

Тема № 1:

РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

1. Регулирование скорости двигателей. Основные показатели регулирования.
2. Регулирование скорости ДПТ независимого возбуждения введением добавочного сопротивления в цепь якоря.
 - 2.1 *Потери мощности при регулировании скорости ДПТ введением добавочного сопротивления R_d в цепь якоря.*
 - 2.2 *Определение величины добавочного сопротивления в цепь якоря при регулировании скорости.*
3. Регулирование скорости ДПТ независимого возбуждения изменением магнитного потока.
4. Регулирование скорости ДПТ независимого возбуждения изменением величины подводимого напряжения.
5. Регулирование скорости ДПТ в системе Г-Д.

1. Регулирование скорости двигателей. Основные показатели регулирования.

Регулированием скорости электропривода называют принудительное ее изменение вне зависимости от нагрузки или поддержание постоянного ее значения при изменении нагрузки.

Понятие регулирования скорости не следует смешивать с естественным изменением скорости в соответствии с механической характеристикой электродвигателя при изменении нагрузки.

Регулирование скорости которое осуществляется дополнительным воздействием на приводной двигатель или систему передач, может быть эпизодическим (получение желаемого уровня скорости) и непрерывным (автоматическое регулирование скорости по заданному закону, независимо от возмущающих воздействий).

Производительность и качество продукции во многих технологических операциях зависят от скоростного режима, причем оптимальное значение скорости в процессе работы может меняться, диктуя изменение скорости привода.

Так, например, при повышении нагрузки на главный электродвигатель круглопильного станка (увеличение сечения обрабатываемого материала, более твердые породы дерева) должна быть изменена скорость подачи материала, а следовательно, и скорость электродвигателя механизма подачи. В металлорежущих станках скорость регулируют в зависимости от рода обрабатываемого материала, качества резца, глубины резания и подачи. На ремонтных заводах и в мастерских используются стенды для обкатки и испытания двигателей внутреннего сгорания, обеспечивающие плавное регулирование скорости в довольно широких пределах.

Изменение скорости может осуществляться механическими и электрическими способами. В настоящее время все чаще применяется электрическое регулирование, имеющее ряд преимуществ по сравнению с механическим. При электрическом регулировании упрощается кинематическая схема рабочей машины и улучшаются ее технико-экономические показатели.

Электрическое регулирования предполагают следующие методы:

В основу параметрического метода положено изменение параметров двигателей или цепей питания (числа витков обмоток, пар полюсов, значения сопротивления цепей обмоток).

В основу методов, связанных с питанием от индивидуального регулируемого источника энергии – предусмотрено применение источников питания, при помощи которых можно изменять частоту и напряжение в необходимых пределах.

Выбор того или иного способа регулирования скорости осуществляется на основании технико-экономического сравнения возможных вариантов.

Основные критерии, которыми руководствуются при выборе способа регулирования скорости, таковы:

1. Пределы регулирования определяются отношением значений максимальной и минимальной скоростей вращения при номинальной нагрузке двигателя, т.е. Ω_{\max} ; Ω_{\min} .

Современные системы регулирования скорости электроприводов позволяют получить довольно широкие диапазоны изменения скорости (200 : 1 и более). Производственные машины требуют различных пределов регулирования скорости (например, токарные станки от 20:1 до 120:1, вертикально-сверлильные - от 2 : 1 до 12:1).

2. Плавность регулирования характеризуется количеством ступеней скорости внутри диапазона регулирования.

Коэффициент плавности представляет собой отношение скоростей соседних регулировочных характеристик:

$$k_{\text{пл}} = \frac{\omega_i}{\omega_{i-1}} \quad (\text{УП.1.})$$

где ω_i и ω_{i-1} - скорости соседних регулировочных характеристик.

Чем ближе значение этого коэффициента к единице, тем выше плавность регулирования скорости.

3. Стабильность работы на заданной скорости определяется жесткостью регулировочных характеристик. Чем больше жесткость, тем меньше отклонения от заданной скорости при изменении нагрузки.

