Харківський національний автомобільно-дорожній університет

кафедра Автомобільної електроніки

А.В. Гнатов

Курс лекцій з дисципліні
«ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ»
Ч.2

Харків – 2021

ЗМІСТ

Лекція № 1 3
Лекція № 2 8
Лекція № 3 13
Лекція № 4 18
Лекція № 5 23
Лекція № 6 27
Лекція № 7 31
Лекція № 8 33
Лекція № 9 38
Лекція № 10 43
Лекція № 11 47
Лекція № 12 51
Лекція № 13 57
Лекція № 14 61
Лекція № 15 66
Лекція № 16 73
Лекція № 17 78
Лекція № 18 88
ЛІТЕРАТУРА 96

Лекція № 1

ТЕМА № 4. Регулирование скорости вращения двигателей переменного тока

План

1. Регулирование скорости вращения двигателей переменного тока.
2. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя введением сопротивления в цепь ротора.
3. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя изменением числа полюсов

1. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Практика развития отечественного машиностроения показывает, что во многих случаях, когда нужно получить глубокое и плавное регулирование скорости, применяются электроприводы постоянного тока. Стремление упростить и удешевить производственную машину, передать функции регулирования и управления непосредственно электрическому приводу, равно как и необходимость улучшения качества продукции за счет регулирования скорости, приводят к тому, что электроприводы постоянного тока находят и будут находить применение в промышленных установках. Однако при использовании двигателей постоянного тока необходимо преобразовывать переменный ток в постоянный. Это преобразование всегда связано с потерями энергии и увеличением капитальных затрат на преобразовательную установку. Поэтому в ряде регулируемых установок применяются двигатели переменного тока, *более дешевые, простые и экономичные в эксплуатации*.

Чаще всего применяются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором или с контактными кольцами, иногда и коллекторные двигатели переменного тока.

Синхронные двигатели широко используются в промышленных установках средней и большой мощности, не требующих регулирования скорости вращения. Хотя принципиально имеется возможность регулирования скорости вращения синхронных двигателей изменением частоты, однако, как правило, синхронные двигатели должны быть отнесены к числу нерегулируемых.

Наибольшее применение получили следующие способы регулирования скорости вращения асинхронного двигателя:

а) введением сопротивления в цепь ротора;

б) изменением числа полюсов;

в) изменением частоты питающего напряжения;

г) каскадным включением асинхронного двигателя с другими машинами или вентильными преобразователями.

Для целей регулирования скорости, кроме упомянутых, могут быть использованы некоторые специальные способы включения электрических двигателей: *импульсное регулирование, регулирование с помощью дросселей насыщения и другие*.

2. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ВВЕДЕНИЕМ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ЦЕПЬ РОТОРА

Введение сопротивления в цепь ротора (реостатное регулирование) позволяет, как и для двигателей постоянного тока, регулировать скорость вращения двигателя. Плавность регулирования зависит от числа ступеней включаемого сопротивления. Регулирование осуществляется вниз от основной скорости, причем лучшее использование двигателя достигается при регулировании с постоянным моментом. Диапазон регулирования непостоянен и зависит от нагрузки. Жесткость характеристик значительно уменьшается по мере снижения скорости, что ограничивает диапазон регулирования до (2-3) : 1. *Недостатком этого способа регулирования являются также значительные потери энергии.*

С точки зрения потерь энергии невыгодным оказывается регулирование скорости, осуществляемое с постоянным моментом и, особенно, с постоянной мощностью. Аналогично двигателю постоянного тока независимого возбуждения здесь потери в цепи ротора пропорциональны скольжению, т. е.

$$\Delta P_2 = P_1 s. \qquad (1.1)$$

Более благоприятным в отношении потерь энергии является реостатное регулирование скорости при вентиляторном моменте нагрузки, когда подводимая мощность значительно уменьшается по мере снижения скорости.

Поэтому такой способ регулирования находит более широкое применение в приводах с вентиляторным моментом нагрузки, а также в механизмах с повторно-кратковременным режимом работы, как, например, **в крановых устройствах.**

Вследствие больших потерь энергии реостатное регулирование скорости вращения асинхронного двигателя при постоянном моменте нагрузки и длительной работе нецелесообразно.

3. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧИСЛА ПОЛЮСОВ

Синхронная угловая скорость асинхронного двигателя зависит от частоты f_1 питающего напряжения и от числа пар полюсов статора p:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}, \qquad (1.2)$$

или синхронная скорость вращения

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p}, \text{ об/мин.} \qquad (1.3)$$

Поэтому изменением числа пар полюсов можно регулировать скорость вращения двигателя.

У двигателей с переключением числа полюсов обмотка каждой фазы состоит обычно из двух одинаковых частей, в одной из которых изменяется направление тока путем переключения этих частей с последовательного на параллельное соединение. Такое переключение (рис. 1.1) приводит к уменьшению числа полюсов вдвое и, следовательно, к увеличению вдвое синхронной скорости машины.

Практически присоединение обмоток производится переключением обмотки статора по схеме, приведенной на рис. 1.2, *а*, где осуществлен переход от одиночной звезды

к двойной, или по схеме, изображенной на рис. 1.2, *б*, где произведено переключение с треугольника на двойную звезду.

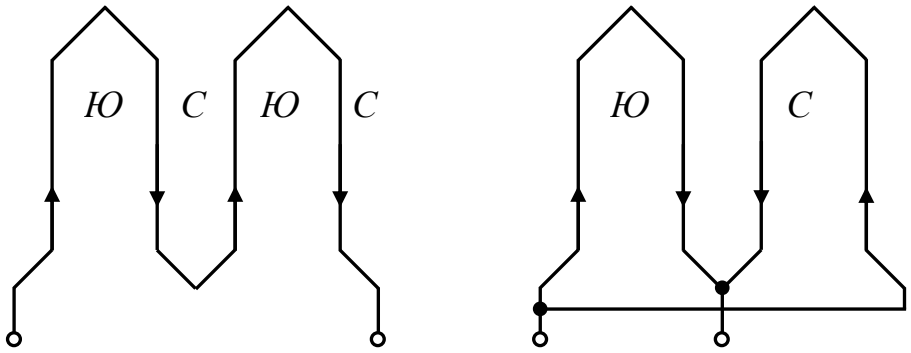


Рис. 1.1. Схема переключения обмоток статора с последовательного на параллельное соединение

Средние схемы (рис. 1.2, *а* и *б*) показывают, как осуществляется переключение на двойную звезду, а крайние справа схемы поясняют соединение обмоток после этого переключения.

Такие двигатели, в которых путем переключения обмоток можно получить две скорости, называются **двухскоростными**.

Переключение обмотки статора со звезды на двойную звезду (рис. 1.2, а) приводит к регулированию скорости (увеличению скорости вдвое), которое целесообразно производить при постоянном моменте. Последнее легко может быть доказано следующими соображениями.

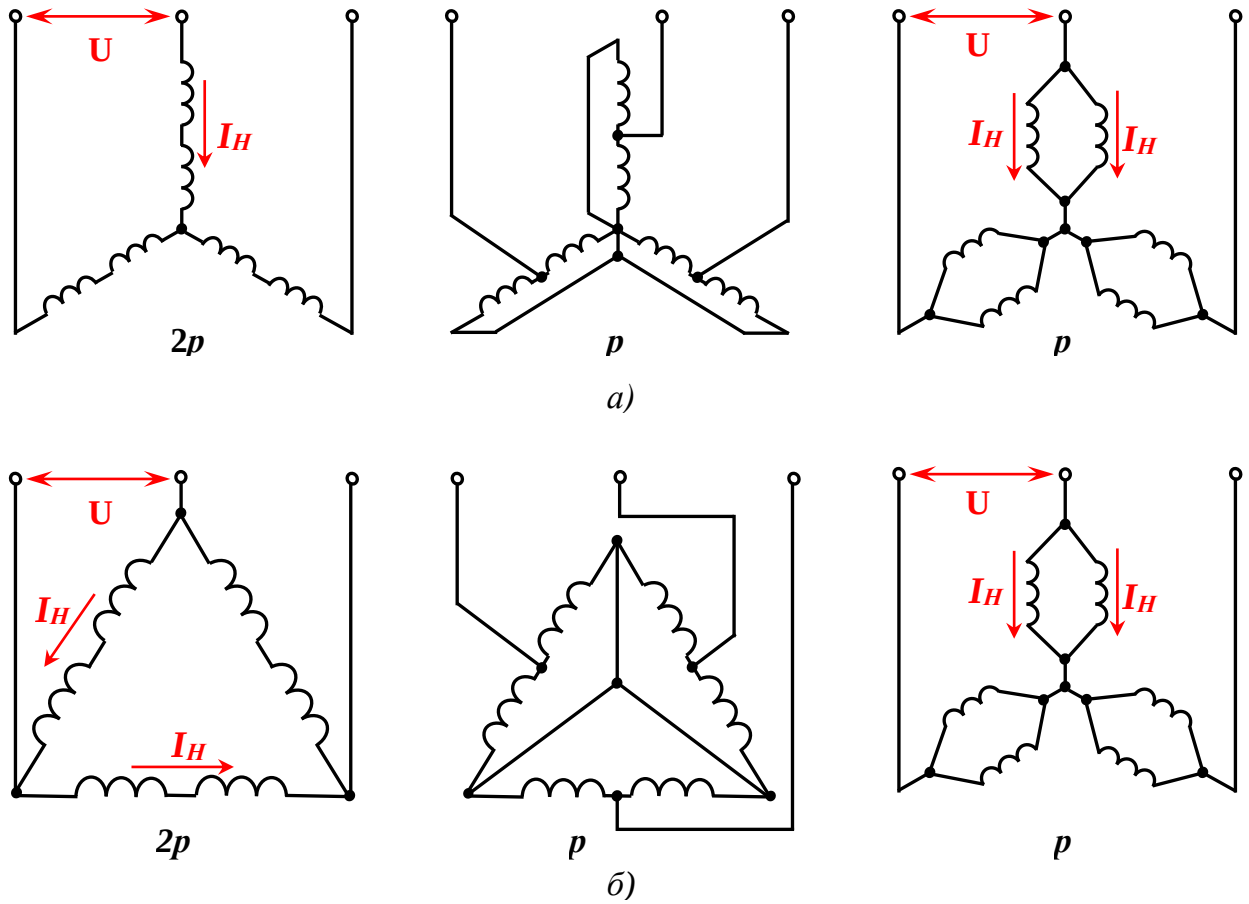


Рис. 1.2. Схемы переключения обмоток статора на двойную звезду

Обозначим линейное напряжение через U, а допустимый ток, проходящий по обмоткам, через $I_н$.

При соединении в звезду мощность, потребляемая двигателем, составит:

$$P_{1Y} = 3\frac{U}{\sqrt{3}} I_н cos\varphi_{1Y} = \sqrt{3} U I_н cos\varphi_{1Y}, \quad (1.3)$$

а для двойной звезды

$$P_{1YY} = 3\frac{U}{\sqrt{3}} 2I_н \cos\varphi_{1YY} = 2\sqrt{3} U I_н \cos\varphi_{1YY}, \quad (1.4)$$

Если предположить, что $cos\varphi_{1Y} \approx cos\varphi_{1YY}$ и не учитывать потери в двигателе, то развиваемая им мощность при вдвое большей скорости будет в 2 раза больше мощности двигателя при низкой скорости. Если с увеличением скорости двигателя пропорционально растет мощность, то момент двигателя остается неизменным. Механические характеристики двухскоростного двигателя, скорость вращения которого регулируется при постоянном моменте, приведены на рис. 1.3.

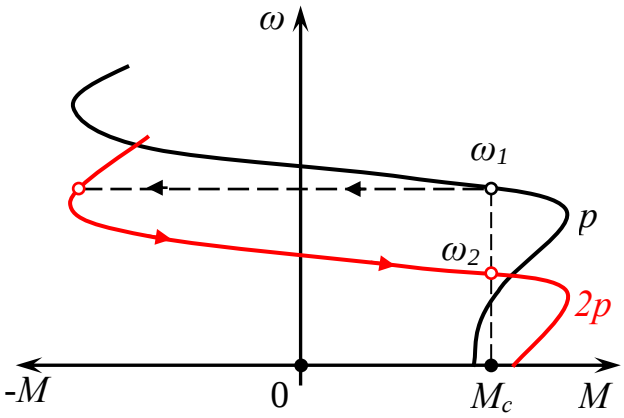


Рис. 1.3. Механические характеристики двухскоростного двигателя, регулируемого с постоянным моментом

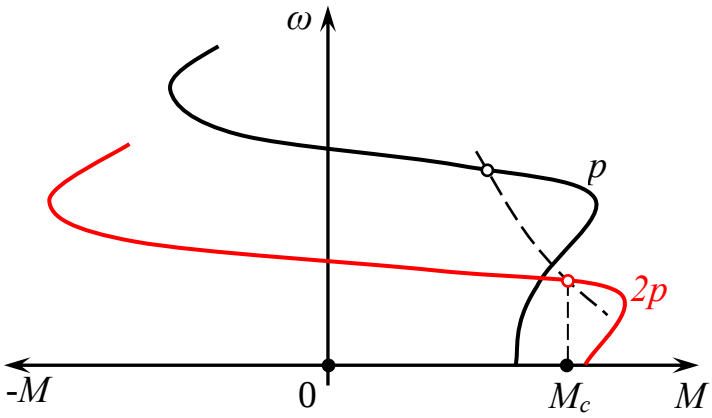


Рис. 1.4. Механические характеристики двухскоростного двигателя, регулируемого с постоянной мощностью

Небезынтересно отметить, что при регулировании скорости вниз от ω_1 к ω_2 двигатель, как это показано пунктиром, переходит в генераторный режим с отдачей энергии в сеть.

Если анализировать схему, приведенную на рис. 1.2, *б*, то для соединения обмотки в треугольник потребляемая двигателем мощность

$$P_{1\Delta} = 3UI_н cos\varphi_{1\Delta}, \quad (1.5)$$

а при соединении в двойную звезду

$$P_{1YY} = 3\frac{U}{\sqrt{3}} 2I_н cos\varphi_{1YY} = 3{,}46 U I_н cos\varphi_{1YY},$$

Сравнение двух последних выражений показывает, что при переключении на высшую скорость мощность, развиваемая двигателем, изменяется незначительно (примерно на 15%, если принять, что $cos\varphi_{1\Delta} \approx cos\varphi_{1YY}$. В этом случае целесообразно использовать такой двигатель для механизмов, скорость которых регулируется при постоянной мощности.

Механические характеристики, иллюстрирующие возможность регулирования скорости вращения двухскоростного двигателя при постоянной мощности, показаны на рис. 1.4.

Кроме двухскоростных двигателей, применяются трехскоростные двигатели, имеющие дополнительно еще одну непереключаемую обмотку, а также четырехскоростные двигатели, в статоре которых обычно закладываются две независимые обмотки на разные числа полюсов, каждая из которых переключается по одной из указанных выше схем.

Чтобы не производить переключений в обмотке ротора, двигатели с переключением полюсов выполняются с короткозамкнутым ротором, так как в нем распределение НС всегда соответствует числу полюсов статорной обмотки.

Регулирование скорости, достигаемое переключением полюсов, дает определенный ряд скоростей, *обусловленный частотой сети и числом полюсов*. Например, для практически применяемых четырехскоростных двигателей можно получить такие синхронные скорости (об/мин) 3000/1500/1000/500; 3000/1500/750/375; 1500/1000/750/500; 1000/750/500/375.

Из приведенного следует, что диапазон регулирования достигает (6:1) – (8:1). Увеличивать этот диапазон практически нецелесообразно, так как уменьшение синхронной скорости ниже n_0 = 375 *об/мин* приводит к значительному увеличению габаритов двигателя.

Регулирование скорости вращения переключением полюсов является не плавным, а ступенчатым. Вместе с тем рассматриваемый способ регулирования является весьма экономичным и отличается механическими характеристиками, обладающими большой жесткостью.

Благодаря своим преимуществам двигатели с переключением полюсов находят широкое применение там, где не требуется плавного регулирования скорости, например в некоторых металлорежущих станках в целях уменьшения количества механических передач. Они применяются также для вентиляторов, насосов, элеваторов в цементной, нефтяной и других отраслях промышленности.

Лекція № 2

ТЕМА № 4. Регулирование скорости вращения двигателей переменного тока

План

1. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя изменением частоты

1. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ

Принципиальная возможность регулирования скорости вращения двигателя изменением частоты питающего напряжения вытекает из формулы $\omega = \frac{2\pi f_1}{p}$. Для получения регулируемой частоты *применяются специальные генераторы или преобразователи частоты*, питающие один или группу асинхронных двигателей, находящихся в одинаковых условиях работы. *Примером групповой установки могут служить транспортные рольганги прокатных станов, текстильные машины, некоторые конвейерные установки и др.* В первом примере каждый ролик рольганга приводится в движение отдельным коротко-замкнутым двигателем мощностью в несколько киловатт. На современных металлургических заводах устанавливается до 100 таких двигателей и больше.

При регулировании частоты необходимо стремиться к тому, чтобы характеристики во всем диапазоне отличались высокой жесткостью, а двигатель обладал достаточной перегрузочной способностью. **Этого можно добиться, сохраняя постоянным магнитный поток**. Для асинхронного двигателя можно приближенно принять, что $U = f_1 \Phi$. Поэтому для сохранения постоянства магнитного потока необходимо производить регулирование с неизменным соотношением

$$\frac{U}{f_1} = \Phi = const\,. \qquad (2.1)$$

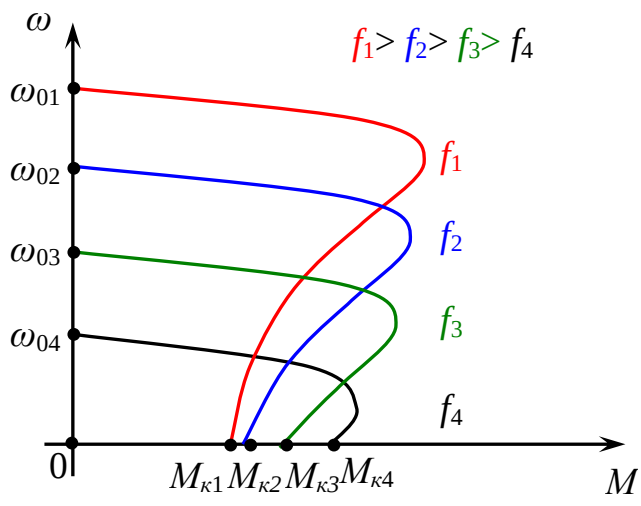


Рис. 2.1. Механические характеристики асинхронного двигателя при регулировании скорости вращения изменением частоты

На рис. 2.1 приведены примерные механические характеристики асинхронного двигателя при регулировании изменением частоты и пропорциональном изменении напряжения ($\frac{U}{f_1} = const$).

Жесткость механических характеристик в рабочей зоне при этом способе регулирования сохраняется сравнительно высокой. Величина критического момента в зоне больших частот сравнительно мало изменяется. Лишь при низких частотах вследствие относительного увеличения падения напряжения в статоре происходит заметное уменьшение магнитного потока, а следовательно, и уменьшение критического момента. Это подтверждается анализом формулы:

$$M_к = \frac{3}{2\omega_0} \cdot \frac{U_ф^2}{R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_к^2}}, \qquad (2.2)$$

где $X_к = X_1 + X_2'$.

Для больших частот величина R_1 значительно меньше $X_к$, и поэтому можно считать, что

$$M_к = \frac{3U_ф^2}{2\omega_0 X_к}. \qquad (2.3)$$

Так как $X_к \equiv f_1$ и $\omega_0 \equiv f_1$,то

$$M_к \equiv \frac{U_ф^2}{f^2} = const. \qquad (2.4)$$

При значительном снижении частоты эти соотношения нарушаются, так как реактивное сопротивление рассеяния $X_к = X_1 + X_2'$ становится сравнимым по величине с сопротивлением статора R_1 или даже меньше его. Влияние падения напряжения в статоре сказывается сильнее, и это приводит к уменьшению критического момента.

Для поддержания достаточной перегрузочной способности двигателя желательно, чтобы при малых частотах напряжение уменьшалось в меньшей степени, чем частота.

С целью получения переменной частоты применяются различные типы преобразователей частоты. К ним можно отнести преобразователи ***электромашинные, электронно-ионные и полупроводниковые***. Последние особенно перспективны и находят все большее применение.

Из электромашинных преобразователей практическое применение получили **синхронные** и **асинхронные**.

Схема с синхронным преобразователем частоты показана на рис. 2.2. Здесь преобразователем частоты **ПЧ** является синхронный генератор, скорость которого регулируется при помощи двигателя постоянного тока **Д** по системе Г – Д (промежуточное звено постоянного тока).

От синхронного генератора подается ток переменной частоты к одному или нескольким асинхронным короткозамкнутым двигателям **АД.** Изменяя плавно в широких пределах частоту тока преобразователя **ПЧ** путем изменения его скорости, можно в широких пределах регулировать и скорость вращения двигателей **АД**. Если короткозамкнутые двигатели работают одновременно, то мощность преобразователя частоты выбирается равной сумме потребляемых мощностей всех рабочих двигателей. Каждая из машин постоянного тока и двигатель **ПД**, приводящий во вращение генератор постоянного тока, должны иметь мощность, равную мощности преобразователя частоты, если пренебречь потерями в машинах преобразовательной установки. Таким образом, если принять за 100% мощность, потребляемую при максимальной скорости асинхронными двигателями **АД**, получим мощность преобразовательного агрегата без учета потерь, равную 400%. Схема с синхронным генератором отличается тем, что на его выходе при неизменном токе возбуждения можно автоматически регулировать частоту и напряжение по закону $\frac{U_2}{f_2} = const$. Однако здесь нельзя получить значительного диапазона регулирования скорости вращения рабочих асинхронных двигателей, если требуется сравнительно большая

перегрузочная способность на всем диапазоне, который может составить примерно (4 – 5):1. Больший диапазон регулирования достигается для механизмов с вентиляторной нагрузкой (до 10:1).

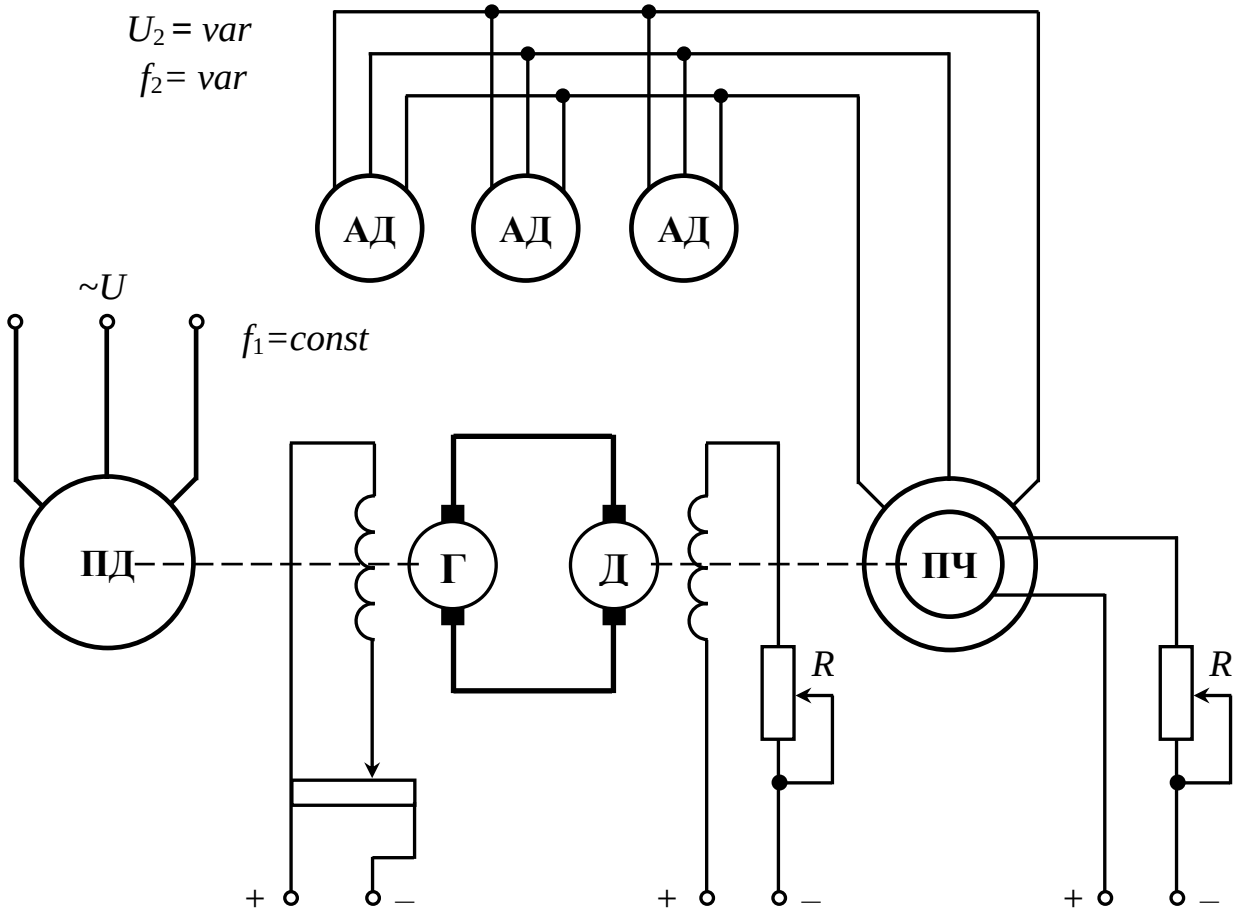


Рис. 2.2. Принципиальная схема включения асинхронных двигателей от синхронного преобразователя частоты

В другом случае в качестве преобразователя частоты используется асинхронная машина с контактными кольцами, возбуждаемая переменным током постоянной частоты f_1 со стороны ротора (рис. 2.3). Также, как и в предыдущем случае, регулирование частоты достигается благодаря регулированию скорости преобразователя. В отличие от первой схемы здесь часть активной мощности передается в сеть регулируемой частоты из сети постоянной частоты через ротор преобразователя. Распределение активных мощностей, поступающих с вала двигателя постоянного тока ($P_д$) и со стороны ротора (P_2), происходит пропорционально частотам статора и ротора, т. е.

$$P_2 = P_{а.д.} \frac{f_1}{f_2}, \tag{2.5}$$

и

$$P_д = P_{а.д.} \frac{f_2 - f_1}{f_2}. \tag{2.6}$$

Используя эти соотношения, получаем:

$$\frac{P_2}{P_д} = \frac{f_1}{f_2 - f_1}. \tag{2.7}$$

Например, при частотах f_2 = 100 *Гц* и f_1 = 50 *Гц* видно, что со стороны регулируемого привода постоянного тока подводится только половина всей мощности, потребляемой асинхронным двигателем АД; другая половина активной мощности подводится через ротор преобразователя частоты. (*Как и в предыдущем случае, собственными потерями машин преобразовательной установки пренебрегаем*)

Таким образом, установленная мощность машин постоянного тока и приводного двигателя **ПД** оказывается равной примерно 50%, т. е. вдвое меньше, чем в случае преобразовательной установки с синхронным генератором.

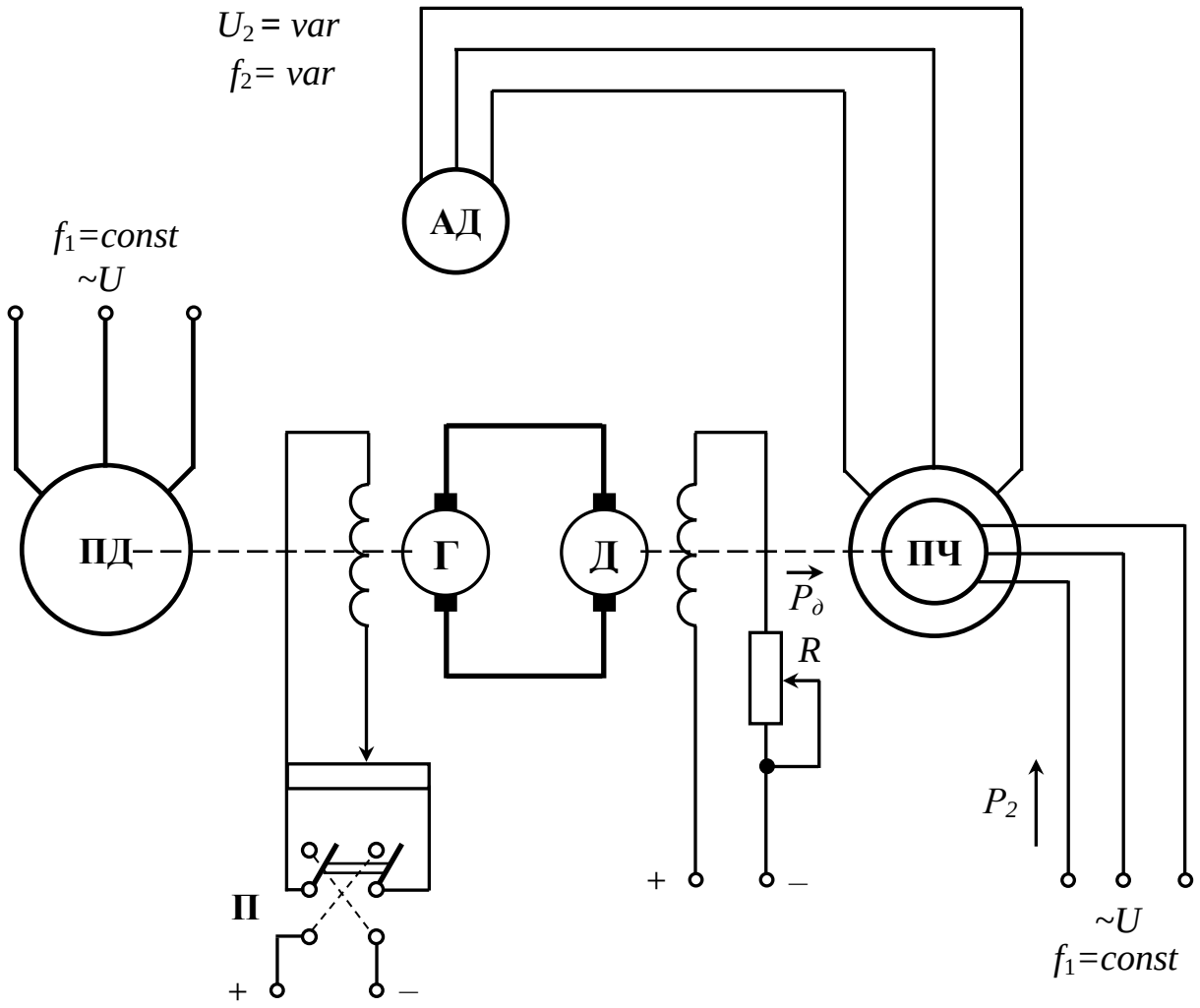


Рис. 2.3. Принципиальная схема включения асинхронного двигателя от асинхронного преобразователя частоты

Установленная мощность асинхронного преобразователя оказывается больше 100%, так как ротором преобразователя потребляется суммарная реактивная мощность для намагничивания самого преобразователя и асинхронного двигателя **АД.**

Достоинством данной системы является возможность независимого регулирования напряжения на входе преобразователя, что обеспечивает на выходе его требуемую зависимость между напряжением и частотой тока, питающего **АД**. Это позволяет увеличить диапазон регулирования скорости до (10 – 12):1 и выше даже при постоянном моменте нагрузки.

В неподвижном состоянии частота преобразователя $f_2 = f_1$. *Для регулирования частоты f_2 вверх от значения f_1 необходимо ротор преобразователя частоты вращать по*

направлению вращения магнитного поля ротора. Для регулирования частоты вниз от значений f_1 необходимо вращать преобразователь против вращения магнитного поля ротора. Перемена направления вращения ротора преобразователя частоты осуществляется изменением полярности напряжения генератора с помощью переключателя **П**.

Машинный преобразователь частоты может быть упрощен, если вместо агрегата постоянной скорости (**ПД – Г**) применить ионный или тиристорный преобразователь, как это имело место в аналогичной замене машинного агрегата системы **Г – Д**.

Из машинных преобразователей частоты, кроме упомянутых, известны коллекторные преобразователи частоты без промежуточного звена постоянного тока, т. е. с непосредственной связью входа и выхода на переменном токе. *Регулирование частоты может быть также получено в асинхронном самовозбуждающемся генераторе с конденсатором. Однако такие преобразовательные установки не получили практического применения*.

К существенным ***недостаткам*** рассмотренных электромашинных преобразователей частоты следует отнести их высокую стоимость, низкий КПД, громоздкость, высокий уровень шума и повышенную инерционность.

Указанных недостатков лишены ***статические*** *преобразователи частоты*, наиболее перспективными из которых являются тиристорные и транзисторные преобразователи.

Лекція № 3

ТЕМА № 4. Регулирование скорости вращения двигателей переменного тока

План

1. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя изменением частоты с помощью тиристорных преобразователей

1. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ С ПОМОЩЬЮ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

По структуре схемы статических преобразователей частоты сходны с аналогичными схемами электромашинных преобразователей и могут быть представлены двумя основными классами:

а) с непосредственной связью;

б) с промежуточным звеном постоянного тока.

Преобразователь с непосредственной связью предназначен для преобразования высокой частоты в низкую и состоит из 18 тиристоров (рис. 3.1). В основе преобразователя находится трехфазная однополупериодная схема выпрямления; каждая фаза преобразователя состоит из двух таких встречно включенных выпрямителей. *Группу из трех вентилей, имеющих общий катод, называют «положительной» или выпрямительной, а группу с общим анодом – «отрицательной», или инверторной.* В течение одного полупериода выходного напряжения преобразователя пропускают ток выпрямительные группы, а в течение другого – инверторные. Частота выходного напряжения определяется длительностью промежутков времени пропускания тока обеими группами. Полуволна выходного напряжения состоит из отрезков волны напряжения питающей сети. На рис. 3.2 показана кривая выходного напряжения при неизменном угле открывания вентилей $\alpha = 0$. Фазовая коммутация вентилей в одной группе, т. е. открывание одного вентиля и закрывание другого, происходит подобно переключению в трехфазной однополупериодной схеме выпрямления без коммутирующих конденсаторов.

При переключении от одной группы к другой могут оказаться одновременно включенными два вентиля разных групп, подключенных к разным фазам сети, что приведет к образованию цепи тока через эти вентили. С целью ограничения этого тока применяются уравнительные реакторы, которые одновременно сглаживают форму кривой выходного напряжения. Возможно осуществление преобразователей частоты с непосредственной связью и без уравнительных реакторов, где используется раздельная система управления вентильными группами. ***Для получения выходного напряжения, близкого по форме к синусоидальному, необходимо изменять угол открытия вентилей*** таким образом, чтобы среднее за полупериод питающей сети значение напряжения изменялось в течение полупериода выходного напряжения по синусоидальному закону. *Регулирование напряжения на выходе преобразователя достигается изменением угла открывания вентилей*.

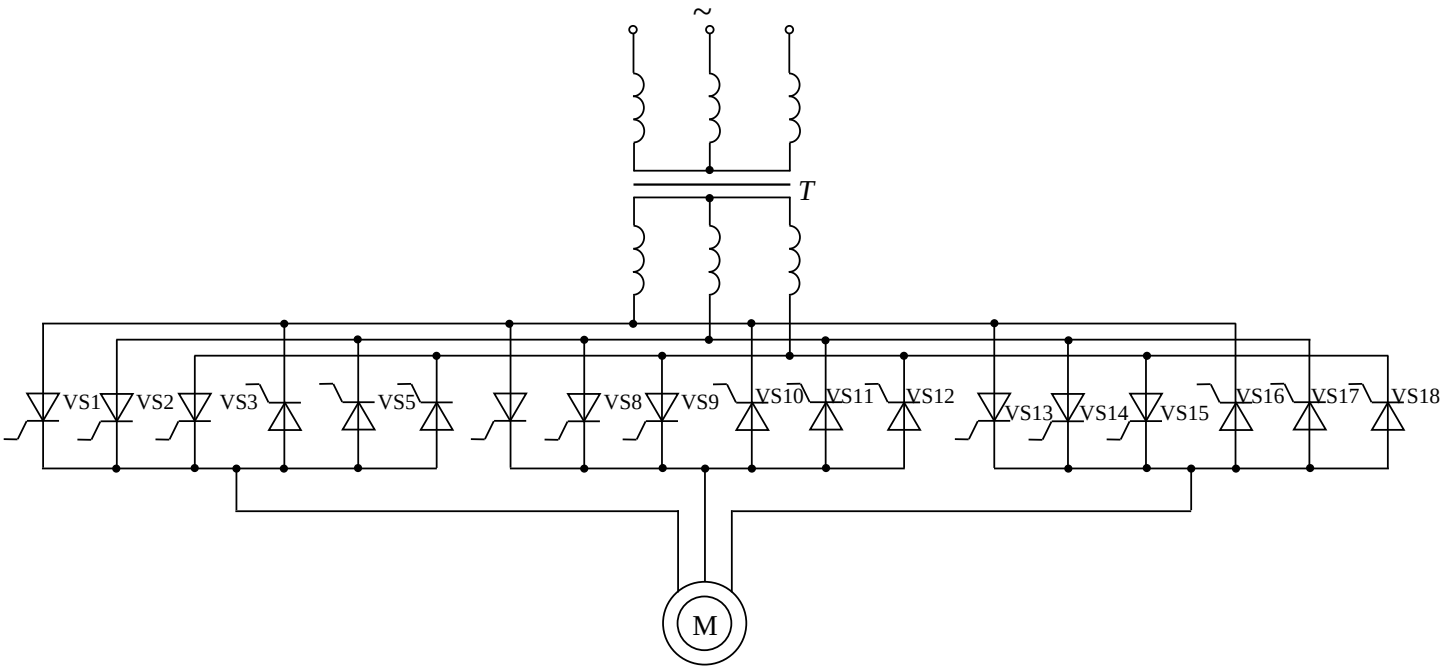


Рисунок 3.1 – Схема статичного перетворювача частоти з безпосереднім зв'язком

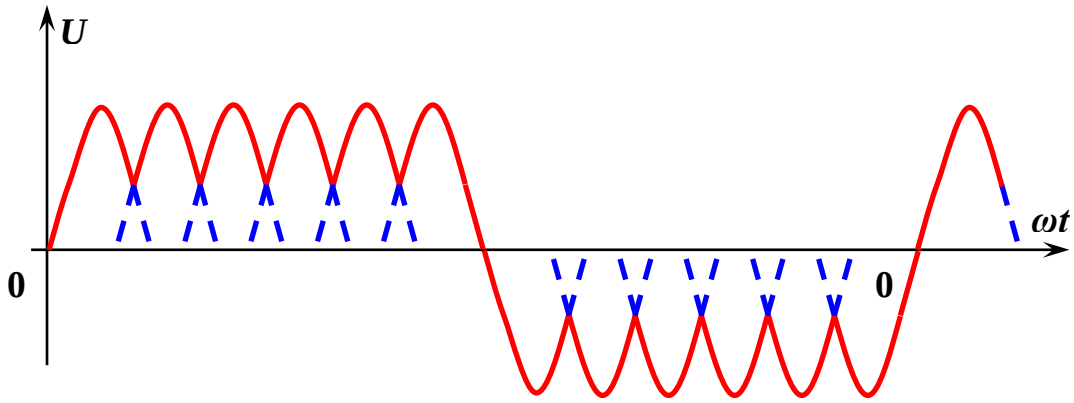


Рис. 3.2. Форма выходного напряжения трехфазного преобразователя с непосредственной связью

К достоинствам этого типа преобразователей можно отнести:

1) однократное преобразование энергии и, следовательно, высокий КПД;
2) возможность прохождения реактивной энергии из сети к двигателю и обратно;
3) отсутствие коммутирующих конденсаторов, так как коммутация производится естественным путем.

