

<b>ГЛАВА 1</b>	
<b>Электров двигатели.....</b>	<b>5</b>
Конструкция трёхфазного асинхронного двигателя.....	1
Принцип работы трёхфазного асинхронного двигателя.....	2
Формирование трёхфазного магнитного поля.....	4
Двигатели, подключенные непосредственно к питающей сети.....	7
Зависимость от числа пар полюсов.....	7
<b>ГЛАВА 2</b>	
<b>Характеристики двигателя.....</b>	<b>9</b>
Момент (Т).....	9
Мощность (Р).....	9
Скорость (n).....	10
<b>ГЛАВА 3</b>	
<b>Шильдик двигателя.....</b>	<b>13</b>
<b>ГЛАВА 4</b>	
<b>Механическая характеристика асинхронного двигателя</b>	<b>19</b>
Нагрузка двигателя.....	20
Перегрузка.....	21
<b>ГЛАВА 5</b>	
<b>Ускорение двигателей.....</b>	<b>23</b>
Прямое подключение.....	23
Переключение «звезда» - «треугольник» .....	24
Мягкий пускатель.....	25
Частотно регулируемый двигатель.....	25
<b>ГЛАВА 6</b>	
<b>Правильный выбор мощности двигателя для</b>	
<b>механизма.....</b>	<b>27</b>
Пример вычисления.....	27
Выбор правильного двигателя.....	27
<b>ГЛАВА 7</b>	
<b>Области работы двигателей.....</b>	<b>33</b>
Четырех квадрантный режим.....	35
<b>ГЛАВА 8</b>	
<b>Управление двигателем.....</b>	<b>39</b>
Диапазон регулирования.....	39
Взрывозащищенные двигатели.....	40
Компенсация тока намагничивания.....	40

<b>ГЛАВА 9</b>	
<b>Преобразователь частоты.....</b>	41
Блок-схема преобразователя частоты.....	41
Принципы работы преобразователя частоты.....	42
Выпрямитель.....	42
Инвертор.....	43
Инверторные ключи.....	44
Импульсный источник питания.....	46
<b>ГЛАВА 10</b>	
<b>Принцип частотного инвертирования.....</b>	47
Принцип частотного инвертирования.....	47
Вольт-герцовая характеристика.....	50
Изменение отношения $U/f$ .....	52
<b>ГЛАВА 11</b>	
<b>Ослабление поля.....</b>	55
Двигатель с номинальной частотой 50 Гц.....	57
Двигатель с номинальной частотой 60 Гц.....	58
<b>ГЛАВА 12</b>	
<b><math>I * R</math> компенсация.....</b>	61
Применение $I * R$ компенсации.....	64
<b>ГЛАВА 13</b>	
<b>Коррекция скольжения.....</b>	65
<b>ГЛАВА 14</b>	
<b>Режим торможения.....</b>	69
Торможение в течение короткого времени.....	70
Торможение в течение длительного времени.....	71
Торможение постоянным током.....	72
<b>ГЛАВА 15</b>	
<b>ШИМ.....</b>	75
<b>ГЛАВА 16</b>	
<b>Векторная модуляция.....</b>	77
Детальное объяснение векторной модуляции.....	78
Формирование векторов поля.....	79
<b>ГЛАВА 17</b>	
<b>Диапазон регулирования преобразователя частоты.....</b>	83
Диапазон регулирования: 0 Гц – 50 Гц.....	83
Диапазон регулирования: 50 Гц – две номинальных частоты.....	83
<b>ГЛАВА 18</b>	
<b>Нагрузка двигателя и его охлаждение.....</b>	

# ГЛАВА 1

## Электрические двигатели

источник энергии

Электрический двигатель является источником энергии, миллиарды которых работают ежедневно во всём мире. В этой главе мы обсудим рабочие принципы, основные характеристики и свойства этой машины.

Двигатель с беличьей клеткой (тип электрического мотора) в основном применяется в ситуациях, когда требуемая мощность находится в пределах от нуля до многих сотен киловатт.

На первый взгляд электрический двигатель имеет простую конструкцию. В двигателе происходит следующее:

Преобразование энергии в электрическом двигателе

Двигатель забирает энергию из питающей сети и преобразует её во вращающий (механический) момент посредством магнитного поля и магнитной индукции.



Рис. 1.1 Преобразование электрической энергии в механическую энергию.

Это вращательное движение может быть использовано для управления механизмами (например: вентиляторами, конвейерами).

### Конструкция трёхфазного асинхронного двигателя

ротор и статор

Как и все электрические машины, двигатель с беличьей клеткой состоит из вращающейся части – ротора и неподвижной части – статора. Статор и ротор разделены воздушным зазором. Статор включает в себя три отдельных обмотки, повернутых одна относительно другой на  $120^\circ$ .

### Принцип работы трёхфазного асинхронного двигателя

трёхфазное магнитное поле

Трёхфазное синусоидальное напряжение, прикладываемое к обмоткам, создаёт трёхфазное магнитное поле в воздушном зазоре.

Скорость вращения этого трёхфазного поля зависит от частоты питающего напряжения. Другими словами трёхфазное поле синхронизировано с частотой питающего напряжения.

<b>ГЛАВА 19</b>	
<b>Режим параллельной работы.....</b>	<b>89</b>
<b>ГЛАВА 20</b>	
<b>Ограничение тока.....</b>	<b>91</b>
<b>ГЛАВА 21</b>	
<b>К.П.Д. преобразователя частоты.....</b>	<b>93</b>
<b>ГЛАВА 22</b>	
<b>Правильный выбор.....</b>	<b>95</b>
Обратите внимание на «необычные моменты».....	96
<b>ГЛАВА 23</b>	
<b>Выбор числа полюсов двигателя.....</b>	<b>97</b>
Преимущества и недостатки режима работы на сверх синхронной скорости.....	97
<b>ГЛАВА 24</b>	
<b>Характер нагрузки и примеры расчетов.....</b>	<b>101</b>
Прилагаемый постоянный момент.....	101
Энергосбережение.....	107

$$n_s = (f \times 60) / p,$$

где:

$n_s$  = число оборотов магнитного трёхфазного поля (об. мин)

$f$  = частота питающей сети (Гц)

60 = коэффициент перевода из секунд в минуты

$p$  = число пар полюсов

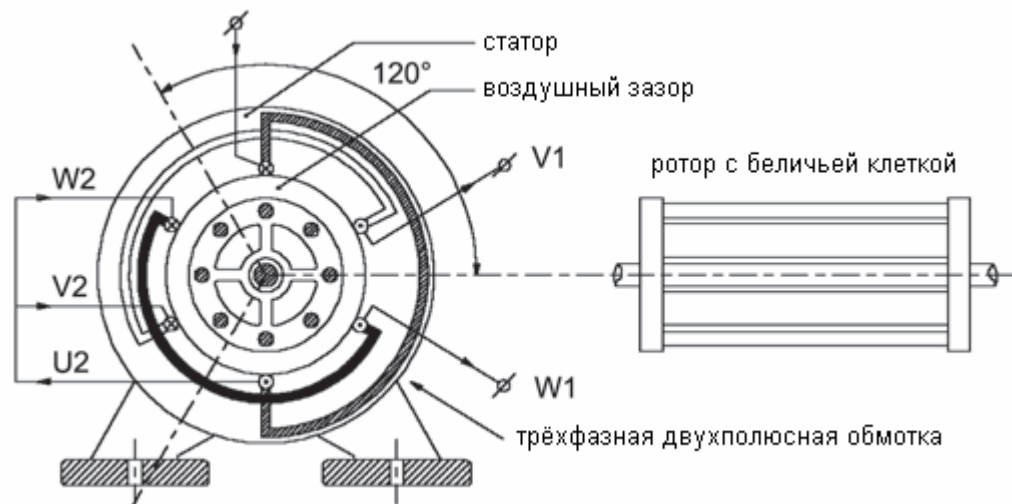


Рис. 1.2 Устройство двигателя с беличьей клеткой.

Если ротор начинает проскальзывать, то генерируется напряжение. В результате через статор начинает протекать ток, как показано на рисунке 1.3.

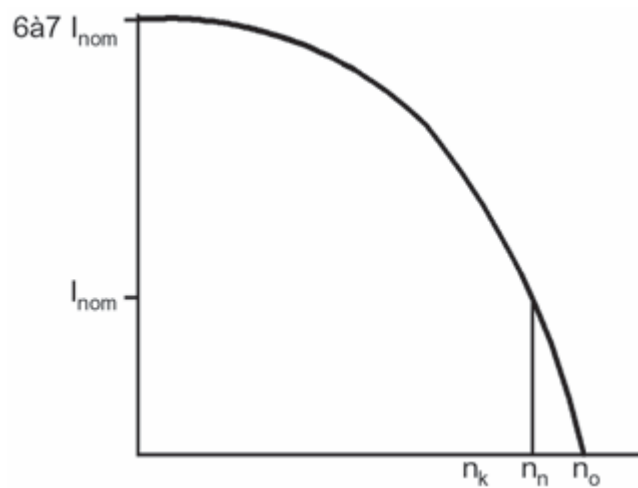


Рис. 1.3

Магнитное поле статора генерирует момент, как показано на рисунке 1.4.



Рис. 1.4

Эта тема будет рассмотрена более подробно в главе 4.

При взаимодействии достаточно большого тока, который начинает протекать через стержни ротора и трёхфазного поля статора, на стержни ротора будет действовать магнитная сила. В результате ротор создаёт момент ( $T$ ) и разгоняется до скорости, приблизительно равной скорости вращения трёхфазного поля статора. Если нет потерь (например сопротивление воздуха, трение в подшипниках) скорость ротора будет следовать за скоростью трёхфазного поля статора.

В этом случае не будет генерироваться индуктивное напряжение и поэтому не будет индуктивного тока. Без индуктивного тока невозможно создать момент для вращения ротора.

Поскольку невозможно избежать потерь в двигателе, некоторый момент ( $T$ ) всегда будет необходим для преодоления потерь. Как следствие, скорость ротора всегда меньше, чем скорость вращения трёхфазного поля статора.

Эта разность называется скольжением ( $s$ ).

$$s = n_s - n_r,$$

где:

$s$  = абсолютное скольжение

$n_s$  = скорость магнитного трёхфазного поля

$n_r$  = скорость ротора

## Генерация трёхфазного магнитного поля

На рисунке ниже показано графическое изображение генерации магнитного поля в трёхфазном двигателе.

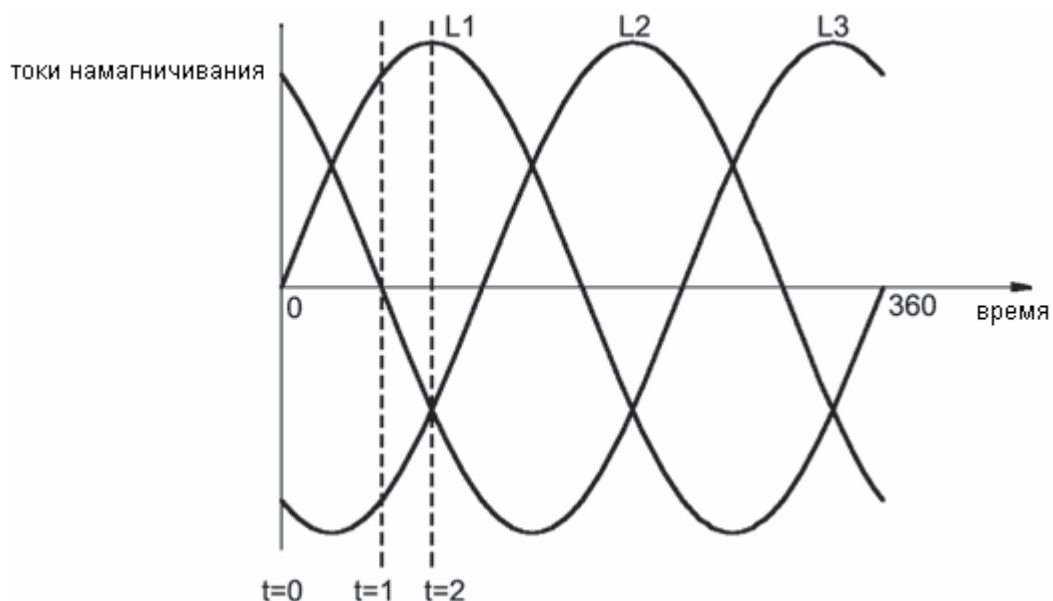


Рис. 1.5 Генерация магнитного поля

При подключении к питающему напряжению обмоток двигателя, соединённых в треугольник или в звезду, возникают намагничивающие токи  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$ , сдвинутые по фазе на  $120^\circ$ . Рассмотрим ситуацию более подробно для моментов времени  $t=0$ ,  $t=1$  и  $t=2$ .

### Момент $t=0$

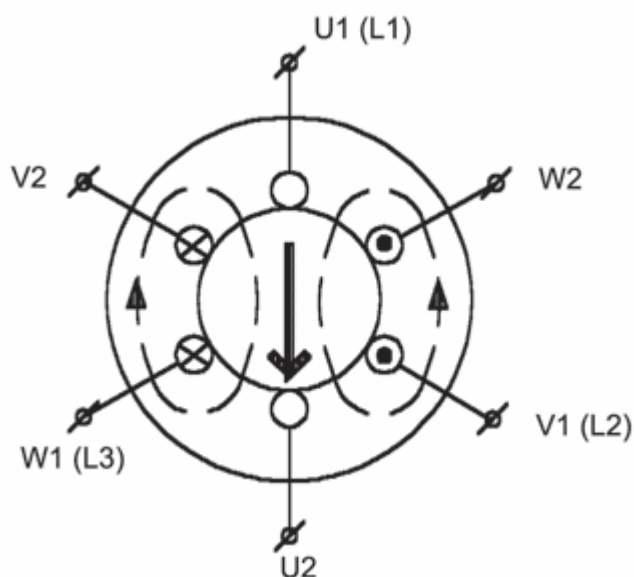


Рис.1.6 Результирующий поток в момент  $t = 0$ .

При  $t=0$  ток через катушку  $U1, U2$  равен нулю. В этой обмотке магнитное поле не генерируется.

В катушке  $V1, V2$  ток отрицательный. Ток втекает в  $V2$ . Это обозначено крестом. Ток вытекает из катушки через  $V1$ . Это обозначено точкой. Этот ток генерирует магнитное поле, величина которого эквивалентна  $I_2$ .

Ток, протекающий через катушку  $W1$  и  $W2$  является положительным. Ток втекает в  $W1$  (крест) и вытекает из катушки в  $W2$  (точка). Этот ток генерирует магнитное поле, величина которого эквивалентна  $I_3$ .

Поскольку ток протекает только через катушки  $V1, V2$  и  $W1, W2$ , силовые линии результирующего магнитного поля имеют направление, показанное на рисунке 1.6.

### Момент $t=1$

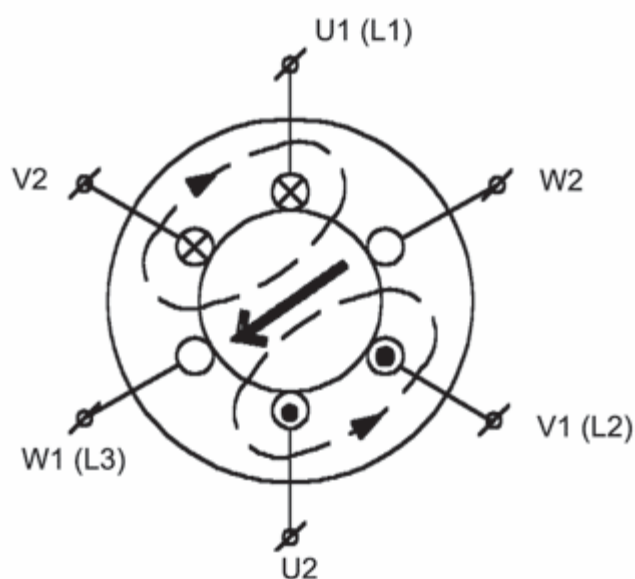


Рис. 1.7 Результирующий поток в момент  $t = 1$ .

В момент  $t=1$  ток, протекающий через катушку  $W1, W2$  равен нулю.

Ток, протекающий через катушку  $U1, U2$  – положительный. Ток втекает в  $U1$  (крест) и вытекает из катушки в  $U2$ (точка).

Ток, протекающий через катушку  $V1, V2$  – отрицательный. Ток втекает в  $V2$  (крест) и вытекает из катушки в  $V1$  (точка).

Эти два тока создают результирующее магнитное поле, представленное на рисунке 1.7. Видно, что результирующее магнитное поле повернулось по часовой стрелке.



## Момент $t=2$



Рис. 1.8 Результирующий поток в момент  $t = 2$ .

В момент  $t=2$  через катушку  $U1, U2$  протекает максимальный положительный ток.

Токи, протекающие через катушки  $V1, V2$  и  $W1, W2$  равны и отрицательны. В случае протекания через катушку  $U1, U2$  ток втекает в  $U1$  (крест) и вытекает в  $U2$  (точка). Вы можете сами проверить токи, протекающие в двух других катушках.

Три различных тока создают результирующее магнитное поле, поворачивающееся в направлении, указанном на рисунке 1.8.

Рассмотрев случаи, соответствующие  $t=0, t=1, t=2$  мы видим, что направление вектора магнитного потока изменяется, но при этом его величина остаётся постоянной.

### Двигатели, подключенные непосредственно к питающей сети

Двигатели, подключенные прямо к питающему напряжению, обладают определённой синхронной скоростью ( $n_s$ ), зависящей от частоты питающего напряжения и числа пар полюсов.

$$n_s = (f \times 60) / p ,$$

где:

$n_s$  = число оборотов магнитного трёхфазного поля (об. мин)

$f$  = частота питающей сети (Гц)

60 = коэффициент перевода из секунд в минуты

$p$  = число пар полюсов

### Зависимость от числа пар полюсов

Перед конструированием двигателя с беличьей клеткой, необходимо определить требуемую скорость для этого двигателя. Двигатель, имеющий четыре полюса (2 северных и 2 южных), – является двигателем с 2 парами полюсов и скорость поля статора равна 1500 об/мин. При увеличении числа пар полюсов, синхронная скорость уменьшается (2 полюса составляют одну пару).

### Пример вычисления:

6 полюсов = 3 пары полюсов

$f = 50$  Гц

$n_s = ?$

$n_s = (50 \cdot 60) / 3 = 1000$  (об/мин)

Другие возможные скорости даны в таблице ниже.

Число полюсов	2	4	6	8	10	12
$n$ (об/мин)	3000	1500	1000	750	600	500
$n_{\text{двигателя}}$ (об/мин)	2920	1460	960	720	580	490

Когда мы просто выбираем двигатель, скорость устанавливается для питающего напряжения 50 Гц.

## ГЛАВА 2

### Характеристики двигателя

#### Момент (Т)

Характеристики

Характеристика двигателя, момент, зависит в основном от генерируемого трёхфазного магнитного поля и тока ротора. Выражаясь просто, момент – это сила, с которой вращается вал.

Можно было бы сравнить это понятие с затяжкой гаек на колесе автомобиля, с использованием динамометрического гаечного ключа.

Момент = сила\*  
длину плеча

Рычажный механизм прикладывает определённую силу к гайке «валу». Сила, прикладываемая к «валу», называется моментом (Т).

Момент (Т) вычисляется произведением силы, действующей на рычажный механизм, на длину плеча.

Момент обычно измеряется в ньютон-метрах, обозначается Нм, но иногда также используется старая единица – килограммометр (1 Нм приблизительно равен 0,1 кг·м)

#### Мощность (Р)

Сила

Сила бензинового двигателя зависит от объёма цилиндров двигателя. Автомобиль с двухлитровым двигателем – это машина с двигателем, имеющим объём цилиндра 2000 см<sup>3</sup>. Чем больше количество смеси (горючее-воздух), которое может быть сожжено в цилиндрах, тем больше движущая сила. А в случае электрических двигателей мы говорим не о двухлитровом двигателе, а о мощности на валу ( $P_{\text{вала}}$ ) электрического двигателя, выражаемой в kW. Используется обозначение мощности на валу в лошадиных силах, где 1 Л.С. = 736 Вт. Суммарная мощность ( $P_{\text{abs}}$ ) трёхфазных двигателей может быть вычислена с использованием формулы на странице 10.

$$P_{\text{abs}} = \sqrt{3} * U_L * I_L * \cos\varphi$$

где:

$\sqrt{3}$  = вычислительный коэффициент для трёхфазной питающей сети.

$U_L$  = линейное напряжение.

$I_L$  = линейный ток.

$\cos\varphi$  = сдвиг по фазе между напряжением и током.

### **Скорость (n)**

Скорость – это скорость вращения вала, выражается в оборотах в минуту (об/мин). Скорость может быть определена по формуле:

$$n = n_s - s ,$$

где:

$n$  = скорость ротора (об/мин).

$n_s$  = скорость трёхфазного магнитного поля (об/мин).

$s$  = абсолютное скольжение.

### **Угловая скорость ( $\omega$ )**

Угол может быть выражен в градусах: один оборот =  $360^0$ . Мы также можем выразить угол в радианах: один оборот =  $2\pi \text{ rad}$ .

Поэтому можно выразить угловую скорость вала в радианах в секунду (рад/с).

Скорость вращения вала, выражаемая в оборотах в минуту соответствует  $n/60$  об/сек. Каждую секунду происходит поворот на  $2\pi n/60$ , таким образом, угловая скорость  $\omega$  равна  $2\pi n/60$ .

### **Мощность (P)**

Соотношение между скоростью ( $n$ ), моментом ( $T$ ) и мощностью ( $P_{\text{вала}}$ ) выражается формулой:

$$P = \omega T ,$$

где:

$P$  = мощность на валу (Вт)

$\omega$  = угловая скорость (рад/с)

$T$  = момент (Нм)

Поэтому:

$$P = (2\pi * n * T) / 60$$

Поскольку :

$$2\pi/60 = 1/9.55$$

$$P = (T * n) / 9.55$$

где:

$P$  = мощность (Вт)

9.55 = константа

$T$  = момент (Нм)

$n$  = скорость вращения ротора (об/мин)

# ГЛАВА 3

## Шильдик двигателя

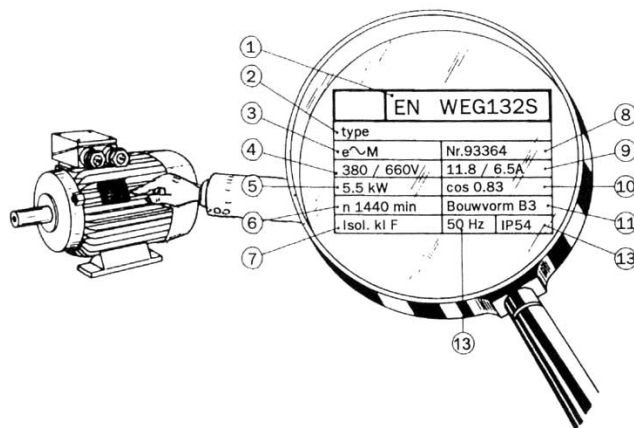


Рис. 3.1 Шильдик двигателя.

