \cdot I_n, \quad (1.111)$$

где K – коэффициент схемы:

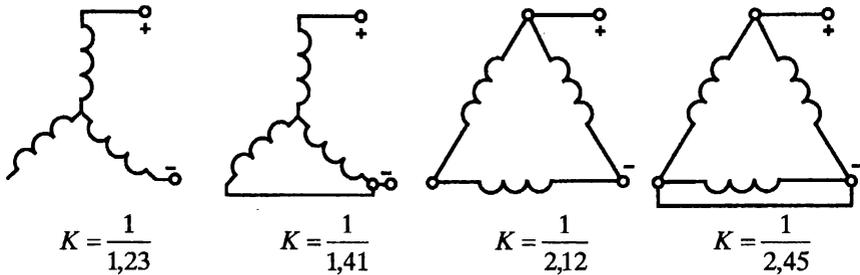


Рис. 1.36

Для определения координат статических характеристик используются следующие расчётные выражения:

$$I_r = \frac{I_{s\varnothing} \cdot X_m}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{v}\right)^2 + (X_m + X_r)^2}}, \quad (1.112)$$

где $v = \frac{n}{n_0} = \frac{\omega}{\omega_0}$ – относительная частота (угловая скорость) вращения ротора;

$$M_{эм} = \frac{3 \cdot 60}{2\pi \cdot n_0} \cdot \frac{I_{s\varnothing}^2 \cdot X_m^2 \cdot \frac{R_r}{v}}{\left(\frac{R_r}{v}\right)^2 + (X_m + X_r)^2}; \quad (1.113)$$

$$M_{эмк} = \frac{3 \cdot 60}{2\pi \cdot n_0} \cdot \frac{I_{s\varnothing}^2 \cdot X_m^2}{2 \cdot (X_m + X_r)^2}; \quad (1.114)$$

$$v_k = \frac{R_r}{X_m + X_r}; \quad (1.115)$$

$$M_{эм} = \frac{2 \cdot M_{эмк}}{\frac{v}{v_k} + \frac{v_k}{v}}. \quad (1.116)$$

Как видим, для расчёта характеристик $n = f(I_r)$ и $n = f(M_{эм})$ необходимо располагать значениями параметров R_r , X_r и X_m Т-образной схемы замещения. Характеристики представлены на рис. 1.37.

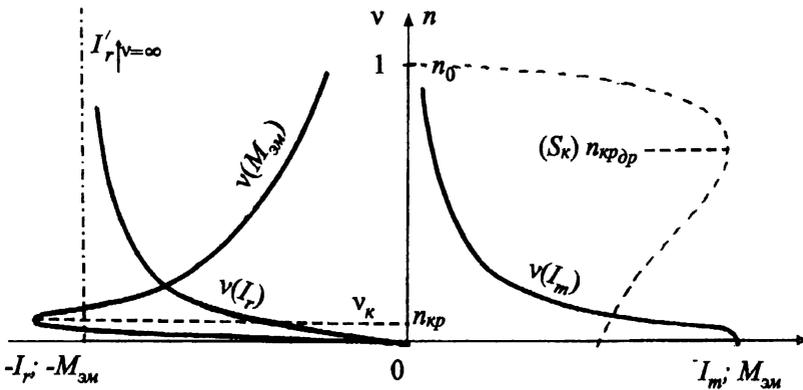


Рис. 1.37

1.9. Построение пусковых диаграмм резисторных электроприводов

Пуск двигателей постоянного тока и асинхронных с фазным ротором производится по искусственным характеристикам путём постепенного отключения предварительно включённых в главную цепь добавочных сопротивлений. Этим обеспечивается ограничение пусковых токов (моментов) до допустимых значений и выход на естественную характеристику. Участки названных характеристик между ординатами пусковых и переключающих токов (моментов) и составляют пусковую диаграмму.

Для построения пусковой диаграммы задаются значениями токов: пускового I_1 и переключения I_2 (или соответствующих моментов). В электроприводах постоянного тока пусковой ток принимается на уровне допустимого по условиям нормальной коммутации на коллекторе:

$$\text{ДПТ НВ} \quad I_1 = (1,8 \div 2,3) \cdot I_{a_N};$$

$$\text{ДПТ СВ} \quad I_1 = (2,0 \div 2,5) \cdot I_{a_N};$$

$$\text{ДПТ ПВ} \quad I_1 = (2,5 \div 3,0) \cdot I_{a_N}.$$

Пусковой момент определяется через принятый ток и соответствующий ему магнитный поток

$$M_{\text{пуск}} = M_{\text{эм}1} = c\Phi_m \cdot (I_{\text{возб}}) \cdot I_1.$$

В электроприводах с асинхронными двигателями с фазным ротором задаются пусковым моментом

$$M_{\text{пуск}} = M_{\text{эм}1} = (0,80 \div 0,85) \cdot \lambda \cdot M_{\text{эм}N},$$

то есть принимают его на 15 ÷ 20 % меньше критического и таким образом ориентируются на участки механических и электромеханических характеристик, близкие к линейным, где ток и момент можно принять пропорциональным.

Ток (или момент) переключения принимается на 15 ÷ 20 % больше значения номинального, которому полагают равным ток (момент) статический

$$I_{\text{пер.}} = I_{a2} = (1,15 \div 1,20) \cdot I_c, \quad \text{где} \quad I_c \cong I_N,$$

или

$$M_{\text{пер.}} = M_{\text{эм}2} = (1,15 \div 1,20) \cdot M_c, \quad \text{где} \quad M_c \cong M_{\text{эм}N}.$$

При построении пусковой диаграммы важно задаться необходимым числом ступеней переключения резисторов:

$$m_{\text{пуск}} = 2 \div 3;$$

$$m_{\text{пуск-рег.}} = 5 \div 7.$$

Пусковая диаграмма строится в координатах предварительно построенной естественной характеристики. Приёмы её построения для различных типов двигателей понятны из рис. 1.38, 1.39, 1.40 и 1.41. При необходимости значения I_{a1} и I_{a2} корректируются, чем обеспечивается целое число ступеней пусковой диаграммы m .

а) Двигатель с независимым (параллельным) возбуждением

Лучи, выходящие из полюса в точке n_0 (см. рис. 1.38, б) представляют семейство используемых электромеханических характеристик, в интервале $I_{a1} \div I_{a2}$ они образуют пусковую диаграмму; для обеспечения её равномерности при целом числе ступеней значения I_{a1} и I_{a2} подбираются.

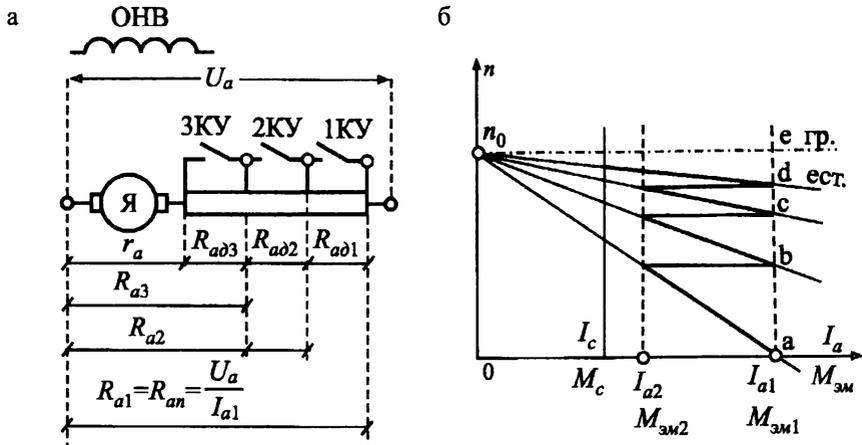


Рис. 1.38

б) Двигатель с последовательным или смешанным возбуждением

Здесь полюс выходящих лучей находится вне оси ординат и его место положения подбирается в соответствии с числом m ступеней и принимаемыми значениями I_{a1} и I_{a2} (см. рис. 1.39).

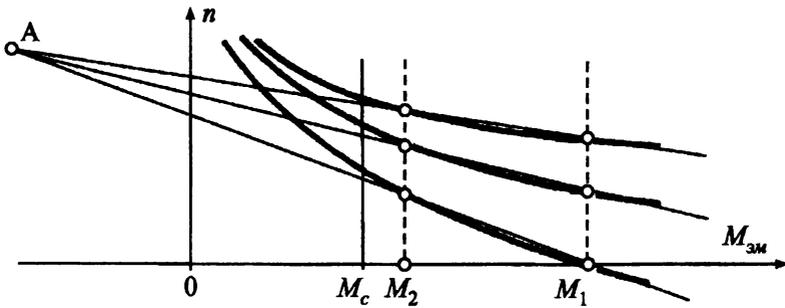


Рис. 1.39

Другой способ, см. § 1.5.4

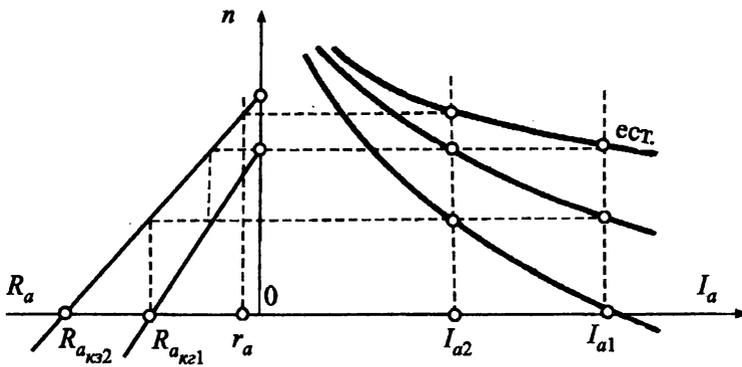
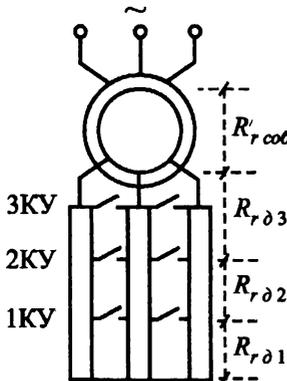


Рис. 1.40

в) Асинхронный двигатель с фазным ротором (с кольцами)

а



б

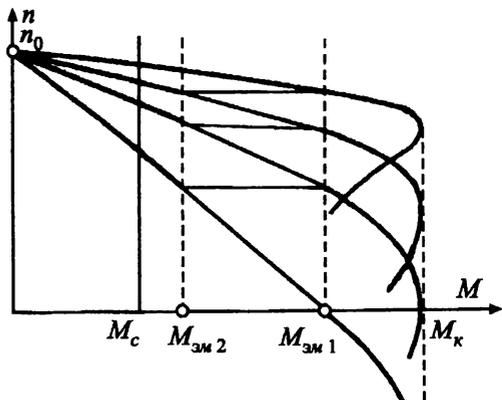


Рис. 1.41

Решение обратных задач. Определение параметров электрических цепей электроприводов по заданным координатам статических характеристик

2.1. Определение сопротивлений пусковых резисторов в электроприводах постоянного и переменного тока

2.1.1. Графический метод, используемый в электроприводах постоянного тока

Из рис. 2.1 видно, что ордината пускового тока в пределах от $n = 0$ до $n = n_0$ делится электромеханическими характеристиками на участки, пропорциональные сопротивлениям цепи якоря.

$$\overline{ae} \cdot m_{\omega} = \Delta n_1 = (r_a + R_{a\partial 3} + R_{a\partial 2} + R_{a\partial 1}) \cdot \frac{I_{a1}}{c_e \cdot \Phi_m} = \frac{R_{a1} \cdot I_{a1}}{c_e \cdot \Phi_m};$$

$$\overline{be} \cdot m_{\omega} = \Delta n_2 = (r_a + R_{a\partial 3} + R_{a\partial 2}) \cdot \frac{I_{a1}}{c_e \cdot \Phi_m} = \frac{R_{a2} \cdot I_{a1}}{c_e \cdot \Phi_m};$$

$$\overline{ce} \cdot m_{\omega} = \Delta n_3 = (r_a + R_{a\partial 3}) \cdot \frac{I_{a1}}{c_e \cdot \Phi_m} = \frac{R_{a3} \cdot I_{a1}}{c_e \cdot \Phi_m};$$

$$\overline{de} \cdot m_{\omega} = \Delta n_e = r_a \cdot \frac{I_{a1}}{c_e \cdot \Phi_m}.$$

Для определения долей пускового реостаты используют следующие соотношение:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\overline{ab}}{\overline{de}} &= \frac{\overline{ae} - \overline{bc}}{\overline{de}} = \frac{R_{a\partial 1}}{r_a}; & R_{a\partial 1} &= \frac{\overline{ab}}{\overline{de}} \cdot r_a; \\ \frac{\overline{bc}}{\overline{de}} &= \frac{\overline{be} - \overline{ce}}{\overline{de}} = \frac{R_{a\partial 2}}{r_a}; & R_{a\partial 2} &= \frac{\overline{bc}}{\overline{de}} \cdot r_a; \\ \frac{\overline{cd}}{\overline{de}} &= \frac{\overline{ce} - \overline{de}}{\overline{de}} = \frac{R_{a\partial 3}}{r_a}; & R_{a\partial 3} &= \frac{\overline{cd}}{\overline{de}} \cdot r_a. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

2.1.2. Аналитический метод

В соответствии с рис. 2.1 обозначены сопротивления цепи якоря для конкретных искусственных характеристик, полагая естественную характеристику $m+1$, для которого $R_{a\ m+1} = r_a$, а первая характеристика отвечает сопротивлению $R_{a1} = U_a / I_{a1}$.