К недостаткам рассмотренного преобразователя частоты относятся:

1) ограниченное регулирование выходной частоты (в пределах 0 – 30% частоты сети);
2) сравнительно большое число силовых вентилей и сложная схема управления ими;
3) невысокий коэффициент мощности.

Преобразователь частоты с непосредственной связью можно использовать в случаях, когда частота питающей сети много выше частоты, соответствующей номинальной скорости асинхронного двигателя (например, если питающая сеть имеет частоту 400 *Гц,* а двигатель серийного использования рассчитан на 50 *Гц).* Этот же преобразова-

тель может быть применен, когда требуется одна рабочая скорость, обусловленная частотой сети, и пониженная скорость (одна или несколько) для вспомогательных операций.

Кроме того, данный тип преобразователя целесообразно применить для регулирования скорости вращения асинхронного двигателя с контактными кольцами, работающего в режиме двойного питания, когда статор его присоединен к сети, а ротор питается от той же сети через преобразователь частоты.

Наибольшее применение для промышленных приводов может иметь статический преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока, блок-схема которого приведена на рис. 3.3. Преобразователь состоит из двух силовых элементов – управляемого выпрямителя ***УВ*** и инвертора ***И***. На вход ***УВ*** подается нерегулируемое напряжение переменного тока промышленной частоты; с выхода ***УВ*** постоянный ток регулируемого напряжения подается на инвертор ***И***, который преобразует энергию постоянного тока в энергию переменного тока регулируемого напряжения и частоты.

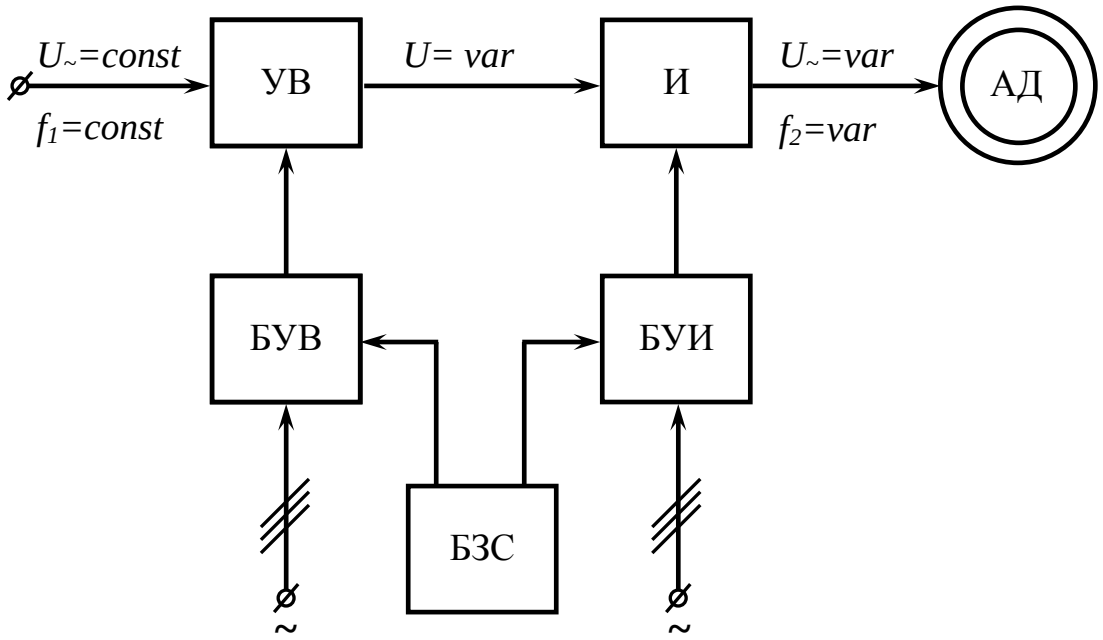


Рис. 3.3. Блок-схема статического преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока

УВ – управляемый выпрямитель; *И* – инвертор; *БУВ, БУИ* – соответственно блок управления выпрямителем и инвертором; *БЗС* – блок задания скорости.

Кроме двух силовых элементов преобразователь содержит еще систему управления, состоящую из блока управления выпрямителем ***БУВ*** и блока управления инвертором ***БУИ***. Выходная частота регулируется в широких пределах и определяется частотой коммутации тиристоров **VS1 – VS6**, которая задается блоком управления инвертором ***БУИ***. В такой схеме производится раздельное регулирование напряжением и частотой, что позволяет осуществить при помощи блока задания скорости ***БЗС*** требуемое соотношением между напряжением и частотой на зажимах асинхронного двигателя. Если в блоке задания скорости ***БЗС*** сопоставлять задающий сигнал с сигналом обратной связи по скорости, то можно осуществить систему автоматического частотного управления с точным поддержанием скорости вращения двигателя.

Примером принципиальной силовой схемы статического преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока, выполненного на тиристорах для привода

небольшой мощности (до 5 *кВт),* может служить схема, приведенная на рис. 3.3 (*Схема разработана в проблемной лаборатории электромеханики МЭИ*).

В качестве управляемого выпрямителя используются два тиристора **VS7** и **VS8** и два диода **VD7** и **VD8**, включенных в так называемую полууправляемую мостовую схему для получения двухполупериодного выпрямленного напряжения, среднее значение которого можно регулировать обычным способом, воздействуя на фазу напряжения управляющих электродов **VS7** и **VS8**. Инвертор состоит из шести тиристоров **VS1 – VS6**, шести последовательно включенных с ними диодов **VD1 – VD6** и шести диодов, включенных по трехфазной мостовой схеме **VD10** – **VD15** и, наконец, шести колебательных контуров ***LC***.

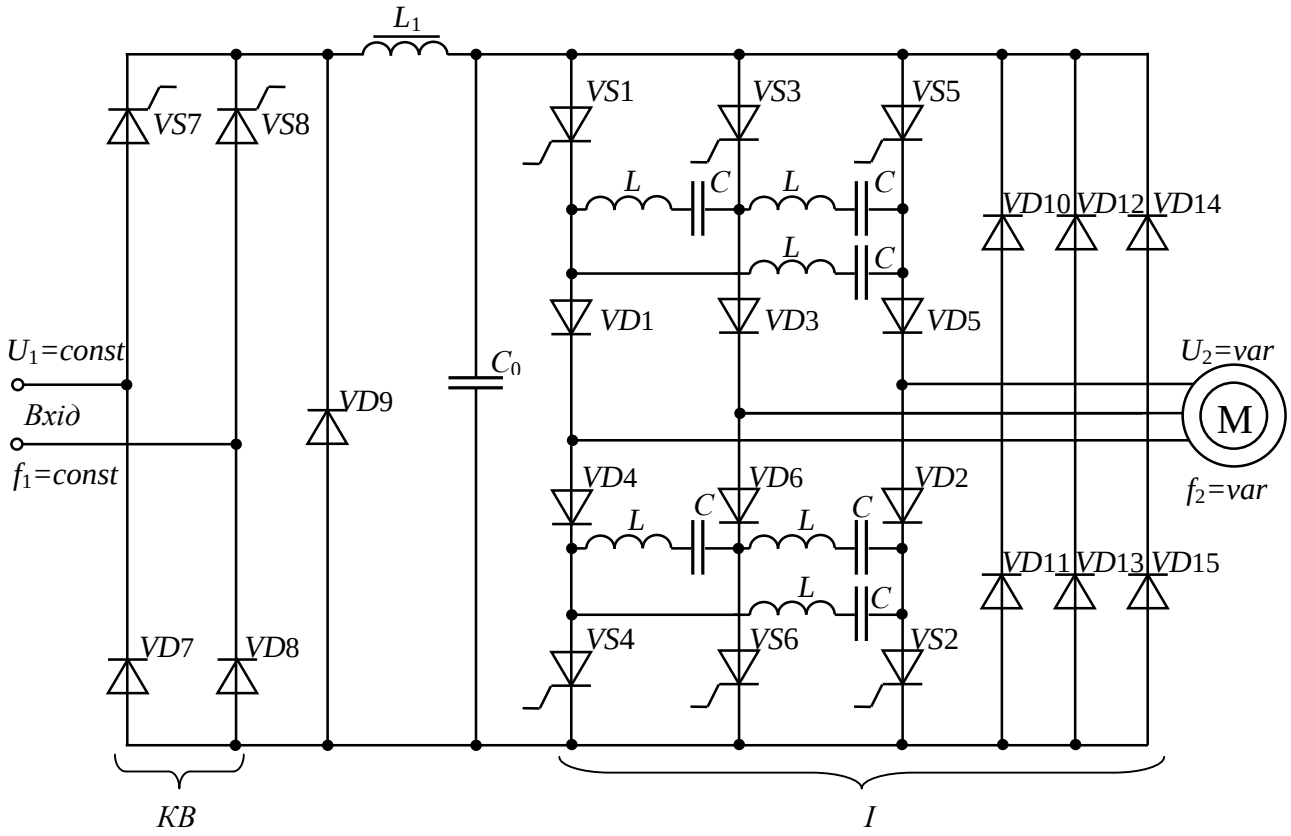


Рисунок 3.3 – Схема статичного перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму

Преобразование постоянного напряжения в трехфазное переменное осуществляется коммутацией тиристоров **VS1 – VS6**, работающих в определенной последовательности. Время открытого состояния каждого тиристора соответствует 120 *эл. град* выходной частоты; последовательность открывания тиристоров отвечает их нумерации по схеме, т. е. сначала открывается **VS1**, через 60° открывается **VS2** и т. д. до **VS6**. После **VS6** вновь **VS1** и т. д. через каждые 60° выходной частоты. При коммутации в каждый момент времени открыты одновременно два тиристора. Открывание тиристоров осуществляется подачей положительного импульса на управляющий электрод от ***БУИ.*** Для закрывания тиристоров необходимо ток, протекающий через него, довести до нуля. Это достигается с помощью коммутирующих контуров ***LC;*** например, при включении **VS3** через ранее открытый **VS1** происходит разряд конденсатора ***C*** и **VS1** закрывается. Выходное напряжение при чисто активной нагрузке имеет ступенчатую форму (рис. 3.4), и длительность каждой ступени соответствует 60° выходной частоты.

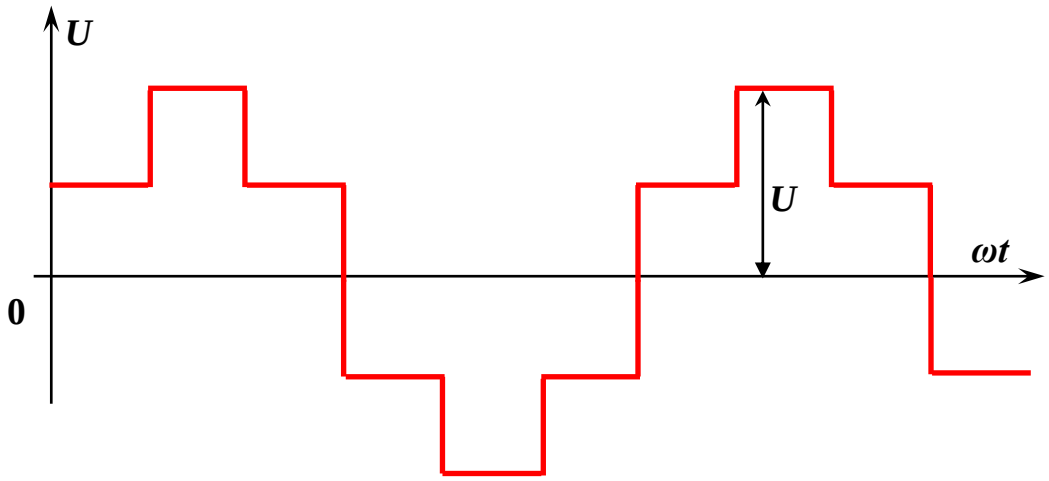


Рис. 3.4 Форма выходного напряжения при чисто активной нагрузке

При питании от преобразователя асинхронного двигателя форма выходного напряжения искажается и зависит от коэффициента мощности, который в свою очередь определяется нагрузкой на валу двигателя.

Диоды **VD1 – VD6** служат для отделения коммутирующих конденсаторов от нагрузки, что дает возможность существенно снизить их емкость в сравнении с обычным параллельным инвертором.

Через мост **VD10 – VD15** реактивная энергия двигателя возвращается конденсатору C_0.

Напряжение на выходе инвертора регулируется изменением напряжения на его входе – управляемым выпрямителем, а частота – изменением частоты подачи импульсов на тиристоры.

Преобразователь с промежуточным звеном постоянного тока позволяет регулировать частоту как вверх, так и вниз от частоты питающей сети; он отличается высоким КПД, значительным быстродействием, малыми габаритами, сравнительно высокой надежностью и бесшумен в работе.

Кроме рассмотренных преобразователей частоты могут быть использованы тиристорные преобразователи с широтноимпульсной модуляцией, которые позволяют получить весьма широкий диапазон регулирования частоты при кривой тока, близкой к синусоидальной. При этом с введением обратных связей можно получить большой диапазон регулирования скорости вращения асинхронного двигателя (до 1 000 : 1 и выше).

Лекція № 4

ТЕМА № 4 Регулирование скорости вращения двигателей переменного тока

План

1. Регулирование скорости вращения коллекторного двигателя переменного тока.
2. Импульсный метод регулирования скорости вращения электродвигателей.

1. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ КОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Коллекторные двигатели переменного тока, отличающиеся плавным регулированием скорости вращения, выполняются однофазными и трехфазными. Однофазные коллекторные двигатели используются в тяговых установках; в промышленных приводах нашли применение трехфазные коллекторные двигатели.

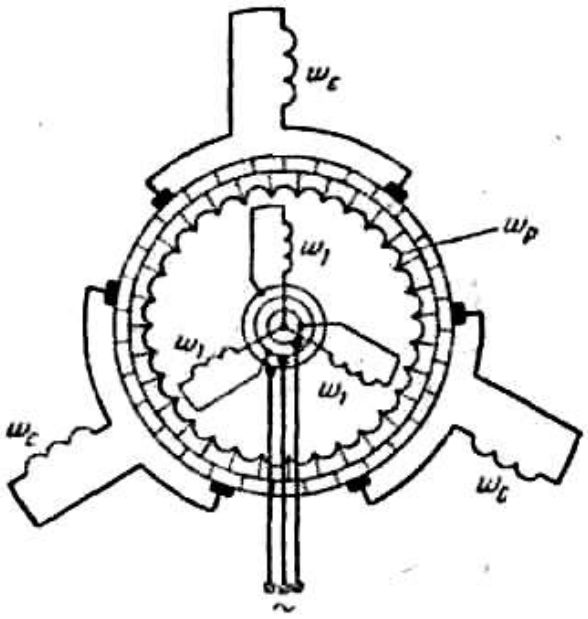


Рис. 4.1. Принципиальная схема коллекторного двигателя Шраге

Коллекторные двигатели переменного тока в настоящее время выпускаются за границей. Отечественной промышленностью было выпущено небольшое количество таких двигателей еще до Великой Отечественной войны.

В промышленном приводе наибольшее применение нашли трехфазные коллекторные двигатели, питаемые со стороны ротора (двигатель Шраге). Принципиальная схема двигателя Шраге приведена на рис. 4.1. На роторе расположены две обмотки; одна из них первичная ω_1 получает, питание через кольца от сети трехфазного тока промышленной частоты. Вторая обмотка ω_p, присоединяемая к коллектору, напоминает обмотку якоря двигателя постоянного тока. Третья обмотка ω_c расположена на статоре, концы каждой фазы этой обмотки выводятся на щетки, установленные на коллекторе. Вращающееся магнитное поле, создаваемое первичной обмоткой, наводит в обмотке статора ЭДС, вызывающую в ней прохождение тока. В результате взаимодействия тока этой обмотки с вращающимся магнитным полем возникает момент.

В обмотке ω_p наводится ЭДС, имеющая частоту тока питающей сети. Так как щетки на коллекторе неподвижны, то ЭДС, снимаемая с коллектора, имеет частоту, равную разности частот питающей сети и частоты вращения. Следовательно, частота тока статора и частота добавочной ЭДС, подводимой к обмоткам статора, одинаковы при любой скорости вращения ротора.

Если щетки каждой фазы раздвигать в обе стороны от осей обмоток, то в обмотку статора будет вводиться добавочная ЭДС. $E_{доб}$, величина которой возрастает по мере увеличения угла между щетками каждой фазы. Добавочная ЭДС алгебраически складывается с ЭДС. статора $E_{2к}s$ (рис. 4.2, *а*), где $E_{2к}$ – значение вторичной (статорной) ЭДС при неподвижном роторе, а s – скольжение.

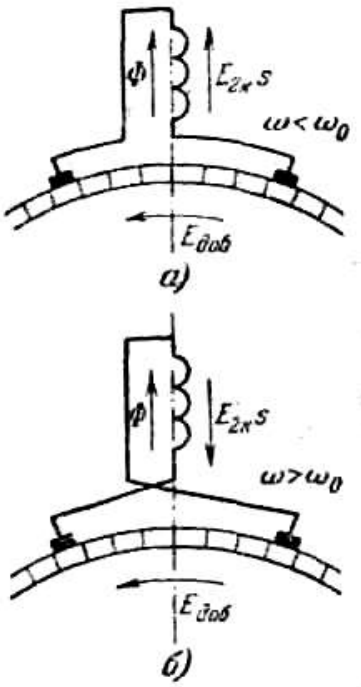


Рис. 4.2. Схема расположения щеток на коллекторе и направления ЭДС. ($E_{2к}s$ и $E_{доб}$) при регулировании скорости

Если при постоянной нагрузке на валу двигателя $E_{2к}s$ и $E_{доб}$ будут действовать в контуре статорной обмотки встречно, то ток в этой обмотке уменьшится, а также уменьшится и момент, развиваемый двигателем. При этом скорость вращения двигателя снизится до такого значения, при котором разность этих ЭДС увеличится, и ток возрастет до величины, обеспечивающей прежнее значение момента, равного моменту нагрузки. В случае раздвижения щеток в противоположном направлении (рис. 4.2, *б*) $E_{2к}s$ и $E_{доб}$ будут действовать согласно при $s > 0$, ток возрастет, момент двигателя увеличится и ротор двигателя будет ускоряться. К концу разгона двигателя и перехода на скорость, превышающую синхронную ($s < 0$), ЭДС $E_{2к}s$ изменит свое направление. В установившемся режиме $E_{2к}s$ и $E_{доб}$ будут вновь действовать встречно, как это показано на рис. 4.2, *б*. Таким образом, регулирование скорости вращения коллекторного двигателя переменного тока производится двусторонним симметричным раздвижением щеток относительно осей статорной обмотки. Схема устройства для перемещения щеток двигателя Шраге показана на рис. 4.3. Если щетки каждой фазы совместить на одной коллекторной пластине, то в этом случае $E_{доб} = 0$ и коллекторный двигатель будет работать как обычный асинхронный бесколлекторный двигатель. Примерные механические характеристики в относительных величинах для коллекторного двигателя Шраге мощностью 40 *кВт* приведены на рис. 4.4. Пусковой момент двигателя при положении щеток, соответствующем наименьшему значению скорости идеального холостого хода, составляет около $2M_{ном}$; при этом пусковой ток $I_п \approx 3I_{ном}$.

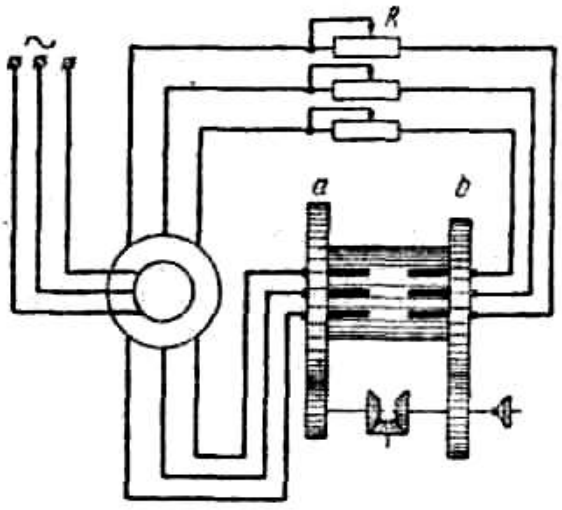


Рис. 4.3. Схема устройства для перемещения щеток двигателя Шраге

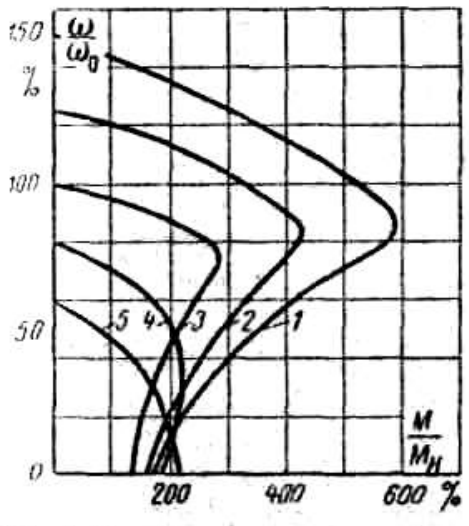


Рис. 4.4. Механические характеристики коллекторного двигателя Шраге

Для ограничения пускового тока может быть использован пусковой реостат *R*, включаемый в цепь статора (рис. 4.3).

Диапазон регулирования скорости вращения двигателей Шраге составляет обычно 3:1. При этом достигается высокая плавность регулирования. Дальнейшее увеличение диапазона регулирования связано со значительным возрастанием габаритов и повышением стоимости машины. Регулирование скорости вращения экономично, так как потери в двигателе незначительны.

Характеристики двигателя в их рабочей части обладают сравнительно небольшим перепадом скорости с изменением нагрузки, поэтому обеспечивается стабильная работа привода. Регулирование скорости можно производить как вверх, так и вниз от основной.

В связи с тем, что магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой, практически остается неизменным, *регулирование скорости вращения двигателей Шраге целесообразно производить при постоянном моменте*.

К недостаткам коллекторных машин переменного тока следует отнести значительно большее лимитирующее влияние на их работу условий коммутации, чем в машинах постоянного тока. Это обстоятельство, а также наличие трех обмоток в двигателях Шраге приводит к значительному увеличению размеров и стоимости их по сравнению с машинами постоянного тока.

Однако эти двигатели в ряде случаев могут найти применение благодаря сравнительно высокому КПД, возможности плавного регулирования скорости и меньшим габаритам установки в сравнении с системой Г – Д или с системой вращающийся преобразователь частоты – асинхронный двигатель.

Они могут применяться в текстильной, бумажной, полиграфической и других отраслях промышленности, в тех случаях, когда достаточным оказывается диапазон регулирования 3:1, а характер работы не отличается резким изменением нагрузки и большой частотой включения.

2. ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В технике электропривода находит применение импульсный метод регулирования скорости вращения двигателей небольшой мощности.

Сущность этого метода заключается в том, что для регулирования скорости производят периодические кратковременные изменения параметров двигателя таким образом и с такой частотой, что требуемая скорость достигается в виде средней скорости в течение полного цикла изменения параметров.

Величина средней скорости может регулироваться при обеспечении соответствующих соотношений между продолжительностью ускорения и замедления двигателя. Изменение параметров привода может осуществляться при помощи быстродействующих электромагнитных аппаратов (контакторов или реле), ионных или полупроводниковых приборов и т. п.

Если периодические переключения производятся длительно с определенной частотой и постоянным соотношением длительности отдельных частей цикла, то скорость вращения двигателя достигает определенного постоянного среднего значения, хотя мгновенные значения скорости непостоянны. Если же при неизменном моменте нагрузки будет изменена продолжительность включения и отключения двигателя, то средняя скорость вращения его изменится. Обозначив продолжительность импульса через t_1, а дли-

тельность паузы через t_2 можно относительную продолжительность импульса выразить через

$$\varepsilon = \frac{t_1}{t_1 + t_2}.$$

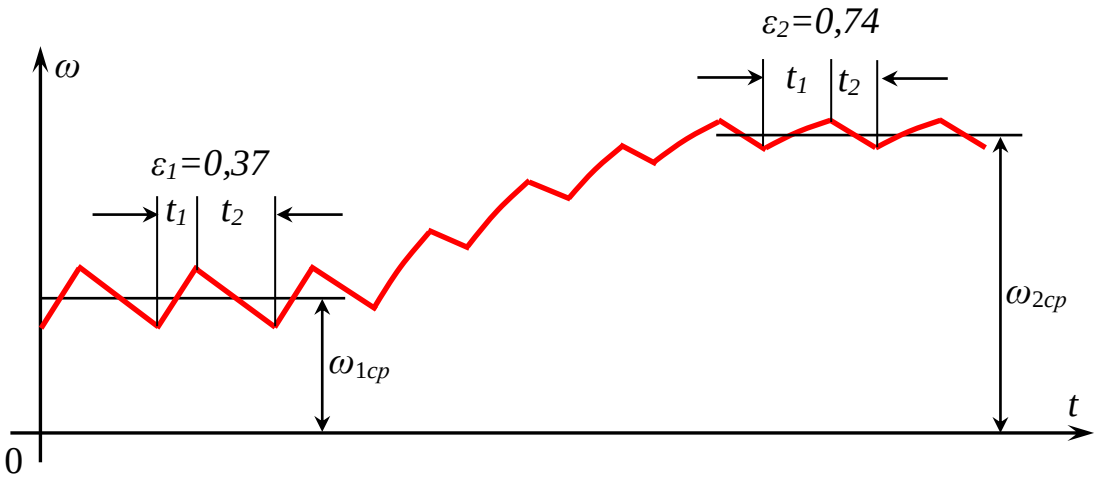


Рис. 4.5. График регулирования скорости при изменении относительной продолжительности импульса

Очевидно, что с увеличением ε и при неизменной нагрузке на валу двигателя скорость вращения его будет возрастать (рис. 4.5).

Следует отметить, что скорость вращения двигателя изменяется с изменением момента нагрузки, если ε остается постоянным. При данном значении ε с уменьшением нагрузки скорость возрастает, и наоборот.

Теория работы электроприводов с импульсным управлением подробно разработана акад. В. С. Кулебакиным. Здесь мы рассмотрим лишь простейшие схемы импульсного управления электродвигателями постоянного и переменного тока и выясним основные положения, иллюстрирующие регулировочные свойства этих систем.

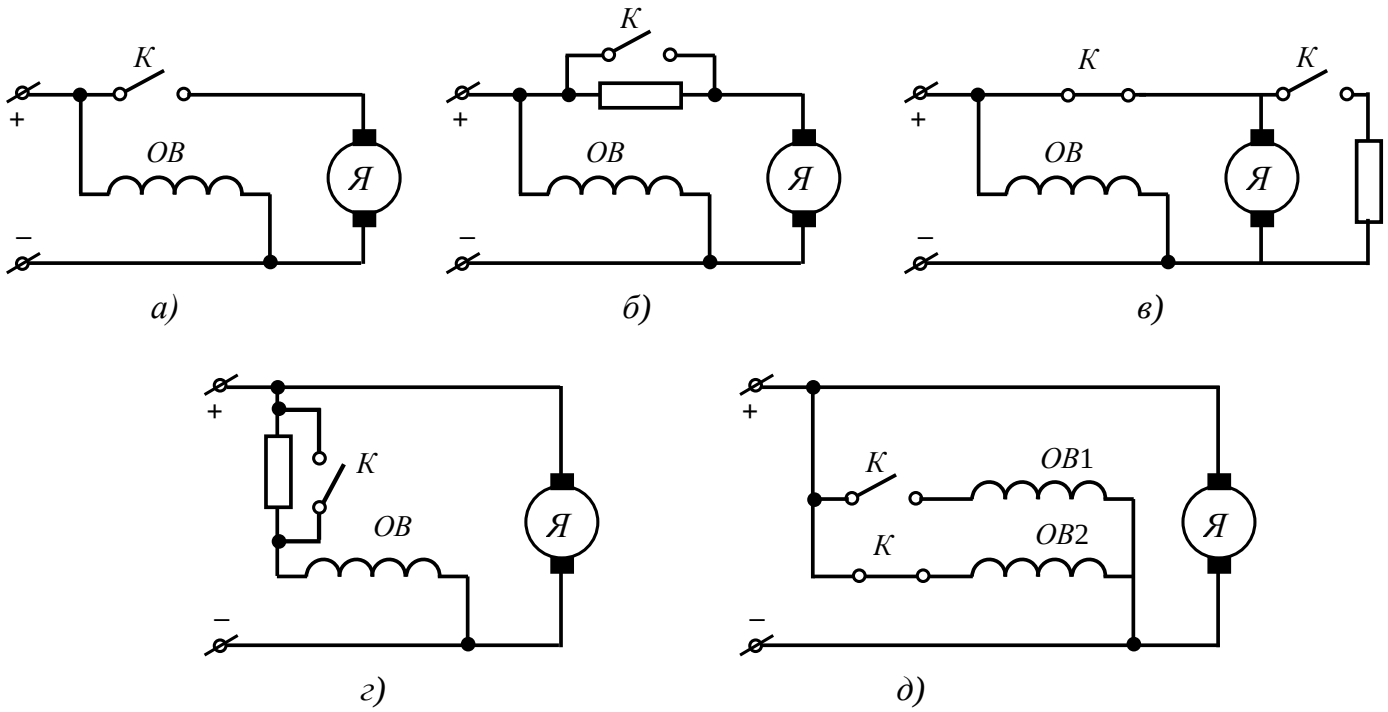
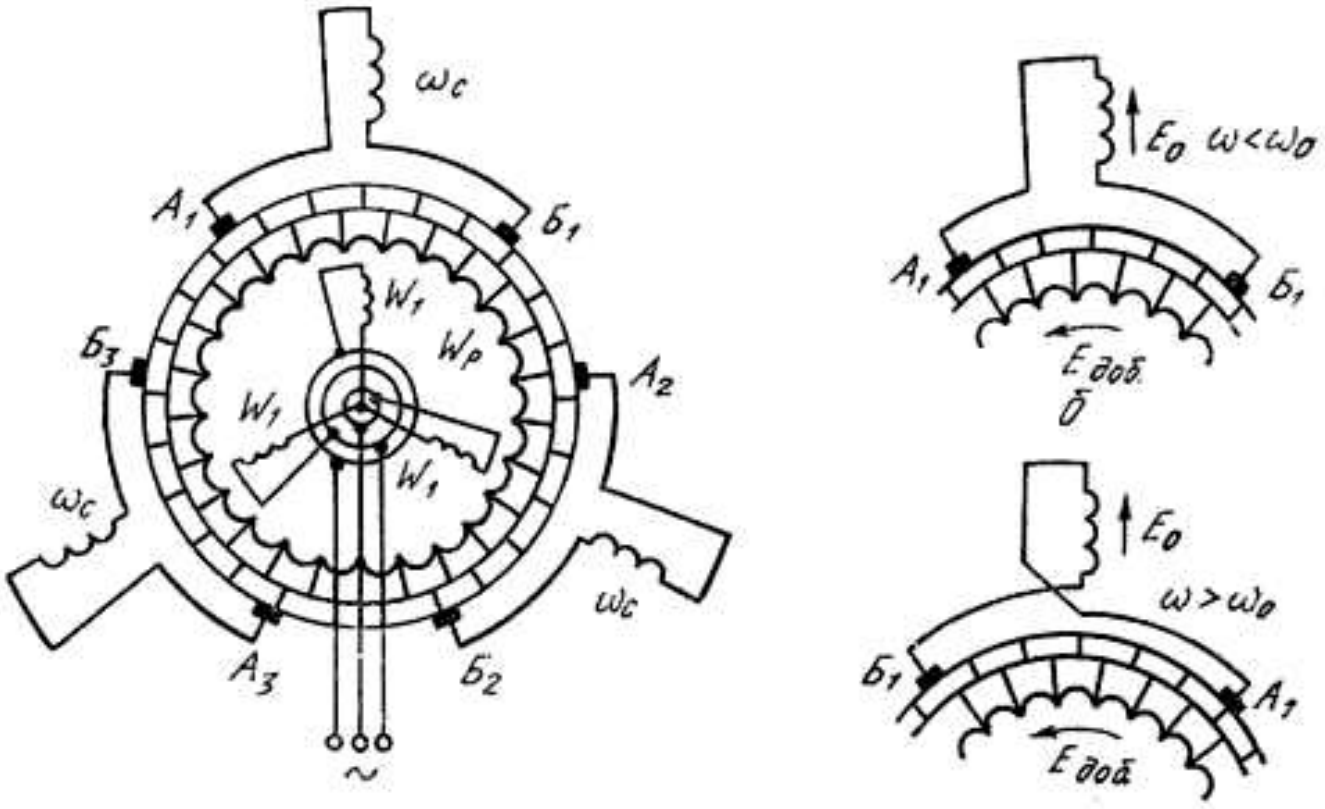


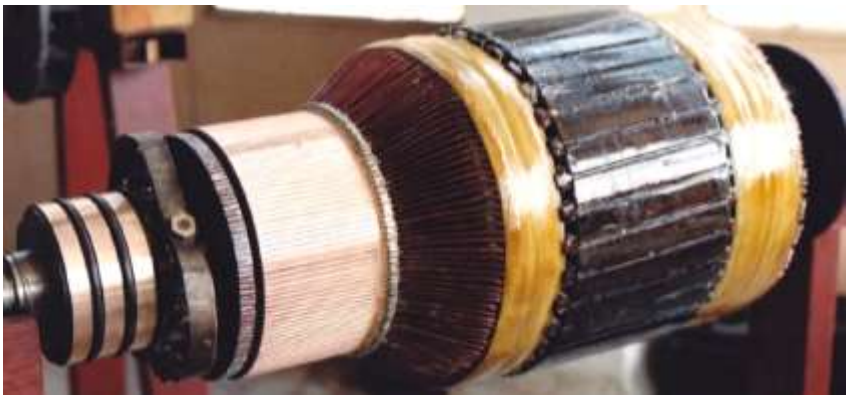
Рис. 4.6. Принципиальная схема импульсного регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока независимого возбуждения

На рис. 4.6 показаны некоторые принципиальные схемы импульсного регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

В схеме, приведенной на рис. 4.6, *а*, обмотка якоря двигателя с помощью контактора ***К*** периодически включается и выключается; обмотка возбуждения включена постоянно. В период, когда обмотка якоря включена, по обмотке проходит ток и двигатель, развивая положительный момент, ускоряется; величина скорости, до которой разгонится двигатель, при прочих равных условиях зависит от продолжительности импульса. Когда контактор ***К*** отключается, момент двигателя становится равным нулю и он замедляется под действием статического момента. (с этого начинается Лекція № 5)

Принципиальная схема коллекторного двигателя Шраге





Ротор двигателя

Лекція № 5

ТЕМА № 4 Регулирование скорости вращения двигателей переменного тока

План

1. Импульсный метод регулирования скорости вращения электродвигателей.

(продолжение)

В схеме, приведенной на рис. 4.6, *а*, обмотка якоря двигателя с помощью контактора ***К*** периодически включается и выключается; обмотка возбуждения включена постоянно. В период, когда обмотка якоря включена, по обмотке проходит ток и двигатель, развивая положительный момент, ускоряется; величина скорости, до которой разгонится двигатель, при прочих равных условиях зависит от продолжительности импульса. Когда контактор ***К*** отключается, момент двигателя становится равным нулю и он замедляется под действием статического момента.

На рис. 4.7 представлены механические характеристики двигателя независимого возбуждения при импульсном замыкании и размыкании цепи якоря для различных значений ε. *Под механической характеристикой здесь* подразумевается зависимость средней скорости вращения двигателя от момента нагрузки. Форма этих характеристик легко поясняется. Действительно, если $\varepsilon = 1$, то двигатель непрерывно включен – этому предельному случаю соответствует естественная характеристика. В другом предельном случае, когда $\varepsilon = 0$, двигатель выключен, следовательно, развиваемый им момент равен нулю. Механическая характеристика при $\varepsilon = 0$ совпадает с осью ординат. Очевидно, что для промежуточных значений $1 > \varepsilon > 0$, семейство механических характеристик будет располагаться между естественной характеристикой и осью ординат. Эти характеристики напоминают характеристики двигателя при реостатном регулировании скорости вращения.

