

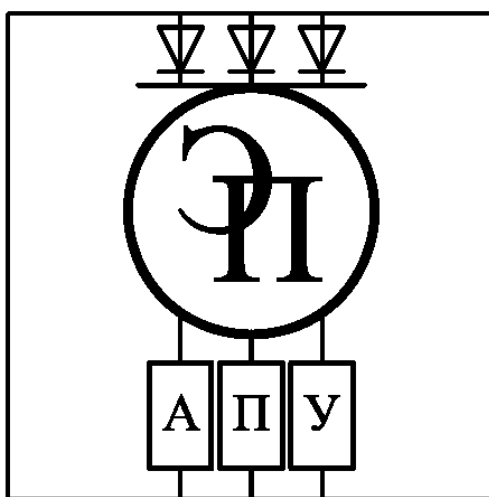
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальности
1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»
дневной и заочной форм обучения*

Часть 2



Могилев 2023

УДК 62-83
ББК 31.291
Т33

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» «31» августа 2022 г., протокол № 1

Составители: канд. техн. наук, доц. Б. Б. Скарыно;
ст. преподаватель А. С. Третьяков

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

Методические рекомендации предназначены к практическим занятиям для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» по дисциплине «Теория электропривода». Приведены основные теоретические положения и формулы, а также рекомендации по расчёту естественных и искусственных статических характеристик двигателей постоянного тока по каталожным данным для формирования процессов пуска и торможения.

Учебно-методическое издание

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Часть 2

Ответственный за выпуск	С. М. Фурманов
Корректор	А. А. Подошево
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 99 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2023

Содержание

Введение.....	4
1 Расчет статических электромеханических и механических характеристик ДПТ с НВ для двигательного режима работы.....	6
1.1 Вывод выражений статической электромеханической и механической характеристик ДПТ с НВ.....	6
1.2 Естественные статические характеристики ДПТ с НВ.....	9
1.3 Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ.....	13
1.4 Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ при изменении напряжения на якоре.....	15
1.5 Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ при изменении магнитного потока.....	17
1.6 Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ при введении в цепь якоря добавочных сопротивлений.....	20
1.7 Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ при шунтировании якоря.....	22
1.8 Расчет пускового реостата для ДПТ с НВ.....	25
2 Тормозные режимы работы ДПТ с НВ.....	30
2.1 Рекуперативное торможение ДПТ с НВ.....	32
2.2 Торможение противовключением ДПТ с НВ.....	32
2.3 Динамическое торможение ДПТ с НВ.....	34
3 Типовые задачи по расчету статических режимов работы ДПТ с НВ и их решение.....	37
Список литературы.....	46
Приложение А. Индивидуальное задание по расчету статических характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением...	47

Введение

Методические рекомендации посвящены расчету статических электромеханических и механических характеристик двигателей постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ с НВ).

Расчёт и анализ статических электромеханических и механических характеристик двигателя – важный этап проектирования электропривода, который позволяет оценить его работу в установившемся режиме.

Статическая электромеханическая характеристика двигателя представляет собой зависимость угловой скорости двигателя от тока в установившемся режиме работы $\{\omega = f(I_a)\}$.

Электромеханическая характеристика позволяет оценить загрузку двигателя по току, а также верно выбрать коммутационные аппараты.

Статическая механическая характеристика двигателя $\{\omega = f(M)\}$ представляет собой зависимость угловой скорости от момента (электромагнитного M_s или на валу M_e) в установившемся режиме работы. Момент электромагнитный M_s и на валу M_e связаны следующим соотношением: $M_s = M_e \pm \Delta M$, где ΔM – момент потерь вращения. В двигательном режиме работы момент электромагнитный M_s больше момента на валу M_e на величину ΔM , а в тормозных режимах (рекуперативное торможение, торможение противовключением и динамическое торможение) меньше.

Статическая механическая характеристика позволяет определить угловую скорость, с которой будет вращаться вал двигателя при данном моменте нагрузки M_c на валу. Статическая механическая характеристика есть множество точек установившегося режима работы электрической машины, для которого момент, развиваемый двигателем, равен моменту нагрузки ($M = M_c$). При совместном рассмотрении механических характеристик механизма $\{\omega = f(M_c)\}$ и двигателя $\{\omega = f(M)\}$ в качестве последней следует рассматривать зависимость угловой скорости в функции момента двигателя на валу $\{\omega = f(M_e)\}$. Однако нужно помнить, что эта функция имеет разрыв первого рода при переходе от двигательного к тормозному режиму работы. Поэтому в ряде задач целесообразнее рассматривать зависимость угловой скорости от электромагнитного момента двигателя $\{\omega = f(M_s)\}$, отнеся момент потерь вращения, вызванный механическими потерями в двигателе, если он превышает 5 % от номинального электромагнитного момента, к нагрузке M_c или пренебрегая им в случае его малости (менее 5 %). При этом следует помнить, что момент потерь вращения ΔM зависит от угловой скорости двигателя, т. е. $\Delta M = f(\omega)$.

Статические характеристики (электромеханические и механические), рассчитанные при номинальных параметрах для нормальной схемы включения двигателя, носят название «естественные характеристики». При изменении хотя бы одного из параметров двигателя или при изменении схемы включения двигателя двигатель в установившемся режиме будет работать на искусственной характеристике. Естественная характеристика у двигателя одна единственная, а искусственных характеристик множество.

Нужно помнить, что регулирование, например, скорости – суть получения необходимого семейства искусственных механических характеристик, а наилучший способ регулирования с энергетической точки зрения такой, который обеспечит идентичность вида механической характеристики механизма $M_c = f(\omega)$ и зависимости допустимого момента двигателя от скорости $M_{\text{дв. доп.}} = f(\omega)$.

Следует иметь в виду, что расчёт статических режимов работы и характеристик двигателя в этих режимах – очень важный этап проектирования электропривода, т. к. по этим характеристикам осуществляют расчёт и выбор пусковых, тормозных и регулировочных реостатов; выбирают, при необходимости, приемлемый тип силового преобразователя электрической энергии; рассчитывают и осуществляют выбор электрических аппаратов управления и защиты.

Методы расчета естественных и искусственных механических и электромеханических характеристик двигателей постоянного тока приведены в [1–3]. Большинство методов расчёта требуют знаний, кроме каталожных данных двигателя, также его электрических параметров (активных и индуктивных сопротивлений статорных и роторных обмоток асинхронных двигателей, полного внутреннего сопротивления якоря двигателя постоянного тока и др.). Если эти параметры в справочниках не приведены, что чаще всего и бывает, необходимо применять приближённые методы расчёта, базирующиеся лишь на данных из каталогов (справочников). Такой подход к расчёту статических характеристик двигателей постоянного тока и принят за основу в методических рекомендациях.

Для закрепления изученного материала в конце методических рекомендаций приведено индивидуальное задание (приложение А), составленное в ста вариантах, выполняя которое студент самостоятельно пройдёт основные этапы расчёта естественной и искусственных статических электромеханических и механических характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, а также типовые задачи по расчёту статических режимов работы двигателей постоянного тока с независимым возбуждением.

1 Расчет статических электромеханических и механических характеристик ДПТ с НВ для двигательного режима работы

1.1 Вывод выражений статической электромеханической и механической характеристик ДПТ с НВ

Схема включения ДПТ с НВ приведена на рисунке 1. Особенностью этого двигателя является то, что якорь двигателя и обмотка возбуждения получают питание от различных (независимых) источников энергии.

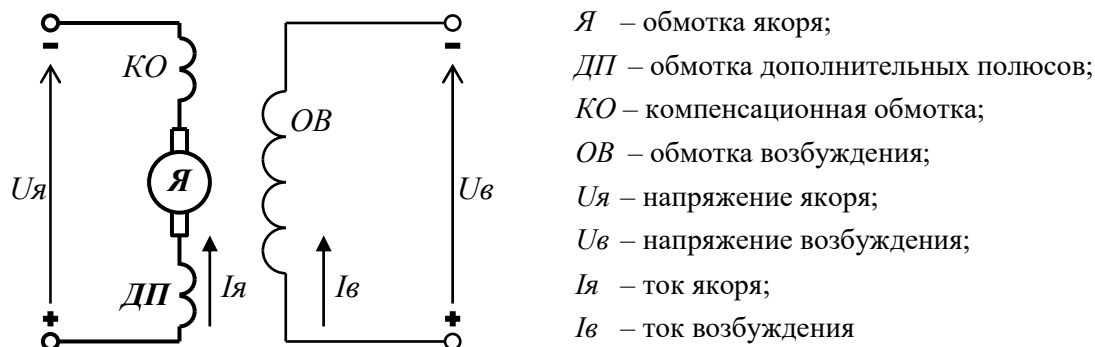


Рисунок 1 – Схема включения ДПТ с НВ

Статическая электромеханическая характеристика ДПТ с НВ $\{\omega = f(Iя)\}$ представляет собой зависимость угловой скорости от тока якоря в установившемся режиме работы.

Выражение электромеханической характеристики можно получить, используя схему замещения для якорной цепи ДПТ с НВ, которая представлена на рисунке 2.

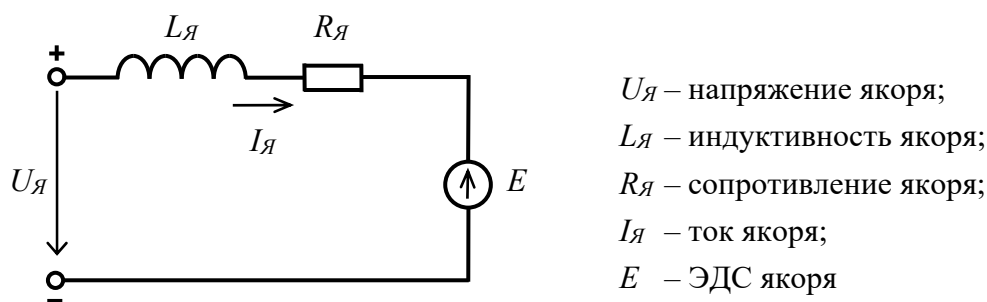


Рисунок 2 – Схема замещения якорной цепи ДПТ с НВ

Данная схема замещения соответствует прямому преобразованию энергии, когда двигатель потребляет электрическую энергию и, за вычетом потерь энергии, преобразовывает её в механическую и отдаёт исполнительному органу рабочей машины, т. е. двигательному режиму работы (см. направление тока якоря, ЭДС и напряжения на якоре).

По второму закону Кирхгофа запишем уравнение электрического равновесия для якорной цепи для двигательного режима работы ДПТ с НВ (см. рисунок 2):

$$U_{\text{я}} = I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \cdot \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + E. \quad (1)$$

В установившемся режиме работы ($I_{\text{я}} = \text{const}$) изменения тока во времени не происходит, поэтому при рассмотрении статического (установившегося) режима работы положим в выражении (1) значение производной тока якоря равным нулю, т. е.:

$$\frac{dI_{\text{я}}}{dt} = 0. \quad (2)$$

С учетом (2) уравнение статического электрического равновесия якорной цепи для двигательного режима работы ДПТ с НВ примет вид:

$$U_{\text{я}} = I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} + E. \quad (3)$$

Электродвижущая сила (ЭДС) ДПТ с НВ пропорциональна угловой скорости якоря двигателя и полезному потоку, создаваемому обмоткой возбуждения ДПТ с НВ, и определяется выражением

$$E = k \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (4)$$

где k – конструктивный коэффициент двигателя;

Φ – поток возбуждения двигателя;

ω – угловая скорость.

Конструктивный коэффициент двигателя

$$k = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a}, \quad (5)$$

где p – число пар полюсов двигателя;

N – число активных проводников обмотки якоря;

a – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Тогда, учитывая (4), уравнение статического электрического равновесия (3) можно записать в виде

$$U_{\text{я}} = I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} + k \cdot \Phi \cdot \omega. \quad (6)$$

Из (6) выразим угловую скорость двигателя:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{\text{я}}. \quad (7)$$

Полученное выражение (7) представляет собой зависимость угловой скорости двигателя от тока якоря $\{\omega = f(I_{\text{я}})\}$ в установившемся (статическом) режиме работы ДПТ с НВ. Выражение (7) носит название «уравнение статической электромеханической характеристики двигателя».

От этого уравнения можно перейти к уравнению статической механической характеристики, т. к. развиваемый двигателем электромагнитный момент пропорционален току якоря и потоку и определяется выражением

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в уравнение (7), запишем уравнение статической механической характеристики ДПТ с НВ:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M. \quad (9)$$

Таким образом, получены уравнение статической электромеханической и уравнение статической механической характеристик ДПТ с НВ:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{\text{я}}; \quad \omega = \frac{U_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M,$$

где $U_{\text{я}}$ – напряжение на якоре, В;

$R_{\text{я}}$ – сопротивление якорной цепи для нагретого состояния, Ом;

$I_{\text{я}}$ – ток якорной цепи, А;

k – конструктивный коэффициент двигателя;

Φ – полезный поток, Вб.

Из выражений (4) и (8) видно, что ЭДС двигателя пропорциональна его угловой скорости, а электромагнитный момент – току якоря, причем коэффициент пропорциональности один и тот же ($k \cdot \Phi$). Поэтому произведение ($k \cdot \Phi$) иногда называют коэффициентом ЭДС и момента (электромагнитного). При неизменном потоке возбуждения ($\Phi = \text{const}$) данный коэффициент обозначают символом C (т. е. $k \cdot \Phi = C$).

С учетом этого уравнения статических электромеханической и механической характеристик двигателя могут быть записаны в виде

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C} - \frac{R_{\text{я}}}{C} \cdot I_{\text{я}}; \quad (10)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C} - \frac{R_{\text{я}}}{C^2} \cdot M, \quad (11)$$

где C – коэффициент ЭДС и момента ($C = k \cdot \Phi$), В·с/рад.

В выражениях (10) и (11) угловая скорость ω является функцией, $I_{Я}$ и M – аргументами, а все остальные величины, входящие в выражения характеристик, называют параметрами двигателя.