4. Направление регулирования характеризует изменение скорости в сторону увеличения или уменьшения относительно основной, соответствующей естественной характеристике.

5. Экономичность регулирования оценивается по величине капитальных затрат и эксплуатационных расходов.

Основным показателем оценки эксплуатационных расходов служит величина потерь мощности.

Возникающие при работе на регулировочных характеристиках потери ΔP_p определяются средневзвешенным К.П.Д. привода за цикл, состоящий из m ступеней регулирования скорости:

$$\eta_p = \frac{\sum_1^m P_e t}{\sum_1^m (P_e + \Delta P_p) t} \quad (\text{УП.1.})$$

где t - время работы на ступени m ; P_e - мощность на валу двигателя.

Средневзвешенный к. п. д. за регулировочный цикл, подсчитанный для различных способов регулирования скорости, позволяет определить, какой из них наиболее экономичен.

6. Допустимая нагрузка двигателя ограничивается его нагревом. Нагрев, в свою очередь, зависит от потерь энергии в двигателе, которые определяются главным образом значением тока, потребляемого двигателем.

Двигатель будет полностью использован в тепловом отношении, если при работе на всех регулировочных характеристиках величина его тока будет номинальной. При кратковременной работе на различных регулировочных характеристиках и токе, отличном от номинального, необходимо, чтобы эквивалентная величина тока за регулировочный цикл была как можно ближе к номинальной, но не превосходила ее. При этом предполагается, что условия охлаждения неизменны на больших и малых скоростях вращения. У самовентилирующихся двигателей при ухудшении охлаждения на малых скоростях допустимый ток принимается меньшим номинального.

Вполне естественно, что допустимые значения момента и мощности при работе на регулировочных характеристиках определяются номинальным или при учете изменения условий охлаждения допустимым током. Значения допустимых мощности и момента у ДПТ могут быть отличными от номинальных, так как момент зависит не только от тока, но и магнитного потока, а мощность - от тока и напряжения, приложенного к якору.

Для асинхронного двигателя допустимая мощность зависит от напряжения, полного тока и коэффициента мощности $\cos\varphi$, а допустимый момент - от магнитного потока.

2. Регулирование скорости ДПТ независимого возбуждения введением добавочного сопротивления в цепь якоря.

Уравнение скоростной характеристики двигателей постоянного тока, решенное относительно скорости,

$$I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{я}}}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}} - \frac{c\Phi}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}} \omega \quad \omega = \frac{U_{\text{я}}}{c\Phi} - \frac{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}}{c\Phi} I_{\text{я}} \quad (\text{УП.1.})$$

показывает, что регулирование скорости может осуществляться как за счет изменения сопротивления цепи якоря или магнитного потока, так и за счет изменения напряжения $U_{\text{я}}$.

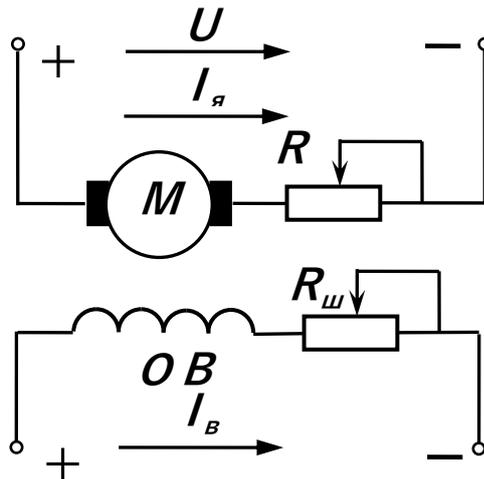


Рис 1 (УП.2.)

При введении сопротивления в цепь якоря двигателя параллельного возбуждения образуются искусственные характеристики, имеющие больший наклон. Таким образом, одному и тому же моменту соответствуют различные скорости. При этом изменение скорости происходит только вниз от основной (рис. 2).

