

Лекция №9 по дисциплине «Электрический привод»

Тема: «Пуск, торможение и реверс
двигателя постоянного тока»



Пуск ДПТ НВ

При пуске двигателя независимого возбуждения необходимо обеспечивать надежность и безопасность двигателя. В первую очередь должна быть подключена обмотка возбуждения и предусмотрена защита от обрыва поля. При отсутствии потока не создается ЭДС, и потому в цепи якоря может остаться только невыключаемое сопротивление. Возникающий в этом случае ток короткого замыкания может вывести двигатель из строя.

Если магнитный поток, создаваемый ОВ спадет до 0 во время работы ДПТ НВ, то двигатель уходит в разнос. (**Разнос двигателя** — нештатный режим работы электродвигателя, при котором происходит неуправляемое повышение частоты вращения выше допустимой)

Технологические требования, предъявляемые к пуску:

– **форсированный** пуск (минимальное время пуска при отсутствии других ограничений), который обеспечивается максимальным пусковым моментом, ограничиваемым допустимым током по условиям коммутации $I_{\text{доп}} = (2 \dots 2,5) \cdot I_{\text{н}}$;

– пуск **с ограничением по ускорению** рабочего органа $a_{\text{доп}}$. Ограничение по ускорению обеспечивается приведенным к валу двигателя динамическим моментом, величина которого рассчитывается по формуле

$$a_{\text{доп}} = \frac{dv}{dt} = \frac{d(\omega_{\text{РО}} \cdot R)}{dt} = \frac{R}{i_{\text{ред}}} \cdot \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{\text{доп}} ; M_{\text{доп}} = J \cdot \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{\text{доп}} = \frac{J \cdot a_{\text{доп}} \cdot i_{\text{ред}}}{R} ;$$

$$M_{\text{макс}} = M_{\text{дин.доп}} + M_{\text{с}}.$$

Технологические требования, предъявляемые к пуску:

– **нормальный пуск** (время пуска не регламентируется, редкие пуски), который обеспечивается условием: $M \geq 1,2 \cdot M_C$, чтобы двигатель только разогнался.

Способы пуска ДПТ НВ:

– постепенным увеличением напряжения на якоре, для чего используются различные преобразователи напряжения (эти способы будут изучаться позднее);

– при питании двигателя от сети неизменного напряжения напряжение подается на якорь скачком, поэтому необходимо ограничить скачок тока якоря допустимым значением по условиям коммутации $I_{\text{доп}} = (2 \dots 2,5) \cdot I_N$ введением на время пуска добавочного сопротивления $R_{\text{доб}}$.

Реостатный пуск ДПТ НВ:

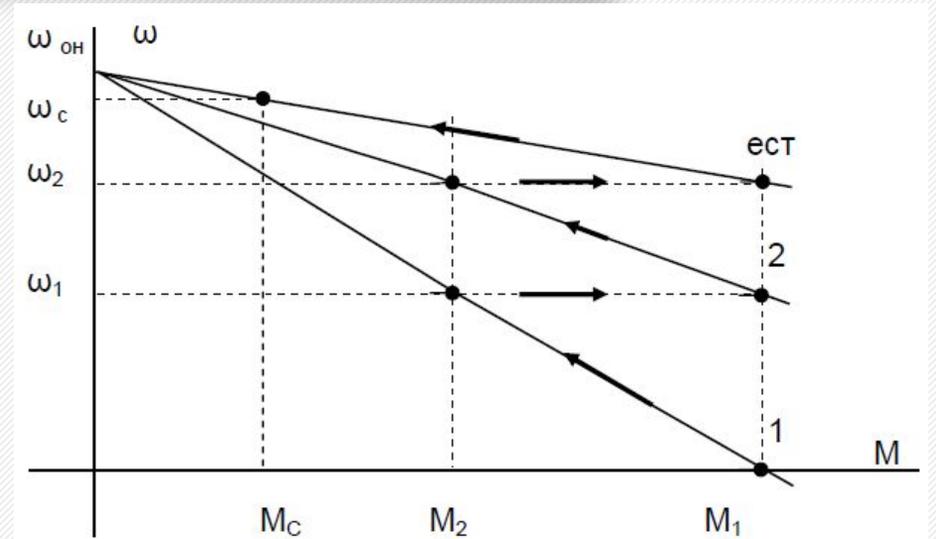
При замыкании контактора КЛ протекает ток I_1 через обмотку якоря и добавочные сопротивления $R_{1\text{доб}}$ и $R_{2\text{доб}}$, создается момент M_1 . Двигатель разгоняется по характеристике 1, ток якоря снижается, и при скорости ω_1 и моменте переключения M_2 включается контактор $KУ_1$, шунтируя $R_{1\text{доб}}$. Двигатель переводится на характеристику 2. Ток якоря вновь увеличивается до значения I_1 , момент – до M_1 . Происходит разгон по характеристике 2 до скорости ω_2 , где при моменте переключения M_2 включается контактор $KУ_2$, переводя двигатель на естественную характеристику. На этой характеристике продолжается разгон до скорости ω_c , где при $M = M_c$ двигатель переходит в установившийся режим работы. В процессе разгона двигателя добавочное сопротивление уменьшают по величине, обеспечивая переключение ступеней пусковых сопротивлений по правильной пусковой диаграмме. Переключение ступеней выполняется автоматически в функции времени, тока, скорости.