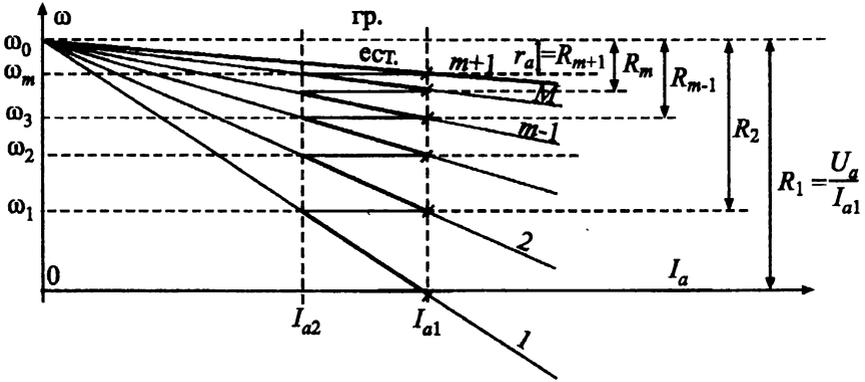


Рис. 2.1

Переключение резисторов производится при токе I_{a2} , что соответствует переходам на более жёсткие характеристики при соответствующих ω_i и одинаковых бросках тока, равных I_{a1} :

$$\text{при } \omega_1 \quad \frac{U_a - E_{a1}}{R_{a1}} = I_{a2}; \quad \frac{U_a - E_{a1}}{R_{a2}} = I_{a1};$$

$$\text{при } \omega_2 \quad \frac{U_a - E_{a2}}{R_{a2}} = I_{a2}; \quad \frac{U_a - E_{a2}}{R_{a3}} = I_{a1};$$

$$\text{при } \omega_m \quad \frac{U_a - E_{am}}{R_{am}} = I_{a2}; \quad \frac{U_a - E_{am}}{R_{a\ m+1}} = I_{a1},$$

откуда
$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{R_{am}}{R_{a\ m+1}} = \lambda,$$

что позволяет для соответствующих ступеней искусственных характеристик записать:

$$\begin{aligned}
 m \quad R_{a m} &= R_{a m+1} \cdot \lambda = r_a \cdot \lambda; \\
 m-1 \quad R_{a m-1} &= R_{a m} \cdot \lambda = r_a \cdot \lambda^2; \\
 m-2 \quad R_{a m-2} &= R_{a m-1} \cdot \lambda = r_a \cdot \lambda^3; \\
 &\dots \\
 1 \quad R_{a m-(m-1)} &= R_{a m-(m-2)} \cdot \lambda = r_a \cdot \lambda^m = R_{a 1}.
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Доли пускового резистора вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 R_{a \partial m} &= R_{a m} - r_a = r_a \cdot \lambda - r_a = r_a \cdot (\lambda - 1); \\
 R_{a \partial m-1} &= R_{a m-1} - R_{a m} = r_a \cdot \lambda^2 - r_a \cdot \lambda = r_a \cdot \lambda \cdot (\lambda - 1); \\
 R_{a \partial m-2} &= R_{a m-2} - R_{a m-1} = r_a \cdot \lambda^3 - r_a \cdot \lambda^2 = r_a \cdot \lambda^2 \cdot (\lambda - 1); \\
 &\dots
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Этот метод позволяет сразу убедиться в целостности числа пусковых ступеней при принятом λ :

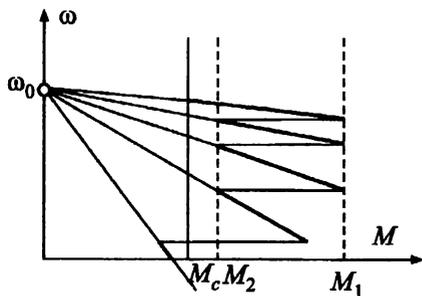


Рис. 2.2

$$R_{a1} = R_{a \text{ пуск.}} = \lambda^m \cdot r_a = \frac{U_a}{I_{a1}},$$

откуда $\lambda^m = \frac{R_{a \text{ пуск.}}}{r_a};$

$$m \cdot \lg \lambda = \lg \frac{R_{a \text{ пуск.}}}{r_a}$$

$$m = \frac{\lg R_{a \text{ пуск.}} / r_a}{\lg \lambda}. \tag{2.4}$$

Однако не всегда требуется m как целое число; с целью безударного выбора люфта в кинематике электрифицированного механизма допускают m дробным (см. рис. 2.2).

2.1.3. Определение ступеней пускового резистора в цепи ротора асинхронного двигателя

В соответствии с рис. 1.41, для естественной и любой искусственной характеристик для ординаты, например, $M_{эм} = M_c = const$ можно записать:

$$M_{эм} = \frac{2 \cdot M_{эмк}(1 + \epsilon)}{\frac{S_e}{S_{ке}} + \frac{S_{ке}}{S_e} + 2\epsilon} = \frac{2 \cdot M_{эмк}(1 + \epsilon)}{\frac{S_u}{S_{ку}} + \frac{S_{ку}}{S_u} + 2\epsilon},$$

где $\epsilon = \frac{R_s}{R_r} \cdot S_{\kappa} = \frac{R_s \cdot R_r}{R_r \cdot \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2}} = \frac{R_s}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2}}$ — от R_r не за-

висит, что позволяет записать:

$$\frac{S_e}{S_{ке}} + \frac{S_{ке}}{S_e} = \frac{S_u}{S_{ку}} + \frac{S_{ку}}{S_u}.$$

Для рабочего участка механической характеристики оказывается

$$\frac{S_u}{S_{ку}} = \frac{S_e}{S_{ке}} \quad \text{или} \quad \frac{S_u}{S_e} = \frac{S_{ку}}{S_{ке}} = \frac{R_r + R_r \text{ доб.}}{R_r},$$

откуда

$$S_u = S_e \frac{R_r + R_r \text{ доб.}}{R_r}, \quad (2.5)$$

что позволяет для заданной искусственной характеристики определить $R_r \text{ доб.}$.

Выражение (2.5) позволяет определить с достаточной для практики точностью сопротивление фазы роторной цепи. Исходят из записи условия ограничения пускового тока ротора до номинальной величины:

$$n = 0, \quad S_u = 1, \quad \text{следовательно,}$$

$$\frac{1}{S_{eN}} = \frac{(R_r + R_r \text{ доб.})_{(N)}}{R_r} \quad \text{или} \quad R_r = (R_r + R_r \text{ доб.})_{\text{пуск}} \cdot S_{eN}. \quad (2.6)$$

Из данных паспорта используют I_{rN} и $E_{rлo}$ для определения полного сопротивления фазы ротора, ограничивающего ток короткого замыкания до номинального

$$Z_r(N) = \frac{E_{rлo}}{\sqrt{3} \cdot I_{rN}} = \sqrt{(R_r + R_{r \text{ доб.}})_{(N)}^2 + X_r^2},$$

где $(R_r + R_{r \text{ доб.}})_{(N)}^2 \gg X_r^2$, которым пренебрегают и получают удобные расчётные выражения:

$$R_r(N) = (R_r + R_{r \text{ доб.}})_{(N)} \cong \frac{E_{rлo}}{\sqrt{3} \cdot I_{rN}}; \quad (2.7)$$

$$R_r = R_r(N) \cdot S_{eN} \cong \frac{E_{rлo}}{\sqrt{3} \cdot I_{rN}} \cdot S_{eN}; \quad (2.8)$$

$$R_{r \text{ доб.}}(N) = R_r(N) - r_2 \cong \frac{E_{2лo}}{\sqrt{3} \cdot I_{2N}} \cdot (1 - S_{eN}). \quad (2.9)$$

2.1.4. Определение параметров цепей электропривода в схеме шунтирования ДПТ НВ (схема I)

Наиболее трудоёмко отыскание параметров цепей по заданным координатам характеристики в искусственных схемах включения.

В схеме I по условиям технологического процесса заданы координаты характеристики:

$$M_c = I_c = 0; \quad n = n_{2p \text{ и } 0};$$

$$M_c = M_{c1}; \quad I_c = I_{c1}; \quad n = n_{u1}.$$

Необходимо найти удовлетворяющие этому условию параметры искусственной схемы I, то есть $R_{ш}$, R_n и R_a .

Полагая, что естественная характеристика построена, здесь же через заданные координаты проводится прямая в пределах I – II квадрантов, представляющая собой искусственную характеристику; а через начало координат в область IV квадранта проводится прямая параллельная естественной характеристике (см. рис. 2.3). Получают характерные точки «А» и «Б».

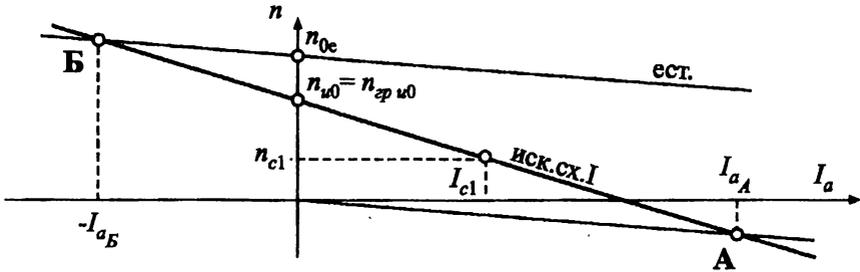


Рис. 2.3

Поскольку I_{aA} или $-I_{aB}$ определяются по масштабу, то используются любые два из трех уравнений:

$$n_{ou} = n_{oe} \cdot k = \frac{60 \cdot U_c \cdot R_{ш}}{2\pi \cdot c \Phi_m \cdot (R_{ш} + R_n)}, \quad (2.10)$$

$$I_{aA} = \frac{U_c}{R_n} \quad \text{или} \quad -I_{aB} = \frac{U_c}{R_{ш}}, \quad (2.11)$$

для определения искомым $R_{ш}$ и R_n .

По уравнению электромеханической характеристики

$$n_{c1} = n_{oe} \cdot k - \frac{n_{oe}}{U_c} \cdot I_{a1} \cdot (R_a + R_n \cdot k), \quad (2.12)$$

проверяется необходимость включения в цепь якоря добавочного сопротивления

$$R_{a \text{ доб.}} = R_a - r_a,$$

так как вполне может оказаться, что $r_a = R_a$ и $R_{a \text{ доб.}} = 0$.

2.1.5. Определение параметров цепей электропривода
в схеме шунтирования якоря ДПТ ПВ (схема III)

Условиями технологического процесса заданы координаты

$$M_c = I_c = 0; \quad n = n_{2p u 0};$$

$$M_c = M_{c1}; \quad I_c = I_{c1}; \quad n = n_{u1}.$$

Необходимо найти удовлетворяющие этому условию параметры искусственной схемы III, то есть $R_{ш}$, R_n и R_a .

Из соображений непревышения допустимого нагрева обмотки последовательного возбуждения при работе электродвигателя на заданном участке статической характеристики принимают ток возбуждения в схеме III при отсутствии нагрузки на валу ($I_a = 0$)

$$I_{n0} = (0,6 \div 1,2) \cdot I_{aN} = \frac{U_c}{R_{ш} + R_n}. \quad (2.13)$$

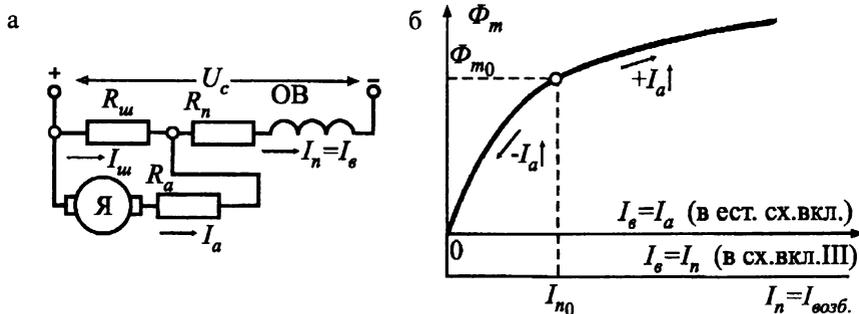


Рис. 2.4

Этим обеспечивается работа привода в заданной точке идеального

холостого хода

$$n_{2p u 0} = n_{2p e 0} \cdot \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_n},$$

с учётом (2.13)

$$n_{2p u 0} = n_{2p e 0} \cdot \frac{R_{ш} \cdot I_{n0}}{U_c},$$

откуда
$$R_{ш} = \frac{n_{зр.u0}}{n_{зр.e0}} \cdot \frac{U_c}{I_{n0}} \quad (2.14)$$

и
$$R_n = \frac{U_c}{I_{n0}} - R_{ш}, \quad (2.15)$$

что позволяет вычислить
$$k = \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_n}$$

Полученные значения $R_{ш}$ и R_n гарантируют прохождение заданной характеристики через точку на оси ординат. Для её прохождения через точку $(M_{c1}; n_{c1})$ определяют необходимое значение $R_a = r_a + R_{a\text{доб}}$. Поступают следующим образом:

$$I_{n1} = \frac{U_c - I_{a1} \cdot R_{ш}}{R_{ш} + R_n},$$

откуда
$$I_{a1} = \frac{I_{n1} \cdot (R_{ш} + R_n) - U_c}{R_{ш}} = \frac{I_{n1} \cdot (R_{ш} + R_n) - I_{n0} \cdot (R_{ш} + R_n)}{R_{ш}} =$$

$$= \frac{I_{n1} - I_{n0}}{\frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_n}} = \frac{I_{n1} - I_{n0}}{k},$$

то есть I_{n1} и I_{a1} обеспечивают

$$M_{эм1} = c\Phi_m \cdot (I_{n1}) \cdot I_{a1} = M_{c1},$$

где
$$c\Phi_m \cdot (I_{n1}) = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{U_c}{n_{зр.e1}},$$

следовательно,

$$M_{эм} = M_{c1} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{U_c}{n_{зр.e1}} \cdot \frac{I_{n1} - I_{n0}}{k},$$

откуда получаем
$$n_{зр.e1} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{U_c}{M_{c1} \cdot k} \cdot (I_{n1} - I_{n0}) \quad (2.16)$$

как уравнение с двумя неизвестными $n_{зр.е1}$ и I_{n1} .

Разрешение возникшей проблемы выполняется представлением уравнения (2.16), как уравнения вспомогательной прямой

$$n_{зр.е1} = Q \cdot (I_{n1} - I_{n0}), \quad (2.16-а)$$

которая якобы пересекает заданную характеристику $n_u = f(M_{эм})$ в точке с координатами M_{c1} ; n_{c1} и граничную характеристику в естественной схеме включения в точке с координатами $I_{возб.} = I_{n1}$; $n_{зр.е1}$ (см. рис. 2.5).