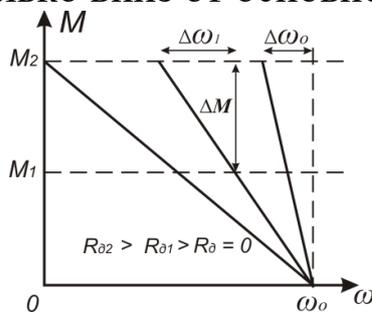


Рис. 2. Мех. хар-ки ДПТ НВ при регулировании скорости изменением сопротивления цепи якоря.

Регулировочные характеристики обладают меньшей жесткостью, чем естественная, поэтому работа на регулировочных характеристиках менее стабильна. Изменение нагрузки будет сопровождаться значительными колебаниями скорости. При изменении момента на величину ΔM

изменение скорости $\Delta\omega$ будет большим на искусственных характеристиках ($\Delta\omega_4 > \Delta\omega_0$).

2.1 Потери мощности при регулировании скорости ДПТ введением добавочного сопротивления R_d в цепь якоря.

В силу значительных добавочных потерь $I_{\text{я}}^2 r_{\text{доб}}$ этот способ следует признать неэкономичным. Регулировочное сопротивление в отличие от пускового должно быть рассчитано на длительную работу, а это увеличивает его габариты и стоимость.

Уменьшение жесткости регулировочных характеристик и увеличение потерь при работе на малых скоростях ограничивает пределы регулирования до 2,5:1. Естественная и регулировочные характеристики проходят через общую точку скорости идеального холостого хода двигателя. При малых нагрузках перепад скорости между соседними характеристиками незначителен.

Это свидетельствует о неэффективности регулирования скорости при таких нагрузках. Следует отметить, что регулирование скорости изменением сопротивления цепи якоря происходит с постоянным допустимым моментом, так как магнитный поток остается постоянным. Допустимая мощность уменьшается пропорционально снижению скорости.

$$\eta_i = \frac{U_{\text{я}} I_{\text{я}} - I_{\text{я}}^2 (r_{\text{я}} + R_d)}{U_{\text{я}} I_{\text{я}}} \quad (\text{УП.4.})$$

2.2. Определение величины добавочного сопротивления в цепь якоря при регулировании скорости.

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{c\Phi} - \frac{r_{\text{я}} + R_d}{c\Phi} I_{\text{я}} \quad (\text{УП.4.})$$

$$\omega_{\text{H}} = \frac{\pi n_{\text{H}}}{30} \quad c\Phi = \frac{U_{\text{H}} - I_{\text{H}} r_{\text{я}}}{\omega_{\text{H}}} \quad r_{\text{я}} = 0,5 \frac{U_{\text{H.я}}}{I_{\text{H.я}}} (1 - \eta_{\text{H}})$$

$$R_d = \frac{U_{\text{я}} - \omega c\Phi}{I_{\text{я}}} - r_{\text{я}} \quad (\text{УП.4.})$$

3. Регулирование скорости ДПТ независимого возбуждения изменением магнитного потока.

Регулирование скорости такого двигателя изменением потока - один из наиболее простых и экономичных способов. В этом случае скорость регулируют плавно, в сторону увеличения. Регулировочные характеристики при уменьшении потока становятся мягче.

Изменение жесткости механических характеристик может быть объяснено аналитически в результате анализа уравнения механической характеристики (Рис 3. УП.5.)

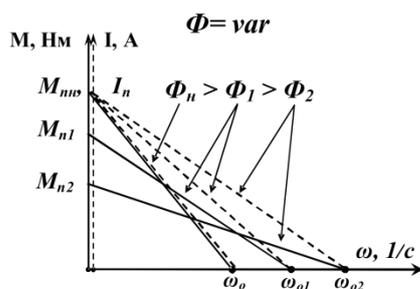


Рис. 3. Мех. и скор. хар-ки ДПТ НВ при регулировании скорости изменением магнитного потока.

С уменьшением потока угол наклона уменьшается, а вместе с ним и жесткость характеристики. Работа на регулировочных характеристиках менее стабильна, чем на естественной характеристике.