1.2 Естественные статические характеристики ДПТ с НВ

Статические характеристики (электромеханические и механические), рассчитанные при номинальных параметрах для нормальной схемы включения ДПТ с НВ (отсутствуют добавочные сопротивления), носят название «естественные характеристики». Выражения естественных статических электромеханической и механической характеристик имеют вид:

$$\omega = \frac{U_{Яном}}{C_{ном}} - \frac{R_{Я}}{C_{ном}} \cdot I_{Я}; \quad (12)$$

$$\omega = \frac{U_{Яном}}{C_{ном}} - \frac{R_{Я}}{(C_{ном})^2} \cdot M. \quad (13)$$

Параметры, входящие в выражения этих характеристик, определяются следующим образом.

1 Номинальное напряжение на якоре задается в справочниках и указывается на табличке двигателя.

2 Сопротивление якорной цепи

$$R_{Я} = k_T \cdot (R_{ОЯ} + R_{ОДП} + R_{КО}) + R_{ЩК}, \quad (14)$$

где $R_{ОЯ}$ – сопротивление обмотки якоря, Ом;

$R_{ОДП}$ – сопротивление обмотки дополнительных полюсов, Ом;

$R_{КО}$ – сопротивление компенсационной обмотки, Ом;

$R_{ЩК}$ – сопротивление щеточного контакта, Ом;

k_T – коэффициент приведения сопротивлений к нагретому состоянию,

$$k_T = \left[1 + \alpha \cdot (\theta - t^0) \right],$$

где t^0 – температура при измерении сопротивлений, $t^0 = 20$ °С;

α – температурный коэффициент, для меди $\alpha = 0,004$ 1/°С;

θ – расчётное значение температуры, определяемое классом изоляции, $\theta = 75$ °С в случае класса изоляции B , $\theta = 90$ °С в случае класса изоляции F .

Если сопротивления обмоток якоря, добавочных полюсов и компенсационной обмотки приведены в справочнике уже для нагретого состояния, то при расчете сопротивления якорной цепи следует использовать коэффициент k_T , равный 1.

У двигателей небольшой мощности компенсационная обмотка может отсутствовать, тогда в формуле (14) следует принять $R_{КО} = 0$.

Сопротивление щеточного контакта определяется по формуле

$$R_{ЩК} = \frac{\Delta U_{Щ}}{I_{Яном}}, \quad (15)$$

где $\Delta U_{Щ}$ – падение напряжения на щеточном контакте, $\Delta U_{Щ} = 0,6$ В – для медно-графитовых и $\Delta U_{Щ} = 2$ В – для графитовых щеток;

$I_{Яном}$ – номинальный ток якоря двигателя, А.

Обычно номинальный ток якоря приводится в справочнике или на табличке двигателя. Если номинальный ток якоря неизвестен, то его можно найти по формуле

$$I_{Яном} = \frac{P_{2ном}}{\eta_{ном} \cdot U_{Яном}} - \frac{U_{Вном}}{k_T \cdot R_{ОВ}}, \quad (16)$$

где $P_{2ном}$ – номинальная мощность на валу двигателя, Вт;

$\eta_{ном}$ – номинальный коэффициент полезного действия, о. е.;

$U_{Вном}$ – номинальное напряжение на обмотке возбуждения, В;

$R_{ОВ}$ – сопротивление обмотки возбуждения, Ом.

В случае если в справочнике не заданы сопротивления обмоток двигателя, то сопротивление якорной цепи можно оценить по приближенной формуле, считая, что половина всех потерь в двигателе приходится на долю переменных потерь

$$R_{Я} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{Яном}}{I_{Яном}} \cdot (1 - \eta_{ном}). \quad (17)$$

3 Коэффициент ЭДС и момента может быть определен из выражения естественной электромеханической характеристики, записанной для номинального режима работы двигателя,

$$k \cdot \Phi_{ном} = C_{ном} = \frac{U_{Яном} - I_{Яном} \cdot R_{Я}}{\omega_{ном}}, \quad (18)$$

где $\omega_{ном}$ – номинальная угловая скорость вала двигателя, рад/с.

В справочнике и на табличке двигателя обычно указывается номинальная частота вращения вала двигателя $n_{ном}$, об/мин. Угловая скорость и частота вращения связаны следующим выражением:

$$\omega = \pi \cdot n / 30. \quad (19)$$

Из анализа выражений электромеханической и механической характеристик видно, что они линейны (при $\Phi = \text{const}$). Для двигательного режима работы ДПТ с НВ угловая скорость и ток (момент) имеют одинаковые знаки. Характеристики двигательного режима работы располагаются в I и III квадрантах плоскости $\{\omega, M\}$. Так как характеристики линейны, то для их построения достаточно рассчитать две точки. Подставляя в выражение требуемой характеристики два значения тока (момента), определяют угловые скорости, соответствующие этим токам (моментам). По полученным двум точкам на плоскости $\{\omega, I_{\text{я}}\}$ или $\{\omega, M\}$ строят требуемую электромеханическую или механическую характеристику. Обычно для расчета первой точки электромеханической (механической) характеристики принимают $I_{\text{я}} = 0$ ($M = 0$), при этом скорость вала двигателя будет равна скорости идеального холостого хода ($\omega = \omega_0$). Скорость идеального холостого хода определяется выражением

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{я}}}{k \cdot \Phi}. \quad (20)$$

Для расчета второй точки электромеханической (механической) характеристики примем скорость равной нулю. При скорости, равной нулю, имеет место режим короткого замыкания. При этом по цепи якоря протекает ток короткого замыкания. Ток короткого замыкания определяется, решив уравнение электромеханической характеристики относительно тока якоря при $\omega = 0$:

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{я}}}{R_{\text{я}\Sigma}}. \quad (21)$$

Момент короткого замыкания определяется, решив уравнение МХ относительно момента при $\omega = 0$:

$$M_{\text{кз}} = k \cdot \Phi \cdot \frac{U_{\text{я}}}{R_{\text{я}\Sigma}} = k \cdot \Phi \cdot I_{\text{кз}}. \quad (22)$$

На рисунках 3 и 4 представлены статические электромеханические $\{\omega = f(I_{\text{я}})\}$ и механические $\{\omega = f(M)\}$ характеристики ДПТ с НВ соответственно.

Статическая электромеханическая и механическая характеристика (ЭМХ и МХ соответственно), показанные сплошными линиями (см. рисунки 3 и 4), построены при условии $k \cdot \Phi = \text{const}$. В действительности же, если не принимать специальных мер, с увеличением тока якоря усиливается действие поперечной реакции якоря, приводящее к снижению потока возбуждения Φ или, как говорят, к размагничиванию машины. Это явление сказывается на форме статических характеристик ДПТ с НВ.

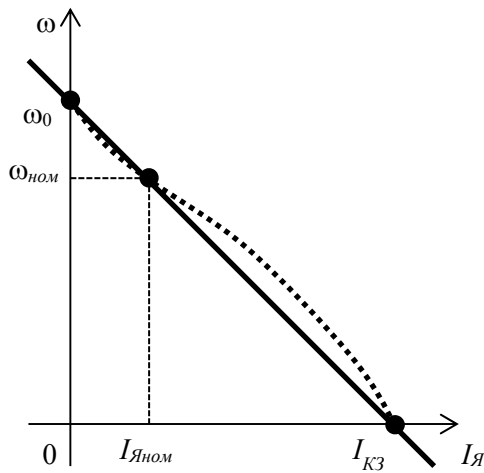


Рисунок 3 – Статические ЭМХ ДПТ с НВ

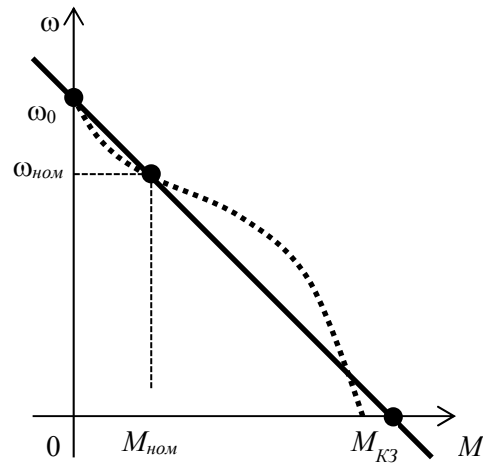


Рисунок 4 – Статические МХ ДПТ с НВ

При малых значениях тока якоря и, соответственно, момента действие реакции якоря не проявляется, благодаря чему характеристики остаются линейными. При дальнейшем увеличении тока якоря начинается снижение потока возбуждения, что вызывает отклонение характеристик в сторону больших скоростей. Соответствующие характеристики, учитывающие влияние реакции якоря, обозначены на рисунках 3 и 4 пунктирными линиями. При этом необходимо отметить, что на ток короткого замыкания (см. формулу (21)) реакция якоря влияния не оказывает, тогда как момент при коротком замыкании вследствие снижения потока возбуждения уменьшается (см. формулу (22)).

В современных ДПТ с НВ, с целью устранения влияния реакции якоря, в цепь якоря последовательно включают компенсационную обмотку, которая располагается на главных полюсах. Наличие такой обмотки ослабляет влияние реакции якоря по поперечной оси при изменении тока якоря в пределах, обусловленных коммутационной способностью коллектора, что позволяет не считаться с изменением потока возбуждения при анализе статических характеристик ДПТ с НВ.

Ввиду того, что ДПТ с НВ имеет определенную перегрузочную способность по току и по моменту (для большинства двигателей общепромышленного применения допустимый ток не превышает трехкратного значения номинального тока якоря ($\lambda_I = 2,5 \dots 3$)) и так как статические характеристики есть множество точек установившегося режима работы, то область построения статических электромеханических и механических характеристик ДПТ с НВ в двигательном режиме работы должна определяться диапазоном изменения тока якоря в пределах $[0 \dots I_{Ядон}]$ и момента $[0 \dots M_{дон}]$.

$$I_{Ядон} = \lambda_I \cdot I_{Яном}; \quad (23)$$

$$M_{дон} = k \cdot \Phi \cdot I_{Ядон} = k \cdot \Phi \cdot \lambda_I \cdot I_{Яном}. \quad (24)$$

Поэтому для расчета второй точки электромеханической (механической) характеристики принимают значение тока якоря (момента) из диапазона $[0 \dots I_{ядоп}]$ ($[0 \dots M_{доп}]$) и рассчитывают угловую скорость. Например, в выражение ЭМХ и МХ подставляют соответственно номинальные значения тока якоря и момента и при этих значениях рассчитывают угловую скорость.

На рисунках 5 и 6 представлены естественные электромеханическая и механическая характеристики ДПТ с НВ соответственно в допустимых пределах существования тока якоря и момента в установившемся режиме работы.

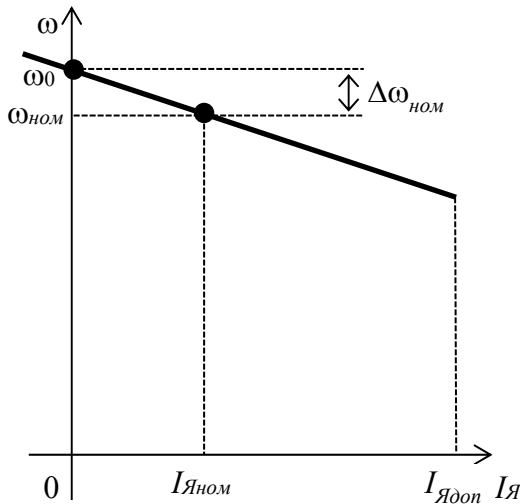


Рисунок 5 – Естественная ЭМХ ДПТ с НВ

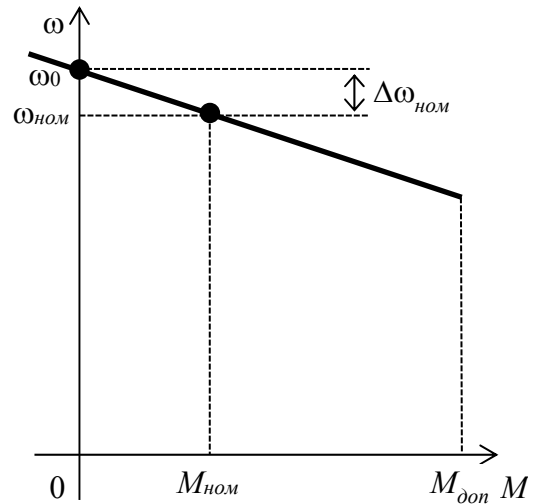


Рисунок 6 – Естественная МХ ДПТ с НВ

1.3 Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ

Как отмечалось ранее, естественные характеристики (электромеханическая и механическая) определяются номинальными параметрами и нормальной схемой включения ДПТ с НВ.

При изменении хотя бы одного из параметров, входящих в выражения механической и электромеханической характеристик (напряжения на якоре, потока двигателя, добавочных сопротивлений), получают характеристики, отличные от естественной. Такие характеристики называют искусственными. Естественная статическая характеристика у двигателя одна, искусственных характеристик множество.

Вид искусственных электромеханических (механических) характеристик обычно оценивают по их расположению относительно естественной электромеханической (механической) статической характеристики, при этом при анализе электромеханической характеристики будем пользоваться такими параметрами, как скорость идеального холостого хода и статическое падение скорости, соответствующее номинальному току якоря.

Скорость идеального холостого хода

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} = \frac{U_{\text{я}}}{C}. \quad (25)$$

Статическое падение скорости можно определить из выражения электро-механической характеристики ДПТ с НВ

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{\text{я}} = \omega_0 - \Delta\omega,$$

при номинальном токе якоря

$$\Delta\omega_{\text{НОМ}} = \frac{R_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{\text{яНОМ}} = \frac{R_{\text{я}}}{C} \cdot I_{\text{яНОМ}}. \quad (26)$$

При анализе механической характеристики будем пользоваться выражением скорости идеального холостого хода (см. формулу (25)) и выражением модуля жесткости механической характеристики.

$$\beta = \left| \frac{dM}{d\omega} \right| = \frac{(k \cdot \Phi)^2}{R_{\text{я}}} = \frac{C^2}{R_{\text{я}}}. \quad (27)$$

Жесткость механической характеристики при принятых допущениях (реакция якоря по поперечной оси скомпенсирована, магнитный поток двигателя не зависит от тока якоря, т. е. $\Phi = \text{const}$) для ДПТ с НВ является постоянной величиной ($\beta = \text{const}$). Так как производная момента по скорости – отрицательная величина, то и жесткость имеет отрицательное значение, что обеспечивает устойчивый установившийся режим работы, например при постоянном моменте нагрузки ($M_c = \text{const}$). Поэтому в дальнейшем будем оперировать модулем жесткости механической характеристики, характеризуя его уменьшение или увеличение в зависимости от изменяемых параметров ДПТ с НВ.