Каждый двигатель снабжается идентификационной табличкой, в которой присутствует вся важная информация, относящаяся к двигателю.

### 1 Наименование производителя (EN)

### 2 Номер типа двигателя (Номер заводского типа)

### 3 Тип двигателя

Двигатель предназначен для питания от трёхфазного силового источника питания.

### 4 Напряжение на обмотке

Трёхфазный двигатель может быть соединён в звезду (Y) или в треугольник (Δ). Соединение в Δ показано на рисунке 3.2. Соединение в Y показано на рисунке 3.3.

При соединении обмоток двигателя в Δ полное линейное напряжение прикладывается к каждой из трёх обмоток двигателя. Линейный ток в  $\sqrt{3}$  раз больше, чем ток обмотки.

При соединении обмоток двигателя в Y, линейное напряжение распределяется между обмотками. На каждую обмотку приходится напряжение в  $\sqrt{3}$  раз меньше линейного. В этом случае линейный ток равен току обмотки.

Если на шильдике двигателя написано 380/660V (Как в этом случае) или 380Δ, то обмотка каждой фазы двигателя предназначена для питания напряжением 380V.

Такой двигатель должен соединяться в Δ при питающей сети с напряжением 380V.

Если на шильдике двигателя написано 220 В/380 В или 380 ВУ, то обмотка каждой фазы двигателя, предназначенная для питания напряжением 220 В. Двигатель должен быть соединён в звезду при питающем напряжении 380 В.

Внимание: Минимальное напряжение, указанное на шильдике двигателя является максимальным дозволённым напряжением, прикладываемым к одной обмотке.

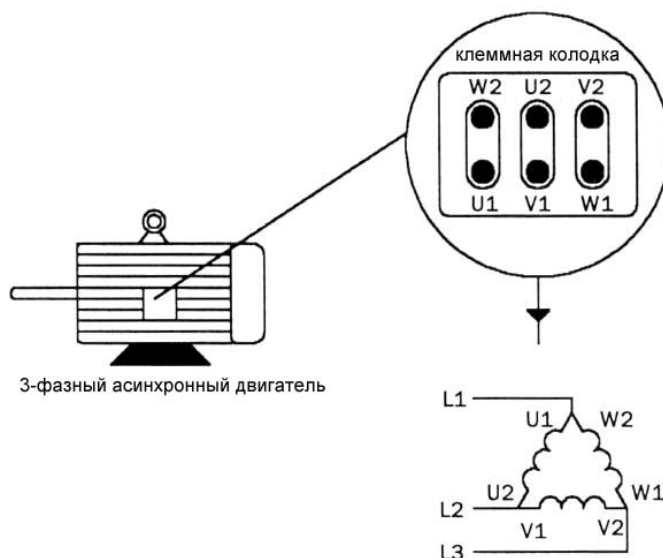


Рис. 3.2 Соединение в треугольник (Δ).

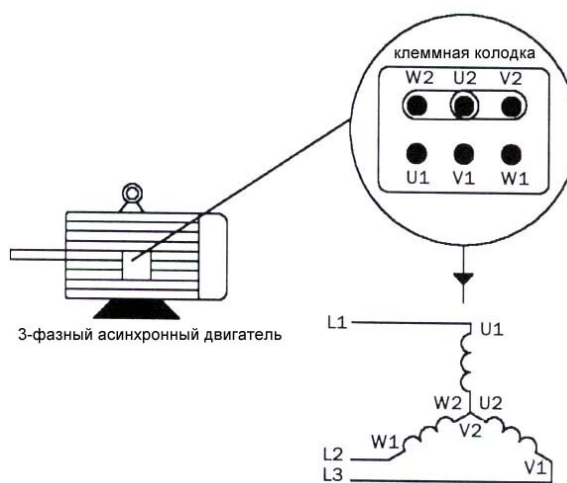


Рис. 3.3 Соединение в звезду (Λ).

## 5 Мощность на валу

Указанная мощность является номинальной мощностью на валу ( $P_{\text{вала}}$ ).  
Формула  $T=(9,55 \cdot P)/n_{\text{ном}}$  позволяет вычислить номинальный момент ( $T_n$ ).

Номинальный момент – это момент, который должен прикладываться постоянно при номинальной скорости. Если двигатель перегружен, возможен его перегрев. В результате могут перегреться подшипники или нарушиться электрическая изоляция обмоток статора двигателя.

## 6 Скорость

Скорость – это номинальное число оборотов в минуту ( $n_{\text{ном}}$ ) при номинальной нагрузке.

Это скорость статора ( $n_s$ ) минус абсолютное скольжение ( $S$ ).

Для рассматриваемого двигателя абсолютное скольжение равно:

$$1500 - 1440 = 60 \text{ об/мин}$$

## 7 Класс изоляции

Класс изоляции означает термический класс изоляционных материалов двигателя.

Каждый изоляционный материал имеет максимальную границу температуры, которая не должна быть превышена.

Например: Для материала термических классов до F = 155<sup>0</sup>C. Максимальный подъём температуры от температуры окружающей среды 35<sup>0</sup>C не должен превышать 120<sup>0</sup>C.

$$B = 130^0$$

$$F = 155^0$$

$$H = 180^0$$

$$C = 180^0$$

Разница между классами H и C в использовании пропиточных материалов. Материалы класса C – без пропитки.

## 8 Заводской номер

Серийный или типовой номер.

## 9 Ток

Линейный ток для соединения в  $\Delta$  и Y соответственно.

## 10 cos φ

Cos φ означает фазовый угол сдвига между током и напряжением. Это очень важно для расчета суммарной мощности и потребляемой мощности. Не весь ток, полученный из питающей сети, пойдёт на создание мощности. Часть тока ( $I \cdot \sin \phi$ ) идет на генерацию трёхфазного поля тока намагничивания. Оставшаяся часть тока ( $I \cdot \cos \phi$ ) обеспечивает мощность на валу.

## 11 Конструкция

Конструкция указывает: как и где мотор был собран (модель корпуса двигателя).

## 12 Частота

В рассматриваемом случае двигатель должен быть подключен к питающей сети с частотой 50 Гц.

### 13 Степень защиты

IP (Защита Доступа) означает степень защиты двигателя от проникновения жидких и твёрдых материалов. Степень защиты обозначается двумя буквами IP и цифрами. Первая цифра относится к защите от попадания твёрдых материалов. Вторая цифра относится к защите от попадания воды. В обоих случаях применяется правило: чем больше цифра, тем лучше защита (более подробную информацию можно найти в стандартах IEC, смотрите публикацию 34-5).

#### Пример вычисления:

Шильдик на двигателе даёт следующую информацию:

$$P_{\text{ном}} = 5,5 \text{ кВт}$$

$$U_{\text{ном}} = 3 * 380/660 \text{ В}$$

$$I_{\text{ном}} = 11,8\text{А}/6,5\text{А}$$

$$n_{\text{ном}} = 1440 \text{ об/мин}$$

$$\cos\varphi = 0,83$$

Это означает также, что:

- Потребляемая активная электрическая мощность  $P_{\text{abs}}$ :

$$P_{\text{abs}} = \sqrt{3} * U_{\text{I}} * I_{\text{I}} * \cos\varphi$$

Подставляя значения, получим:

$$P_{\text{abs}} = \sqrt{3} * 380 * 11,8 * 0,83 = 6,446 \text{ кВт}$$

- Номинальный момент  $T_{\text{ном}}$ :

$$T_{\text{ном}} = (9,55 * P_{\text{ном}}) / n_{\text{ном}}$$

Подставляя значения, получим:

$$T_{\text{ном}} = (9,55 * 5500) / 1440 = 36,4 \text{ Nm}$$

- КПД  $\eta$ :

$$\eta = P_{\text{ном}} / P_{\text{abs}}$$

Подставляя значения, получим:

$$\eta = 5500 / 6440 = 0,853$$

## ГЛАВА 4

### Механическая характеристика асинхронного двигателя (кривая момент/скорость)

Число оборотов ( $n$ ) или скорость асинхронного двигателя зависит от нагрузки. Скорость ротора обычно на 1 – 10% ниже, чем скорость поля статора. График ниже относится к двигателю, подключённому к сети питающего напряжения (50 Гц). На графике изображена зависимость момента ( $T$ ) от скорости ( $n$ ).

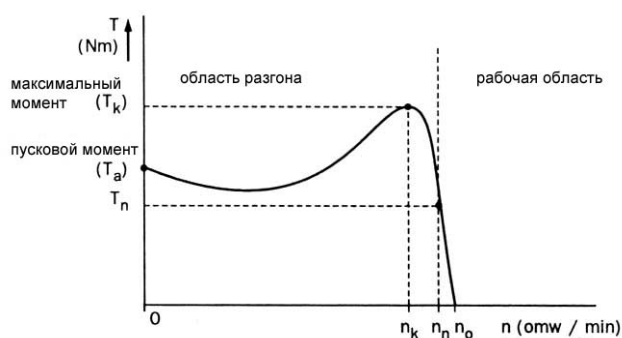


Рис. 4.1 Кривая момент/скорость

Кривая момент-скорость содержит два важных показателя:

- Пусковой момент
- Пусковой момент ( $T_a$ ) или момент освобождения. Это момент, прикладываемый к двигателю с неподвижным ротором.
- Максимальный момент
- Критический момент ( $T_k$ ) или максимальный момент.

Характеристика момент-скорость может подразделяться на две части:

- Область ускорения
- Область ускорения ( $0 < n < n_n$ )
- Рабочая область
- Рабочая область ( $n_n < n < n_o$ )

где:

- $n_k$  = скорость при максимальном моменте
- $n_o$  = скорость идеального холостого хода
- $n_n$  = номинальная скорость

### Нагрузка двигателя

Возрастание нагрузки требует увеличения момента двигателя. Первоначально ротор будет замедляться в течение какого-то момента. Это приведёт к росту разности скоростей между полем статора и ротором (абсолютное скольжение). Это ведёт к увеличению индуктивного напряжения, генерируемого в роторе. Увеличение индуктивного напряжения приводит к возрастанию тока в стержнях ротора и последующему увеличению момента ( $T$ ).

Увеличение  
скольжения при  
возрастании  
нагрузки

Энергия, требуемая для генерации этого момента ( $T$ ) поступает из трёхфазного магнитного поля статора через воздушный зазор. Это ведёт к возрастанию тока статора. Из сети питающего напряжения будет поступать больше энергии в двигатель.



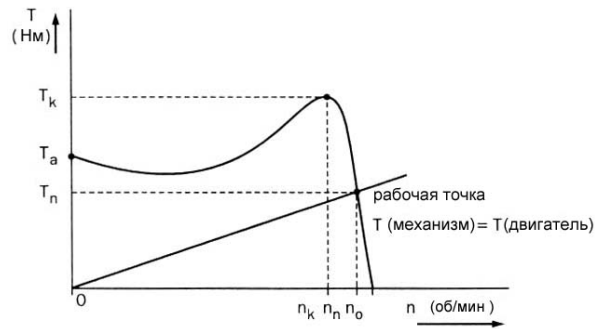


Рис. 4.2

На рисунке 4.2 изображена кривая нагрузки, возрастающей линейно с увеличением скорости.

**Область ускорения:** ( $0 < n < n_n$ )

В процессе ускорения прикладываются следующие моменты:  $T_{двигателя} > T_{механизма}$ .

Избыточный момент

Избыточный момент (разность между моментом двигателя и моментом механизма при нулевой скорости является причиной разгона двигателя). Двигатель будет раскручиваться максимально быстро через область ускорения.

Момент

Момент в начале разгона называется моментом освобождения (разность  $T_{старт} - T_{механизма}$ , при  $n=0$ ).

Освобождения

**Рабочая область:** ( $n_n < n < n_0$ )

После прохождения области ускорения двигатель переходит в рабочую область. В рабочей области (крутой участок кривой  $T/n$ ) мотор стабилизируется на определённой скорости. Это место пересечения, в котором момент двигателя и момент механизма равны ( $T_{двигателя} = T_{механизма}$ ). Ускорение равно нулю и скорость ( $n$ ) постоянна.

Это пересечение называется рабочей точкой двигателя. Информация, относящаяся к номинальной рабочей точке, может быть найдена на шильдике двигателя.

**Перегрузка**

Момент механизма изображён на графике кривой момент/скорость.

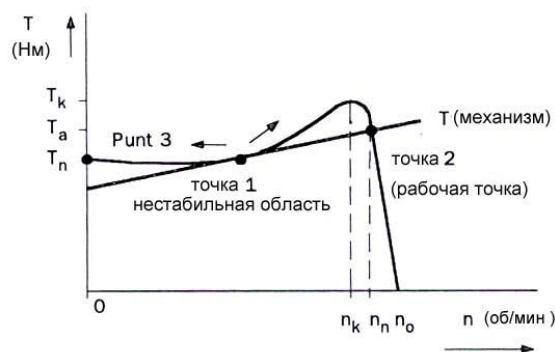


Рис. 4.3 График

нагрузки.

Двигатель будет находиться в точке пересечения кривой момент/скорость с моментом нагрузки (точка 1) в нестабильной области.

Возможны два случая:

- Двигатель обладает избыточным моментом, проходит через максимальный момент и стабилизируется в рабочей области (точка 2).
- Другая возможность – двигатель обладает недостаточным, маленьким моментом и не способен приложить требуемый момент, когда механизм производит большое сопротивление ( $T_{\text{двигателя}} < T_{\text{механизма}}$ ). Это значит, что двигатель остановится (точка 3). Если момент механизма уменьшится, двигатель перейдет в точку 1.

Эту ситуацию можно сравнить с тем, если кто-то едет на велосипеде вверх на горку. Его скорость 20 км/час. В данный момент он приближается к горке. Для того, чтобы сохранить скорость 20 км/час, велосипедисту необходимо увеличить усилие (мощность). Если он этого не сделает, то скорость уменьшится (возможно, до полной остановки).



Рис. 4.4

# ГЛАВА 5

## Ускорение двигателей

В промышленности стандартные трёхфазные асинхронные двигатели используются для различных целей. Существуют различные способы подключения и управления трёхфазным асинхронным двигателем.

### Прямое подключение

Прямое подключение к питающей сети  $6 * I_{ном}$

Как уже подразумевает само название, двигатель напрямую подключается к сети питающего напряжения. Уровень тока определяется только полным сопротивлением двигателя. При пуске это сопротивление очень мало. Пусковой ток может возрасти до  $6 - 8 * I_{ном}$ .

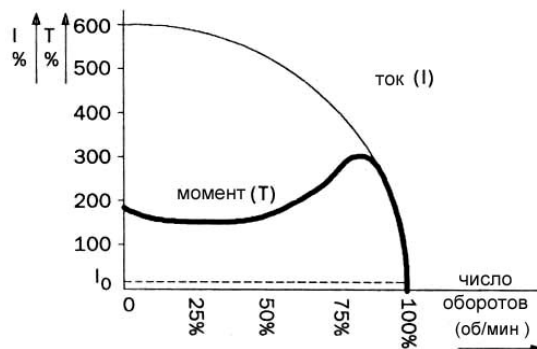


Рис. 5.1 Прямое подключение двигателя к питающей сети.

При синхронной скорости ток ротора равен нулю, статор будет потреблять только ток намагничивания (ток намагничивания  $I_0$  необходим для генерации трёхфазного магнитного поля).

### Переключение «звезда» - «треугольник»

При пуске все обмотки двигателя соединяются в «звезду». При соединении в «звезду» напряжение, приходящееся на обмотку двигателя, меньше. Из-за этого более низкого напряжения (380В вместо 660В) ток уменьшается. Через некоторое время обмотки переключаются в треугольник. В этот момент на каждую обмотку приходится напряжение 380В. Если использовать переключение «звезда» - «треугольник», можно уменьшить пусковые токи до  $3 - 4 * I_{ном}$ .

При соединении обмоток двигателя в «звезду», и трёхфазное магнитное поле и ток ротора в  $\sqrt{3}$  раз меньше, чем при соединении в «треугольник», на всём диапазоне скоростей. Поэтому момент двигателя будет в 3 раза меньше, чем при соединении в «треугольник».

Переключение «звезда» - «треугольник» может быть применено для двигателей, предназначенных для питания 380/660В при напряжении питающей сети 380В.

Быстрое переключение со «звезды» на «треугольник» может привести к кратковременному коммутационному всплеску тока, всё ещё во много раз большему, чем  $I_{ном}$ . (смотрите рисунок 5.2)

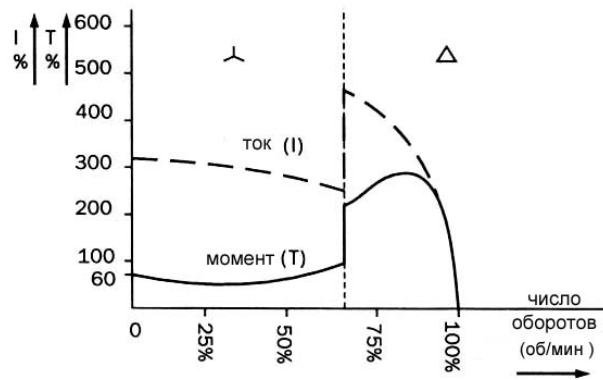


Рис 5.2 Изменение тока и момента при переключении звезда-треугольник.

Изменение напряжения при переключении «звезда» - «треугольник» представлено на рисунке 5.3. В течение нескольких секунд к обмоткам приложено более низкое напряжение. Через некоторое время происходит переключение в треугольник и полное напряжение (380В) прикладывается к обмоткам.

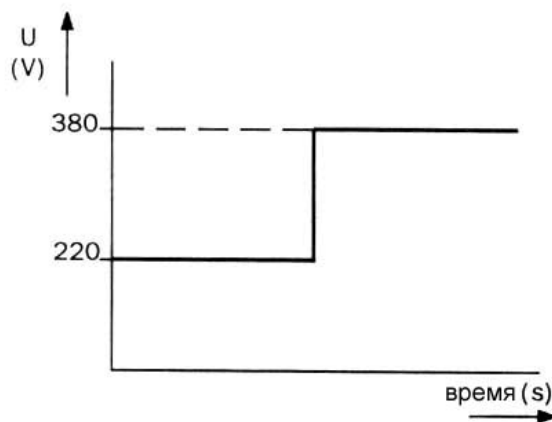


Рис. 5.3 Изменение напряжения при переключении звезда-треугольник.

### Мягкий пускатель

Мягкий пускатель позволяет осуществить плавный переход без скачка напряжения, который имеет место при переключении «звезда» - «треугольник», поскольку он электронным способом увеличивает напряжение с течением времени. Мягкий пускатель может ограничить пусковой ток до  $2,5 - 3 \times I_{ном}$ , в зависимости от вида применения.

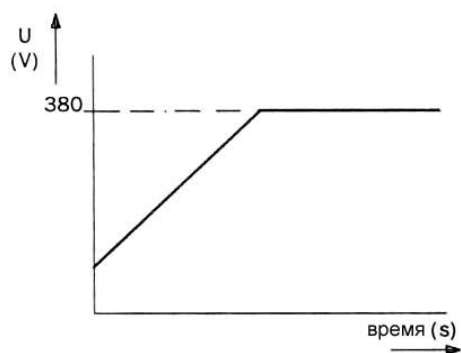


Рис. 5.4 Изменение напряжения с мягким пускателем

### **Частотно регулируемый двигатель**

Позже мы увидим, как пусковой ток двигателя, управляемого преобразователем частоты не будет возрастать больше, чем  $1,5 \times I_{\text{ном}}$ .

Это ограничение пускового тока – только одна из многих характеристик преобразователя частоты. В дальнейшем мы подробно обсудим это.

## ГЛАВА 6

### Правильный выбор мощности двигателя для механизма

#### Пример вычисления

Будем предполагать, что двигатель управляет механизмом напрямую, без трансмиссии и т.п.

Момент, требуемый механизмом, постоянный и равен 48 Нм на всём диапазоне скоростей от нуля до номинальной скорости.

Каталог двигателей даёт много информации о двигателях с различной мощностью и различными скоростями.

Синхронная Скорость n об/мин	Размеры	P <sub>ном</sub> кВт	n <sub>ном</sub> об/мин	Выход	cos φ	I <sub>ном</sub> при 380 В, А	I <sub>a</sub> /I <sub>n</sub>	T <sub>a</sub> /T <sub>n</sub>	T <sub>з</sub> /T <sub>n</sub>	T <sub>к</sub> /T <sub>n</sub>	Момент инерции кг/м <sup>2</sup>
3000	ZK 132 SK2	5.5	2860	85	0.91	10.8	6	2.4	2.1	2.7	0.020
	ZK 160 MK2	11	2890	87	0.90	21.4	6.2	2.6	2.2	2.8	0.040
	ZK 160 M2	15	2910	88	0.91	28.4	7.2	2.6	2.1	3.2	0.050
1500	ZK 132 SK2	4	1420	83	0.83	8.8	6.2	2.4	2	2.8	0.0135
	ZK160M4	11	1455	89	0.89	22.4	6	2.5	2.2	2.5	0.073

*каталог двигателей*

#### Выбор правильного двигателя

Выберем двигатель, мощностью 5.5 кВт из каталога двигателей.

Решение:

- Вычисление номинального момента (T<sub>ном</sub>):

$$T_{\text{ном}} = (9.55 * P_{\text{ном}}) / n_{\text{ном}}$$

Подставив значения, получим:

$$T_{\text{ном}} = (9.5 * 5500) / 2860 = 18 \text{ Нм}$$

Кроме того, каталог двигателей даёт информацию о пусковом моменте (T<sub>a</sub>) и максимальном моменте (T<sub>к</sub>), которая представлена в виде отношения.

