

Асинхронный двигатель питается от сети переменного тока, как правило, трехфазной. Трехфазная система обмоток создает вращающееся магнитное поле с угловой скоростью вращения:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p_n} \quad (1)$$

где  $f$  – частота питающей сети,  $p_n$  – число пар полюсов.

Вращающееся магнитное поле пересекает витки обмоток ротора. Если скорость вращения ротора отличается от скорости вращения поля, то в роторной обмотке начинает индуцироваться ток, который, взаимодействуя с полем статора, создает момент. В результате двигатель обладает механической характеристикой, изображенной на рисунке 1

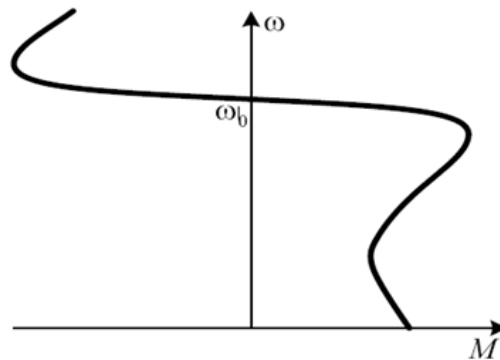


Рис. 1. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Как видно из характеристики, скорость на рабочем участке несильно отличается от скорости холостого хода, и становится ясно, что эффективно регулировать скорость вращения двигателя можно, изменяя частоту вращения поля статора или частоту питающей сети. Остается открытым вопрос: как менять питающее напряжение?

Как правило, двигатель работает на колене кривой намагничивания, как показано на рисунке 2. Тогда становится понятно, что увеличение потока приведет к резкому увеличению тока, а снижение к уменьшению момента.

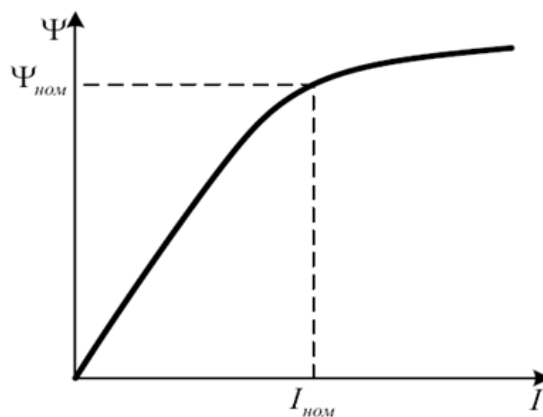


Рис. 2. Кривая намагничивания двигателя

Уравнение электрического равновесия для одной фазы можно записать следующим образом:

$$U_{a1} = i_{a1} \cdot R_1 \frac{d\psi_{a1}}{dt} \quad (2)$$

Если пренебречь падением напряжения на активном сопротивлении фазы статора, то уравнение упростится:

$$U_{a1} = \frac{d\psi_{a1}}{dt} \quad (3)$$

Фазное напряжение изменяется по закону:

$$U_{a1} = U_{max} \cdot \sin \omega_0 t \quad (4)$$

Если теперь приравнять правые части выше написанных уравнений, то получится выражение:

$$\frac{d\psi_{a1}}{dt} = U_{max} \cdot \sin \omega_0 t \quad (5)$$

После интегрирования это выражение примет вид:

$$\psi_{a1} = -\frac{U_{max}}{\omega_0} \cdot \cos \omega_0 t \quad (6)$$

или

$$\psi_{a1} = -\frac{U_{max}}{2\pi f} \cdot \cos(2\pi f t) \quad (6)$$

Из полученного выражения видно, что амплитуда потока фазы прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна частоте, поэтому для поддержания постоянства потока требуется изменение напряжения пропорциональное изменению частоты. Такой закон регулирования напряжения в функции частоты называется  $U/f = \text{const}$ .