Так как жесткость механической характеристики определяется как производная момента по скорости, то (из геометрического смысла производной жесткость может быть определена как тангенс угла между осью скорости и характеристикой) жесткость характеризует наклон статической механической характеристики к оси скорости.

Так характеристика, проходящая через точку идеального холостого хода и параллельная оси абсцисс (момента), будет иметь жесткость, равную бесконечности ($\beta = \infty$), а характеристика, совпадающая с осью ординат (скорости), будет иметь жесткость, равную нулю ($\beta = 0$).

С учетом выражения (27) статическая механическая характеристика ДПТ с НВ может быть представлена в виде

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C} - \frac{M}{\beta} = \omega_0 - \frac{M}{\beta} = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (28)$$

или

$$M = \beta \cdot (\omega_0 - \omega). \quad (29)$$

Рассмотрим искусственные статические характеристики, получаемые изменением хотя бы одного из параметров, входящих в выражение электромеханической (механической) характеристики.

1.4 Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ при изменении напряжения на якоре

Следует отметить, что напряжение на якоре ДПТ с НВ можно только уменьшать. Характеристики, полученные уменьшением напряжения на якоре ДПТ НВ, называют искусственными характеристиками при пониженном напряжении.

Выражения искусственных статических электромеханической и механической характеристик для этого случая имеют вид:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C_{\text{НОМ}}} - \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{НОМ}}} \cdot I_{\text{я}}; \quad (30)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C_{\text{НОМ}}} - \frac{R_{\text{я}}}{(C_{\text{НОМ}})^2} \cdot M. \quad (31)$$

На рисунке 7 приведены статические электромеханические и механические характеристики ДПТ с НВ при уменьшении напряжения на якоре.

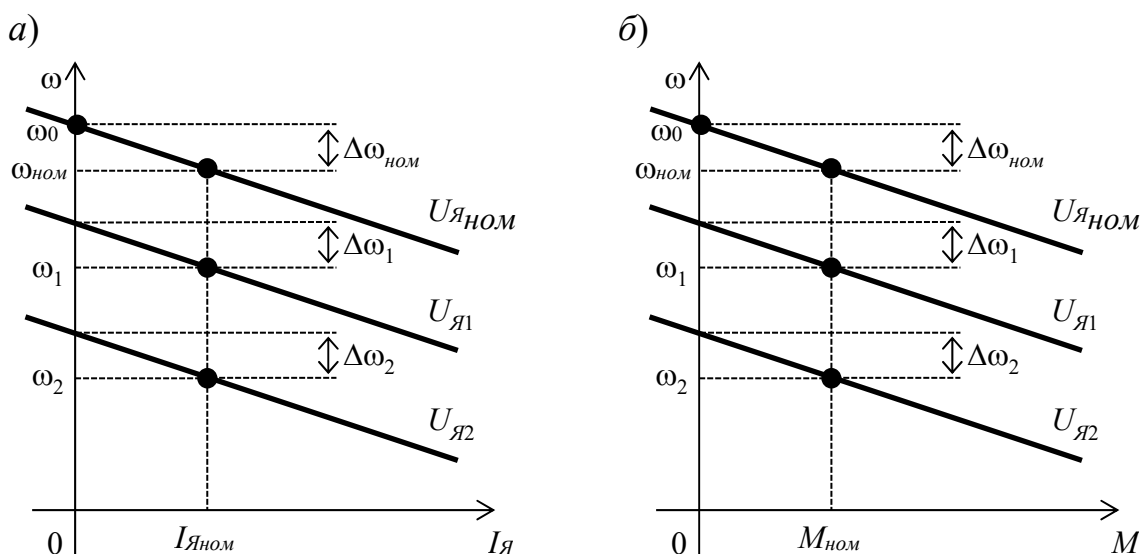


Рисунок 7 – Статические ЭМХ (а) и МХ (б) ДПТ с НВ при изменении напряжения якоря ($U_{\text{я}2} < U_{\text{я}1} < U_{\text{яНОМ}}$)

При уменьшении напряжения, подводимого к якорю ДПТ с НВ (при постоянном магнитном потоке и постоянном сопротивлении цепи якоря), скорость идеального холостого хода уменьшается пропорционально приложенному напряжению, статическое падение скорости остается постоянным ($\Delta\omega_{ном} = \Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$) и жесткость механических характеристик остаётся неизменной ($\beta = \text{const}$), характеристики в этом случае будут параллельны друг другу и естественной характеристике.

Расчёт требуемого значения напряжения на якоре ДПТ с НВ для обеспечения требуемой скорости ω_C при моменте M_C осуществляется подстановкой последних в выражение статической механической характеристики (см. формулу (31)). Например, для работы в точке A (рисунок 8) с моментом M_A и угловой скоростью ω_A требуется уменьшить напряжение на якоре ДПТ с НВ. Тогда требуемое напряжение якоря для искусственной характеристики можно определить по формуле

$$U_{Яи} = C_{НОМ} \cdot \omega_A + \left(\frac{R_{Я}}{C_{НОМ}} \right) \cdot M_A,$$

а искусственную статическую механическую характеристику можно рассчитать и построить по выражению

$$\omega = \frac{U_{Яи}}{C_{НОМ}} - \frac{R_{Я}}{(C_{НОМ})^2} \cdot M.$$

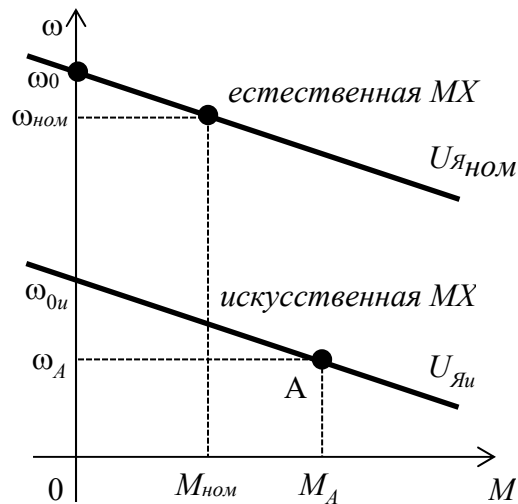


Рисунок 8 – Искусственная МХ ДПТ с НВ при напряжении якоря $U_{Яи}$

1.5 Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ при изменении магнитного потока

Характеристики, полученные ослаблением потока возбуждения, называют искусственными характеристиками при ослабленном потоке.

Поток двигателя определяется током обмотки возбуждения. Зависимость потока двигателя от тока возбуждения $\{\Phi = f(I_B)\}$ носит название «кривая намагничивания двигателя». На рисунке 9 приведена универсальная кривая намагничивания ДПТ с НВ, где ток возбуждения и поток представлены в относительных единицах (относительно их номинальных значений). Как видно из кривой намагничивания увеличение тока возбуждения не вызывает существенного увеличения потока двигателя, при этом только лишь возрастают потери в цепи обмотки возбуждения, что может привести к ее чрезмерному нагреву и выходу из строя. Поэтому поток двигателя только уменьшают, уменьшая ток возбуждения.

Ток возбуждения определяется выражением

$$I_B = \frac{U_B}{R_B}, \quad (32)$$

где U_B – напряжение на обмотке возбуждения, В;

R_B – сопротивление цепи обмотки возбуждения, Ом.

Согласно выражению (32), ток возбуждения пропорционален напряжению возбуждения и обратно-пропорционален сопротивлению цепи возбуждения, значит, уменьшить ток в обмотке возбуждения (а следовательно, и поток двигателя) можно, либо уменьшая напряжение возбуждения, либо вводя добавочное сопротивление в цепь обмотки возбуждения.

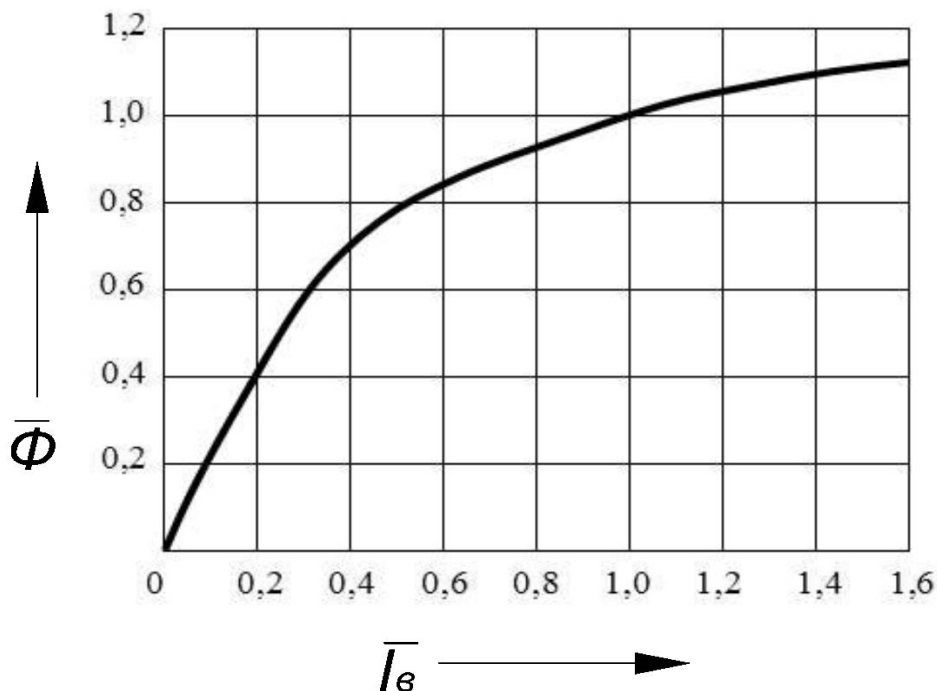


Рисунок 9 – Универсальная кривая намагничивания ДПТ с НВ

С ослаблением магнитного потока двигателя скорость его идеального холостого хода возрастает, статическое падение скорости увеличивается, т. к. и скорость идеального холостого хода (см. формулу (25)) и статическое падение скорости (см. формулу (26)) обратно пропорциональны потоку двигателя. Модуль жесткости механической характеристики (см. формулу (27)) пропорционален квадрату потока двигателя и с уменьшением потока снижается быстрее, чем растет скорость идеального холостого хода двигателя, которая обратно пропорциональна потоку в первой степени.

Статические характеристики электромеханические и механические ДПТ с НВ при ослаблении потока двигателя, например в 2 раза, приведены на рисунках 10 и 11 соответственно.

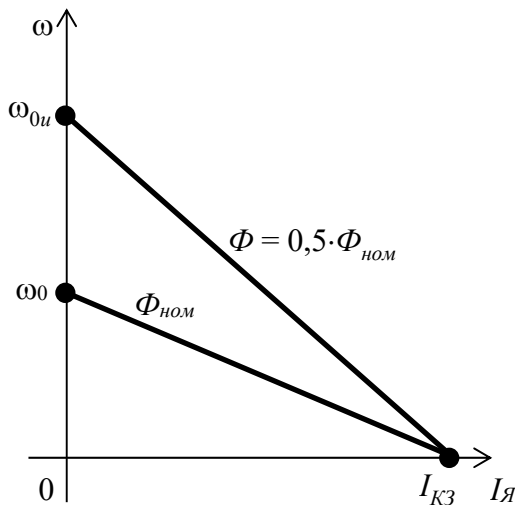


Рисунок 10 – Статические ЭМХ ДПТ с НВ при ослаблении потока возбуждения в 2 раза

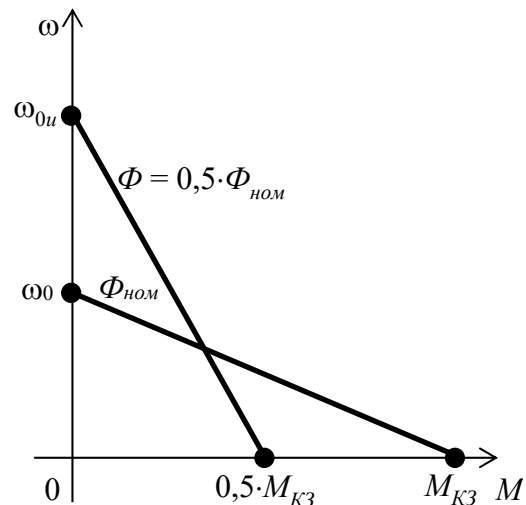


Рисунок 11 – Статические МХ ДПТ с НВ при ослаблении потока возбуждения в 2 раза

При ослаблении (уменьшении) потока возбуждения двигателя происходит уменьшение момента короткого замыкания пропорционально магнитному потоку (см. рисунок 11), а изменения тока короткого замыкания при этом не наблюдается (см. рисунок 10). При уменьшении магнитного потока ДПТ с НВ в 2 раза ток короткого замыкания остаётся прежним, момент короткого замыкания уменьшается в 2 раза, при этом скорость идеального холостого хода ω_0 возрастает в 2 раза.

Выражения искусственных статических электромеханической и механической характеристик для этого случая имеют вид:

$$\omega = \frac{U_{\text{Яном}}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{Я}}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{\text{Я}}; \quad (33)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{Яном}}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{Я}}}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M. \quad (34)$$

Ослабление потока двигателя, как отмечалось ранее, можно обеспечить введением в цепь обмотки возбуждения добавочного сопротивления $R_{доб}$ или уменьшением напряжения на обмотке возбуждения.