При изменении момента нагрузки скорость двигателя значительно изменяется. При изменении магнитного потока, если считать это изменение мгновенным, двигатель переходит с одной характеристики на другую, которая соответствует новому значению потока, и затем разгоняется за счет избыточного момента до скорости, соответствующей равенству моментов двигателя и рабочей машины. Следует отметить, что момент двигателя возрастает с уменьшением потока в результате увеличения тока якоря, однако при больших нагрузках и недостаточно жестких характеристиках может наступить обратное регулирование. В этом случае рост тока якоря не сможет возместить уменьшение потока, что приведет к снижению момента, а следовательно, и скорости.

Пределы регулирования скорости при изменении потока ограничиваются механической прочностью машины, условиями коммутации при увеличении скорости и снижением стабильности работы на регулировочных характеристиках. Допустимый предел регулирования скорости 3:1.

Постоянные потери при данном способе регулирования меняются мало. Потери в обмотке возбуждения уменьшаются, механические по-

тери растут, потери в стали меняются незначительно.

Потери при регулировании скорости изменением потока могут быть определены по формуле

$$\Delta P_p = \Delta P_p + \Delta P_{vн} i_{я}^2 \quad (\text{УП.5.})$$

где ΔP_p - потери при работе двигателей на регулировочной хар-ке;

ΔP_c - постоянные потери;

$\Delta P_{vн}$ - переменные потери при номинальной нагрузке;

$i_{я}$ - относительная величина тока якоря.

Хотя дополнительные потери отсутствуют и способ экономичен, однако следует помнить, что на малых скоростях, соответствующих естественной хар-ке, двигатель может быть настолько недогружен, что коэффициент полезного действия будет меньше, чем при регулировании скорости изменением активного сопротивления в цепи якоря.

4. Регулирование скорости ДПТ независимого возбуждения изменением величины подводимого напряжения.

Данный способ регулирования применяют, когда к приводу предъявляются повышенные требования в отношении стабильности, плавности и диапазона регулирования, необходимости сохранения величины допустимого момента. В этом случае наклон механических характеристик не меняется, регулировочные характеристики идут параллельно естественной. Характеристики сохраняют свою жесткость, обеспечивая стабильную работу при любой заданной скорости. Диапазон регулирования достигает значительной величины (8 - 10) : 1.

Регулирование скорости с использованием индивидуального источника питания *очень плавное* и осуществляется вниз от основной скорости.

Регулирование изменением напряжения производится при переменной мощности и постоянном допустимом моменте.

Способ достаточно экономичен (в отношении потерь двигателя), но велики первоначальные затраты и эксплуатационные расходы, связанные с применением, как правило, индивидуального источника питания.

При регулировании скорости изменением напряжения величина постоянных потерь будет изменяться так же, как и при регулировании скорости изменением сопротивления в цепи якоря; переменные потери не будут зависеть от скорости, их величина определится нагрузочным моментом.

5. Регулирование скорости ДПТ в системе Г-Д.

Для плавного регулирования скорости в широком диапазоне (10:1 и более), а также для обеспечения частых пусков и реверсирования двигателя применяется система генератор - двигатель (система Г - Д).

Система Г-Д состоит из асинхронного *M2* или синхронного двигателя, генератора *G1* и приводного двигателя *M1* постоянного тока, вращающего рабочую машину *PM* (рис. 4). Обмотки возбуждения машин постоянного тока получают питание от постоянного источника или машины возбудителя.

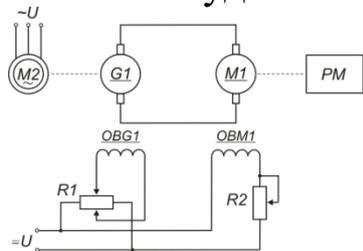


Рис. 4 Схема системы Г-Д

Приводной двигатель *M1* можно пустить в ход, подав полное напряжение на обмотку *OBG1* возбуждения генератора. Большая индуктивность этой обмотки предопределяет то обстоятельство, что, несмотря на мгновенную подачу полного напряжения, ток возбуждения генератора до номинального значения будет нарастать медленно, по экспоненциальному закону. По такому же закону будет изменяться Э.Д.С. генератора и напряжение, приложенное к якору двигателя.