Порядок расчета правильной пусковой диаграммы аналитическим методом:

— по заданному способу пуска (форсированный, с допустимым ускорением, нормальный) определяется момент M_1 (или M_2);

— при $\omega = 0$ рассчитывается $R = U_H / I_1$, где $I_1 = M_1 / k \cdot \Phi_H$;

— разбивается $R_{\text{доб}}$ на ступени, обеспечивая правильную пусковую диаграмму. Современные станции управления выпускают с двумя – тремя ступенями. При увеличении числа ступеней растут габариты и стоимость установки, но снизить время пуска не удастся, так как каждый аппарат обладает конечным быстродействием.



Порядок расчета правильной пусковой диаграммы аналитическим методом:

При $\omega = \omega_1$ токи якоря

$$I_2 = \frac{(U_H - E_1)}{R_1}, I_1 = \frac{(U_H - E_1)}{R_2}, \text{ тогда } \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

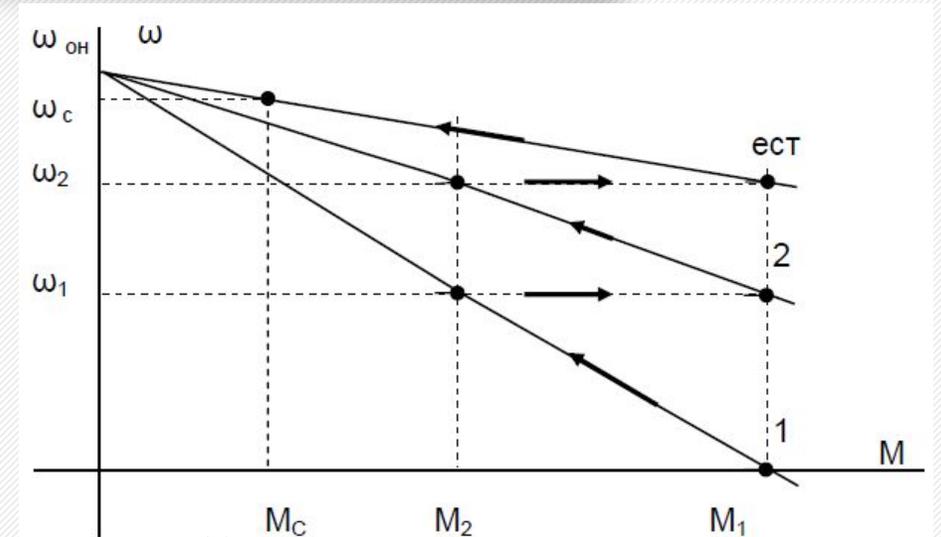
При $\omega = \omega_2$ токи якоря

$$I_2 = \frac{(U_H - E_2)}{R_2}, I_1 = \frac{(U_H - E)}{r_{\text{я}}}, \text{ тогда } \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1}{r_{\text{я}}}.$$

В общем случае и при большем числе ступеней отношение токов и сопротивлений остается величиной постоянной

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_2}{R_3} = \dots = \frac{R_m}{r_{\text{я}}} = \lambda,$$

$$R_1 = \lambda \cdot R_2 = \lambda^2 \cdot R_3 = \dots = \lambda^m \cdot r_{\text{я}}.$$



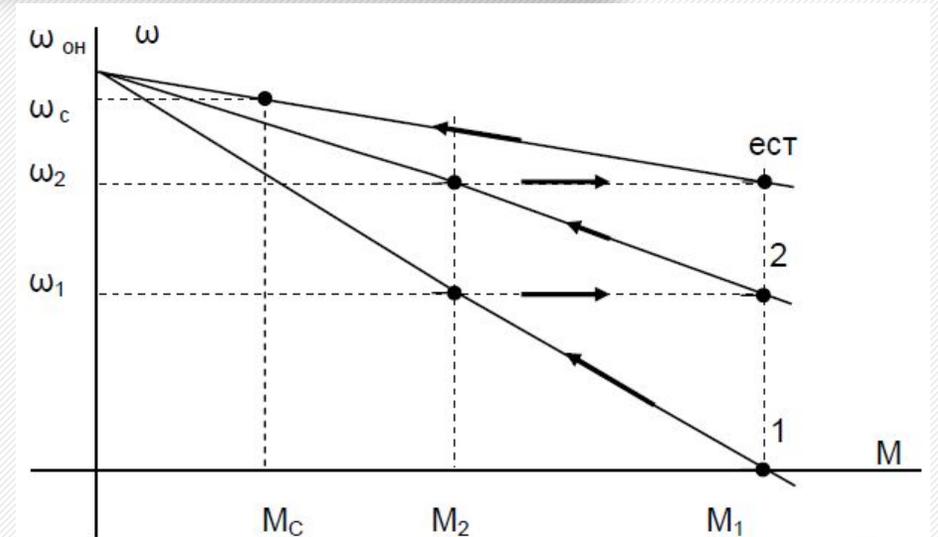
Порядок расчета правильной пусковой диаграммы аналитическим методом:

Отношение максимального момента M_1 к моменту переключения M_2 :

$$\lambda = \frac{I_1}{I_2} = \frac{M_1}{M_2} = m \sqrt{\frac{R_1}{r_{\text{я}}}}$$

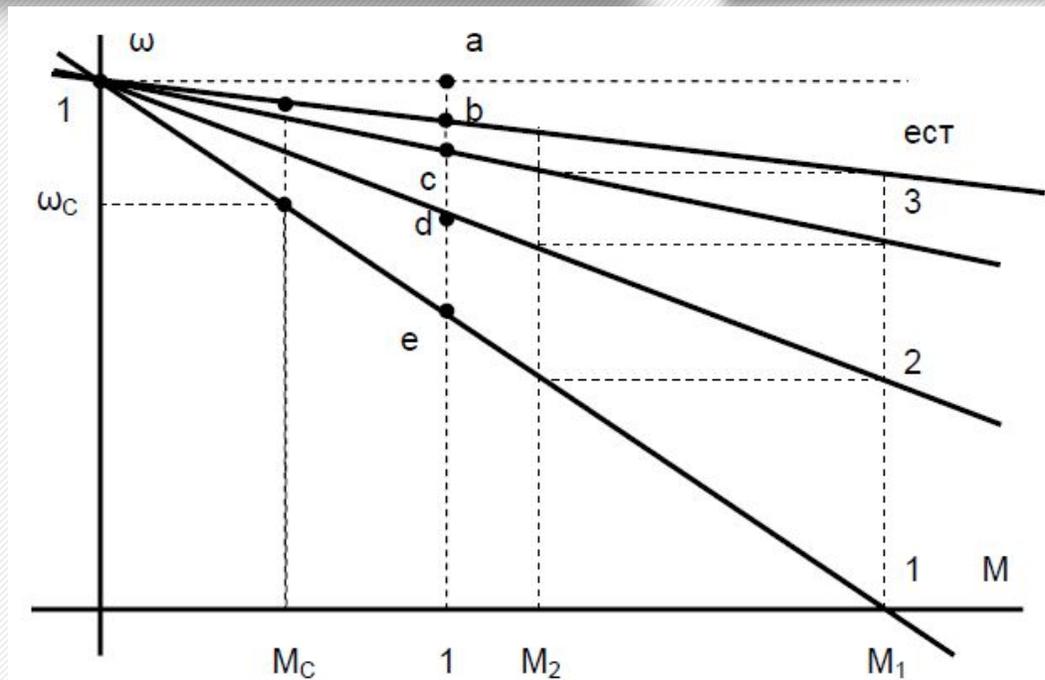
Необходимо убедиться, что $M_2 \geq 1,2 \cdot M_C$.
Если не выполняется, то придется увеличить число ступеней m , если $M_1 = M_{\text{МАКС ДОП}}$.

Таким образом, для разбиения $R_{\text{ДОБ}} = R_1$ на ступени задаемся током I_1 , числом ступеней m и определяем $\lambda = I_1 / I_2$. По величине λ рассчитываем полные сопротивления на пусковых характеристиках: R_1 – на характеристике 1; $R_2 = R_1 / \lambda$ – на характеристике 2; $R_3 = R_2 / \lambda = R_1 / \lambda^2$ – на характеристике 3 и т.д. Сопротивления ступеней: $R_{1\text{ДОБ}} = R_1 - R_2$; $R_{2\text{ДОБ}} = R_2 - r_{\text{я}}$



Расчет пусковой диаграммы можно выполнить **графическим** методом:

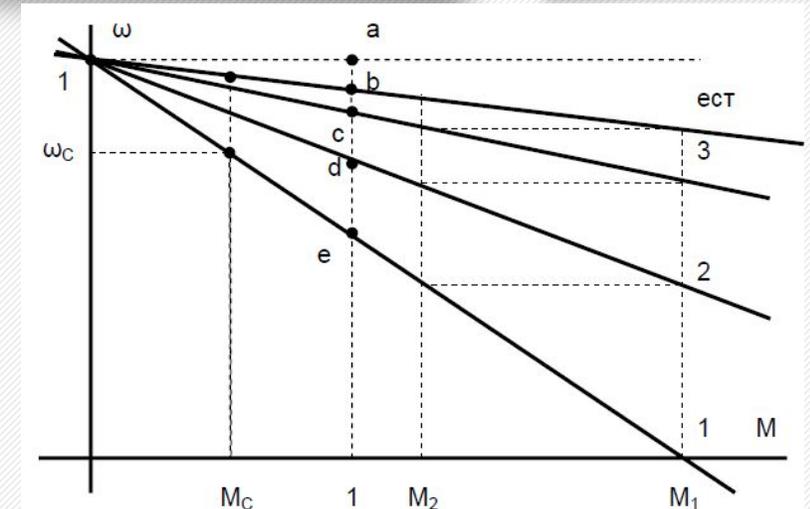
Следует отметить приближенность графического метода расчета для двигателя с прямолинейными механическими характеристиками по сравнению с аналитическим методом, рассмотренным выше. Однако для двигателя с нелинейными механическими характеристиками без графического метода не обойтись. Расчет графическим методом проще вести в о.е.



1. Строится естественная механическая характеристика.
2. Задаем токами I_1 и I_2 (или моментами M_1^* и M_2^* , в о.е. они равны).

Расчет пусковой диаграммы можно выполнить графическим методом:

3. Методом подбора строится правильная пусковая диаграмма таким образом, чтобы переход на естественную характеристику совпал с моментом M_1^* . Если моменты не совпали, вновь задаются моментом переключения M_2^* и повторяют построение, и так до совпадения моментов.



4. После построения правильной пусковой диаграммы при $M^* = 1$ измеряют отрезки, пропорциональные добавочным сопротивлениям в долях от известной величины невыключаемого сопротивления якоря $ab \equiv r_{я}$, $bc \equiv R_{3ДОБ}$, $cd \equiv R_{2ДОБ}$, $de \equiv R_{1ДОБ}$, и рассчитывают сопротивления ступеней:

$$R_{1ДОБ} = r_{я} \cdot \frac{de}{ab}, \quad R_{2ДОБ} = r_{я} \cdot \frac{cd}{ab}, \quad R_{3ДОБ} = r_{я} \cdot \frac{bc}{ab}.$$

Тормозные режимы ДПТ НВ:

Тормозным называют режим работы, когда двигатель избыточную механическую энергию превращает в электрическую, когда двигатель переводится в генераторный режим. Источниками избыточной механической энергии являются потенциальная энергия, запасенная поднятым грузом механизма подъема или движущимся под уклон транспортным механизмом, и избыточная кинетическая энергия, создаваемая при снижении скорости движущимися инерционными массами.

С технологической точки зрения рассматривают тормозные режимы:

- **торможение на спуске**, обеспечивающее поддержание скорости двигателя и механизма при движении на спуске (действительно для активного статического момента);
- **торможение на выбеге**, обеспечивающее торможение с целью остановки привода, обеспечивающее заданное время остановки двигателя (ТВ).

Рекуперативное торможение:

- Рекуперативным торможением, или просто рекуперацией, принято называть генераторное торможение с отдачей энергии в сеть. При работе в двигательном режиме двигатель потребляет ток I из сети (сплошные стрелки на рисунке). Для отдачи энергии в сеть ток якоря должен изменить направление (пунктирные стрелки $I < 0$).
- Кроме того, необходимо иметь в сети потребителя этой энергии, при этом напряжение потребителя U должно быть направлено встречно ЭДС E двигателя, работающего генератором, и должно быть меньше по величине $U < E$. Таким образом, режим рекуперации предусматривает параллельное включение сети и генератора.