- Вычисление пускового момента (T<sub>a</sub>):

$$\text{Отношение} = T_a / T_{\text{ном}} = 2.4$$

Отсюда:

$$T_a = 2.4 * T_{\text{ном}}$$

$$T_a = 2.4 * 18 = 43 \text{ Нм}$$

- Вычисление максимального момента ( $T_k$ ):

$$\text{Отношение} = T_k/T_{\text{НОМ}} = 2.7$$

Отсюда:

$$T_k = 2.7 * T_{\text{НОМ}}$$

$$T_k = 2.7 * 18 = 48 \text{ Нм}$$

- Вычисление седлового момента ( $T_z$ ):

$$\text{Отношение} = T_z/T_{\text{НОМ}} = 2.1$$

Отсюда:

$$T_z = 2.1 * T_{\text{НОМ}}$$

$$T_z = 2.1 * 18 = 37.8 \text{ Нм}$$

Эти четыре параметра  $T_a$ ,  $T_{\text{НОМ}}$ ,  $T_k$  и  $T_z$  позволяют нарисовать полную кривую момент/скорость.

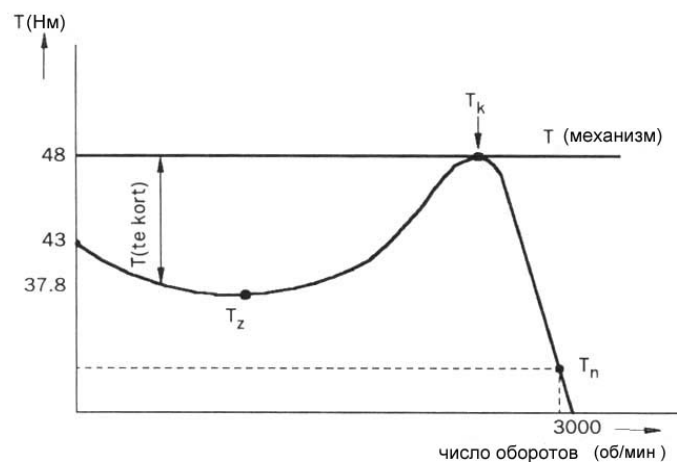


Рис. 6.1 Кривая момент/скорость для двигателя 5,5 кВт

Давайте предположим, что в нашем распоряжении механизм, с постоянным моментом, например, 48 Нм и двигатель мощностью 5.5 кВт. В этом случае двигатель будет не в состоянии вращать механизм. Двигатель 5.5 кВт не обладает достаточным пусковым моментом для вращения механизма. Механизм требует момент 48 Нм, а двигатель может обеспечить только пусковой момент 43 Нм.

**Выберем двигатель 15 кВт.**(Смотрите каталог двигателей)

- Вычисление номинального момента ( $T_n$ ):

$$T_{ном} = (9.55 * P_{ном})/n_{ном}$$

После подстановки числовых значений:

$$T_{ном} = (9.55 * 15000)/2910 = 49 \text{ Нм}$$

- Вычисление пускового момента ( $T_a$ ):

$$\text{Из каталога} = T_a/T_{ном} = 2.6$$

$$\text{Отсюда: } T_a = 2.6 * T_{ном}$$

После подстановки числовых значений:

$$T_a = 2.6 * 49 = 127 \text{ Нм}$$

- Вычисление максимального момента:

$$\text{Из каталога} = T_k/T_{ном} = 3.2$$

$$\text{Отсюда: } T_k = 3.2 * T_{ном}$$

Подставляя числовые значения, получим:

$$T_k = 3.2 * 49 = 156 \text{ Нм}$$

- Вычисление седлового момента ( $T_z$ ):

$$\text{Из каталога} = T_z/T_{ном} = 2.1$$

$$\text{Отсюда: } T_z = 2.1 * T_{ном}$$

После подстановки значений, получим:

$$T_z = 2.1 * 49 = 103 \text{ Нм}$$

Эти параметры позволяют нарисовать кривую момент/скорость для этого двигателя ( $P = 15 \text{ кВт}$ ).



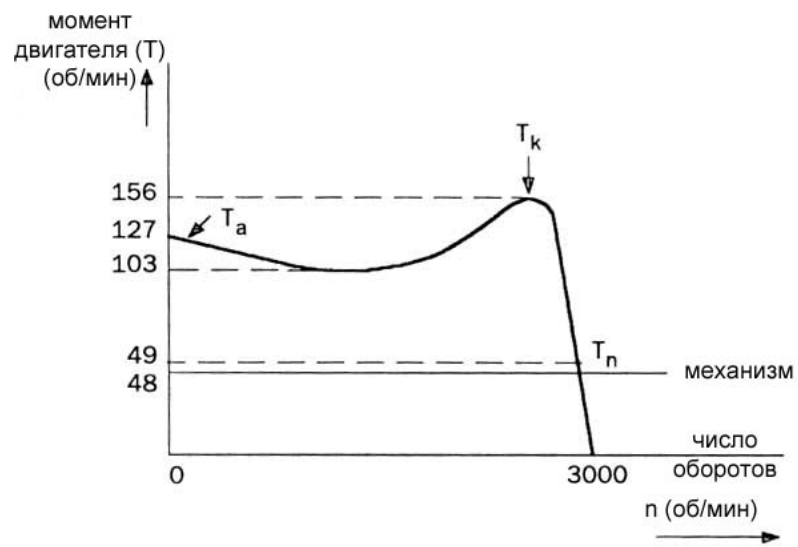


Рис. 6.2 Кривая момент/скорость для двигателя 15 кВт

Этот пример ясно показывает, что каталог двигателей хорошо помогает в правильном выборе двигателя для механизма.

Итак:

Если  $n = 0$ , то:

$$\begin{aligned}
 \text{Избыточный момент} &= T_{\text{мотор}} - T_{\text{механизма}} \\
 &= 127 \text{ Нм} - 48 \text{ Нм} \\
 &= 79 \text{ Нм}
 \end{aligned}$$

## ГЛАВА 7

### Области работы двигателей

Теперь мы зададимся вопросом: «Может ли двигатель с беличьей клеткой обеспечить тормозной момент?»

Предположения:

Четырех полюсный электродвигатель с беличьей клеткой ( $n_s = 1500$  об/мин) подключён к трёхфазной сети питающего напряжения. Со стороны вала двигатель соединяется с дизельным двигателем. Этот дизельный двигатель снабжён «педалью ускорения», позволяющей управлять мощностью.

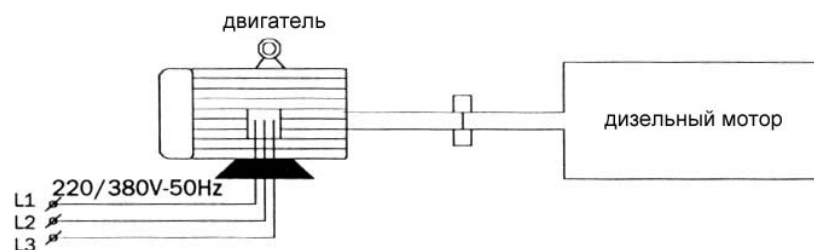


Рис. 7.1

Возможны три случая:

1. Двигатель с беличьей клеткой вращает дизельный двигатель.
2. Двигатель с беличьей клеткой и дизельный двигатель сбалансированы (держат друг друга).
3. Дизельный двигатель вращает двигатель с беличьей клеткой.

Рассмотрим все три случая соответственно.

*1. Мотор с беличьей клеткой вращает дизельный двигатель.*

Если мы не «давим на акселератор», двигатель с беличьей клеткой вращает дизельный двигатель. Скорость будет немного ниже 1500 об/мин.

*2. Двигатель с беличьей клеткой и дизельный двигатель держат друг друга, «сбалансированы».*

«Нажатием на акселератор» мы увеличиваем скорость дизельного двигателя. Электродвигатель с беличьей клеткой производит всё меньший и меньший момент ( $T$ ) и, как результат, ток двигателя уменьшается.

В определённый момент времени оба двигателя вращаются с одинаковой скоростью. Момент ( $T$ ), производимый беличьей клеткой двигателя в это время, равен нулю.

Ток намагничивания Двигатель потребляет только ток намагничивания ( $I \cdot \sin\phi$ ) для поддержания целостности магнитного поля.

Сверхсинхронный режим	3. Дизельный двигатель вращает асинхронный двигатель с беличьей клеткой. «Нажатием на акселератор» мы заставляем ротор асинхронного двигателя вращаться со скоростью больше, чем 1500 об/мин. Режим, когда ротор вращается быстрее, чем скорость вращения магнитного поля статора, называется сверхсинхронным режимом. Момент двигателя меняет свой знак, ток двигателя меняет направление. Кроме того, ток двигателя возрастает и $\cos\varphi$ меняет знак.
Тормозной момент	Момент электродвигателя направлен противоположно направлению вращения, другими словами, двигатель вырабатывает тормозной момент.
Энергия торможения	Двигатель с беличьей клеткой не получает энергию от питающей сети, а возвращает энергию в сеть. В сверхсинхронном режиме двигатель с беличьей клеткой работает, как генератор. Энергия торможения преобразуется в электрическую и возвращается в сеть.

Все три случая представлены на рисунке 7.2

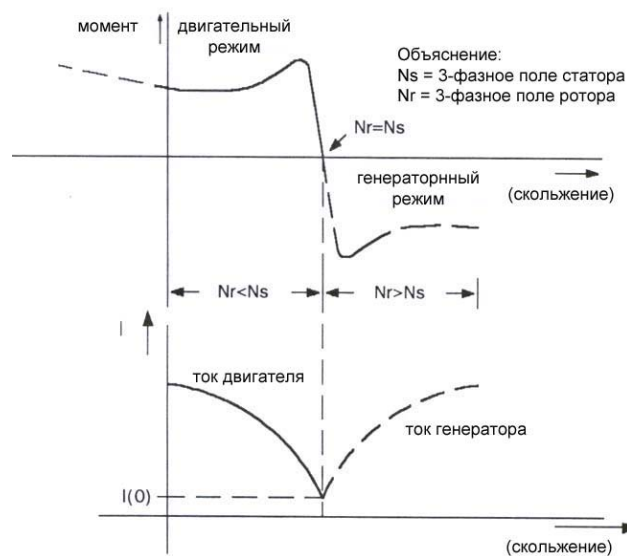


Рис. 7.2 Диаграмма тока в двигательном, нейтральном и генераторном режимах.

## Четырех квадрантный режим

### Что такое четырех квадрантный режим?

Мы уже видели, что можно нарисовать несколько кривых момент/скорость. Всякий раз мы предполагали, что вал двигателя вращается только в одну сторону. Если смотреть на двигатель со стороны вала, то вращение по часовой стрелке называется (считается) положительным.

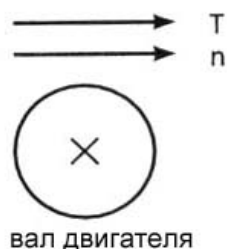


Рис. 7.3 Двигатель со стороны вала.

Режим квадрантов объясним на примере лифта.

Лифт движется вертикально под воздействием двигателя и противовеса.

Противовес имеет вес 600 кг.

Лифт имеет вес 500 кг при пустой кабине и 750 кг, когда кабина полная.

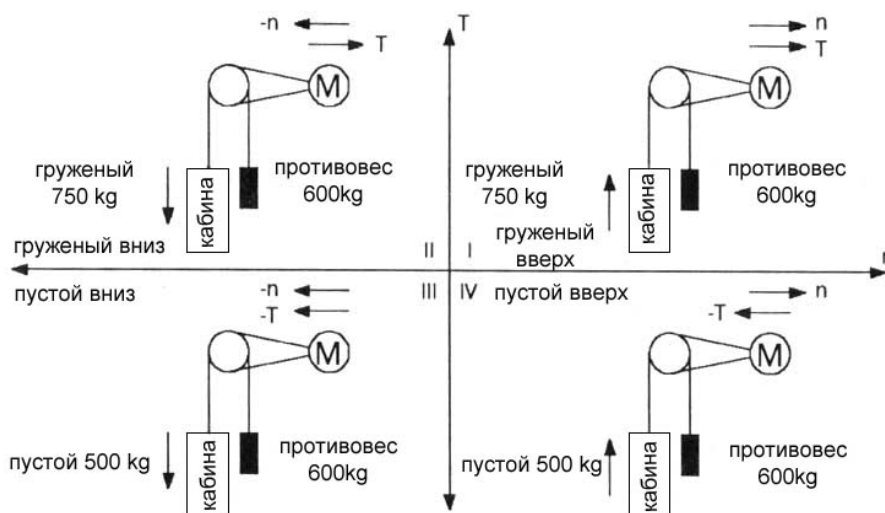


Рис. 7.4 Режим работы в четырёх квадрантах.

Возникают ситуации, когда кабина лифта тяжелее противовеса и когда противовес тяжелее кабины лифта. Это означает, что в некоторых ситуациях направление вращения двигателя изменяется для обеспечения правильной работы лифта.

Двигательный режим при вращении по часовой стрелке.

### Квадрант I (+n, +T)

*{Двигательный режим при вращении по часовой стрелке}*

Кабина лифта стоит на первом этаже. Люди входят и полная кабина едет на восьмой этаж. Двигатель должен выполнять работу в первом квадранте. Масса  $750 - 600 = 150$  кг должна быть преодолена.

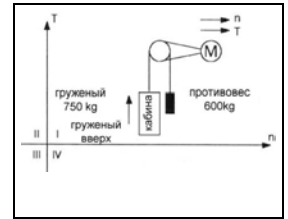


Рис. 7.5  
Квадрант I

Генераторный режим при вращении против часовой стрелки.

### Квадрант II (-n, +T)

*{Генераторный режим при вращении против часовой стрелки}*

На восьмом этаже люди выходят и столько же людей входят в кабину лифта. Затем полная кабина идёт на пятый этаж. Прилагаемый балансирующий момент, направленный в противоположную сторону, должен гарантировать, что лифт не будет ускоряться при движении на пятый этаж. Двигатель обеспечивает торможение во втором квадранте.

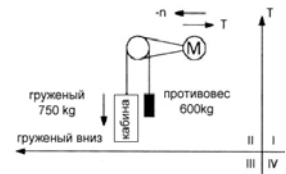


Рис. 7.6  
Квадрант II

Двигательный режим при вращении против часовой стрелки.

### Квадрант III (-n, -T)

*{Двигательный режим при вращении против часовой стрелки}*

На пятом этаже все люди вышли из кабины лифта и она осталась пустой. Масса противовеса стала больше массы кабины лифта. На первом этаже кто-то нажал на кнопку вызова кабины лифта. Это означает, что двигатель должен работать в двигательном режиме, чтобы опустить кабину лифта.

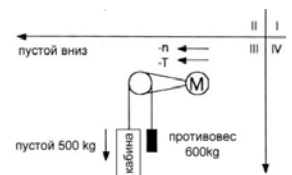


Рис. 7.7  
Квадрант III

Генераторный режим при вращении против часовой стрелки.

### Квадрант IV (+n, -T)

*{Генераторный режим при вращении против часовой стрелки}*

Как только кабина лифта пришла на первый

этаж, один человек, весом 80 кг, входит в нее. Затем, лифт поднимается вверх на шестой этаж. С одним человеком в кабине лифта масса противовеса (600 кг) больше, чем общий вес кабины лифта (500 + 80 = 580 кг). Кабина лифта стремится

разогнаться при движении вверх.

Двигатель должен замедлять

движение кабины в четвертом квадранте.

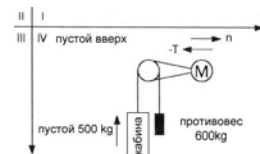


Рис. 7.8  
Квадрант IV

В заключение можно сказать, что могут возникнуть три ситуации (как и в случае с дизельным двигателем):

Четырех квадрантный режим работы – это способность двигателя работать в обоих направлениях, как в двигательном, так и в генераторном режиме.

1. Двигательный режим:

двигатель с беличьей клеткой движет лифт.

2. Генераторный режим:

лифт движет двигатель с беличьей клеткой.

3. Нейтральный режим:

двигатель с беличьей клеткой и лифт удерживают друг друга (сбалансированы).

Мы говорим о четырех квадрантном режиме, когда двигатель способен работать и двигателем и генератором в обоих направлениях вращения (по часовой стрелке и против). При помощи четырех квадрантного режима работы можно управлять работой лифта.

# ГЛАВА 8

## Управление двигателем

Часто необходимо для лучшего использования двигателя регулировать его скорость и момент. Двигатель должен быть «гибким». Гибкость означает, что двигатель должен иметь диапазон регулирования от 0 об/мин до номинальной скорости и выше. Особенно в промышленных условиях двигатель должен быть адаптирован к производственному процессу. Двигатель должен быть всегда регулируемым.

### Диапазон регулирования

Нижеследующий обзор показывает диапазоны регулирования для:

- серводвигателей
- двигателей постоянного тока
- частотно-регулируемых трехфазных асинхронных двигателей

*Серводвигатели:* 1:10000.

Это означает, что пропорция между наибольшей и наименьшей скоростями равна 10000. Серводвигатели производятся для максимальной мощности до 10 кВт.

*Двигатели постоянного тока с обратной связью по скорости:* 1:1000

Это означает, например, что область регулирования заключена, например, в диапазоне от 3 до 3000 об/мин.

*Трёхфазные асинхронные двигатели с преобразователем частоты без обратной связи по скорости:*

Для двигателей мощностью около 1 кВт диапазон регулирования составляет до 1:10, для двигателей мощностью до 100 кВт и выше диапазон регулирования 1:50.

В настоящее время трехфазный асинхронный двигатель, управляемый современным преобразователем частоты, способен иметь характеристики, как у двигателя постоянного тока, благодаря использованию быстрой микропроцессорной техники. Это даёт пользователю дополнительные преимущества, поскольку двигатель постоянного тока требует дополнительное обслуживание по сравнению с другими решениями (графитовые щётки и т.д.),

в то время, как трёхфазный асинхронный двигатель практически не требует обслуживания и имеет более надёжную конструкцию.

### Взрывозащищенные двигатели

При использовании преобразователя частоты с взрывозащищенными двигателями, необходимо произвести пересертификацию квалификационным сертификационным органом. Обычный сертификат будет недействителен.

## Компенсация тока намагничивания

Компенсация тока намагничивания при помощи так называемых «cos φ конденсаторов» не является необходимой при управлении двигателем от преобразователя частоты. Будет даже лучше, если эти конденсаторы будут вообще удалены. Высшие гармоники тока питающей сети, генерируемые преобразователем частоты, могут стать причиной перегрева конденсаторов.

# ГЛАВА 9

## Преобразователь частоты

Преобразователь частоты располагается между источником питающего напряжения и двигателем. Преобразователь частоты позволяет двигателю вращаться с определённым моментом (Т) или скоростью (n).



Рис. 9.1 220/380V-50Hz

## Блок-схема преобразователя частоты

К преобразователям частоты применима следующая блок-схема:

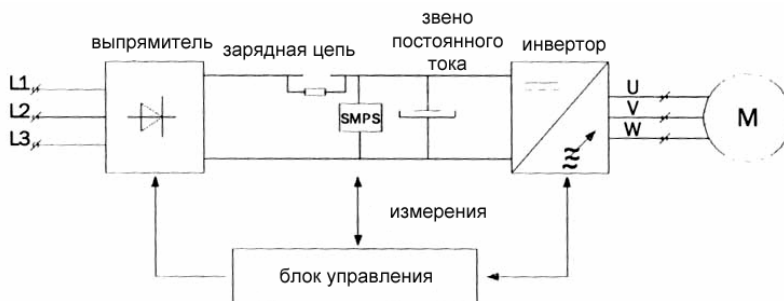


Рис. 9.2 Блок-схема преобразователя частоты.

Блок-схема преобразователя частоты



переменное  
напряжение  
|  
постоянное  
напряжение  
|  
регулируемое  
переменное  
напряжение

## Принципы работы преобразователя частоты

Переменное напряжение преобразуется в постоянное напряжение. Это постоянное напряжение посылается на выход в виде импульсов, как положительных, так и отрицательных и генерирует синусоидальный ток в двигателе. Частота этой «синусоидальной» волны может регулироваться изменением количества импульсов чередующегося положительного и отрицательного напряжения в единицу времени. Возможно также управлять амплитудой выходного напряжения за счет ширины пульсации постоянного напряжения.

Трёхфазное питающее напряжение выпрямляется шестью внутренними диодами (выпрямитель). Выпрямленное напряжение на конденсаторах контура постоянного тока равно максимальной амплитуде линейного напряжения ( $380 * \sqrt{2} = 540 \text{ В}$ ).

В процессе подачи силового питания зарядный ток емкостей промежуточного контура постоянного тока ограничивается зарядной цепочкой, защищая источник питания и предохранители от пиковых бросков тока.

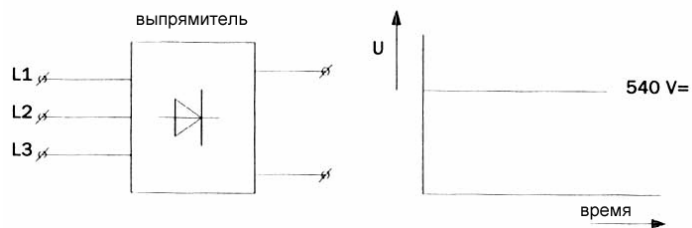


Рис. 9.3 Выпрямитель.

## Инвертор

*Инвертор* преобразует постоянное напряжение в переменное напряжение. Он может быть представлен в виде шести «ключей». Каждый ключ прерывает постоянный ток в течение некоторого времени, таким образом, позволяя генерировать напряжение, близкое к синусоидальному.

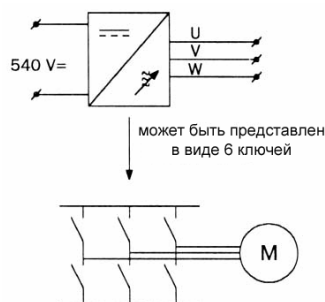


Рис. 9.4 Инвертор.

Рисунок 9.5 представляет изменение во времени постоянного напряжения, управляемого инвертором. Это напряжение генерирует ток в двигателе, показанный на рисунке 9.6.

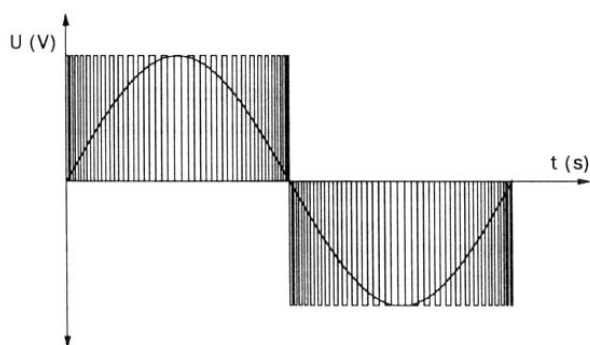


Рис. 9.5 Диаграмма напряжения.

