

## **Тема № 2**

### **РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

---

1. Регулирование скорости асинхронных двигателей. Способы регулирования.
2. Реостатное и импульсное регулирование скорости асинхронного двигателя. Расчет потерь регулирования.
3. Регулирование скорости АД изменением питающего напряжения.
4. Регулирование скорости АД изменением числом пар полюсов.
5. Импульсное регулирование скорости АД изменением сопротивления в цепи ротора.
6. Регулирование скорости АД изменением питающей частоты.

# 1. Регулирование скорости асинхронных двигателей. Способы регулирования.

Приводы переменного тока имеют существенное преимущество по сравнению с приводами постоянного тока - отсутствие коллектора, меньше в 2...3 раза удельный расход электротехнической стали и стоимость электродвигателя.

По принципу своего действия асинхронный двигатель в обычной схеме включения не допускает регулирования скорости его вращения. Особое внимание следует обратить на то, что во избежание значительных потерь энергии, а, следовательно, для короткозамкнутых асинхронных двигателей во избежание перегрева его ротора, двигатель должен работать в длительном режиме с минимальными значениями скольжения.

Рассмотрим возможные способы регулирования скорости асинхронных двигателей (рис.1). Скорость двигателя определяется двумя параметрами: скоростью вращения электромагнитного поля статора  $\omega_0$  и скольжением  $s$ .



Рис 1

Отмечая достоинства двигателей переменного тока, нельзя не обратить внимания на то, что Относительно простые способы регулирования угловой скорости электроприводов переменного тока обладают рядом недостатков, к которым можно отнести в одном случае небольшую плавность, в другом - невысокие энергетические показатели и т. д. Более эффективные способы регулирования осуществляются при помощи преобразовательных устройств и средств управления.

Анализ возможностей различных способов регулирования скорости асинхронного двигателя показывает, что Разомкнутая система управления не может в полной мере обеспечить выполнение технологических требований рабочей машины. В целях повышения диапазона регулирования и обеспечения требуемой жесткости механических характеристик в схему управления вводят различные обратные связи.

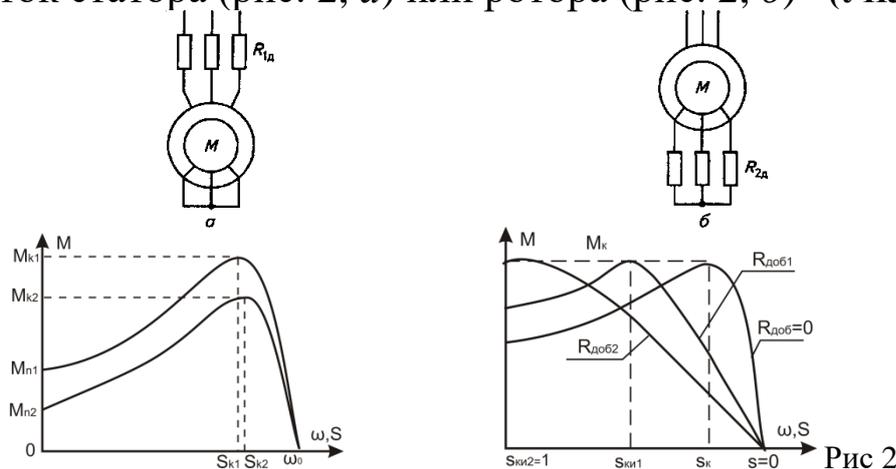
Сравнительные технические данные для систем электроприводов ТРС - АД, ТРИ - АД и ПЧ - АД приведены в таблице 1 (УПЗ.1).

Показатель	ТРС - АД	ТРИ - АД	ПЧ - АД
Регулирование скорости в сторону уменьшения	1:10	1:10	1:10000
Регулирование пускового момента в сторону уменьшения	1:4	1:4	1:4
Диапазон мощностей, кВт	5...150	20...130	0,5...8000

Из приведенных данных можно сделать вывод, что замкнутые системы обладают большим диапазоном регулирования и наибольшим диапазоном регулирования обладает система ПЧ - АД, которую широко применяют в регулируемых асинхронных приводах.