Для расчета величины добавочного сопротивления, включённого в цепь обмотки возбуждения, вначале необходимо найти значение потока двигателя при заданной угловой скорости и моменте нагрузки, для чего подставляют эти значения в выражение статической механической характеристики (см. формулу (34)) и определяют поток двигателя. Например, для работы в точке B (см. рисунок 12) с моментом M_B и угловой скоростью ω_B требуется уменьшить поток двигателя. Требуемый поток Φ можно определить по формуле

$$\Phi = \frac{U_{яном} \pm \sqrt{U_{яном}^2 - 4 \cdot \omega_B \cdot M_B \cdot R_{я}}}{k \cdot 2 \cdot \omega_B}.$$

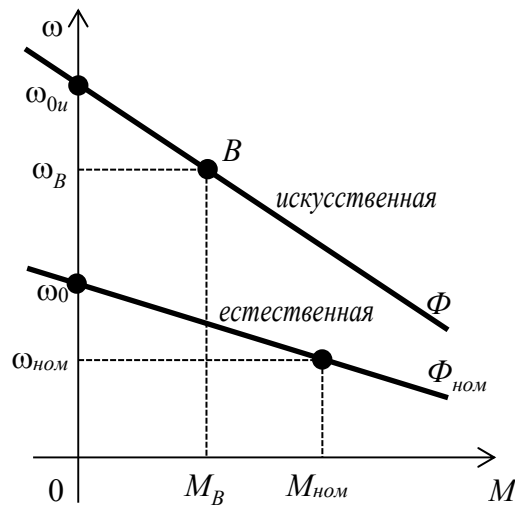


Рисунок 12 – Искусственная МХ ДПТ с НВ при ослаблении потока двигателя

При этом из двух значений потока выбирают то значение, которое меньше номинального потока приблизительно во столько раз, во сколько угловая скорость двигателя ω_B больше скорости двигателя при $M = M_B$ при работе его на естественной характеристике при номинальном потоке.

Затем для выбранного значения потока Φ вычисляют его относительное значение по формуле

$$\bar{\Phi} = \frac{\Phi}{\Phi_{ном}} = \frac{k \cdot \Phi}{k \cdot \Phi_{ном}}.$$

По универсальной кривой намагничивания (см. рисунок 9) для относительного значения потока определяют относительное значение, а затем и реальное значение тока возбуждения по формуле

$$I_B = \overline{I}_B \cdot I_{Вном}.$$

Величину добавочного сопротивления, включённого в цепь обмотки возбуждения, находят по формуле

$$R_{Вдоб} = \frac{U_{Вном}}{I_B} - R_B.$$

При необходимости величину напряжения возбуждения U_B , на которое нужно подключить обмотку возбуждения, чтобы обеспечить требуемый поток двигателя, определяют по формуле

$$U_B = I_B \cdot R_B.$$

Для выбора добавочного сопротивления по справочнику его значение следует привести к холодному состоянию по формуле

$$R_{Вдоб(t^0C)} = \frac{R_{Вдоб}}{k_T}.$$

Мощность добавочного сопротивления, включённого в цепь обмотки возбуждения, определяют как

$$P_{Вдоб} = (I_B)^2 \cdot R_{Вдоб}.$$

1.6 Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ при введении в цепь якоря добавочных сопротивлений

Искусственная характеристика, полученная введением в цепь якоря добавочного сопротивления (реостата), носит название «реостатная электромеханическая (или механическая) характеристика». Выражения электромеханических и механических реостатных характеристик имеют вид:

$$\omega = \frac{U_{Яном}}{C_{НОМ}} - \frac{R_Я + R_{Ядоб}}{C_{НОМ}} \cdot I_Я ; \quad (35)$$

$$\omega = \frac{U_{Яном}}{C_{НОМ}} - \frac{R_Я + R_{Ядоб}}{(C_{НОМ})^2} \cdot M , \quad (36)$$

где $R_{Ядоб}$ – величина добавочного сопротивления, Ом.

При введении в цепь якоря $R_{Ядоб}$ скорость идеального холостого хода (см. формулу (25)) не изменяется, все реостатные характеристики проходят через точку $\omega = \omega_0$. Статическое падение скорости с увеличением сопротивления якорной цепи ($R_Я + R_{Ядоб}$) возрастает (см. формулу (26)). Модуль жесткости

статической механической характеристики при введении в цепь якоря $R_{Ядоб}$ падает (см. формулу (27)). Механические характеристики с ростом сопротивления якоря становятся мягче. На рисунке 13 приведены реостатные электро-механические и механические характеристики ДПТ с НВ при введении сопротивления в цепь якоря.

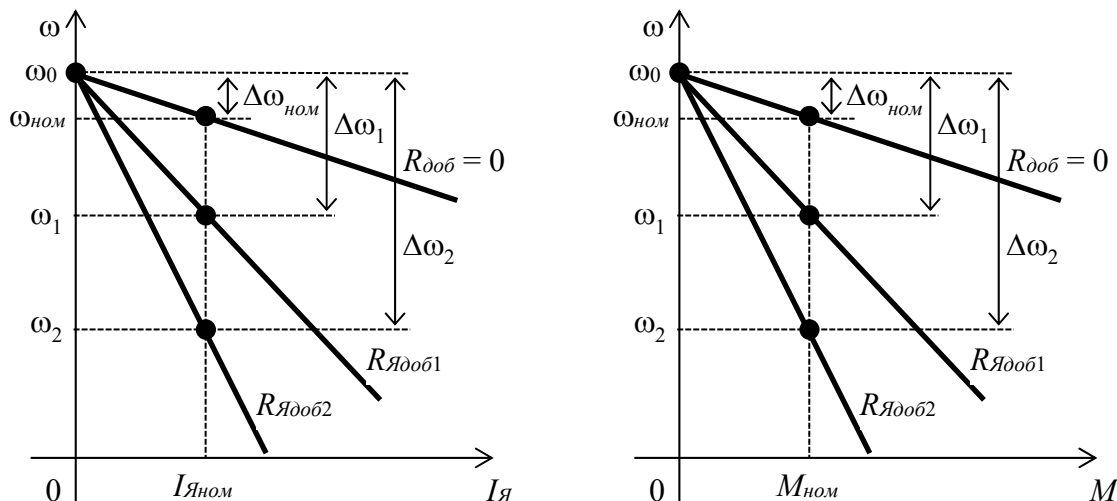


Рисунок 13 – Статические ЭМХ и МХ ДПТ с НВ при введении в цепь якоря добавочных сопротивлений ($R_{Ядоб2} > R_{Ядоб1}$)

Расчет требуемого значения добавочного сопротивления, включённого в цепь якоря ДПТ с НВ для обеспечения требуемой скорости ω_C при моменте M_C , осуществляется подстановкой последних в выражение статической механической характеристики (см. формулу (36)). Например, для работы в точке С (см. рисунок 14) с моментом M_C и угловой скоростью ω_C требуется в цепь якоря ввести добавочное сопротивление. Тогда требуемое сопротивление для искусственной (реостатной) характеристики можно определить по формуле

$$R_{Ядоб} = \frac{C_{ном} \cdot (U_{Яном} - C_{ном} \cdot \omega_C)}{M_C} - R_{Я}, \quad (37)$$

а искусственную (реостатную) статическую механическую характеристику можно рассчитать и построить по выражению

$$\omega = \frac{U_{Яном}}{C_{НОМ}} - \frac{R_{Я} + R_{Ядоб}}{(C_{НОМ})^2} \cdot M.$$

Определив требуемое значение $R_{Ядоб}$ по (37), не стоит забывать, что оно найдено для нагретого состояния. Для выбора добавочного сопротивления из справочника его необходимо привести к холодному состоянию, используя формулу

$$R_{Ядоб(t^0C)} = \frac{R_{Ядоб}}{k_T}. \quad (38)$$

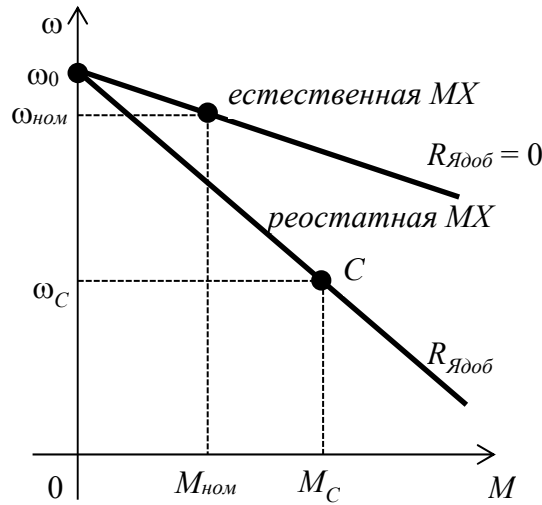


Рисунок 14 – Реостатная МХ ДПТ с НВ при введении в цепь якоря $R_{Ядоб}$

1.7 Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ при шунтировании якоря

Искусственные характеристики ДПТ с НВ могут быть получены путем шунтирования якорной обмотки. Схема включения ДПТ с НВ при шунтировании якоря приведена на рисунке 15.

Выражения статических электромеханических и механических характеристик при шунтировании якоря ДПТ с НВ имеют вид:

$$\omega = \frac{\alpha \cdot U_{Яном}}{C_{НОМ}} - \frac{R_{Я} + \alpha \cdot R_{Ядоб}}{C_{НОМ}} \cdot I_{Я}; \quad (39)$$

$$\omega = \frac{\alpha \cdot U_{Яном}}{C_{НОМ}} - \frac{R_{Я} + \alpha \cdot R_{Ядоб}}{(C_{НОМ})^2} \cdot M, \quad (40)$$

где α – коэффициент деления напряжения,

$$\alpha = \frac{R_{Ш}}{R_{Ш} + R_{П}}.$$

На рисунке 16 отображены статические электромеханические характеристики для постоянного значения сопротивления, включённого последовательно с обмоткой якоря ДПТ ($R_{П} = \text{const}$), а сопротивление, шунтирующее якорную обмотку, изменяемое ($R_{Ш} = \text{var}$). На рисунке 17 статические электромеханические характеристики приведены для случая, когда $R_{П} = \text{var}$, а $R_{Ш} = \text{const}$. Статические механические характеристики при шунтировании якоря имеют аналогичный вид (рисунки 18 и 19).

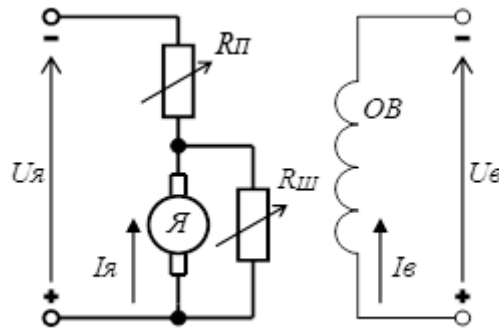


Рисунок 15 – Схема включения ДПТ с НВ при шунтировании якоря

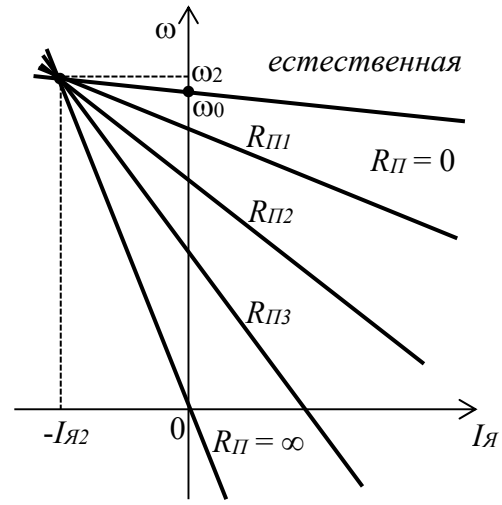
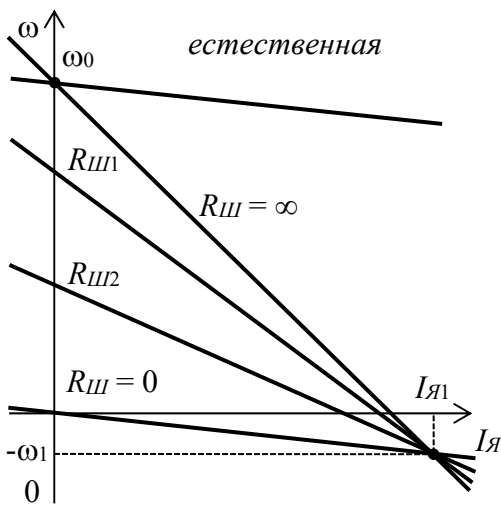


Рисунок 16 – Статические ЭМХ ДПТ с НВ при шунтировании якоря, $R_{П} = \text{const}$, $R_{Ш} = \text{var}$ ($R_{Ш2} > R_{Ш1}$)

Рисунок 17 – Статические ЭМХ ДПТ с НВ при шунтировании якоря, $R_{Ш} = \text{const}$, $R_{П} = \text{var}$ ($R_{П3} > R_{П2} > R_{П1}$)

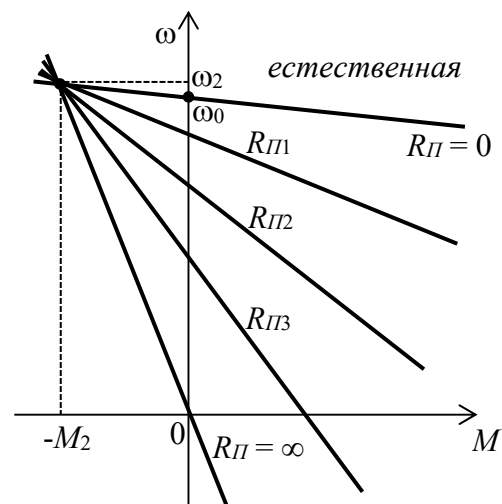
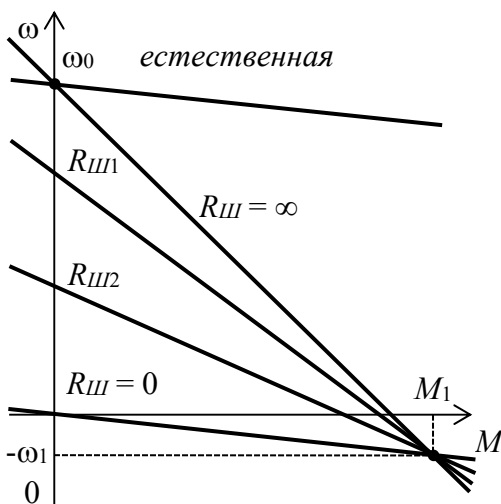