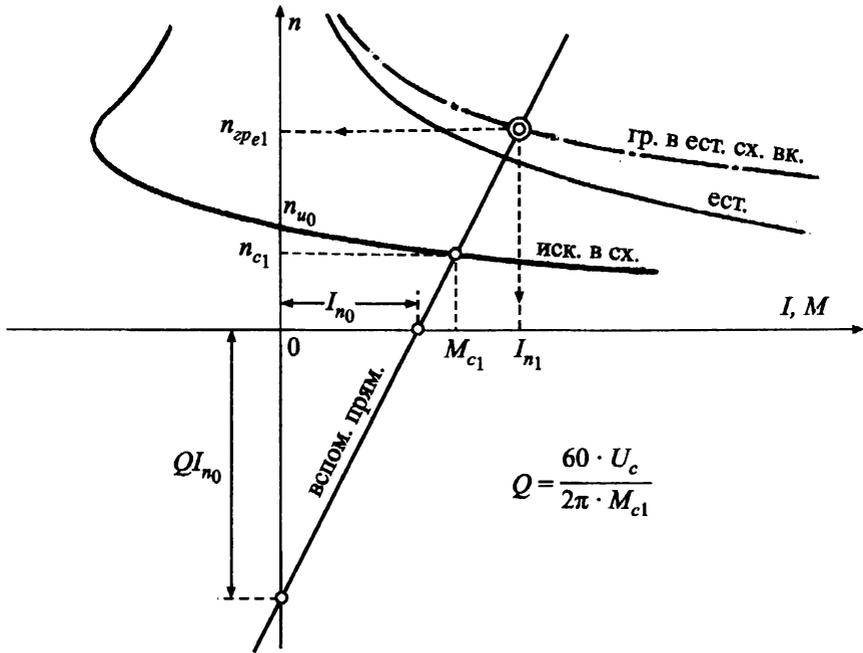


Рис. 2.5

При $I_{n1} = 0$ $n_{зр.е1} = -Q \cdot I_{n0}$, а при $I_{n1} = I_{n0}$ $n_{зр.е1} = 0$; через полученные координаты приводят вспомогательную прямую до пересечения

с $n_{zp.e} = f(I_a)$, координаты точки пересечения и есть искомые неизвестные $n_{zp.e1}$ и I_{n1} .

Далее вычисляют искомое $R_{a\text{доб.}} = R_a - r_a$, используя уравнения электромеханической характеристики, записанное для заданной точки

$$\begin{aligned} n_{u1} &= n_{zp.e1} \cdot k - \frac{n_{zp.e1}}{U_c} \cdot I_{a1} \cdot [(r_a + R_{a\text{доб.}}) + k \cdot R_n] = \\ &= n_{zp.e1} \cdot k - \frac{n_{zp.e1}}{U_c} \cdot \frac{I_{n1} - I_{n0}}{k} \cdot [(r_a + R_{a\text{доб.}}) + k \cdot R_n]. \end{aligned} \quad (2.17)$$

2.1.6. Определение параметров цепей электропривода в схеме шунтирования якоря с внесением обмотки последовательного возбуждения в шунтирующую цепь (схема IV)

Условиями технологического процесса заданы координаты:

$$M_c = I_c = 0; \quad n = n_{zp.u0};$$

$$M_c = M_{c1}; \quad I_{a1} = I_c; \quad n = n_{u1}.$$

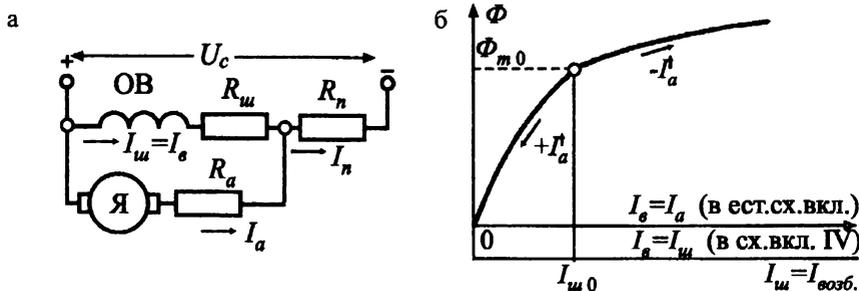


Рис. 2.6

Необходимо найти удовлетворяющее этому условию параметры искусственной схемы IV; то есть $R_{ш}$, R_n и R_a .

Из соображений непревышения допустимого нагрева обмотки возбуждения при работе электродвигателя на заданном участке статической характеристики принимают ток возбуждения в схеме IV при отсутствии нагрузки на валу ($I_a = 0$)

$$I_{ш0} = (0,8 \div 1,6) \cdot I_{aN} = \frac{U_c}{R_{ш} + R_n}. \quad (2.18)$$

Этим обеспечивается работа привода в заданной точке идеального холостого хода

$$n_{зр.u0} = n_{зр.e0} \cdot \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_n},$$

с учётом (2.18)

$$n_{зр.u0} = n_{зр.e0} \cdot \frac{R_{ш} \cdot I_{ш0}}{U_c},$$

откуда

$$R_{ш} = \frac{n_{зр.u0}}{n_{зр.e0}} \cdot \frac{U_c}{I_{ш0}}, \quad (2.19)$$

и

$$R_n = \frac{U_c}{I_{ш0}} - R_{ш}, \quad (2.20)$$

что позволяет вычислить

$$k = \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_n}.$$

Полученные значения $R_{ш}$ и R_n гарантируют прохождение заданной характеристики через точку на оси ординат. Для её прохождения через точку $(M_{c1}; n_{c1})$ определяют необходимое значение $R_a = r_a + R_{a\text{доб}}$.

Для этого записывают $I_{ш} = \frac{U_c - I_{a1} \cdot R_{ш}}{R_{ш} + R_n}$,

откуда
$$I_{a1} = \frac{U_c - I_{ш1} \cdot (R_{ш} + R_n)}{R_n} = \frac{I_{ш0} \cdot (R_{ш} + R_n) - I_{ш1} \cdot (R_{ш} + R_n)}{R_n} =$$

$$= \frac{I_{ш0} - I_{ш1}}{\frac{R_n}{R_{ш} + R_n} \cdot \frac{R_{ш}}{R_{ш}}} = \frac{I_{ш0} - I_{ш1}}{k \cdot \frac{R_n}{R_{ш}}},$$

то есть $I_{ш1}$ и $I_{а1}$ обеспечивают $M_{эм1} = c\Phi_m \cdot (I_{ш1}) \cdot I_{а1} = M_{с1}$,

где
$$c\Phi_m \cdot (I_{ш1}) = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{U_c}{n_{зр.е1}},$$

следовательно
$$M_{эм1} = M_{с1} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{U_c}{n_{зр.е1}} \cdot \frac{I_{ш0} - I_{ш1}}{k \cdot \frac{R_n}{R_{ш}}},$$

откуда получаем
$$n_{зр.е1} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{U_c}{M_{с1} \cdot k \cdot \frac{R_n}{R_{ш}}} \cdot (I_{ш0} - I_{ш1}), \quad (2.21)$$

как уравнение с двумя неизвестными $n_{зр.е1}$ и $I_{ш1}$.

Разрешение возникшей проблемы выполняется представлением уравнения (2.21) как уравнения вспомогательной прямой

$$n_{зр.е1} = G \cdot (I_{ш0} - I_{ш1}), \quad (2.21-a)$$

которая якобы пересекает заданную характеристику $n_u = f(M_{эм})$ в точке с координатами $M_{с1}$; n_1 и граничную характеристику в естественной схеме включения с координатами $I_{возб.} = I_{н1}$; $n_{зр.е1}$ (см. рис. 2.7).

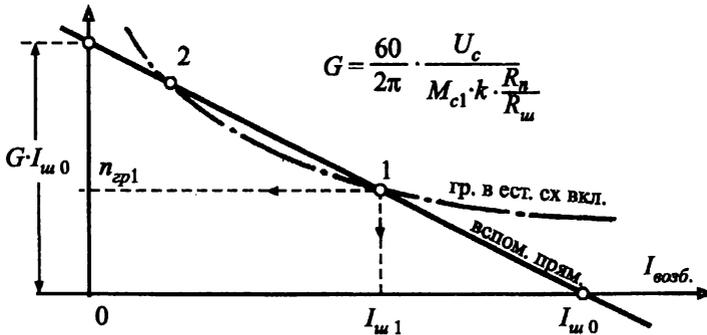


Рис. 2.7

При $I_{ш1} = 0$ $n_{zp.e1} = G \cdot I_{ш0}$; а при $I_{ш1} = I_{ш0}$ $n_{zp.e1} = 0$; через полученные координаты проводят прямую до пересечения $n_{zp.e} = f(I_g)$.
Здесь получаются две точки пересечения, какую из них взять?

Если выполнить проверку по обеим точкам, то окажется, что координаты точки «2» дадут отрицательное значение R_a , что не реально.

Координаты точки «1»: $n_{zp.e1}$ и $I_{ш1}$ используют для вычисления $R_{a\text{ доб.}} = R_a - r_a$ через уравнение электромеханической характеристики, записанное для заданной точки

$$\begin{aligned} n_{ш1} &= n_{zp.e1} \cdot k - \frac{n_{zp.e1}}{U_c} \cdot I_{a1} \left[(r_a + R_{a\text{ доб.}}) + k \cdot R_n \right] = \\ &= n_{zp.e1} \cdot k - \frac{n_{zp.e1}}{U_c} \cdot \frac{I_{ш0} - I_{ш1}}{k \cdot \frac{R_n}{R_{ш}}} \left[(r_a + R_{a\text{ доб.}}) + k \cdot R_n \right]. \end{aligned} \quad (2.22)$$

2.2. Определение параметров питающей сети

Заданная координата на оси ординат (точка идеального холостого хода) даёт определённую ориентацию на определение параметров питающей сети, см. гл. 1.3, § 1.6.1 – а, и § 1.6.5.

В двигателях с независимым (параллельным) и смешанным возбуждением

$$n_0 = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{U_a}{c\Phi_m} = \frac{U_a}{c_e\Phi_m},$$

откуда
$$U_a = c_e\Phi_m \cdot n_0 = c\Phi_m \frac{2\pi}{60} \cdot n_0$$

при соответствующем значении $\Phi_m = f(i_a, I_a)$ – в ДПТ СВ.

В асинхронных двигателях

$$n_o = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

указывает на частоту напряжения питающей сети f_1 и число пар полюсов машины p .

Точка, соответствующая заданной координате при нагрузке на валу соотносится с точкой идеального холостого хода, что даёт возможность определения необходимого сопротивления главной цепи. Это и обеспечит действительное прохождение характеристики (в данном случае искусственной) через заданные точки.

Глава третья

**Методика экспериментального определения координат
статических характеристик электроприводов**

3.1. Цель и задачи лабораторного практикума

Цель лабораторного практикума:

- закрепить теоретические знания по электромеханическим свойствам и энергетике различных двигателей электроприводов постоянного и переменного тока в условиях лаборатории на реальных физических установках;

- приобрести необходимые практические навыки выполнения экспериментальных исследований статических механических и электромеханических характеристик машин постоянного и переменного тока в двигательном и тормозных режимах работы.

К задачам лабораторного практикума относится следующее:

- освоить методику обеспечения установившегося режима движения различных испытуемых машин постоянного и переменного тока в двигательном и тормозных режимах работы;

- уяснить (через условия и результаты экспериментальных исследований) значимость и соответствие теоретических положений в области электромеханических свойств и энергетике электроприводов в различных установившихся режимах работы;

- приобрести навыки сопоставления и оценки результатов экспериментального и теоретического исследования статических характеристик;
- приобрести умение аргументированного объяснения возможных отклонений в результатах эксперимента от теоретических положений;
- приобрести практические навыки использования паспортных (каталожных) данных электрических машин, лабораторного оборудования и аппаратуры.

3.2. Условия обеспечения установившегося движения ($n = Const$) системы «ИМ-ВМ» при выполнении лабораторных работ

Свойства реактивных и активных моментов рабочих машин можно имитировать электрической машиной, используя ее в различных тормозных и двигательном режимах работы. Назовём её вспомогательной машиной (ВМ), а машины для экспериментального исследования будем называть испытуемыми (ИМ). В общем случае испытуемыми могут быть не только электрические, но и двигатели любого типа, например внутреннего сгорания и другие, что используется на испытательных стендах машиностроительных предприятий.

Вспомогательной (ВМ) должна быть электрическая машина, жёстко связанная с валом испытуемой (ИМ), позволяющая наиболее просто обеспечивать возможность определения механических нагрузок на едином валу через физические величины, характеризующие работу ВМ. Полагая, что реакция якоря ВМ в достаточной степени скомпенсирована и электромагнитное состояние среды энергопреобразования (Φ_m) можно считать независимым от тока в цепи якоря $I_{a,вм}$, отражающего нагрузку. Выполнение таких условий позволяет однозначно связывать механические, электромаг-

нитные и электрические переменные в соответствующих цепях ВМ с энергетическими и механическими физическими величинами, которые характеризуют установившийся процесс движения единого вала системы «ИМ – ВМ». Перечисленным требованиям отвечает машина постоянного тока независимого возбуждения (ВМ).

В соответствии с уравнением движения электропривода, установившийся режим движения системы «ИМ – ВМ» ($n = Const$) соответствует условию равновесия развиваемых моментов на объединённом валу со стороны ИМ и со стороны ВМ. Это возможно, если одна из машин работает в *двигательном режиме*, развивает активный (движущий) момент и берёт на себя покрытие всех моментов потерь холостого хода в системе «ИМ – ВМ», а другая, находясь в *одном из тормозных режимов*, развивает реактивный (противодействующий движению) момент. Рассмотрим это на примерах.

Допустим, *исследуется двигательный режим работы ИМ*, тогда ВМ должна быть включена в тормозной, например генератором на сеть, то есть в рекуперативное торможение. Установившееся движение системы «ИМ – ВМ» отражает рис. 3.1. Развиваемая ИМ механическая мощность передаётся на вал ВМ для электромагнитного преобразования в электрическую.

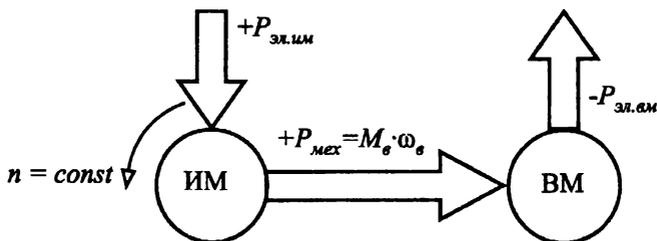


Рис. 3.1

Развиваемый ИМ момент на валу $M_{в.им}$ - движущий, а момент со стороны ВМ $M_{в.вм}$ - тормозной.