## 2. Реостатное и импульсное регулирование скорости асинхронного двигателя. Расчет потерь регулирования.

Этот способ реализуют путем введения добавочных сопротивлений в цепь обмоток статора (рис. 2, а) или ротора (рис. 2, б) (УПЗ.3).



В первом случае искусственные механические характеристики хотя и лежат ниже естественной, но диапазон регулирования крайне мал и составляет 1,15-1,2. При этом регулирование происходит путем изменения параметров в силовой цепи, что неблагоприятно отражается на энергетических показателях привода.

$$s_k = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \quad M = \frac{m \cdot U_1^2 \cdot r_2' \cdot s}{\omega_0 \cdot [(r_1 + r_2')^2 + x_k^2 \cdot s^2]} \quad (\text{УПЗ.4.})$$

Во втором случае (при введении добавочных сопротивлений в обмотку ротора) диапазон регулирования составляет 2...3, как у двигателя постоянного тока независимого возбуждения с аналогичными показателями регулирования.

$$s_k = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \quad M_k = \frac{m \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_o \cdot (\sqrt{r_1^2 + x_k^2} + r_1)} \quad (\text{УПЗ.5.})$$

Следует напомнить, что регулируют скорость ступенчато. Жесткость механических характеристик с ростом диапазона регулирования значительно снижается и может не обеспечить требуемую точность позиционирования. Плавность регулирования можно повысить путем применения импульсного регулирования сопротивлений в цепи ротора (ТРС), как у ДПТ НВ при регулировании сопротивления в цепи якоря с помощью импульсного коммутатора. При постоянных значениях скважности  $\gamma$  механические характеристики аналогичны обычным реостатным характеристикам.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum \Delta P} \quad \cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{m_1 U_1 I_1} = \frac{P_1}{\sqrt{3} UI} \quad (\text{УПЗ.6.})$$

Электрические потери в цепи ротора  $\Delta P_{эл2} = s P_{эм} = M \Delta \omega$  при прочих равных условиях пропорциональны величине скольжения, поэтому способы регулирования скорости изменением жесткости характеристики  $\omega(M)$  по определению являются неэкономичными с точки зрения потерь энергии.

### 3. Регулирование скорости АД изменением питающего напряжения.

Регулирование скорости двигателя за счет вариации напряжения питания (рис. 2), например с помощью тиристорного регулятора напряжения (ТРИ) в незамкнутой системе регулирования, также не дает удовлетворительного диапазона, который находится в пределах 1,3... 1,5 с резким уменьшением критического момента двигателя, поэтому при постоянном статическом моменте этот способ вообще оказывается неприемлемым.