Рисунок 18 – Статические МХ ДПТ с НВ при шунтировании якоря, $R_{П} = \text{const}$, $R_{Ш} = \text{var}$ ($R_{Ш2} > R_{Ш1}$)

Рисунок 19 – Статические МХ ДПТ с НВ при шунтировании якоря, $R_{Ш} = \text{const}$, $R_{П} = \text{var}$ ($R_{П3} > R_{П2} > R_{П1}$)

При выбранных конкретных значениях $R_{П1}$ и $R_{Ш1}$ статическая механическая характеристика 1 (рисунок 20) определяется по точкам A и B с координатами:

$$M_A = \frac{-U_{Яном}}{R_{Ш1}} \cdot C_{НОМ}; \quad \omega_A = \omega_0 \cdot \left(1 + \frac{R_{Я}}{R_{Ш1}}\right);$$

$$M_B = \frac{U_{Яном}}{R_{П1}} \cdot C_{НОМ}; \quad \omega_B = \omega_0 \cdot \left(-\frac{R_{Я}}{R_{П1}}\right).$$

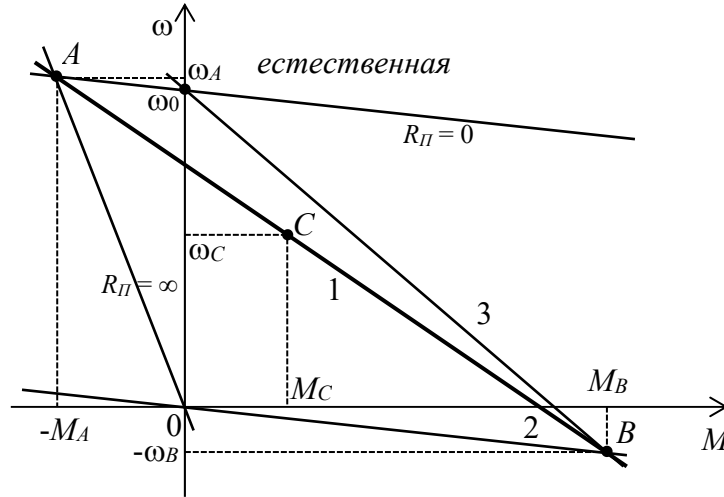


Рисунок 20 – Статические МХ ДПТ с НВ при шунтировании якоря

При заданном моменте нагрузки (статическом моменте M_C) и заданной скорости ω_C (точка C , см. рисунок 20) определение требуемых значений $R_{П1}$ и $R_{Ш1}$ производят в следующем порядке:

– задаются требуемым значением жёсткости искусственной характеристики:

$$\beta_C = \frac{\Delta M_C}{\Delta \omega_C} = \frac{M_B - M_C}{\omega_C + \omega_B}; \quad (41)$$

– через точку C проводят прямую, тангенс угла которой определяется выражением (41), до пересечения с характеристикой 2 (последняя проводится через начало координат параллельно естественной характеристике);

– соединяя точку B с точкой идеального холостого хода ($\omega = \omega_0$, $M = 0$), прямой 3 контролируют достаточность рабочей области при возможных колебаниях момента на валу;

– определяют искомые значения $R_{П1}$ и $R_{Ш1}$:

$$R_{П1} = \frac{M_B}{C_{НОМ} \cdot U_{Яном}};$$

$$\alpha = \frac{R_{Ш1}}{R_{Ш1} + R_{П1}} = \frac{C_{НОМ}^2 \cdot \omega_0 + R_{Я} \cdot M_C}{C_{НОМ} \cdot U_{ЯНОМ} - R_{П1} \cdot M_C};$$

$$R_{Ш1} = R_{П1} \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right);$$

или при известных ω_C , β_C и M_C

$$R_{П1} = \frac{U_{ЯНОМ} \cdot (C_{НОМ}^2 - R_{Я} \cdot \beta_C)}{C_{НОМ} \cdot (M_C + \omega_C \cdot \beta_C)};$$

$$\alpha = \frac{R_{Ш1}}{R_{Ш1} + R_{П1}} = \frac{C_{НОМ} \cdot (\beta_C \cdot \omega_C + M_C)}{\beta_C \cdot U_{ЯНОМ}};$$

$$R_{Ш1} = R_{П1} \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right).$$

1.8 Расчет пускового реостата для ДПТ с НВ

Прямой пуск (непосредственное подключение якоря к источнику постоянного тока) не всегда возможен, т. к. броски тока якоря могут превысить допустимые значения по условиям коммутации на коллекторе машины. Кроме того, рабочие органы многих производственных механизмов требуют осуществления пуска с заданным ускорением. В таких случаях для пуска двигателя используют дополнительные резисторы, включенные в якорную цепь двигателя, которые по мере разгона двигателя выводятся (шунтируются коммутационными аппаратами), и двигатель к концу пуска переходит на естественную характеристику. Таким образом, пуск осуществляется в несколько ступеней.

Для ДПТ с НВ пусковые сопротивления могут быть рассчитаны аналитическим и графическим методами. Аналитический метод расчета предпочтительнее, т. к. позволяет более точно осуществить расчет сопротивлений пускового реостата. Рассмотрим именно этот метод расчета.

Для расчета пускового реостата ДПТ с НВ воспользуемся пусковой диаграммой, изображённой на рисунке 21. Данная диаграмма построена для трёх ступеней пускового реостата в предположении, что момент нагрузки постоянен ($M_C = \text{const}$).

Отметим, что при расчете пусковых реостатов и построении пусковой диаграммы можно использовать как статические механические характеристики, так и статические электромеханические характеристики двигателя (если поток машины в процессе пуска остаётся величиной постоянной, т. е. $k\Phi = C = \text{const}$).

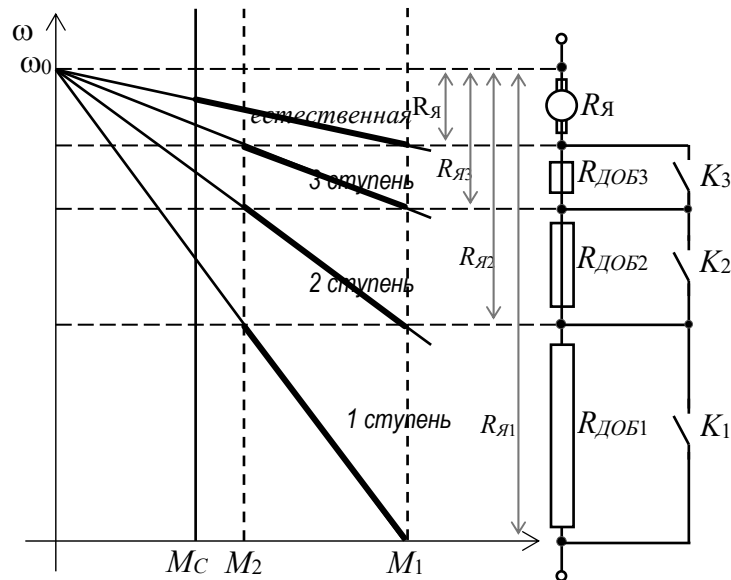


Рисунок 21 – Пусковая диаграмма двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Аналитический расчет ступеней пускового реостата проводят в следующей последовательности:

1) задаются значением пикового момента M_1 (см. рисунок 20):

– если в процессе пуска должно быть ограничено ускорение, то M_1 должен удовлетворять условию

$$M_1 \leq M_{\text{Спуск}} + M_{\text{ДИНдоп}}, \quad (42)$$

где $M_{\text{Спуск}}$ – момент нагрузки при пуске, Н·м;

$M_{\text{ДИНдоп}}$ – допустимый динамический момент при пуске, Н·м.

Для вращательного движения рабочего органа

$$M_{\text{ДИНдоп}} = J_{\text{ПР}} \cdot \varepsilon_{\text{доп}} \cdot i;$$

для поступательного движения рабочего органа

$$M_{\text{ДИНдоп}} = J_{\text{ПР}} \cdot \frac{a_{\text{доп}}}{\rho},$$

где $\varepsilon_{\text{доп}}$, $a_{\text{доп}}$ – допустимые значения ускорений;

i , ρ – передаточное отношение и радиус приведения;

– если нет ограничений на допустимое ускорение в процессе пуска, то M_1 определяют из условия

$$M_1 \leq \lambda \cdot M_{\text{ном}} = \left(\frac{I_{\text{Ядоп}}}{I_{\text{Яном}}} \right) \cdot M_{\text{ном}} = \left(\frac{I_{\text{Ядоп}}}{I_{\text{Яном}}} \right) \cdot \frac{M_{\text{доп}}}{M_{\text{ном}}}, \quad (43)$$

где λ – перегрузочная способность двигателя (справочная величина, задается в каталоге);

2) задаются значением переключающего момента M_2 , на 10 %...20 % большим значения момента статического при пуске:

$$M_2 \approx (1,1 \dots 1,2) \cdot M_{\text{Стат}};$$

3) определяют полное сопротивление якорной цепи при скорости, равной нулю, и моменте M_1 :

$$R_{\text{Я1}} = \frac{U_{\text{Я}}}{I_1} = \frac{U_{\text{Я}} \cdot k\Phi}{M_1};$$

4) для выбранных значений M_1 и M_2 определяют число ступеней пускового реостата:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{M_2}{M_1}\right)}{\ln\left(\frac{R_{\text{Я}}}{R_{\text{Я1}}}\right)}, \quad (44)$$

где $R_{\text{Я}}$ – сопротивление якоря двигателя, приведенное к рабочей температуре (см. формулу (14));

5) полученное значение числа ступеней по (44), если оно дробное, округляют до ближайшего целого числа и уточняют значение переключающего момента M_2 :

$$M_2 = M_1 \cdot \sqrt[n]{\frac{R_{\text{Я}}}{R_{\text{Я1}}}}; \quad (45)$$

6) сравнивают значение переключающего момента M_2 , вычисленного по (45), и значение момента статического при пуске $M_{\text{Стат}}$:

$$M_2 > M_{\text{Стат}}; \quad (46)$$

7) если условие (см. формулу (46)) не выполняется, то увеличивают число ступеней пускового реостата n и повторяют расчеты, начиная с п. 5;

8) при выполнении условия (см. формулу (46)) переходят к расчёту сопротивлений пусковой диаграммы (см. рисунок 21).

Полное сопротивление якорной цепи при работе двигателя на i -й ступени пускового реостата определяется по формуле

$$R_{Яi} = R_{Я1} \cdot \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{(i-1)}. \quad (47)$$

Сопротивление i -й ступени пускового реостата вычисляется по формуле

$$R_{ДОбi} = R_{Я1} \cdot \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{(i-1)} \cdot \left(1 - \frac{M_2}{M_1} \right) = R_{Яi} \cdot \left(1 - \frac{M_2}{M_1} \right), \quad (48)$$

где i – номер ступени пускового реостата (см. рисунок 21).

После расчёта сопротивлений пускового реостата по формулам (47) и (48) можно построить пусковую диаграмму (семейство статических реостатных характеристик (механических или электромеханических), на которых работает двигатель в процессе пуска). Для построения можно воспользоваться формулами (36) и (35), в которых вместо $(R_{Я} + R_{ДОб})$ нужно подставить значения сопротивлений, рассчитанные по (47).

Реостатный пуск (переключение ступеней пускового реостата) может происходить в функции любой из координат (времени, пути, тока якоря, скорости и т. п.).

Время работы на i -й реостатной характеристике пускового реостата при изменении момента от M_1 до M_2 можно приблизительно оценить (принимая индуктивность якоря равной нулю ($L_{Я} = 0$)) по формуле

$$t_i = T_{Mi} \cdot \ln \left(\frac{M_1 - M_{Спуск}}{M_2 - M_{Спуск}} \right), \quad (49)$$

где T_{Mi} – электромеханическая постоянная времени, с.

$$T_{Mi} = \frac{J_{\Sigma}}{\beta_i},$$

где J_{Σ} – суммарный приведенный момент инерции привода, кг·м²;

β_i – модуль жёсткости i -й реостатной характеристики, Н·м·с/рад.

Полное время пуска двигателя определяется как сумма интервалов времени работы двигателя на всех пусковых ступенях и времени разгона по естественной статической характеристике:

$$t_{пуск} \approx \sum T_{Mi} \cdot \ln \left(\frac{M_1 - M_{Спуск}}{M_2 - M_{Спуск}} \right) + T_M \cdot \ln \left(\frac{M_1 - M_{Спуск}}{1,05 \cdot M_{Спуск} - M_{Спуск}} \right).$$

Путь, проходимый двигателем при работе на i -й реостатной характеристике с учётом указанных допущений, можно оценить по формуле

$$\varphi_i = t_i \cdot \left(\frac{M_1 - M_{\text{пуск}}}{\beta_i} + \omega_{\text{нач}i} \right) - T_{Mi} \cdot (\omega_{\text{кон}i} - \omega_{\text{нач}i}),$$

где t_i – время разгона двигателя при его работе на i -й ступени пускового реостата (определяется по (49));

$\omega_{\text{нач}i}$, $\omega_{\text{кон}i}$ – начальная и конечная скорости двигателя при работе на i -й ступени пускового реостата:

$$\omega_{\text{нач}i} = \omega_0 - \left(\frac{M_1}{\beta_i} \right);$$

$$\omega_{\text{кон}i} = \omega_0 - \left(\frac{M_2}{\beta_i} \right).$$

Определив требуемое значение сопротивлений пускового реостата по (48) не стоит забывать, что они найдены для нагретого состояния. Для выбора сопротивлений из справочника их необходимо привести к холодному состоянию, используя (38).

2 Тормозные режимы работы ДПТ с НВ

Все рассмотренное ранее относилось к двигательному режиму работы ДПТ с НВ, когда двигатель потребляет электрическую энергию из сети постоянного тока и, преобразовав её в механическую за вычетом потерь, передаёт исполнительному органу рабочей машины.

Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением находят применение следующие тормозные режимы:

- 1) режим торможения противовключением;
- 2) режим динамического торможения;
- 3) режим рекуперативного (генераторного) торможения.

На рисунке 22 и в таблице 1 дана краткая характеристика энергетических режимов работы ДПТ с НВ.