Используем удобство связи моментов на валу и выражения электромагнитных моментов ИМ и ВМ:

- для двигательного режима ИМ

$$M_{в.им} = M_{эм.им} - \Delta M_{хх.им}, \quad (3.1)$$

- для тормозного режима ВМ

$$M_{в.вм} = M_{эм.вм} + \Delta M_{хх.вм}. \quad (3.2)$$

Выражения (3.1) и (3.2) позволяют записать для двигательного режима ИМ:

$$M_{в.им} = M_{эм.вм} + \Delta M_{хх.вм}; \quad (3.3)$$

$$M_{эм.им} = M_{эм.вм} + \Delta M_{хх.вм} + \Delta M_{хх.им}. \quad (3.4)$$

Как видим, в двигательном режиме работы развиваемый на валу электромагнитный момент ИМ удобно определить через полезный электромагнитный момент ВМ, работающей в тормозном режиме, и моменты потерь холостого хода в машинах экспериментальной установки:

- при определении $M_{в.им}$ - необходимо суммировать с $M_{эм.вм}$ момент потерь холостого хода $\Delta M_{хх.вм}$;

- при определении $M_{эм.им}$ - требуется к $M_{эм.вм}$ прибавить суммарный момент потерь холостого хода $\Delta M_{хх.вм} + \Delta M_{хх.им} = \Delta M_{\Sigma хх}$ в системе «ИМ-ВМ».

В двигательном режиме работы ИМ обеспечивает установившееся движение ($n = Const$) системе «ИМ – ВМ», совершает полезную деятельность ($M_{эм.вм}$) и берёт на себя покрытие всех потерь в экспериментальной установке.

Рассмотрим другой случай, когда *ИМ находится в каком-либо тормозном режиме* и развивает на валу противодействующий движению момент. Значит, установившийся режим движения в экспериментальной установке должна обеспечивать *ВМ*, включённая в двигательный режим работы, потребляя из сети электрическую мощность, а развиваемая на её валу механическая мощность будет передаваться на вал *ИМ*. При этом по форме внешне похожая сбалансированность моментов на валах *ИМ* и *ВМ* окажется противоположной по энергетике, рис. 3.2.

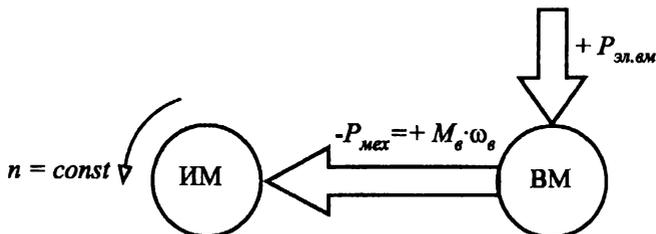


Рис. 3.2

Используем выражения моментов на валу через электромагнитные моменты *ИМ* и *ВМ*:

- для тормозного режима *ИМ*

$$M_{г.им.} = M_{эм.им.} + \Delta M_{хх.им.}, \quad (3.5)$$

- для двигательного режима *ВМ*

$$M_{г.вм.} = M_{эм.вм.} - \Delta M_{хх.вм.}. \quad (3.6)$$

Выражения (3.5) и (3.6) позволяют записать для тормозных режимов *ИМ*:

$$M_{г.им.} = M_{эм.вм.} - \Delta M_{хх.вм.}, \quad (3.7)$$

$$M_{эм.им.} = M_{эм.вм.} - \Delta M_{хх.вм.} - \Delta M_{хх.им.} = M_{эм.вм.} - (\Delta M_{хх.вм.} + \Delta M_{хх.им.}). \quad (3.8)$$

И здесь моменты *ИМ* удобно определяют через полезный электромагнитный момент *ВМ*:

- *при определении* $M_{в.им}$ - необходимо из $M_{эм.вм}$ вычесть момент потерь холостого хода $\Delta M_{хх.вм}$;

- *при определении* $M_{эм.им}$ - требуется из $M_{эм.вм}$ вычесть моменты потерь холостого хода $\Delta M_{хх.вм}$ и $\Delta M_{хх.им}$, то есть $(-\Delta M_{\Sigma хх.})$ «ИМ-ВМ», поскольку покрытие всех потерь взяла на себя ВМ.

Полученные уравнения (3.3) и (3.7), соответственно, (3.4) и (3.8) целесообразно объединить в общей записи:

$$M_{в.им \partial / m} = M_{эм.вм.} \pm \Delta M_{хх.вм.}, \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} M_{эм.им \partial / m} &= M_{эм.вм.} \pm \Delta M_{хх.вм.} \pm \Delta M_{хх.им} = \\ &= M_{эм.вм.} \pm \Delta M_{\Sigma хх.эксп.уст.}, \end{aligned} \quad (3.10)$$

где индексы ∂ / m указывают на двигательный/тормозные режимы работы

ИМ и соответствуют знакам (+)/(-);

$\Delta M_{\Sigma хх}$ - суммарный момент холостого хода машин экспериментальной установки; *в условиях выполнения лабораторного практикума валы ВМ и ИМ не рассоединяются*, поэтому в задачу экспериментов входит определение только $M_{эм.им}$.

Раскроем физическую сущность электромагнитного момента ВМ. Процесс электро–магнитно–механического энергопреобразования, протекающий внутри машины при том или ином направлении её вращения и режимах работы (двигательного или тормозного) характеризуется переменными в электрических и механических цепях и электромагнитным состоянием среды энергопреобразования, которое связывает эти переменные. Такая связь отчётливо видна из выражения электромагнитной мощности, которая может быть представлена и электрическими, и механическими переменными:

$$P_{эм,вм} = E_a \cdot I_a = \omega \cdot M_{эм,вм}, \quad \text{Вт} \quad (3.11)$$

где

$$E_a = c \cdot \Phi_m \cdot \omega \quad (3.12)$$

$$M_{эм} = c \cdot \Phi_m \cdot I_a = M_\theta \pm \Delta M_{хх}, \quad \text{Нм} \quad (3.13)$$

E_a – ЭДС вращения якоря, которая представляет собой внутренний физический регулятор тока нагрузки в цепи якоря; В;

$M_{эм}$ – электромагнитный (двигательный/тормозной) момент, развиваемый внутри машины, который обеспечивает электромагнитную связь между статором и якорем (ротором в АД), Нм

Полученное естественное представление $M_{эм}$ через электромагнитное состояние среды энергопреобразования ($c\Phi_m$) и ток якоря (I_a) позволяет преобразовать уравнение (3.10) к окончательной форме записи:

$$M_{эм,имд/т} = [c\Phi_m(I_a \pm I_{хх\Sigma})]_{вм}, \quad \text{Нм} \quad (3.14)$$

где $(c\Phi_m)_{вм}$ – показатель электромагнитного состояния ВМ, Вебер = В·с, (см. § 3.6.1);

$(I_a)_{вм}$ – ток цепи якоря ВМ; измеряется непосредственно в процессе эксперимента, А.

$(I_{хх\Sigma})_{вм}$ – ток холостого хода в цепи якоря ВМ, А, который отражает суммарные постоянные (холостого хода) потери в машинах экспериментальной установки (см. § 3.6.2).

3.3. Используемые режимы работы ВМ

для экспериментального определения координат статических характеристик ИМ

Исследование установившихся режимов движения различных типов ИМ требует универсального использования электромеханических свойств и энергетических возможностей ВМ.

Рассмотрим условия существования и энергетику этих режимов ВМ.

Рекуперативное торможение ВМ является классическим примером работы генератора на сеть постоянного тока или на преобразователь электроэнергии в инверторном режиме. Его электрическая схема и статические характеристики представлены на рис. 3.3 и 3.4. В этом режиме ток протекает под действием $E_a - U_a$, включенных встречно при $|E_a| > |U_a|$ и работа проходит в области скоростей $\omega > \omega_0$, превышающих точку идеального холостого хода.

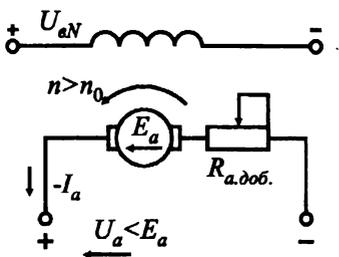


Рис. 3.3

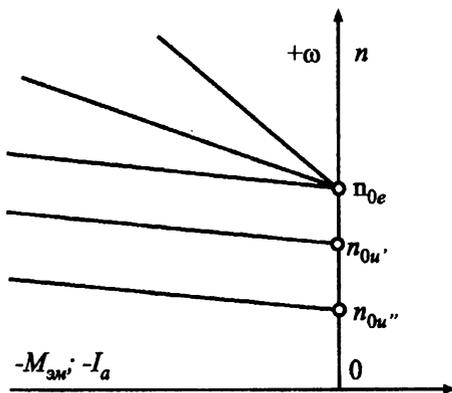


Рис. 3.4

Если скорость вращения якоря выражается через частоту вращения n в об/мин, то используется (1.2) для преобразования в рад/с.

Уравнения механической и электромеханической статических характеристик ВМ в режиме рекуперативного торможения записываются:

$$\omega = \frac{U_a}{c \cdot \Phi_m} + M_{эм} \frac{R_a}{c^2 \cdot \Phi_m^2} = \omega_0 + \Delta\omega_M; \quad \text{рад/с} \quad (3.15)$$

$$\omega = \frac{U_a}{c \cdot \Phi_m} + I_a \frac{R_a}{c \cdot \Phi_m} = \omega_0 + \Delta\omega_I; \quad \text{рад/с} \quad (3.16)$$

Баланс развиваемой внутри ВМ электромагнитной мощности записывается:

$$P_{эм.вм} = E_a \cdot (-I_a) = U_a(-I_a) + I_a^2 \cdot R_a; \text{ Вт} \quad (3.17)$$

где $U_a(-I_a)$ – отдаваемая с якоря электрическая мощность, Вт;

$I_a^2 \cdot R_a = \Delta P_{ав}$ – покрываемая в цепях якоря мощность переменных (тепловых) потерь, Вт;

$R_a = r_a + R_{a,доб.}$ – сопротивления цепи якоря, представляют рассеиватель тепловой энергии, Ом

Изменение координат установившегося движения системы «ИМ – ВМ» производится изменением управляющих воздействий через $R_{a,доб.}$ и U_a .

Динамическое торможение ВМ также представляет генераторный

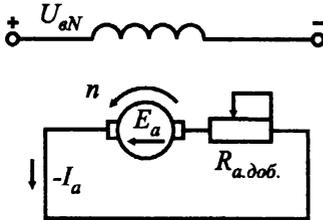


Рис. 3.5

режим, но при работе на индивидуальную электрическую нагрузку, которой является собственная якорная цепь ВМ. Электрическая схема и статические характеристики этого режима представлены на рис. 3.5 и 3.6. В этом режиме цепь якоря ВМ отключается от источника электроэнергии и через $R_{a,доб.}$ замыкается на себя: $U_a = 0$ и ток протекает под действием $|E_a|$.

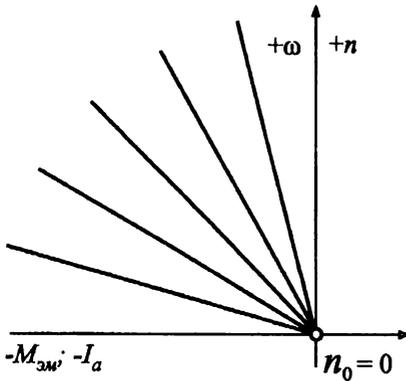


Рис. 3.6

Уравнения механической и электромеханической статических характеристик ВМ в режиме динамического торможения записываются:

$$\omega = \pm M_{эм} \cdot \frac{R_a}{c^2 \cdot \Phi_m^2} = \pm \Delta\omega_M, \quad (3.18)$$

$$\omega = \pm I_a \cdot \frac{R_a}{c \cdot \Phi_m} = \pm \Delta\omega_I, \quad (3.19)$$

где (\pm) указывают на II/IV квадранты системы координат, поскольку $\omega_0 = 0$.

Баланс развиваемой внутри ВМ электромагнитной мощности при динамическом торможении записывается:

$$P_{эм.вм} = E_a \cdot (-I_a) = I_a^2 \cdot R_a = \Delta P_{ав}; \quad \text{Вт} \quad (3.20)$$

то есть вся электромагнитная мощность ВМ полностью идёт на покрытие переменных потерь в сопротивлениях цепи якоря ВМ.

Изменение выходных координат испытуемого электропривода в двигательном режиме ИМ, производится воздействием на $R_{a.доб.}$ в цепи ВМ.

Торможение противовключением ВМ также является генератор-

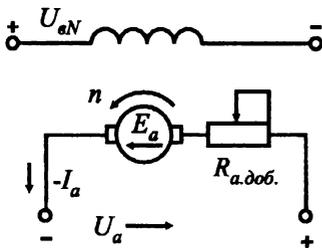


Рис. 3.7

ным режимом, но включённой последовательно с электрической сетью. Здесь необходимо обеспечить прохождение тока в цепи якоря ВМ под действием суммы $|E_a| + |U_a|$, для этого изменяют полярность подводимого к якорю ВМ напряжения и она включается на противоположное направление

движения (в III квадранте), но будучи жёстко связанной на валу с ИМ, последняя раскручивает её в свою сторону. Электрическая схема и статические характеристики этого режима представлены на рис. 3.7 и 3.8.