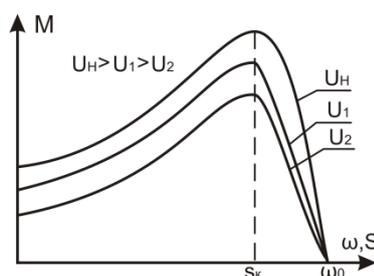


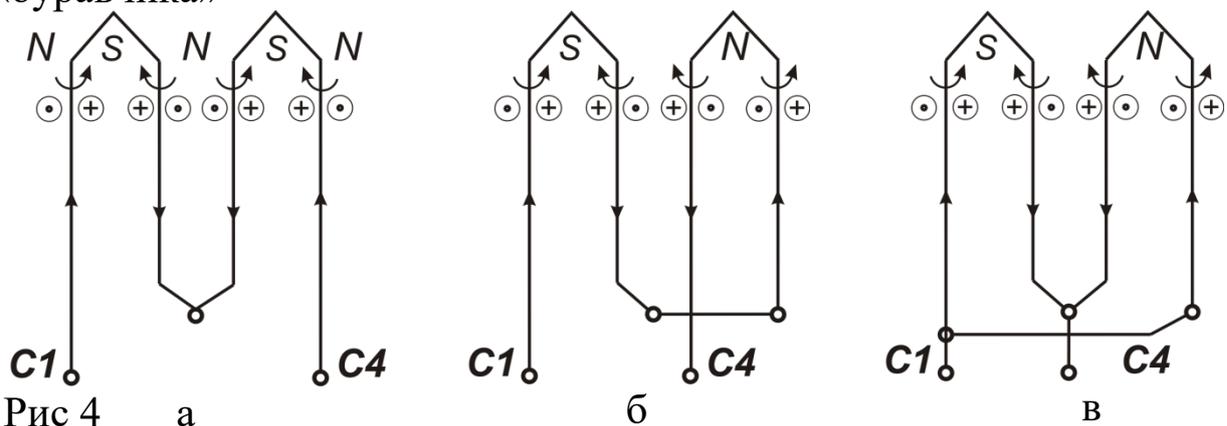
Рис 3.

$$s_k = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \quad M = \frac{m \cdot U_1^2 \cdot r_2' \cdot s}{\omega_o \cdot [(r_1 \cdot r_2')^2 + x_k^2 \cdot s^2]} \quad (\text{УПЗ.2.})$$

### 3. Регулирование скорости АД изменением числом пар полюсов.

Данный способ регулирования используют в многоскоростных АД, которые имеют обмотку статора с изменяемым числом полюсов. Регулирование экономичное, его широко применяют для ступенчатого изменения частоты вращения (угловой скорости) асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Так как количество пар полюсов АД может быть равным только целому числу: 1, 2, 3 и т. д., то данный способ согласно соотношениям ( $\omega = \omega_0(1 - s) = \frac{2\pi f_1}{p_n}(1 - s)$ ) (УП. 3.6)) обеспечивает только ступенчатое регулирование частоты вращения асинхронного ЭП. Чаще всего изменение числа пар полюсов обмотки статора АД получают путем соответствующего изменения схемы обмотки. Для этого каждая фаза обмотки статора разделена на несколько секций и имеет от них соответствующее число выводов. Изменяя схему соединения этих секций статорной обмотки во всех фазах, добиваются различных частот вращения магнитного поля статора, а соответственно и частоты вращения ротора АД.

На рис.4. показан принцип изменения числа пар полюсов на примере одной фазы двухскоростного АД. Стрелками показано условное направление протекания токов в секциях обмотки, а кружками - соответствующее направление магнитных силовых линий в соответствии с правилом «буравчика»



а ) исходная схема      б, в – схемы при изменении числа пар полюсов

В двухскоростном АД каждая фаза обмотки статора состоит из двух одинаковых секций (катушечных групп), рис.4. Если секции соединить согласно последовательно, то образуется максимальное число пар полюсов, условно равное  $2p$ , которому соответствует угловая скорость магнитного поля  $\omega_0$  (рис.4а). При соединении этих же секций встречно последовательно (рис.4б) или параллельно (рис.4в) количество пар полюсов уменьшается вдвое и становится равным  $p$ , а синхронная угловая

скорость соответственно увеличивается в два раза и становится равной  $2\omega_0$ . Так как зависимость статических моментов нагрузки на валу двигателя от угловой скорости  $M_c=f(\omega)$  самая разнообразная, то для разных видов нагрузки существуют наиболее оптимальные схемы переключений секций статорных обмоток АД, при которых на всех частотах вращения двигатель ЭП по возможности полностью загружен, и исключается его перегрузка.

Наиболее распространенные и целесообразные схемы переключения статорной обмотки двухскоростных АД для основных видов нагрузок ЭП показаны на рис.5.