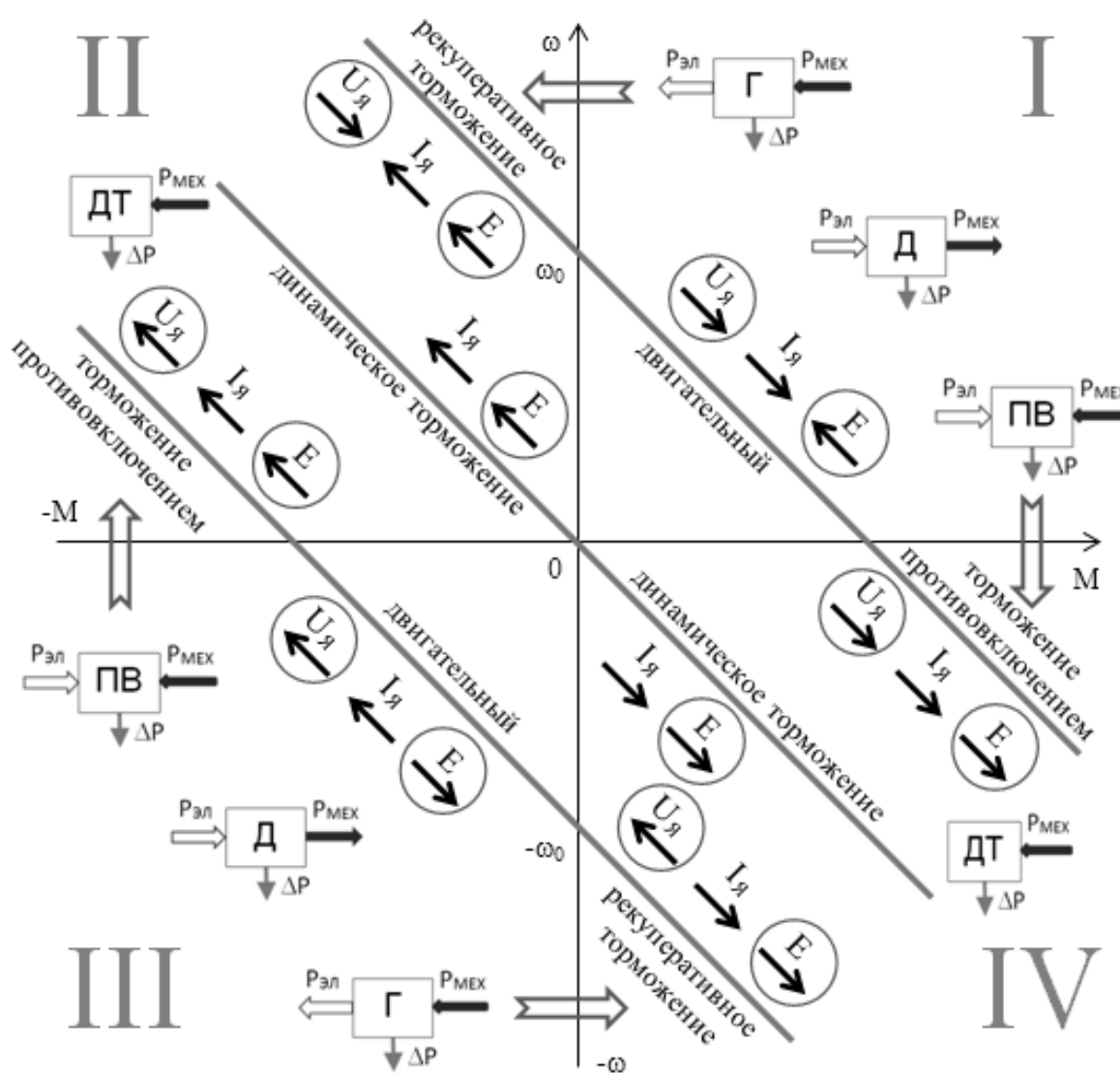
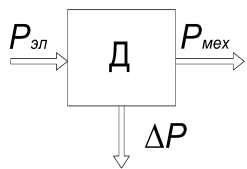
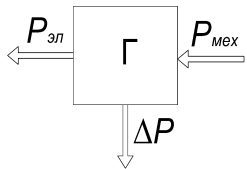
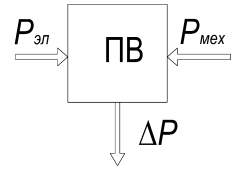
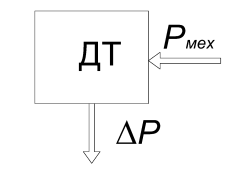


Рисунок 22 – Энергетические режимы работы ДПТ с НВ

Таблица 1 – Энергетические режимы работы ДПТ с НВ

Энергетические режимы работы ДПТ с НВ	Двигательный	Генераторный параллельно с сетью (рекуперативное торможение)	Генераторный последовательно с сетью (торможение противовключением)	Генераторный независимо от сети (динамическое торможение)
Направление потоков энергии (схема)				
Уравнение статического электрического равновесия	$U_{Я} = E + I_{Я}R_{Я}$	$E = U_{Я} + I_{Я}R_{Я}$	$U_{Я} + E = I_{Я}R_{Я}$	$E = -I_{Я}R_{Я}$
Уравнение статической электромеханической характеристики $\omega = f(I_{Я})$	$\omega = \frac{U_{Я}}{C} - \frac{R_{Я}}{C} I_{Я}$	$\omega = \frac{U_{Я}}{C} + \frac{R_{Я}}{C} I_{Я}$	$\omega = -\frac{U_{Я}}{C} + \frac{R_{Я}}{C} I_{Я}$	$\omega = -\frac{R_{Я}}{C} I_{Я}$
Уравнение статической механической характеристики $\omega = f(M)$ или $M = f(\omega)$	$\omega = \frac{U_{Я}}{C} - \frac{R_{Я}}{C^2} M$ или $M = \beta(\omega_0 - \omega)$	$\omega = \frac{U_{Я}}{C} + \frac{R_{Я}}{C^2} M$ или $M = \beta(\omega - \omega_0)$	$\omega = -\frac{U_{Я}}{C} + \frac{R_{Я}}{C^2} M$ или $M = \beta(\omega_0 + \omega)$	$\omega = -\frac{R_{Я}}{C^2} M$ или $M = -\beta\omega$
Уравнение баланса мощностей	$P_{ЭЛ} = P_{МЕХ} + \Delta P$ или $U_{Я}I_{Я} = EI_{Я} + I_{Я}^2R_{Я}$	$P_{МЕХ} = P_{ЭЛ} + \Delta P$ или $U_{Я}I_{Я} = EI_{Я} - I_{Я}^2R_{Я}$	$\Delta P = P_{МЕХ} + P_{ЭЛ}$ или $U_{Я}I_{Я} = -EI_{Я} + I_{Я}^2R_{Я}$	$P_{МЕХ} = \Delta P$ или $EI_{Я} = -I_{Я}^2 \cdot R_{Я}$
Квадранты плоскости $\{M, \omega\}$, в которых изображаются МХ и ЭМХ	I и III	II и IV	II и IV	II и IV
Характерная особенность основных режимов ДПТ с НВ	$P = M \cdot \omega \geq 0$ $0 \leq \omega \leq \omega_0 $ $\text{sign}(\omega) = \text{sign}(\omega_0)$	$P = M \cdot \omega < 0$ $ \omega \geq \omega_0 $ $\text{sign}(\omega) = \text{sign}(\omega_0)$	$P = M \cdot \omega < 0$ $\text{sign}(\omega) \neq \text{sign}(\omega_0)$	$P = M \cdot \omega < 0$ $\omega_0 = 0$
Выражение для тока якоря	$I_{Я} = \frac{U_{Я} - E}{R_{Я}}$	$I_{Я} = \frac{E - U_{Я}}{R_{Я}}$	$I_{Я} = \frac{U_{Я} + E}{R_{Я}}$	$I_{Я} = -\frac{E}{R_{Я}}$

2.1 Рекуперативное торможение ДПТ с НВ

Режим рекуперативного торможения (генераторный режим параллельно с сетью) осуществляется в том случае, когда скорость двигателя оказывается выше скорости идеального холостого хода ω_0 и его ЭДС E больше приложенного напряжения сети $U_{я}$. При этом двигатель работает генератором параллельно с сетью, которой он отдаёт электрическую энергию; ток якоря двигателя изменяет свое направление; изменяет свое направление и момент.

Уравнение механической характеристики двигателя в режиме рекуперативного торможения получается из общего выражения механической характеристики, если изменять в нем знак момента на противоположный:

$$\omega = \frac{U_{я}}{C} + \frac{R_{я}}{C^2} \cdot M. \quad (50)$$

Анализ выражения (50) показывает, что механическая характеристика двигателя в режиме рекуперативного торможения является продолжением механической характеристики двигательного режима в области квадранта II плоскости $\{M, \omega\}$.

Этот способ торможения весьма экономичен, т. к. он сопровождается отдачей энергии в сеть. Рекуперативное торможение применяется в приводах транспортных и подъемных механизмов и при некоторых способах регулирования скорости, когда двигатель, переходя к низшим скоростям, проходит значение $\omega > \omega_0$.

В режиме рекуперативного торможения ток в якоре двигателя определяется выражением

$$I_{я} = \frac{E - U_{я}}{R_{я}}. \quad (51)$$

2.2 Торможение противовключением ДПТ с НВ

Режим торможения противовключением (генераторный режим последовательно с сетью) получается в том случае, когда обмотки двигателя включены для одного направления вращения, а якорь двигателя под воздействием внешнего момента или сил инерции вращается в противоположную сторону. Это может происходить, например, в приводе подъемника (рисунок 23). В начале двигатель, работая на естественной МХ, при моменте M_C развивал скорость ω_C (точка A), затем для торможения в цепь якоря вводится добавочное сопротивление $R_{ДВ}$. Привод переходит работать на искусственную характеристику, и моменту на валу M_C соответствует статическая скорость, равная $\omega_{ДВ}$ (точка B). Но переход с рабочей точки A в точку B осуществляется только через точку C , т. к. при включении двигателя на характеристику 2 он имеет некоторую скорость (в данном случае ω_C), а этой скорости на

МХ 2 соответствует точка *C*. Таким образом, двигатель включен на подъем, а момент, развиваемый грузом, заставляет привод вращаться в сторону спуска груза. Такой же энергетический режим получается и при переключении двигателя для быстрой остановки на противоположное направление вращения путем изменения полярности напряжения, подводимого к якорю двигателя (рисунок 24).

В первом случае якорь вращается под действием груза в сторону, противоположную действию момента, развиваемого двигателем, поэтому ЭДС двигателя изменит свое направление на обратное и станет согласной приложенному напряжению сети (см. рисунок 22).

Во втором случае, благодаря кинетической энергии привода, якорь двигателя будет продолжать вращаться в том же направлении и, следовательно, он сохранит направление ЭДС, но она теперь будет направлена согласно приложенному напряжению сети (см. рисунок 22). В режиме торможения противовключением ток в якоре двигателя определяется выражением

$$I_{я} = \frac{U_{я} + E}{R_{я} + R_{ПВ}}. \quad (52)$$

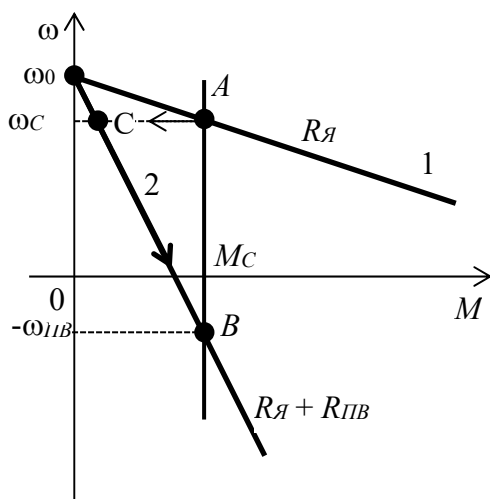


Рисунок 23 – Статические МХ ДПТ с НВ в режиме торможения противовключением при активном моменте нагрузки на валу

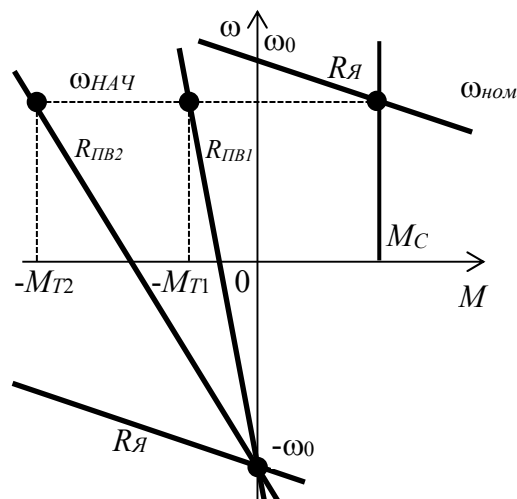


Рисунок 24 – Статические МХ ДПТ с НВ в режиме торможения противовключением при реверсе двигателя ($R_{ПВ1} > R_{ПВ2}$)

Для ограничения тока якоря до допустимой для двигателя величины $I_{ядоп}$ в цепь якоря ДПТ с НВ при торможении противовключением необходимо ввести дополнительное сопротивление $R_{ПВ}$, рассчитываемое по формуле

$$R_{ПВ} = \frac{U_{я} + E_{\max}}{I_{ядоп}} - R_{я}, \quad (53)$$

где E_{\max} – максимальное значение ЭДС двигателя.

$$E_{\max} = k \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{нач}}, \quad (54)$$

где $\omega_{\text{нач}}$ – скорость двигателя до начала торможения, рад/с.

В режиме торможения противовключением к двигателю со стороны сети подводится мощность ($P_{\text{ЭЛ}} = U_{\text{Я}} \cdot I_{\text{Я}}$), а со стороны вала – механическая ($P_{\text{МЕХ}} = E \cdot I_{\text{Я}}$) и вся она расходуется в цепи якоря на потери:

$$P_{\text{ЭЛ}} + P_{\text{МЕХ}} = I_{\text{Я}}^2 \cdot (R_{\text{Я}} + R_{\text{ПВ}}). \quad (55)$$

Этот режим обеспечивает интенсивность торможения при сравнительно мало изменяющемся тормозном моменте, но сопровождается потреблением энергии из сети и значительным нагревом двигателя.