Уравнения механической и электромеханической статических характеристик ВМ в режиме противовключения записываются:

$$\omega = -\frac{U_a}{c \cdot \Phi_m} + M_{эм} \frac{R_a}{c^2 \cdot \Phi_m^2} = -\omega_0 + \Delta\omega_M; \text{ рад/с} \quad (3.21)$$

$$\omega = -\frac{U_a}{c \cdot \Phi_m} + I_a \frac{R_a}{c \cdot \Phi_m} = -\omega_0 + \Delta\omega_I; \text{ рад/с} \quad (3.22)$$

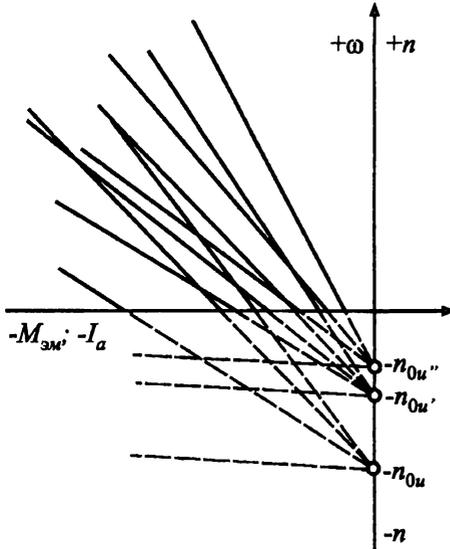


Рис. 3.8

Баланс развиваемой внутри ВМ электромагнитной мощности при противовключении записывается:

$$P_{эм.вм.} = -P_{эл.вм.} + I_a^2 \cdot R_a, \quad (3.23)$$

что рационально переписать как

$$P_{эм.вм.} + P_{эл.вм.} = I_a^2 \cdot R_a = \Delta P_{ав}, \quad (3.23-a)$$

откуда вытекает, что *развиваемая внутри ВМ электромагнитная мощность суммируется с потребляемой ей электрической мощностью из сети и*

полностью направляется на покрытие переменных (теловых) потерь в цепи якоря. В энергетическом отношении это самый не экономичный режим энергопотребления, но на короткое время является весьма удобным в практическом использовании.

Изменение выходных координат испытуемого электропривода в двигательном режиме ИМ, производится воздействием на величину $R_{a,доб.}$ и подбором значений U_a от разных источников напряжения.

Двигательный режим ВМ используется при исследовании тормозных режимов работы ИМ, для этого ВМ должна обеспечивать режим установившегося движения в экспериментальной установке, развивая актив-

ный движущий момент на валу и передавать его на вал ИМ. $U_a > E_a$ и ток в цепи якоря протекает под действием разности $|U_a| - |E_a|$. Электрическая схема и статические характеристики режима представлены на рис. 3.9 и 3.10.

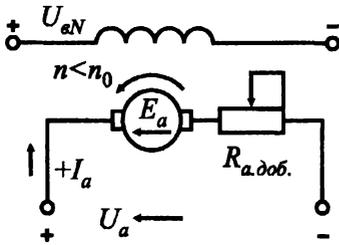


Рис. 3.9

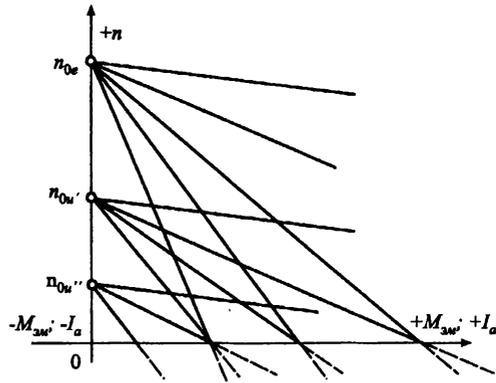


Рис. 3.10

Уравнения механической и электромеханической статических характеристик ВМ в двигательном режиме записываются:

$$\omega = \frac{U_a}{c \cdot \Phi_m} - M_{эм} \frac{R_a}{c^2 \cdot \Phi_m^2} = \omega_0 - \Delta\omega_m, \quad \text{рад/с} \quad (3.24)$$

$$\omega = \frac{U_a}{c \cdot \Phi_m} - I_a \frac{R_a}{c \cdot \Phi_m} = \omega_0 - \Delta\omega_l, \quad \text{рад/с} \quad (3.25)$$

Здесь целесообразно записать баланс электрической мощности, потребляемой ВМ от источника напряжения (сети)

$$P_{эл.вм} = U_a \cdot I_a = E_a \cdot I_a + I_a^2 \cdot R_a = P_{эм.вм} + \Delta P_{ав}, \quad (3.26)$$

где $P_{эм.вм}$ – электромагнитная мощность ВМ, полезно используется для проведения экспериментальных исследований ИМ в тормозных режимах;

$\Delta P_{ав}$ – переменные потери на нагревание сопротивлений в цепи

якоря ВМ, покрываются источником электроэнергии.

Изменение координат установившегося движения системы «ИМ – ВМ» осуществляется изменением управляющих воздействий через $R_{a,доб}$ и U_a ВМ.

Необходимо отметить, что во всех рассмотренных режимах работы ВМ (при $c\Phi_{mN}$) статические характеристики линейны, что позволяет достаточно легко обеспечивать устойчивость движения системы «ИМ – ВМ».

3.4. Лабораторные стенды экспериментальных установок

Для выполнения лабораторных работ по электрическому приводу имеется несколько разновидностей оборудования рабочих мест. Электрические машины расположены на двух параллельных линиях, находящихся за соответствующим лабораторным стендом. Валы машин механически соединены с помощью муфт. Каждая линия представляет собой единый трёхмашинный агрегат, в котором одна не используется.

Рабочие места оснащены металлическими и жидкостными реостатами для силовых цепей постоянного и переменного тока, движковыми реостатами и потенциометрами для цепей независимого возбуждения машин постоянного тока, импульсными измерителями скорости, коммутационной и электроизмерительной аппаратурой, а также проводами для сборки схем.

Система электроснабжения лабораторных стендов обеспечивает возможность работы со следующими напряжениями: ~ 380 В; ~ 220 В; $=220$ В; $=110$ В; $=48$ В. Выбор рода тока и величины питающего напряжения определяется студентами в соответствии с задачами проводимых экспериментов.

Комплектация машинных агрегатов на линиях каждого стенда представлена на рис. 3.11 – 3.15 и в таблице 3 с паспортными данными двигателей.

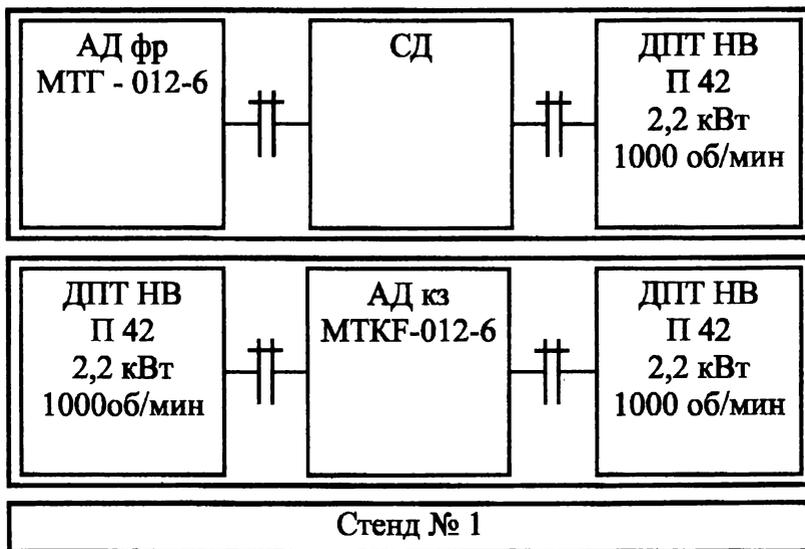


Рис. 3.11

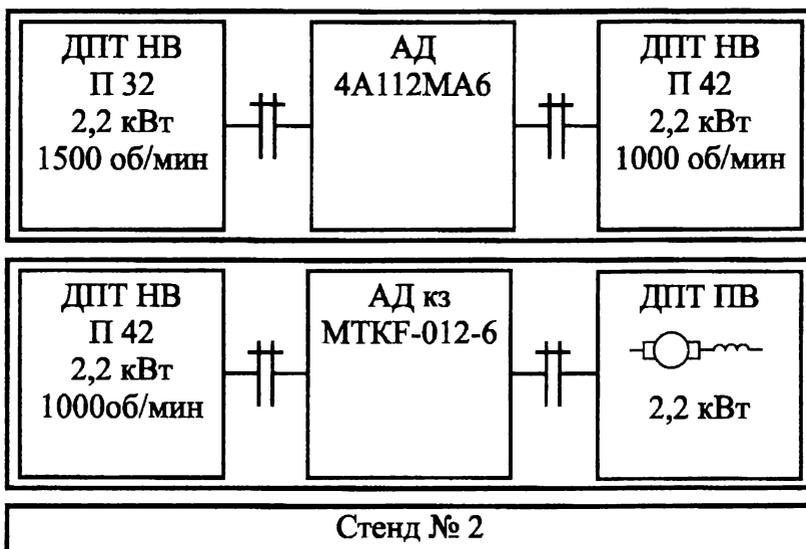


Рис. 3.12

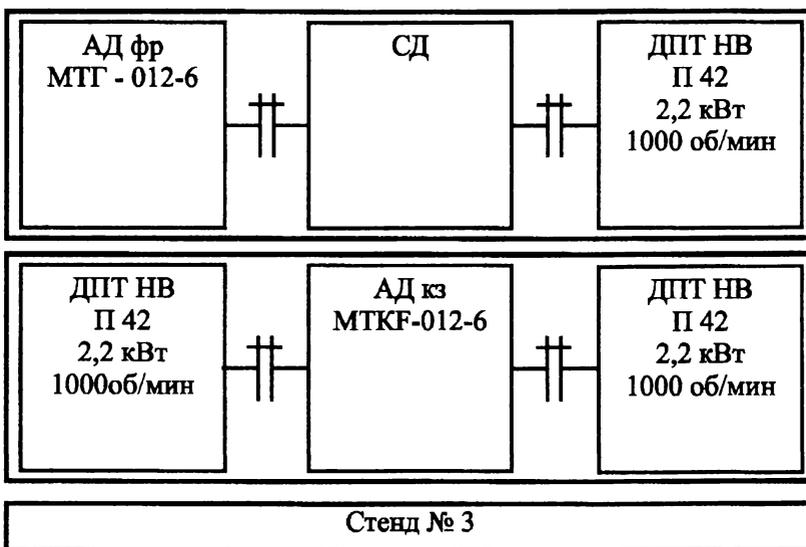


Рис. 3.13

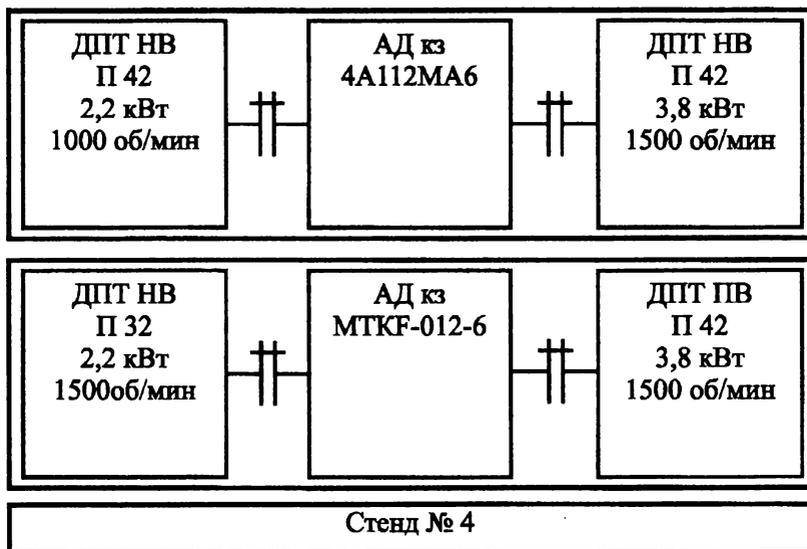


Рис. 3.14

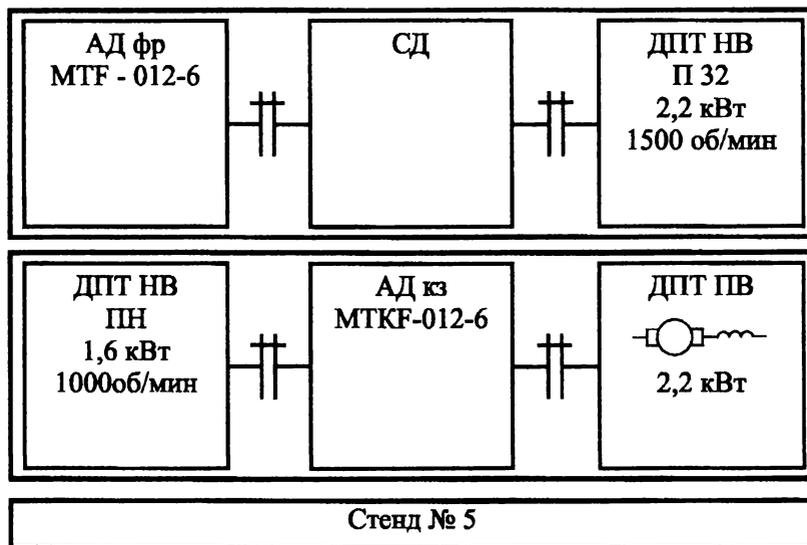


Рис. 3.15

Обозначения:

- ДПТ НВ – двигатель постоянного тока независимого возбуждения;
 ДПТ ПВ – двигатель постоянного тока последовательного возбуждения;
 АД КЗ – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
 АД ФР – асинхронный двигатель с фазным ротором;
 СД – синхронный двигатель.

Паспортные данные двигателей УЛС

Таблица 3

1. АД ФР МТГ – 012 – 6	2. АД КЗ МТКФ – 012 – 6	3. АД КЗ 4А112МА6
1	2	3
$P_{2N} = 2,2$ кВт $n_N = 895$ об/мин	$P_N = 2,2$ кВт 380/220 В (Y/Δ)	$P_N = 3$ кВт $U_1 = 380$ В

Разрыв табл. 3.