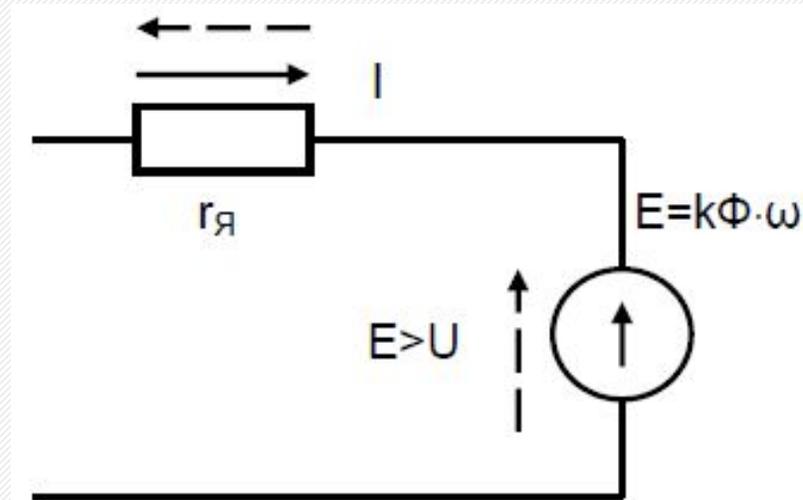


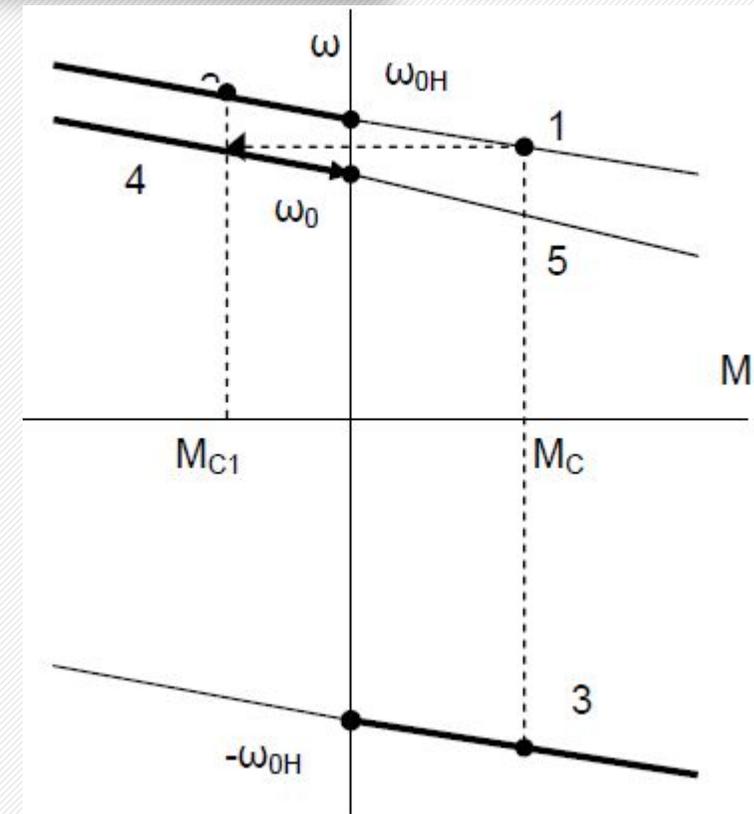
Схема замещения ДНВ
— двигатель; --- генератор

$$I = (U - E) / R_я$$

Рекуперативное торможение:

1. Движение транспортного средства под уклон – в этом случае при одном знаке скорости изменяется знак статического момента от M_C на $M_{C1} < 0$. Двигатель на естественной характеристике переходит из точки 1 двигательного режима при подъеме в точку 2 режима рекуперации (режим торможения на спуске).

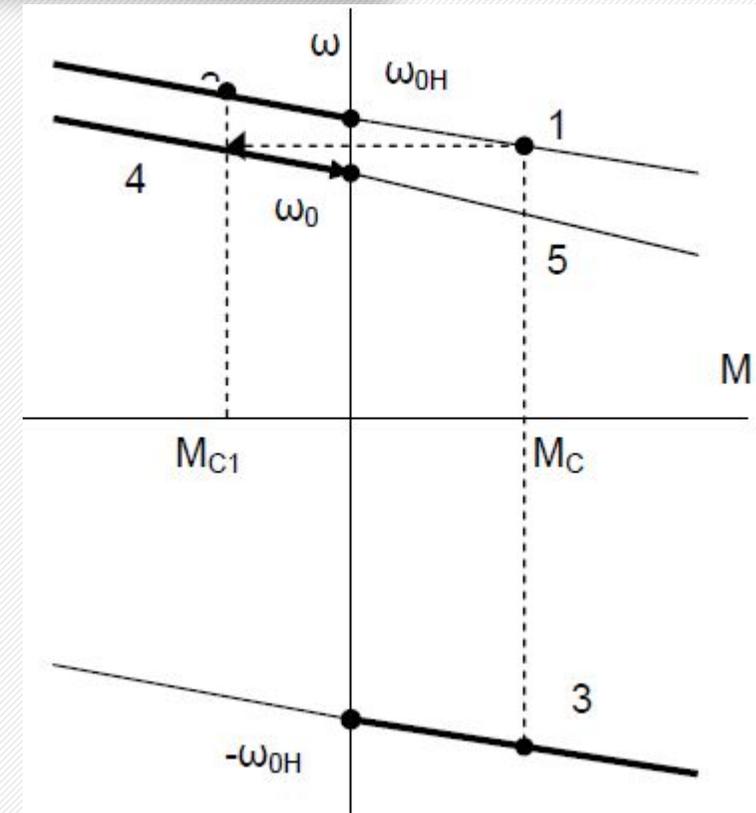
2. Спуск груза – при неизменном знаке M_C двигатель реверсируется и под действием груза вращается с установившейся скоростью (в точке 3) выше скорости идеального холостого хода ($\omega > \omega_{0H}$).



$$I = (U - E) / R_{я}$$

Рекуперативное торможение:

3. При снижении напряжения на якоре (вариант питания двигателя от индивидуального преобразователя) снижается скорость идеального холостого хода $\omega_0 < \omega_{0H}$. Двигатель из-за механической инерции не может мгновенно изменить скорость и осуществляется переход из точки 1 двигательного режима работы в точку 4 режима рекуперации. При таком переходе создается отрицательный момент двигателя, динамический момент так же отрицательный, поэтому скорость двигателя начинает снижаться, момент двигателя уменьшается и стремится к M_C в точку 5. На участке механической характеристики – от точки 4 до ω_0 – двигатель работает в режиме рекуперативного торможения, обеспечивая торможение на выбеге – торможение с целью остановки.



$$I = (U - E) / R_{я}$$

Рекуперативное торможение:

Достоинства режима РТ:

- жёсткие механические характеристики обеспечивают возможность получения устойчивой скорости спуска при значительных изменениях момента;
- высокая экономичность, избыточная электрическая энергия возвращается в сеть и может быть использована другим механизмом;

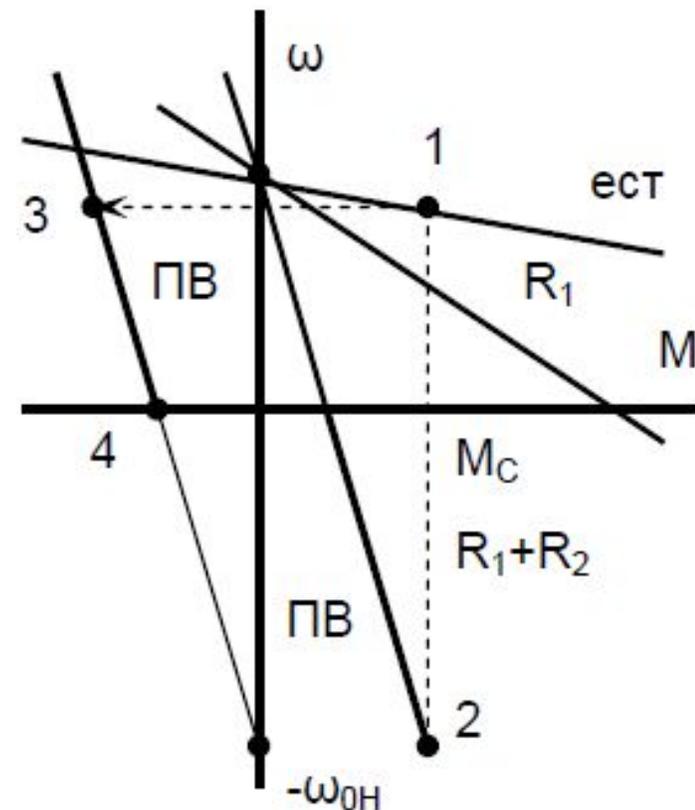
Недостатки режима РТ:

- сложность осуществления данного режима при питании ДНВ от сети постоянного напряжения;
- необходим потребитель энергии рекуперации. Если потребитель энергии рекуперации отсутствует, по цепи якоря ток не протекает, не создается тормозной момент, груз падает (!?).

Область применения РТ: грузоподъемные механизмы (краны, лифты и т.п.); электрический транспорт; системы с индивидуальным преобразователем (ТП – Д, Г – Д).

Торможение противовключением:

Режим противовключения – тормозной режим, когда двигатель включён для одного направления вращения, но под действием внешних сил вращается в противоположную сторону. Пусть двигатель работает в точке 1 с активным статическим моментом M_C . При введении в цепь якоря добавочного сопротивления R_1 скорость движения снизится, но если увеличить добавочное сопротивление до $(R_1 + R_2)$, то $M_C > M_{кз}$, и активный статический момент M_C заставит двигатель вращаться в противоположном направлении в точке 2. В точке 2 при неизменном направлении тока изменилось направление вращения двигателя, знак E поменялся на обратный и стал совпадающим с напряжением сети. Теперь генератор работает последовательно с сетью, для ограничения тока якоря величина этих сопротивлений должна быть увеличена



$$I = (U + E) / R_{я}$$

Торможение противовключением:

Достоинства торможения ПВ: интенсивное торможение до полной остановки; простота осуществления (включение добавочного сопротивления).

Недостатки режима: очень мягкие характеристики (существенное изменение скорости спуска при изменении массы груза); энергия из сети и энергия с вала двигателя идет на потери (неудовлетворительная энергетика); необходимость отключения привода при скорости, близкой к нулю из-за опасности разворота в обратную сторону.

Область применения режима распространяется на двигатели относительно небольшой мощности (до 100 кВт), где потери относительно не велики, а простота осуществления режима имеет существенное значение (крановое хозяйство и простейшие механизмы с низкими технологическими требованиями).