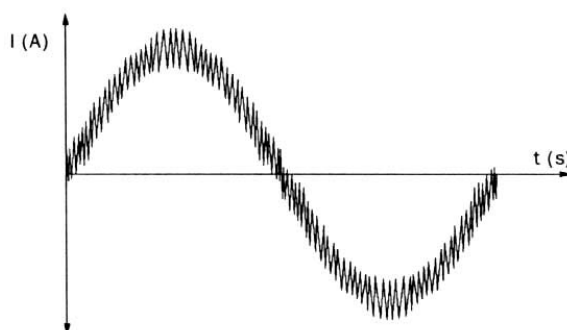


Рис. 9.6 Диаграмма тока.

## Инверторные ключи

В качестве инверторных ключей используются следующие компоненты:

### - Тиристор

Тиристоры пригодны для работы в широком диапазоне токов и напряжений (даже очень высоких). Они не очень чувствительны и очень легко перегружаются. У них большие потери передачи, но общая передаваемая мощность очень велика.

Тиристоры больше не используются по следующим причинам:

- тиристор относительно медлителен
- для тиристора необходимы большие коммутирующие цепочки (он не запирается автоматически) и поэтому инвертор частоты должен быть достаточно большим.

### - Биполярный транзистор

Силовой транзистор пригоден для широкого диапазона токов и напряжений (даже относительно больших). Транзисторы больше не используются.

Преимущества  
и недостатки  
транзистора

*Преимущества* транзисторов:

- высокая скорость переключения
- малые коммутационные потери
- низкие потери передачи

*Недостатки* транзисторов

- требуется высокая мощность управления
- надежен только при строго определенном управлении током/напряжением

- **MOSFET (Метал-оксид-силиконовый полевой транзистор)**

MOSFET пригоден только для малых величин токов и напряжений

Преимущества  
и недостатки  
MOSFET

*Преимущества* MOSFET:

- высокая скорость переключения
- малые коммутационные потери
- низкая мощность управления, что делает частотный инвертор более компактным.

*Недостатки* MOSFET:

- высокие потери передачи
- чувствительность к статическому электричеству
- не предназначен для мощностей выше 2 кВт.

Фирма Emotron использует в своих инверторах частоты IGBT модули.

- **IGBT ( Биполярный транзистор с изолированным затвором)**

IGBT – это комбинация MOSFET и транзистора.

IGBT ведет себя, как идеальный переключающий элемент.

- требуется очень малая мощность управления, таким образом преобразователи частоты могут быть компактными
- допускает высокую частоту коммутации
- низкие коммутационные потери
- низкие потери передачи
- устойчив к очень высоким перегрузкам, т.е. прочен
- возможно исполнение в виде изолированного модуля.

IGBT - это  
комбинация  
MOSFET+  
транзистор

Преимущества IGBT:  
Энергосбережение и  
низкий уровень шума

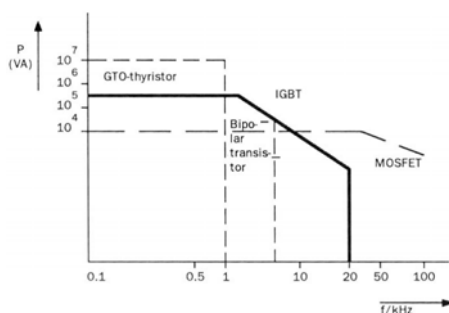


Рис. 9.7 Обзор компонентов силовой электроники

Увеличивая частоту коммутации, можно генерировать более синусоидальный ток в двигателе. При этом увеличение нагрева двигателя, производимое инверсией частоты, очень мало и почти несущественно для маломощных двигателей. Увеличением частоты коммутации можно ограничить дополнительный шум двигателя, возникающий при модуляции.

## Импульсный источник питания

Одним из элементов блок-схемы (рис 9.2) является импульсный источник питания (SMPS).

SMPS используется в большинстве преобразователей частоты.

SMPS гарантирует, что напряжение питания цепей управления электроникой преобразователя частоты всегда постоянно.

SMPS берет свою энергию от конденсаторов звена постоянного тока!

Недостатками трансформатора при питании от цепи переменного тока являются: большие габариты и вес при низком к.п.д.(40% - 50%).

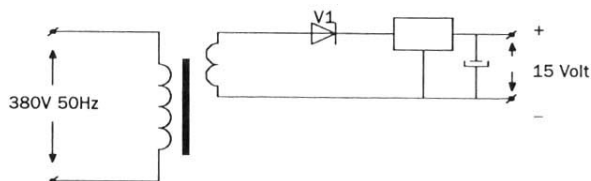


Рис. 9.8 Трансформатор

Принцип работы SMPS:

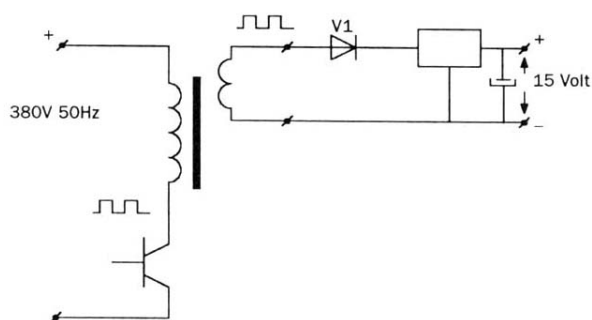


Рис. 9.9 Импульсный источник питания (SMPS)

Преимущества импульсного источника питания (SMPS) в сравнении с трансформатором:

- высокий к.п.д. (до 90%)
- высокая частота коммутации позволяет использовать легкий трансформатор с ферритовым сердечником (т.е. он компактный)
- благодаря управляющей электронике, SMPS легко адаптировать к большим колебаниям питающего напряжения и нагрузки.

# ГЛАВА 10

## Принцип частотного инвертирования

Функция преобразователя частоты

Преобразователь частоты способен преобразовывать напряжение и частоту, поступающие из обычной сети (220 В/380В – 50Гц) в регулируемые напряжение (U) и частоту (f).

Три условия при различных скоростях двигателя

### Принцип частотного инвертирования

Преобразователь частоты определяет три условия при различных скоростях двигателя:

- 1 он изменяет скорость магнитного поля в двигателе
- 2 он держит величину магнитного поля в двигателе постоянной
- 3 он обеспечивает плавное вращение 3-х фазного поля (не пошаговое)

Мы объясним все три условия.

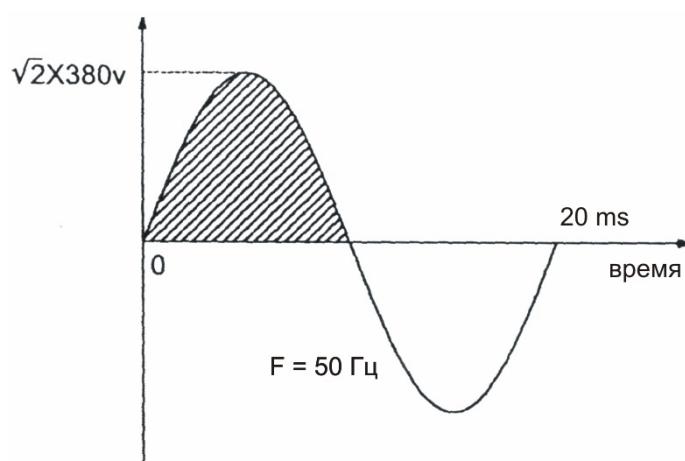
#### 1 Изменение скорости магнитного поля.

Для того, чтобы удовлетворять этому условию, необходимо изменять частоту выходного напряжения преобразователя частоты.

#### 2 Постоянная величина магнитного поля в двигателе.

Электрическая энергия поставляется сетевым источником питания 220/380В – 50Гц. Двигатель сконструирован для вполне определенного напряжения и частоты питающей сети. Следующее суждение применимо к двигателям, которые подключены непосредственно к питающей сети:

- постоянная величина магнитного поля
- постоянная скорость магнитного поля (частота питающей сети 50Гц).



Площадь под синусоидальной формой напряжения определяет величину (силу) магнитного поля.



Рис. 10.1 Поверхностная мера для магнитного поля

Изменение магнитного поля

Величина (сила) магнитного поля может быть изменена посредством:

- изменение только напряжения (U)
- изменение только частоты (f)

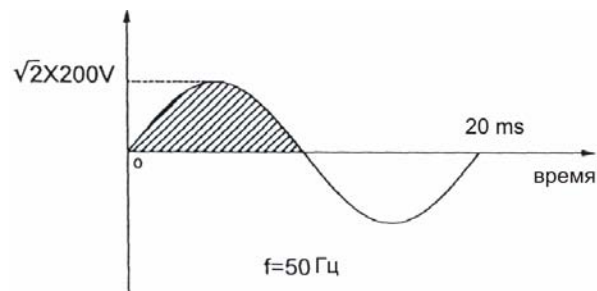


Рис. 10.2 Магнитное поле при  $U = 200\text{В}$  и  $f = 50\text{Гц}$

Изменение  
напряжения

*Изменение напряжения (U):*

При изменении напряжения от 380В до 200В (Рис. 10.2) площадь под синусоидальной кривой становится меньше.

В результате сила магнитного поля уменьшится, и двигатель не может больше создавать требуемый момент.

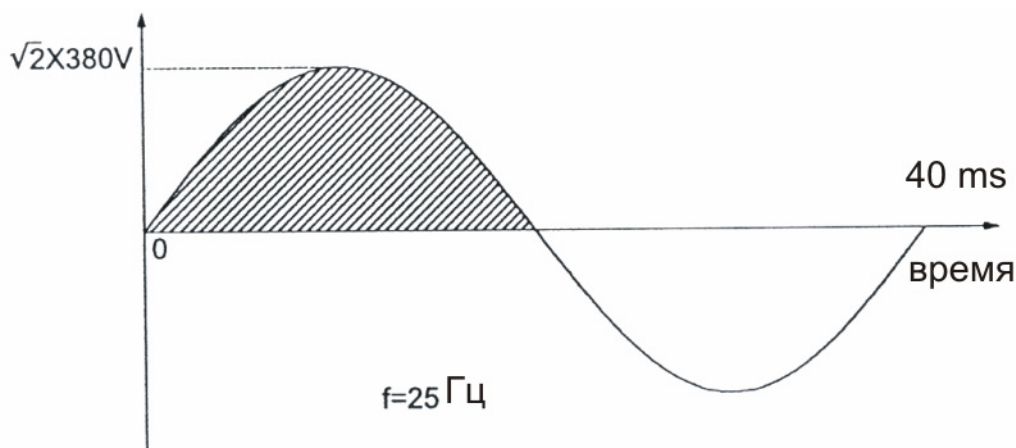


Рис. 10.3 Магнитное поле при  $U = 380 \text{ В}$  и  $f = 25 \text{ Гц}$ .

Изменение частоты

*Изменение частоты f:*

При изменении частоты от 50 Гц до 25 Гц, скорость меняется. Это означает, что большее поле может генерироваться в двигателе. Это магнитное поле настолько сильно, что мотор становится магнитно-насыщенным. Результат: вращение вала нестабильное, и возрастает температура двигателя.

Отношение U/f

*Вывод:*

Сила трёхфазного магнитного поля зависит от отношения напряжение/частота (U/f), обеспечиваемого источником питания.

Величина U/f

Для двигателя, подключенного к питающей сети, величина U/f есть:

$$U/f = 380(\text{В})/50(\text{Гц}) = 7,6$$

## Вольт-герцовая характеристика

Преобразователи частоты держат величину магнитного поля постоянной при различных скоростях. При низких частотах это обеспечивается изменением величины напряжения на клеммах двигателя пропорционально частоте. Это выражено вольт-герцовой характеристикой ( $U/f$ ).

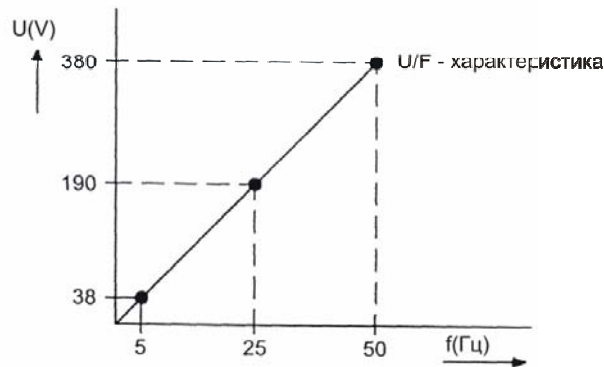


Рис. 10.4 Характеристика  $U/f$ .

Характеристика применена к двигателю, сконструированному для величины  $U/f = 7,6$  В/Гц.

Вычисление с параметрами, указанными на рисунке 10.4:

$$U/f = 380(\text{В})/50(\text{Гц}) = U/f = 190(\text{В})/25(\text{Гц}) = U/f = 38(\text{В})/5(\text{Гц}) = 7,6$$

В точке (380 В, 50 Гц) преобразователь частоты обеспечивает напряжение и частоту равными напряжению и частоте питающей сети. Для того, чтобы поддерживать это поле постоянным при более низких частотах, напряжение и частота должны меняться. При более низких скоростях, например при 25 Гц, на клеммах двигателя будет напряжение 190 В, и частота 25 Гц.

Это поясняется рисунками 10.5 и 10.6.

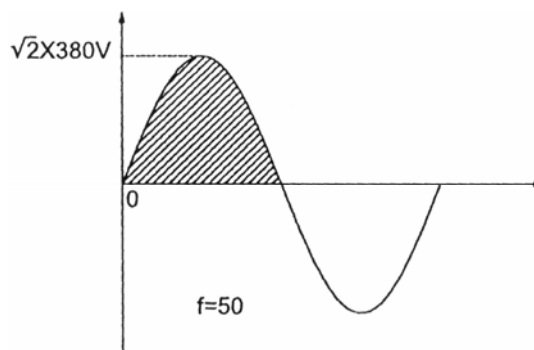


Рис.10.5 Время периода 20 мс.

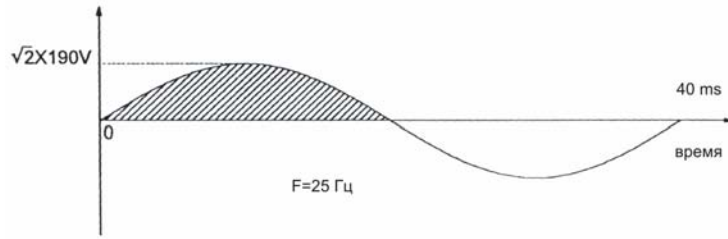


Рис. 10.6 Время периода 40 мс.

Площади под обеими синусоидальными кривыми одинаковы. Одинаковая площадь означает одинаковую силу магнитного поля.

Мы должны уйти от принципа, что преобразователь частоты всегда питает двигатель с напряжением 380 В/50 Гц. Преобразователь частоты гарантирует, что отношение  $U/f$  остаётся постоянным при низких частотах.

### Изменение отношения $U/f$

Магнитное поле, генерируемое в двигателе зависит от отношения  $U/f$ .

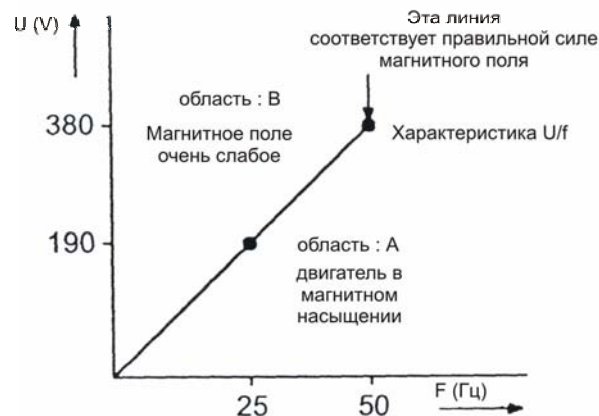


Рис. 10.7

### Увеличение отношения $U/f$

Магнитное насыщение

Когда мы увеличиваем отношение  $U/f$ , двигатель перейдёт в состояние магнитного насыщения (область В). Насыщенный двигатель характеризуется неравномерным вращением вала и рывками. Температура двигателя также повышается очень быстро и токи больше несинусоидальные.

### Уменьшение отношения $U/f$

Недомагничивание

Когда мы уменьшаем отношение  $U/f$ , магнитное поле очень слабое. Двигатель не намагничен (область А). Момент, производимый двигателем, очень слаб. Правильное отношение  $U/f$  гарантирует постоянно генерируемый момент (Т).

Постоянное отношение  $U/f$  необходимо, чтобы избежать ослабления момента на всём диапазоне частот (от 0 Гц до основной частоты 50 Гц). График 10.7 относится к двигателю с величиной  $U/f = 7.6$  В/Гц. Неправильно установленное



на преобразователе частоты значение  $U/f$  приводит к некорректному намагничиванию двигателя с беличьей клеткой.

*Трёхфазное поле должно вращаться равномерно (не пошагово).*

Мы объясним это условие на примере: когда мы едем со средней скоростью 100 км/ч, это не означает, что мы едем постоянно с этой скоростью в течение всего часа. Иногда мы едем со скоростью 120 км/час, а иногда - 80 км/час, но средняя скорость 100 км/час.

Равномерное вращение означает, что трёхфазное поле покрывает окружность с постоянной угловой скоростью. В этом случае средняя угловая скорость равна скорости в любой точке окружности.

Ни в одном из многочисленных типов преобразователей частоты это условие не выполняется полностью, что является причиной всех случаев «плохого» поведения двигателя. Это даёт следующие побочные эффекты:

- мотор вращается «квадратно» при низких скоростях;
- в двигателе выделяется большое количество дополнительного тепла. Для того, чтобы избежать чрезмерного роста температуры, двигатель не должен быть непрерывно нагружен при низкой скорости.

Если выполнены все **три условия**, преобразователь частоты обеспечивает следующее:

Под влиянием уменьшения частоты (и, поэтому, также и напряжения) на двигателе, кривая момент/скорость перемещается влево.

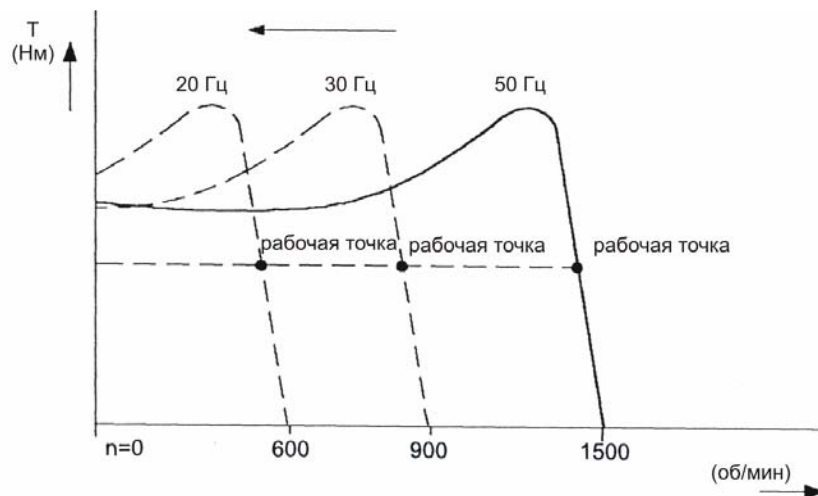


Рис. 10.8

Кривая момент/скорость перемещается влево

При уменьшении частоты кривая момент/скорость остаётся неизменной

Пока преобразователь частоты держит отношения  $U/f$  постоянным, кривая момент/скорость не будет меняться. Поэтому, номинальный момент ( $T$ ) останется неизменным на всём диапазоне частот.

Под влиянием уменьшения частоты (и напряжения) кривая момент/скорость целиком смещается влево. Это также применимо по отношению к кривой тока.

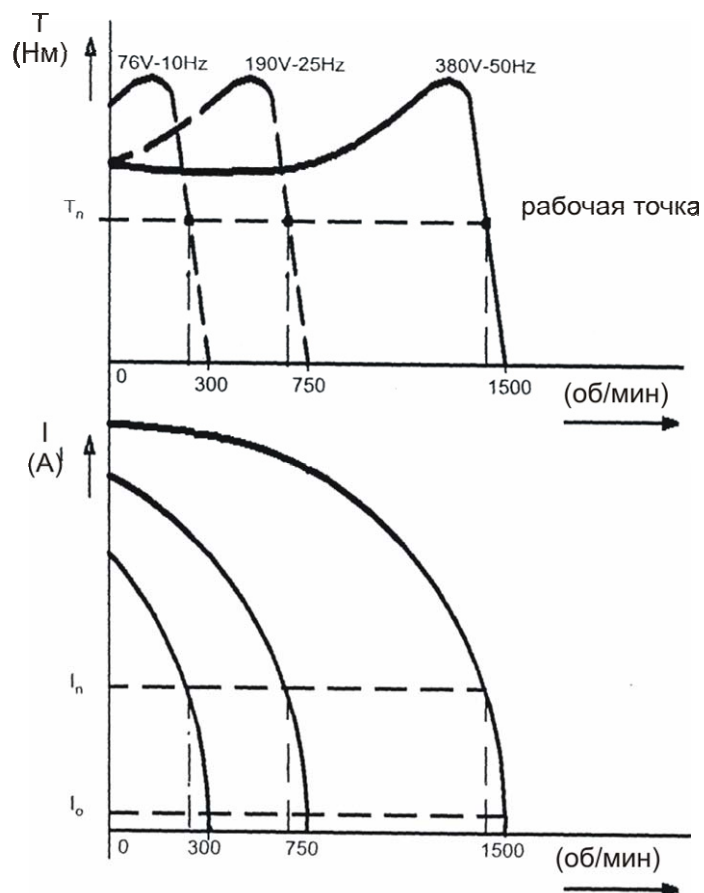


Рис. 10.9 Кривая тока

При увеличении частоты от нуля, ток ускорения, потребляемый двигателем, никогда не будет слишком большим при обеспеченном номинальном моменте ( $T$ ). Поскольку инвертор частоты может обеспечить только  $1,5 \cdot I_{ном}$ , мы будем всегда находиться справа от максимального момента (см. главу 4) рабочей области двигателя.