Продолжение табл. 3

1	2	3
$\frac{M_{\max}}{M_N} = 2,3$ $\cos \varphi_N = 0,67$ $\cos \varphi_0 = 0,13$ $I_{1N} = 7,5 \text{ A}$ $I_{10} = 7,5 \text{ A}$ $r_1 = 3,6 \text{ Ом}$ $x_1 = 2,58 \text{ Ом}$ $E_{2N} = 144 \text{ В}$ $I_{2N} = 11 \text{ A}$ $r_2 = 0,67 \text{ Ом}$ $x_2 = 0,585 \text{ Ом}$ $k_e = 2,5$	$6,5/11 \text{ A (Y/\Delta)}$ $n_N = 840 \text{ об/мин}$ $I_{1N} = 7,2 \text{ A}$ $\cos \varphi_N = 0,69$ $\eta_N = 0,67$ $I_0 = 5,3 \text{ A}$ $\cos \varphi_0 = 0,14$ $r_1 = 3,63 \text{ Ом}$ $x_1 = 2,51 \text{ Ом}$ $r'_2 = 5,38 \text{ Ом}$ $x'_2 = 2,32 \text{ Ом}$ $M_{\max} = 66 \text{ Н}\cdot\text{м}$ $I_0 = 5,3 \text{ A}$ $J = 0,028 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$I_1 = 7,4 \text{ A}$ $\cos \varphi_N = 0,76$ $\eta_N = 0,8$ $r_{1*} = 0,085$ $x_{1*} = 0,074$
<p style="text-align: center;">4. П 42</p> $n_N = 1000 \text{ об/мин}$ $P_N = 2,2 \text{ кВт}$ $U_N = 220 \text{ В}$ $I_N = 13,1 \text{ A}$ $\eta_N = 0,77$	<p style="text-align: center;">5. П 42</p> $n_N = 1500 \text{ об/мин}$ $P_N = 3,8 \text{ кВт}$ $U_N = 220 \text{ В}$ $I_N = 21,4 \text{ A}$ $\eta_N = 0,805$	<p style="text-align: center;">6. П 32</p> $n_N = 1500 \text{ об/мин}$ $P_N = 2,2 \text{ кВт}$ $U_N = 220 \text{ В}$ $I_N = 12,2 \text{ A}$ $\eta_N = 0,82$
<p style="text-align: center;">7. ПН</p> $n_N = 1000 \text{ об/мин}$ $P_N = 1,6 \text{ кВт}$ $U_N = 220 \text{ В}$ $I_N = 10 \text{ A}$ $\eta_N = 0,7$	<p style="text-align: center;">8. СД</p> $n_0 = 1000 \text{ об/мин}$ $P_N = 1,6 \text{ кВт}$ $U_{1N} = 220 \text{ В}$ $I_{1N} = 3,5 \text{ A}$ $I_{fN} = 4 \text{ A}$ $I_{f0} = 1,5$ $\eta_N = 0,78$ $\cos \varphi_0 = 0,8$	

3.5. Организация выполнения лабораторных работ студентами

1. Программа экспериментального исследования статических характеристик ИМ охватывает все типы двигателей промышленных электроприводов: постоянного тока с независимым (параллельным) и последовательным возбуждением; трёхфазных переменного тока (асинхронных с короткозамкнутым и с фазным ротором, синхронных).

Студенты группы предварительно распределяются по бригадам и одновременно получают от руководителя задание на выполнение конкретной предстоящей лабораторной работы (тип ИМ и № стенда)

2. Лабораторные работы по электрическому приводу носят экспериментально-исследовательский характер. Для этого студентам предоставляется методика, техническое оборудование и условия работы (см. гл. 3.2, 3.3, 3.4 и 3.6); рекомендуется учебно-методический материал по теоретической части дисциплины (раздел первый), и заблаговременно выдаётся конкретное задание (гл. 3.7). В задании перечислено: что требуется выполнить, но не говорится - как это сделать? Таким образом, при выполнении лабораторного практикума предстоит творческая деятельность и соответствующая подготовка.

3. Ещё до начала лабораторного практикума выясняется готовность студентов к его выполнению. Для этого каждая лабораторная бригада проходит коллоквиум – собеседование с преподавателем, на котором выясняется степень подготовленности студентов бригады к самостоятельной работе и рассматривается протокол к предстоящей работе. В протоколе указывается:

- название лабораторной работы;
- состав бригады;
- номинальные данные ИМ;

- заготовка под результаты калибровки ВМ (схемы включения машины, таблицы измерений, полученный или ожидаемый результат);
- заготовка под экспериментальные исследования по всем пунктам задания (электрические схемы включения ИМ и ВМ, таблицы с искомыми переменными для построения координат статических характеристик ИМ и координат расчётных характеристик ИМ для сопоставления с экспериментальными).

Протокол утверждается подписью преподавателя.

4. К выполнению лабораторных работ допускаются бригады, в которых все студенты прошли коллоквиум, прослушали инструктаж по технике безопасности и расписались в соответствующей ведомости о соблюдении правил работы с электроустановками.

5. В процессе выполнения лабораторных работ, протекающих в условиях опасных для здоровья напряжений и движущихся электрических машин, требуется внимание и трудовая дисциплина:

- запрещается общение между бригадами, все возникающие вопросы разрешаются с преподавателем;

- напряжения на стенды включаются преподавателем после оповещения голосом;

- собранные схемы не проверяются преподавателем; перед первым включением каждой схемы к стенду приглашается преподаватель, которому докладывается порядок выполнения подготовленного фрагмента работы:

- очерёдность включения электрических цепей ИМ и ВМ;
- начальные параметры и переменные электрических цепей;
- направление и пределы их измерения;

- порядок отключения;

- студент, подающий напряжение на собранную бригадой схему, должен визуально убедиться, что никто из его коллег не касается приводимых в движение машин и токоведущих элементов на установке, предупреждает бригаду голосом: «Включаю напряжение», после чего бригада начинает работу;

- при обнаружении неправильности сборки схемы или нарушении порядка работы бригада удаляется из лаборатории для подготовки к повторному коллоквиуму;

- при выяснении вины студентов, повлекшей выход из строя или порчи лабораторного оборудования, его восстановление осуществляется силами и средствами студентов.

6. По окончании работы бригада предъявляет единый протокол (не листочки черновиков) с полученными результатами, который утверждает преподавателем.

7. Каждый член бригады на основании протокольных результатов составляет индивидуальный отчёт, который защищается перед началом следующей лабораторной работы.

В отчёт входят все схемы включения машин, результаты экспериментов и расчётов по уравнениям статических характеристик соответствующие графические построения, заданные преподавателем. Результаты измерений и расчётов даются в виде таблиц, в отчёте приводятся и необходимые аналитические выражения.

Расчётные и экспериментально полученные статические характеристики ИМ во всех заданных режимах строятся на едином графике четырёх квадрантов в координатах системы $n = f(M, I)$; это лучше выполнить на

вкладке в отчёт из миллиметровой бумаги. Допускается выделение разных характеристик цветом, на графике выделяются точки эксперимента.

Отчёт завершается анализом полученных результатов эксперимента и расчёта; оцениваются электромеханические свойства и энергетика.

3.6. Калибровка вспомогательной машины

3.6.1. Определение $c\Phi_{т.ем}$

Обычно обеспечивается номинальный магнитный поток. Вспомогательная машина включается генератором с независимым возбуждением на холостом ходу, а испытуемая двигателем (рис. 3.16).

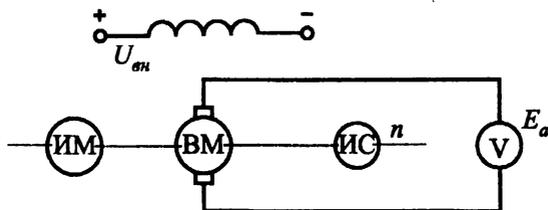


Рис. 3.16

Измерителем скорости ИС определяется n (об/мин), а вольтметром V – ЭДС якоря E_a (Вольт), полагая сопротивление вольтметра бесконечно большим.

Приведение в движение ВМ осуществляется при помощи ИМ с обеспечением необходимых условий пуска, соответствующих типу ИМ. Например, если испытуемой является двигатель постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТ ПВ), то его нельзя использовать для вращения генератора (ВМ) на холостом ходу! В таком случае следует включить ИМ по схеме с независимым возбуждением, обеспечив ток возбуждения равным номинальному току якоря. Для этого в цепи независимого возбуждения должно быть предусмотрено ограничивающее сопротивление

(жидкостный реостат), возможно потребуется пониженное напряжение, подводимое к этой цепи, а также амперметр для контроля $I_g = I_{aN}$. В цепи якоря также должно быть предусмотрено пусковое сопротивление, либо к якорю ИМ подводится напряжение от управляемого преобразователя.

Желательно измерения E_a сделать при разных скоростях и направлениях вращения, а затем определить среднее значение искомой величины

$$c\Phi_m = \frac{60 \cdot E_a}{2\pi \cdot n} = k, \quad \text{Вебер} = \text{В} \cdot \text{с}.$$

3.6.2. Определение $(I_{xx})_{\text{вм}} = f(n)$

Для получения названной зависимости ВМ должна быть включена в двигательном режиме без полезной нагрузки на её валу. **В условиях лаборатории отсоединение ВМ от вала ИМ не будет производиться.**

Если ИМ является АД, то его обмотка статора в условиях определения искомой зависимости не может быть включённой в сеть переменного тока, а ротор – просто представляет собой инерционную массу на валу ВМ. Поэтому ток в цепи якоря ВМ I_a будет отражать потери мощности $(\Delta P_{Fe} + \Delta P_{\text{мех}})_{\text{вм}} + (P_{\text{мех}})_{\text{им}}$, а учёта $(\Delta P_{Fe})_{\text{им}}$ не будет; не будут учтены и переменные потери в роторе (ΔP_v) , которые имеют место в двигательном режиме АД (см. рис. 3.21). Отмеченное отразится на точности определения $(M_{\text{эм}})_{\text{им}}$.

Другое дело, если ИМ является машиной постоянного тока, у которой без подачи напряжения на цепь якоря, имеется возможность обеспечить независимое возбуждение и тем самым обеспечить в токе I_a ВМ отражение потери мощности

$$(\Delta P_{Fe} + \Delta P_{\text{мех}})_{\text{вм}} + (\Delta P_{Fe} + \Delta P_{\text{мех}})_{\text{им}} = \Delta P_{\Sigma c} = \Delta P_{\Sigma xx}$$

Результаты записываются в таблицу 4, по которым строится вспомогательная характеристика $I_{xx}(n)$ или $n(I_{xx})$.

Таблица 2.

$I_{xx.ам}, А$						
$n, об/мин$						

3.7. Типовые задания к лабораторным работам

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Исследование статических характеристик электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения

1. Снять естественные механическую и электромеханическую характеристики в области допустимого тока якоря.

2. Собрать схему шунтирования якоря двигателя независимого возбуждения с заданными величинами $R_{ш}$ и R_n ; снять искусственные характеристики, см. [§ 1.6.6]:

$$n = f(M_{эм}); \quad n = f(I_a); \quad n = f(I_{ш}); \quad n = f(I_n),$$

в пределах второго - первого - четвертого квадрантов; исследовать влияние $R_{ш}$ и R_n на вид характеристик, построить $M_{эм} = f(I_a)$.

3. Включить испытуемый двигатель в обычную схему с заданным добавочным сопротивлением в цепи якоря и снять искусственные характеристики в пределах первого - четвертого квадрантов. Для точки пересечения характеристик пунктов 2 и 3 провести расчёт потерь мощности во всех сопротивлениях, рассчитать потребляемую из сети и развиваемую электромагнитную мощности; результаты выразить через номинальную мощность и оценить экономичность схем пунктов 2 и 3.

4. Снять механическую и электромеханическую характеристики в

режиме динамического торможения, эксперимент провести при заданных значениях тормозных сопротивлений $R_{a,доб}$.

5. Снять основную и искусственные характеристики в системе «генератор – двигатель». Для одной из характеристик сопоставить энергетiku в точке пересечения с характеристикой пункта 3.

6. Снять основную и искусственную характеристики в системе «тиристорный преобразователь – двигатель». Для одной из характеристик сопоставить энергетiku в точке пересечения с характеристикой пункта 3.

7. Для параметров всех экспериментально полученных характеристик рассчитать и построить теоретические.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Исследование статических характеристик электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения

1. Снять естественные механическую и электромеханическую характеристики в области допустимых скорости и нагрузки на валу.

2. Собрать схему шунтирования якоря, см. [§ 1.6.6]:

а) с вынесением ОПВ в последовательную цепь

б) с вынесением ОПВ в шунтирующую цепь

при заданных величинах $R_{ш}$ и R_n ; снять искусственные характеристики

$$n = f(M_{эм}); \quad n = f(I_a); \quad n = f(I_{ш}); \quad n = f(I_n),$$

в пределах второго - первого - четвертого квадрантов; исследовать влияние $R_{ш}$ и R_n на вид характеристик, построить $M_{эм} = f(I_a)$.

3. Включить испытуемый двигатель в обычную схему с заданной величиной добавочного сопротивления в цепи якоря и снять искусственные характеристики в пределах первого - четвертого квадрантов. Для точки пересечения характеристик пунктов 2 и 3 провести расчёт потерь мощности

во всех сопротивлениях, рассчитать потребляемую из сети и развиваемую электромагнитную мощности; результаты выразить через номинальную мощность и оценить экономичность схем пунктов 2 и 3.

4. Исследовать режим динамического торможения при заданных значениях тормозных сопротивлений $R_{m\partial}$.

5. Снять механическую и электромеханическую характеристики при динамическом торможении:

а) с независимым возбуждением, при заданных $R_{m\partial}$ и I_e ;

б) с самовозбуждением при заданных $R_{m\partial}$ и $I_{e\text{доб}}$.

6. Снять переходную характеристику испытуемой машины $c\Phi_m = f(I_e)$, необходимую для расчёта теоретических, см. [§ 1.6.6].

7. Для параметров всех экспериментально полученных характеристик рассчитать и построить теоретические.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. Исследование статических характеристик электропривода переменного тока с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором

1. При пониженном в $\sqrt{3}$ раз напряжении на статоре снять искусственные механическую и электромеханическую характеристики в области допустимых токов в цепи статора.

2. Используя схему предыдущего опыта снять искусственную характеристику при заданном значении добавочного сопротивления в фазах статора. Эксперимент провести в пределах первого - четвертого квадрантов при допустимых токах в цепи статора.

3. Исследовать режим динамического торможения с независимым возбуждением при заданных схеме включения обмотки статора и токе воз-

буждения, см. [гл. 1.8]:

- а) провести несколько включений машины в режим ДТ при заданном токе в цепи статора, построить зависимость $t_{\text{торм}} = f(R_{\text{тд}})$. Сравнить $t_{\text{торм}}$ с длительностью остановки на выбеге при отключении двигателя и отсутствии нагрузки на валу;
- б) снять механические характеристики в режиме ДТ при заданных токах в цепи статора. Оценить энергетику в заданной точке установившегося режима работы.