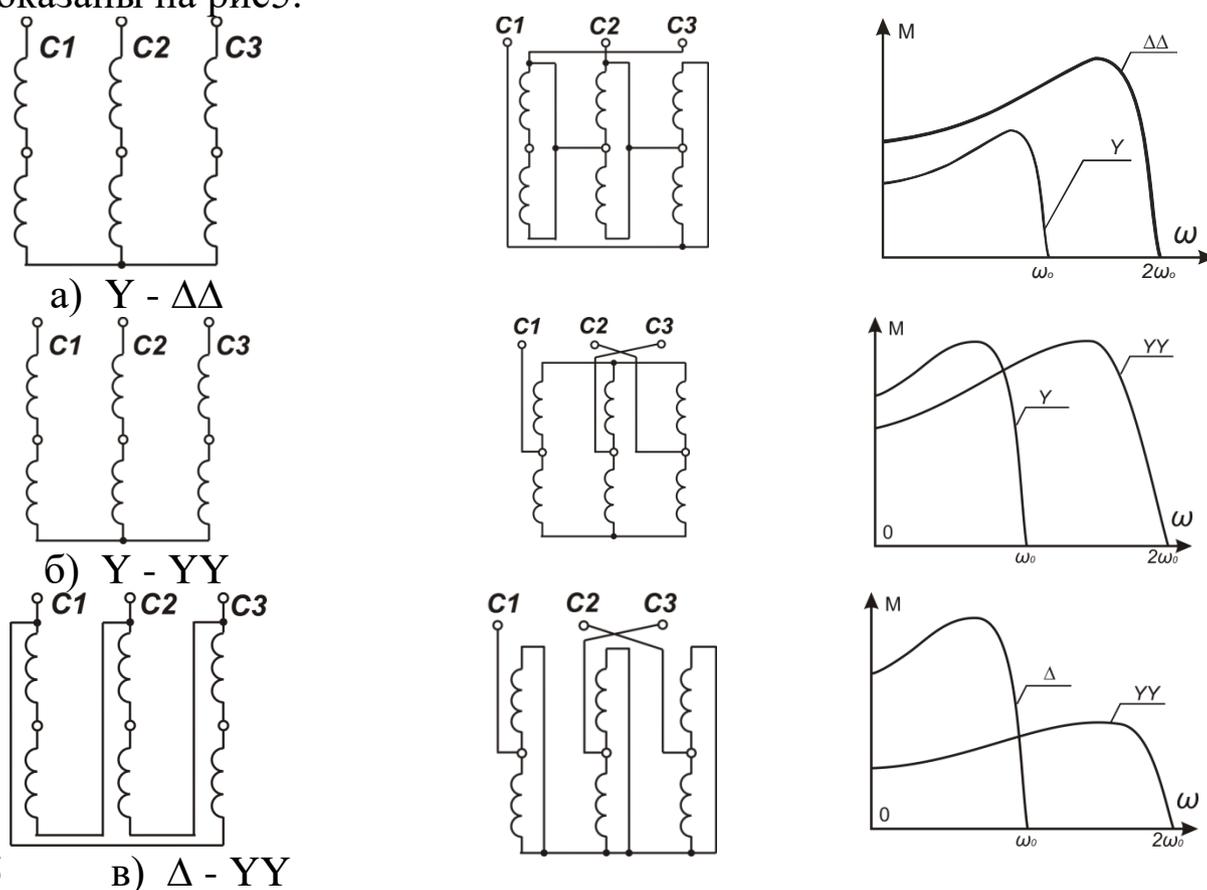


Рис5 в)  $\Delta - YY$

Нагрузочная способность  $2^x$  скоростного АД, обмотка которого переключается со схемы «звезда» (Y) на схему «двойной треугольник» ( $\Delta\Delta$ ) и наоборот, рис.5а. Для этого возьмем отношение значений потребляемой мощности АД в этих режимах, которое при допущении равенства КПД и  $\cos\phi$  двигателя равно отношению мощностей на валу электродвигателя:

$$\frac{P_Y}{P_{\Delta\Delta}} = \frac{\sqrt{3} U I_H \cos\phi_Y}{3U 2I_H \cos\phi_{\Delta\Delta}} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \approx \frac{1}{4} \quad \text{УП.3.8.}$$

где  $U$ -линейное напряжение электропитания, В;  $I_H$  и  $2I_H$  - допускаемые (номинальные) значения токов обмотки при разных схемах включения, А.