Уравнение статической механической характеристики двигателя в режиме торможения противовключением имеет вид

$$\omega = -\frac{U_{\text{Я}}}{C} + \frac{R_{\text{Я}}}{C^2} \cdot M. \quad (56)$$

Анализ уравнения (56) показывает:

- характеристика двигателя в режиме торможения противовключением является прямолинейной;
- с уменьшением тормозного сопротивления тормозной момент двигателя возрастает;
- величина тормозного момента уменьшается со снижением угловой скорости электродвигателя.

2.3 Динамическое торможение ДПТ с НВ

Режим динамического торможения (генераторный режим независимо от сети) происходит при отключении якоря двигателя от сети и замыкании его на внешнее сопротивление (обмотка возбуждения остается подключенной к сети). При этом кинетическая энергия, запасенная в двигателе и в движущихся частях приводного им механизма, преобразуется в электрическую энергию и выделяется в виде тепла в сопротивлениях цепи якоря, т. е. машина будет работать в режиме генератора, создавая тормозной момент.

Вследствие того, что ЭДС двигателя сохраняет при торможении такой же знак, как и в двигательном режиме, а напряжение извне к якорю не прикладывается, ток якоря определяется по формуле

$$I_{\text{Я}} = \frac{E}{R_{\text{Я}} + R_{\text{ДТ}}}, \quad (57)$$

Величина тормозного сопротивления $R_{ДТ}$ рассчитывается из условия, чтобы при номинальной скорости вращения якоря его ток не превышал бы допустимого значения $I_{Доп}$ по условиям коммутации:

$$R_{ДТ} = \frac{E_{\max}}{I_{Доп}} - R_{Я}. \quad (58)$$

Уравнение механической характеристики двигателя при динамическом торможении может быть получено из общего выражения механической характеристики при $U_{Я} = 0$:

$$\omega = -\frac{R_{Я} + R_{ДТ}}{C^2} \cdot M. \quad (59)$$

Анализ выражения (59) показывает:

- механические характеристики двигателя при динамическом торможении (рисунок 25) представляют собой прямые, проходящие через начало координат;
- крутизна характеристики определяется величиной сопротивления цепи якоря;
- тормозной момент возрастает с уменьшением тормозного сопротивления;
- со снижением скорости ДПТ тормозной момент уменьшается и при скорости, равной нулю, становится также равен нулю ($\omega = 0, M_T = 0$).

Динамическое торможение используется также для получения посадочных (низких) скоростей при спуске грузов в подъемно-транспортных механизмах. С энергетической точки зрения этот способ торможения выгоднее торможения противовключением, т. к. в процессе такого торможения из сети потребляется энергия только цепью возбуждения.

При расчете статических механических характеристик двигателя следует иметь в виду различие между моментом двигателя электромагнитным и моментом на его валу. Это разные моменты. Из-за наличия механических потерь в двигателе (трение в подшипниках, вентиляционные потери) момент электромагнитный отличается от момента на валу на величину момента потерь вращения. Соотношение электромагнитного момента, момента на валу и момента потерь вращения имеет вид:

$$M = M_B \pm \Delta M, \quad (60)$$

где M – электромагнитный момент двигателя, Н·м;
 M_B – момент на валу двигателя, Н·м;
 ΔM – момент потерь вращения, Н·м.

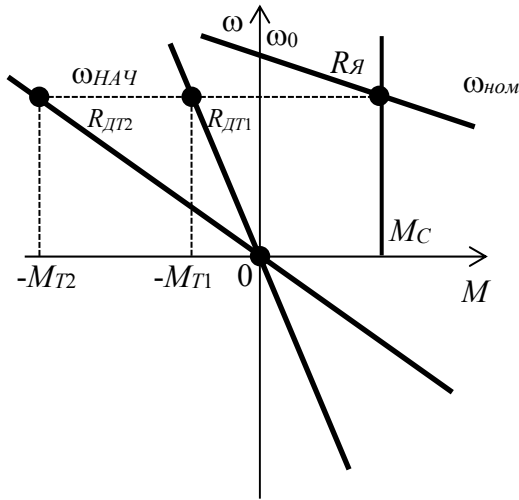


Рисунок 25 – Статические МХ ДПТ с НВ в режиме динамического торможения ($R_{ДТ1} > R_{ДТ2}$)

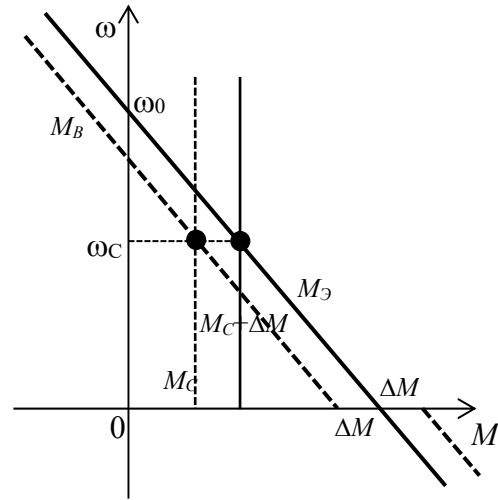


Рисунок 26 – Статические МХ ДПТ с НВ $\omega = f(M_B)$ и $\omega = f(M)$, где M – электромагнитный момент; M_B – момент на валу

При совместном рассмотрении механических характеристик механизма $\omega = f(M_C)$ и характеристик двигателя $\omega = f(M_B)$ в качестве последних следует рассматривать зависимость угловой скорости в функции момента на валу. Вместе с тем, эта зависимость имеет разрыв первого рода (рисунок 26), обусловленный влиянием момента потерь вращения. Поэтому при решении задач в области автоматизированного электропривода лучше рассматривать механические характеристики двигателя $\omega = f(M)$ (где M – электромагнитный момент), отнеся момент потерь вращения ΔM , если его величина существенная (больше 5 % от номинального момента), к нагрузке M_C или пренебрегая им в случае его малости (меньше 5 % от номинального момента).

Номинальный электромагнитный момент

$$M_{ном} = C_{ном} \cdot I_{Яном}.$$

Номинальный момент на валу

$$M_{Вном} = \frac{P_{2ном}}{\omega_{ном}}.$$

Тогда момент потерь вращения

$$\Delta M = M_{ном} - M_{Вном}.$$

3 Типовые задачи по расчету статических режимов работы ДПТ с НВ и их решение

Задача 1. Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 имеет следующие каталожные параметры:

- номинальная мощность на валу $P_{2ном} = 4$ кВт;
 - номинальное напряжение якоря $U_{Яном} = 220$ В;
 - номинальное напряжение возбуждения $U_{Вном} = 220$ В;
 - номинальный КПД двигателя равен 79 %;
 - сопротивление обмотки якоря $R_{ОЯ} = 0,56$ Ом;
 - сопротивление обмотки дополнительных полюсов $R_{ОДП} = 0,34$ Ом;
 - сопротивление обмотки возбуждения $R_{ОВ} = 134$ В;
 - номинальная частота вращения вала $n_{ном} = 1500$ об/мин;
 - класс изоляции обмоток – F;
 - сопротивления обмоток приведены для температуры 20 °С.
- Требуется определить номинальный ток якоря.

Решение

Номинальный ток якоря для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением можно найти по формуле

$$I_{Яном} = \frac{P_{2ном}}{\eta_{ном} \cdot U_{Яном}} - \frac{U_{Вном}}{k_T \cdot R_{ОВ}},$$

где $P_{2ном}$ – номинальная мощность на валу двигателя, Вт;

$\eta_{ном}$ – номинальный коэффициент полезного действия, о. е.;

$U_{Вном}$ – номинальное напряжение на обмотке возбуждения, В;

$R_{ОВ}$ – сопротивление обмотки возбуждения, Ом;

k_T – коэффициент приведения сопротивлений к нагретому состоянию.

Определим вначале коэффициент приведения сопротивлений к нагретому состоянию по формуле

$$k_T = [1 + \alpha \cdot (\theta - t^\circ)],$$

где t° – температура при измерении сопротивлений, $t^\circ = 20$ °С;

α – температурный коэффициент, для меди $\alpha = 0,004$ 1/°С;

θ – расчётное значение температуры, определяемое классом изоляции, $\theta = 90$ °С в случае класса изоляции F.

Тогда

$$k_T = [1 + 0,004 \cdot (90 - 20)] = 1,28.$$

Теперь определим ток якоря:

$$I_{Яном} = \frac{4 \cdot 10^3}{0,79 \cdot 220} - \frac{220}{1,28 \cdot 134} = 22,2 \text{ А.}$$

Ответ: номинальный ток якоря равен 22,2 А.

Задача 2. Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) определить номинальный коэффициент ЭДС и момента.

Решение

Выражение для определения номинального коэффициента ЭДС имеет вид:

$$k \cdot \Phi_{ном} = C_{ном} = \frac{U_{Яном} - I_{Яном} \cdot R_{Я}}{\omega_{ном}},$$

где $\omega_{ном}$ – номинальная угловая скорость вала двигателя, рад/с;

$R_{Я}$ – сопротивление якорной цепи двигателя, Ом.

Вычислим номинальную угловую скорость, зная частоту вращения вала двигателя:

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30} = \frac{\pi \cdot 150}{30} = 157 \text{ рад/с.}$$

Сопротивление якорной цепи определяется выражением

$$R_{Я} = k_T \cdot (R_{ОЯ} + R_{ОЩ} + R_{КО}) + R_{ЩК},$$

где $R_{ЩК}$ – сопротивление щеточного контакта, Ом.

Сопротивление щеточного контакта при условии, что щётки двигателя медно-графитовые (принимая падение напряжения $\Delta U_{Щ} = 0,6 \text{ В}$), можно найти по формуле

$$R_{ЩК} = \frac{\Delta U_{Щ}}{I_{Яном}} = \frac{0,6}{22,2} = 0,027 \text{ Ом.}$$

Тогда сопротивление якорной цепи, с учетом коэффициента приведения сопротивлений к нагретому состоянию, величина которого определена в задаче 1, будет

$$R_{Я} = 1,28 \cdot (0,56 + 0,34 + 0) + 0,027 = 1,18 \text{ Ом.}$$

Тогда номинальный коэффициент ЭДС и момента

$$k \cdot \Phi_{ном} = C_{ном} = \frac{220 - 22,2 \cdot 1,18}{157} = 1,23 \text{ В} \cdot \text{с/рад.}$$

Ответ: номинальный коэффициент ЭДС и момента равен 1,23 В·с/рад.

Задача 3. Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) определить номинальный электромагнитный момент и номинальный момент на валу, а также момент потерь вращения при номинальной угловой скорости вала двигателя.

Решение

При решении задачи воспользуемся данными задач 1 и 2. Тогда номинальный электромагнитный момент двигателя будет

$$M_{ном} = C_{ном} \cdot I_{Яном} = 1,23 \cdot 22,2 = 27,3 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Момент номинальный на валу определим как

$$M_{Вном} = \frac{P_{2ном}}{\omega_{ном}} = \frac{4 \cdot 10^3}{157} = 25,5 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Тогда момент потерь вращения

$$\Delta M = M_{ном} - M_{Вном} = 27,3 - 25,5 = 1,8 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Ответ: номинальный электромагнитный момент двигателя равен 27,3 Н·м, номинальный момент двигателя на валу – 25,5 Н·м, момент потерь вращения – 1,8 Н·м.

Задача 4. Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) определить скорость идеального холостого хода, статическое падение скорости при номинальном токе якоря и модуль жесткости естественной механической характеристики.

Решение

При решении задачи воспользуемся данными задач 1 и 2. Скорость идеального холостого хода

$$\omega_0 = \frac{U_{Яном}}{k \cdot \Phi_{ном}} = \frac{U_{Яном}}{C_{ном}} = \frac{220}{1,23} = 178,9 \text{ рад/с.}$$

Статическое падение скорости при номинальном токе якоря определим по формуле

$$\Delta\omega_{\text{ном}} = \frac{R_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{\text{яном}} = \frac{R_{\text{я}}}{C} \cdot I_{\text{яном}} = \frac{1,18}{1,23} \cdot 22,2 = 21,3 \text{ рад/с.}$$

Модуль жесткости естественной механической характеристики

$$\beta = \left| \frac{dM}{d\omega} \right| = \frac{(k \cdot \Phi)^2}{R_{\text{я}}} = \frac{C^2}{R_{\text{я}}} = \frac{1,23^2}{1,18} = 1,28 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с/рад.}$$

Ответ: скорость идеального холостого хода ДПТ с НВ равна 178,9 рад/с, статическое падение скорости при номинальном токе якоря составляет 21,3 рад/с, модуль жесткости естественной механической характеристики ДПТ с НВ равен 1,28 Н·м·с/рад.

Задача 5. Для ДПТ с НВ 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) определить скорость идеального холостого хода, ток короткого замыкания и момент короткого замыкания при напряжении на якоре двигателя 50 В.

Решение

При решении задачи воспользуемся данными задач 1 и 2. Скорость идеального холостого хода при напряжении на якоре 50 В

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{я}}}{k \cdot \Phi_{\text{ном}}} = \frac{U_{\text{я}}}{C_{\text{ном}}} = \frac{50}{1,23} = 40,7 \text{ рад/с.}$$

Ток короткого замыкания при заданном напряжении определим по формуле

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = \frac{50}{1,18} = 42,4 \text{ А.}$$

Момент короткого замыкания при заданном напряжении определим по формуле

$$M_{\text{кз}} = k \cdot \Phi_{\text{ном}} \cdot I_{\text{кз}} = C_{\text{ном}} \cdot I_{\text{кз}} = 1,23 \cdot 42,4 = 52,2 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Ответ: при напряжении на якоре 50 В скорость идеального холостого хода равна 40,7 рад/с, ток короткого замыкания – 42,4 А, момент короткого замыкания – 52,2 Н·м.

Задача 6. Для ДПТ с НВ 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) рассчитать и построить естественную электромеханическую характеристику для двигательного режима работы, учитывая двукратную перегрузочную способность двигателя по току.