4. Исследовать режим динамического торможения с самовозбуждением при заданных схеме и ёмкости конденсаторов, снять механическую характеристику, обратиться к руководителю.

5. Исследовать двигательный режим при включении трехфазной машины в однофазную сеть. Определить оптимальное значение ёмкости конденсаторов, снять статические характеристики, обратиться к руководителю.

6. Исследовать электропривод при пониженном напряжении в схеме несимметричного включения статора, снять статические характеристики, обратиться к руководителю.

7. Исследовать и снять статические характеристики в системе «управляемый преобразователь - асинхронный двигатель»:

- а) при $U_{sm} - Const$, $f_1 - Var$;
- б) при $U_{sm} - Var$, $f_1 - Const$;
- в) при других заданных законах при $U_{sm} = f(f_1)$.

8. Рассчитать и построить теоретические характеристики: естественные, искусственные для пунктов 1 и 3, б.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Исследование статических характеристик электропривода переменного тока с асинхронным двигателем с фазным ротором

1. При пониженном в $\sqrt{3}$ раз напряжении на статоре снять искусственные механическую и электромеханическую характеристики в области допустимых токов в цепи статора; добавочное сопротивление в цепи ротора отсутствует.

2. Используя схему предыдущего опыта, снять искусственную характеристику при заданном значении добавочного сопротивления в фазах ротора. Эксперимент провести в пределах первого - четвертого квадрантов при допустимых токах в цепи статора.

3. Исследовать электропривод в схеме несимметричного включения заданных активных сопротивлений в цепи ротора, снять механическую и электромеханическую характеристики.

4. Исследовать режим динамического торможения с независимым возбуждением при заданных схеме включения обмотки фаз статора, токе возбуждения и величинах добавочных сопротивлений в цепи ротора:

а) провести несколько включений машины в режим ДТ при заданном токе в цепи статора и заданных значениях сопротивлений в цепи ротора, построить зависимость $t_{\text{торм}} = f(R_{\text{доб}})$.

Сравнить $t_{\text{торм}}$ с длительностью останова на выбеге при отключении двигателя и отсутствии нагрузки на валу;

б) снять механические характеристики в режиме ДТ при заданных сопротивлениях в цепи ротора и токах в цепи статора. Оценить энергетику при заданной скорости установившегося движения.

5. Рассчитать и построить теоретические характеристики: естественные, искусственные для пунктов 1,2 и 4,б.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. Исследование статических характеристик электропривода переменного тока с синхронным двигателем

1. Снять естественную механическую характеристику в пределах первого-второго квадрантов в области допустимых нагрузок.

2. Снять пусковую характеристику при пониженном напряжении на статоре и обмотке возбуждения, замкнутой на разрядное сопротивление. Экспериментально полученную характеристику пересчитать на номинальное напряжение статора и построить.

3. Исследовать энергетику в режимах двигательном и рекуперативного торможения в функции тока возбуждения.

4. Исследовать режим динамического торможения при заданных величинах тока возбуждения и сопротивлений в цепи статора, снять механические характеристики.

5. Исследовать влияние частоты напряжения, подводимого к статору; снять механические характеристики.

6. Построить векторные диаграммы для всех исследованных режимов работы.

3.8. Учебно-методические пояснения существа отдельных понятийно-смысловых фрагментов

При подготовке к коллоквиуму и оформлении результатов лабораторных работ у студентов возникают определённые затруднения. *Особенно это связано с наглядным представлением технологии построения $n = f(M_{эм.им})$* , когда $M_{эм.им}$ определяется по уравнению (3.14) в двигательном и тормозных режимах работы.

Здесь необходимо не забывать, что каждая (i – тая) точка искомой характеристики в условиях эксперимента определяется при установившемся режиме движения ($n_i = Const$). Информация о координатах искомой механической характеристики ИМ поступает от ВМ в процессе эксперимента, это (n_i) и ($I_{a\text{ вМ}i}$), а также из результатов её калибровки: $c\Phi_{т\text{ вМ}}$ и $I_{xx\Sigma} = f(n_i)_{\text{вМ}}$. Вычисление искомого электромагнитного момента производится по уравнению (3.14):

$$(M_{эм\partial/m})_{\text{им}} = (M_{эм})_{\text{вМ}} \pm (\Delta M_{\Sigma xx})_{\text{вМ}} = c\Phi_{т\text{ вМ}} \cdot (I_{a\text{ вМ}} \pm I_{xx\Sigma})_{\text{вМ}}.$$

Каким образом можно наглядно предоставить факт равновесия моментов в системе «ИМ – ВМ», обеспечивающий системе установившийся режим движения в точках $n_i = Const$?

Для ответа на поставленный вопрос целесообразно перейти к рассмотрению конкретных примеров.

Пример 1. ИМ – ДПТ НВ находится в двигательном режиме работы; необходимо экспериментально получить его естественную механическую характеристику $n = f(M_{эм})$. В таком случае ВМ включается в тормозной режим, допустим в режим динамического торможения с независимым возбуждением.

ИМ_д, потребляя из сети электрическую мощность $P_{1\text{ эл.}\partial}$, электромагнитно-механическим путём преобразует её, а в процессе преобразования неизбежны её переменные $\Delta P_{v\partial}$ и постоянные $\Delta P_{c\partial} = (\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mex})_{\partial}$ потери внутри ИМ_д, которые покрываются, а на валу развивается механическая мощность $P'_{2\text{ мех.}\partial}$. Но ИМ_д, имея на своём валу ВМ, для обеспечения движения системе «ИМ – ВМ» с единой скоростью (n_i) вынуждена покрывать постоянные потери

$\Delta P_{с\text{ в м}} = (\Delta P_{F_e} + \Delta P_{mex})_{в м}$. В итоге на валу ИМ развивается механическая мощность $P_{2\text{ мех. } \partial} = M_{в\partial} \cdot \omega_{в}$ и вращающий механический момент $M_{в\partial}$, который передаётся ВМ и уравнивает её полезный электромагнитный момент $M_{э м. в м}$. Таким образом, $M_{в\partial. и м} = M_{э м. т. в м}$.

Проиллюстрируем рассмотренное в графическом изображении на механических характеристиках, рис. 3.19.

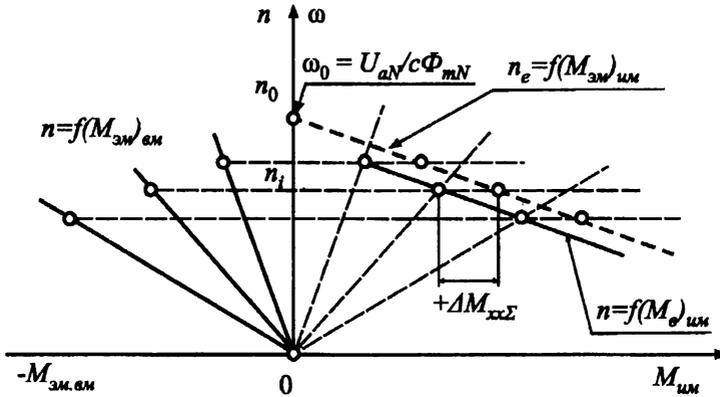


Рис. 3.19

В I квадранте располагаются механические характеристики ИМ в двигательном режиме работы, а во II квадранте механические характеристики $n = f(M_{э м})_{в м}$ при различных $R_{a. до б.}$ в режиме динамического торможения. Установившаяся скорость n_i легко определяются через точку пересечения зеркального отображения $n = f(M_{э м})_{в м}$ с $n = f(M_{э м})_{и м}$. Для построения искомой $n = f(M_{э м})_{и м}$ необходимо, в соответствии с (3.14), по каждой абсциссе n_i прибавить $\Delta M_{\Sigma xx} = [c \cdot \Phi_m \cdot I_{xx \Sigma}(n_i)]_{в м}$. Объединив полученное геометрическое точек прямой получим искомую естественную характеристику ИМ.

Пример 2. ИМ – АД КЗР. Требуется экспериментально получить рабочую часть его механической характеристики в пределах I и II квадрантов. В I квадранте он будет работать в двигательном режиме, а во II квадранте в режиме рекуперативного торможения. Работу ВМ целесообразно использовать в динамическом торможении при исследовании АД в двигательном режиме, а для его перевода в рекуперативное торможение ВМ следует включить в двигательный режим, рис. 3.20.

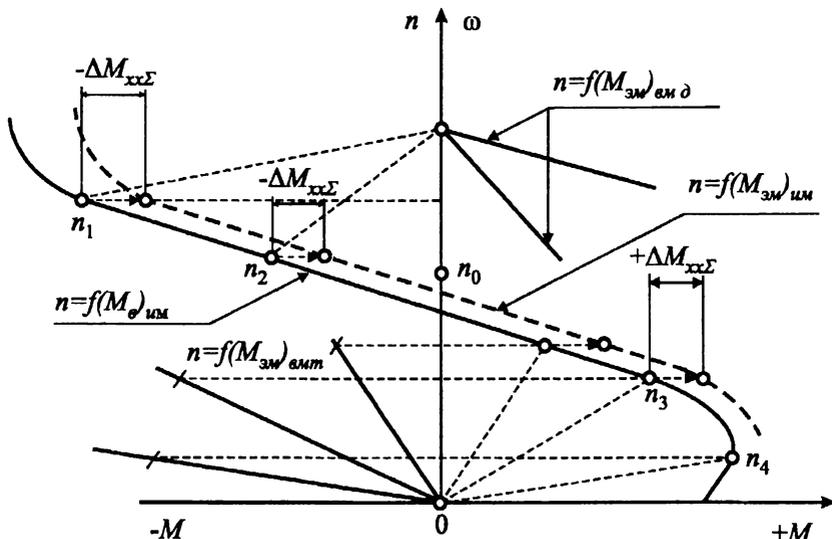


Рис. 3.20

Всё сделано как и в предыдущем примере: зеркальные отображения $n = f(M_{эМ})_{вм}$ наложены на пересечения с $n = f(M_{э})_{ИМ}$, далее, в соответствии с (3.14), в двигательном режиме ИМ прибавлялся, а в тормозном вычитался $\Delta M_{хх\Sigma}$, взятые из калибровки ВМ. Полученное геометрическое место точек объединено в характеристику. Но можно ли её назвать

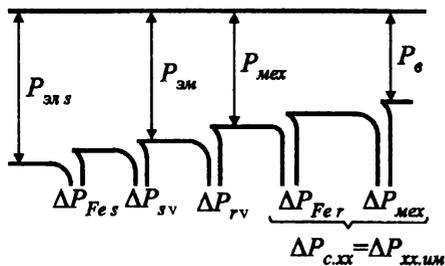


Рис. 3.21

$n = f(M_{эм})_{шм}$? Ответ следует найти из мнемонической структуры баланса электрической мощности АД, показанной на рис. 3.21 и условий проведения калибровки ВМ с АД (гл. 3.6).

При работе АД КЗР в двигательном режиме $(P_{эм} - P_е)_{шм} = (\Delta P_{рв} + \Delta P_{Фер} + \Delta P_{мех})_{вм}$, а при калибровке $(\Delta P_{рв} + \Delta P_{Фер})_{шм}$ не оказались учтёнными, хотя они и небольшие.

Поэтому для контроля необходимо на оси ординат показать

$$n_{0шм} = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \text{ где } f_1 = 50 \text{ Гц, а } p - \text{ взять из маркировки АД, например,}$$

4А112МА – 6, где 6 – число полюсов $2p = 6$, то есть $n_0 = 1000$ об/мин. Если n_0 выше полученной характеристики, то эту характеристику следует

переместить вверх по оси ординат до $n_{0шм}$ и получить искомую

$$n = f(M_{эм})_{шм}.$$

Ещё один вопрос: точки на рис. 3.20 n_1, n_2, n_3 относятся к установившемуся режиму, а n_4 не является таковой, её координаты именуют не установившемся равновесием. Почему?

Пример 3. ИМ – ДПТ ПВ. Требуется получить с помощью (3.14) экспериментальную искусственную механическую характеристику с заданной величиной $R_a \text{ доб.}$, которая проходит в пределах I и IV квадрантов.

Схема включения (рис. 3.22), должна иметь заданное неизменяемое добавочное сопротивление, которое и выполняет функцию пускового; амперметр A_1 , по данным которого будет строиться характеристика

$$n = f(I_a)_{\text{ИМ}}$$

Для проведения эксперимента в пределах первого квадранта ВМ целесообразно включить в режим ДТ, на схеме рис. 3.22 не показано, а для перевода ИМ из первого в четвёртый квадрант ВМ включается на реверс.

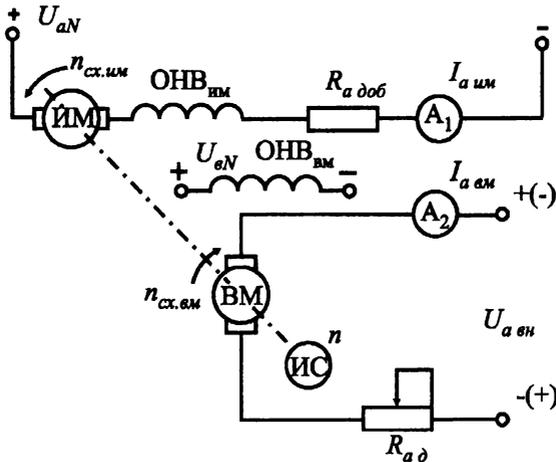


Рис. 3.22

Поэтому перед началом эксперимента необходимо проверить обеспечение схемами включения ИМ и ВМ встречного направления вращения каждого в отдельности, не забывая о том, что машины последовательного возбуждения не должна работать без нагрузки. Поэтому используется для неё толчковое включение в сеть.

Возможно якорную цепь ВМ рационально включить на пониженное напряжение (110 или 48 В), оставив возбуждение номинальным!

При переходе (n) через ноль происходит излом характеристики $n = f(M_{\text{в}})_{\text{ИМ}}$ на величину $2 \cdot M_{\text{хх}\Sigma}$, вызванной переменной ИМ и ВМ ролями в обеспечении движения агрегата. В первом квадранте ИМ работает в двигательном режиме и покрывает реактивное сопротивление движению агрегата, а её работа в четвёртом квадранте – тормозной режим. Поэтому

движение ИМ в четвёртом квадранте обеспечивает ВМ, работающая в двигательном режиме третьего квадранта. Названный излом характеристики $M_{\theta \text{ ИМ}}$ следует уловить в процессе эксперимента, так как его величина $2 \cdot \Delta M_{\text{xx}\Sigma} = 2 \cdot c \cdot \Phi_m \cdot I_{a \text{ xx}}$ позволяет определить $I_{\text{xx}\Sigma}$ при $n = 0$, который вносится в калибровочную характеристику $n = f(I_{\text{xx}\Sigma})$ рис. 3.17.