# ГЛАВА 11

## Ослабление поля

Магнитное поле  
уменьшается при  
уменьшении  
отношения  $U/f$

Преобразователь частоты может увеличивать выходную частоту до величины большей, чем номинальная частота двигателя. Преобразователь частоты, однако, не способен обеспечить напряжение выше, чем напряжение питающей сети. При выходной частоте выше номинальной величина отношения напряжение/частота уменьшается. Меньшее значение отношения  $U/f$  проявляется в уменьшении магнитного поля и, как следствие, уменьшении момента ( $T$ ). Поэтому, если скорость выше номинальной частоты, - это называется ослаблением поля.

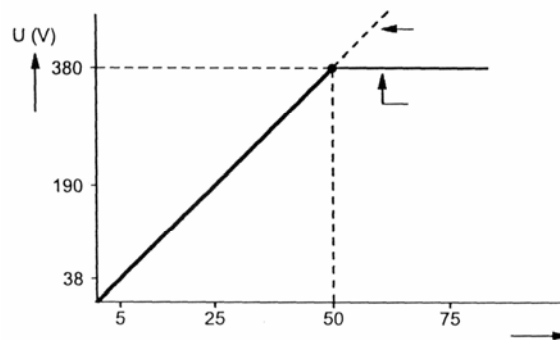


Рис 11.1

В целом кривая момент/скорость и, следовательно, также максимальный момент ( $T_k$ ) изменяется, как квадрат силы магнитного поля, поскольку при определенном скольжении ток ротора пропорционален магнитному полю. Таким образом, момент  $\approx$  (магнитное поле)<sup>2</sup>.

Уменьшение  
момента в случае  
ослабления поля.

*Например:* если номинальное отношение напряжение/частота у двигателя равно 380 В/50 Гц, высота кривой момент/скорость для отношения 380 В/70 Гц, получается умножением номинальной величины на  $(5/7)^2$ . Это означает, что в области ослабления поля мы имеем значительно меньший максимальный момент ( $T_k$ ). Момент ( $T$ ) уменьшается, как квадрат отношения напряжение/частота.

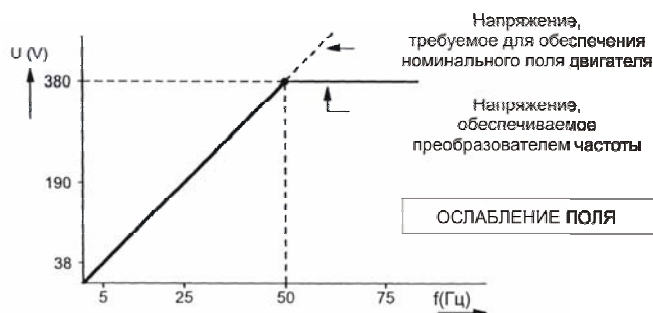


Рис.11.2

Если нарисовать кривую момент/скорость для этого графика, можно увидеть, что кривая момент/скорость падает при частотах больше, чем 50 Гц.

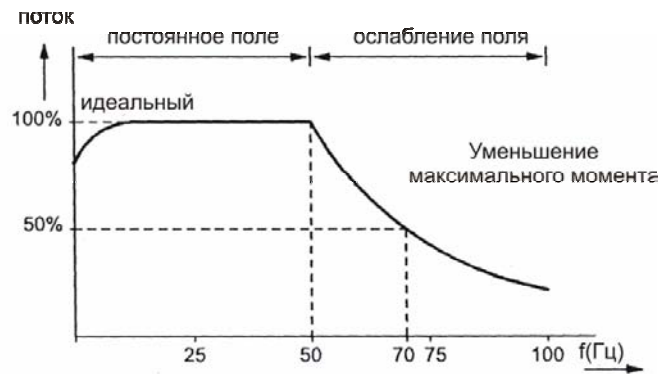


Рис 11.3

Напряжение питающей сети не может больше возрасть (для того, чтобы удерживать величину В/Гц постоянной), а преобразователь частоты не способен обеспечивать напряжение на выходе больше, чем напряжение на входе.

Поэтому, выходное напряжение остаётся постоянным при частоте двигателя большей, чем 50 Гц, что ведёт к уменьшению отношения В/Гц. В результате, сила магнитного поля уменьшается. Вот почему это называется областью ослабления поля. Поскольку при ослаблении поля момент уменьшается, а скорость возрастает, мощность на валу двигателя остаётся постоянной.

$$P = \omega * T$$

При увеличении частоты на выходе преобразователя частоты скорость трёхфазного поля может преодолеть номинальное значение. Это свойство преобразователя частоты имеет ряд преимуществ, например, это могло бы быть полезным при использовании двигателя в области ослабления поля. Однако, мы никогда не должны нагружать двигатель до уровня, превышающий критический момент. Фактически, необходимо поддерживать резерв примерно  $T < 2/3 T_k$ . Можно нагружать двигатель номинальным током. Поскольку момент пропорционален произведению тока двигателя и магнитного поля, то это означает, что выше 50 Гц момент двигателя изменяется обратно пропорционально частоте. Мощность пропорциональна произведению скорости (частоты) и момента и, следовательно, в области ослабления поля мощность двигателя остаётся постоянной.

### Двигатель с номинальной частотой 50 Гц

Преобразователь частоты подключён к питающему напряжению 380 В. Соотношение напряжение/частота для частотного инвертора установлено на:

$$380(\text{В})/50(\text{Гц}) = 7,6$$

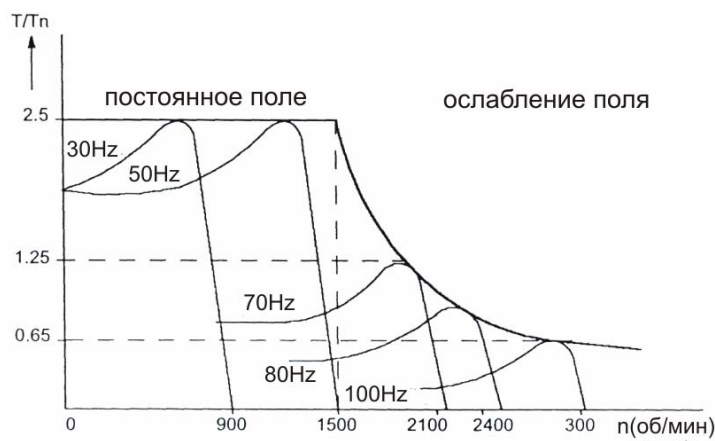


Рис. 11.4

Влияние изменения отношения  $U/f$  на характеристику магнитного потока

Изменение отношения напряжение/частота влияет на характеристику момента. Если мы изменим величину, например, на  $U/f = 380/60 = 6.3$ , это повлияет на магнитный поток (см. рис. 11.5).

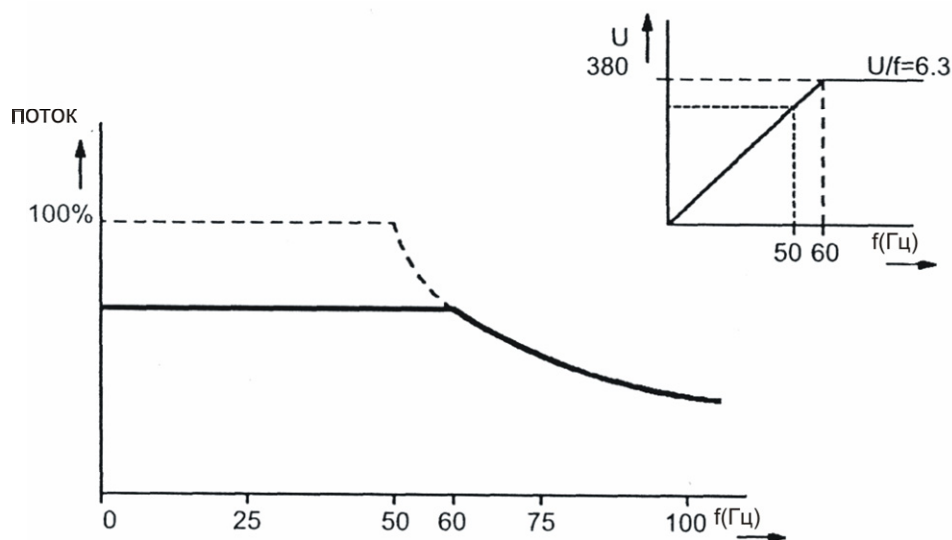


Рис 11.5

Когда величина  $U/f$  уменьшается, номинальное выходное напряжение может быть достигнуто только при большей частоте. В результате, на частоте 50 Гц двигатель подключён к меньшему напряжению. Это даёт постоянный, но меньший момент при большем диапазоне регулирования.

## Двигатель с номинальной частотой 60 Гц

Используя преобразователь частоты, можно подключать двигатель с номинальной частотой 60 Гц (такие двигатели используются в США) к питающей сети с частотой 50 Гц. В этом случае отношение напряжение/частота должно быть установлено по-другому, т.е.  $380 \text{ В}/60 \text{ Гц} = 6.3$ . Отношение напряжение/частота устанавливается точно для оптимального магнитного поля. Двигатель будет вести себя также, как при питании от сети 60 Гц. Момент (Т) остаётся постоянным от 0 до 60 Гц (см рис 11.6).

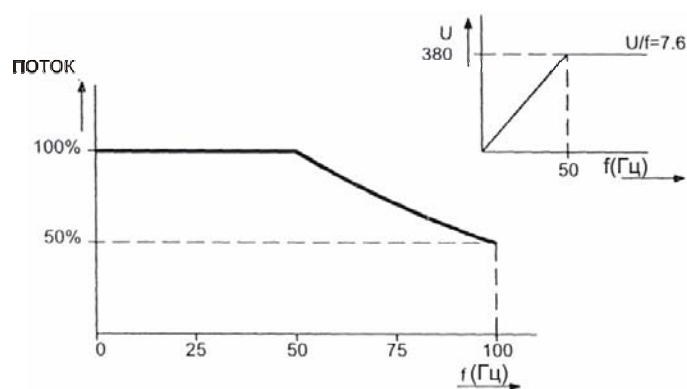


Рис 11.6

# ГЛАВА 12

## I \* R компенсация

Если двигатель, подключённый к преобразователю частоты, вращается с маленькой частотой (от 0 до 5-10 Гц), производимый двигателем момент (Т) уменьшается. Это уменьшение момента на малых частотах объясняется следующим образом:

Активное и реактивное сопротивление  
Обмотка двигателя состоит из активного сопротивления (R) и индуктивного сопротивления ( $X_L$ ). Активное сопротивление (R) зависит от типа используемого провода. Реактивное индуктивное сопротивление ( $X_L$ ) зависит не только от типа материала, но также от частоты. Реактивное сопротивление переменному току ( $X_L$ ) зависит от частоты следующим образом:

$$X_L = 2\pi * f * L$$

Где:

$X_L$  = реактивное сопротивление катушки

f = частота

L = индуктивность

Чем меньше частота, тем меньше величина реактивного сопротивления переменному току. При низких частотах величина активной части сопротивления будет иметь большее влияние, чем реактивная часть. Падение напряжения на активной части остаётся неизменным, в то время, как падение напряжения на реактивной части уменьшается. В результате сила магнитного поля уменьшается. Для того, чтобы компенсировать эту потерю напряжения на низкой скорости, преобразователь частоты обеспечивает дополнительное напряжение. Этим объясняется название I \* R компенсация. В этом случае становится возможным получить более «сильный» момент (Т) при низкой скорости.

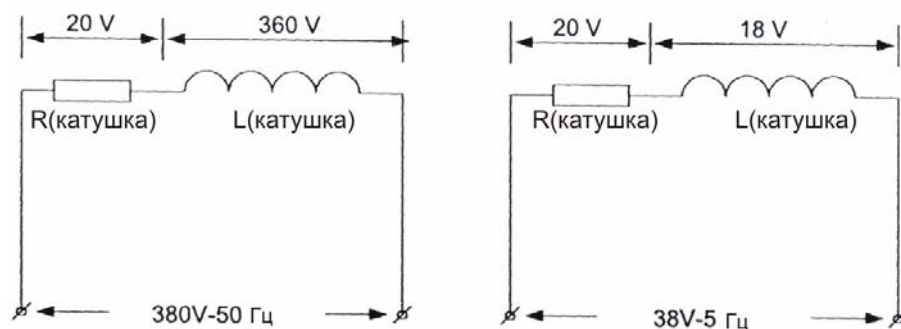


Рис. 12.1 Упрощённая схема замещения обмотки двигателя.

### Пример вычисления:

На рисунке 12.1 представлена схема замещения обмотки двигателя. Падение напряжения на реактивной части определяет силу магнитного поля. Сейчас мы рассчитаем дополнительное напряжение, необходимое для генерации номинального магнитного поля, например, при 5 Гц. Отношение  $U/f$  для рисунка 12.1:

$$U/f = 360 \text{ (В)}/50 \text{ (Гц)} = 7.2 \text{ В/Гц}$$

$$U/f = 18 \text{ (В)}/5 \text{ (Гц)} = 3.6 \text{ В/Гц}$$

Расчет показывает, что отношение  $U/f$  для рассматриваемой обмотки статора (L), становится меньше. Напряжение на реактивной части, которое генерирует магнитное поле, уменьшилось. Преобразователю частоты необходимо обеспечить большее напряжение для того, чтобы восстановить магнитное поле.

В данном случае прикладываемое дополнительное напряжение ( $I * R$  компенсация) должно быть 56 В, т.к.

$$U/f = (56 - 20) \text{ (В)}/5 \text{ (Гц)} = 36/5 = 7.2 \text{ В/Гц}$$

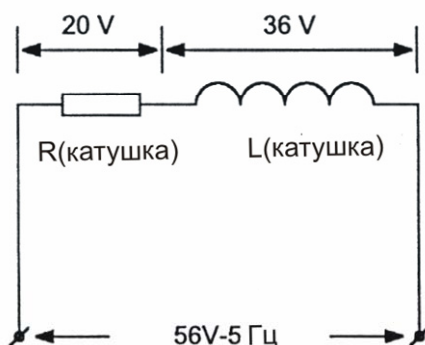


Рис. 12.2

Это дополнительное напряжение снова обеспечивает номинальное поле.

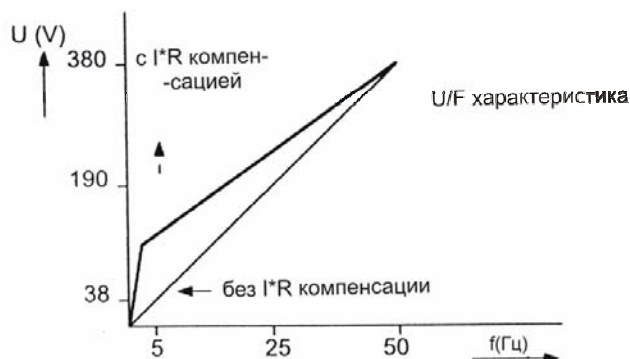


Рис. 12.3 Дополнительное напряжение при низкой частоте.



График показывает, что при низкой скорости есть отклонение от стандартной кривой  $U/f$ . Преобразователь частоты обеспечивает дополнительное напряжение.

Если преобразователь частоты компенсирует только часть падения напряжения на активном сопротивлении, кривая момент/скорость будет меньше номинальной. Если преобразователь частоты обеспечивает слишком большое напряжение, двигатель переходит в магнитное насыщение, которое приводит к высоким всплескам токов. В результате этих выбросов токов преобразователь частоты может отключиться.

Практическая  
установка I \* R  
компенсации

Практическая установка  $I * R$  – это установка, при которой данная  $I * R$  компенсация, достаточна для того, чтобы гарантировать, что двигатель очень близок к магнитному насыщению при низких значениях пускового момента. К сожалению, это означает, что  $I * R$  компенсация не будет оптимальной для другого, более высокого пускового момента, который может потребоваться в другой момент времени. Основным принципом является то, что двигатель должен быть в состоянии обеспечить достаточный номинальный момент ( $T_n$ ) при полуторократном токе. Если требуемые пусковые моменты больше, двигатель не всегда способен вращать механизм. В качестве возможного решения проблемы в этой ситуации можно использовать двигатель и преобразователь частоты большей мощности.

### **Применение $I * R$ компенсации:**

- Если требуется высокий пусковой момент.
- При длинных кабелях двигателя со значительными потерями напряжения.

# ГЛАВА 13

## Коррекция скольжения

Абсолютное скольжение ( $s$ ) – это разность скоростей между скоростью трёхфазного поля статора ( $n_s$ ) и скоростью ротора ( $n_r$ ). Другими словами, абсолютное скольжение выражает потерю скорости.

$$s = n_s - n_r$$

Скольжение двигателя с беличьей клеткой зависит от:

1. **Номинальное скольжение двигателя.**

Величины относительных скольжений для стандартных двигателей:

- 1 кВт: около 6%
- 10 кВт: около 3%
- 100 кВт: около 1,5%

2. **Нагрузка двигателя.**

Нагрузка определяет скольжение в рабочей точке вращающегося ротора. При увеличении нагрузки двигателя ротор сначала замедлится. Скольжение (разность скоростей между трёхфазным полем статора и ротором) возрастает. Чем больше нагрузка, тем больше скольжение.

3. **Температура двигателя.**

Нагрев стержней ротора приведёт к возрастанию их сопротивления. Это означает, что когда сопротивление ротора возрастает (как результат подъёма температуры), один и тот же ток ротора (= момент двигателя) будет достигаться при большем абсолютном скольжении ( $s$ ).

4. **Настройка величины В/Гц.**

Величина  $U/f$  определяет размер магнитного поля. Это поле определяет крутизну кривой момент/скорость.

Факторы,  
определяющие  
скольжение

**Пример вычисления:**

Мы даём пример, чтобы показать применение коррекции скольжения.

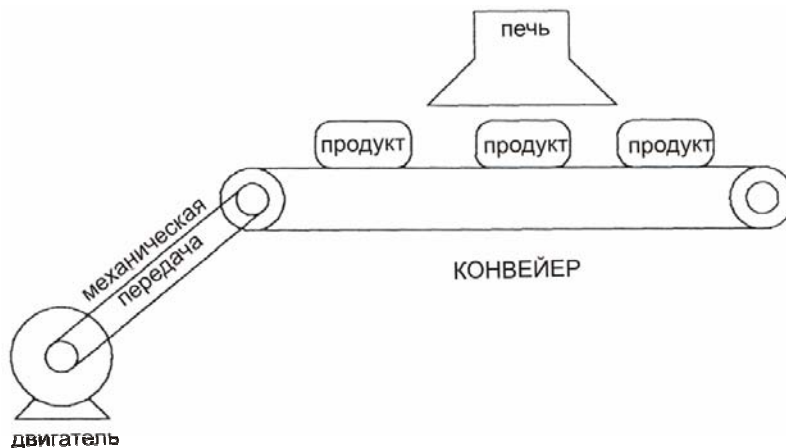


Рис. 13.1 Конвейер.

*Дано:*

Процесс обжига может быть представлен следующим образом. Время обжига зависит от скорости, с которой конвейер проходит через печь. Конвейер управляется четырех полюсным двигателем ( $n = 1500$  об/мин). Абсолютное скольжение ( $s$ ): 100 об/мин.

Момент, требуемый для конвейера, более-менее постоянный на всём диапазоне регулирования.

Время обжига меняется в зависимости от продукта. Правильное время обжига устанавливается путём вращения двигателя с требуемой частотой.

*Предполагается:*

- Время обжига для продукта 1 – одна минута ( $n = 1500$  об/мин)
- Преобразователь частоты установлен на 50 Гц
- Время обжига для продукта 2 – десять минут ( $n = 150$  об/мин)
- Преобразователь частоты установлен на 5 Гц

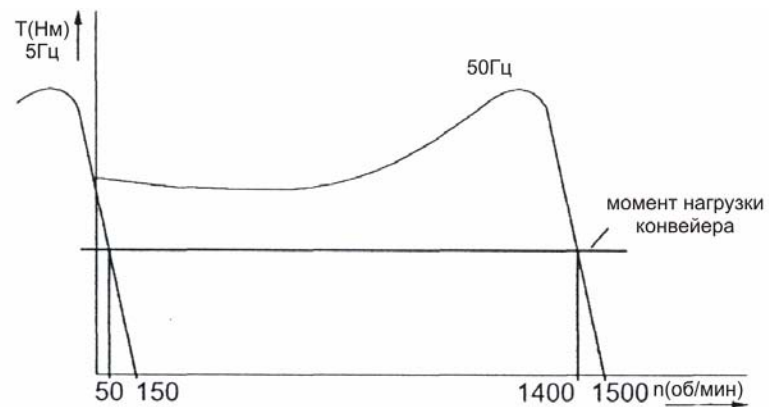


Рис. 13.2

Беря в расчёт скольжение, это означает, что продукт 1 проходит через печь со скоростью 1400 об/мин. Время обжига при этом:  $1500/1400 \cdot 1$  мин = 1,06 мин. При низких скоростях имеются проблемы. Для продукта 2 скорость равна  $150 - 100 = 50$  об/мин. В процентах это увеличивает время обжига до 300%. Время обжига при этом будет  $150/50 \cdot 1$  мин = 3 мин. Это означает, что продукт 2 сгорит.

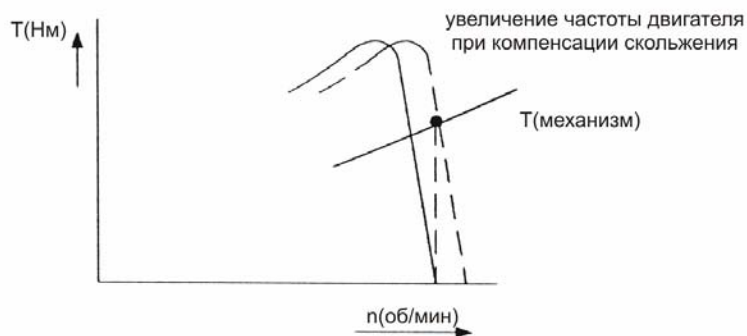


Рис 13.3

Преобразователи частоты, имеющие функцию так называемой компенсации скольжения, компенсируют большую часть зависимых от нагрузки отклонений скорости. В зависимости от нагрузки двигателя, частотный инвертор корректирует выходную частоту так, что действительная скорость соответствует желаемой скорости так точно, насколько это возможно (См. рис. 13.3). Другими словами: преобразователь частоты увеличивает частоту для того, чтобы компенсировать скольжение.

**Внимание:** Коррекция скольжения в преобразователе частоты даёт такую же точность, как регулирование скорости с обратной связью по скорости. Является ли коррекция скольжения достаточной, зависит от желаемой точности управления, диапазона регулирования и момента нагрузки при низких скоростях.