Решение

Для расчёта естественной электромеханической характеристики воспользуемся выражением

$$\omega = \frac{U_{Яном}}{C_{ном}} - \frac{R_{Я}}{C_{ном}} \cdot I_{Я} ,$$

а также данными, рассчитанными в предыдущих задачах, а именно:

– определим первую точку характеристики (точку идеального холостого хода): $I_{Я} = 0$, $\omega = \omega_0 = \frac{220}{1,23} = 178,9$ рад/с;

– определим вторую точку характеристики (точку номинального режима работы): $I_{Я} = I_{Яном} = 22,2$ А, $\omega = \omega_{ном} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157$ рад/с;

– определим предельно допустимый ток якоря двигателя в установившемся режиме работы, учитывая двукратную перегрузочную способность двигателя по току: $I_{Ядоп} = \lambda_I \cdot I_{Яном} = 2 \cdot 22,2 = 44,4$ А.

По двум точкам (идеального холостого хода и номинального режима работы) построим статическую электромеханическую характеристику в первом квадранте плоскости $\{I_{Я}, \omega\}$ для интервала изменения тока якоря от нуля до предельно допустимого значения $[0 \dots I_{Ядоп}]$.

Ответ: статическая электромеханическая характеристика представлена на рисунке 27.

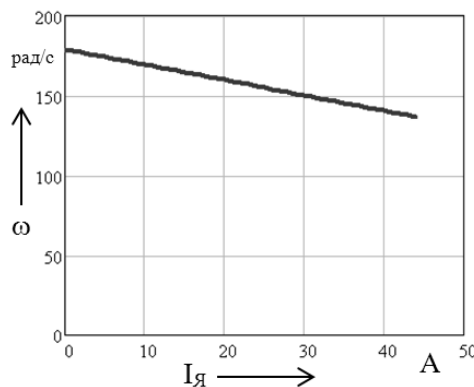


Рисунок 27 – Естественная ЭМХ ДПТ с НВ

Задача 7. Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) определить угловую скорость, с которой будет работать двигатель постоянного тока с независимым возбуждением на естественной характеристике при нагрузке на валу, равной 20 Н·м.

Решение

При решении задачи воспользуемся данными предыдущих задач. Угловую скорость двигателя, с которой он будет работать в установившемся режиме работы при $M_C = 20$ Н·м, определим, подставив в выражение статической механической характеристики момент, равный моменту нагрузки:

$$\omega_{уст} = \omega_0 - \frac{M_C}{\beta} = 178,9 - \frac{20}{1,28} = 163,3 \text{ рад/с.}$$

Ответ: установившаяся скорость вала двигателя при нагрузке 20 Н·м будет равна 163,3 рад/с.

Задача 8. Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) определить величину сопротивления, включенного в якорную цепь двигателя, для обеспечения работы двигателя со скоростью $0,5 \cdot \omega_{ном}$ при моменте нагрузки на валу $1,2 \cdot M_{ном}$. Привести схему включения двигателя для этого случая и построить реостатную механическую характеристику.

Решение

При решении задачи воспользуемся данными предыдущих задач. Определим вначале момент нагрузки M_C и требуемую статическую угловую скорость ω_C :

$$M_C = 1,2 \cdot M_{Вном} = 1,2 \cdot 25,5 = 30,6 \text{ Н·м;}$$

$$\omega_C = 0,5 \cdot \omega_{ном} = 0,5 \cdot 157 = 78,5 \text{ рад/с.}$$

Требуемое добавочное сопротивление для искусственной (реостатной) характеристики можно найти по формуле

$$R_{доб} = \frac{C_{ном} \cdot (U_{Яном} - C_{ном} \cdot \omega_C)}{M_C} - R_{я} = \frac{1,23 \cdot (220 - 1,23 \cdot 78,5)}{30,6} - 1,18 = 2,85 \text{ Ом.}$$

Для выбора добавочного сопротивления из справочника приведем его сопротивление к холодному состоянию по формуле

$$R_{доб(t^{\circ}C)} = \frac{R_{доб}}{k_T} = \frac{2,85}{1,28} = 2,2 \text{ Ом.}$$

Схема включения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением для этого случая имеет вид (рисунок 28).

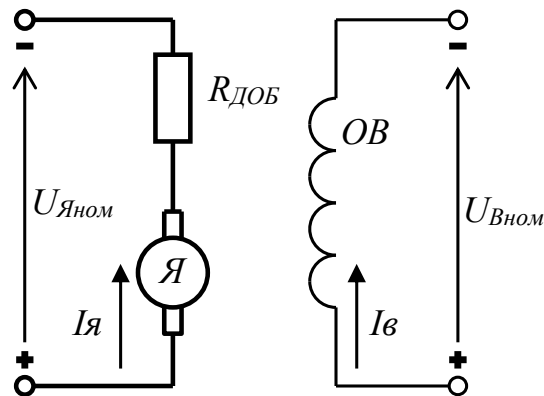


Рисунок 28 – Схема включения ДПТ с НВ при введении $R_{ДОБ}$ в цепь якоря

Выражение реостатной механической характеристики

$$\omega = \frac{U_{\text{Яном}}}{C_{\text{НОМ}}} - \frac{R_{\text{Я}} + R_{\text{ДОБ}}}{(C_{\text{НОМ}})^2} \cdot M.$$

Для построения реостатной механической характеристики определим две точки этой характеристики, а именно:

- точку идеального холостого хода: $M = 0$, $\omega = \omega_0 = 178,9$ рад/с;
- точку статического режима работы: $M = M_c = 30,6$ А, $\omega = \omega_c = 78,5$ рад/с.

Определим предельно допустимый момент двигателя, в установившемся режиме работы, учитывая двукратную перегрузочную способность двигателя по току:

$$M_{\text{дон}} = \lambda_I \cdot M_{\text{ном}} = 2 \cdot 27,3 = 54,6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

По двум точкам (идеального холостого хода и статического режима работы) построим реостатную механическую характеристику в первом квадранте плоскости $\{M, \omega\}$ для интервала изменения момента двигателя от нуля до предельно допустимого значения $[0 \dots M_{\text{дон}}]$.

Ответ: для обеспечения работы двигателя со скоростью $0,5 \cdot \omega_{\text{ном}}$ при моменте нагрузки на валу $1,2 \cdot M_{\text{ном}}$ в якорную цепь двигателя нужно ввести добавочное сопротивление $R_{\text{ДОБ}}$, величина которого в холодном состоянии равна 2,2 Ом. Статическая механическая характеристика при этом приведена на рисунке 29 (характеристика 2). Схема включения ДПТ с НВ при введении $R_{\text{ДОБ}}$ в цепь якоря отображена на рисунке 28.

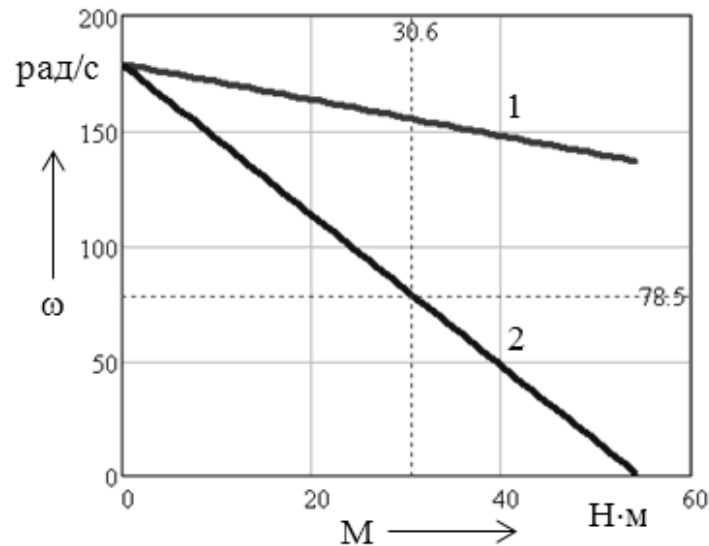


Рисунок 29 – Естественная механическая характеристика 1 и реостатная механическая характеристика 2 ДПТ с НВ при введении в цепь якоря $R_{доб} = 2,85 \text{ Ом}$

Задача 9. Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) определить величину напряжения на якоре двигателя для обеспечения работы двигателя со скоростью $0,3 \cdot \omega_{ном}$ при моменте нагрузки на валу $1,5 \cdot M_{ном}$.

Решение

При решении задачи воспользуемся данными предыдущих задач. Определим вначале момент нагрузки M_C и требуемую статическую угловую скорость ω_C :

$$M_C = 1,5 \cdot M_{Вном} = 1,5 \cdot 25,5 = 38,25 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$\omega_C = 0,3 \cdot \omega_{ном} = 0,3 \cdot 157 = 47,1 \text{ рад/с}.$$

Требуемое напряжение на якоре найдём по формуле

$$U_{я} = C_{НОМ} \cdot \omega_C + \left(\frac{R_{я}}{C_{НОМ}} \right) \cdot M_C = 1,23 \cdot 47,1 + \left(\frac{1,18}{1,23} \right) \cdot 38,25 = 94,6 \text{ В}.$$

Ответ: для обеспечения работы двигателя со скоростью $0,3 \cdot \omega_{ном}$ при моменте нагрузки на валу $1,5 \cdot M_{ном}$ на якорь двигателя необходимо подать напряжение, равное 94,6 В.

Задача 10. Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) работает на естественной механической характеристике с моментом статическим, приведенным к валу двигате-

ля, равным $1,4 \cdot M_{ном}$. Якорь двигателя отключают от сети и замыкают на сопротивление $R_{дт}$, обмотка возбуждения остается подключенной к сети. Определить величину сопротивления $R_{дт}$, которое необходимо включить, чтобы обеспечить начальный тормозной момент двигателя, равный $2 \cdot M_{ном}$.

Решение

При решении задачи воспользуемся данными предыдущих задач. Определим вначале момент нагрузки M_C и начальный тормозной момент $M_{доп}$:

$$M_C = 1,4 \cdot M_{Вном} = 1,4 \cdot 25,5 = 37,5 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{доп} = 2 \cdot M_{Вном} = 2 \cdot 25,5 = 51 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

При данной нагрузке угловая скорость вала двигателя (а это и есть начальная скорость для режима динамического торможения) при его работе на естественной механической характеристике будет определяться выражением

$$\omega_{нач} = \omega_0 - \frac{M_C}{\beta} = 178,9 - \frac{37,5}{1,28} = 149,6 \text{ рад/с}.$$

Величина тормозного сопротивления $R_{дт}$ рассчитывается из условия, чтобы при начальной скорости вращения вала двигателя его момент не превышал бы допустимого значения $M_{доп}$:

$$R_{дт} = \frac{C_{ном}^2 \cdot \omega_{нач}}{M_{доп}} - R_я = \frac{1,23^2 \cdot 149,6}{51} - 1,18 = 3,25 \text{ Ом}.$$

Для выбора добавочного сопротивления из справочника приведём его сопротивление к холодному состоянию по формуле

$$R_{дт(t^{\circ}C)} = \frac{R_{дт}}{k_T} = \frac{3,25}{1,28} = 2,5 \text{ Ом}.$$

Ответ: величина сопротивления $R_{дт}$, на которое необходимо замкнуть якорную цепь двигателя, чтобы обеспечить начальный тормозной момент двигателя, равный $2 \cdot M_{ном}$ в режиме динамического торможения, равна 2,5 Ом.

Список литературы

- 1 **Фираго, Б. И.** Теория электропривода: учебное пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – 2-е изд. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.
- 2 **Ключев, В. И.** Теория электропривода: учебник / В. И. Ключев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.: ил.
- 3 **Ильинский, Н. Ф.** Общий курс электропривода / Н. Ф. Ильинский, В. Ф. Козаченко. – Москва: Энергоатомиздат, 1992. – 543 с.
- 4 **Москаленко, В. В.** Электрический привод: учебник / В. В. Москаленко. – Москва: ИНФРА-М, 2022. – 364 с.
- 5 **Онищенко, Г. Б.** Теория электропривода: учебник / Г. Б. Онищенко. – Москва: ИНФРА-М, 2018. – 384 с.: ил.
- 6 Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1. – 456 с.: ил.

Приложение А (обязательное)

Индивидуальное задание по расчету статических характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Согласно варианту, выданному преподавателем, выбрать из справочника ДПТ с НВ и выписать все его параметры.

Требуется:

1) рассчитать и построить естественные электромеханическую и механическую характеристики выбранного двигателя (максимальное значение тока якоря принять равным $2 \cdot I_{яном}$);

2) определить величину сопротивления, включенного в якорную цепь двигателя, для обеспечения работы двигателя со скоростью $A \cdot \omega_{ном}$ при моменте нагрузки на валу $B \cdot M_{ном}$. Привести схему двигателя для этого случая и построить реостатную механическую характеристику;

3) определить напряжение, которое необходимо подать на якорь двигателя, для обеспечения работы двигателя со скоростью $A \cdot \omega_{ном}$ при моменте нагрузки на валу $B \cdot M_{ном}$. Построить полученную механическую характеристику;

4) двигатель работает на естественной механической характеристике с моментом статическим, приведенным к валу двигателя равным $C \cdot M_{ном}$. Якорь двигателя отключают от сети и замыкают на сопротивление $R_{доб}$. обмотка возбуждения остается подключенной к сети.

Определить:

а) величину сопротивления $R_{доб}$, которое необходимо включить, чтобы обеспечить начальный тормозной момент двигателя, равный $D \cdot M_{ном}$;

б) скорость, с которой будет вращаться двигатель после окончания переходного процесса, если коэффициент полезного действия механизма равен 0,85, а момент нагрузки $C \cdot M_{ном}$ – активный;

5) решение п. 4 проиллюстрировать графиками статических механических характеристик;

б) определить величину сопротивления, включенного в цепь обмотки возбуждения двигателя, для обеспечения работы двигателя со скоростью $C \cdot \omega_{ном}$ при моменте нагрузки на валу $A \cdot M_{ном}$. Привести схему двигателя для этого случая и построить статические электромеханическую и механическую характеристики;

7) определить величину сопротивления противовключением, включенное в цепь якоря двигателя, чтобы момент, допустимый при реверсе и номинальной нагрузке на валу, не превысил величину $D \cdot M_{ном}$.