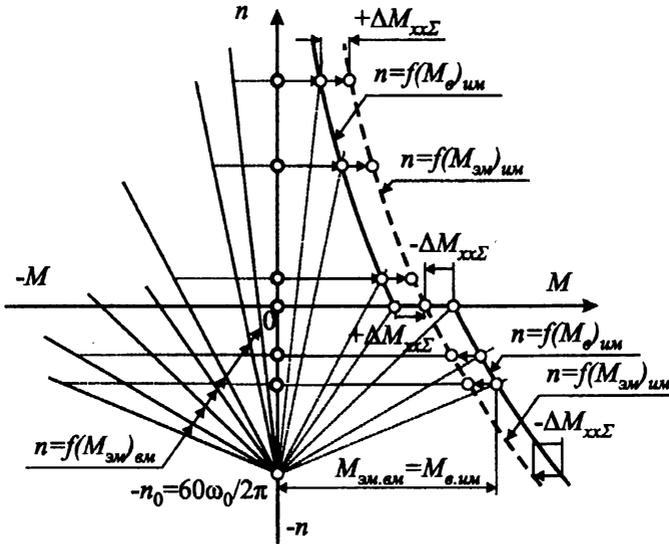


Рис. 3.23

Результаты экспериментов заносятся в таблицу 6 протокола, где указывается направление вращения агрегата и знаки переменных.

Таблица 6

n , об/мин						
$(I)_{\text{ИМ}}$, А						
$(I_a)_{\text{эм}}$, А						
$(I_{\text{xx}\Sigma})_{\text{эм}}$, А						
$(c \cdot \Phi_m)_{\text{эм}}$, В·с						
$(M_{\text{эм}})_{\text{ИМ}}$, Н·м						

Электромеханические и механические характеристики всех пунктов задания строятся по данным протокола в единых системах координат с расчётными. Приводить характеристики ВМ, как это показано на примерах настоящего параграфа, совершенно не требуется. Просто это надо знать, представлять и при необходимости уметь объяснить.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная:

1. Ильинский Н.Ф. - Основы электропривода: Изд. МЭИ, 2003. – 224с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов.- М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
3. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. – Общий курс электропривода: Учебник для вузов.- М: Энергоатомиздат, 1992. - 544с.
4. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода: Учебн. для вузов. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994.
5. Москаленко В.В.- Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат; 1986. - 416с.: ил.

Дополнительная:

6. Чилкин М.Г., Соколов М.М., Терехов В.М., Шинянский А.В. Основы автоматизированного электропривода: Учебн. пособие для вузов. – М., Энергия, 1974. – 568 с.
7. Справочник по электрическим машинам: в 2-х т. / Под ред. Копылова И.П. и Клокова Б.К. – Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988.-455 с.
8. Справочник по электрическим машинам: в 2-х т. / Под ред. Копылова И.П. и Клокова Б.К. – Т.2. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.
9. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / Кравчик А.Э. и др. – М.: Энергоиздат, 1982.- 504с.
10. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. Изд. 6-е, М.: Энергия, 1977. – 432 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ. Экспериментальное определение активных и индуктивных сопротивлений

1. При возможности отделения каждой фазы обмотки статора АД КЗР и АД ФР измерения их активных сопротивлений производится на постоянном токе методом вольтметра – амперметра или с помощью моста.

2. Если обмотка соединена по схеме Y без вывода нейтрали (статорная АД или роторная АД ФР), то производят измерения последовательно соединённых каждых двух фаз (рис. П.1), получают три уравнения:

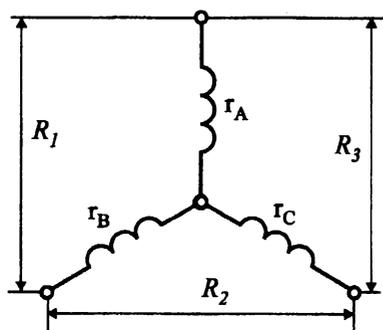


Рис. П.1

$$R_1 = r_a + r_b;$$

$$R_2 = r_b + r_c;$$

$$R_3 = r_c + r_a,$$

где R – измеренное;

r – искомое сопротивление.

Решая совместно полученную систему уравнений, находят искомые сопротивления каждой фазы:

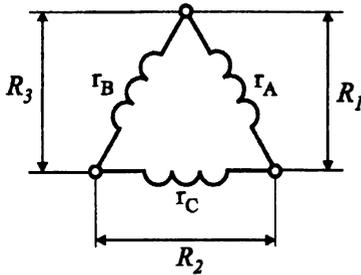
$$R_1 + R_3 - R_2 = 2 \cdot r_a,$$

откуда

$$\begin{aligned} r_a &= \frac{R_1 + R_3 - R_2}{2}; \\ r_b &= \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2}; \\ r_c &= \frac{R_2 + R_3 - R_1}{2}. \end{aligned} \tag{П.1}$$

При одинаковых сопротивлениях $R_1 = R_2 = R_3 = R$, измеренные сопротивления фаз равны: $r_a = r_b = r_c = \frac{R}{2}$, Ом.

Если фазы соединены в схему Δ , что встречается в машинах с переключением числа пар полюсов, то измерения производят следующим образом, рис. П.1. Измеренные сопротивления:



$$R_1 = \frac{1}{\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_e + r_c}} = \frac{r_a(r_e + r_c)}{r_a + r_e + r_c};$$

$$R_2 = \frac{r_e(r_c + r_a)}{r_a + r_e + r_c};$$

$$R_3 = \frac{r_c(r_a + r_e)}{r_a + r_e + r_c}.$$

Рис. П.2

Решение полученной системы уравнений позволяет получить через результаты измерений значения искомых сопротивлений фаз:

$$r_a = \frac{1}{2} \left[\frac{4 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3 - R_1} - (R_2 + R_3 - R_1) \right];$$

$$r_e = \frac{1}{2} \left[\frac{4 \cdot R_3 \cdot R_1}{R_3 + R_1 - R_2} - (R_3 + R_1 - R_2) \right]; \quad (\text{П.2})$$

$$r_c = \frac{1}{2} \left[\frac{4 \cdot R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 - R_3} - (R_1 + R_2 - R_3) \right].$$

При одинаковых сопротивлениях $R_1 = R_2 = R_3 = R$, измеренные сопротивления фаз равны: $r_a = r_e = r_c = \frac{3R}{2}$.

Величина приведённого активного сопротивления фазы статора АД R_s Γ -образной схемы замещения определяется:

$$R_s = K_\phi \cdot r_{(s)} \cong r_s, \quad (\text{П.3})$$

где r_s — измеренное сопротивление одной из фаз статора;

K_ϕ — коэффициент Филда, зависит от устройства проводников об-

мотки, способ их закладки в пазы и от частоты тока; учитывает неравномерное распределение тока в сечении проводника; для машин малой мощности (единицы кВт) с достаточной точностью принимается равным единице.

3. Определение R_r . АД ФР может быть выполнено через приведение измеренного сопротивления фазы ротора с использованием K_ϕ и K_{mp} :

$$R_r = K_\phi \cdot K_{mp} \cdot r_{(s)} \cong r_r, \quad \text{Ом} \quad (\text{П.4})$$

где r_r – измеренное сопротивление одной из фаз ротора;

$$K_{mp} = \frac{\omega_1 \cdot k_{01}}{\omega_2 \cdot k_{02}} - \text{коэффициент трансформации, определяется через}$$

число витков обмоток статора ω_1 и ротора ω_2 , а также обмоточными коэффициентами статора k_{01} и ротора k_{02} .

K_ϕ – результирующий коэффициент Филда, особенно влияет на величину сопротивления в машинах с глубоким пазом и с двойной беличьей клеткой, в обычных – принимают равным единице.

В АД КЗР измерение сопротивления обмотки ротора не представляется возможным.

4. Определение X_s . АД КЗР; АД ФР для Г-образной схемы замещения производится из опыта однофазного питания, в котором к обмоткам фаз статора, соединенным последовательно, рис. П.3, или параллельно, рис. П.4, от источника переменного тока номинальной частоты подводится напряжение, достаточное для того, чтобы по обмоткам фаз проходил номинальный ток при результирующем магнитном поле статора равным нулю

$$Z^2 = X_s^2 + R_s^2, \quad \text{откуда} \quad X_s = \sqrt{Z^2 - R_s^2}. \quad (\text{П.5})$$

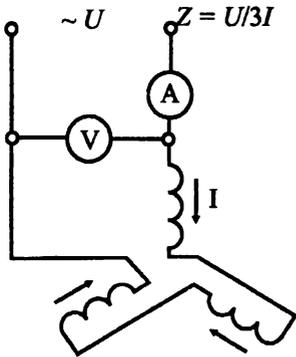


Рис. П.3

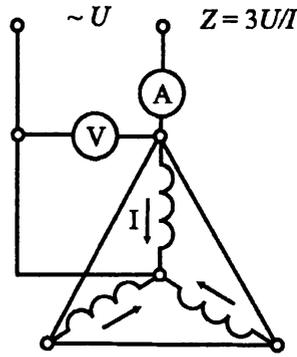


Рис. П.4

Полученное X_s обусловлено полями рассеяния при обтекании обмоток статора токами, совпадающими по фазе, то есть это индуктивное сопротивление нулевой последовательности $x_0 = X_s$, которое в значительной мере зависит от конструкции обмотки и степени сокращения шага. Например, в двухслойных обмотках с шагом $2/3$ полюсного деления он очень мал.

Последовательному включению фаз, рис. П.3, следует отдать предпочтение в тех случаях, когда приходится измерять очень малые индуктивные сопротивления. Здесь, при том же значении напряжения U , потребляемый ток I в девять раз меньше чем с параллельным включением фаз, рис. П.4. При последовательном соединении фаз всегда обеспечивается равенство токов во всех фазах по величине и фазе, что весьма существенно для достижения правильного результата. Результат экспериментального определения X_s не зависит заметно от того, что ротор вращается или нет. Поэтому замеры производятся при неподвижном роторе, $n = 0$.

5. Определение X_μ - реактивного сопротивления намагничивающей

цепи производят из опыта холостого хода машины.

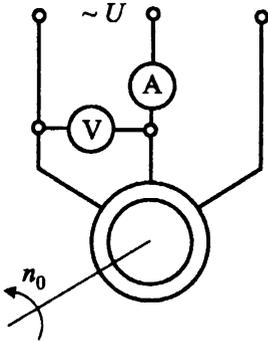


Рис. П.5

Если скорость АД внешним активным моментом, приложенным к её валу раскрутить до $n = n_0$, то $I_r = 0$ и

$$Z_0 = \frac{U_\phi}{I_{s0}} = \sqrt{(R_s + R_\mu)^2 + (X_s + X_\mu)^2}, \text{ поскольку}$$

$R_\mu \ll X_\mu$, то R_μ пренебрегают, тогда

$$X_\mu = \sqrt{Z_0^2 - R_s^2} - X_s \quad (33)$$

6. Определение R_r и X_r , активного и реактивного сопротивлений

обмотки ротора, как приведённых к обмотке статора, используя режим короткого замыкания, что требует исключения вращения АД: $n = 0$, то есть $S = 1$.

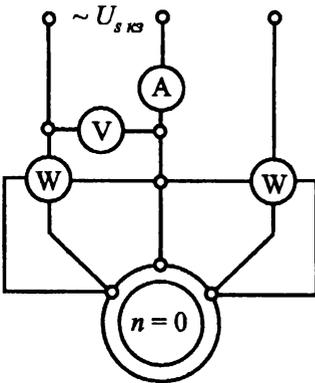


Рис. П.6

Полное сопротивление КЗ:

$$Z_{КЗ} = \frac{U_{s КЗ}}{I_{s КЗ} \cdot \sqrt{3}}$$

Полное активное сопротивление КЗ:

$$R_{КЗ} = \frac{P_{КЗ}}{3I_{s КЗ}^2}$$

Полное реактивное сопротивление КЗ:

$$X_{КЗ} = \sqrt{Z_{КЗ}^2 - R_{КЗ}^2}$$

При нормальной работе АД частота тока в цепи статора остаётся постоянной, а изменение частоты тока происходит в цепи ротора в процессе

изменения его скорости вращения. Изменение полного активного сопротивления АД зависит от изменения активного сопротивления ротора. В условиях заторможенного ротора, $S=1$, частота тока в цепи ротора равна стандартной 50 Гц, поэтому активное сопротивление обмотки ротора определяется:

$$R_r = R_{кз} - R_s. \quad (\text{П.7})$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора определяется:

$$X_r = \sqrt{Z_{кз}^2 - R_{кз}^2} - X_s. \quad (\text{П.8})$$

Отметим, что в некоторых АД X_r зависит от насыщения. Поэтому действительное значение его может быть найдено опытным путём только при токах, близких к току КЗ при номинальном напряжении. Однако из-за опасности перегрева машины производство такого опыта не принято. Опыт КЗ осуществляют при пониженном напряжении, а нахождение $X_{кз}$, соответствующего U_N и учёту насыщения производят путём экстраполяции; с этой целью строят зависимость $X_{кз} = f(I_{кз})$ на диаграмме с логарифмическим масштабом для тока КЗ. Это даёт зависимость в виде прямой, что облегчает экстраполяцию и позволяет производить построение по двум точкам [9].

Томашевский Николай Иосифович,
Томашевский Дмитрий Николаевич,
Емельянов Александр Александрович,
Ипполитов Владимир Владимирович.

Под редакцией канд. техн. наук, доцента Н.И. Томашевского.

Исследование статических характеристик электроприводов

Учебно-методическое пособие к лабораторному практикуму

Подписано в печать *10.04.06* Формат 60x84/16. Бумага для множ. аппаратов.
Печать плоская. Усл. печ. л. *7,6*. Уч.-изд. л. *8,1*. Тираж *200* экз. Заказ *№141*