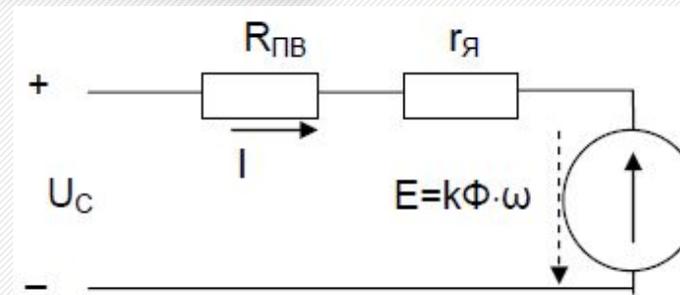


Схема замещения ДНВ в режиме торможения противовключением

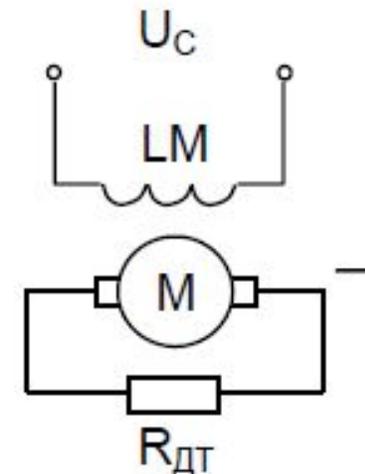
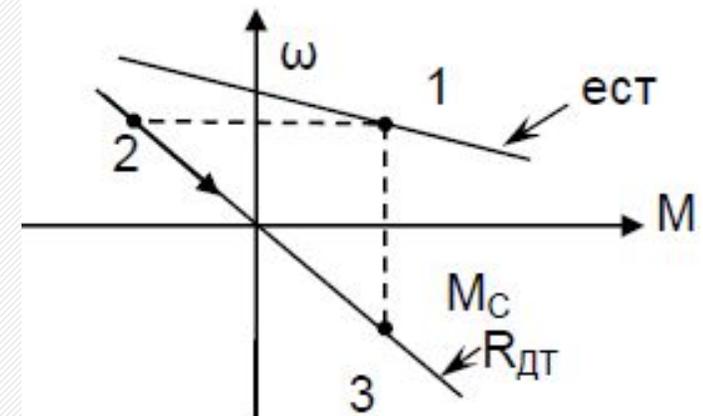
$$I = (U + E) / R_{\text{я}}$$

Динамическое торможение:

Режимом динамического торможения называют режим торможения двигателя, при котором обмотка возбуждения остаётся подключенной к сети, а якорь двигателя отключается от сети и замыкается на добавочное сопротивление ($R_{дт}$), а в некоторых случаях для обеспечения низких скоростей спуска – просто закорачивается ($R_{дт} = 0$).

Двигатель работает в точке 1 двигательного режима. Для получения режима динамического торможения необходимо отключить контакторы направления КВ, КН и включить контактор динамического торможения КД.

$$I = E / R_{я}$$



Динамическое торможение:

ДТ занимает промежуточное положение между РТ и ПВ почти по всем показателям:

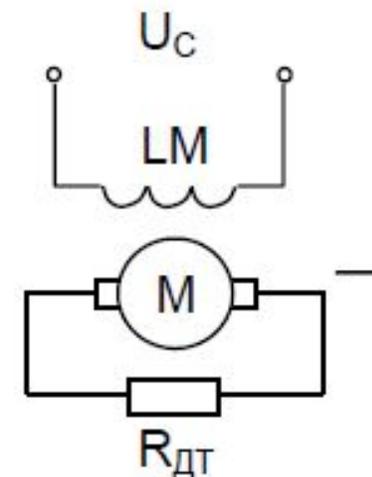
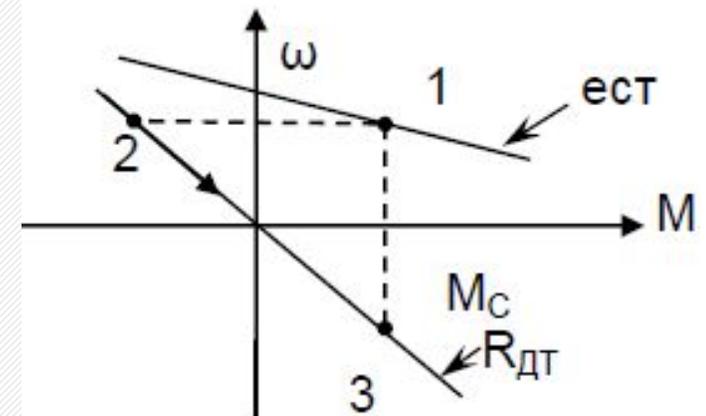
- в энергетике – избыточная энергия в сеть не отдаётся (как при РТ), но и не потребляется из сети (как при ПВ);

- точность поддержания скорости на спуске – характеристики жёстче, чем в режиме ПВ, но мягче, чем при РТ;

- интенсивность торможения ниже, чем при противовключении, по мере снижения скорости тормозной момент падает;

Важное достоинство – возможность точной остановки при реактивном статическом моменте.