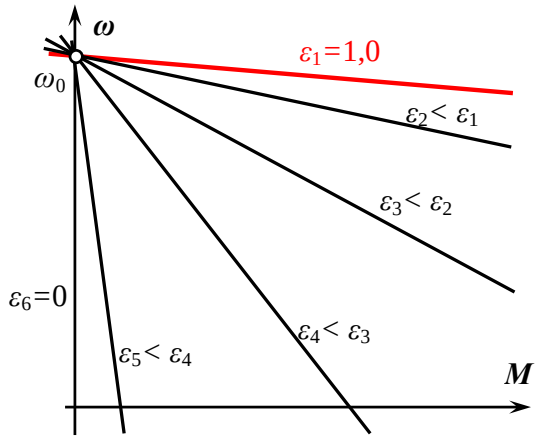


Рис. 4.7. Механические характеристики двигателя для случая работы по схеме, приведенной на рис. 4.6, *а*

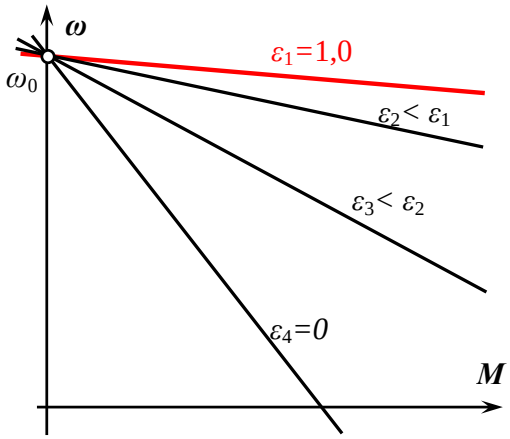


Рис. 4.8. Механические характеристики для случая работы двигателя по схеме, приведенной на рис. 4.6, *б*

В случае работы двигателя по схеме, изображенной на рис. 4.6, *б*, контактор ***К*** периодически включает или шунтирует дополнительное сопротивление в цепи якоря двигателя. Механические характеристики двигателя для данного случая приведены на рис. 4.8. Вследствие того что двигатель при отключенном контакторе ($\varepsilon = 0$) остается присо-

единенным к сети, его механическая характеристика напоминает обычную реостатную характеристику. Все характеристики при $\varepsilon > 0$ располагаются выше упомянутой. Для этой схемы включения жесткость механических характеристик двигателя при тех же значениях ε оказывается большей, чем в предыдущем случае.

Более жесткие механические характеристики получаются, если двигатель включить по схеме, приведенной на рис. 4.6, *в*. Здесь с помощью соответствующего переключения (например, реверсивного контактора) двигатель при подаче одного импульса присоединяется к сети, а при подаче другого работает в режиме динамического торможения. Для одного из предельных случаев ($\varepsilon = 0$) обмотка якоря двигателя отключена от сети и замкнута на сопротивление; его механическая характеристика, соответствующая динамическому торможению, проходит через начало координат. Как и в предыдущем случае, если $\varepsilon = 1$, получается естественная характеристика двигателя. Для промежуточных значений ε механические характеристики (рис. 4.9) подобны характеристикам двигателя независимого возбуждения при регулировании скорости вращения шунтированием обмотки якоря.

Схеме, приведенной на рис. 4.6, *г*, соответствует семейство характеристик, отвечающее регулированию скорости вращения двигателя независимого возбуждения при ослаблении магнитного потока.

Еще более жесткими механическими характеристиками обладает двигатель, включенный по схеме, данной на рис. 4.6, *д*, что позволяет обеспечить больший диапазон регулирования скорости, чем в предыдущих случаях.

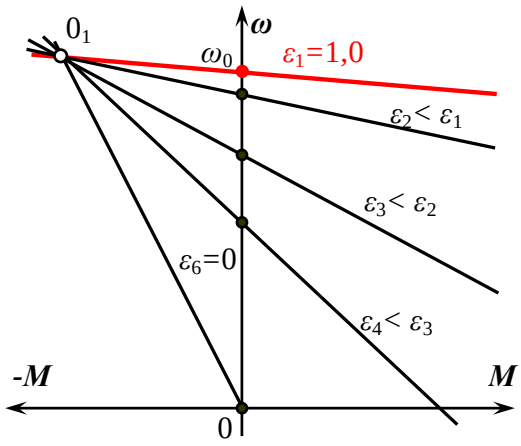


Рис. 4.9. Механические характеристики для случая работы двигателя по схеме, приведенной на рис. 4.6, *в*

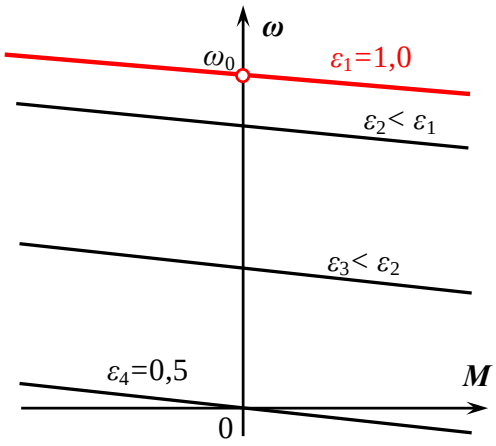


Рис. 4.10. Механические характеристики для случая работы двигателя по схеме, приведенной на рис. 4.6, *г,д*

В рассматриваемой схеме предполагается, что двигатель имеет две независимые обмотки возбуждения **ОВ₁** и **ОВ₂**, каждая из которых создает НС, одинаковые по величине, но разные по знаку. При длительном включении обмотки **ОВ₁** ($\varepsilon = 1{,}0$) двигатель работает на естественной характеристике. Отключение обмотки возбуждения **ОВ₁** и включение обмотки **ОВ₂** ($\varepsilon = 0$) переводит двигатель для работы на естественной характеристике, но с противоположным направлением вращения. Для $\varepsilon = 0{,}5$ механическая характеристика двигателя проходит через начало координат параллельно естественной характеристике. Изменяя величину ε в пределах 0,5 – 1,0, можно регулировать скорость вращения двигателя в сравнительно широких пределах (рис. 4.10). Механические характеристики двигателя при этом подобны тем, какие получаются в системе Г – Д.

Импульсное регулирование скорости вращения двигателей постоянного тока находит применение для приводов малой мощности (например, во вспомогательных авиационных устройствах, следящих системах и др.)

Метод импульсного регулирования скорости вращения применим для двигателей переменного тока. Простейшие принципиальные схемы включения асинхронных короткозамкнутых двигателей при импульсном управлении приведены на рис. 4.11.

Механические характеристики короткозамкнутых двигателей, включенных по схемам, изображенным на рис. 4.11, приведены на рис. 4.12.

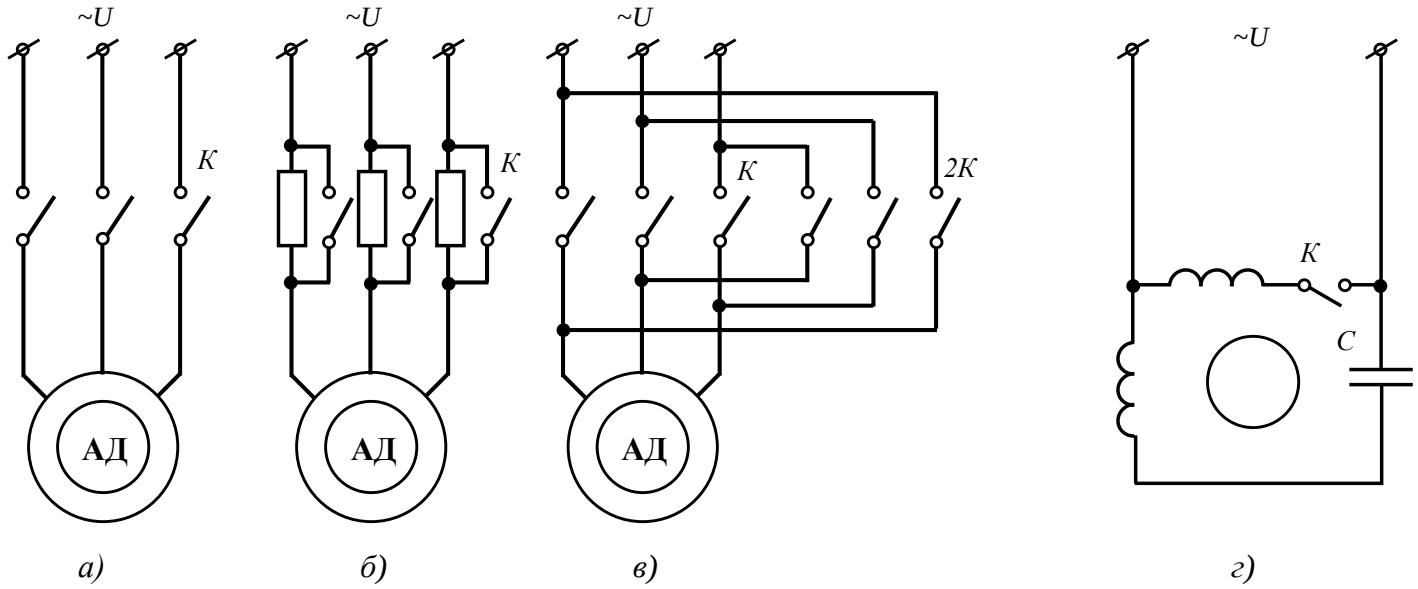


Рис. 4.11. Принципиальная схема импульсного управления короткозамкнутыми асинхронными двигателями

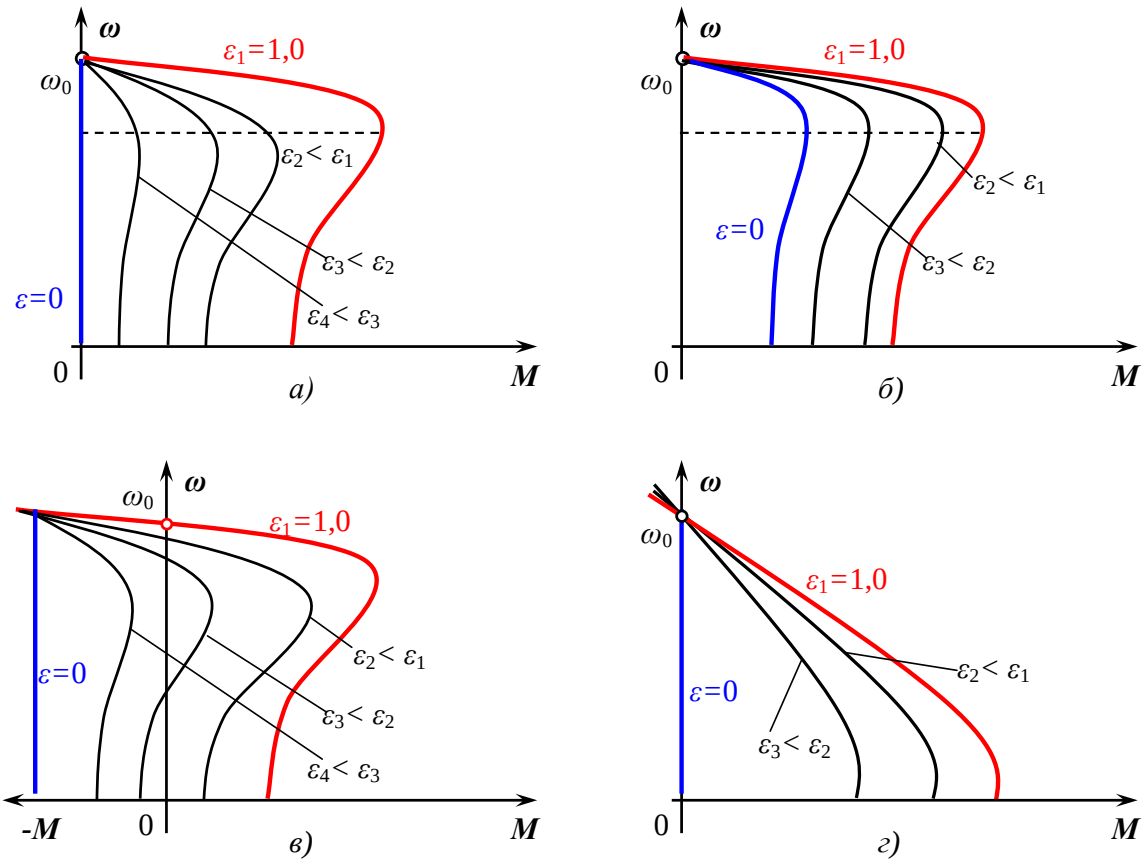


Рис. 4.12. Механические характеристики двигателей, управляемых по схемам, изображенным на рис. 4.11.

Импульсное регулирование скорости вращения короткозамкнутых двигателей достигается также путем периодического включения и выключения переключателя ***К***. Регулирование скорости вращения по схемам, изображенным на рис. 4.11, может производиться в сравнительно широких пределах лишь при осуществлении замкнутых систем управления, в которых, как было показано выше, используются обратные связи для автоматического поддержания скорости вращения двигателя на заданном уровне.

Надежность и четкость работы систем импульсного регулирования скорости вращения двигателей зависит от надежности и быстродействия аппаратов управления. Весьма перспективными в этом отношении являются управляемые полупроводниковые приборы, например тиристоры, которые могут быть использованы в качестве бесконтактный аппаратов управления.

Недостатки:

1. Энергетические показатели при импульсном регулировании напряжения хуже из-за больших пульсаций напряжения и угловой скорости, а также из-за переходных электромагнитных процессов, вызванных включением и выключением обмоток статора двигателя

Еще худшими энергетическими показателями обладает ЭП, схема которого представлена на рис. 4.11 *в*. Наложение двигательного и тормозного режимов вызывает почти непрерывные электромагнитные переходные процессы.

Достоинство (схема рис. 4.11 *в*):

Повышенная жесткость механических характеристик в области генераторного режима.

Импульсное регулирование переменного напряжения применяется редко, оно уступило место другим способам регулирования.

Лекція № 6

ТЕМА № 5 Переходные процессы в электроприводе

План

1. Общие сведения о переходных режимах.
2. Время ускорения и замедления привода. определение наивыгоднейшего передаточного отношения.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

Переходным режимом электропривода называют режим работы при переходе от одного установившегося состояния привода к другому, когда изменяются скорость, момент и ток. *Эти режимы характеризуются изменениями ЭДС, угловой скорости, момента и тока.*

Причинами возникновения переходных режимов в электроприводах являются либо изменение нагрузки, связанное с производственным процессом, либо воздействие на электропривод при управлении им, т. е. пуск, торможение, изменение направления вращения и т. п. Переходные режимы в электроприводах могут возникнуть также в результате аварий или нарушения нормальных условий электроснабжения (например, изменение напряжения или частоты сети, несимметрия напряжения и т. п.).

Изучение переходных режимов электропривода имеет большое практическое значение. Правильный выбор мощности электродвигателей, правильный подбор аппаратов и расчет схем управления, уменьшение расхода энергии при пуске и торможении основаны на знании переходных режимов электроприводов.

Лишь ограниченное число исполнительных механизмов допускает возможность проектирования электроприводов без учета характера протекания переходных процессов. К ним относятся некоторые редко пускаемые и длительно работающие механизмы с простейшими пусковыми устройствами (например, вентилятор, насос и т. п.). Для большинства же рабочих машин характер протекания переходных процессов должен учитываться, так как он оказывает существенное влияние на работу привода.

Для увеличения производительности механизма необходимо не только выбрать оптимальное значение номинальной скорости, но и стремиться к сокращению длительности переходных режимов привода.

Работы советских ученых, проведенные в Московском энергетическом институте, в Электротехническом и Политехническом ленинградских институтах, в Харьковском электротехническом институте и других организациях, внесли большой вклад в теорию переходных режимов в электроприводах постоянного и переменного тока.

Изучение переходных режимов и влияния на них различных электрических и механических параметров, например напряжения, сопротивления, индуктивности, махового момента и т. п., необходимо также для правильного выбора способов управления и расчета схем.

В переходном режиме электропривода одновременно и взаимосвязанно между *собой действуют переходные механические, электромагнитные и тепловые процессы. При быстро протекающих процессах изменение теплового состояния электропривода в большинстве случаев не оказывает существенного влияния на другие процессы, поэтому в дальнейшем при изучении переходных режимов в электроприводах изменение тепловo-*

го состояния двигателя не учитывается. В этом случае имеют в виду протекание только механических и электромагнитных переходных процессов, в совокупности называемых электромеханическим переходным процессом.

Переходные режимы электроприводов связаны с динамикой работы электрического двигателя и производственного механизма. Поэтому возникает необходимость в рассмотрении основных сведений из области динамики электропривода.

2. ВРЕМЯ УСКОРЕНИЯ И ЗАМЕДЛЕНИЯ ПРИВОДА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИВЫГОДНЕЙШЕГО ПЕРЕДАТОЧНОГО ОТНОШЕНИЯ

Время переходных режимов привода: пуска, торможения, перехода от одной скорости к другой, как указывалось выше, влияет на производительность механизма.

Определение времени переходных режимов основано на интегрировании уравнения движения привода:

$$M - M_c = J\frac{d\omega}{dt}; \tag{6.1}$$

$$J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{4g}; \tag{6.2}$$

где D – диаметр инерции, м;

G – сила тяжести (вес), Н. Это соотношение следует из формулы, определяющей момент инерции тела массой m, кг;

ρ – радиус инерции, м.

Если сила тяжести выражена в ньютонах, то масса тела определяется из равенства

$$G = mg, \tag{6.3}$$

где g = 9,81 м/с^2 – ускорение свободного падения.

Разделяя переменные в соотношении (6.1), получаем:

$$dt = \frac{Jd\omega}{M - M_c}. \tag{6.4}$$

Время, необходимое для изменения скорости привода от ω_1, до ω_2,

$$t_{1,2} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{Jd\omega}{M - M_c}. \tag{6.5}$$

Для решения этого интеграла необходимо знать зависимость моментов двигателя и механизма от скорости. В простейшем случае, приняв $M=const$, $M_c=const$ и $J=const$, получим:

$$t_{1,2} = J\frac{\omega_1 - \omega_2}{M - M_c}. \tag{6.6}$$

Этим уравнением можно воспользоваться, например, для приближенного расчета времени пуска двигателя с реостатом. Если текущее значение момента двигателя заменить средним его значением через $M = \alpha M_н$, как это показано на рис. 6.1, то получим следующее выражение для времени пуска от состояния покоя до конечной скорости, соответствующей заданному моменту сопротивления:

$$t_П = \frac{J\omega_н}{\alpha M_н - M_c}. \tag{6.7}$$

Если требуется точно учесть время переходного процесса и момент двигателя не может быть принят постоянным, например при пуске короткозамкнутого двигателя, необходимо пользоваться уравнением (6.5). При этом следует иметь в виду, что момент инерции для большинства приводов является постоянной величиной, а момент двигателя и момент сопротивления в переходных режимах обычно не остаются постоянными.

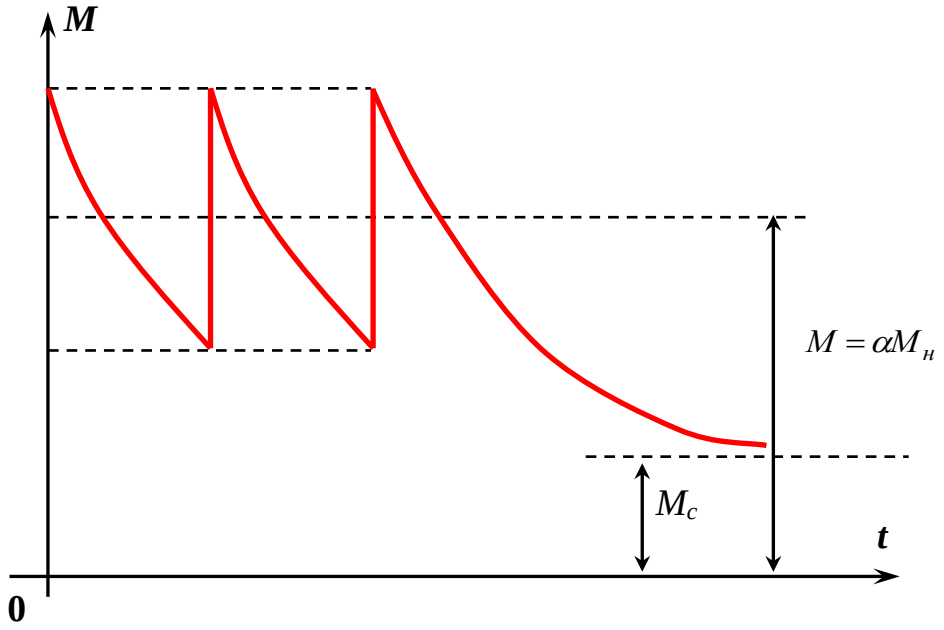


Рис. 6.1. График пускового момента двигателя

Из уравнения (6.5) видно, что теоретически полное время переходного процесса равно бесконечности. Действительно, поскольку переходный процесс заканчивается при наступлении равенства моментов($M = M_c$), то величина, стоящая под знаком интеграла, стремится к бесконечности. В практических расчетах обычно считают, что процесс разбега заканчивается при скорости, равной не ω_2, а приблизительна $\omega = 0{,}95\ \omega_2$ тогда время разбега получит конечное значение.

В тех случаях, когда динамический момент имеет отрицательное значение, привод замедляется. Для такого случая уравнение моментов будет иметь вид:

$$-M - M_c = J\frac{d\omega}{dt}. \qquad (6.8)$$

Очевидно, привод замедляется и в том случае, когда двигатель развивает положительный момент по абсолютной величине, меньший момента сопротивления.

Из последнего уравнения следует, что время замедления:

$$t_T = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{Jd\omega}{-(M + M_c)} = \int_{\omega_2}^{\omega_1} \frac{Jd\omega}{M + M_c}. \qquad (6.9)$$

Полагая в частном случае $J = const$, $M = const$ и $M_c = const$, получаем:

$$t_T = J\frac{\omega_1 - \omega_2}{M + M_c}. \qquad (5.10)$$

Если моменты двигателя и статического сопротивления находятся в сложной зависимости от скорости, уравнение движения аналитически не решается, В этом случае приходится пользоваться приближенными графическими или графо-аналитическими методами решения.

В ряде практических случаев (например, в следящих системах, приводах вспомогательных механизмов прокатных станов, продольно-строгальных станках и т. п.) возникает необходимость в получении минимального времени разгона и торможения производственного механизма с целью повышения его производительности. При заданных значениях моментов инерции ротора двигателя $J_Д$, производственного механизма J_c и момента сопротивления M_c уравнение движения привода относительно рабочего вала (пренебрегая потерями в передачах) может быть записано так:

$$iM - M_c = \left(J_c + k \cdot J_Д \cdot i^2\right)\frac{d\omega_c}{dt}, \tag{6.11}$$

где k – коэффициент, учитывающий момент инерции передач.

Очевидно, минимум времени разгона имеет место при наибольшем ускорении. Из (6.11):

$$\frac{d\omega_c}{dt} = \frac{iM - M_c}{J_c + k \cdot J_Д \cdot i^2}. \tag{6.12}$$

Пользуясь правилом определения максимума $\frac{d\omega_c}{dt}$ и полагая M_c = *const*, а также M=*const* (средним за период переходного режима), ***находим оптимальное (или наивыгоднейшее) передаточное отношение i.***

$$i_{опт} = \frac{M_c}{M} + \sqrt{\left(\frac{M_c}{M}\right)^2 + \frac{J_c}{kJ_Д}}. \tag{6.13}$$

В том случае, когда момент сопротивления оказывается значительно меньшим момента двигателя при пуске,

$$i_{опт} = \sqrt{\frac{J_c}{kJ_Д}}. \tag{6.14}$$

Лекція № 7

ТЕМА № 5 Переходные процессы в электроприводе

План

1. Графическое и графо-аналитическое решение уравнения движения привода.

1. ГРАФИЧЕСКОЕ И ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПРИВОДА

Если невозможно аналитически решить уравнение движения, то его решают, например, так называемым методом пропорций или методом конечных приращений. Сущность этого метода заключается в замене бесконечно малых приращений скорости $d\omega$ и времени dt малыми конечными приращениями $\Delta\omega$ и Δt. При этом предполагается, что в уравнение движения электропривода подставляются средние значения момента двигателя и момента сопротивления для каждого периода изменения скорости. Эти средние значения моментов обычно находятся графическим путем на основании механических характеристик двигателя и производственного механизма.

Рассмотрим применение метода пропорций на примере короткозамкнутого асинхронного двигателя для привода вентилятора.

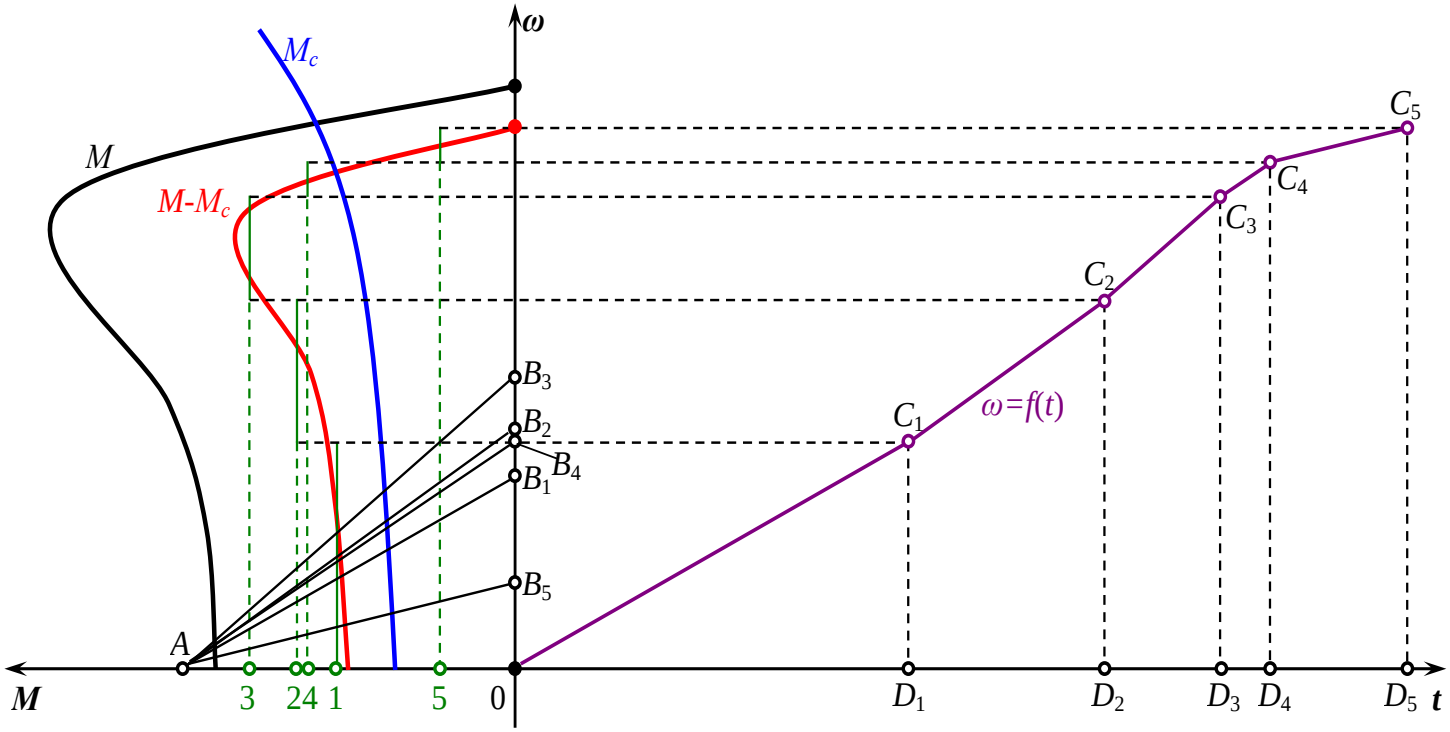


Рис. 7.1 Применение метода пропорций для случая пуска привода вентилятора с короткозамкнутым двигателем

Метод пропорций основан, как указывалось выше, на следующей записи уравнения движения электропривода.

$$M - M_c = J\frac{d\omega}{dt}; \qquad (7.1)$$

Считая, что в некотором интервале времени Δt разность моментов $M - M_c$ остается величиной постоянной, получаем пропорцию

$$\frac{M - M_c}{j} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}. \qquad (7.2)$$

На рис. 7.1 показан ход графического построения кривой скорости $\omega = f(t)$ и нахождения времени пуска двигателя, выполненный на основании пропорции (7.1). Построение ведется следующим образом. В левом квадранте строятся характеристики $M = f(\omega)$ и $M_c = f_1(\omega)$. Графически находится их разность $M - M_c = \psi(\omega)$ – кривая динамического момента, изображаемая в том же квадранте. Последнюю кривую заменяют ступенчатой с участками $M - M_c = const$. От числа участков зависят точность построений и конечные результаты. Точность тем выше, чем на большее число участков разбита кривая $M - M_c = \psi(\omega)$.

Полученные на отдельных участках значения динамических моментов откладывают вверх на оси ординат. Так, для первого участка получаем отрезок *OB,* для второго OB_1 и т. д. Отмеченные на оси ординат точки *B,* B_1, B_2 и т. д. соединяют прямыми с точкой *A,* находящейся от начала координат на расстоянии, пропорциональном величине *J*. Затем из начала координат проводят прямую *OC,* параллельную *AB*. Последняя прямая характеризует искомую функцию $\omega = f(t)$ для первого участка моментов. Это следует из подобия треугольников *AOB* и *ODC*.

Действительно, *OB/OA = CD/OD,* но $OB = M_1 - M_c$; *OA = J*; $CD = \Delta\omega_1$, следовательно, отрезок *OD* согласно уравнению (7.2) соответствует времени пуска на первом участке, т. е. $OD = \Delta t_1$.

Проведя аналогичное построение для всех последующих участков $M - M_c$, строим кривую скорости вращения двигателя и находим искомое время пуска привода.

При построении следует учитывать масштабы величин, связанные между собой соотношением:

$$\frac{m_M}{m_J} = \frac{m_\omega}{m_t}, \qquad (7.3)$$

где m_M – масштаб момента;

m_J – масштаб момента инерции *J*;

m_ω – масштаб скорости вращения двигателя;

m_t – масштаб времени.

Если задаться масштабами трех величин: момента, скорости, времени, то из приведенного соотношения находится масштаб четвертой величины – момента инерции *J*.

Подобный метод построения кривой скорости для определения времени пуска применим также для двигателей постоянного тока, если механические характеристики не могут быть выражены аналитически. Приведенный метод расчета может быть применен не только для пусковых, но и для тормозных режимов работы.

Лекція № 8

ТЕМА № 5 Переходные процессы в электроприводе

План

1. Определение времени пуска двигателя методом площадей
2. Пуск двигателя независимого возбуждения до основной скорости

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПУСКА ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ ПЛОЩАДЕЙ

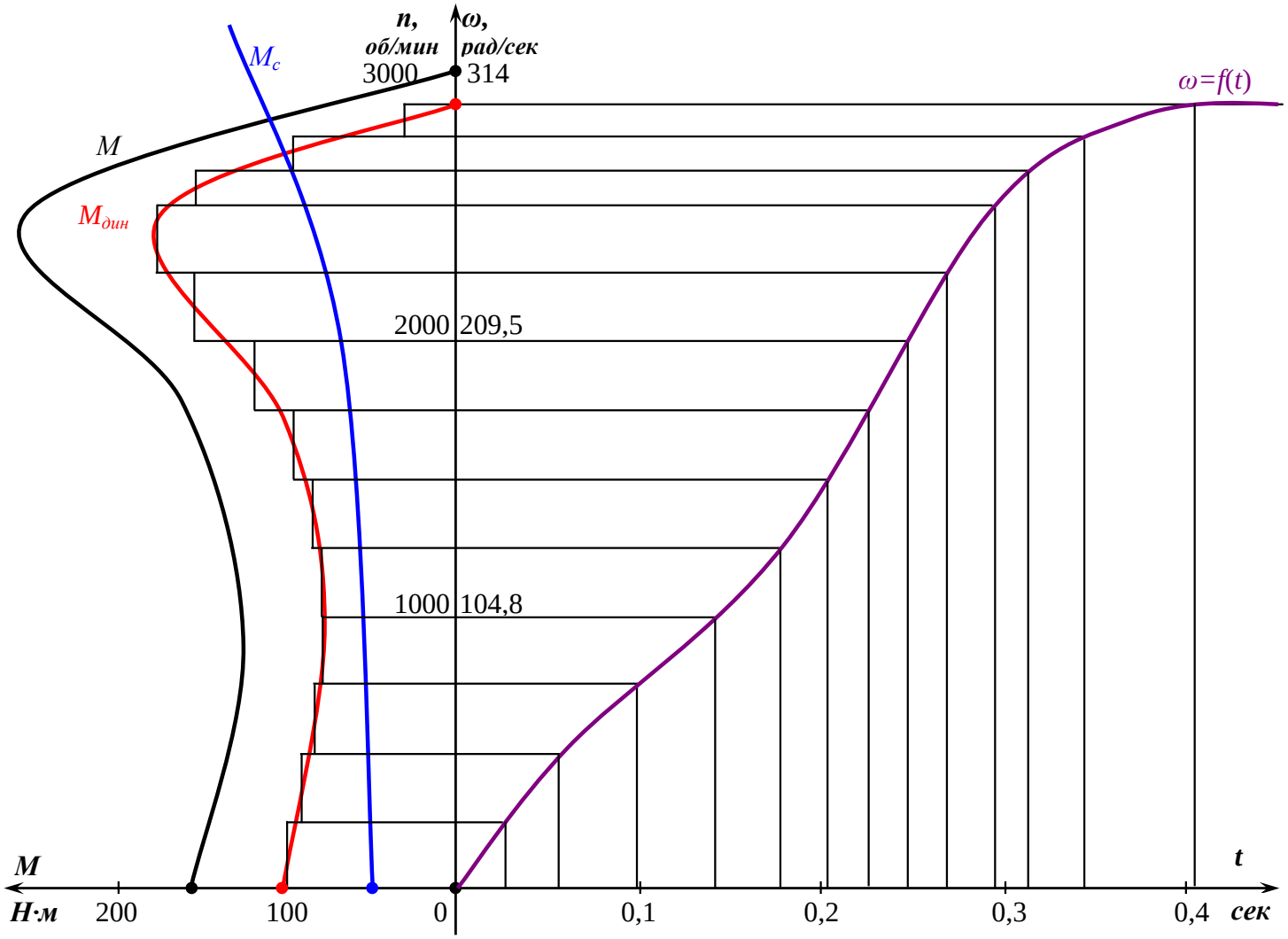


Рис. 8.1. К определению времени пуска привода вентилятора.

Кроме метода пропорций для построения кривой скорости $\omega = f(t)$ и определения времени пуска двигателя используется ***метод площадей***, сводящийся к графо-аналитическому интегрированию уравнения движения. Задаются механическими характеристиками двигателя и производственного механизма. Затем эти две характеристики совмещаются и, как в предыдущем случае, определяется кривая динамического момента $M_{дин} = M - M_c$ (рис. 8.1).

Кривая динамического момента делится на ряд участков, на каждом из которых момент предполагается постоянным и равным среднему значению. Для каждого участка будет справедливо следующее выражение:

$$\Delta t = J\frac{\Delta\omega}{M - M_c}. \qquad (8.4)$$

(*Формулы начал нумеровать с* 8.4)

При равенстве величин $\Delta\omega$ на всех участках общее время пуска определится по формуле

$$t = \sum_1^m (\Delta t) = J\Delta\omega\sum_1^m \frac{1}{M - M_c}, \qquad (8.5)$$

где m – число участков;

$\Delta\omega = const$ – перепад скорости на каждом участке;

$M - M_c$ – соответствующее значение динамического момента (M_1, M_2...) на каждом из участков.

При расчете переходных режимов электроприводов необходимо учитывать характеристики не только производственных механизмов, но и различных типов электродвигателей. Особенности характеристик различных двигателей оказывают существенное влияние на протекание переходных режимов.

Изучение переходных режимов в электроприводах связано с необходимостью установления зависимостей скорости, тока, момента, а иногда и пути от времени при пуске, торможении и реверсировании электродвигателей.

2. ПУСК ДВИГАТЕЛЯ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДО ОСНОВНОЙ СКОРОСТИ

Пуск двигателя независимого возбуждения до основной скорости может быть произведен от сети постоянного тока замыканием в цепи якоря выключателя B (рис. 8.2).

В приведенной схеме предполагается постоянно включенное сопротивление реостата, следовательно, общее сопротивление цепи якоря

$$R = R_я + R_p. \qquad (8.6)$$

При исследовании процесса пуска полагаются неизменными: магнитный поток двигателя Φ, напряжение сети U и момент нагрузки M_c. Кроме того, индуктивность обмотки якоря принимается $L_я = 0$.

Уравнения электрического и механического равновесия системы при пуске

$$U = c\omega + iR; \qquad (8.7)$$

$$M = ci = J\frac{d\omega}{dt} + M_c. \qquad (8.8)$$

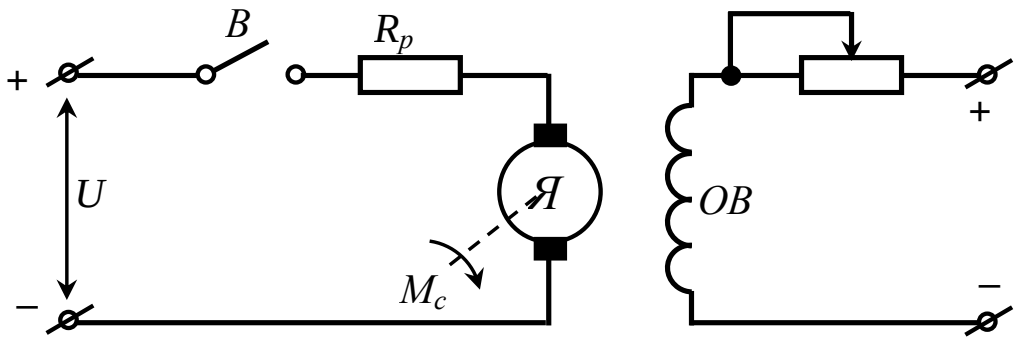


Рис. 8.2 Принципиальная схема пуска двигателя независимого возбуждения

Если из (8.8) определить значение тока якоря *i* и подставить его в (8.7), а затем разделить его левую и правую часть на *c*, то после несложных преобразований получим:

$$\frac{U}{c} = \omega + \frac{JRd\omega}{c^2 dt} + \frac{M_c R}{c^2}, \tag{8.9}$$

или

$$\omega_0 = \omega + T_M \frac{d\omega}{dt} + \Delta\omega_c, \tag{8.10}$$

где $\omega_0 = \frac{U}{c}$ – скорость вращения двигателя при идеальном холостом ходе;

$\Delta\omega_c = \frac{M_c R}{c^2}$ – перепад скорости при нагрузке (рис. 8.3);

$T_M = \frac{JR}{c^2} = \frac{J\omega_0}{M_к}$ – электромеханическая постоянная времени.