# ГЛАВА 14

## Режим торможения

Двигатель, подключённый напрямую к питающему напряжению и вращающийся со скоростью больше, чем скорость трёхфазного поля (сверхсинхронная скорость) начинает работать, как генератор.

Как генератор

Двигатель возвращает электрическую энергию в питающую сеть.

Тормозящий момент

При генерации электрической энергии в генераторном режиме создаётся тормозящий момент в двигателе.

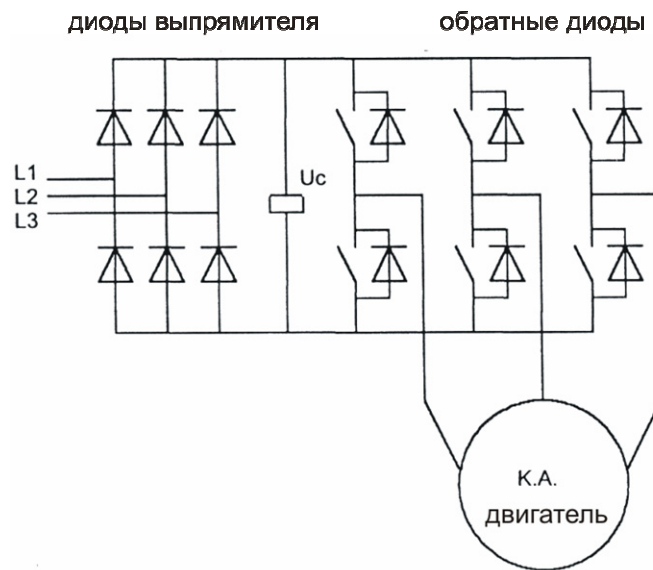


Рис 14.1 Энергия торможения не возвращается в питающую сеть.

Если двигатель подключён к питающей сети через преобразователь частоты, то невозможно вернуть электрическую энергию обратно в питающую сеть из-за выпрямительного диодного моста. Генерация электрической энергии приводит к увеличению напряжения в промежуточном звене постоянного тока.

### Торможение в течение короткого времени

Под воздействием генерации электроэнергии напряжение в звене постоянного тока будет возрастать, если на короткий период времени частота ротора будет больше частоты трёхфазного поля статора. В результате двигатель переходит в генераторный режим и возвращает энергию в преобразователь частоты. Напряжение в звене постоянного тока не должно становиться очень большим т.к. возможно разрушение конденсаторов при максимальном блокирующем напряжении для IGBT. Быстрые управляющие цепи ограничивают увеличение напряжения в звене постоянного тока. Например, автоматически корректируется выходная частота.

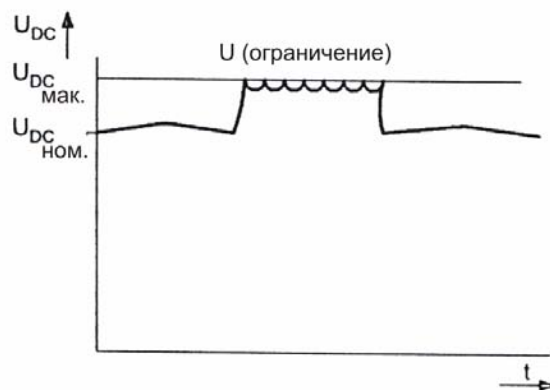


Рис 14.2 Максимальное напряжение в звене постоянного тока  $U_{DCMAX}$  (ограничение)

В зависимости от величины разрешенного перенапряжения и величины максимального тока двигателя возможно реализовать тормозные моменты приблизительно до 50% от номинального момента двигателя при небольших мощностях. Это процентное соотношение уменьшается до 10-20% для больших мощностей.

Однако это сильно зависит от:

- конструкции двигателя
- мощности двигателя (этот принцип торможения лучше работает для маленьких двигателей, т.к. они имеют относительно более высокие потери)
- величины, до которой напряжение звена постоянного тока может быть выше, чем нормальное напряжение контура постоянного тока. При  $U_{DCMAX} = 1,25 \cdot U_{DCНОМ}$  тормозной эффект значительно больше, чем при  $U_{DCMAX} = 1,15 \cdot U_{DCНОМ}$ .

Мы видим, что напряжение в звене постоянного тока  $U_C$  возрастает в режиме торможения. Если двигатель будет генерировать энергию больше, чем энергия, рассеиваемая в «железе» двигателя, напряжение в цепи постоянного тока будет возрастать до тех пор, пока что-нибудь не выйдет из строя.

Ограничение  
напряжения

Напряжение в цепи постоянного тока непрерывно измеряется. Если оно становится очень большим, преобразователь частоты устанавливает такую выходную частоту, при которой двигатель работает с меньшим превышением синхронной скорости. В этом случае генерируется меньшая энергия, которая может быть рассеяна. Это называется *ограничением напряжения* ( $U_{limit}$ ).

В области ослабления поля (см. рис. 14.3) этот принцип торможения не применяется. Здесь большее напряжение звена постоянного тока  $U_C$  не приводит к большей, чем номинальная, величине В/Гц выходного напряжения.

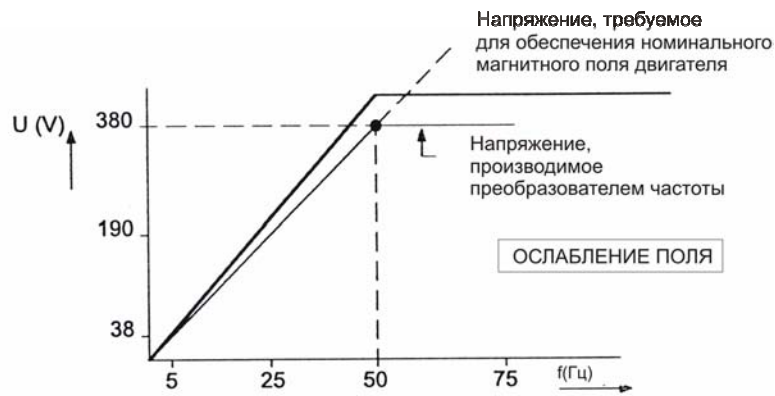


Рис. 14.3

### Торможение в течение длительного времени

При необходимости тормозить двигатель в течение длительного времени и/или с большими тормозными моментами, преобразователь частоты и двигатель вместе не в состоянии управлять этой тормозной энергией. Двигатель очень сильно нагревается.

Тормозной модуль

Преобразователи частоты могут снабжаться так называемым «тормозным модулем».

Этот модуль подключается параллельно конденсаторам (рис. 14.4) и состоит, как правило, из электрического сопротивления и импульсного ключа.

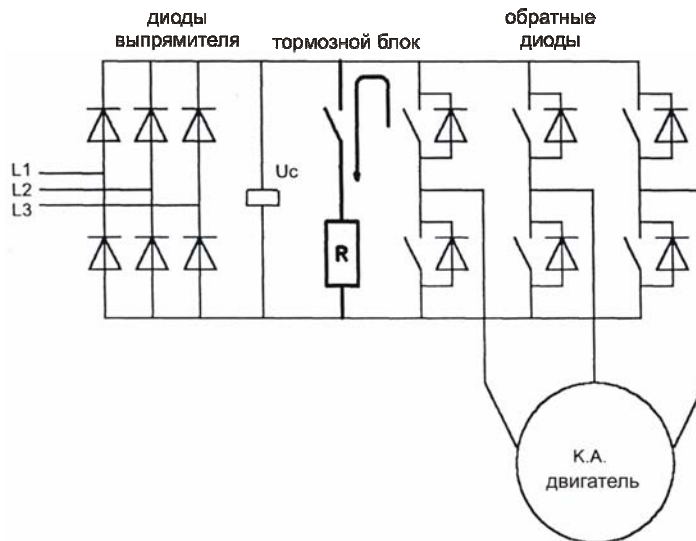


Рис. 14.4 Разряд энергии через тормозной модуль

До того, напряжение на конденсаторах достигнет слишком большого значения (Рис 14.5), импульсный ключ автоматически включится и энергия торможения от генерирующего ее «двигателя» рассеется на резисторе.

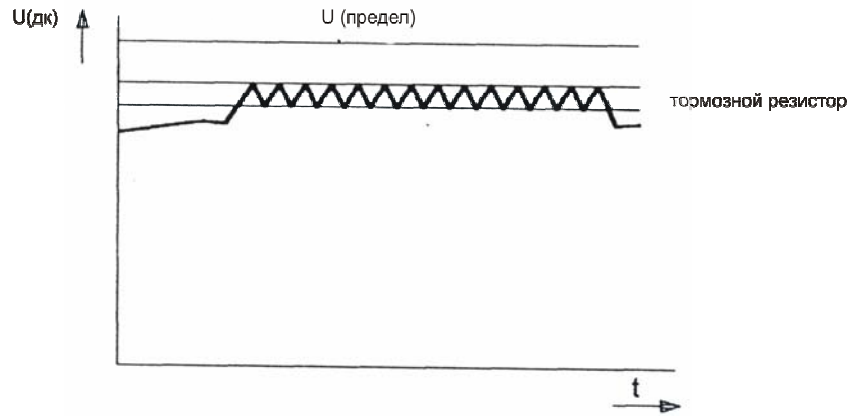


Рис. 14.5

### Торможение постоянным током

Торможение  
постоянным током

Векторная модуляция предлагает и другую возможность тормозить двигатель: *торможение постоянным током*. Принцип торможения постоянным током двигателя с беличьей клеткой хорошо известен. В статоре генерируется неподвижное магнитное поле.

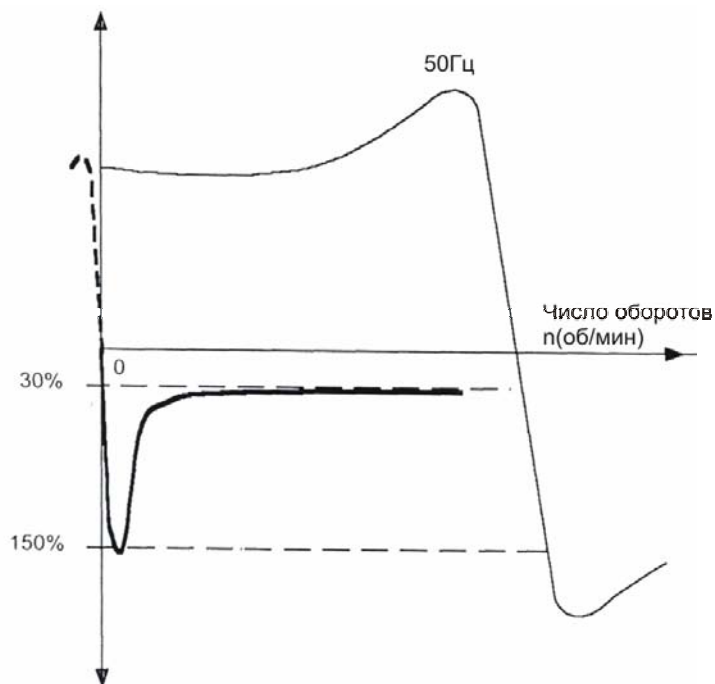


Рис. 14.6

Отметим, что кривая момент/скорость более крутая в области малых скольжений, чем в случае обычных «50 Гц кривых момент/скорость» для двигателя. Обычно эта кривая круче примерно в три раза. Торможение постоянным током с помощью векторной модуляции может осуществляться без дополнительных устройств. Однако, известно, что при этом виде торможения



Торможение  
постоянным током:  
только в течение  
короткого времени.

постоянный ток должен быть большим, чтобы получить достаточно сильный тормозной эффект.

Торможение постоянным током возможно только в течение короткого времени. При этом стержни ротора очень быстро нагреваются и двигатель обязательно перегреется, если он будет длительно тормозиться постоянным током. Поэтому торможение постоянным током может быть использовано только в специальных случаях.

## ГЛАВА 15

### ШИМ

Генерация  
синусоидального  
тока с ШИМ

ШИМ означает – широтно-импульсная модуляция. При этой форме частотного инвертирования изменяется ширина импульсов.

При помощи ШИМ мы хотим генерировать синусоидальный ток так, чтобы получить следующее:

- малые дополнительные потери в двигателе
- плавное вращение двигателя даже на малых скоростях

Однако существует ряд ограничений для этого способа модуляции:

1. Двигатель относительно шумный, поскольку среднее синусоидальное напряжение на самом деле состоит из множества импульсов с частотой около 1-2 кГц.
2. ШИМ меньше подходит для приводов с высокими динамическими характеристиками (быстрое изменение нагрузки и скорости).
3. Этот принцип модуляции меньше подходит для работы на высоких скоростях.
4. Этот метод неэффективно использует ключи инвертора. Эти ключи работают более часто, чем это необходимо.
5. Очень большие потери напряжения при частотах около 50 Гц.

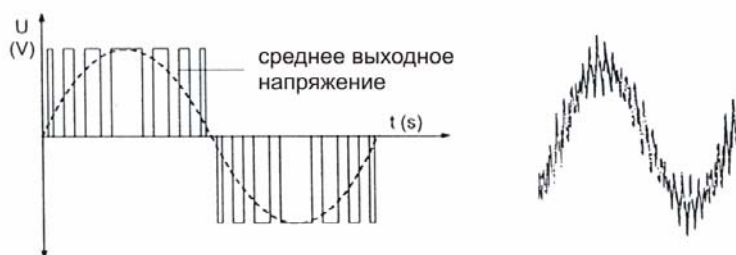


Рис.15.1 Формирование напряжения при ШИМ



Рис 15.2 Ток при ШИМ

# ГЛАВА 16

## Векторная модуляция

Вращающийся вектор Поведение двигателя в целом зависит от магнитного поля в воздушном зазоре. Магнитное поле в воздушном зазоре может быть представлено, как вращающийся вектор.

Стрелка направлена в точку, где магнитное поле максимально положительно (для удобства предположим, что двигатель имеет два полюса). Длина вектора соответствует силе магнитного поля. В идеальном случае конец вектора описывает окружность и при этом отсутствуют нежелательные изменения силы магнитного поля.

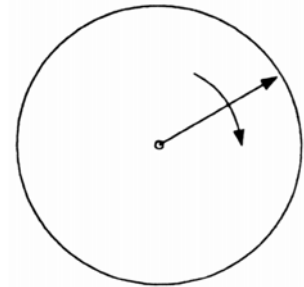


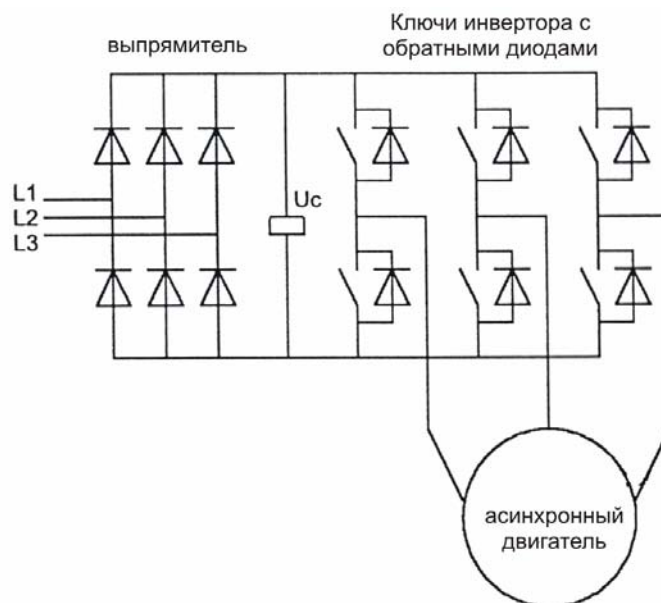
Рис.16.1

### Оптимально:

- точная сила магнитного поля
- круговой магнитный поток
- точная средняя угловая скорость
- минимальные изменения в угловой скорости.

Векторная модуляция Принцип векторной модуляции предназначен для генерации оптимального трёхфазного магнитного поля в двигателе. Векторная модуляция удерживает постоянными как угловую скорость, так и абсолютную величину трёхфазного поля (длину стрелки). Это даёт очень хорошие динамические свойства и уменьшение модуляционного шума в двигателе.

Абсолютная величина



### Детальное объяснение векторной модуляции

Рис. 16.2 Диаграмма, поясняющая принцип.

Один из двух ключей в одной ветви инвертора всегда закрыт, а другой ключ всегда открыт. Поэтому достаточно просто представить инвертор (Рис. 16.2). Трёхфазное магнитное поле в двигателе может быть представлено, как вращающийся вектор магнитного потока.

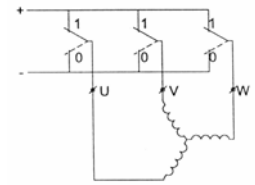


Рис. 16.3

Инверторные ключи

Вектор магнитного потока определяется состоянием ключей инвертора, поскольку изменение вектора магнитного потока зависит от напряжения, подключённого к клеммам двигателя.

Это напряжение определяется одной из восьми комбинаций состояния инверторных ключей (6 векторов поля и 2 нулевых вектора).

Восемь комбинаций определяются следующим образом:

U	V	W	Вектор поля
0	0	1	1
1	0	1	2
1	0	0	3
1	1	0	4
0	1	0	5
0	1	1	6
1	1	1	7
0	0	0	0

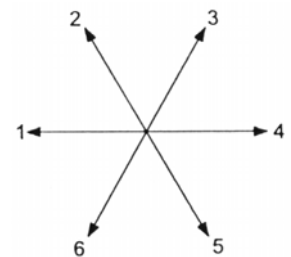


Рис. 16.4

## Формирование векторов поля

*Вектор поля 1:*

$$U = 0 \quad V = 0 \quad W = 1$$

Ток втекает через обмотку, подключённую к клемме W. В точке соединения обмоток в звезду этот ток делится на две одинаковые части и вытекает через обмотки, соединёнными с клеммами U и V.

Три магнитных поля в трёх обмотках генерируют магнитное поле, представленное векторной диаграммой на рисунке 16.5.

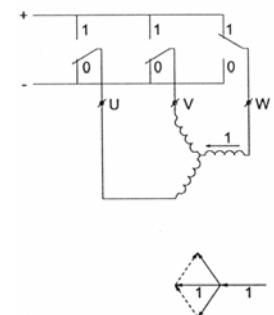


Рис 16.5

Формирование векторов поля 1

*Вектор поля 2:*

$$U = 1 \quad V = 0 \quad W = 1$$

Ток втекает через обмотки, соединёнными с клеммами U и W. Этот ток суммируется в звезде и вытекает через обмотку, соединённую с клеммой V.

Три магнитных поля в трёх

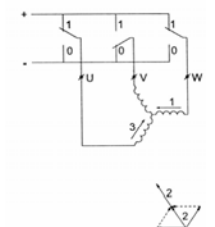
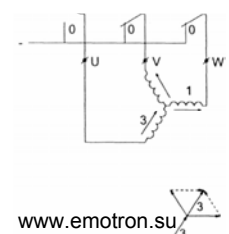


Рис. 16.6

Формирование векторов поля 2



обмотках генерируют магнитное поле, представленное векторной диаграммой на рисунке 16.6.

*Вектор поля 3:*

$$U = 1 \quad V = 0 \quad W = 0$$

Ток втекает через обмотку, подключённую к клемме U. Этот ток делится в звезде на две равные части. И вытекает через обмотки, подключённые к клеммам V и W.

Три магнитных поля в трёх обмотках генерируют магнитное поле, представленное векторной диаграммой на рисунке 16.7.

Рис. 16.7

Формирование векторов поля 3

Путём установки ключей инвертора в определённое положение, можно изменять направление вектора магнитного потока или держать его неподвижным. Результирующий вектор магнитного потока состоит из двух компонентов: уже имеющегося в двигателе магнитного потока и потока, производимого вектором потока. Сумма этих компонентов определяет величину и направление магнитного потока.

Изменение или статика

Размер или направление магнитного потока

В момент времени  $t = 0$ , магнитный поток в двигателе равен нулю. Предположим, что мы включаем вектор поля 2. В течение некоторого времени магнитное поле ориентируется в направлении вектора поля 2.



Рис 16 8

В принципе это увеличение будет продолжаться до тех пор, пока статор не станет насыщенным, останавливая силу магнитного поля на определённой величине.

Когда спустя некоторое время мы переключим ключи в положение 4 ( $U = 1, V = 1, W = 0$ ), произойдёт изменение действующего в данный момент магнитного поля в направлении вектора 4, формируя магнитный поток в направлении вектора поля 4.

Таким образом, возможная траектория магнитного поля формируется переключением по порядку 4, 5, 6, 1, 2, 3 и так далее...

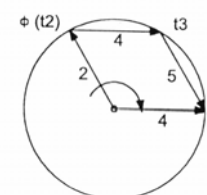


Рис 16 9

В каждый момент времени порядок векторов поля получается переключением только одного переменного ключа (состоящего из двух ключей инвертора - IGBT). Таким образом, трёхфазное поле получается минимальным переключением ключей инвертора.

Поскольку ключи инвертора используются непродолжительно, можно гарантировать высокую надёжность работы инвертора. Это позволяет получать высокие скорости двигателя при минимальных потерях в ключах инвертора.

U	V	W	Вектор поля
0	0	1	1
1	0	1	2
1	0	0	3
1	1	0	4
0	1	0	5
0	1	1	6
1	1	1	7
0	0	0	0

Как мы видим, траектория поля очень далека от идеальной (в идеале – круг). Поэтому попытаемся получить более округлую траекторию модели поля. Это возможно, если использовать несколько векторов поля, которые следуют друг за другом быстрее, чтобы выстроить угловые точки. Тогда порядок переключения больше не будет состоять из 1, 2, 3, 4, 5 и т.д. Переход, например, от 4 к 5 будет наполняться дополнительными переключениями, т.е. 4, 5, 4, 5 или даже больше.

В этом случае вектор поля приближается к более круглой (идеальной) траектории. Недостатком является более высокая частота коммутации инверторных ключей.

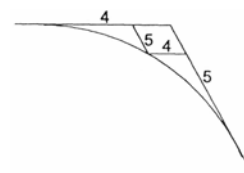


Рис. 16.10

Этим способом можно создать почти идеальную модель поля на всех частотах, отличающихся от номинальной частоты (50 Гц). Если требуется частота ниже номинальной, необходимо использовать два нулевых режима. (0 и 7).

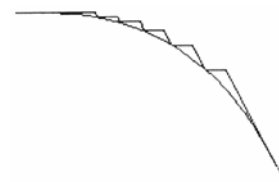


Рис. 16.11

Как видно из принципиальной диаграммы, в режимах 0 и 7 обмотки двигателя закорочены. Поэтому напряжение равно 0 вольт. Вследствие этого, вектор поля перейдёт в неподвижное состояние в своей последней позиции. Режимы 0 и 7 называются «остановами», а режимы 1 - 6 называются «движениями».