Как ранее было установлено, при переключении обмотки статора АД со схемы «звезда» на схему «двойной треугольник» синхронная угловая скорость двигателя возрастает в 2 раза. Так как  $P = M \omega$ , то очевидно, что допустимый вращающий момент АД возрастает также в 2 раза, что и отражено на механических характеристиках. В этом случае наиболее рациональная нагрузка асинхронного ЭП - это производственный механизм с линейно нарастающей механической характеристикой ( $x=1$ ) или с приближающейся к ней вентиляторной характеристикой ( $x=2$ ), что автоматически обеспечивает работу АД без перегрузки на обеих угловых скоростях с нагрузкой, близкой к номинальному значению.

Аналогично для схемы переключения обмотки статора АД со «звезды» на «двойную звезду» (рис. 5, б) имеем:

$$\frac{P_Y}{P_{YY}} = \frac{\sqrt{3} U I_H \cos \varphi_Y}{\sqrt{3} U 2 I_H \cos \varphi_{\Delta\Delta}} = \frac{1}{2} \quad \text{УП.3.10.}$$

При данном переключении скорость возрастает в 2 раза, согласно соотношению допустимый момент АД остается неизменным, что отражено на механической характеристике на рис.5б. Для данной схемы переключения обмотки статора АД со «звезды» на «двойную звезду» целесообразная нагрузка на валу - это нагрузка с независимым от угловой скорости моментом ( $x=0$ ). Такую нагрузку создают грузоподъемные механизмы и тихоходные конвейеры.

Для главного электропривода металлорежущих станков, создающих нагрузку с постоянной мощностью ( $x = -1$ ), целесообразно использовать двухскоростные АД со схемой переключения обмотки статора с «треугольника» на «двойную звезду». В этом случае имеем:

$$\frac{P_{\Delta}}{P_{YY}} = \frac{3 U I_H \cos \varphi_{\Delta}}{3 U 2 I_H \cos \varphi_{YY}} = \frac{3}{2\sqrt{3}} \approx 1 \quad \text{УП.3.12.}$$

Из формулы следует, что после переключения обмотки с «треугольника» на «двойную звезду» и возрастанием угловой скорости в 2 раза допускаемая мощность нагрузки практически не изменилась. Следовательно, допускаемый вращающий момент АД снижается в 2 раза. Это отражено на рис.5в.

Существенный недостаток многоскоростных АД помимо ступенчатого регулирования угловой скорости - повышенная сложность обмотки статора и сложность ее подключения и коммутации. Например, даже у 2-скоростных АД количество выводов обмотки статора равно 12, а у 4-скоростных - 24. Поэтому для преодоления указанных недостатков 4-скоростные АД выполняют в ряде случаев с двумя независимыми обмотками, каждая из которых двухскоростная.

## 5. Импульсное регулирование скорости АД изменением сопротивления в цепи ротора.

Развитие полупроводниковой техники активизировало применение импульсного способа для регулирования АД и постоянного тока. Сущность его заключается в периодическом (импульсном) изменении параметров цепей двигателя или питающей сети. Применительно к асинхронному ЭП чаще всего осуществляется импульсное изменение подводимого к двигателю напряжения или сопротивлений резисторов в цепях ротора или статора (рис.6). Эти способы применяются главным образом для регулирования скорости, хотя при необходимости они позволяют регулировать (ограничивать) ток и момент двигателя.

На рис.6(а,б,в) показаны некоторые из возможных схем включения АД КЗ при импульсном регулировании скорости. В этих схемах, периодически замыкая или размыкая контакты, включают двигатель в сеть и отключают его от сети (а), подключают его к сети через сопротивление  $R$  или напрямую (б), переводят из двигательного режима в тормозной и обратно (в).