Электромеханической постоянной времени называется время, в течение которого привод, обладающий моментом инерции *J*, разгоняется без нагрузки из неподвижного состояния до скорости идеального холостого хода ω_0 при неизменном моменте, равном моменту короткого замыкания $M_к$. Необходимо отметить, что величина постоянной времени зависит от значения $M_к$. С увеличением сопротивления цепи якоря момент $M_к$ уменьшается и соответственно увеличивается постоянная времени. Величина электромеханической постоянной времени не зависит от нагрузки. Уравнение (8.10) может быть записано иначе:

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{T_M} = \frac{\omega_0 - \Delta\omega_c}{T_M}. \tag{8.11}$$

Решение этого уравнения дает:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_c + C \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}, \tag{8.12}$$

где *C* – постоянная интегрирования, определяемая по начальным условиям переходного режима.

Для $t = 0$ начальное значение скорости $\omega = \omega_{нач}$, поэтому:

$$C = \omega_{нач} - (\omega_0 - \Delta\omega_c) = \omega_{нач} - \omega_c. \tag{8.13}$$

Теперь легко получить уравнение для скорости вращения двигателя при пуске в общем виде:

$$\omega = \omega_c + (\omega_{нач} - \omega_c) e^{-\frac{t}{T_M}}, \tag{8.14}$$

где ω_c – установившаяся скорость вращения двигателя (рис. 8.3).

В частном случае, когда пуск двигателя совершается под нагрузкой из неподвижного состояния ($\omega_{нач} = 0$),

$$\omega = \omega_c \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right). \tag{8.15}$$

При пуске без нагрузки до установившейся скорости ω_0:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right). \tag{8.16}$$

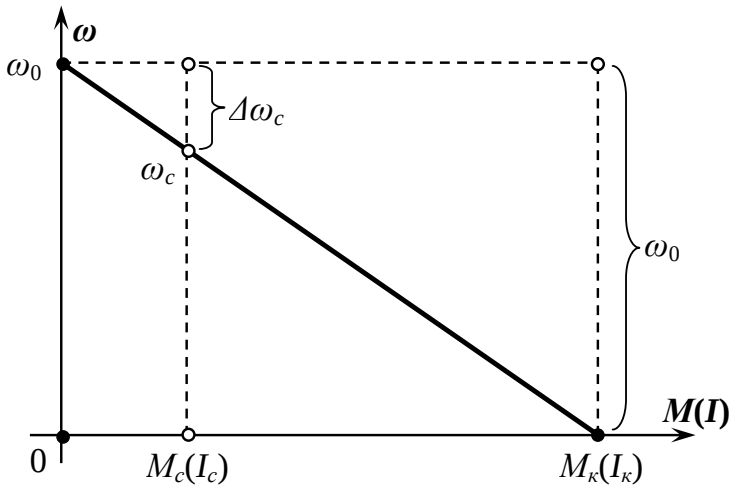


Рис. 8.3. К определению электромеханической постоянной времени.

Аналогичные формулы получаются, если вместо угловой скорости использовать скорость вращения двигателя *n, об/мин,* приводимую в каталогах.

На рис. 8.4 представлены кривые $\omega = f(t)$ при пуске двигателя независимого возбуждения под нагрузкой (кривая 1) и без нагрузки (кривая *2*). Согласно формулам (8.15) и (8.16) процесс пуска теоретически заканчивается за бесконечно большое время. Однако практически можно считать процесс пуска закончившимся при $t_n = (3 \div 4)\, T_M$, так как скорость в этом случае отличается от установившегося значения не более чем на $5 \div 2\%$.

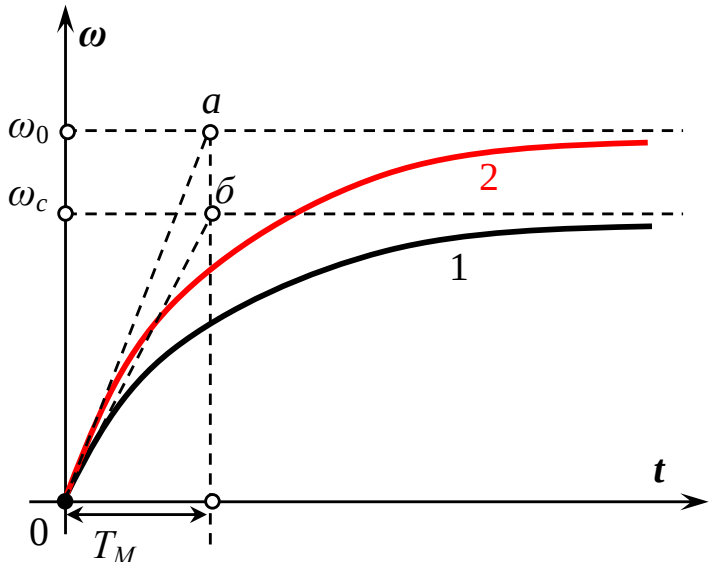


Рис. 8.4 Кривые $\omega = f(t)$ при пуске двигателя независимого возбуждения

В самом деле, из уравнения (8.15) вытекает, что

при $t = \infty$; $\quad e^{-\frac{t}{T_M}} = 0$; $\quad \omega = \omega_c$;

$t = 3T_M$; $\quad e^{-3} \approx 0{,}05$; $\quad \omega \approx 0{,}95\omega_c$;

$t = 4T_M$; $\quad e^{-4} \approx 0{,}02$; $\quad \omega \approx 0{,}98\omega_c$.

Таким образом, для $t = 3T_M$ скорость привода отличается от установившегося значения не более чем на 5%, и можно считать, что неустановившийся процесс к этому времени практически закончится.

Если бы пуск двигателя совершался с неизменным моментом, равным $M_к$, то скорость двигателя во времени изменялась по прямой *Оа* – при пуске двигателя без нагрузки и *Об* – при пуске под нагрузкой (рис. 8.5). Следовательно, если провести через начало координат касательную к кривой 2 до пересечения с горизонталью, проходящей через точку ω_0, то полученный отрезок $\omega_0 a$ даст в определенном масштабе величину $t = T_M$.

Если же аналогичным путем провести касательную к прямой 1, то отрезок $\omega_c б$ также будет равен $T_м$.

Зависимость тока в цепи якоря от времени при пуске двигателя определяется из уравнения (8.8):

$$i = \frac{J}{c} \cdot \frac{d\omega}{dt} + I_c, \qquad (8.17)$$

где $I_c = \frac{M_c}{c}$ – ток нагрузки.

Лекція № 9

ТЕМА № 5 Переходные процессы в электроприводе

План

1. Пуск двигателя независимого возбуждения до основной скорости

1. ПУСК ДВИГАТЕЛЯ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДО ОСНОВНОЙ СКОРОСТИ *(продолжение)*

Определив из (8.12)

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{C}{T_M} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} \tag{9.1}$$

и подставив значение производной в уравнение для тока, получим:

$$i = -\frac{J}{c} \cdot \frac{C}{T_M} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} + I_c. \tag{9.2}$$

Для начальных условий при $t = 0$, $i = I_{нач}$ постоянная интегрирования

$$C = -\frac{cT_M}{J}\left(I_{нач} - I_c\right).$$

Подставив постоянную интегрирования C в (9.2), найдем:

$$i = I_c + \left(I_{нач} - I_c\right) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}. \tag{9.3}$$

Начальное значение тока в общем виде определяем по формуле

$$I_{нач} = \frac{U - E}{R}.$$

В частном случае, когда пуск совершается из неподвижного состояния двигателя ЭДС его равна нулю и

$$I_{нач} = I_к = \frac{U}{R}$$

Ток в якоре при этом выражается зависимостью

$$i = \left(I_к - I_c\right) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} + I_c. \tag{9.4}$$

При пуске без нагрузки, когда $I_c = 0$,

$$i = I_к \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}. \tag{9.5}$$

По формулам (9.4) и (9.5) построены кривые $i = f(t)$, приведенные на рис. 9.1.

Из рассмотрения рис. 8.3, 8.4, 9.1 можно заключить, что если механическая характеристика двигателя линейна и момент нагрузки постоянен, то $\omega = f(t)$ и $i = f_1(t)$ выражаются простыми экспоненциальными зависимостями.

При многоступенчатом реостатном пуске двигателя параллельного возбуждения и постоянном напряжении сети задаются обычно определенными границами колебаний пускового тока или пускового момента. В этом случае для нахождения времени пуска

удобнее пользоваться в качестве исходного не уравнением скорости, а уравнением тока (9.3).

Процесс пуска двигателя в несколько ступеней, изображенный на рис. 9.2, характерен тем, что ток двигателя во время пуска колеблется в пределах от I_1 до I_2. В начале пуска $I_{нач} = I_1$, далее, по мере ускорения двигателя растет его ЭДС, вследствие чего начинает уменьшаться ток в цепи якоря двигателя, а следовательно, и момент двигателя. Когда ток достигнет некоторого значения I_2, выключается часть пускового реостата с таким расчетом, чтобы ток двигателя снова достиг значения I_1 и т. д. Найдем время t_x, в течение которого ток двигателя изменяется от I_1 до I_2. Для этого воспользуемся уравнением (9.3), написав его в следующем виде:

$$I_2 = I_c + (I_1 - I_c) \cdot e^{-\frac{t_x}{T_{Mx}}}, \qquad (9.6)$$

где I_1 и I_2 – границы изменения пускового тока (рис. 9.2);

t_x – время пуска двигателя на рассматриваемой ступени пускового реостата;

T_{Mx} – электромеханическая постоянная времени для той же ступени.

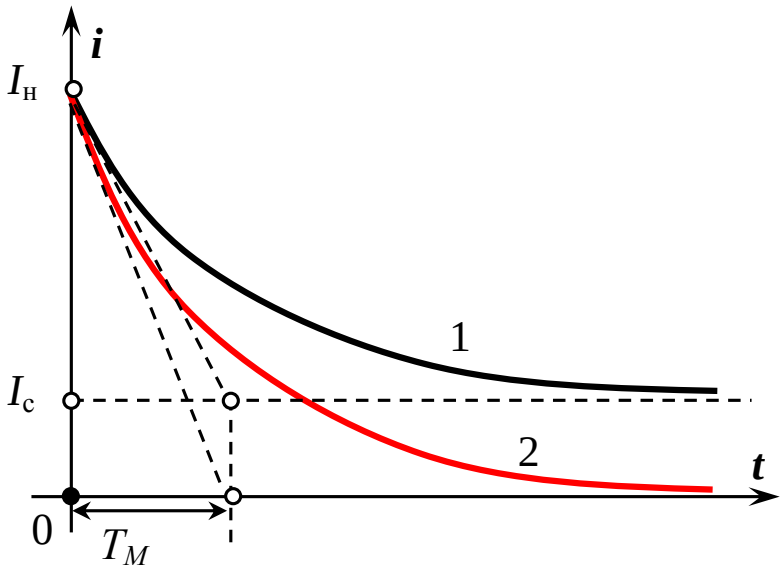


Рис. 9.1 Кривые *i= f (I)* при пуске двигателя независимого возбуждения в одну ступень.

1 – пуск под нагрузкой; 2 – пуск при холостом ходе

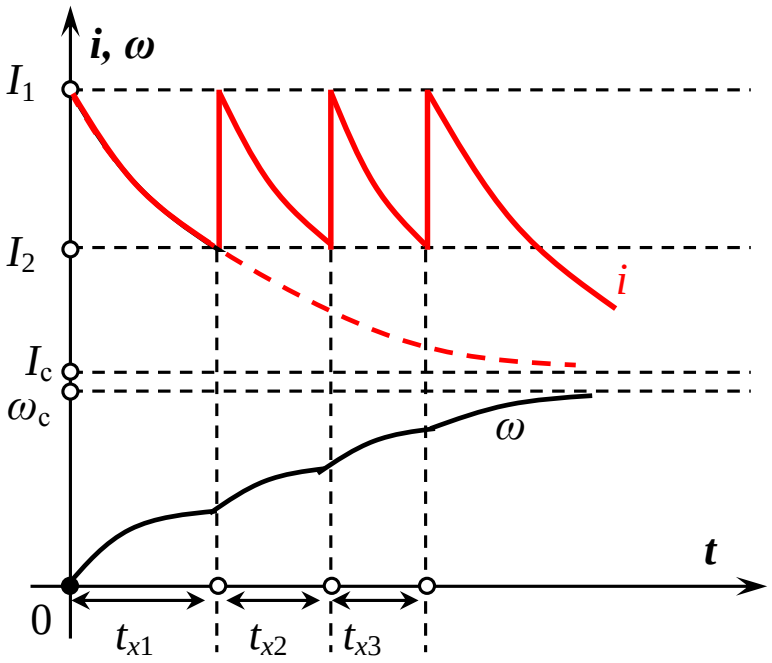


Рис. 9.2 Диаграмма для реостатного пуска двигателя независимого возбуждения в несколько ступеней

Постоянная времени для каждой ступени реостата соответствует величине введенного в цепь якоря сопротивления.

Решая равенство (9.6) относительно времени пуска, находим:

$$t_x = T_{Mx}\, ln \frac{I_1 - I_c}{I_2 - I_c}. \qquad (9.7)$$

Если значение тока нагрузки I_c во время пуска не изменяется, то под знаком логарифма стоит постоянная величина и, следовательно, можно написать:

$$t_x = kT_{Mx}. \qquad (9.8)$$

По мере выведения реостата сопротивление цепи якоря уменьшается, а следовательно, уменьшается и величина электромеханической постоянной, что приводит в свою очередь к уменьшению времени пуска на каждой последующей ступени, т. е. $t_{xl} > t_{x2} > t_{x3}$ и т. д.

На рис. 9.2 приведена зависимость $i = f(t)$, построенная на основании формулы (9.3) с учетом сказанного выше. Там же показана кривая скорости вращения двигателя $\omega = f(t)$, которая построена по уравнению (8.14) Лекція № 8. Время переходного процесса на последней ступени (при $I = I_c$ или $\omega = \omega_c$) получается равным бесконечности. Практически для этой ступени надо принимать подобно предыдущему

$$t_x = (3 \div 4)T_{Mx}.$$

В тех случаях, когда время протекания электромагнитных процессов соизмеримо со временем протекания механических процессов, приходится учитывать и влияние электромагнитной инерции цепи якоря, которым мы до сих пор пренебрегали. На рис. 9.3 показаны кривые пуска двигателя при постоянном напряжении сети и учете индуктивности якоря. Как видно из рис. 9.3, пуск двигателя состоит из двух этапов.

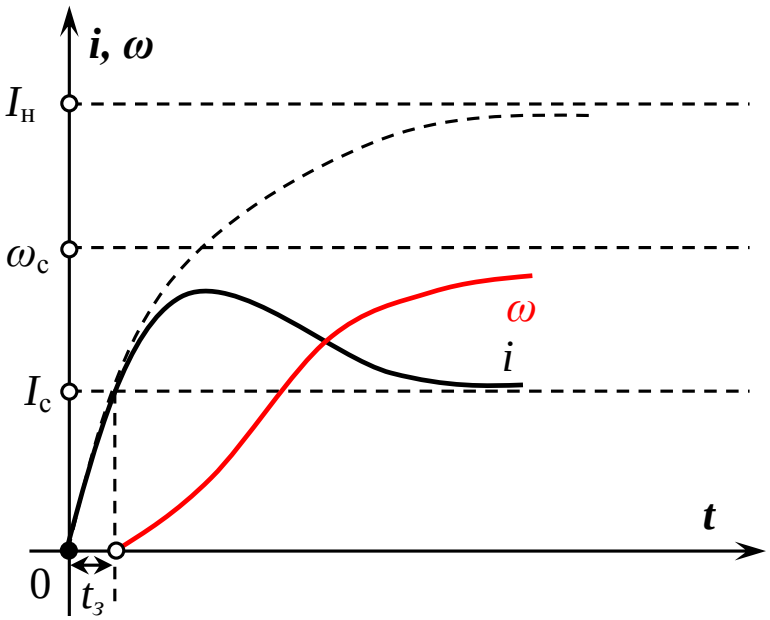


Рис. 9.3 Диаграмма для $\omega = f(t)$, u $i = f_1(t)$, при пуске двигателя независимого возбуждения, построенная с учетом электромагнитной инерции якоря

Первый этап: двигатель неподвижен, пока ток в якоре не достигнет величины, необходимой для создания момента трогания. На этом этапе увеличение тока двигателя зависит от скорости протекания электромагнитного процесса, определяемого уравнением напряжения для цепи якоря двигателя:

$$U = iR + L_я \frac{di}{dt}. \qquad (9.9)$$

Решение уравнения (9.9) при индуктивности якоря $L_я = const$ дает закон изменения тока в якоре при неподвижном двигателе:

$$i = \frac{U}{R}\left(1 - e^{-\frac{t_x}{T_э}}\right) = I_к\left(1 - e^{-\frac{t_x}{T_э}}\right), \qquad (9.10)$$

где $I_к = U/R$ – ток короткого замыкания двигателя;

$T_э = L_я/R$ – электромагнитная постоянная времени цепи якоря; она имеет размерность времени и определяет скорость протекания электромагнитных процессов.

Кривая тока, построенная по уравнению (9.10), изображена на рис. 9.3, в пределах промежутка времени t_3 сплошной кривой, а за его пределами – пунктирной. Время t_3, которое называют ***временем запаздывания***, определяется из (9.10) при подстановке тока $i = I_c$. В этом случае

$$t_3 = T_э \ ln \frac{I_к}{I_к - I_c}. \qquad (9.11)$$

Следует отметить, что в действительности время запаздывания будет несколько больше времени, подсчитанного по формуле (9.11). Это дополнительное запаздывание пуска двигателя объясняется тормозящим влиянием вихревых токов, возникающих в стали двигателя.

По истечении времени t_3 двигатель начнет вращаться. Скорость двигателя возрастает, и ЭДС, возникающая в якоре, влияет на величину тока двигателя. Теперь уже оба процесса – электромагнитный и электромеханический протекают совместно, составляя

единый процесс пуска двигателя. Расчет тока якоря и скорости двигателя при $\Phi = const$ необходимо вести, исходя из следующих уравнений:

$$U = iR + L_я \frac{di}{dt} + e = iR + L_я \frac{di}{dt} + c\omega, \qquad (9.12)$$

и

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}.$$

Разделив обе части последнего равенства на c, получим:

$$i = I_c + \frac{Jd\omega}{dt}. \qquad (9.13)$$

Совместное решение уравнений (9.12) и (9.13) приводит к линейному дифференциальному уравнению второго порядка относительно i (соответственно и относительно ω), интегрирование которого дает возможность построить искомые зависимости $i = f_1(t)$ и $\omega = f(t)$. Примерный характер кривых для этого случая показан на рис. 9.3.

Лекція № 10

ТЕМА № 5 Переходные процессы в электроприводе

План

1. Пуск двигателя независимого возбуждения до скорости выше основной

1. ПУСК ДВИГАТЕЛЯ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДО СКОРОСТИ ВЫШЕ ОСНОВНОЙ

Ранее был рассмотрен пуск двигателя до основной скорости; при этом предполагалось, что в процессе разгона магнитный поток и напряжение сети оставались неизменными и равными номинальным. Если возникает необходимость разогнать двигатель до скорости выше основной, то обычно этот процесс совершается в два этапа – *первый* заключается в разбеге двигателя до основной скорости с выведением его на естественную характеристику и *второй* – в разгоне от основной скорости до требуемой, которая достигается ослаблением магнитного потока двигателя. Пуск двигателя до скорости выше основной может быть произведен по схеме, приведенной на рис. 10.1 размыканием выключателя ***В***.

Статические характеристики, соответствующие номинальному и ослабленному магнитному потоку двигателя, показаны сплошными линиями на рис. 10.2. Если бы поток двигателя изменялся мгновенно, то переход с одной характеристики на другую происходил так, как показано пунктирными линиями со стрелками.

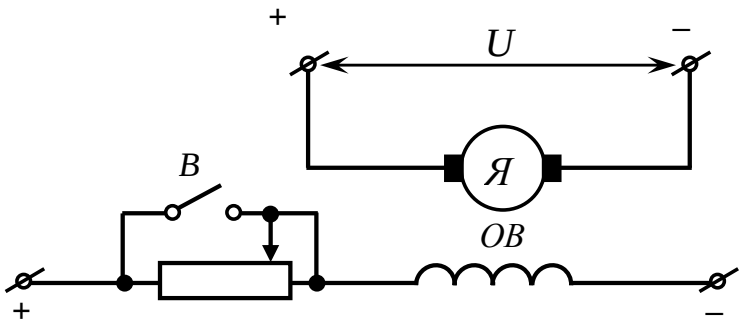


Рис 10.1 Принципиальная схема пуска двигателя выше основной скорости

В действительности, за счет индуктивности обмотки возбуждения магнитный поток изменяется во времени, обусловленном электромагнитной постоянной времени контура обмотки возбуждения и поэтому ток якоря и момент двигателя не достигают значений соответствующих I_1 и M_1 как показано на рис. 10.2, а изменяются по характеристикам, изображенным красными линиями, отвечающим так называемым *динамическим механическим характеристикам*.

Рассмотрим подробнее второй этап разгона. В данном случае вследствие нелинейной зависимости скорости двигателя ω от его магнитного потока Φ, а также тока возбуждения $I_в$ от величины магнитного потока Φ решение уравнений переходного режима целесообразно производить графо-аналитическим методом.

В общем случае исходные уравнения для расчетов скорости вращения и тока двигателя при ослаблении его магнитного потока записываются аналогично предыдущему, т. е.

$$U = k\Phi\omega + iR, \tag{10.1}$$

$$k\Phi i = M_c + J\frac{d\omega}{dt}. \tag{10.2}$$

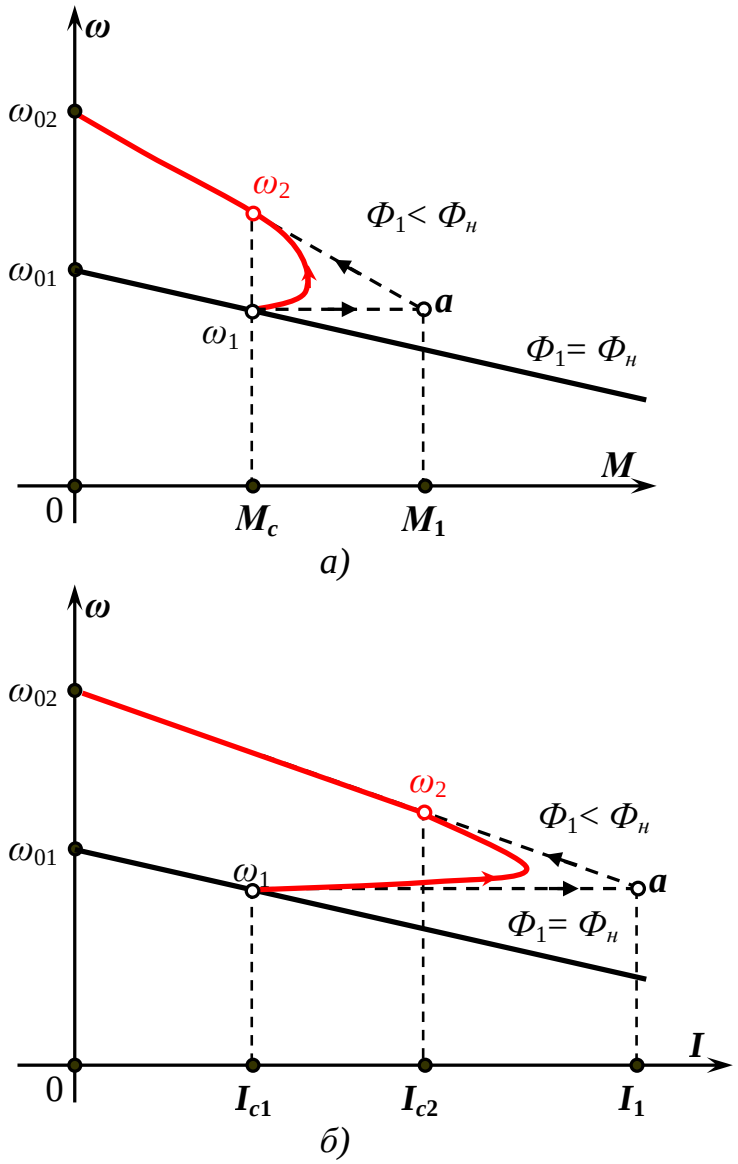


Рис. 10.2. Статические характеристики при ослаблении магнитного потока двигателя

Здесь не учитывается индуктивность якоря ввиду ее незначительности по сравнению с индуктивностью обмотки возбуждения.

Заменив k в (10.1) через $k = \dfrac{U}{\Phi_н\omega_0}$, а в (10.2) $k_н = \dfrac{M_н}{\Phi_н I_н}$ запишем:

$$U = \frac{U}{\Phi_н\omega_0}\Phi\omega + iR; \tag{10.3}$$

$$\frac{M_н\Phi i}{\Phi_н I_н} = M_c + J\frac{d\omega}{dt}. \tag{10.4}$$

Определив i из (10.4) и подставив его в (10.3), а также разделив обе части полученного уравнения на $\dfrac{U\Phi_н}{\Phi}$, получим:

$$\frac{\Phi}{\Phi_н}=\left(\frac{\Phi}{\Phi_н}\right)^2\frac{\omega}{\omega_0}+\frac{\Delta\omega_c}{\omega_0}+T_M\frac{d\dfrac{\omega}{\omega_0}}{dt}, \qquad (10.5)$$

где T_M – электромеханическая постоянная времени, отвечающая естественной характеристике; или

$$\varphi=\varphi^2\omega^*+\Delta\omega_c^*+T_M\frac{dv}{dt}, \qquad (10.6)$$

где $\varphi=\dfrac{\Phi}{\Phi_н}$ – относительное значение магнитного потока;

$\omega^*=\dfrac{\omega}{\omega_0}$ – относительная скорость вращения двигателя;

$\Delta\omega_c^*$ – относительный перепад скорости вращения двигателя при нагрузке, равной M_c, и номинальном магнитном потоке.

Для решения (10.6) следует найти зависимость $\varphi=f(t)$. На небольшом интервале изменения потока (рис. 10.3, *а)* можно принять зависимость между током возбуждения и потоком линейной, тогда изменение потока во времени определится по формуле

$$\varphi=\varphi_{кон}\left(1-e^{-\frac{t}{T_Э}}\right)+\varphi_{нач}\cdot e^{-\frac{t}{T_Э}}, \qquad (10.7)$$

где $\varphi_{нач}$, $\varphi_{кон}$ – начальное и конечное значение относительных величин магнитного потока двигателя;

$T_Э$ – электромагнитная постоянная времени контура обмотки возбуждения двигателя.

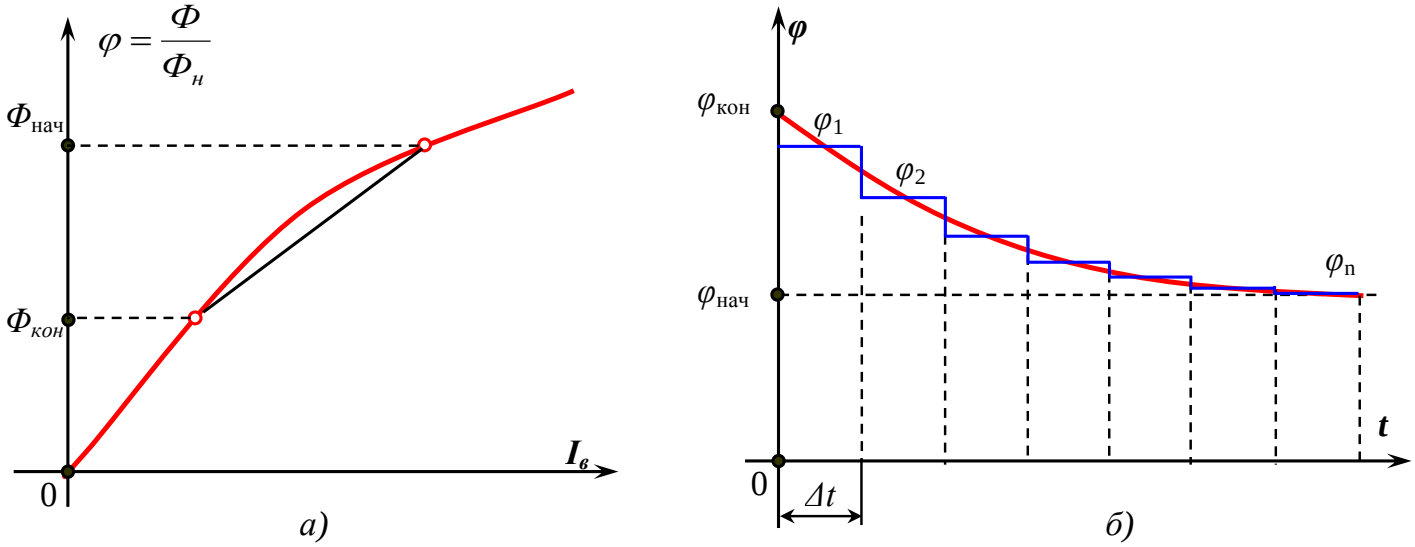


Рис. 10.3. Кривые изменения магнитного потока:
а) – в функции тока возбуждения;
б) – в функции времени.

Кривую $\varphi = f(t)$, приведенную на рис. 10.3, *б* разбиваем на ряд отрезков с постоянными значениями потока на каждом участке с интервалом, времени, соответствующим выбранному интервалу времени Δt. Имея зависимость $\varphi = f(t)$, легко найти и $\varphi^2 = f_1(t)$ после чего уравнение (10.6) может быть разрешено в конечных приращениях. Расчет кри-

вой скорости ведется с первого участка, для которого известна начальная скорость $\omega^*_{нач}$ и среднее значение потока φ_1.

Приращение скорости на первом участке определится по формуле:

$$\Delta\omega^*_1 = \frac{\varphi_1 - \varphi_1^2\omega^*_{нач1} - \Delta\omega^*_c}{\frac{T_M}{\Delta t} + \frac{1}{2}\varphi_1^2}. \qquad (10.8)$$

Начальная скорость на втором участке равна:

$$\omega^*_{нач2} = \omega^*_{нач1} + \Delta\omega^*_1.$$

Аналогично определяется приращение скорости на втором участке и т. д.

По рассчитанным приращениям строится кривая скорости вращения двигателя при ослаблении магнитного потока (рис. 10.4, а). Для определения тока в цепи якоря двигателя при разгоне его путем ослабления потока можно воспользоваться формулой (10.1) и после несложных преобразований привести ее к виду:

$$\frac{i}{I_{кз}} = 1 - \varphi\omega^*, \qquad (10.9)$$

где $I_{кз} = \frac{U}{R}$ – ток короткого замыкания.

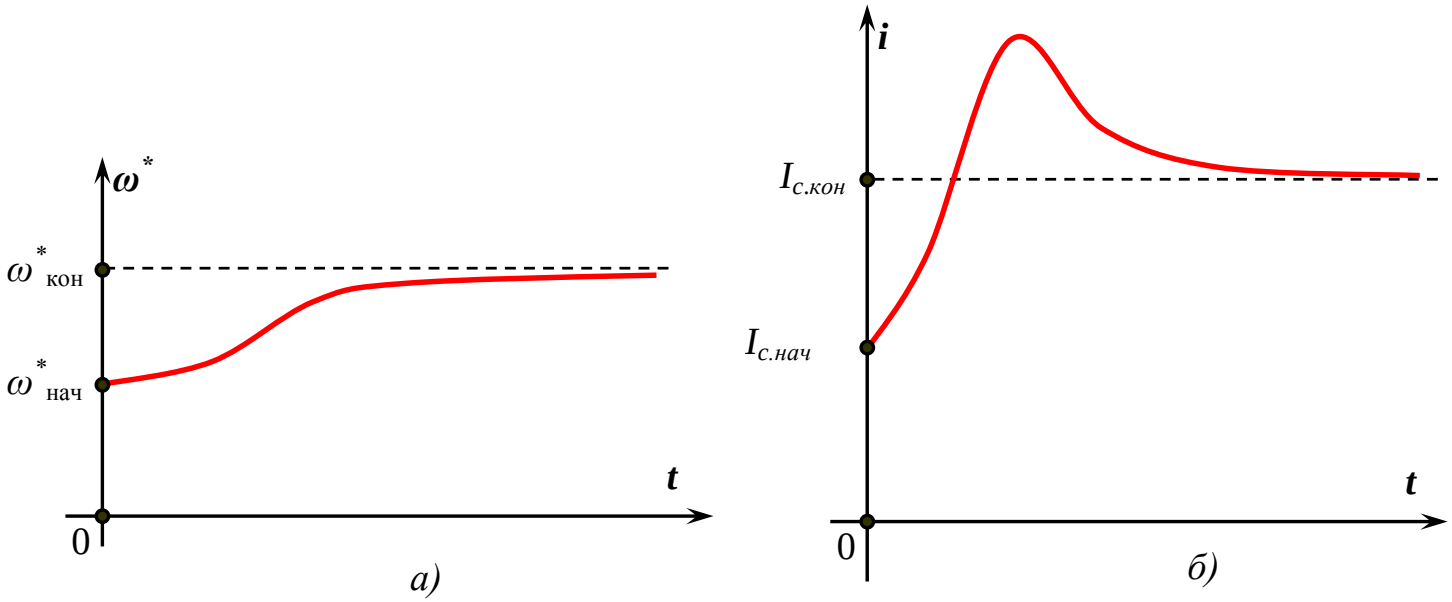


Рис. 10.4. Кривые изменения:
а) $\omega^* = f(t)$
б) $i = f_1(t)$

Примерный вид кривой $i = f_1(t)$ при неизменном статическом моменте дан на рис. 10.4, *б*. Конечное значение тока при этом

$$I_{с.кон} = I_{с.нач}\frac{\varphi_{нач}}{\varphi_{кон}}. \qquad (10.10)$$

Лекція № 11

ТЕМА № 5 Переходные процессы в электроприводе

План

1. Динамическое торможение двигателя независимого возбуждения

1. ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ ДВИГАТЕЛЯ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Если обмотку якоря работающего двигателя отключить от сети и замкнуть на дополнительное сопротивление (рис. 11.1), то двигатель переходит в генераторный режим и интенсивно тормозится (рис. 11.2).

Обмотка возбуждения в процессе торможения остается присоединенной к сети постоянного тока.

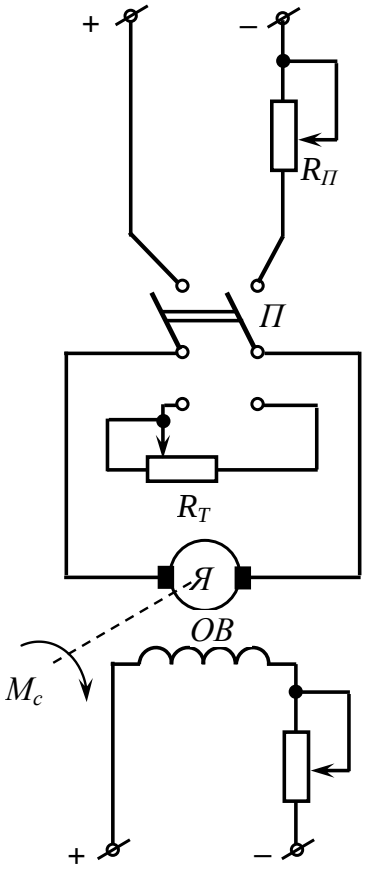


Рис. 11.1. Принципиальная схема динамического торможения

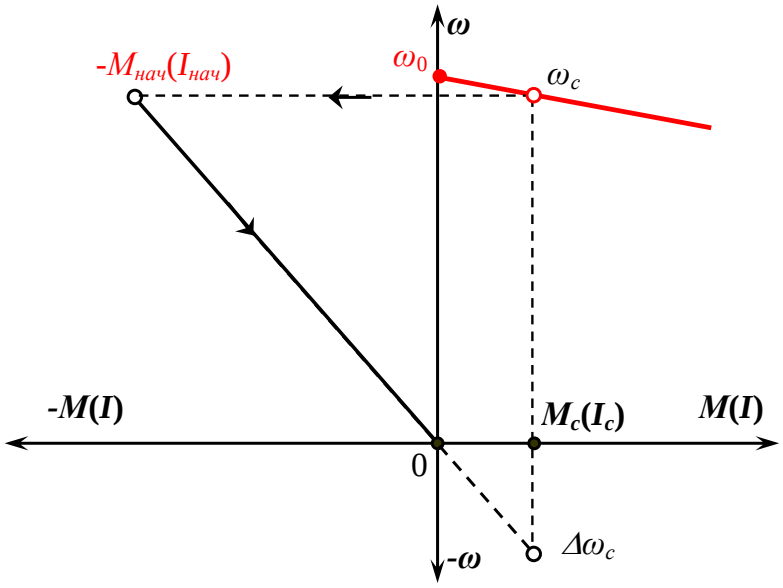


Рис. 11.2. Механическая характеристика двигателя при переходе из двигательного режима в режим динамического торможения

Основные уравнения, характеризующие процесс динамического торможения, следующие:

$$c\omega + iR = 0; \qquad (11.1)$$

$$ci = J\frac{d\omega}{dt} + M_c;$$

где $R = R_я + R_T$.