Если подставить в формулу (2) значение напряжения для малой скорости вращения, то доля  $iR$  - составляющей обратно-пропорционально увеличивается по отношению к прикладываемому напряжению. Это обстоятельство приводит к существенному уменьшению потока на малых частотах и, соответственно, уменьшению момента. Для обеспечения нагрузочной способности по моменту близкой к номинальной во всем диапазоне скоростей вращения применяют  $iR$  - компенсацию, то есть завышение напряжения относительно закона  $U/f = \text{const}$  как показано на рисунке 3.

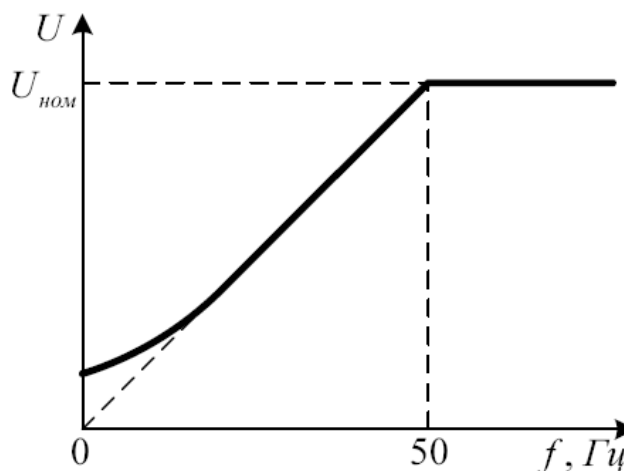


Рис. 3. Закон регулирования  $U/f = \text{const}$  в преобразователях частоты

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

### Принцип частотного инвертирования

Преобразователь частоты определяет три условия при различных скоростях при различных двигателях:

1. Изменяет скорость магнитного поля в двигателе
2. Держит величину магнитного поля в двигателе постоянной
3. Обеспечивает плавное вращение 3-х фазного поля (не пошаговое)

Объясним все эти 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 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)

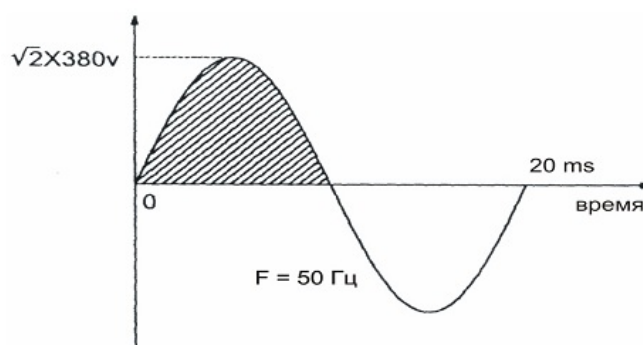


Рис. 4. Поверхностная мера для магнитного поля

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

Величина (сила) магнитного поля может быть изменена посредством:

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

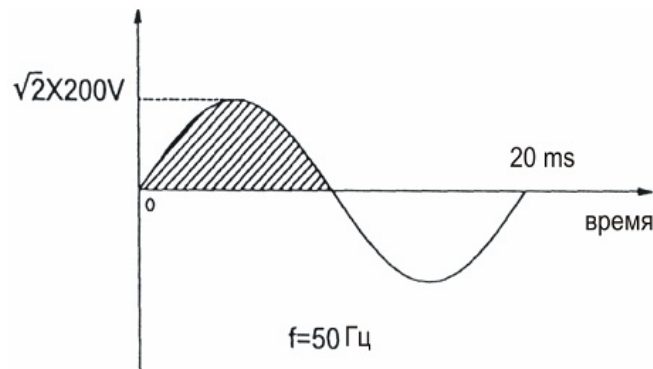


Рис. 5. Магнитное поле при  $U = 200\text{ В}$  и  $f = 50\text{ Гц}$

#### Изменение напряжения (U):

При изменении напряжения от 380 В до 200 В (Рис. 5) площадь под синусоидальной кривой становится меньше. В результате сила магнитного поля уменьшится, и двигатель не может больше создавать требуемый момент.