Располагая остановы в регулярных интервалах между переключениями, можно получить меньшую среднюю скорость. При переходе от «движения» к «останову», необходимо переключить только один переменный ключ.

Поскольку временные промежутки для других векторов поля остаются неизменными, модель поля также остаётся без изменения. Длительность периода возросла и выходная частота уменьшилась. Сила поля, наоборот, останется без изменения.

Вводя более короткое время для «движений» и не делая «остановов», можно получать более высокую частоту. Магнитное поле уменьшается, а выходная частота возрастает. В результате скорость ротора возрастает, а максимум создаваемого момента уменьшается (ослабление поля).

### **Заключение**

Если выбрать правильный способ переключения, векторная модуляция имеет следующие характеристики:

- постоянную силу магнитного поля
- постоянную круговую форму магнитного поля
- постоянную среднюю угловую скорость магнитного поля

## ГЛАВА 17

### Диапазон регулирования преобразователя частоты

#### Диапазон регулирования: 0 Гц – 50 Гц

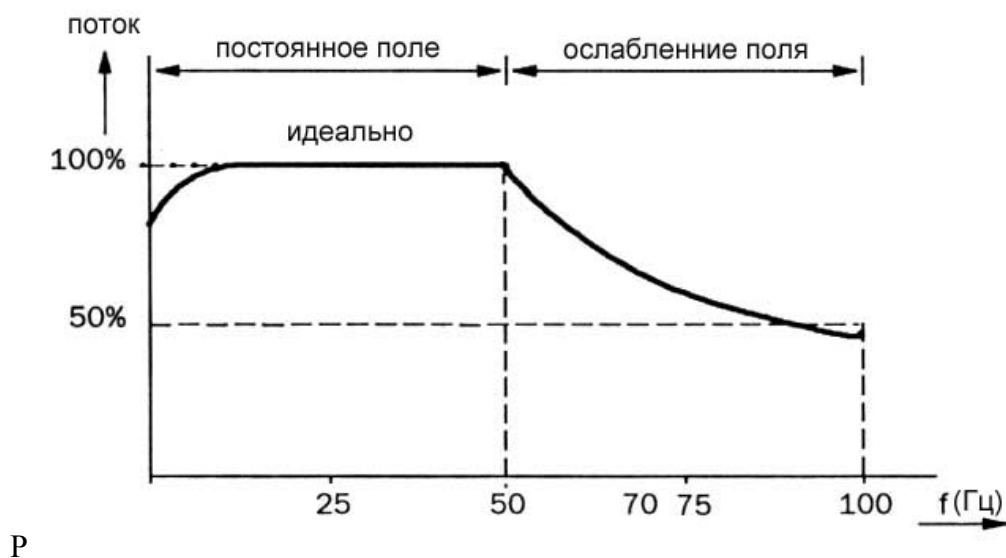
Преобразователь частоты способен изменять выходное напряжение (частоту и амплитуду) без каких-либо проблем. Преобразователь частоты обеспечивает работу для четырех полюсного двигателя со скоростью 750 об/мин, с напряжением и частотой 190 В - 25 Гц.

- Двигатель обеспечивает постоянный момент ( $T$ ) при любой частоте. Можно сказать, что кривая момент/скорость движется, как одно целое, влево.
- Если двигатель работает в области низких скоростей, то он охлаждается не оптимально. Без дополнительного охлаждения лучше не позволять двигателю работать долгое время на низких скоростях.

#### Диапазон регулирования: 50 Гц – две номинальных частоты

Инвертор способен поднять частоту до величины выше, чем номинальная частота (ослабление поля). Длительная работа на сверх синхронных скоростях может быть нежелательна по механическим причинам. Многие стандартные двигатели могут достигать скоростей до 3000/4000 об/мин без каких-либо проблем.

В области ослабления поля происходит квадратичное уменьшение критического момента ( $T_k$ ) (см. главу 11). Два диапазона регулирования представлены на рисунке 17.1.

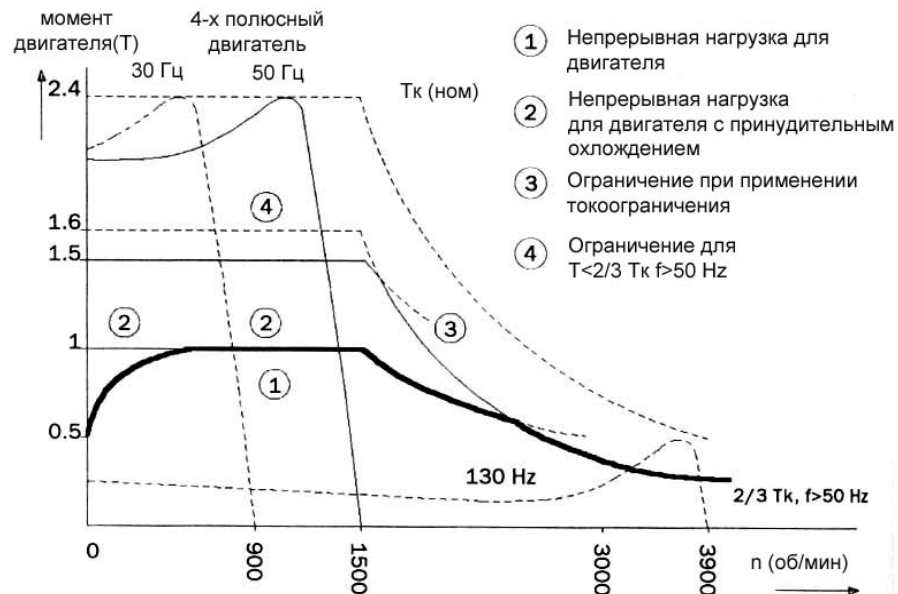


ис 17.1

Рисунок 17.1 даёт хорошее представление об области управления преобразователя частоты.

Нагрузочная способность привода с преобразователем частоты зависит от:

- Отношения между током ограничения  $I_{\text{макс}}/I_{\text{ном}}$  преобразователя частоты и номинальным током. Инвертор способен давать максимум  $1,5 I_{\text{ном}}$ .
- Принудительное охлаждение двигателя или нет.
- Отношение  $T_k/T_n$  двигателя. На рисунке 17.2 мы выбрали двигатель для  $T_k/T_n = 2,4$ .



Рис

17.2 Область 1 представляет диапазон регулирования преобразователя частоты.

Область 1 – это непрерывно используемая рабочая область для частотно-регулируемого привода.

### Объяснение графиков на рисунке 17.2.

*Линия 1:*

Это постоянно обеспечиваемый момент для двигателя с естественным охлаждением. Двигатель охлаждается вентилятором на его валу.

*Линия 2:*

Это постоянно обеспечиваемый момент для двигателя с принудительным охлаждением.

*Линия 3:*



Это максимальный момент ( $T$ ), которым обеспечивается привод при ограничении тока  $I = 1,5 * I_{ном}$ .

*Линия 4:*

При частоте выше 50 Гц максимальный доступный момент ( $T$ ) уменьшается. По этой причине скольжение приближается к величине максимального скольжения. При небольшом моменте сопротивления, рабочий момент пройдёт через максимальный момент и двигатель остановится.

Это объясняет общее правило, что скольжение не должно быть больше, чем  $2/3$  от критического. Как результат, максимальный разрешённый момент нагрузки должен быть меньше  $2/3 T_k$ .

## ГЛАВА 18

### Нагрузка двигателя и его охлаждение

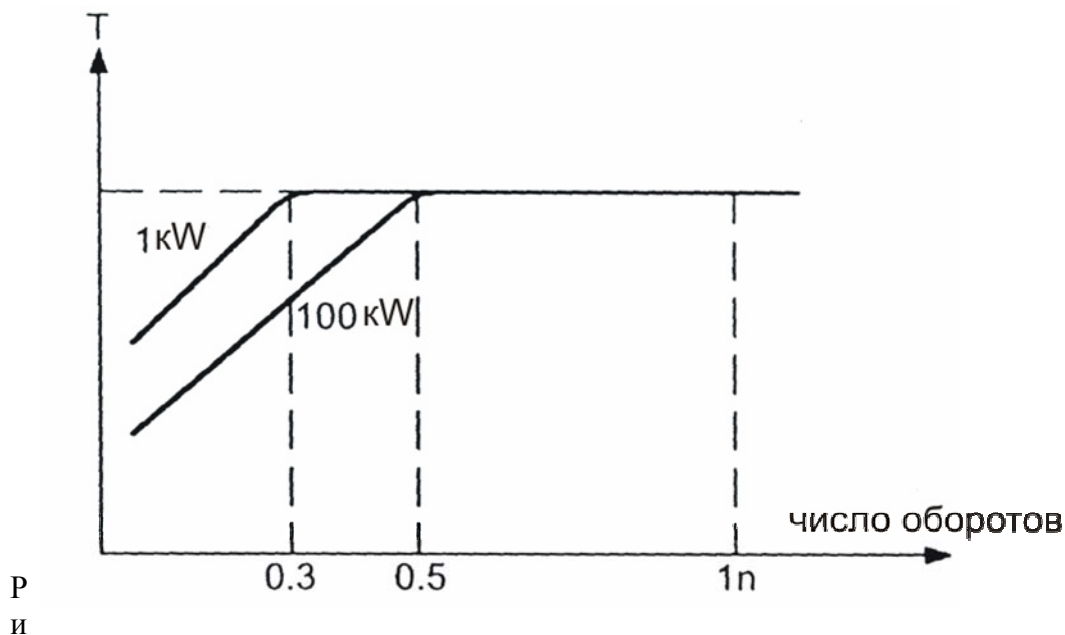
Стандартный двигатель с беличьей клеткой охлаждается вентилятором, который находится на его валу со стороны задней крышки. Охлаждающая мощность вентилятора уменьшается пропорционально скорости двигателя.

Это зависит, конечно, от тепла, выделяемого в двигателе и от допустимого превышения температуры двигателя. Выделение тепла зависит от момента привода, который двигатель должен обеспечить (ток двигателя). Из этого следует вывод, что охлаждение определяет момент, который допускается в течение длительного времени.

Время нагрева двигателя с беличьей клеткой меняется от нескольких минут (для мощностей менее 1 кВт) до 10 минут и более (для мощностей около 100 кВт).

Уменьшение  
момента  
при низких  
скоростях

Двигатель большой мощности использует вентилятор гораздо более часто, чем двигатель малой мощности, поскольку маленький двигатель имеет относительно большую поверхность охлаждения (отношение между поверхностью и объемом) и, поэтому, излучает через поверхность относительно большее количество тепла.



с. 18.1 Кривая момент/скорость

Для того, чтобы обеспечить высокий момент, даже при низких скоростях, двигатель должен иметь принудительное охлаждение.

Частичное решение может быть получено выбором двигателя большей мощности.

## ГЛАВА 19

### Режим параллельной работы

Преобразователь частоты может управлять несколькими параллельно включенными двигателями. В случае, если скорости двигателей должны быть различны, можно использовать, например, двигатели с различными синхронными скоростями (например, 1500 и 3000 об/мин). Скорость двигателей может регулироваться одновременно при неизменном соотношении между различными скоростями во всем диапазоне регулирования.

Условия  
параллельной  
работы

Общий ток двигателей не должен превышать максимальный выходной ток, определенный для данного преобразователя частоты.

Выходной ток преобразователя частоты может быть больше, чем номинальный ток одного двигателя. Поэтому каждый двигатель, обычно, индивидуально защищается, как в случае прямого подключения к сети питающего напряжения.

Если подключенные параллельно двигатели значительно отличаются по мощности, возможны проблемы при пуске и на низких скоростях в случаях, когда требуется большой ускоряющий момент механизма. Это происходит из-за того, что маленькие двигатели имеют относительно большое сопротивление статора и, следовательно, требуют дополнительную  $I \cdot R$  компенсацию при старте на малых скоростях. Этот дополнительный ток приводит к магнитному насыщению больших двигателей.

Автоматические настройки в преобразователях частоты, которые разработаны специально для преобразователя частоты, работающего с одним двигателем, (такие, как авто  $I \cdot R$  компенсация, коррекция скольжения, настройка момента и подхвата вращения), при этом не используются.

Двигатели всегда должны быть индивидуально защищены при помощи тепловой защиты или термисторов.

## ГЛАВА 20

### Ограничение тока

Преобразователь частоты изменяет частоту и удерживает постоянным величину отношения напряжение/частота. Кривая момент/скорость сдвигается согласно рисунку 20.1 горизонтально влево, при этом свойства двигателя остаются неизменными. Ток двигателя, вырабатываемый преобразователем частоты, ограничен до  $1,5 * I_{ном}$ . Этим способом двигатель и преобразователь частоты защищаются от чрезмерно больших токов. При более высокой нагрузке двигателя преобразователь будет вырабатывать больший ток. В определённый момент инвертор выйдет на ограничение тока, вот почему частотный инвертор не вырабатывает ток выше, чем  $1,5 * I_{ном}$ .

В преобразователе частоты происходит следующее:

Инвертор начинает вырабатывать максимальный ток  $1,5 * I_{ном}$ , и также  $1,5 * T_n$ .

Преобразователь частоты уменьшает частоту и, как результат, кривая момент/скорость и кривая ток/скорость движутся влево (см. рис. 10.9).

Преобразователь частоты при ограничении тока

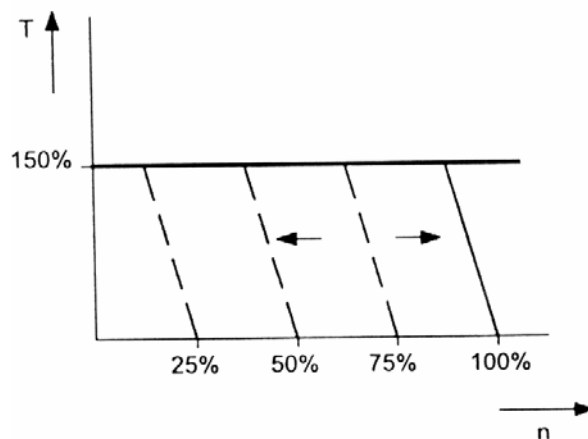


Рис 20.1 Уменьшение частоты при ограничении тока.

Преобразователь частоты удерживает вырабатываемый им максимальный ток в течение 30 секунд. Если нагрузка не уменьшается, то двигатель останавливается и преобразователь частоты даёт ошибку по перегрузке ( $I^2t$ ). Если момент нагрузки уменьшается, преобразователь частоты увеличивает частоту. Двигатель начинает вращаться со своей первоначальной скоростью.

# ГЛАВА 21

## К.П.Д. преобразователя частоты

КПД преобразователя частоты зависит от отношения между выходной и входной мощностью. На входе ток не синусоидальный (из-за диодного выпрямителя) и на выходе напряжение и ток не является синусоидальными. Это делает достаточно трудным точное измерение входной мощности  $P_{вх}$  и выходной мощности  $P_{вых}$ . Номинальные КПД (при номинальном выходном токе и номинальной выходной частоте):

Номинальная мощность 100 кВт; КПД = 98%  
Номинальная мощность 10 кВт; КПД = 97,5%  
Номинальная мощность 1 кВт; КПД = 97 %

На практике наиболее применимым является метод определения КПД через потери.

### Потери в преобразователе частоты играют важную роль в двух областях:

1. Потери, становящиеся заметными из-за выделения тепла в преобразователе. Эти потери должны быть рассеяны. Таким образом, они определяют конструкцию преобразователя частоты и тепло, которое должно быть рассеяно в шкафу управления.
2. Потери при потреблении электроэнергии, которые должны быть оплачены потребителем. Важным фактором является количество часов работы в году, так же, как и средняя нагрузка. Эти факторы зависят от применения. Дополнительные потери в 1 кВт означают, что за год:  
 $1 \text{ кВт} \times 365 \text{ дней} \times 24 \text{ часа} = 8760 \text{ кВт*час}$   
При плате за 1 кВт\*час 1 рубль, это означает 8760 рублей за год.

### Потери и высокая частота коммутации

Высокая частота коммутации может быть применена для ограничения дополнительного шума двигателя. Однако, это немедленно воздействует на КПД. На потери в преобразователе частоты влияют также коммутационные потери в ключах инвертора (IGBT модулях).

## ГЛАВА 22

### Правильный выбор

#### Вопросы, интересующие пользователя:

- Используем ли мы систему индикации ошибок?
- Как определить сечение кабеля для двигателя?
- Защищен ли двигатель от перегрузки?
- Защищён ли преобразователь от коротких замыканий? Заземлён ли он?
- В каких помещениях можно использовать конкретный преобразователь?
- Защищён ли преобразователь частоты от тепловой перегрузки?
- Как преобразователь частоты реагирует на изменения нагрузки?
- Достаточно ли доступно для понимания руководство по эксплуатации?

#### Определение типоразмера преобразователя частоты

Для правильного выбора преобразователя частоты является важной следующая информация:

- номинальная мощность механизма
- кривая момент/скорость механизма
- точность и диапазон регулирования
- питающее напряжение
- способ управления
- тормозной режим да/нет

В большинстве случаев инженеру необходимо знать только номинальный КПД и кривую момент/скорость механизма для того, чтобы определить правильный типоразмер преобразователя частоты. Может произойти следующее: двигатель (... кВт), подключённый напрямую к сети питающего напряжения, управляет механизмом. Если мы хотим использовать преобразователь частоты для управления двигателем, мы выбираем преобразователь той же мощности, что и двигатель. Иногда, однако, необходимо выбирать преобразователь большей мощности.

#### *Принимайте во внимание:*

- слишком высокие ускоряющие моменты
- моменты с высокой пульсацией
- «необычную» кривую момент/скорость

## Обратите внимание на «необычные моменты»

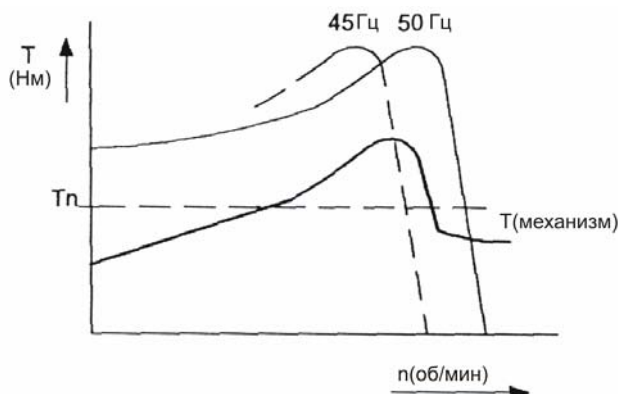


Рис.

22.1

Если двигатель напрямую подключён к сети питающего напряжения, мы измеряем ток на частоте 50 Гц. Нам ничего неизвестно о ситуации при частотах меньших, чем 50 Гц.

- при каких условиях мы измеряем ток при 50 Гц?
- проводили ли мы измерения при самых тяжёлых условиях работы?

Уменьшение частоты означает, что кривая момент/скорость двигателя перемещается влево. В ситуации на рисунке 22.1 механизм, вращающийся со скоростью, соответствующей 45 Гц, требует момент, который в два раза превышает момент, требуемый при скорости, соответствующей 50 Гц. Это означает, что получить вращение при 45 Гц невозможно. В этом случае необходимо взять двигатель и преобразователь частоты в два раза большей мощности.

Ток, вырабатываемый преобразователем частоты, является важным фактором, определяющим стоимость.

Поэтому очень важно рассчитать ожидаемый ток. Фактически, нам нежелательно превышать типоразмер из-за увеличения стоимости. С другой стороны, однако, нам хотелось бы иметь «запас» для неожиданных ситуаций (например: для преодоления момента трогания зажатого конвейера, требуется больший ток). Выбор преобразователя частоты должен основываться на токе, требуемом механизмом, то есть на выходном токе преобразователя частоты.

Зависимость преобразователя частоты от величины

## ГЛАВА 23

### Выбор числа полюсов двигателя

Иногда, применение режима работы на сверх синхронной скорости ( $f > 50$  Гц) даёт определённые преимущества.

#### Преимущества и недостатки режима работы на сверх синхронной скорости

##### Преимущества:

- более быстрое вращение двигателя без необходимости его замены
- применения, требующие постоянной мощности. Высокий момент при низких скоростях и низкий момент при высоких скоростях.

##### Недостатки:

- механические аспекты такие, как более быстрый износ подшипников
- риск перегрузки двигателя (см. стр. 85)

##### Пример вычисления:

Механизм (10 кВт) требует постоянный момент ( $T$ ). При низких скоростях моменты сопротивления могут достигать 180% от номинального момента механизма (см. рис. 23.1)

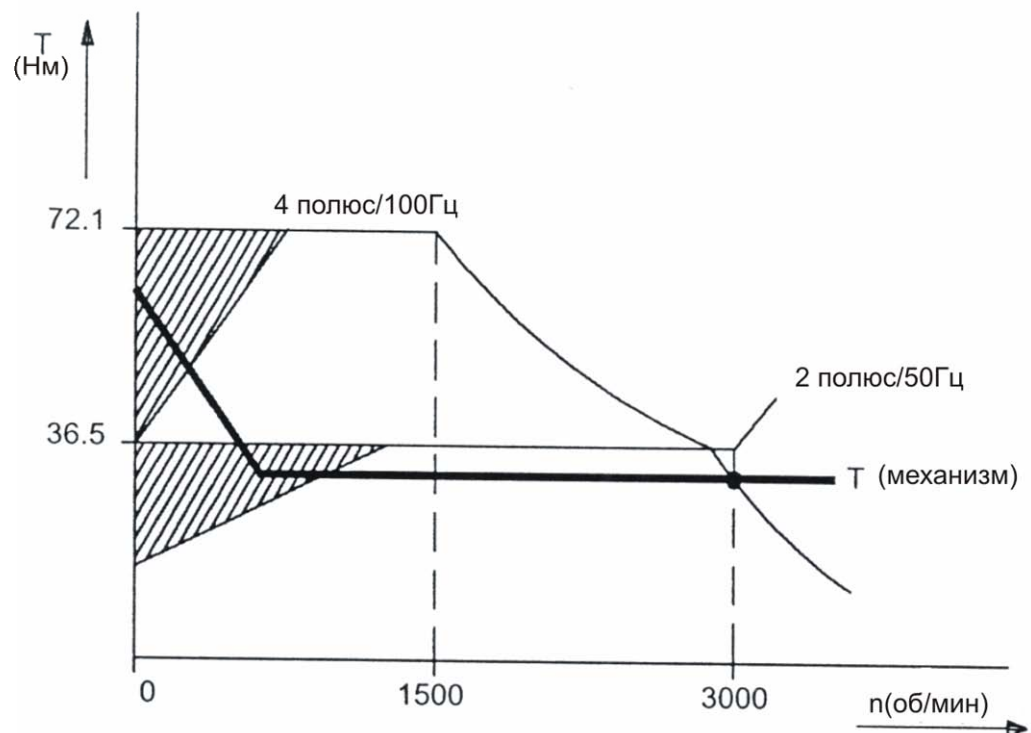


Рис. 23.1 Представление максимального момента для двух полюсного и четырех полюсного двигателя.