Пуск двигателя *Д* происходит при пониженном напряжении на его якоре, поэтому в цепи якоре́й двигателя и генератора не устанавливают пусковые сопротивления.

При снятии напряжения с обмотки *OBG1* (благодаря ее индуктивности и наличию параллельного сопротивления *R1*) ток возбуждения генератора уменьшается медленно. При этом понижается Э.Д.С. генератора и напряжение, приложенное к двигателю. Так как двигатель продолжает вращаться за счет запаса кинетической энергии системы, то наступит такой момент, когда Э.Д.С. двигателя окажется больше Э.Д.С. генератора и ток в цепи якоре́й машин изменит направление. Тогда двигатель станет работать в режиме генератора, а генератор - в режиме двигателя. Поскольку у генератора, теперь работающего двигателем, ток возбуждения продолжает падать, то скорость его вращения увеличится. Это приведет к тому, что повысится скорость асинхронного двигателя и он перейдет в режим генераторного торможения. Следовательно, торможение рабочей машины будет происходить с рекуперацией энергии в сеть.

Для изменения направления вращения приводного двигателя *M1* достаточно изменить полярность тока в обмотке *OBG1* возбуждения генератора, т. е., сместив бегунки резистора на противоположные стороны, что вызовет протекание двух описанных выше процессов: торможение и разбег двигателя в обратную сторону.

Регулирование скорости двигателя осуществляется за счет плавного изменения напряжения. Увеличению диапазона регулирования при этом препятствует наличие остаточного намагничивания и неустойчивая работа двигателя при низком напряжении генератора. Это объясняется влиянием реакции якоря генератора, которое проявляется тем больше, чем меньше поток возбуждения, и нестабильностью падения напряжения в якорной цепи (двигателя и генератора) при изменении нагрузки.

Применение комбинированного регулирования скорости двигателя изменением напряжения и магнитного потока позволяет расширить диапазон регулирования: (20 - 30) : 1.

Жесткость механических характеристик двигателя постоянного тока в системе генератор - двигатель несколько меньше, чем при питании от сети постоянного тока, за счет падения напряжения в цепи якоря и снижения Э.Д.С. генератора, вызванного снижением скорости, асинхронного двигателя под нагрузкой.

Регулировочные характеристики при изменении напряжения проходят параллельно естественной характеристике, а при уменьшении магнитного потока - с соответственно возрастающим углом наклона к оси ординат (рис. 5).

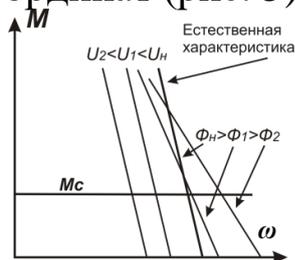


Рис.5 Регулировочные хар-ки ДПТ НВ в системе Г - Д.

Регулирование изменением напряжения происходит при сохранении допустимого момента, а изменением магнитного потока - при постоянстве допустимой мощности.

Скорость двигателя в системе Г-Д может быть определена:

$$\omega_D = \frac{E_G}{c_G \Phi_D} - \frac{r_{я.г.} + r_{я.д.}}{c_G \Phi_D} I_{я} \quad (\text{УП.8.})$$

Уравнение механической характеристики:

$$M_D = \frac{E_G c_D \Phi_D}{r_{я.г.} + r_{я.д.}} - \frac{c_G c_D \Phi_D^2 \omega_D}{r_{я.г.} + r_{я.д.}} \quad (\text{УП.8.})$$

В системе генератор - двигатель исключены мощные пусковые и регулировочные реостаты, а следовательно, и потери в них. Наличие рекуперативного режима увеличивает экономичность системы.

Наряду с достоинствами система Г-Д обладает и недостатками: большие первоначальные затраты, высокая установленная мощность, низкий К.П.Д. (за счет потерь в трех машинах соизмеримой мощности, не считая возбуждателя), неустойчивая работа в зоне малых скоростей и довольно чувствительная электромагнитная инерция системы. Однако последний недостаток может быть устранен в результате форсировки тока возбуждения и применения усилителей.