Совместное решение (11.1) и (8.8)

$$M = ci = J\frac{d\omega}{dt} + M_c, \qquad (8.8).$$

относительно ω дает:

$$\omega = -\Delta\omega_c + Ce^{-\frac{t}{T_M}}. \qquad (11.2)$$

Постоянная интегрирования C определяется из начальных условий. При t =0

$$\omega = \omega_{нач} = \omega_c;$$

$$C = \omega_{нач} + \Delta\omega_c,$$

где $\omega_{нач} = \omega_c$ – скорость вращения двигателя в момент переключения с двигательного режима на динамическое торможение;

$\Delta\omega_c = \frac{M_c R}{c^2}$ – абсолютное значение перепада скорости, определяемое по характеристике динамического торможения при моменте нагрузки M_c (рис. 11.2)

После подстановки C в (11.2) получим:

$$\omega = -\Delta\omega_c + (\omega_{нач} + \Delta\omega_c)e^{-\frac{t}{T_M}}. \qquad (11.3)$$

При динамическом торможении без нагрузки (M_c = 0), $\Delta\omega_c = 0$ и $\omega_{нач} = \omega_0$, тогда

$$\omega = \omega_0 e^{-\frac{t}{T_M}}. \qquad (11.4)$$

На рис. 11.3 показаны характеристики ω = $f(t)$ при динамическом торможении в случае, когда торможение производится под нагрузкой (кривая 1) и когда M_c = 0 (кривая 2). При торможении под нагрузкой кривая ω = $f(t)$ асимптотически стремится к скорости $-\Delta\omega_c$, если момент нагрузки активный, например в случае опускающегося груза в приводе крановой установки. Если момент нагрузки реактивный, то торможение электропривода закончится при скорости ω = 0 (точка *б*).

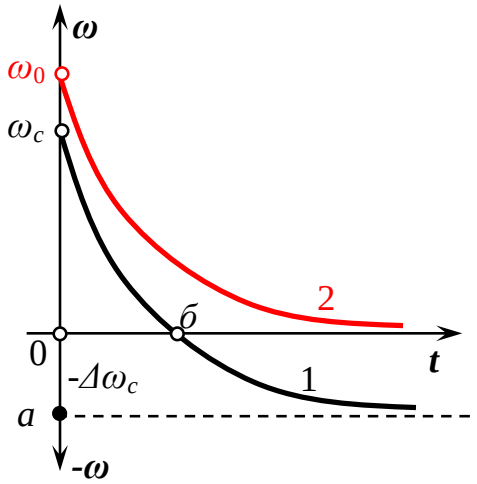


Рис. 11.3. Кривые ω = $f(t)$ при динамическом торможении двигателя независимого возбуждения.

При торможении без нагрузки кривая ω = $f(t)$ асимптотически приближается к нулю, начальная скорость торможения в этом случае $\omega_{нач} = \omega_0$

Для определения i = $f_1(t)$ можно воспользоваться формулой (9.2)

$$i = -\frac{J}{c}\cdot\frac{C}{T_M}\cdot e^{-\frac{t}{T_M}} + I_c, \qquad (9.2)$$

если подставить в нее постоянную интегрирования C, соответствующую данным начальным условиям:

$$C = -\frac{cT_M}{J}\left(I_{нач} - I_c\right),$$

и

$$i = I_c + \left(I_{нач} - I_c\right)\cdot e^{-\frac{t}{T_M}}, \qquad (11.5)$$

На рис. 11.4 кривая 1 иллюстрирует изменение тока в цепи якоря при динамическом торможении и наличии активной нагрузки на валу двигателя, которой соответствует ток I_c.

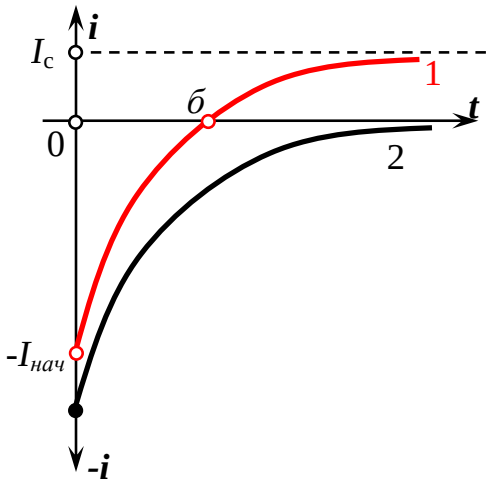


Рис. 11.4. Кривые $i = f_1(t)$ при динамическом торможении двигателя независимого возбуждения.

Кривая 2 иллюстрирует процесс динамического торможения при $M_c = 0$. Ток в цепи якоря для этого случая определяется по формуле:

$$i = -I_{нач}\cdot e^{-\frac{t}{T_M}}. \qquad (11.6)$$

Абсолютное значение тока в момент переключения из двигательного режима в режим динамического торможения

$$I_{нач} = \frac{c\omega_{нач}}{R}. \qquad (11.7)$$

Время торможения от начальной скорости $\omega_{нач}$ до текущей ω_1 может быть получено из уравнения (11.3), если решить его относительно t_1 т. е.

$$t_1 = T_M\, ln\frac{\omega_{нач} + \Delta\omega_c}{\omega_1 + \Delta\omega_c}. \qquad (11.8)$$

При торможении до полной остановки ($\omega_1 = 0$)

$$t_T = T_M\, ln\frac{\omega_{нач} + \Delta\omega_c}{\Delta\omega_c}. \qquad (11.9)$$

Когда $I_c = 0$; $\Delta\omega_c = 0$ и теоретически время $t_T = \infty$, практически процесс торможения можно считать законченным за время $t_T = 3T_M$. Постоянная времени определяется

аналогично тому, как это производилось в **лекции № 7**. В данном случае учитывается величина суммарного сопротивления цепи якоря двигателя при динамическом торможении. Время торможения может быть также определено на основании (11.5). Например, при торможении до полной остановки, когда $i = 0$, время торможения

$$t_T = T_M \ln \frac{I_{нач} + I_c}{I_c}. \qquad (11.10)$$

Лекція № 12

ТЕМА № 5 Переходные процессы в электроприводе

(продолжение по вопросу Лекции № 11)

План

1. Торможение противовключением и реверсирование двигателя независимого возбуждения
2. Торможение двигателя независимого возбуждения с отдачей энергии в сеть

1. ТОРМОЖЕНИЕ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ И РЕВЕРСИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Торможение противовключением осуществляется при изменении полярности напряжения на зажимах обмотки якоря (либо обмотки возбуждения) работающего двигателя и неизменном направлении тока в обмотке возбуждения. По схеме, приведенной на рис. 12.1, указанное переключение выполняется с помощью переключателя **П**, причем для ограничения тока, потребляемого из сети при торможении, в цепь якоря вводится дополнительное сопротивление R_T.

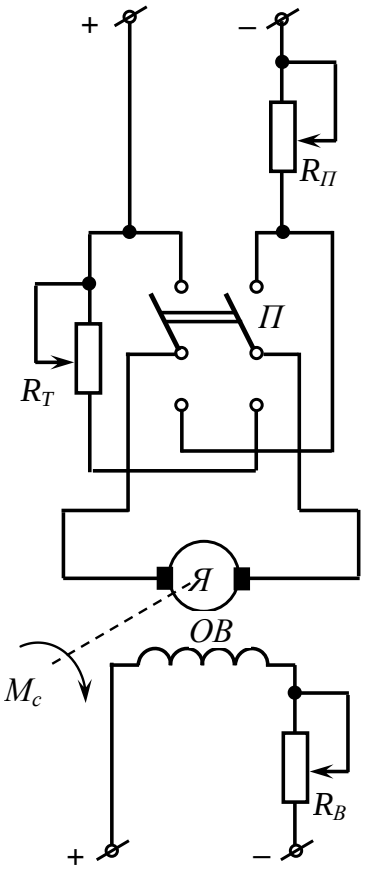


Рис. 12.1 Принципиальная схема торможения противовключением и реверсирования двигателя независимого возбуждения

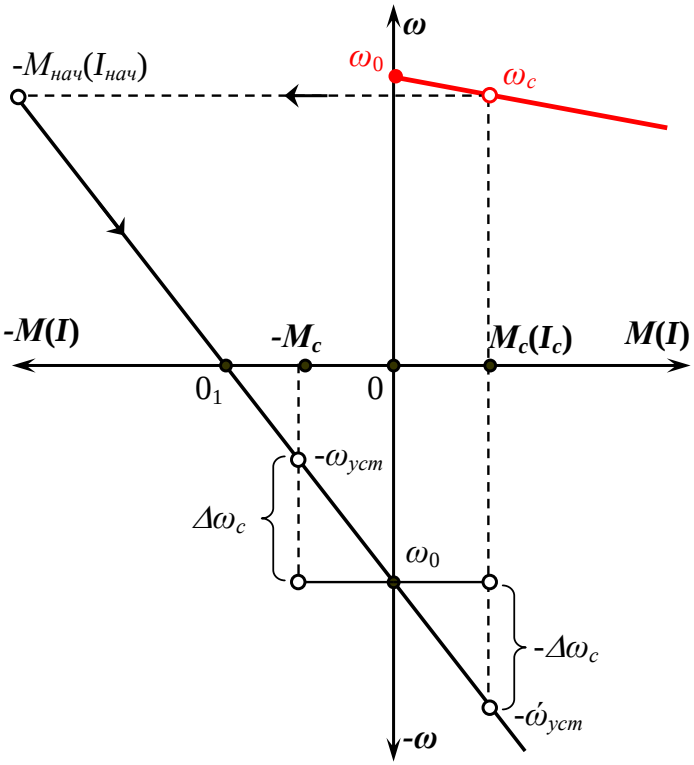


Рис. 12.2. Механическая характеристика при переходе из двигательного режима в режим противовключения

Рис. 12.2 иллюстрирует переход из двигательного режима в режим противовключения. В этом случае происходит интенсивное, торможение соответственно характеристике $M_{нач}$ 0_1. Если якорь двигателя при скорости, равной или близкой к нулю, не отключить, то двигатель, развивая момент по абсолютной величине, больший момента сопротивле-

ния, разгонится в противоположном направлении до установившейся скорости (характеристика $0_1\omega_{уст}$). Процесс электрического торможения противовключением с последующим разгоном в обратном направлении и называется реверсированием.

Уравнение электрического равновесия для цепи якоря двигателя в период торможения противовключением

$$-U = c\omega + iR. \qquad (12.1)$$

Это уравнение отличается от аналогичного при пуске (8.7)

$$U = c\omega + iR, \qquad (8.7)$$

тем, что перед U стоит знак минус. Поэтому можно воспользоваться общим уравнением для скорости (8.10),

$$\omega_0 = \omega + T_M \frac{d\omega}{dt} + \Delta\omega_c, \qquad (8.10)$$

заменив в нем $+\omega_0$ на $-\omega_0$, тогда при реверсировании

$$\omega = -\omega_0 - \Delta\omega_c + C \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}. \qquad (12.2)$$

Для $t = 0$ скорость двигателя в момент переключения якоря $\omega = \omega_{нач} = \omega_c$ (рис. 11.6) и постоянная интегрирования $C = \omega_c + \omega_0 + \Delta\omega_c$.

Зависимость $\omega = f(t)$ при реверсировании определяется выражением:

$$\omega = -(\omega_0 + \Delta\omega_c) + (\omega_c + \omega_0 + \Delta\omega_c)e^{-\frac{t}{T_M}}. \qquad (12.3)$$

Формула (12.3) получена в предположении постоянства знака $\Delta\omega_c$ изменением направления вращения двигателя, т. е. момент нагрузки принят активным. В этом случае после реверсирования установившаяся скорость двигателя превысит ω_o на величину $\Delta\omega_c$. Зависимость $\omega = f(t)$ при активном моменте нагрузки характеризуется **кривой 1** (рис. 12.3).

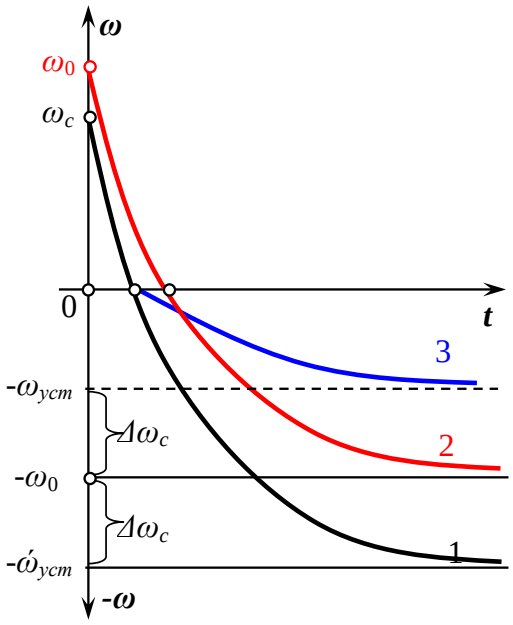


Рис. 12.3 Зависимость $\omega = f(t)$ при реверсировании двигателя независимого возбуждения

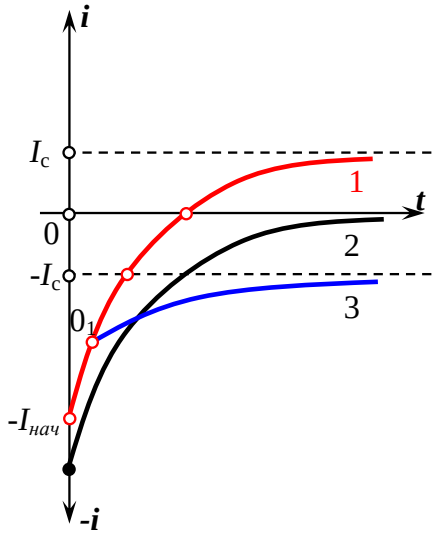


Рис. 12.4. Зависимость $i = f_1(t)$ при реверсировании двигателя независимого возбуждения

Для реверсирования без нагрузки ($\omega_c = \omega_0$ и $\Delta\omega_c = 0$)

$$\omega = -\omega_0 + 2\omega_0 \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}. \qquad (12.4)$$

Данному случаю соответствует кривая 2 на рис. 13.3. Если же реверсирование происходит с реактивным моментом нагрузки, то кривая $\omega = f(t)$ в точке пересечения с осью абсцисс имеет излом и к установившейся скорости $\omega_{уст}$ приближается асимптотически, как показано на рис. 12.3 (кривая 3). Расчет этой кривой производите на основании тех же исходных формул с учетом того обстоятельства, что при изменении знака скорости момент нагрузки также изменит свой знак.

Зависимость для тока в цепи якоря двигателя при реверсировании определяется таким же методом, как и при динамическом торможении. В окончательном виде ток

$$i = I_c - (I_{нач} + I_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}, \qquad (12.5)$$

здесь $I_{нач} = \frac{c\omega_{нач}}{R}$ – абсолютное значение тока в начальный момент переключения из двигательного режима в режим торможения противовключением, где $R = R_я + R_T$ – общее сопротивление якорной цепи.

Формула (12.5), так же как и (12.3), справедлива для случая активного момента нагрузки (**кривая 1**, рис. 12.4). Эта формула будет также применима и для реактивного момента с начала торможения до остановки двигателя. В точке 0_1 кривая $i = f(t)$ при реактивном моменте нагрузки будет иметь излом. К установившемуся значению тока $-I_c$ кривая $i = f(t)$ приближается асимптотически, как показано на рис. 12.4 (кривая 3).

При реверсировании без нагрузки

$$i = -I_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}. \qquad (12.6)$$

Так как в этом случае $\omega_c = \omega_0$, то

$$I_{нач} = \frac{2U}{R} = 2I_к,$$

и

$$i = -2I_к \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}. \qquad (12.7)$$

Зависимость $i = f(t)$ при $M_c = 0$ иллюстрируется кривой 2 на рис. 12.4.

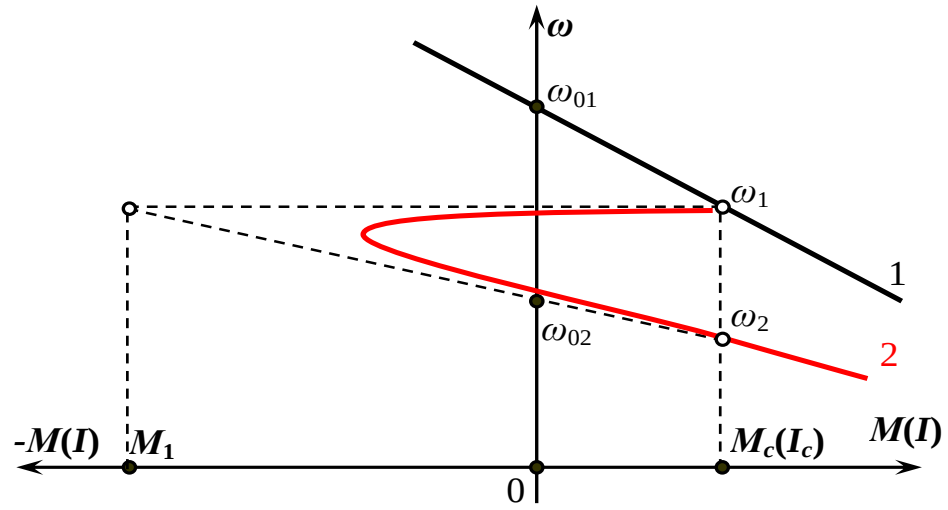
2. ТОРМОЖЕНИЕ ДВИГАТЕЛЯ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ С ОТДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ В СЕТЬ

Торможение с рекуперацией энергии в сеть возникает при снижении скорости двигателя независимого возбуждения за счет усиления его магнитного потока. В этом случае, как показано на рис. 12.5, скорость будет изменяться от ω_1 до ω_2.

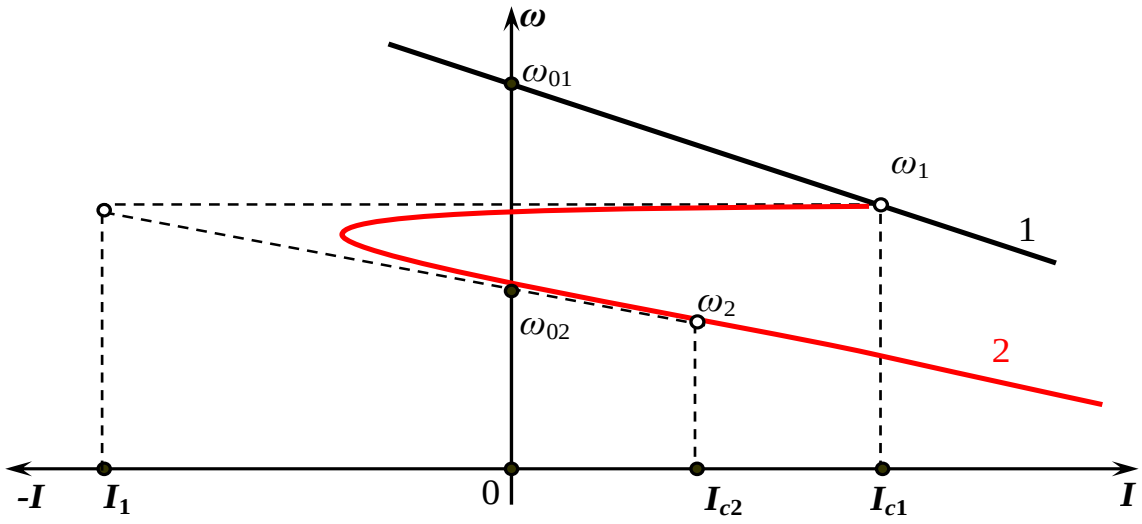
В силу механической инерции привода скорость его не может мгновенно измениться, и с ростом магнитного потока возрастает ЭДС двигателя. Когда ЭДС двигателя станет по абсолютной величине больше приложенного напряжения, ток якоря приобретет отрицательное значение и энергия рекуперируется в сеть. В начальный момент торможения величина момента и соответственно тока двигателя не достигают значений M_1 и I_1. Объясняется это тем, что благодаря электромагнитной инерции цепи возбуждения магнитный поток двигателя сразу не достигает своего установившегося значения.

Максимум тока и момента при торможении оказываются меньшими значений соответственно M_1 и I_1.

На рис. 12.5 представлены характеристики для случая торможения с постоянным статическим моментом M_c. При этом установившееся значение тока в конце торможения I_{c2} меньше установившегося значения тока I_{c1} до начала торможения.



а)



б)

Рис. 12.5. Статические характеристики при усилении магнитного потока двигателя

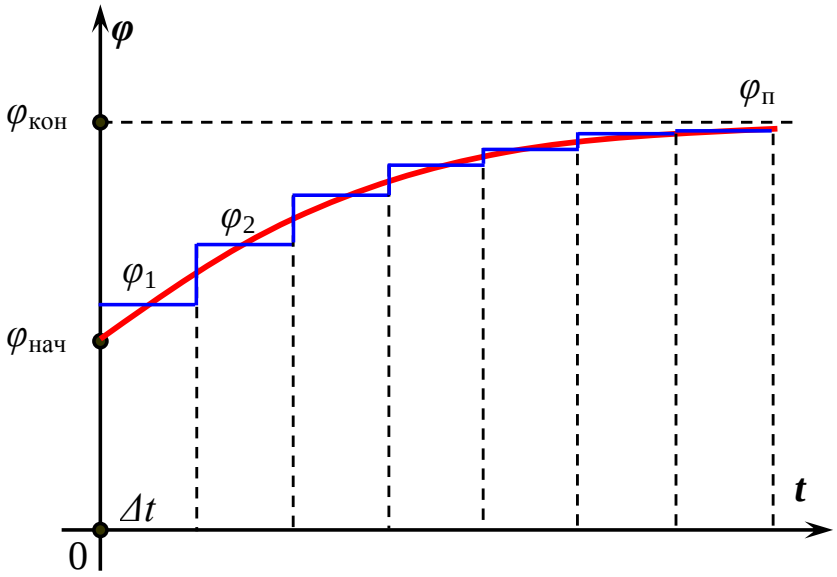


Рис. 12.6. Кривая изменения магнитного потока в функции времени

Если принять изменение магнитного потока во времени $\varphi = f(t)$ по экспоненте (рис. 12.6) и заменить ее ступенчатым графиком с равными интервалами по времени Δt, то, воспользовавшись методикой, изложенной в [**1_Лекція № 10**], можно построить кривые изменения скорости и тока якоря при торможении (рис. 12.7).

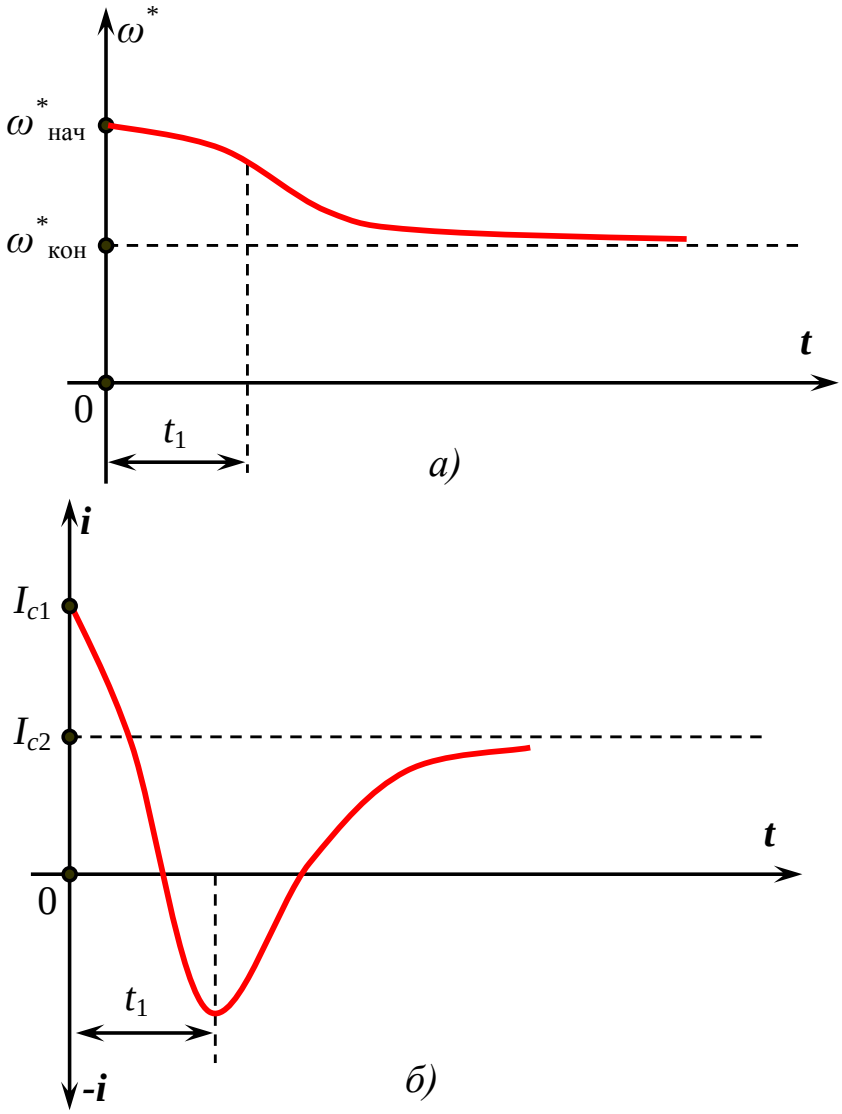


Рис. 12.7. Кривая изменения $\omega^*=f(t)$ (*а*) и $i=f_1(t)$ (*б*) при торможении

Лекція № 13

ТЕМА № 5 Переходные процессы в электроприводе

План

1. Энергетика переходных режимов двигателя постоянного тока независимого возбуждения

1. ЭНЕРГЕТИКА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Мощность, потребляемая из сети и отдаваемая через вал двигателя, расходуется на:

1) преодоление нагрузки

$$P_c = M_c\omega; \tag{13.1}$$

2) создание запаса кинетической энергии вращающихся масс электропривода, определяемой динамическим моментом.

$$P_{дин} = M_{дин}\omega = J\omega\frac{d\omega}{dt}; \tag{13.2}$$

3) покрытие потерь в электродвигателе. Если считать, что потери на трение входят в мощность нагрузки, то потери в двигателе будут складываться из тепловых потерь в цепи якоря $\Delta P_2 = i^2R$ и из потерь, затрачиваемых на возбуждение.

В суммарных потерях энергия, затрачиваемая на возбуждение, обычно составляет незначительную долю и поэтому в дальнейшем не будет учитываться.

Потери энергии в цепи якоря при переходных режимах влияют на выбор мощности электродвигателя и габариты дополнительного сопротивления.

Потери энергии в цепи якоря при пуске двигателя независимого возбуждения определяются выражением

$$\Delta A_n = \int_0^{t_n} i^2 R dt\,. \tag{13.3}$$

Из уравнения электрического равновесия при пуске двигателя в одну ступень следует:

$$Ui = Ei + i^2R,$$

или

$$i^2R = Ui - Ei = M\omega_0 - M\omega; \tag{13.4}$$

где Ui – мощность подводимая из сети;

Ei – электромагнитная мощность.

Если пуск двигателя совершается без нагрузки (M_c = 0), то

$$M = J\frac{d\omega}{dt} \quad \text{и} \quad dt = J\frac{d\omega}{M}; \tag{13.5}$$

Подставляя в (13.3) значения из (13.4) и (13.5), получаем:

$$\Delta A_n = \int_0^{t_n} M(\omega_0 - \omega)J\frac{d\omega}{M};$$

при пуске от $\omega_1 = \omega_{нач}$ до $\omega_2 = \omega_{кон}$

$$\Delta A_n = \int_{\omega_{нач}}^{\omega_{кон}} J(\omega_0 - \omega)d\omega. \qquad (13.6)$$

В частном случае, когда пуск совершается от $\omega_{нач} = 0$ до $\omega_{кон} = \omega_0$

$$\Delta A_n = \frac{J\omega_0^2}{2}. \qquad (13.7)$$

Таким образом, потери энергии в цепи якоря двигателя независимого возбуждения при пуске без нагрузки равны запасу кинетической энергии, который приобретут маховые массы электропривода до установившейся скорости. Величина этих потерь не зависит от величины сопротивления в цепи якоря, т. е. не зависит от формы механической характеристики двигателя, числа пусковых ступеней и их сопротивлений, равно как и от времени пуска.

Работа, произведенная двигателем во время пуска, определяется также запасом кинетической энергии, накопленной за этот период, т. е.

$$A_{мех} = \frac{J\omega_0^2}{2}. \qquad (13.8)$$

Следовательно, электрическая энергия, поступающая в цепь якоря при пуске двигателя, равна двойной величине запаса кинетической энергии:

$$A_{эл} = A_{мех} + \Delta A_n = J\omega_0^2. \qquad (13.9)$$

При пуске двигателя под нагрузкой для случая $M_c = const$

$$i^2 R = M\omega_0 - M\omega = (M_c + M_j)\cdot(\omega_0 - \omega); \qquad (13.10)$$

$$dt = \frac{Jd\omega}{M_j}. \qquad (13.11)$$

Используя (13.10) и (13.11), после несложных преобразовании получаем:

$$\Delta A_n = \int_0^{t_n} i^2 R dt = \int_0^{\omega_c} J(\omega_0 - \omega)d\omega + \int_0^{t_n} M_c(\omega_0 - \omega)dt, \qquad (13.12)$$

или

$$\Delta A_n = J\left(\omega_0\omega_c - \frac{\omega_c^2}{2}\right) + M_c\left(\omega_0 t_n - \int_0^{t_n}\omega dt\right). \qquad (13.13)$$

Первый член выражения (13.13) представляет собой потери энергии в цепи якоря, обусловленные разгоном инерционных масс, тогда как второй можно рассматривать как потери в цепи якоря при наличии нагрузочного момента. Если ω_c мало отличается от ω_0, то первый член

$$\Delta A_{nj} \approx \frac{J\omega_0^2}{2}.$$

Потери, обусловленные наличием нагрузки,

$$\Delta A_{n.c} = M_c\left(\omega_0 t_n - \int_0^{t_n}\omega dt\right).$$

Величина этих потерь подсчитывается на основании кривой $\omega = f(t)$ (рис. 13.1).

На рис. 13.1 заштрихованная площадь представляет собой разность

$$\omega_0 t_n - \int_0^{t_n} \omega dt = F .$$

Следовательно,

$$\Delta A_{n.c} = M_c F . \qquad (13.14)$$

Общие потери в цепи якоря при пуске

$$\Delta A_n = J\left(\omega_0 \omega_c - \frac{\omega_c^2}{2} \right) + M_c F . \qquad (13.15)$$

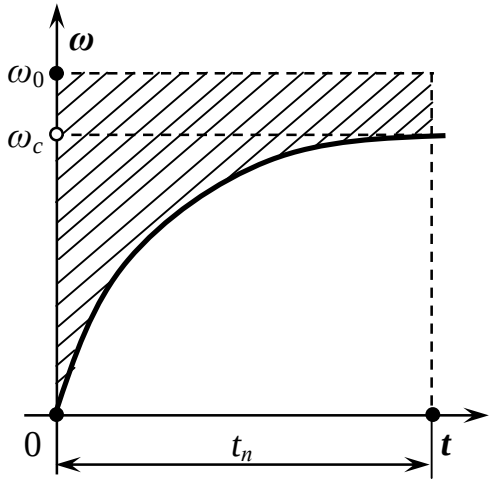


Рис. 13.1. К определению потерь энергии при пуске двигателя независимого возбуждения

Формула (13.15) может быть использована для определения потерь и при многоступенчатом пуске двигателя. Потери энергии в цепи якоря при динамическом торможении без нагрузки (M_c = 0) определяются на основании (13.6). Здесь необходимо учесть, что при динамическом торможении U = 0 и ω = 0; тогда, полагая, что торможение происходит от $\omega_{нач} = \omega_0$ до $\omega_{кон}$ = 0, получаем:

$$\Delta A_{Т.Д.} = \int_{\omega_0}^{0} - J\omega d\omega = \int_0^{\omega_c} J\omega d\omega ,$$

или

$$\Delta A_{Т.Д.} = \frac{J\omega_0^2}{2} . \qquad (13.16)$$

Из (13.16) вытекает, что потери в цепи якоря двигателя при динамическом торможении (в случае, когда M_0 = 0) определяются запасом кинетической энергии, которым обладают маховые массы привода в начальный момент торможения.

Если торможение производится под нагрузкой, то потери энергии

$$\Delta A_{Т.Д.} = \frac{J\omega_0^2}{2} - M_c \int_0^{t_T} \omega dt . \qquad (13.17)$$

Второй член уравнения (13.17) легко подсчитать, как и в предыдущем случае, если известна зависимость $\omega = f(t)$.

Потери энергии в цепи якоря двигателя при реверсировании могут быть найдены на основании (13.6), если учесть, что напряжение U изменяет свой знак, следовательно, изменяет знак и ω_0. Считая, что реверсирование происходит без нагрузки (M_c = 0), в пределах от $\omega_{нач} = \omega_0$ до $\omega_{кон} = -\omega_0$, получаем:

$$\Delta A_p = \int_{\omega_0}^{-\omega_0} J(-\omega_0 - \omega)d\omega,$$

или

$$\Delta A_p = \int_{-\omega_0}^{\omega_0} J(\omega_0 + \omega)d\omega;$$

$$\Delta A_p = 4\frac{J\omega_0^2}{2}. \qquad (13.18)$$

Легко доказать, что при торможении противовключением (реверсирование до ω = 0) потери энергии в цепи якоря равны (для M_c = 0):

$$\Delta A_{T.П} = 3\frac{J\omega_0^2}{2}. \qquad (13.19)$$

Следовательно, при торможении противовключением без нагрузки потери энергии в цепи якоря равны трехкратной величине запаса кинетической энергии. Часть этой энергии, равная $\frac{J\omega_0^2}{2}$, покрывается энергией с вала электродвигателя, а другая часть $2\frac{J\omega_0^2}{2}$ потребляется из сети.

Очевидно, что потери энергии в цепи якоря при реверсировании равны четырехкратному запасу кинетической энергии (13.18). Это понятно, так как реверсирование представляет собой процесс, состоящий из торможения противовключением и пуска двигателя в обратном направлении.

Если торможение противовключением производится до полной остановки под нагрузкой *($M_c \neq 0$)*, то потери энергии определяются аналогично предыдущему по формуле

$$\Delta A_{T.П} = J\left(\omega_0\omega_c + \frac{\omega_0^2}{2}\right) - M_c\int_0^{t_T}(\omega_0 + \omega)dt. \qquad (13.20)$$

Из (13.20) следует, что потери энергии при торможении под нагрузкой меньше, чем без нагрузки.

Лекція № 14

ТЕМА № 5 Переходные процессы в электроприводе

План

1. Переходные режимы в приводах с двигателями последовательного возбуждения
2. Переходные режимы в приводах с асинхронными двигателями трехфазного тока

1. ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ В ПРИВОДАХ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В этом случае переходные режимы исследуются графо-аналитическими методами, так как магнитный поток двигателя изменяется нелинейно в зависимости от тока якоря.

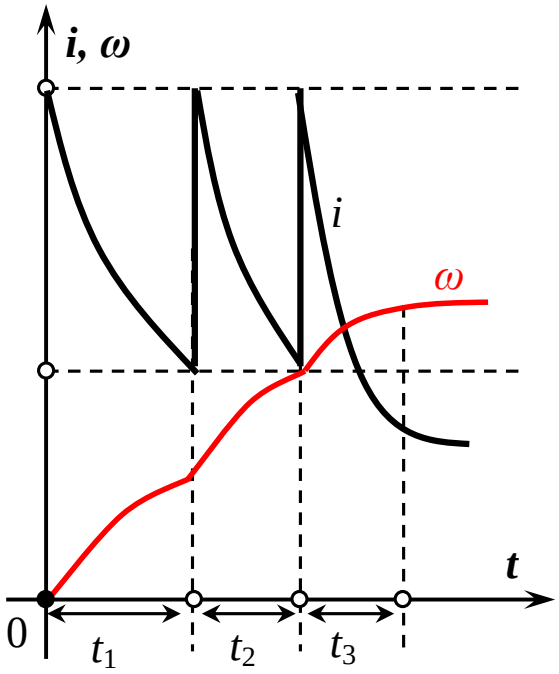


Рис. 14.1. Зависимость $\omega = f(t)$ и $i = f_1(t)$ при ступенчатом пуске двигателя последовательного возбуждения.

Для определения зависимостей $\omega = f(t)$ и $\omega = f_1(t)$ может быть использована изложенная на предыдущих Лекціях графо-аналитического решения переходных режимов.

Примерный вид кривых скорости вращения и тока якоря двигателя последовательного возбуждения при ступенчатом пуске показан на рис. 14.1.

Принципиальная схема реверсирования двигателя последовательного возбуждения дана на рис. 14.2. При переключении переключателя ***П*** из верхнего положения в нижнее двигатель из установившегося режима при $\omega = \omega_c$ и $I = I_c$ переходит в режим противовключения. На рис. 14.3 кривая 1 соответствует естественной характеристике двигателя, а кривая 2 – характеристике в режиме противовключения.

Потери энергии при пуске и торможении приводов с двигателями последовательного возбуждения при одинаковом маховом и статическом моментах, а также одинаковых пределах изменения скорости могут быть *больше, меньше или равны* аналогичным потерям в двигателях независимого возбуждения.