Решение:

Выберем двухполюсный двигатель, мощностью 11 кВт из каталога двигателей.

Синхронная Скорость n об/мин	Размер	P <sub>ном</sub> кВт	n <sub>ном</sub> об/мин	Выход	cos φ	I <sub>ном</sub> при 380 В, А	I <sub>в</sub> /I <sub>н</sub>	T <sub>в</sub> /T <sub>н</sub>	T <sub>з</sub> /T <sub>н</sub>	T <sub>к</sub> /T <sub>н</sub>	Момент инерции кг/м <sup>2</sup>
3000	ZK 132 SK2	5.5	2860	85	0.91	10.8	6	2.4	2.1	2.7	0.020
	ZK 160 MK2	11	2890	87	0.90	21.4	6.2	2.6	2.2	2.8	0.040
	ZK 160 M2	15	2910	88	0.91	28.4	7.2	2.6	2.1	3.2	0.050
1500	ZK 132 SK2	4	1420	83	0.83	8.8	6.2	2.4	2	2.8	0.0135
	ZK160M4	11	1455	89	0.89	22.4	6	2.5	2.2	2.5	0.073

Двигатель способен обеспечить постоянный момент (Т) во всём диапазоне регулирования. Однако, максимальный момент (Т<sub>к</sub>) этого двигателя с преобразователем частоты является недостаточным для создания ускоряющего момента механизма. Таким образом, это решение не является удовлетворительным.

Мы делаем выбор между двумя различными решениями:

- 1) - двух полюсный двигатель большей мощности и более мощный преобразователь частоты.
  - дополнительное охлаждение на низкой скорости (усиленное охлаждение)

или

- 2) - четырёх полюсный двигатель мощностью 11 кВт и в два раза большей величиной момента.

Двух полюсный  
двигатель

Двухполюсный двигатель имеет момент (Т):

$$T = (9.55 * 11000) / 2890 = 36.3 \text{ Нм}$$

Если мы выбираем четырёх полюсный двигатель (1500 об/мин), такой же мощности (11 кВт), то этот двигатель имеет величину момента в два раза выше, чем двух полюсный двигатель.

Четырёх  
полюсный  
двигатель

Четырёх полюсный двигатель имеет момент:

$$T = (9.55 * 11000) / 1455 = 72.2 \text{ Нм}$$

Используя четырёх полюсный двигатель в области ослабления поля, можно достичь скорости 3000 об/мин. От 0 до 1500 об/мин момент (Т) постоянный и достаточный для управления механизмом. После 1500 об/мин четырёх полюсный двигатель работает в области ослабленного поля. Здесь момент (Т) уменьшается, но остаётся достаточным для управления механизмом.

Как можно видеть из рисунка 17.2, мы также должны обратить внимание на максимальный момент. Нам также известно, что:

- четырёх полюсный двигатель имеет максимальный момент, равный  $2,5 T_{ном}$ .
- максимальный момент уменьшается по квадратичному закону
- мы не хотим нагружать двигатель больше, чем  $2/3 T_{к}$ .
- механизму требуется момент, приблизительно равный 30 Нм (следует из графика)

$$(50/f)^2 * 2.5 * 72.1 * 2/3 = 30$$

$$(50/f)^2 = 0.25$$

$$(50/f) = 0.5 \Rightarrow f = 100 \text{ Гц}$$

Благодаря использованию этой формулы, отпадает необходимость в покупке двигателя большей мощности, а требуется двигатель с другим числом полюсов.

Выходная частота преобразователя увеличивается таким образом, чтобы достигнуть желаемой скорости.

# ГЛАВА 24

## Характер нагрузки и примеры расчетов

Для того, чтобы правильно выбрать преобразователь частоты, прежде всего необходимо определить мощность двигателя. Момент двигателя должен быть выше, чем момент, требуемый механизмом. Более того, должно учитываться уменьшение нагрузочной способности при низких скоростях, поскольку двигатель охлаждается не оптимально.

### Прилагаемый постоянный момент

#### Пример расчёта

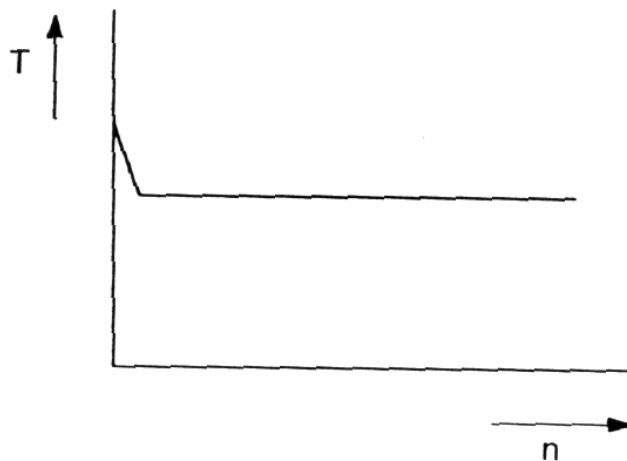


Рис. 24.1 Постоянный момент.

Дано: (см. рис. 24.2)

- четырёх полюсный двигатель ( $n = 1500$  об/мин)
- коэффициент механической передачи 1:10
- каждый продукт весит 50 кг
- масса ленты 25 кг
- диаметр ведущего ролика  $r = 0.2$  м
- КПД передачи 90%

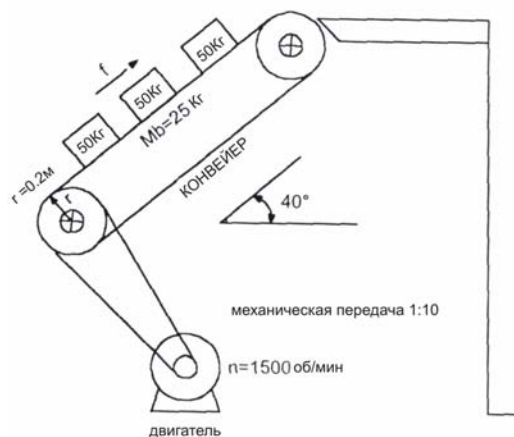


Рис.

24.2

Требуется:

Найти мощность двигателя привода.

Решение:

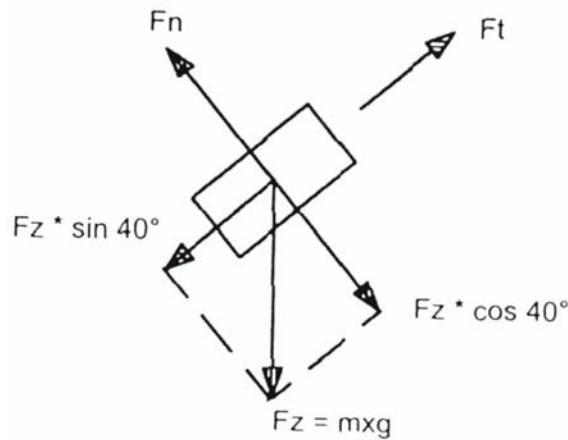


Рис 24.3

На рисунке 24.3 изображена силовая диаграмма. Сила тяжести  $F_z$  разложена на составляющие – силу, перпендикулярную конвейеру  $F_z \cdot \cos 40^\circ$  и силу, параллельную конвейеру  $F_z \cdot \sin 40^\circ$ . Сила реакции конвейера  $F_n$  уравновешивает силу  $F_z \cdot \cos 40^\circ$ . В качестве силы трения возьмём  $0,1 F_z$ .

Сила, необходимая для разгона конвейера:

$$F_{\text{необх}} = (m \cdot g) \sin 40^\circ + 0,1 \cdot F_z$$

где:

$F_z$  = сила тяжести (Н)

$m$  = масса (кг)

$g$  = ускорение свободного падения ( $\text{м/с}^2$ )

после подстановки числовых значений:

$$F_{\text{необх}} = (3 \cdot 50 \cdot 10) \sin 40^\circ + 0,1 \cdot (3 \cdot 50 \cdot 10) = F_{\text{необх}} = 1112 \text{ Н}$$

Масса конвейера в расчет не принималась.

Момент на ролике конвейера:

$$T = F \cdot r = 1112 \cdot 0,2 = 222,4 \text{ Нм}$$

Момент, создаваемый двигателем с учётом передаточного числа механизма (i). (i = скорость двигателя/скорость механизма =  $1500/150 = 10$ ):

$$T_{\text{передачи}} = 222,4/10 = 22,24 \text{ Нм}$$

С учётом КПД механической передачи требуемый момент двигателя:

$$T_{\text{двиг}} = T_{\text{передачи}}/\eta = 22,4/0,9 = 24,7 \text{ Нм}$$

Мы должны выбрать двигатель, способный обеспечить момент 24.7 Нм.

Таким образом, требуется двигатель, мощностью:

$$P = (T * n)/9.55 = (24.7 * 1500)/9.55 = 3.87 \text{ кВт}$$

Выберем двигатель 4 кВт из каталога двигателей.

Синхронная Скорость n об/мин	Размеры	P <sub>ном</sub> кВт	n <sub>ном</sub> об/мин	Выход	cos φ	I <sub>ном</sub> при 380 В, А	I <sub>в</sub> /I <sub>н</sub>	T <sub>в</sub> /T <sub>н</sub>	T <sub>з</sub> /T <sub>н</sub>	T <sub>к</sub> /T <sub>н</sub>	Момент инерции кг/м <sup>2</sup>
3000	ZK 132 SK2	5.5	2860	85	0.91	10.8	6	2.4	2.1	2.7	0.020
	ZK 160 MK2	11	2890	87	0.90	21.4	6.2	2.6	2.2	2.8	0.040
	ZK 160 M2	15	2910	88	0.91	28.4	7.2	2.6	2.1	3.2	0.050
1500	ZK 132 SK2	4	1420	83	0.83	8.8	6.2	2.4	2	2.8	0.0135
	ZK160M4	11	1455	89	0.89	22.4	6	2.5	2.2	2.5	0.073

Двигатель 4 кВт имеет номинальный момент:

$$T_{\text{ном}} = (P * 9.55)/n = (4000 * 9.55)/1420 = 26.9 \text{ Нм}$$

Рассчитаем разгон двигателя из состояния покоя до номинальной скорости (1500 об/мин). Избыточный вращающий момент гарантирует разгон конвейера. Преобразователь частоты обеспечивает 1.5 номинального момента. При этом допустима временная перегрузка инвертора и двигателя.

Избыточный момент:

$$\Delta T = T_{1.5 * \text{ном}} - T_{\text{необх}} = 40.35 - 24.7 = 15.65 \text{ Нм}$$

Ускорение также зависит от момента инерции двигателя и движущихся частей механизма.

$$t_a = J/\Delta T * (n_r - n_0)/9.55$$

где:

$\Delta T$  = избыточный момент

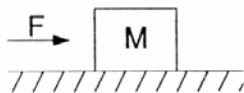
$n_r$  = номинальная скорость

$n_0$  = скорость в положение покоя

$t_a$  = время ускорения

поступательное движение:

$$F = m * a = m * \Delta V / \Delta t$$



где:

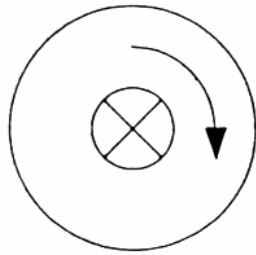
F = сила

m = масса

a = ускорение

v = скорость

вращательное движение:



$$T = J * \Delta\omega/\Delta t$$

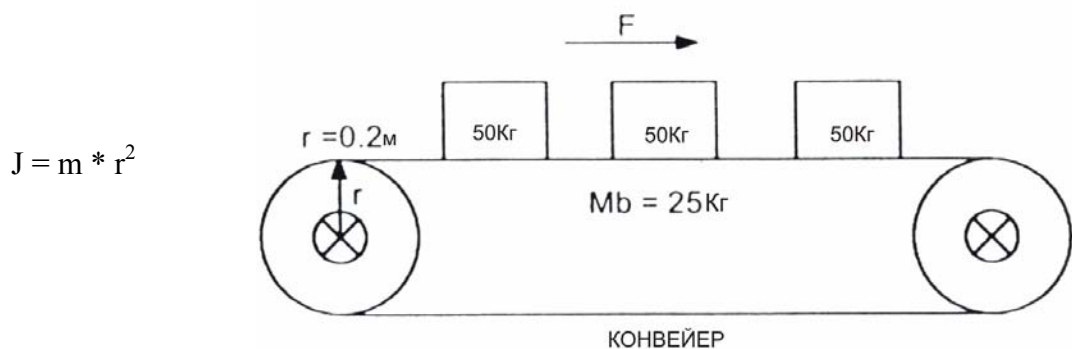
где:

$\omega = 2\pi n/60$  = угловая скорость

T = вращающий момент

J = момент инерции массы

Сначала мы рассмотрим влияние момента инерции массы непосредственно на конвейер.



Это должно быть приведено к валу двигателя, так как мы имеем дело с механической передачей, у которой есть отношение  $i$ . Это означает, что момент инерции на валу двигателя ( $J_2$ ) зависит от величины  $i$ :

$$J_2 = (\omega_1/\omega_2)^2 * J_1$$

$$J_2 = (1/i^2) * J_1$$

Теперь вычислим J (момент инерции массы):

$$J = (m_{\text{конвейера}} + m_{\text{продукта}}) * r^2 * (1/i^2)$$

После подстановки значений получим:

$$J = (150 + 25) * 0.2^2 * 0.1^2 = 0.07 \text{ кгм}^2$$

Суммарный момент:

$$J_{\text{общее}} = J + J_{\text{двигателя}}$$

После подстановки значений получим:

$$J_{\text{общее}} = 0.07 + 0.0135 = 0.0835 \text{ кгм}^2$$

Время ускорения:

$$T_a = 0,0835/15/65 * (1420 - 0)/9.55 = 5.6 \text{ сек}$$

Двигатель, работающий с преобразователем частоты, разгоняется за 5.6 секунд. Для того, чтобы получить более быстрый разгон двигателя, необходимо выбрать двигатель и преобразователь частоты большей мощности. Это позволит увеличить разницу моментов. Двигатель имеет большой избыточный момент для ускорения. С помощью установки времени разгона в преобразователе частоты на определённую величину, можно увеличить время разгона. В этом случае двигатель будет разгоняться не за 5.6, а, например, за 10 секунд.

## Энергосбережение

### Пример расчета:

Этот пример показывает метод энергосбережения, который состоит в задании скорости для регулирования потока с использованием частотно регулируемого насоса.

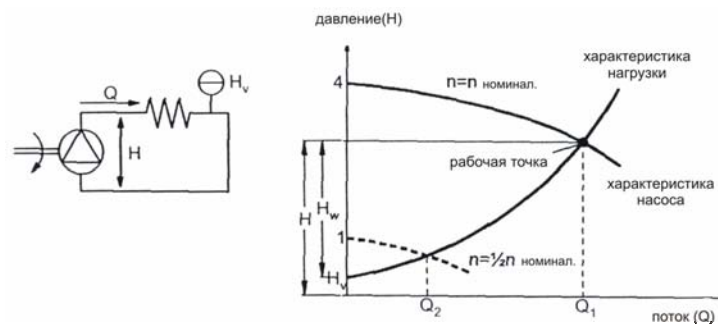


Рис. 24.4 Регулирование насоса

где:

$Q$  = поток

$H$  = давление за насосом

$H_v$  = статическое давление

$H_w$  = давление трения

Насос имеет квадратичную кривую нагрузки.

$$H \sim n^2$$
$$Q \sim n$$

Кривая  $n = n_{\text{номинальная}}$  отображает характеристику насоса на его номинальной скорости. Кривая  $n = 0.5n_{\text{номинальная}}$  отображает характеристику насоса при пятидесяти процентной скорости насоса. Мы видим, что рабочая точка располагается на кривой нагрузки.

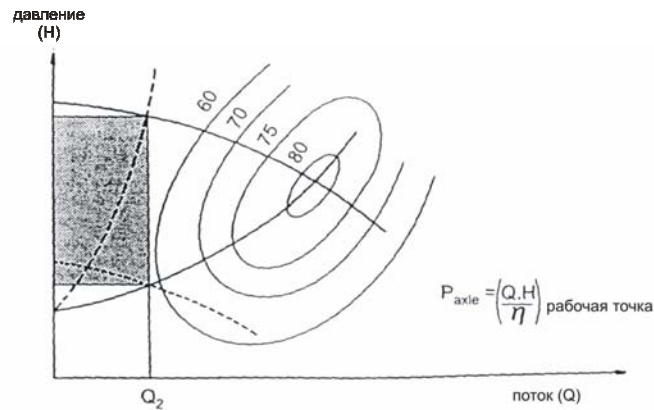


Рис. 24.5

Этот рисунок показывает выход насоса (эллипсы). Пунктирная кривая нагрузки применяется для случая, когда вместо регулирования скорости используется регулирование потока, например, с помощью клапанов. Мы видим, что при регулировке с помощью клапанов не обязательно поддерживать высокое давление при том же самом потоке.

#### Рисунок 24.6

По горизонтали – поток, по вертикали - требуемая мощность на валу насоса. Шкала мощности выбрана более менее произвольно. Предположим, в этом примере расчета, что при стопроцентной скорости насоса требуется мощность 100 кВт. При уменьшении скорости потока в случае управления клапаном мощность на валу насоса уменьшается, но не намного, в то время, как уменьшение потока изменением скорости приводит к быстрому снижению мощности на валу.

Кратко поясним причину этого:

- когда поток устанавливается с помощью управляющего клапана, производительность ( $Q * H$ ) уменьшится, только не намного, так как давление  $H$  будет возрастать при дальнейшем закрытии управляющего клапана
- когда поток устанавливается с помощью регулирования скорости, производительность ( $Q * H$ ) уменьшается очень быстро, так как давление  $H$  резко падает с уменьшением скорости

Следует отметить, что часто при номинальном режиме работы (100% поток) разность в требуемой мощности на валу составляет уже 25%. Как обычно, причиной этому является небольшое завышение типоразмера при выборе насоса.



Для того, чтобы определить сэкономленную энергию за год, необходимо знать информацию о рабочих точках и продолжительности работы в течение года. Мы проработаем этот вопрос, начиная рассмотрение с насоса, работающего в непрерывном режиме. Будем считать, что в течение года было 7000 часов работы (один год составляет 8760 часов). Далее предположим, что номинальный поток производился 2000 часов в году, 300 часов – 85%, 1000 часов – 70% и 1000 часов – 50%.

Необходимые мощности на валу насоса известны (см. рис. 24.6).

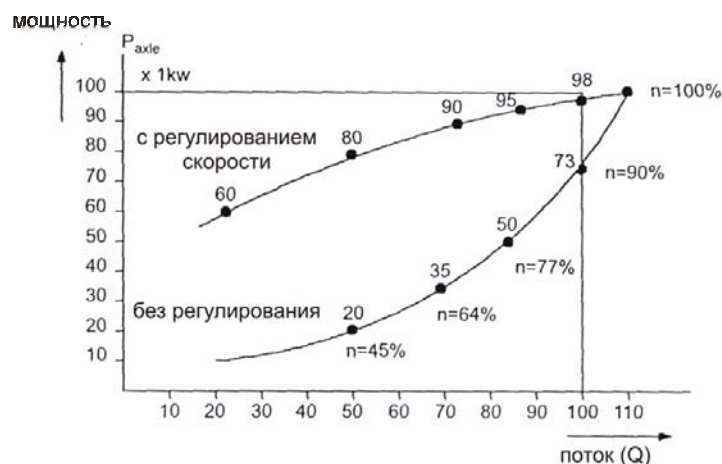


Рис. 24.6

Для того, чтобы определить электрическую мощность в обеих ситуациях, расчёт должен включать КПД механической передачи. При дроссельном управлении мы запускаем привод с помощью трёх фазных асинхронного двигателя с беличьей клеткой, с предположительным КПД 94% в диапазоне мощностей от 100 кВт до 80 кВт.

При управлении потоком с помощью регулируемого привода, мы должны стартовать с более низким КПД.

Всё это показано на таблице ниже.

Q	Часы/год	Управление клапаном				Регулируемый привод			
		$P_a$ (кВт)	$\eta$	$P_c$ (кВт)	кВт*час x 100	$P_a$ (кВт)	$\eta$	$P_c$ (кВт)	кВт*час x 1000
100%	2000	100	0,94	106	212	73	0,90	81	162
85%	3000	95	0,94	101	303	50	0,86	58	174
70%	1000	90	0,94	96	96	35	0,80	44	44
50%	1000	80	0,94	85	85	20	0,70	28	28
	7000				696				408

Имеются четыре рассматриваемые рабочие точки для 100%, 85%, 70%, 50% с соответствующими мощностями при дроссельном управлении.

Это деление даёт потребляемую мощность для трёхфазного асинхронного двигателя с беличьей клеткой. Это число, умноженное на количество рабочих часов, даёт значение в киловатт-часах. За один год это составит 701 МВт\*час. В случае регулируемого привода вычисление производится аналогично. Требуемые механические мощности значительно ниже, тем не менее, КПД регулируемого привода ниже, чем КПД односкоростного привода. Рассматриваемые величины даны в таблице. Требуемые электрические мощности перемножены на количество часов работы. За один год это составило 371 МВт\*час.

Экономия электроэнергии для этого примера составит  $701 - 371 = 330$  МВт\*час!!! В процентном отношении это  $330/701 = 47\%$ .

Стоимость экономии учитывается, когда сохранённые киловатт-часы включаются в контракт с энергетической компанией. Как правило, счёт энергетической компании делится на энергетическую часть и часть с фиксированными тарифами. Энергосбережение относится к энергетической части, когда потребляется меньшее количество киловатт-часов.

В решении, использующем насос с регулированием скорости, управляющий клапан может быть исключён! С другой стороны необходимо купить и установить оборудование для управления насосом.