Область применения – нереверсивный привод, в реверсивном – при необхоточной остановки.



Реверс ДПТ НВ:

Реверсирование — изменение направления вращения двигателя — производится путем изменения направления действия вращающего момента. Для этого требуется изменить направление магнитного потока двигателя постоянного тока, т. е. переключить обмотку возбуждения или якорь, при этом в якоре будет протекать ток другого направления. При переключении и цепи возбуждения, и якоря направление вращения останется прежним.

Обмотка возбуждения двигателя параллельного возбуждения имеет значительный запас энергии: постоянная времени обмотки составляет секунды для двигателей больших мощностей. Значительно меньше постоянная времени обмотки якоря. Поэтому для того чтобы реверсирование проходило возможно быстрее, производится переключение якоря. Только там, где не требуется быстроедействие, можно выполнять реверсирование путем переключения цепи возбуждения.

Реверс ДПТ СВ, ДПТ ШВ, ДПТ ПВ:

Реверсирование двигателей последовательного возбуждения можно производить переключением или обмотки возбуждения, или обмотки якоря, так как запасы энергии в обмотках возбуждения и якоря невелики и их постоянные времени относительно малы.

При реверсировании двигателя с параллельным возбуждением якорь сперва отключается от источника питания и двигатель механически тормозится или переключается для торможения. После окончания торможения якорь переключается, если он не был переключен в процессе торможения, и выполняется пуск при другом направлении вращения.

В такой же последовательности производится и реверсирование двигателя последовательного возбуждения: отключение — торможение — переключение — пуск в другом направлении. У двигателей со смешанным возбуждением при реверсировании следует переключить якорь либо последовательную обмотку вместе с параллельной.

Задача:

Рассчитать *трехступенчатый* пусковой реостат ($Z = 3$) для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, технические данные которого: $P_{ном} = 7,1$ кВт; $U_{ном} = 220$ В; $n_{ном} = 750$ об/мин; $r_я = 0,48$ Ом; $\eta_{ном} = 83,5$ %. Режим пуска *форсированный*.

Решение:

- 1. Ток якоря в номинальном режиме:** $I_{ном} = \frac{P_{ном}}{U_{ном} \cdot \eta_{ном}};$
- 2. Принимаем значение пускового тока:** $I_{пуск} = 1,4I_{ном};$
- 3. Номинальное сопротивление двигателя:** $R_{ном} = U_{ном} / I_{ном};$
- 4. Отношение начального пускового тока к току переключений:** $\lambda = \sqrt[Z]{U_{ном} / (I_{пуск} \cdot r_я)}$
- 5. Сопротивление резисторов реостата:** $r_3 = r_я (\lambda - 1); \quad r_2 = r_3 \lambda; \quad r_1 = r_2 \lambda;$

Решение задачи:

1. Ток якоря в номинальном режиме: $I_{ном} = \frac{P_{ном}}{U_{ном} \cdot \eta_{ном}} = \frac{7100}{220 \cdot 0,835} = 38,6 A$
2. Принимаем значение пускового тока: $I_{пуск} = 1,4 \cdot 38,6 = 54 A$
3. Номинальное сопротивление двигателя: $R_{ном} = U_{ном} / I_{ном} = 220 / 38,6 = 5,7 Ом$
4. Отношение начального пускового тока к току переключений:

$$\lambda = \sqrt[3]{U_{ном} / (I_{пуск} \cdot r_я)} = \sqrt[3]{220 / (54 \cdot 0,48)} = 2,05$$

5. Сопротивление резисторов реостата:

$$r_3 = r_я (\lambda - 1) = 0,48 \cdot (2,05 - 1) = 0,5 Ом$$

$$r_2 = 0,5 \cdot 2,05 = 1,02 Ом$$

$$r_1 = 1,02 \cdot 2,05 = 2,09 Ом$$

Контрольные вопросы:

1. Какие виды пуска Вы знаете?
2. Какие технологические требования, предъявляемые к пуску Вы знаете?
3. Какими методами можно рассчитать сопротивления для реостатного пуска?
4. Какие виды тормозных режимов вы знаете?
5. Назовите достоинства, недостатки, область применения рекуперативного торможения.
6. Как можно осуществить режим рекуперативного торможения?
7. Назовите достоинства, недостатки, область применения торможения протвивовключением.
8. Как можно осуществить режим торможения протвивовключением?
9. Назовите достоинства, недостатки, область применения динамического торможения.
10. Как можно осуществить режим динамического торможения?
11. Как осуществляется реверс ДПТ НВ?
12. Как осуществляется реверс ДПТ ПВ, ДПТ СВ, ДПТ ШВ?