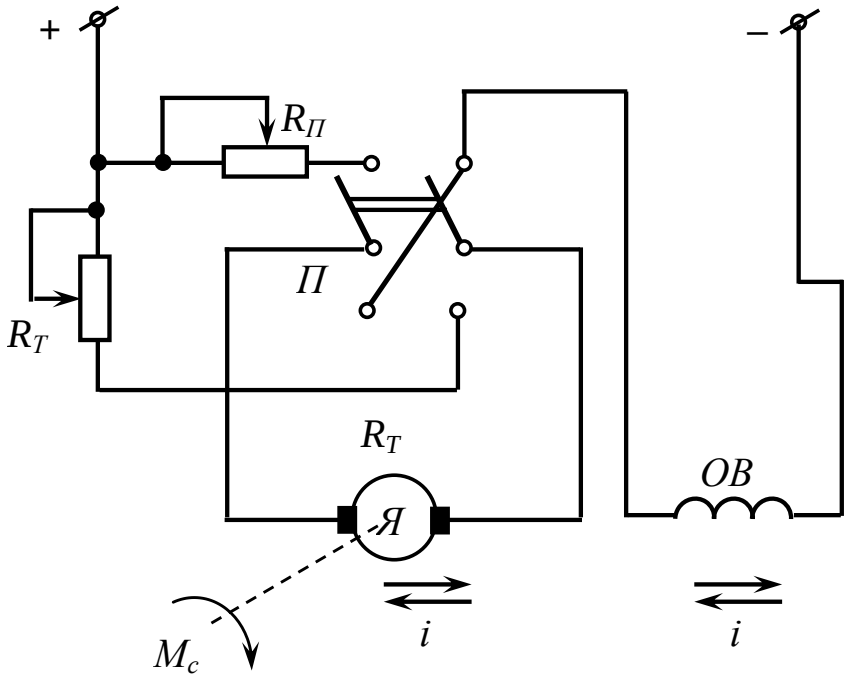


Рис. 14.2. Принципиальная схема реверсирования двигателя последовательного возбуждения

Если в переходном режиме среднее значение тока в якоре меньше номинального и момент двигателя также меньше номинального, то потери оказываются больше, чем в двигателе независимого возбуждения за счет увеличения длительности переходного режима. При токе, большем номинального, вследствие сокращения времени переходного режима потери энергии меньше, чем в двигателе независимого возбуждения. И наконец, когда ток якоря в переходном режиме равен в среднем номинальному значению, то потери энергии одинаковы в приводах с двигателями как последовательного, так и независимого возбуждения.

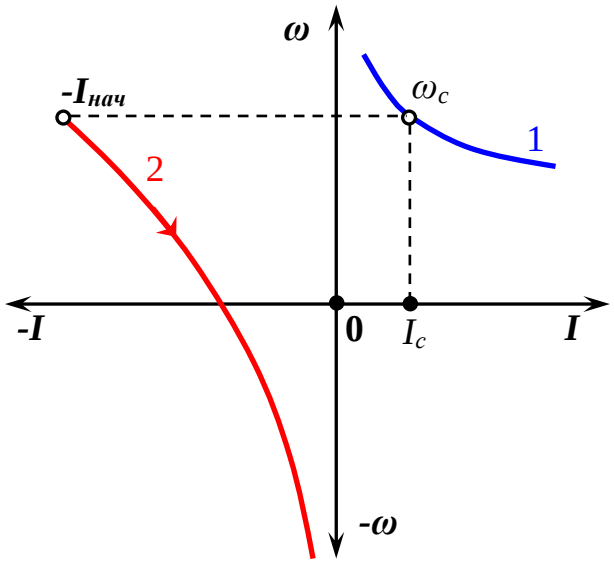


Рис. 14.3. Характеристика $\omega = f(t)$ при реверсировании двигателя последовательного возбуждения

Для более точного определения потерь энергии в цепи якоря двигателя последовательного возбуждения необходимо предварительно построить зависимость $i = f(t)$.

2. ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ В ПРИВОДАХ С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

При исследовании переходных режимов в приводах с асинхронными двигателями в первом приближении пренебрегаем электромагнитными процессами, так как они протекают значительно быстрее механических процессов.

Пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором небольшой и средней мощности обычно осуществляется при полном напряжении.

Иногда пуск короткозамкнутых двигателей с целью ограничения тока или момента осуществляется при пониженном напряжении с помощью дополнительного активного или реактивного сопротивления в цепи статора.

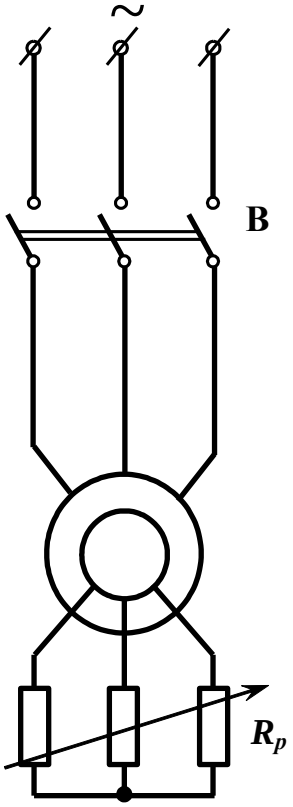


Рис. 14.4. Принципиальная схема пуска асинхронного двигателя.

Пуск двигателей с контактными кольцами осуществляется посредством пускового реостата R_p включенного в цепь ротора двигателя (рис. 14.4). Число пусковых ступеней реостата и величина их сопротивлений определяются условиями пуска электропривода.

Если для упрощения принять, что двигатель разгоняется без нагрузки ($M_c = 0$) в одну пусковую ступень, и учесть, что момент, развиваемый двигателем,

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}, \qquad (14.1)$$

то уравнение движения привода запишется так:

$$\frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} = J\frac{d\omega}{dt}. \qquad (14.2)$$

Известно, что $\omega = \omega_0(1-s)$ следовательно:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\omega_0\frac{ds}{dt}, \qquad (14.3)$$

Тогда

$$\frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} = -J\omega_0\frac{ds}{dt}. \qquad (14.4)$$

После разделения переменных

$$dt = -\frac{J\omega_0}{2M_{кр}}\left(\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}\right)ds, \qquad (14.5)$$

или

$$dt = -\frac{T_M}{2}\left(\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}\right)ds, \qquad (14.6)$$

где

$T_M = \dfrac{J\omega_0}{M_{кр}}$ – электромеханическая постоянная времени.

Электромеханическая постоянная времени представляет собой время, в течение которого привод с моментом инерции J разгонится до синхронной скорости ω_0 под действием момента, равного максимальному $M_{кр}$.

Из (14.6) получаем время пуска двигателя:

$$t_{n0} = \frac{T_M}{2}\int_{s_{кон}}^{s_{нач}}\left(\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}\right)ds. \qquad (14.7)$$

При пуске двигателя из неподвижного состояния ($s_{нач} = 1$):

$$t_{n0} = \frac{T_M}{2}\left(\frac{1-s^2}{2s_{кр}} + s_{кр}\,ln\frac{1}{s}\right). \qquad (14.8)$$

Если принять, что $s = 0$, то ($t_n = \infty$. Практически можно считать пуск закончившимся тогда, когда значение скольжения будет отличаться не больше чем на 0,05 от его установившегося значения. Тогда время пуска без нагрузки

$$t_{n0} = \frac{T_M}{2}\left(\frac{1-0{,}05^2}{2s_{кр}} + s_{кр}\,ln\frac{1}{0{,}05}\right). \qquad (14.9)$$

Пренебрегая в первом члене величиной $0{,}05^2$ (в сравнении с единицей), получаем в относительных величинах

$$\frac{t_{n0}}{T_M} = \frac{1}{4s_{кр}} + 1{,}5s_{кр}. \qquad (14.10)$$

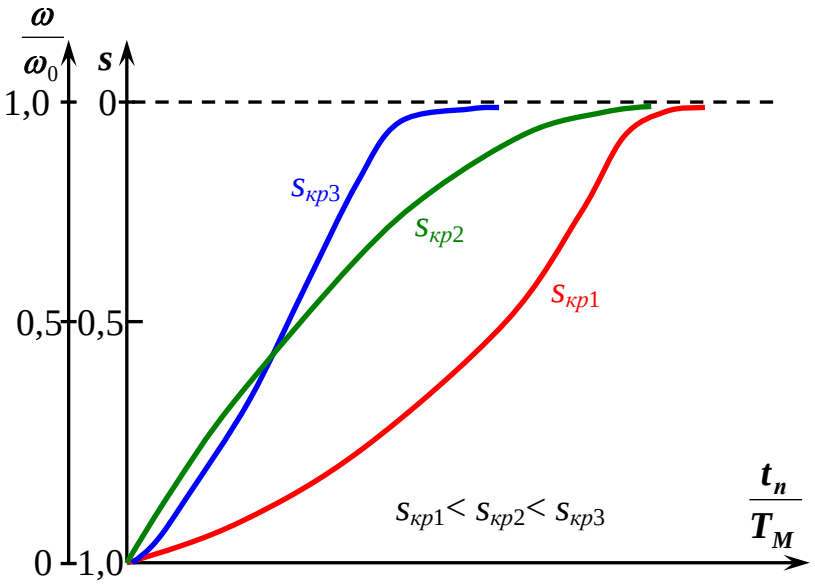


Рис. 14.5. Кривые $s = f\left(t_n/T_M\right)$ при пуске асинхронного двигателя для различных значений $s_{кр}$.

Следовательно, относительная величина времени пуска зависит от величины $s_{кр}$ (рис. 14.5), которая пропорциональна сопротивлению цепи ротора.

Пользуясь (14.10), можно установить, что время пуска имеет минимальное значение:

$$\left(\frac{t_{n0}}{T_M}\right)_{min} = 1{,}22, \qquad (14.11)$$

при $s_{кр} = 0{,}407$ (рис. 14.6).

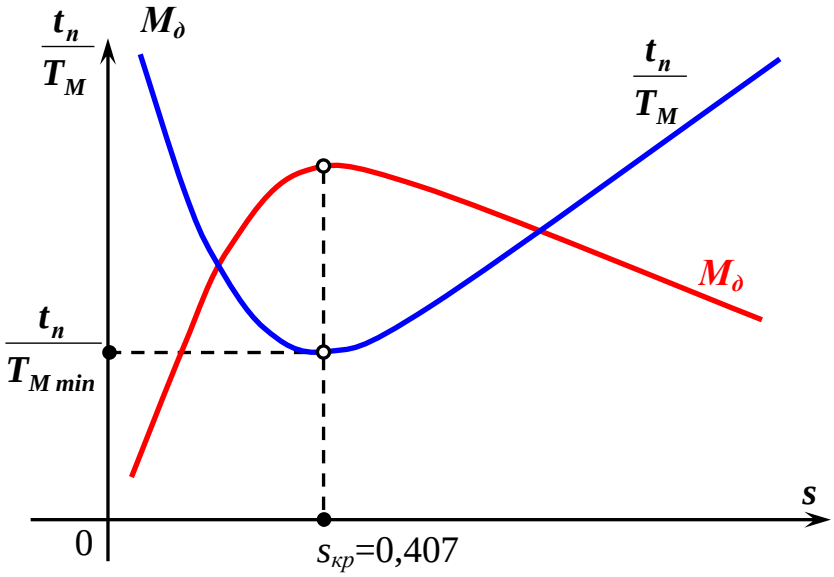


Рис. 14.6. Зависимость $M_д$ и t_n/T_M от $s_{кр}$.

Лекція № 15

ТЕМА № 5 Переходные процессы в электроприводе

План

1. Переходные режимы в приводах с асинхронными двигателями трехфазного тока.
2. Ступенчатый пуск двухскоростных и многоскоростных двигателей.
3. Торможение противовключением и реверсирование.
4. Динамическое торможение.
5. Рекуперативное торможение асинхронного двигателя

1. ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ В ПРИВОДАХ С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

(*Продолжение*)

Минимальное время пуска при прочих равных условиях определяется наибольшим действующим (или наибольшим эффективным) значением момента двигателя за период пуска. Эта величина эффективного момента соответствует, очевидно, наибольшей площади (рис. 15.1), ограниченной кривой $M = f$ (s).

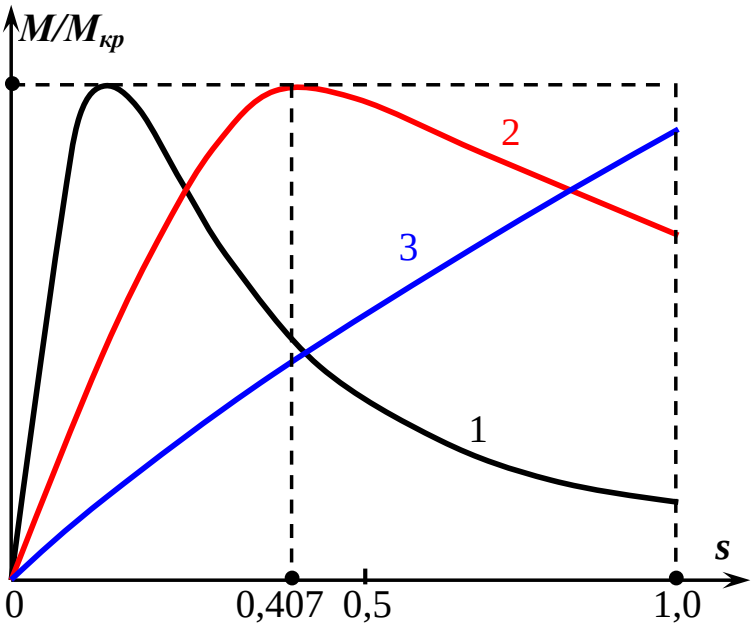


Рис. 15.1. Зависимость $M/M_{кр} = f(s) M/M_к = / (s)$ при различных значениях, $s_{кр}$.

Время пуска без нагрузки ($M_c = 0$) может быть определено также через значение эффективного момента по формуле, аналогичной (6.7):

$$t_П = \frac{J\omega_н}{\alpha M_н - M_c}. \qquad (6.7)$$

$$t_{по} = \frac{J\omega_0}{M_{эф.п}}. \qquad (15.1)$$

Отсюда значение эффективного момента при пуске

$$M_{эф.п} = \frac{J\omega_0}{t_{по}}.$$

Если, в эту формулу подставить значение, $t_{по}$ из (14.10),

$$\frac{t_{п0}}{T_M} = \frac{1}{4s_{кр}} + 1{,}5s_{кр}, \qquad (14.10)$$

то после преобразований получаем:

$$M_{эф.п} = \frac{M_{кр}s_{кр}}{0{,}25 + 1{,}5s_{кр}^2}. \qquad (15.2)$$

Эффективный, или действующий момент при пуске имеет максимальное значение при $s_{кр}$ = 0,407 и равен 0,8.1 $M_{кр}$.

На рис. 15.1 кривая 2 отвечает этому случаю. Максимальное значение действующего момента $M_д$ (рис. 14.6) соответствует минимальному времени пуска двигателя.

2. СТУПЕНЧАТЫЙ ПУСК ДВУХСКОРОСТНЫХ И МНОГОСКОРОСТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ступенчатый пуск двухскоростных и многоскоростных двигателей производится в начале присоединением к сети обмоток статора так, чтобы получить наибольшее число полюсов. Затем, по достижении двигателем установившейся скорости соответственно этому числу полюсов, его обмотки переключаются на меньшее число полюсов, при этом Двигатель вновь ускоряется, разгоняясь до большей скорости.

На рис. 15.2 показаны механические характеристики двухскоростного асинхронного двигателя, по которым иллюстрируется процесс ступенчатого пуска. Вначале двигатель соответственно характеристике, отвечающей числу пар полюсов 2p, разгоняется до скорости ω_1, при моменте нагрузки M_c, после чего происходит переключение на число пар полюсов p и с начальным моментом M_1 двигатель начинает разгоняться до скорости ω_2.

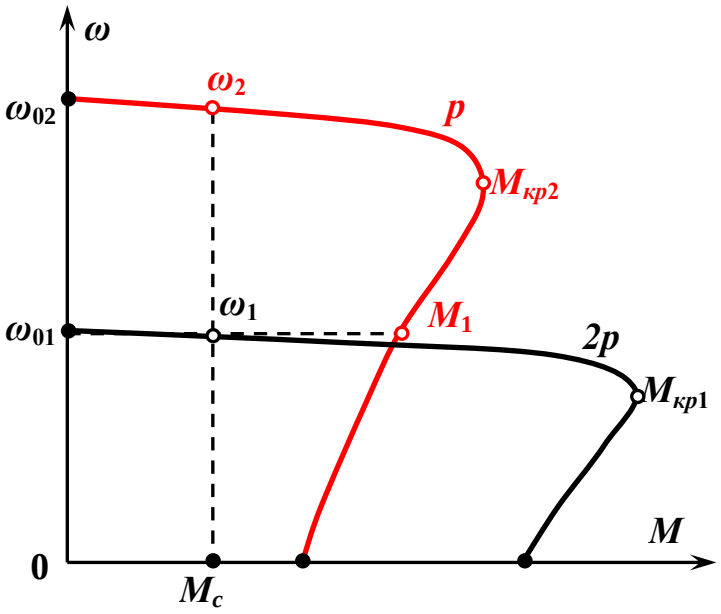


Рис. 15.2. Характеристики двухскоростного двигателя при двухступенчатом пуске.

Кривая скорости во времени при $M_c = 0$ может быть построена по формуле (14.8):

$$t_{n0} = \frac{T_M}{2}\left(\frac{1-s^2}{2s_{кр}} + s_{кр}\, ln\frac{1}{s}\right), \qquad (14.8)$$

для первой ступени в предположении, что скольжение изменяется от 1 до 0,05, $T_M = T_{M1} = \frac{J\omega_{01}}{M_{кр1}}$, $s_{кр} = s_{кр1}$. Расчет кривой скорости для второй ступени производится по той же формуле, однако начальным скольжением будет 0,5, а конечным 0,05; кроме того $T_M = T_{M2} = \frac{J\omega_{02}}{M_{кр2}}$, $s_{кр} = s_{кр2}$.

Полное время разгона равно сумме времен разгона на первой и второй ступенях. Для рассмотренного случая время ступенчатого пуска окажется меньшим, чем время разгона в одну ступень до той же наибольшей скорости. Аналогично производится построение кривой скорости во времени при другом числе скоростей двигателя.

3. ТОРМОЖЕНИЕ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ И РЕВЕРСИРОВАНИЕ

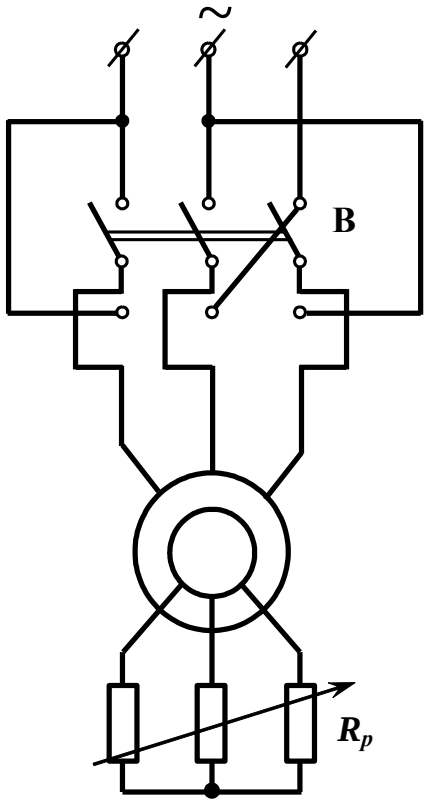


Рис. 15.3. Принципиальная схема реверсирования асинхронного двигателя.

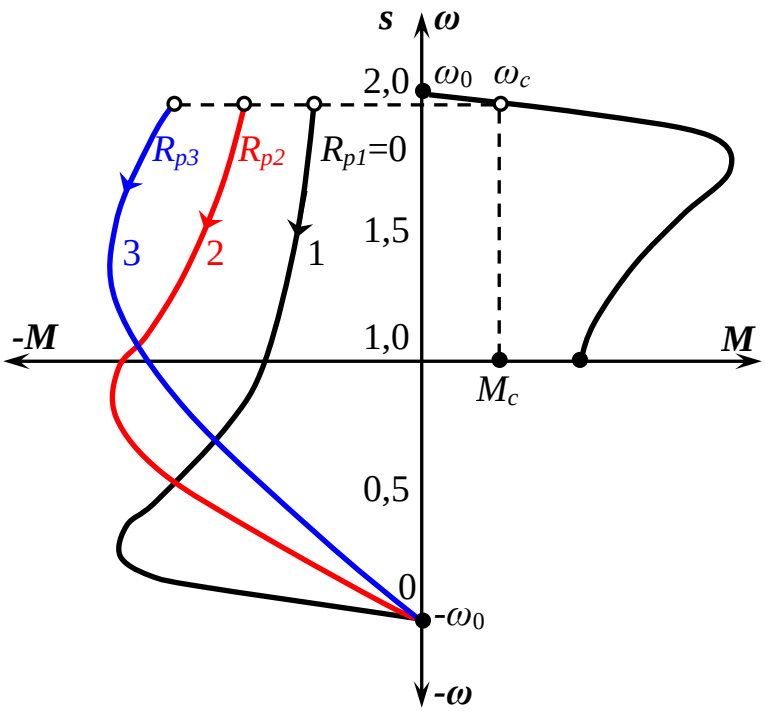


Рис. 15.4. Характеристики $\omega = f(M)$, переход из двигательного режима в режим противовключения

Торможение противовключением и реверсирование асинхронного двигателя осуществляются переключением двух фаз статора (рис. 15.3). Характеристики $\omega = f(M)$, иллюстрирующие переход из двигательного режима в режим противовключения, показаны на рис. 15.4.

Кривая 1 соответствует торможению, когда ротор замкнут накоротко, кривые 2 и 3 – условию, что в цепи ротора включено сопротивление соответственно $R_{p2} < R_{p3}$.

Если принять $M_c = 0$, $s = \dfrac{\omega_0 + \omega}{\omega_0}$, то уравнение движения привода примет вид:

$$-\frac{2M_{кр}}{\dfrac{s}{s_{кр}} + \dfrac{s_{кр}}{s}} = J\omega_0 \frac{ds}{dt}, \qquad (15.3)$$

После преобразований можно получить в общем виде для времени торможения такое же выражение, как и (14.7).

$$t_{m0} = \frac{T_M}{2} \int_{s_{кон}}^{s_{нач}} \left(\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} \right) ds. \qquad (14.7)$$

Учитывая, что торможение происходит в пределах скольжений от $s_{нач} = 2$ до $s_{кон} = 1$, получаем:

$$t_{m0} = T_M \left(0{,}345 s_{кр} + \frac{0{,}75}{s_{кр}} \right). \qquad (15.4)$$

Аналогично случаю пуска, время торможения противовключением имеет минимальное значение:

$$\left(\frac{t_{m0}}{T_M} \right)_{min} = 1{,}027, \text{ при } s_{кр} = 1{,}47$$

На рис. 15.4 показано, что характеристика *3* соответствует случаю, когда $s_{кр} = 1{,}47$ и эффективное значение тормозного момента имеет наибольшее значение. Аналогично предыдущему может быть найдено эффективное значение момента при торможении противовключением:

$$M_{эф.т} = \frac{M_{кр} s_{кр}}{0{,}75 + 0{,}345 s_{кр}^2}. \qquad (15.5)$$

Если $s_{кр} = 1{,}47$, то эффективный момент имеет максимальное значение при торможении $M_{эф.т.max} = 0{,}98 M_{кр}$.

Зная значение эффективного момента при пуске или при торможении противовключением, можно в случае постоянства момента сопротивления M_c определить время пуска или торможения под нагрузкой:

$$t_{n(m)} = \frac{J\omega}{M_{эф.n(m)} \pm M_c}. \qquad (15.6)$$

В формуле (15.6) *знак минус* относится к режиму пуска двигателя, *знак плюс* к режиму торможения. Время реверсирования можно рассматривать как сумму времен торможения противовключением и разбега в обратном направлении.

4. ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ

Динамическое торможение, как упоминалось выше, осуществляется чаще всего при переключении на ходу обмотки статора от источника переменного тока на источник постоянного тока (рис. 15.5).

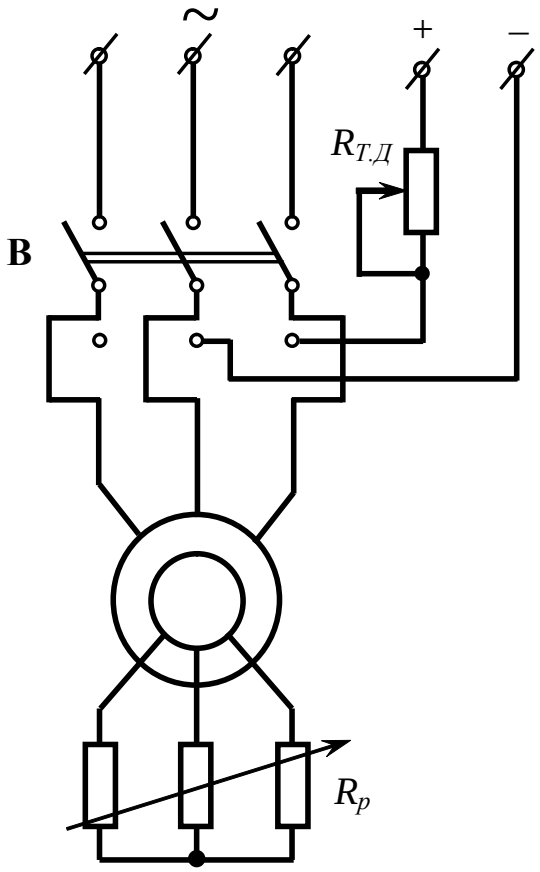


Рис. 15.5. Принципиальная схема динамического торможения

.

Соответствующие характеристики динамического торможения получаются при введении сопротивления R_T в цепь ротора (рис. 15.6). Характеристика **1** относится к случаю, когда $R_T = 0$.

Для ограничения величины постоянного тока вводится дополнительное сопротивление $R_{Д.Т}$.

Если торможение производится без нагрузки, то уравнение движения запишется следующим образом:

$$-\frac{2M_{max}}{\frac{s_{max}}{s}+\frac{s}{s_{max}}} = J\frac{d\omega}{dt}. \qquad (15.7)$$

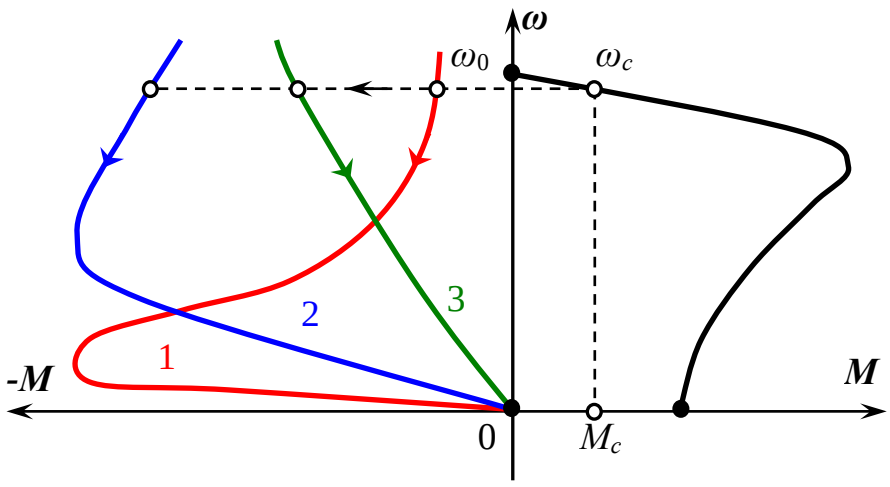


Рис. 15.6. Характеристики двигателя $\omega = f(M)$ при переключении из двигательного режима на динамическое торможение.

После преобразований, принимая во внимание, что $s = \frac{\omega}{\omega_0}$, получим время торможения:

$$t_{т.Д} = \frac{T_M}{2}\left(s_{max} \ln s + \frac{s^2}{2s_{max}} \right) \Bigg|_{s_{кон}}^{s_{нач}} \qquad (15.8)$$

Когда $s_{нач} = 1$, а $s_{кон} = 0{,}05$, формула (15.8) запишется так:

$$t_{т.Д} = T_M \left(1{,}5 s_{max} + \frac{1}{4 s_{max}} \right), \qquad (15.9)$$

где $T_M = \frac{J\omega_0}{M_{кр}}$ – электромеханическая постоянная времени при динамическом торможении.

Так как формула (15.9) аналогична (14.10)

$$\frac{t_{п0}}{T_M} = \frac{1}{4 s_{кр}} + 1{,}5 s_{кр}, \qquad (14.10)$$

для времени пуска асинхронного двигателя без нагрузки, то значение эффективного момента двигателя при динамическом торможении может быть найдено по формуле, аналогичной (15.2):

$$M_{эф.п} = \frac{M_{кр} s_{кр}}{0{,}25 + 1{,}5 s_{кр}^2}. \qquad (15.2)$$

Очевидно, что минимальное время торможения, так же как и при пуске, соответствует $s_{max} = 0{,}407$.

5. РЕКУПЕРАТИВНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рекуперативное торможение асинхронного двигателя возможно, если скорость вращения его оказывается выше синхронной. Как отмечалось выше, этот способ торможения может быть осуществлен при управлении, например, двух- или многоскоростными двигателями, в случае переключения обмоток статора работающего двигателя с меньшего числа полюсов на большее. Построив механическую характеристику двигателя в генераторном режиме и определив из нее максимальный момент и критическое скольжение, подсчитав электромеханическую постоянную времени для данного случая и задавшись пределами изменения скольжения, можно аналогично предыдущему построить кривую зависимости скорости от времени и определить время торможения.

Торможение двух- или многоскоростного двигателя может быть ступенчатым – в начале рекуперативным, а затем торможением противовключением (или динамическим торможением).

Рис. 15.7 иллюстрирует процесс двухступенчатого торможения двухскоростного двигателя.

Если не учитывать время коммутации аппаратов управления, то можно считать, что время торможения при ступенчатом торможении существенно меньше, чем при торможении в одну ступень, за счет увеличения эффективного тормозного момента.

В случае использования четырехскоростного двигателя, можно осуществить рекуперативное торможение в три ступени; на последней четвертой ступени торможения осуществляется противовключение при наибольшем числе полюсов статорной обмотки. Плавное рекуперативное торможение осуществляется при частотном управлении асинхронным двигателем в случае, если преобразователь частоты обладает двусторонней проводимостью.

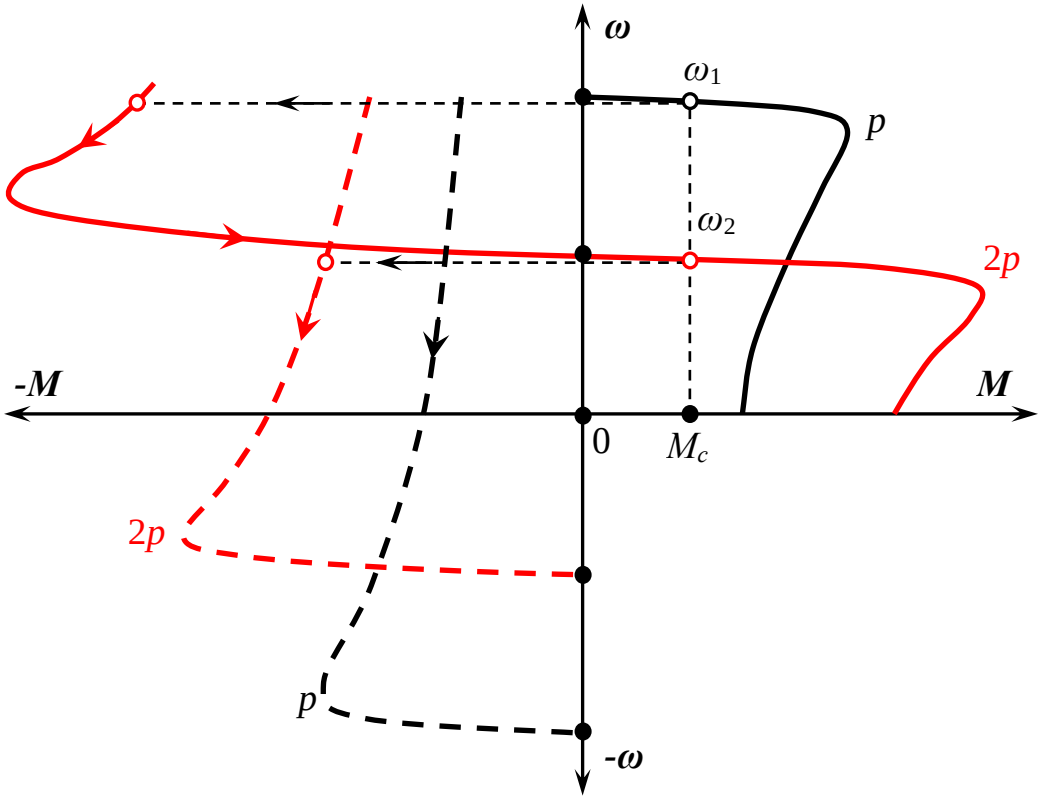


Рис. 15.7. Характеристики ступенчатого торможения двухскоростного двигателя.

Лекція № 16

Тема № 3: Автоматизований електропривод з асинхронними двигунами спеціального призначення

1. Асинхронные двигатели с внешним ротором
2. Линейные асинхронные двигатели

1. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ВНЕШНИМ РОТОРОМ

Помимо асинхронных двигателей общего назначения, составляющих основу современного электропривода, в последние годы все более широкое применение получают асинхронные двигатели специального назначения. Применение таких двигателей позволяет упростить электропривод и придать ему некоторые специфические свойства, которые двигателями общего назначения не обеспечиваются. Для двигателей специального назначения характерна нетрадиционность их конструкции. К таким двигателям относятся двигатели с внешним ротором и линейные асинхронные двигатели.

Асинхронные двигатели с внешним ротором. Эти двигатели отличаются от ранее рассмотренных тем, что их статор (неподвижная часть) находится внутри ротора (вращающейся части). Такую конструкцию иногда называют обращенной. По принципу действия эти двигатели не отличаются от асинхронных двигателей общего назначения, т. е. от двигателей с внутренним ротором.

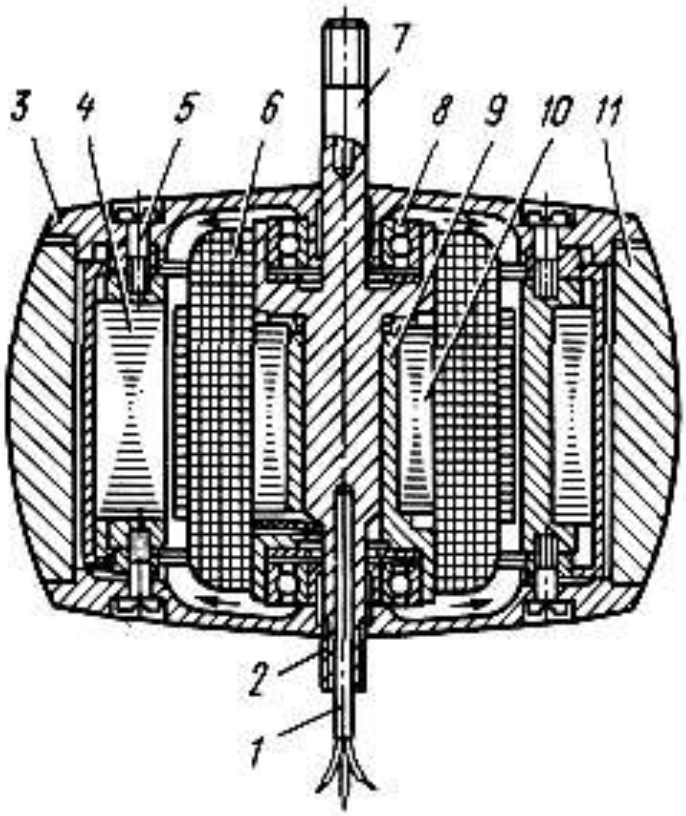


Рис. 16.1. Устройство трехфазного асинхронного двигателя с внешним ротором

Асинхронный двигатель с внешним ротором (рис. 16.1) состоит из шихтованного сердечника статора 10, собранного на втулке 9, которая напрессована на стальную невращающуюся ось 7. Трехфазная обмотка статора 6 имеет три вывода 1, которые проходят через полую часть 2 оси 7. Внешний ротор состоит из шихтованного сердечника 4,

в пазах которого расположены стержни обмотки, замкнутые с двух сторон замыкающими кольцами. Наружная поверхность ротора образована ободом 11, форма которого зависит от назначения двигателя, т. е. он может быть колесом, шкивом, роликом или просто массивным элементом – маховиком. С двух сторон обод закреплен крышками 3 посредством винтов 5. Крышки 3 сочленяются с подшипниками 8.

Асинхронные двигатели с внешним ротором применяют в электроинструменте, в рольганге на металлургических предприятиях (внешний ротор двигателя – это вращающийся ролик рольганга), в качестве двигателя-маховика для привода устройств, требующих равномерного вращения при неравномерной нагрузке на вал.

Однако самое широкое применение эти двигатели получили в гироскопических приборах в качестве *гиродвигателей*. Гироскопические приборы составляют основу навигационной техники в судостроении, авиации и ракетостроении. Основной элемент гироскопического прибора – *гироскоп*, т. е. массивный цилиндрический ротор. Приведенный в быстрое вращение, этот ротор сохраняет неизменным положение в пространстве своей оси вращения. Чем больше частота вращения ротора, тем эффективнее проявляется это свойство.

Основное требование к гидродвигателю состоит в создании большого кинетического момента, Н·м·с:

$$M_{кин} = J_2\omega_2, \qquad (16.1)$$

где J_2 – момент инерции ротора, Н·м·с^2; ω_2 – угловая скорость ротора, 1/с.

Гидродвигатели для обеспечения большого момента инерции l'i изготавливают с внешним ротором, а для получения большой угловой скорости й2 их питают от сети переменного тока частотой f_1 = 400 ÷ 2000 Гц при числе полюсов обмотки статора 2р = 4 или 8. Обмотку ротора гидродвигателей выполняют с малым активным сопротивлением, что определяет работу двигателя с небольшим скольжением (s = 0,02 ÷ 0,05). Это необходимо для получения жесткой механической характеристики, т.е. возможные колебания питающего напряжения и нагрузки не будут сопровождаться значительными изменениями частоты вращения ротора.

2. ЛИНЕЙНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Во многих производственных механизмах, транспортных средствах и приборных устройствах рабочий орган совершает поступательное или возвратно-поступательное движение. Для привода этих устройств и механизмов используют двигатели с вращательным движением ротора и промежуточным кинематическим звеном для преобразования вращательного движения в линейное. Такое звено усложняет привод, вызывает дополнительные потери мощности, снижает КПД и надежность. Кинематика привода указанных устройств упрощается, если использовать линейный электродвигатель, у которого подвижная часть совершает поступательное или возвратно-поступательное движение. Наибольшее применение получили линейные асинхронные двигатели (ЛАД).

Принцип действия ЛАД основан на способности многофазной (трехфазной) системы токов создавать бегущее магнитное поле. Если в обычном асинхронном двигателе статор цилиндрической формы разрезать вдоль его оси и развернуть в плоскость (рис. 16.2), то получим статор линейного двигателя, называемый индуктором 1. Если обмотку индуктора соединить звездой или треугольником и включить в трехфазную сеть, то воз-

никает магнитное поле, ось которого будет перемещаться вдоль развернутой поверхности сердечника индуктора с синхронной скоростью υ_1. Такое магнитное поле *называют бегущим*.

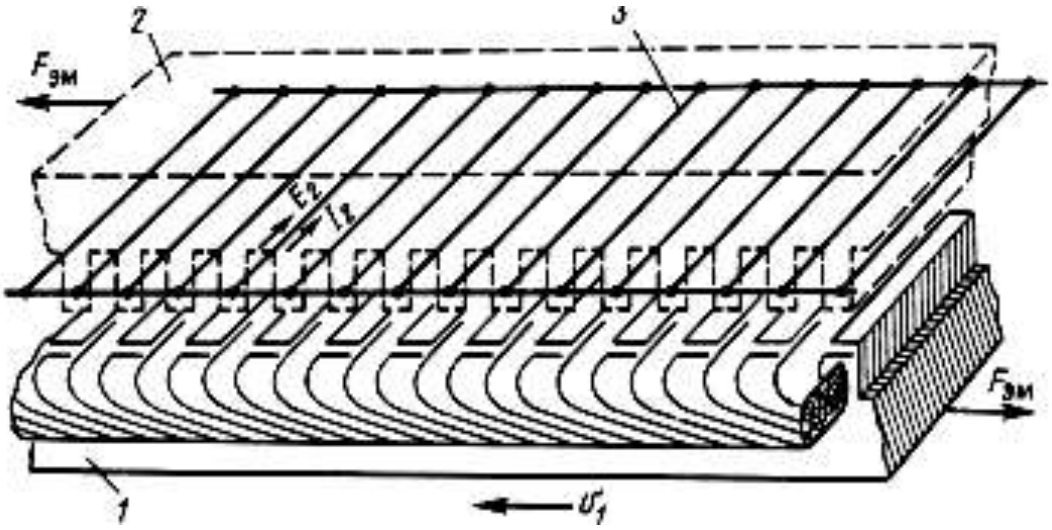


Рис. 16.2. Электромагнитная схема линейного асинхронного двигателя

Синхронная скорость бегущего поля пропорциональна частоте тока f_1 и длине индуктора L_u и обратно пропорциональна числу пар полюсов в обмотке индуктора p:

$$\upsilon_1 = \frac{f_1 L_u}{p}. \qquad (16.2)$$

Вблизи индуктора, параллельно ему, расположен вторичный элемент, состоящий из магнитопровода 2 (на рис. 4.2 показан пунктирными линиями), в пазы которого заложены алюминиевые или медные стержни 3 короткозамкнутой обмотки. Бегущее поле индуктора, сцепляясь со стержнями 3 короткозамкнутой обмотки, будет наводить в них ЭДС E_2, которая создаст токи I_2. Взаимодействуя с бегущим магнитным полем, эти токи создают электромагнитные силы $F_{эм}$, стремящиеся сместить магнитопроводы индуктора и вторичного элемента относительно друг друга в противоположных направлениях. Если один из магнитопроводов, например индуктора, закрепить неподвижно, то другой магнитопровод, называемый в этом случае бегунком, будет линейно перемещаться относительно первого в направлении движения бегущего поля. В итоге электроэнергия, поступающая в обмотку индуктора из сети, будет преобразовываться в механическую энергию линейного (поступательного) движения.

Если неподвижным сделать вторичный элемент, то бегунком станет индуктор, который будет перемещаться линейно в направлении, противоположном движению создаваемого им бегущего поля.

Электромагнитная сила, вызывающая линейное перемещение бегунка линейного двигателя, прямо пропорциональна числу пар полюсов обмотки индуктора p, току вторичного элемента I_2 и бегущему магнитному полю Φ_2:

$$F_{эм} = c_м p I_2 \Phi_2 \cos\psi_2, \qquad (16.3)$$

где $c_м$ – постоянный коэффициент, определяемый конструкцией линейного двигателя; ψ_2 – угол сдвига фаз между ЭДС $\dot{E}_2$ и током $\dot{I}_2$ во вторичном элементе двигателя.

Скорость движения бегунка υ_2 всегда меньше скорости бегущего поля υ_1, так как только в этом случае в обмотке вторичного элемента ЛАД наводится ЭДС. Таким образом, в ЛАД, так же как и в двигателях с вращательным движением ротора, скольжение *s* характеризует отставание подвижной части двигателя от бегущего поля:

$$s = \frac{\upsilon_1 - \upsilon_2}{\upsilon_1}. \qquad (16.4)$$

Имеются конструкции ЛАД, в которых в качестве вторичного элемента используется полоса из меди, алюминия или стали, обладающей ферромагнитными свойствами. Возможно применение составного вторичного элемента, например полосы из ферромагнитной стали, покрытой слоем меди.

Линейные асинхронные двигатели используют для привода заслонок, подъемно-транспортных средств, металлообрабатывающих станков, в электроприводе манипуляторов (роботов) и во многих других случаях, где рабочий орган должен совершать поступательное или возвратно-поступательное движение. Рассмотрим несколько примеров практического применения ЛАД. На рис. 4.3, *а* показано устройство привода тележки мостового крана с ЛАД. На тележке 3 расположен индуктор линейного двигателя, состоящий из шихтованного сердечника 6, в пазах которого расположена обмотка 5. Направляющая для колес 2 представляет собой стальную балку 1, к нижней части которой прикреплена стальная полоса 4 – вторичный элемент ЛАД.

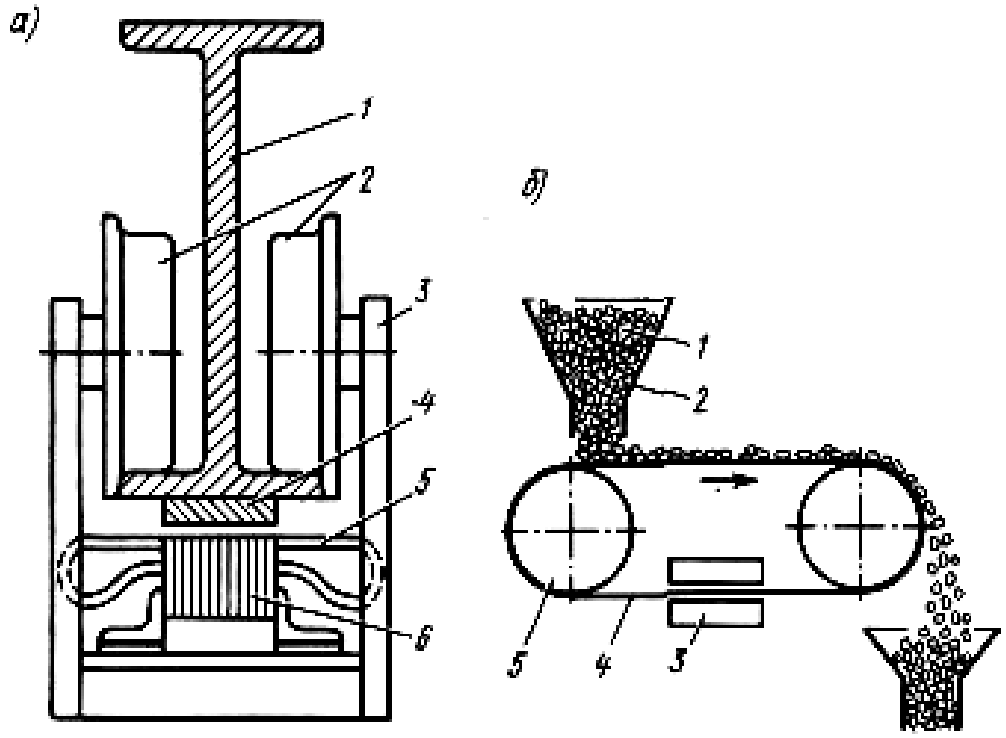


Рис. 16.3. Линейные асинхронные двигатели для привода тележки мостового крана (*а*) и ленты транспортера (б)

На рис. 16.3, *б* показан пример применения ЛАД для привода ленточного конвейера, транспортирующего сыпучие материалы 1 из бункера 2. Груз переносится металличе-

ской лентой 4, укрепленной на вращающихся барабанах 5. Металлическая лента – вторичный элемент ЛАД. Электромагнитное усилие, приводящее ленту в движение, возникает на участке ленты, проходящем в воздушном зазоре между двумя индукторами 3.

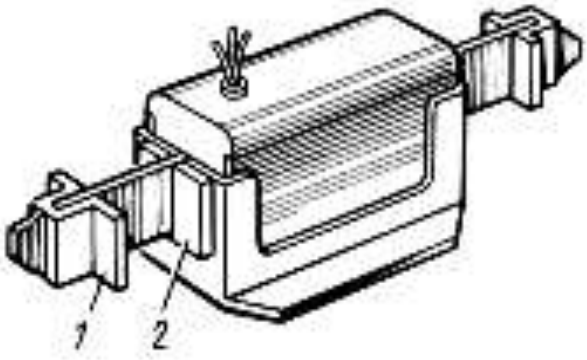


Рис. 15.4. Линейный асинхронный двигатель возвратно-поступательного движения

В ЛАД с возвратно-поступательным движением, которые получили наибольшее применение для привода производственных механизмов и станков, изменяется направление бегущего поля индуктора в момент окончания движения бегунка в одном из направлений. Для этого необходимо изменять порядок чередования фаз питающего напряжения. Для торможения бегунка в конце хода применяют ограничительные пластины на бегунке 1 и индукторе 2 (рис. 16.4). Иногда между этими пластинами располагают пружины.

Примеры использования линейных двигателей в металлообрабатывающих станках – привод стола плоскошлифовального станка или привод стола продольно-строгального станка.

Недостатки линейных асинхронных двигателей: явление краевого эффекта, трудность увеличения электромагнитного усилия, создаваемого двигателем. Явление краевого эффекта представляет собой комплекс электромагнитных процессов, обусловленных разомкнутой конструкцией статора (индуктора). Нежелательные последствия краевого эффекта – появление «паразитных» тормозных усилий, направленных встречно движению подвижной части двигателя; возникновение поперечных сил, стремящихся сместить подвижную часть двигателя в поперечном направлении. Краевой эффект вызывает ряд других нежелательных явлений, ухудшающих рабочие характеристики линейных двигателей. В двигателях с вращательным движением ротора электромагнитный момент, развиваемый двигателем, усиливается применением редуктора, понижающего частоту вращения. В ЛАД увеличение силы, действующей на рабочий орган машины, возможно лишь посредством рычага (системы рычагов), с большим плечом на стороне двигателя. Однако это усложняет привод и лишает его главного достоинства, которое достигается заменой двигателя с вращательным движением ротора на линейный двигатель.

В линейных двигателях возвратно-поступательного движения возникают неблагоприятные условия работы, вызванные чередованием циклов разгона в начале движения бегунка и торможения в конце его движения. Поэтому целесообразно регулировать скорость, изменяя частоту питающего напряжения f_1. Применяемые для этого регуляторы частоты должны обеспечивать оптимальный закон изменения частоты, соответствующий минимальным потерям в переходных режимах разгона и торможения.

Лекція № 17

Тема № …: Автоматизований електропривод з спеціальними двигунами

1. Шаговые исполнительные двигатели. Общие сведения.
2. Шаговые двигатели с переменным магнитным сопротивлением.
3. Шаговые двигатели с постоянными магнитами (активным ротором).
4. Гибридные шаговые двигатели.
5. Биполярные и униполярные шаговые двигатели

1. ШАГОВЫЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Шаговый двигатель – это электромеханичское устройство, которое преобразует электрические импульсы в дискретное механическое угловое перемещение выходного вала (*общий вид ШД представлен на рис. 1*). Угол поворота вала, называемый ***угловым шагом***, точно соответствует числу и порядку следования управляющих импульсов, поступающих на обмотки статора шагового двигателя.

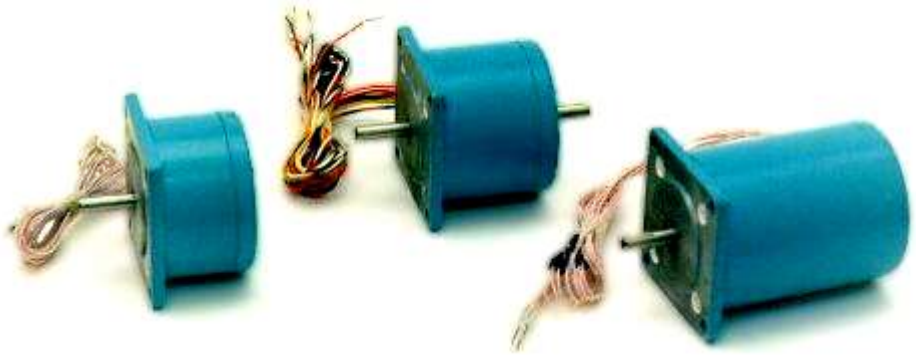


Рис. 1. Внешний вид шаговых двигателей семейства ДШИ-200.

По принципу работы шаговые двигатели являются синхронными, так как электромагнитный момент, действующий на их ротор, создается силами магнитного притяжения полюсов статора и ротора.

Шаговые двигатели получили наибольшее применение в автоматизированном программном электроприводе.

Существуют три основных типа шаговых двигателей:

- двигатели с переменным магнитным сопротивлением (ШД с пассивным (невозбужденным) ротором или их еще называют *реактивными*);
- двигатели с постоянными магнитами (активным ротором);
- гибридные двигатели.

Достоинства ШД:

- угол поворота ротора определяется числом импульсов, которые поданы на двигатель
- двигатель обеспечивает полный момент в режиме остановки (если обмотки запитаны)
- прецизионное позиционирование и повторяемость. Хорошие шаговые двигатели имеют точность 3-5% от величины шага. Эта ошибка не накапливается от шага к шагу

- возможность быстрого старта/остановки/реверсирования
- высокая надежность, связанная с отсутствием щеток, срок службы шагового двигателя фактически определяется сроком службы подшипников
- однозначная зависимость положения от входных импульсов обеспечивает позиционирование без обратной связи
- возможность получения очень низких скоростей вращения для нагрузки, присоединенной непосредственно к валу двигателя без промежуточного редуктора
- может быть перекрыт довольно большой диапазон скоростей, скорость пропорциональна частоте входных импульсов

Недостатки ШД:

- шаговым двигателем присуще явление резонанса
- возможна потеря контроля положения ввиду работы без обратной связи
- потребление энергии не уменьшается даже без нагрузки
- затруднена работа на высоких скоростях
- невысокая удельная мощность
- относительно сложная схема управления

2. ШАГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ПЕРЕМЕННЫМ МАГНИТНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Шаговые двигатели с пассивным ротором. Такие двигатели называют реактивными. Статор реактивного трехфазного шагового двигателя (рис. 2) имеет шесть

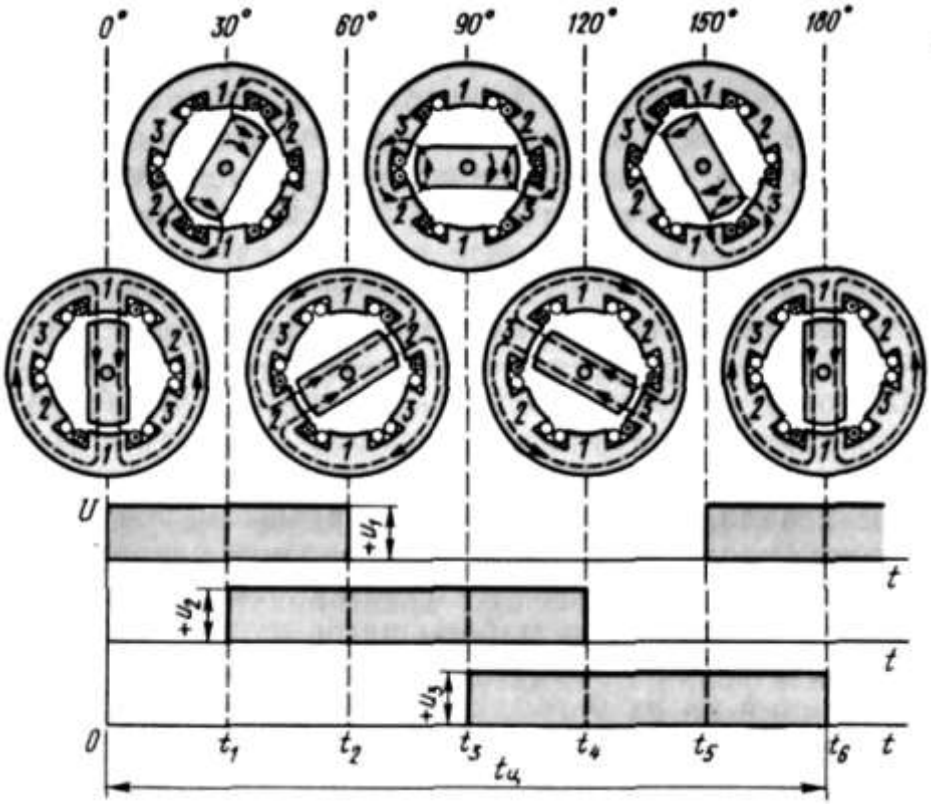


Рис. 2. К принципу действия реактивного шагового двигателя

явно выраженных полюсов (по два полюса на фазу), а ротор – два выступа (невозбужденных полюса). При прохождении импульса тока в обмотке фазы 1 статора ротор занимает положение, при котором его ось совмещается с осью 1–1 полюсов статора. В момент времени t_1 при появлении импульса тока в фазе 2 на ротор действуют силы магнитного притяжения, обусловленные одновременным намагничиванием полюсов 1–1 и 2–2. В результате ротор повернется на угловой шаг $\alpha_ш$ = 30°. В момент времени t_2 импульс тока в фазе 1 прекратится и ротор, совершив еще один шаг $\alpha_ш$ = 30°, займет положение по оси 2–2. В момент t_3 появится импульс тока в фазе 3 и ротор, повернувшись на 30°, займет среднее положение между полюсами 2–2 и 3–3. Суммарный угол поворота ротора составит 90°. В моменты времени t_4, t_5 и t_6 ротор также будет совершать угловые шаги по 30° и в конце цикла займет положение по оси полюсов статора 1–1, совершив половину оборота (180°). В последующие циклы подачи на обмотку статора управляющих импульсов напряжения u_1, u_2 и u_3 процессы в шаговом двигателе будут повторяться. Двигатель работает по шеститактной схеме коммутации с раздельно-совместным включением обмоток фазы: 1→1,2→2→2,3→3→3,1→ …

На рис. 3 представлен еще один пример ШД с переменным магнитным сопротивлением имеют несколько полюсов на статоре и ротор зубчатой формы из магнитомягкого материала. Намагниченность ротора отсутствует. Для простоты на рисунке ротор имеет 4 зубца, а статор имеет 6 полюсов. Двигатель имеет 3 независимые обмотки, каждая из которых намотана на двух противоположных полюсах статора. Такой двигатель имеет шаг $\alpha_ш$ = 30°.

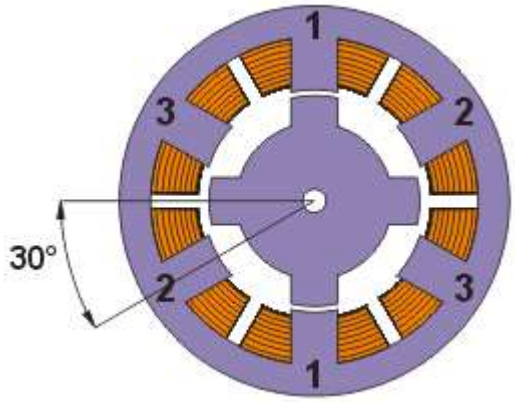


Рис. 3. Двигатель с переменным магнитным сопротивлением

Реактивные шаговые двигатели работают от однополярных импульсов, так как изменение полярности импульса не изменяет направления сил, действующих на невозбужденный ротор. Чтобы изменить направление ротора (реверс) шагового двигателя, необходимо поменять схему коммутации обмоток статора, например, принять 1→1,3→3→3,2→2→2,1→ ...

Если в рассматриваемом двигателе принять схему коммутации с раздельным включением обмоток статора: 1→2→3 то угловой шаг двигателя увеличится в два раза: $\alpha_ш$ = 60°. В общем случае угловой шаг двигателя:

$$\alpha_ш = \frac{360}{2p_2 m_1 k_ф}, \qquad (17.1)$$

где $2p_2$ – число полюсных выступов на роторе;

m_1 – число фаз обмотки статора;

$k_ф$ — коэффициент, зависящий от способа включения фаз обмотки статора (при раздельном включении $k_ф = 1$, при раздельно-совместном $k_ф = 2$.

Уменьшение углового шага $\alpha_ш$ повышает быстродействие, так как сокращается время на перемещение ротора при отработке сигнала и увеличивается точность работы шагового двигателя. Для уменьшения углового шага $\alpha_ш$ увеличивают число полюсных выступов на роторе $2p_2$. Если в рассматриваемом двигателе применить ротор крестообразного сечения с $2p_2 = 4$, то при раздельно-совместном включении обмоток фаз статора угловой шаг уменьшится вдвое: $\alpha_ш = 15°$. Дальнейшее уменьшение шага возможно при использовании в двигателе принципа редукции скорости. На полюсных наконечниках статора и на поверхности цилиндрического ротора делают открытые пазы, придавая поверхностям этих элементов гребенчатую форму. Пазы на статоре и роторе выполняют с одинаковым шагом. На рис. 8.15 показана конструкция шагового двигателя с числом полюсов на статоре $2p_1 = 8$ и числом пазов на цилиндрическом роторе $Z_2 = 36$. Угловой шаг этого двигателя $\alpha_ш = 2{,}5°$. Возможно и дальнейшее уменьшение шага.

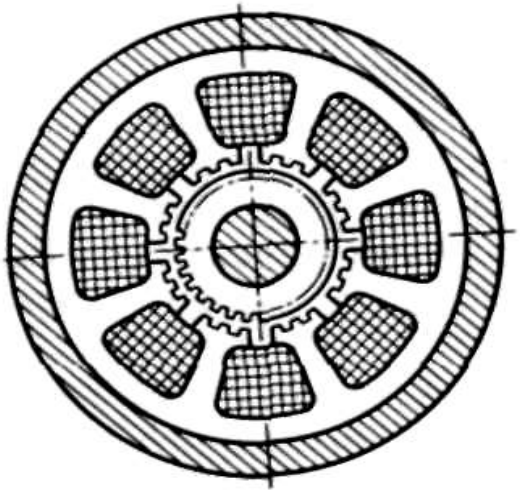


Рис. 4. Магнитная система реактивного ШД с электромагнитной редукцией

Недостаток реактивных шаговых двигателей с электромагнитной редукцией – небольшой вращающий момент.

Один из основных параметров шаговых двигателей — ***частота приемистости*** $f_{пр}$, представляющая собой наибольшую частоту следования управляющих импульсов, при которой ротор двигателя втягивается в синхронизм с места без потери шага.

Частота приемистости зависит от нагрузки на валу шагового двигателя: в режиме холостого хода частота приемистости наибольшая $f_{пр\ max}$, а с появлением нагрузки – уменьшается. Частота приемистости при номинальной нагрузке реактивных шаговых двигателей $f_{пр\ ном} \le 1000 \div 1200$ Гц. При увеличении углового шага частота приемистости уменьшается.

Шаговый двигатель работает совместно с коммутатором, преобразующим заданную последовательность управляющих импульсов в m_1-фазную систему импульсов напряжения прямоугольной формы.

3. ШАГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ (АКТИВНЫМ РОТОРОМ)

ШД с активным ротором. Ротор такого двигателя выполнен из постоянного магнита, а статор – такой же, как у реактивных шаговых двигателей, т. е. с сердечником с явно выраженными полюсами и многофазной обмоткой. В шаговом двигателе с активным ротором можно применять двухполярные импульсы напряжения, так как с изменением направления тока в обмотке фазы статора меняется магнитная полярность соответствующих полюсов. Так как ротор двигателя намагничен, то изменение полярности полюсов

статора вызывает изменение направления сил взаимодействия между полюсами статора и ротора.

Рассмотрим принцип действия двухфазного двигателя с двухполюсным постоянным магнитом на роторе и четырьмя явно выраженными полюсами на статоре (рис. 5).

При подаче импульса напряжения положительной полярности ($+u_1$) в обмотку 1 фазы два полюса этой фазы приобретают магнитную полярность, как на рис. 5, *а*, при этом ротор занимает вертикальное положение, обусловленное направлением сил взаимного притяжения полюсов статора и ротора разноименной полярности. В момент времени t_1 (рис. 5, *д*) импульс в фазе 1 прекращается, поступает положительный импульс (+ u_2) в фазу 2. При этом обмотка 1 фазы обесточивается, а полюса фазы 2 приобретают магнитную полярность, как на рис. 5, *б*. В результате ротор поворачивается против часовой стрелки на $\alpha_ш$=90°. В момент времени t_2 на обмотку фазы 1 подается импульс напряжения отрицательной полярности ($-u_1$), а с обмотки 2 фазы импульс напряжения снимается. В результате полюса этой фазы приобретут полярность, как на рис. 5, *в*, и ротор повернется против часовой стрелки еще на 90°. Затем в момент времени t_3 импульс напряжения отрицательной полярности поступит в обмотку 2 фазы и ротор повернется еще на 90° (рис. 5, *г*). При подаче импульса напряжения ($+u_1$) на обмотку фазы 1 ротор заканчивает полный оборот и занимает исходное положение (см. рис. 5, *а*). Работа шагового двигателя соответствует коммутации с раздельным включением обмоток фазы и разнополярными импульсами напряжения ($+u_1$)→($+u_2$)→($-u_1$)→($-u_2$)→($+u_1$). Если в рассмотренном двигателе применить коммутацию с раздельно-совместным включением обмоток фазы, тогда:

($+u_1$)→ ($+u_1$)($+u_2$)→($+u_2$)→($+u_2$)($-u_1$)→($-u_1$)→($-u_1$)($-u_2$)→($-u_2$)($+u_1$)→($+u_1$),

то ШД будет работать с угловым шагом $\alpha_ш$=45°, при этом вращающий момент на роторе возрастет примерно в 1,5 раза.

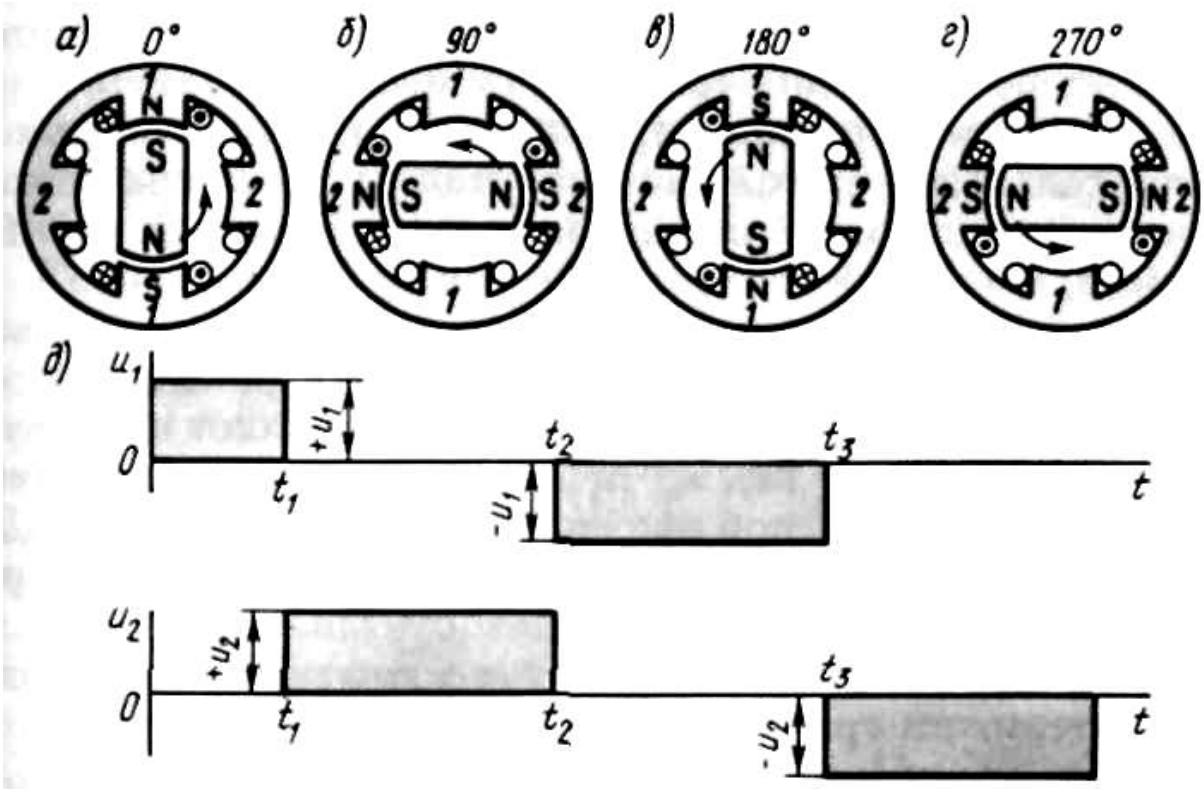


Рис. 5. К принципу действия шагового двигателя с активным ротором

ШД с активным ротором работают также с однополярньши импульсами напряжения (что упрощает конструкцию коммутатора), но при этом число обмоток фазы на статоре (и число полюсов) увеличивается.

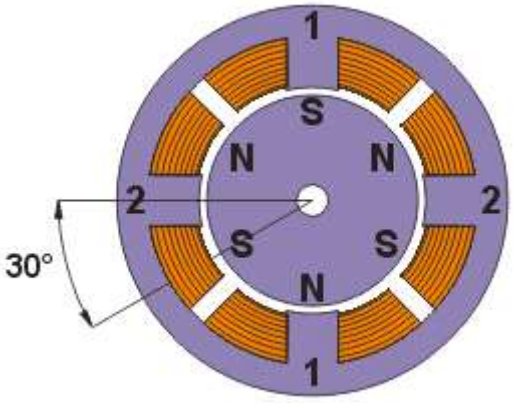


Рис. 5. Двигатель с постоянными магнитами.

Разрез реального шагового двигателя с постоянными магнитами показан на рис. 6.

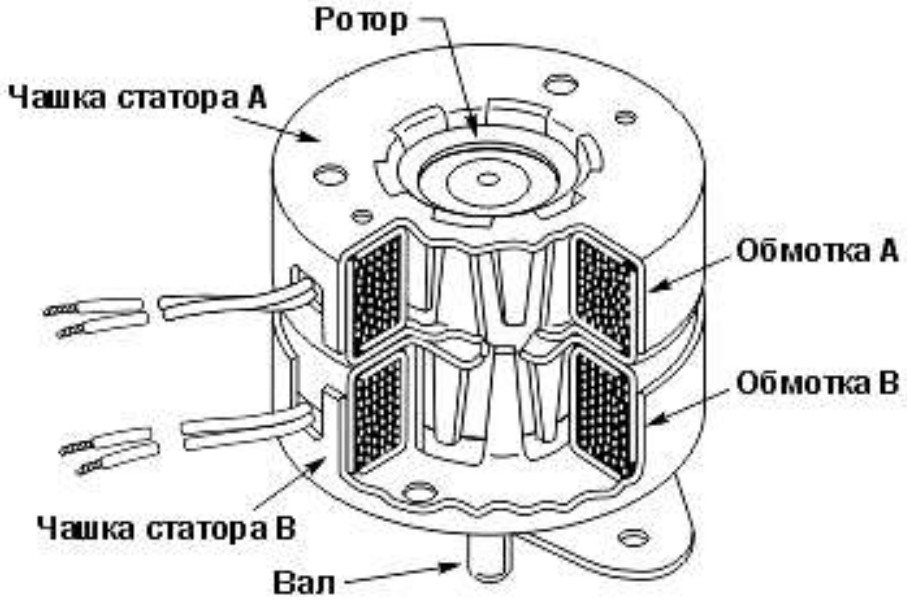


Рис. 6. Разрез шагового двигателя с постоянными магнитами

По сравнению с реактивными ШД с активным ротором создают *большие вращающие моменты, обеспечивают фиксацию ротора* при снятии управляющего сигнала.

Недостаток двигателей с активным ротором – большой угловой шаг (15–90°). Это объясняется технологическими трудностями изготовления ротора с постоянными магнитами при большом числе полюсов. Для уменьшения углового шага увеличивают число фаз в обмотке статора или применяют двухстаторную конструкцию. Двухстаторные двигатели имеют два одинаковых сердечника статора с одинаковыми обмотками, на валу размещены два ротора, при этом сердечники статоров смещены относительно друг друга на половину зубцового деления (роторы расположены соосно). *Недостаток* таких двигателей – сложность изготовления.

Из-за разнообразных требований, предъявляемых к исполнительным ШД, были созданы специальные шаговые двигатели – линейные, волновые, с катящимся ротором.

Рассматривая принцип действия шагового двигателя, влияние нагрузочного момента на валу двигателя не учитывалось. Если на вал шагового двигателя действует нагрузочный момент $M_н$ то при переключении управляющего импульса с одной фазы на дру-

гую вектор МДС статора повернется на угол $\alpha_ш$, ротор двигателя, поворачиваясь за вектором МДС, будет отставать от него на угол $\Delta\Theta_c$, называемый углом статической ошибки ШД, эл. град:

$$\Delta\Theta_c = arcsin\left(\frac{M_н}{M_{max}}\right), \qquad (17.2)$$

где M_{max} – максимальный статический момент, соответствующий углу смещения ротора относительно вектора МДС статора $\Theta = 90^0$.

Быстродействие ШД определяется скоростью протекания электромагнитных процессов при переключении управляющих импульсов напряжения с одной обмотки фаз статора на другую. Скорость протекания процессов оценивается электромагнитной постоянной времени, с:

$$T_Э = \frac{L_ф}{r_ф}, \qquad (17.3)$$

где $L_ф$ – индуктивность обмотки фазы статора, Гн; $r_ф$ – активное сопротивление обмотки фазы, Ом.

Для повышения быстродействия ШД в обмотки фаз статора включают последовательно добавочные резисторы $R_{доб}$, тогда:

$$T_Э = \frac{L_ф}{r_ф + R_{доб}}. \qquad (17.4)$$

Энергетический показатель ШД – потребляемая мощность P_1.

Частота вращения шаговых двигателей регулируется изменением частоты подачи управляющих импульсов напряжения на обмотку статора, в зависимости от которой меняются режимы работы ШД: статический, квазистатический, установившийся и переходные.

Статический режим – режим, при котором по обмоткам фаз статора проходит постоянный ток, создающий неподвижное в пространстве магнитное поле. При этом ротор двигателя находится в состоянии статического равновесия, а прикладываемый к валу нагрузочный момент отклоняет ротор в ту или иную сторону от уравновешенного состояния на $\Delta\Theta_c$, т. е. на угол статической ошибки.

Квазистатический режим – режим работы ШД при единичных угловых шагах, когда к началу последующего шага все переходные процессы, связанные с отработкой предыдущего шага, полностью заканчиваются. Для обеспечения требуемой частоты отработки шагов в квазистатическом режиме применяют различные способы торможения ротора.

Установившийся режим – режим, соответствующий постоянной частоте следования управляющих сигналов. Ротор двигателя в этом режиме имеет постоянную частоту вращения, однако при переходе из одного установившегося состояния в другое могут возникать колебания ротора.

Переходные режимы – это основные режимы работы (пуска, ускорения, реверса) исполнительного ШД, работающего в автоматизированном электроприводе.

Основное требование к ШД в этих режимах – точная отработка частоты следования управляющих сигналов без потери шага при любом характере изменения частоты.

4. ГИБРИДНЫЕ ШАГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Гибридные ШД являются более дорогими, чем двигатели с постоянными магнитами, зато они обеспечивают меньшую величину шага, больший момент и большую скорость. Типичное число шагов на оборот для гибридных двигателей составляет от 100 до 400 (угол шага 3.6 – 0.9 град.). Гибридные двигатели сочетают в себе лучшие черты двигателей с переменным магнитным сопротивлением и двигателей с постоянными магнитами. Ротор гибридного двигателя имеет зубцы, расположенные в осевом направлении (рис. 7).

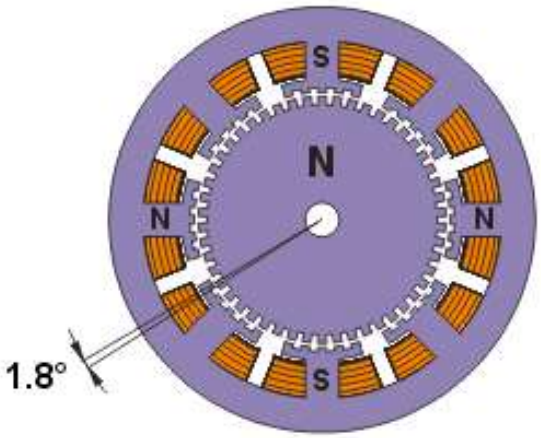


Рис. 7. Гибридный двигатель

Ротор разделен на две части, между которыми расположен цилиндрический постоянным магнит. Таким образом, зубцы верхней половинки ротора являются северными полюсами, а зубцы нижней половинки – южными. Кроме того, верхняя и нижняя половинки ротора повернуты друг относительно друга на половину угла шага зубцов. Число пар полюсов ротора равно количеству зубцов на одной из его половинок. Зубчатые полюсные наконечники ротора, как и статор, набраны из отдельных пластин для уменьшения потерь на вихревые токи. Статор гибридного двигателя также имеет зубцы, обеспечивая большое количество эквивалентных полюсов, в отличие от основных полюсов, на которых расположены обмотки. Обычно используются 4 основных полюса для 3.6 град. двигателей и 8 основных полюсов для 1.8- и 0.9 град. двигателей. Зубцы ротора обеспечивают меньшее сопротивление магнитной цепи в определенных положениях ротора, что улучшает статический и динамический момент. Это обеспечивается соответствующим расположением зубцов, когда часть зубцов ротора находится строго напротив зубцов статора, а часть между ними.