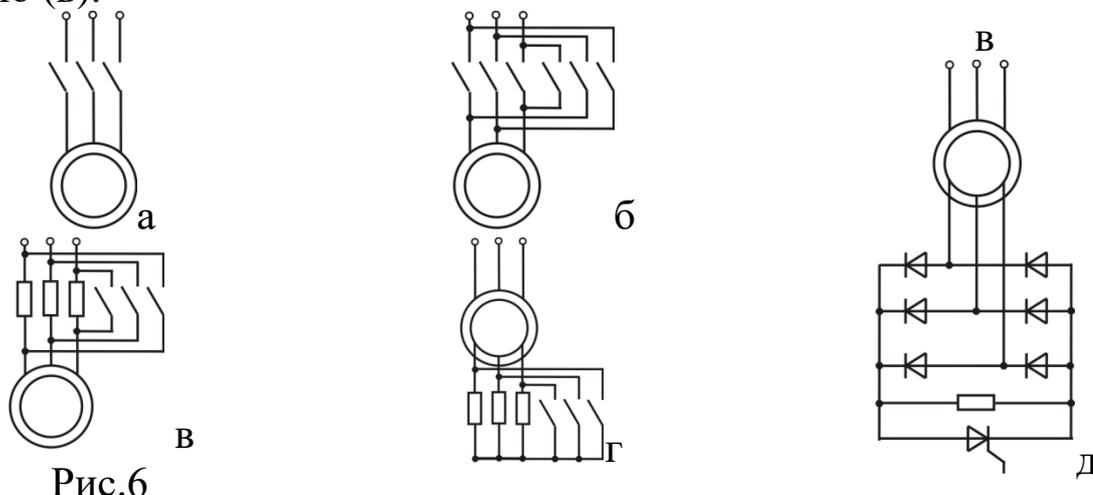


Рис.6

Для импульсного регулирования сопротивления резисторов  $R$  в цепи ротора АД ФР (рис.6.г) параллельно резистору включены контакты управляемого ключа (например, электромагнитного или тиристорного контактора), работающего с изменяемым заполнением (скважностью)  $0 < \gamma < 1$ . Аналогично работает схема на рис.6.д, в которой используются выпрямитель и резистор, включенный в цепь выпрямленного тока ротора. Шунтирование резистора осуществляется с помощью тиристорного ключа, который также работает с управляемым заполнением (скважностью)  $\gamma$ . Величиной, характеризующей импульсную работу, является относительная продолжительность импульса

$$\gamma = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \quad \text{УП.3.14.}$$

где  $t_1$  - время работы двигателя при непосредственном включении в сеть;  $t_2$  - время работы с добавочным сопротивлением, работы в тормозном режиме или время отключенного состояния.

Двигатель работает в переходных процессах, по экспоненциальным законам меняются: ток, момент, скорость. Периодические переключения длительны, с определенной частотой и постоянным соотношением времени включения и отключения или постоянным соотношением продолжительности отдельных частей цикла, то скорость двигателя достигает определенного среднего значения.

Использование рассмотренных схем обеспечивает получение семейства искусственных механических характеристик двигателя при различных значениях  $\gamma$ . Проанализируем характеристики АД при работе управляемого ключа со скважностью  $\gamma = 1$  и  $\gamma = 0$ .

При  $\gamma = 1$  (ключ постоянно замкнут или тиристорный ключ постоянно открыт) резистор закорочен и двигатель работает на естественной механической характеристике.

При  $\gamma = 0$  (ключ постоянно разомкнут или тиристорный ключ постоянно закрыт) резистор полностью введен в цепь ротора и двигатель работает по искусственной характеристике. При промежуточных значениях заполнения  $0 < \gamma < 1$  эквивалентное сопротивление  $R_{эkv}$  в цепи ротора изменяется в соответствии с формулой  $R_{эkv} = (1 - \gamma)R_d$  и искусственные характеристики располагаются между граничными.

Аналогично могут быть получены характеристики двигателя при импульсном регулировании сопротивления добавочного  $R$  в цепи статора.

Импульсное регулирование напряжения на статоре двигателя может быть реализовано с помощью тиристорного регулятора напряжения. В этом случае реализуются искусственные механические характеристики, аналогичные изображенным на рис. 2 (УПЗ.5).

Для улучшения показателей регулирования координат двигателя импульсным способом создаются замкнутые ЭП с использованием различных обратных связей. В результате за счет автоматического регулирования у механические характеристики двигателя становятся жесткими и обеспечивают регулирование его скорости.

Использование импульсных способов позволяет в ряде случаев осуществлять регулирование координат ЭП с помощью более простых схем управления.

## 6. Регулирование скорости АД изменением питающей частоты.

Частотный способ регулирования скорости обладает теми преимуществами, что и регулирование двигателей постоянного тока изменением подведенного к обмотке якоря напряжения. Это касается, в первую очередь, экономичности, диапазона регулирования, плавности и точности при высокой жесткости искусственных механических характеристик. Одновременно с регулированием решается и проблема пуска в приводах с большими моментами инерции и работающих в повторно-кратковременных режимах. Возможность регулирования скорости АД изменением частоты вытекает из выражения синхронной скорости.

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (\text{УП.15.})$$

$$M_k = \frac{M_{k\text{ст}}}{\varphi^2} \quad M = kU_H^2 u^2 \quad s_k = \frac{s_{k\text{ст}}}{\varphi}$$

$$M = \frac{2M_{k\text{ст}} \frac{u^2}{\varphi^2} \left(1 + \frac{\varepsilon_{\text{ст}}}{\varphi}\right)}{\frac{s\varphi}{s_{\text{ст}}} + \frac{s_{\text{ст}}}{s\varphi} + 2 \frac{s_{\text{ст}}}{\varphi}}$$

Указанный способ требует наличия преобразователя частоты, который может формировать момент двигателя при заданной скорости в соответствии с механической характеристикой рабочей машины. Изменением частоты источника питания можно регулировать скорость выше основной в 1,5...2 раза (обусловлено механической прочностью обмотки ротора) и 10...15 раз ниже основной, что обеспечивает регулирование скорости в диапазоне 20...30.

В таблице 1 приведены правила частотного регулирования по (3.30) для различных типов нагрузки.

Таблица 1 Правила частотного регулирования

Параметры	$\frac{M}{M_H}$	$\frac{U}{U_H}$	$\frac{P}{P_H}$	$\frac{\Phi}{\Phi_H}$	$\frac{I}{I_H}$
Постоянная мощность $M = M \frac{f_H}{f}$	$\frac{f_H}{f}$	$\sqrt{\frac{f_H}{f}}$	const	$\sqrt{\frac{f_H}{f}}$	$\sqrt{\frac{f_H}{f}}$
Постоянный момент $M = M_H = \text{const}$	const	$\frac{f}{f_H}$	$\frac{f}{f_H}$	const	const,
Вентиляционный закон $M = M \left(\frac{f}{f_H}\right)^2$	$\left(\frac{f}{f_H}\right)^2$	$\left(\frac{f}{f_H}\right)^2$	$\left(\frac{f}{f_H}\right)^3$	$\frac{f}{f_H}$	$\frac{f}{f_H}$

Краткий анализ возможностей различных способов регулирования скорости асинхронного двигателя показывает, что разомкнутая система управления не может в полной мере обеспечить выполнение технологических требований рабочей машины. В целях повышения диапазона регулирования и обеспечения требуемой жесткости механических характеристик в схему управления вводят различные обратные связи.

Из приведенных данных можно сделать вывод, что замкнутые системы обладают большим диапазоном регулирования и наибольшим диапазоном регулирования обладает система ПЧ - АД, которую широко применяют в регулируемых асинхронных приводах.