Большинство современных шаговых двигателей являются гибридными. По сути гибридный двигатель является двигателем с постоянными магнитами, но с большим числом полюсов. По способу управления такие двигатели одинаковы, дальше будут рассматриваться только такие двигатели. Чаще всего на практике двигатели имеют 100 или 200 шагов на оборот, соответственно шаг равен 3.6 грд или 1.8 грд. Большинство контроллеров позволяют работать в полушаговом режиме, где этот угол вдвое меньше, а некоторые контроллеры обеспечивают микрошаговый режим.

5. БИПОЛЯРНЫЕ И УНИПОЛЯРНЫЕ ШАГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

В зависимости от конфигурации обмоток двигатели делятся на биполярные и униполярные. Биполярный двигатель имеет одну обмотку в каждой фазе, которая для изме-

нения направления магнитного поля должна переполюсовывается драйвером. Для такого типа двигателя требуется мостовой драйвер, или полумостовой с двухполярным питанием. Всего биполярный двигатель имеет две обмотки и, соответственно, четыре вывода (рис. 8а).

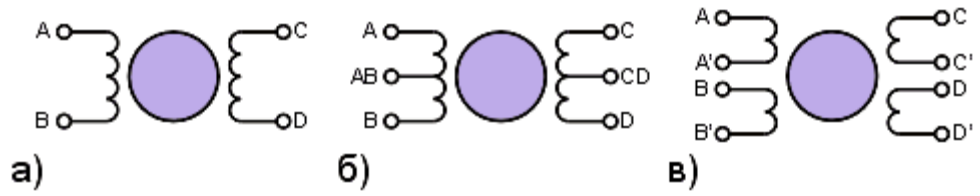


Рис. 8. Биполярный двигатель (а), униполярный (б) и четырехобмоточный (в).

Униполярный двигатель также имеет одну обмотку в каждой фазе, но от середины обмотки сделан отвод. Это позволяет изменять направление магнитного поля, создаваемого обмоткой, простым переключением половинок обмотки. При этом существенно упрощается схема драйвера. Драйвер должен иметь только 4 простых ключа. Таким образом, в униполярном двигателе используется другой способ изменения направления магнитного поля. Средние выводы обмоток могут быть объединены внутри двигателя, поэтому такой двигатель может иметь 5 или 6 выводов (рис. 8б). Иногда униполярные двигатели имеют раздельные 4 обмотки, по этой причине их ошибочно называют 4-х фазными двигателями. Каждая обмотка имеет отдельные выводы, поэтому всего выводов 8 (рис. 8в). При соответствующем соединении обмоток такой двигатель можно использовать как униполярный или как биполярный. Униполярный двигатель с двумя обмоткими и отводами тоже можно использовать в биполярном режиме, если отводы оставить неподключенными. В любом случае ток обмоток следует выбирать так, чтобы не превысить максимальной рассеиваемой мощности.

Биполярный или униполярный?

Если сравнивать между собой биполярный и униполярный двигатели, то биполярный имеет более высокую удельную мощность. При одних и тех же размерах биполярные двигатели обеспечивают больший момент.

Момент, создаваемый шаговым двигателем, пропорционален величине магнитного поля, создаваемого обмотками статора. Путь для повышения магнитного поля – это увеличение тока или числа витков обмоток. Естественным ограничением при повышении тока обмоток является опасность насыщения железного сердечника. Однако на практике это ограничение действует редко. Гораздо более существенным является ограничение по нагреву двигателя вследствии омических потерь в обмотках. Как раз этот факт и демонстрирует одно из преимуществ биполярных двигателей. В униполярном двигателе в каждый момент времени используется лишь половина обмоток. Другая половина просто занимает место в окне сердечника, что вынуждает делать обмотки проводом меньшего диаметра. В то же время в биполярном двигателе всегда работают все обмотки, т.е. их использование оптимально. В таком двигателе сечение отдельных обмоток вдвое больше, а омическое сопротивление – соответственно вдвое меньше. Это позволяет увеличить ток в корень из двух раз при тех же потерях, что дает выигрыш в моменте примерно 40%. Если же повышенного момента не требуется, униполярный двигатель позволяет уменьшить габариты или просто работать с меньшими потерями. На практике все же часто применяют униполярные двигатели, так как они требуют значительно более простых схем управления обмотками. Это важно, если драйверы выполнены на дискретных компонентах. В настоящее время существуют специализированные микросхемы драйверов для биполярных двигателей, с использованием которых драйвер получается не сложнее,

чем для униполярного двигателя. Например, это микросхемы L293E, L298N или L6202 фирмы SGS-Thomson, PBL3770, PBL3774 фирмы Ericsson, NJM3717, NJM3770, NJM3774 фирмы JRC, A3957 фирмы Allegro, LMD18T245 фирмы National Semiconductor.

Лекція № 18

Тема № …: Автоматизований електропривод з спеціальними двигунами

1. Мотор-колесо.
2. Ступичный асинхронный тяговый двигатель с внешним ротором для привода мотор-колеса.
3. Синхронный тяговый двигатель с возбуждением от постоянных магнитов
4. Бесконтактный двигатель постоянного тока

1. МОТОР-КОЛЕСО

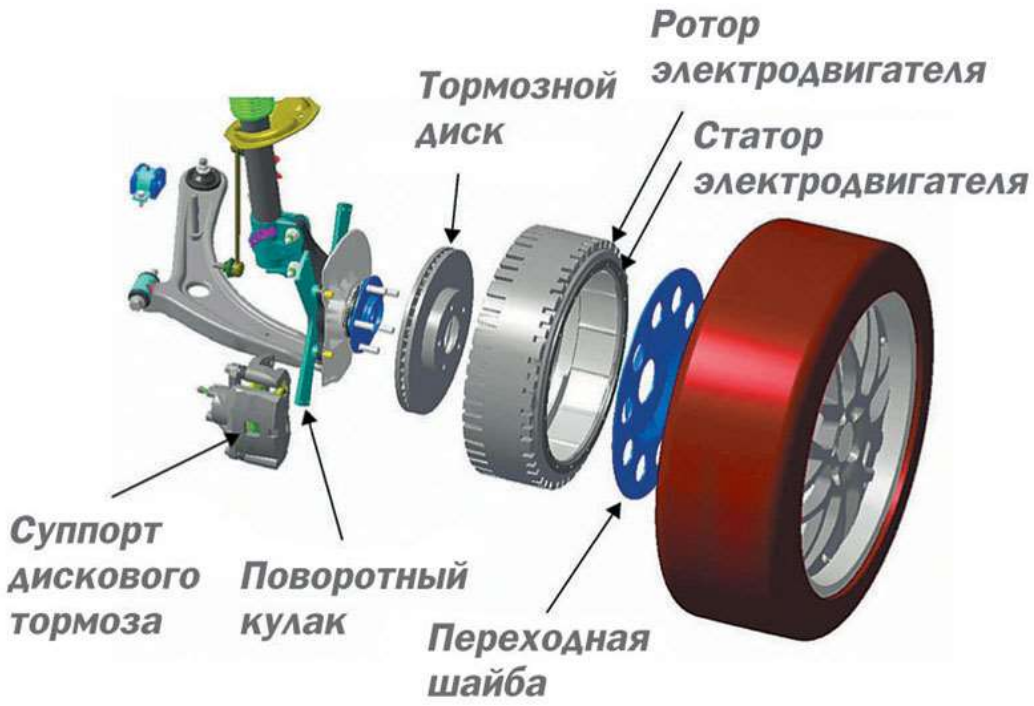


Рисунок 1 – Схема безредукторного двигателя для автотранспорта

Мотор-колесо представляет собой бесконтактный электродвигатель, в котором вращается не ротор, а статор. Статор является и ободом колеса.

Высокий КПД – характерный признак такого низкооборотного, но высокомоментного двигателя.

Отличительные особенности мотор-колеса:

- Безредукторный вентильный электродвигатель встроен в ступицу колеса;
- Высококоэрцитивные постоянные магниты на основе редких металлов;
- Высокий удельный момент;
- Применение композиционных материалов и сплавов.

Итак, преимущества мотор-колеса заключаются в следующем. Во-первых, отсутствие редукторного узла обусловливает высокую надежность и, следовательно, больший срок эксплуатации. Во-вторых, управляемая скорость вращения мотор-колеса, что достигается с помощью программируемого микропроцессора или персонального компьютера, управляющих скоростью и направлением. В-третьих повышенную плавность хода за счет того, что отсутствие редуктора позволяет вращаться двигателю без дискретного ша-

га с очень высокой точностью. Наконец, у данного электропривода за счет применения новых материалов практически абсолютно бесшумная работа.

2. СТУПИЧНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ТЯГОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ВНЕШНИМ РОТОРОМ ДЛЯ ПРИВОДА МОТОР-КОЛЕСА

Устройство данного трипа двигателя можно рассмотреть на примере, тягового привода, который используется в трамвая с низким уровнем пола, производимые немецкой компанией ABB Henschel (ныне входит в состав Bombardier).
Данный привод базируется на трехфазном асинхронном двигателе с внешним ротором и жидкостным охлаждением, который приводит во вращение одно колесо (рис. 2)

Рисунок 2 - Общий вид ступичного привода с тормозным диском

Концепция привода характеризуется тем, что частота вращения ротора тягового двигателя равна частоте вращения колеса. Благодаря этому отпадает необходимость в редукторе. Такая конструкция обеспечивает пониженный уровень шума и значительно меньшие эксплуатационные расходы по сравнению с классическим приводом.
Конструкция
Статор в ступичном асинхронном тяговом двигателе расположенный внутри. Статор состоит из следующих элементов (рис. 3):
неподвижного полого вала с трубой, образующей рубашку охлаждения (7);
шихтованного магнитопровода со стягивающими кольцами (6);
статорной обмотки с соединителями, токоподводами и штекерным разъемом для подключения (5, 8);
элементов уплотнения осевого подшипника.
Через полый вал двигателя с приваренной к нему трубой охлаждения жидкость подается к неподвижным частям тягового двигателя. Магнитопровод на винтах крепится к трубе охлаждения и с помощью двух колец фиксируется в продольном направлении. Обмотка статора с изоляцией класса 200 размещена в пазах магнитопровода и токоподводами соединена со штекерным разъемом.
Конструкцию ротора образуют:
труба корпуса с пазами для обмотки (1);
стержни и короткозамыкающие кольца обмотки (3);
вращающиеся подшипниковые щиты (4).
Труба корпуса, выполненная из улучшенной стали, имеет внутренние пазы, в которых расположены стержни, образующие короткозамкнутую обмотку.

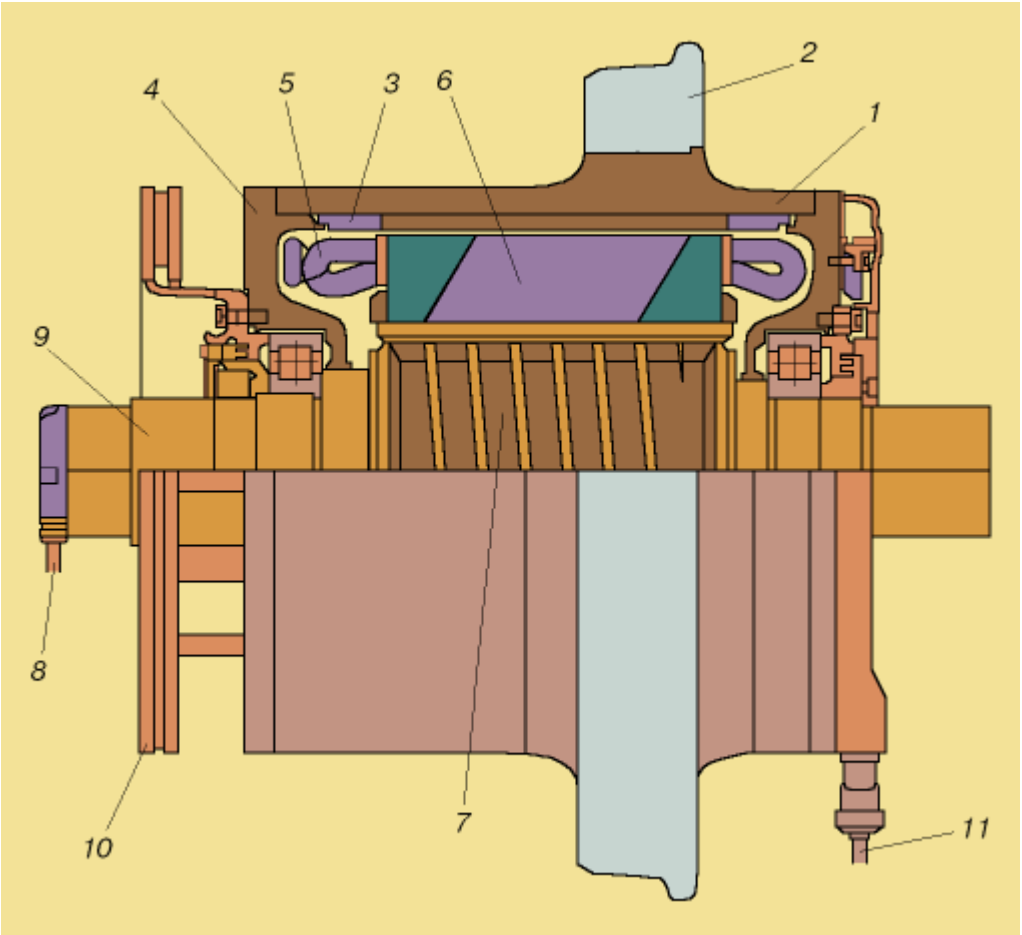


Рисунок 3 - Продольный разрез ступичного привода:

1 — труба корпуса внешнего ротора; 2 — колесный бандаж; 3 —стержни короткозамкнутой роторной обмотки; 4 — вращающийся подшипниковый щит; 5 — лобовая часть статорной обмотки; 6 — пакет железа статора; 7 — труба рубашки охлаждения; 8 — штекерный разъем подвода питания; 9 — полая ось; 10 — тормозной диск; 11 — подвод охлаждающей жидкости

Таблица 1 - Технические данные ступичного тягового привода

Наружный диаметр трубы корпуса, мм	440
Длина двигателя, мм	460
Число полюсов	8
Схема включения обмоток статора	звезда
Расход охлаждающей жидкости (вода с гликолем), л/мин	15
Номинальная мощность двигателя, кВт	35
Частота вращения номинального режима, об/мин	240
Напряжение на двигателе, В	380
Номинальный ток двигателя, А	100

Общая масса каждого приводного блока мотор — колесо составляет 510 кг (без бандажа). Активные элементы двигателя (магнитопровод, обмотки, электрические соедините-

ли и т. д.) имеют массу лишь 208 кг. Остальное приходится на пассивные элементы, которые большей частью используются и на немоторных колесах.

Основные характеристики
Ступичный тяговый привод специально разработан для подвижного состава, используемого на линиях с номинальным напряжением в контактной сети 600 или 750 В постоянного тока (рис. 4). Минимальное допустимое напряжение составляет 420 В, максимальное 900 В. При этом магнитный поток в двигателе устанавливается независимо от колебаний напряжения в контактной сети в той степени, в которой это допускает система регулирования напряжения преобразователя.

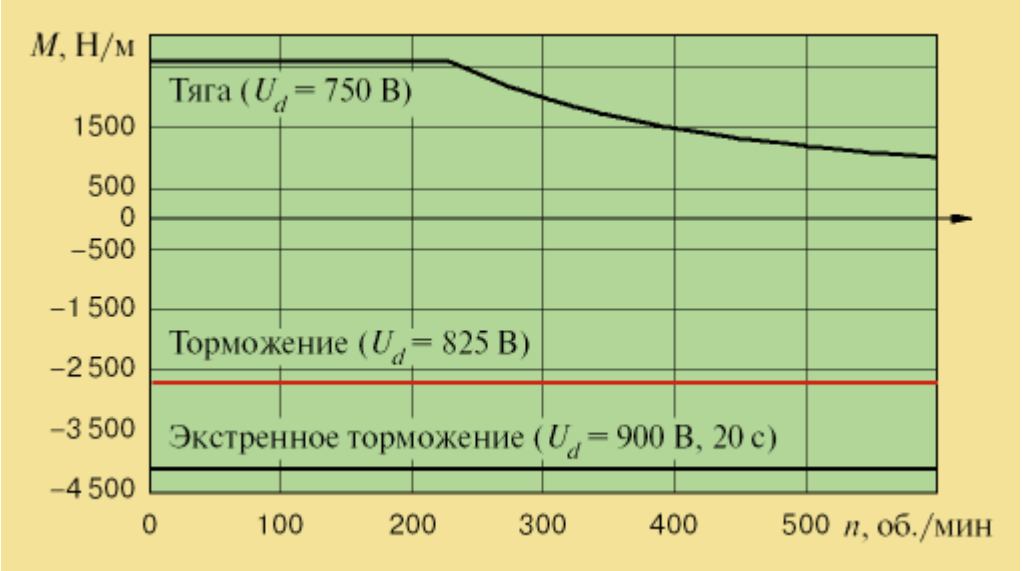


Рисунок 4 - Характеристики двигателя при напряжении сети 750 В
M — крутящий момент; n — частота вращения; Ud — напряжение в контактной сети

На рис. 4 приведены кривые зависимости крутящего момента двигателя от частоты вращения для режимов тяги, служебного и экстренного торможения.

3. СИНХРОННЫЙ ТЯГОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Тяговые двигатели, возбуждаемые постоянными магнитами и имеющие большое число пар полюсов, позволяют реализовать безредукторный электрический тяговый привод. В этом случае достигается значительное повышение КПД и снижение массы по сравнению с редукторным приводом.
Новые магнитные материалы и транзисторы IGBT позволили приступить к работам по созданию мощного тягового двигателя, возбуждаемого постоянными магнитами. Первые теоретические исследования показали значительные преимущества такого тягового привода по сравнению с широко применяемым трехфазным асинхронным:
двигатель на постоянных магнитах может иметь намного большее число пар полюсов, чем трехфазный асинхронный. Этим обеспечивается настолько высокий вращающий момент, что становится возможным использование такого двигателя без редуктора, т. е. реализуется безредукторный тяговый привод;

поскольку двигатель уже имеет магнитное поле возбуждения, а редуктор отсутствует, тяговый тракт обладает повышенным КПД. В свою очередь, транзисторы IGBT обеспечивают дальнейшее повышение общего КПД всей системы тягового привода;
двигатель на постоянных магнитах, обеспечивающий повышенные мощность и вращающий момент, имеет меньшие массу и объем, чем асинхронный двигатель с редуктором;
мотор с ротором, возбуждаемым постоянными магнитами, может без преобразователя передавать энергию торможения на тормозные резисторы.
Рассмотренные преимущества обеспечивают следующее:
малая масса и высокий КПД позволяют экономить энергию, затрачиваемую на тягу, и улучшать энерго- и экобаланс тягового подвижного состава;
малая неподрессоренная масса снижает нагрузку на верхнее строение пути;
распределенный тяговый привод позволяет реализовать более простую концепцию электротранспорта. При этом уменьшается масса тягового привода и одновременно повышается его установленная мощность. Это позволяет создавать подвижной состав с пониженным уровнем пола, в котором осевые нагрузки могут распределяться более равномерно;
исключаются все недостатки, связанные с редукторным тяговым приводом, а именно использование дополнительного пространства, износ, загрязняющие окружающую среду потери масла, пожароопасность. Последнее обстоятельство имеет особое значение, если охлаждение двигателя на постоянных магнитах реализуется без использования масла;
возможно простое решение системы электрического тормоза с задаваемым замедлением, поскольку двигатель в генераторном режиме надежно переключается на тормозные резисторы.
Машины на постоянных магнитах могут также различаться типом ротора:
в машине с активным ротором все магниты расположены на роторе, а обмотки — на статоре;
в машине с пассивным ротором все магниты и обмотки расположены на статоре.
Данный синхронный тяговый двигатель разработан в виде двух симметричных секций мощностью по 250 кВт с полым ротором. Эти секции состыкованы на оси колесной (рис. 5). Двигатель представляет собой машину с внешним ротором, в которой возбуждение осуществляется мощными постоянными магнитами, а обмотки охлаждаются маслом.
Внешние роторы секций имеют исполнение, обеспечивающее оптимальный вращающий момент, статоры расположены внутри. Каждый ротор имеет корпус из пластмассы, армированной стекловолокном, в нишах которого магниты закреплены на клее таким образом, что образуют кольцевой магнитный поток. Всего по окружности ротора размещено 56 высокоэнергетичных магнитов из сплава FeNdB. Дополнительно магниты закреплены бандажами, изготовленными из композитов, содержащих углеродное волокно. Благодаря этому в области бандажей не образуются вихревые токи.

Особенности двигателей с возбуждением от постоянных магнитов
По сравнению с трехфазными асинхронными тяговыми двигателями машины, возбуждаемые постоянными магнитами, имеют ряд принципиальных особенностей.
Вращающееся поле статора в такой машине должно быть точно синхронизировано с частотой вращения ротора и зависит от его положения. В связи с этим для каждой машины необходимы система, с высокой точностью определяющая положение ротора, и отдельный преобразователь.

В машине на постоянных магнитах поле возбуждения отключить невозможно, поэтому внутрь нее всегда могут попадать магнитные загрязнители, например металлическая пыль от тормозных колодок. В связи с этим одним из обязательных условий применения таких машин является их герметичное исполнение.
В результате старения материала поле постоянных магнитов может ослабевать, в результате чего уменьшается вращающий момент, развиваемый двигателем. В связи с этим следует выбирать такой магнитный материал, который в течение срока службы машины остается стабильным.

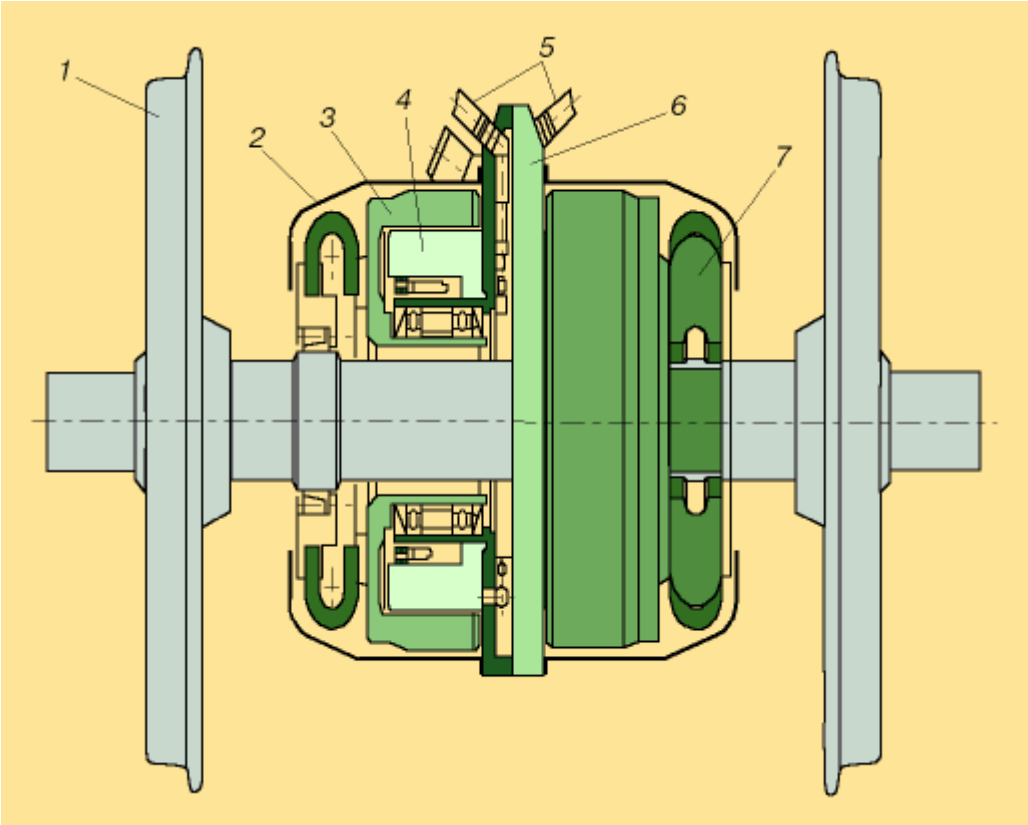


Рисунок 5. Синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов, установленныйна колесной паре:

1 — колесная пара; 2 — кожух двигателя; 3 — ротор с постоянными магнитами; 4 — статор с обмотками; 5 — элементы крепления двигателя к раме тележки; 6 — несущий диск; 7 — муфта

Поскольку большое число пар полюсов обусловливает достаточно высокую основную частоту тока катушек, кривая которого к тому же имеет прямоугольную форму, возникает большое число гармоник широкого спектра частот. Взаимодействуя с собственными частотами элементов машины, эти гармоники могут стать причиной возникновения значительного шума. Кроме того, обусловленные ими электромагнитные воздействия не должны превышать допусков, установленных на железных дорогах.
Машина с активным ротором, т. е. несущим постоянные магниты, имеет свои дополнительные особенности. С одной стороны, такой двигатель способен переходить в режим электрического реостатного торможения при отключенном тяговом преобразователе, что позволяет причислить его к электрическим машинам, обеспечивающим надежное торможение. С другой стороны, пропорциональность частоты вращения постоянных магнитов ротора индуцируемой электромагнитной силе означает, что при снижении уровня

напряжения промежуточного звена до определенной величины задаваемые значения частоты вращения и соответственно скорости движения поезда не могут быть достигнуты. В связи с этим режим напряжения промежуточного звена должен надежно контролироваться, а в процессе регулирования двигателя по возможности чаше должны использоваться возможности ослабления поля.

При отключенном тяговом преобразователе активный ротор возбуждает в железе статора вихревые токи, величина которых зависит от частоты вращения двигателя, работающего в режиме холостого хода, т. е. когда поезд движется на выбеге. Возникающие при этом тепловые потери должны отводиться системой охлаждения во избежание термических повреждений двигателя.

При коротком замыкании в обмотках статора также возможны термические повреждения, так как даже при отключенном тяговом преобразователе подпитка короткозамкнутой обмотки током продолжается в результате вращения магнитов ротора. Таким образом, для машины с активным ротором необходим надежный отвод тепловых потерь в режиме короткого замыкания.

4. БЕСКОНТАКТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

С целью улучшения свойств двигателей постоянного тока были созданы двигатели с бесконтактным коммутатором, называемые бесконтактными двигателями постоянного тока (БДПТ). Отличие БДПТ от коллекторных двигателей традиционной конструкции состоит в том, что у них щеточно-коллекторный узел заменен полупроводниковым коммутатором (инвертором), управляемым сигналами, поступающими с бесконтактного датчика положения ротора. Рабочая обмотка двигателя — обмотка якоря — расположена на сердечнике статора, а постоянный магнит – на роторе.

Вал двигателя *Д* (рис. 6,а*)* механически соединен с датчиком положения ротора *ДПР,* сигнал от которого поступает в коммутатор *БК*. Подключение секций обмотки якоря к источнику постоянного тока происходит через элементы блока коммутатора *БК*- Назначение *ДПР* — выдавать управляющий сигнал в блок коммутатора в соответствии с положением полюсов постоянного магнита относительно секций обмотки якоря.

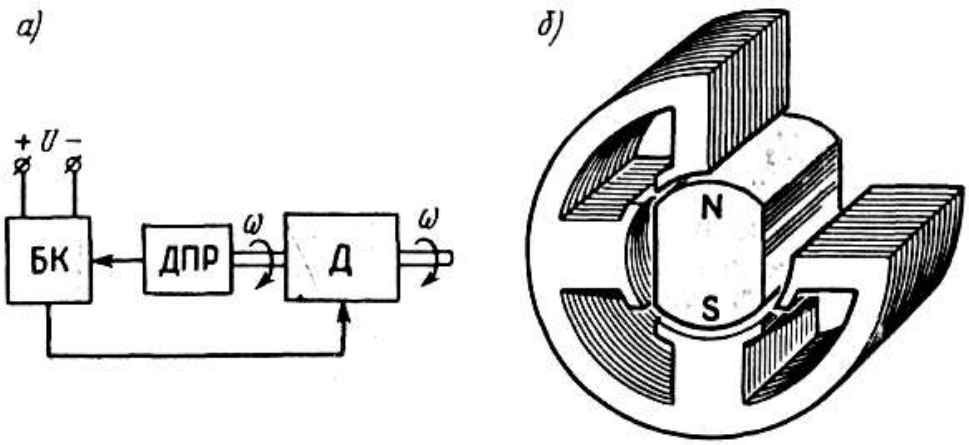


Рисунок 6 – Структурная схема (а) и магнитная система (б) четырехфазного бесконтактного двигателя постоянного тока

В качестве датчиков положения ротора применяют различные чувствительные бесконтактные элементы с минимальными размерами и потребляемой мощностью и большой кратностью минимального и максимального сигналов, чтобы не вызывать нарушений в работе блока коммутатора. Чувствительные элементы *ДПР* должны надежно работать при внешних воздействиях (температура, влажность, вибрации и т. п.), на которые рассчитан двигатель. Такие свойства присущи ряду чувствительных элементов (датчиков): индуктивных, трансформаторных, магнитодиодов и т.п. Наиболее целесообразно использовать датчики ЭДС Холла (рис. 7), представляющие собой тонкую полупроводниковую пластину с нанесенными на ней контактными площадками, к которым припаяны выводы *1—2*, подключенные к источнику напряжения U_1 и выводы *3—4*, с которых снимают выходной сигнал U_2. Если в цепи *1—2* проходит ток *I*, а датчик находится в магнитном поле, вектор индукции *B* которого перпендикулярен плоскости пластины датчика, то в датчике наводится ЭДС и на выводах *3—4* появляется напряжение U_2. Значение ЭДС зависит от тока *I* и магнитной индукции *B*, а полярность — от направления тока *I* в цепи *1—2* и направления вектора магнитной индукции *B*.

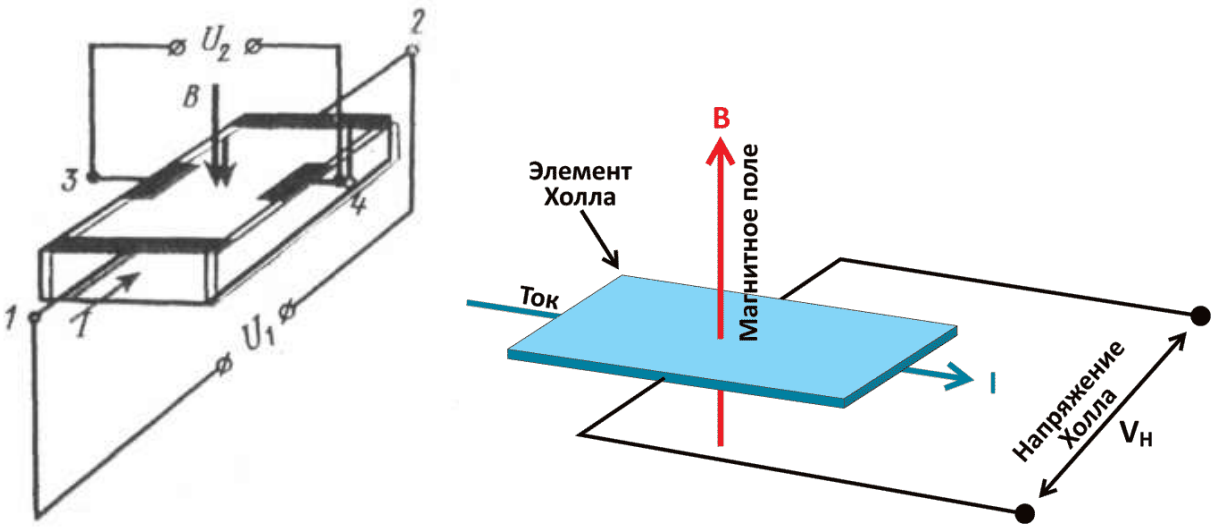


Рисунок 7 – Датчик ЭДС Холла

Эффект Холла – ***это возникновение электрического поля в проводнике или полупроводнике с током при помещении его в магнитное поле.***

Эффект Холла – следствие влияния силы Лоренца на движение носителей тока. В магнитном поле $\vec{B}$ при протекании через проводник тока с плотностью $\vec{j}$ устанавливается электрическое поле с напряженностью:

$$\vec{E} = R\left[\vec{B}, \vec{j}\right], \qquad (21)$$

где *R* – **постоянная Холла**.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода. Изд. 5-е доп. и переработ. / Чиликин М. Г. – М. : Энергия, 1971. – 432 с.
2. Ключев В. И. Теория электропривода / Ключев В. И. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.
3. Теорія електроприводу. Методичні вказівки до курсового проекту «Розрахунок робочих параметрів і характеристик режимів пуску і гальмування електропривода з асинхронним двигуном» для студентів спеціальності 7.092206 і 7.092501. / А.В. Гнатов, В. І. Калмиков – Х.: ХНАДУ, 2008. – 31 с.
4. Ильинский Н. Ф. Общин курс электропривода: Учебник для вузов / Н. Ф. Ильинский, В. Ф. Козаченко – М.: Энергоатомпздяг, 1992. – 532 с.
5. Миллер Е. В. Основы теории электропривода / Миллер Е. В. – М. : Высшая школа, 1968. – 408 с.
6. Чиликин М. Г. Теория автоматизированного электропривода: Учеб. Пособие для вузов / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер – М. : Энергия, 1979. – 616 с.
7. Специальные электрические машины / [А. И. Бертинов, Д. А. Бут, С. Р. Мизюрин и др.] – М., 1982. – 320 с.
8. Кацман М. М. Электрические машины автоматических устройств. Учеб. для учащихся электротехн. спец. Техникумов / Кацман М. М. – М. : Форум-Инфра-М, 2002. – 264 с.
9. Хрущев В. В. Электрические микромашины автоматических устройств / Хрущев В. В. – Л. : Энергия, 1978. – 384 с.
10. Лопухина Е. М. Асинхронные микромашины с полым ротором. Теория, основы расчёта и испытания / Е. М. Лопухина, Г. С. Сомихина – М. : Энергия, 1967. – 488 с.
11. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления / Кенио Т. – 1987. – 200 с.
12. Емельянов А. В., Шаговые двигатели: учеб. Пособие / А. В. Емельянов, А. Н. Шилин / ВолгГТУ. – Волгоград, 2005. – 48 с.
13. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. / Е. П. Попов – М. : Наука, 1989. – 452 с.
14. Автоматизированный электропривод / [под ред. Н. Ф. Ильинского, М. Г. Юньков а] – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 544 с.
15. Башарин А. В. Примеры расчета автоматизированного электропривода / А. В. Башарин, Ф. Н. Голубев, В. Г. Кепперман – Л. : Энергия, 1971. – 440 с.
16. Сиротин А. А. Автоматическое управление электроприводами / Сиротин А. А. – М. : Энергия, 1969. – 560 с.
17. Системы управления электроприводами: Учеб. Пособие / [А. П. Голубь, Б. И. Кузнецов, И. А. Попрышко]. – К. : УМК ВО, 1992. – 376 с.
18. Москаленко В. В. Электрический привод / Москаленко В. В. – М. : Высшая школа, 1991. – 430 с.
19. Основы автоматизированного электропривода / [М. Г. Чиликин, М. М. Соколов,В. М. Терехов др.]. – М. : Энергия, 1974. – 568 с.
20. Иванченко А. И. Электросиловое оборудование. Руководство к лабораторным работам. Ч. 2 / А. И. Иванченко, Л. Н. Кобылкин, А. М. Шингели – Х. : ХВВКУ, 1975. – 60 с.
21. Системы управления электроснабжением и электроприводом / [Б. Ф. Самойле-

нко, Б. Т. Кононов, Ю. А. Скворцов и др.]. – МО СССР, 1990. – 415 с.

22. Трехов В.И. Элементы автоматизированного электропривода / Трехов В. И. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.

23. Башарин А. В. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский – Л. : Энергоиздат, 1982. – 392 с.

24. Дьяконов В. И. Расчет электроприводов с линейными асинхронными двигателями / Дьяконов В. И. – Иваново, 1973. – 141 с.

25. Иванов А. А. Справочник по электротехнике. Изд. 5-е, перераб. и доп. / Иванов А. А. – К. : Вища школа, 1984. – 304 с.

26. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / [под ред. В. И. Круповича] – М. : Энергоиздат, 1982. – 364 с.

27. Справочник по автоматизированному электроприводу / [под ред. В. А. Елисеева, А. В. Шинянского]. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

28. Теорія електропривода / [під ред. М. Г. Поповича]. – Київ: Вища школа, 1993 – 493 с.

29. Сен П. Тиристорные электроприводы постоянного тока / Сен П. – Пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.

30. Кацман М. М. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу / Кацман М. М. – М. : Высшая школа, 1983. – 335 с.

31. Кацман М. М. Электрические машины автоматических устройств / М. М. Кацман, Ф. М. Юферов – М. : Высшая школа, 1979. – 261 с.

32. Электропривод [Электронный ресурс] – 2015. – http://electroprivod.ru/linear_public.htm.

33. Гибридный автомобиль [Электронный ресурс] – 2015. – http://elektrocar.narod.ru/articles/gibrid01.html.

34. Ступичный асинхронный тяговый двигатель с внешним ротором [Электронный ресурс] – 2015. – http://mydocx.ru/6-34503.html.

35. Вентильний електродвигун [Электронный ресурс] – 2015. – https://uk.wikipedia.org/wiki/Вентильний_електродвигун.