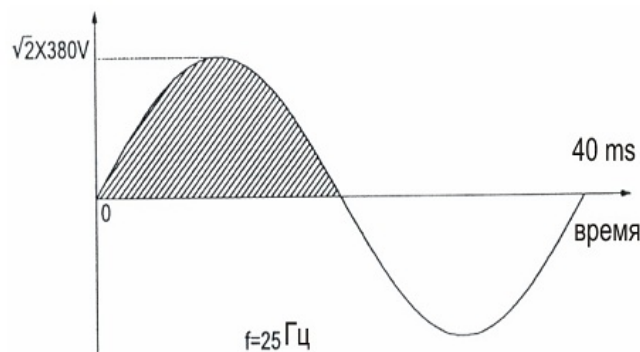


Рис. 6. Магнитное поле при  $U = 380\text{ В}$  и  $f = 25\text{ Гц}$ .

#### 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.

#### Вывод:

Сила трёхфазного магнитного поля зависит от отношения напряжение/частота ( $U/f$ ), обеспечиваемого источником питания. Для двигателя, подключенного к питающей сети, величина  $U/f$  есть:

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

### Вольт-герцовая характеристика

Преобразователь частоты держит 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 ( $U/f$ ).

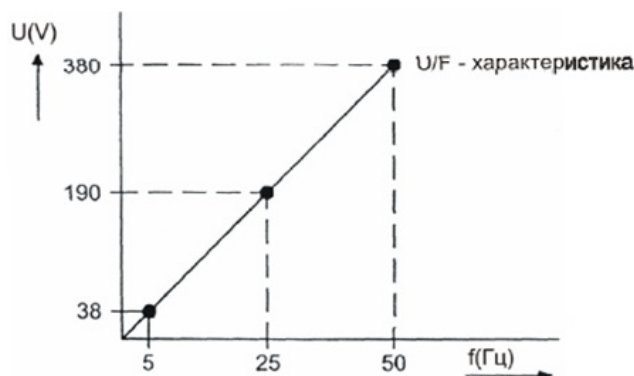


Рис. 7. Характеристика  $U/f$

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

Вычисление с параметрами, указанными на рисунке 7:  $U/f = 380(\text{В})/50(\text{Гц}) = U/f = 190(\text{В})/25(\text{Гц}) = U/f = 38(\text{В})/5(\text{Гц}) = 7,6$

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 8 и 9.

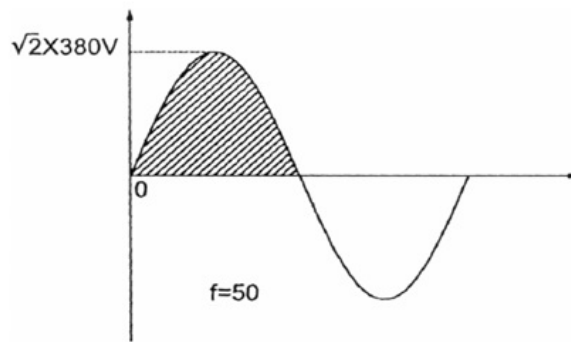


Рис. 8. Время периода 20 мс.

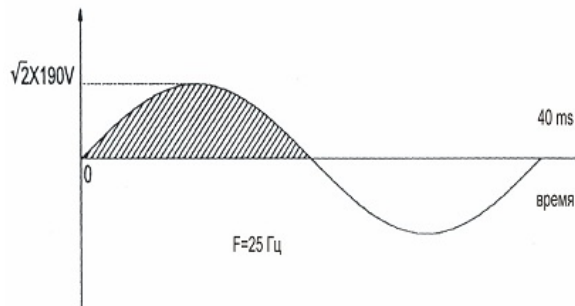


Рис. 9. Время периода 40 мс.

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.

### Увеличение отношения $U/f$

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

### Уменьшение отношения $U/f$

Когда мы уменьшаем отношение  $U/f$ , магнитное поле очень слабое. Двигатель не намагничен. Момент, производимый двигателем, очень слаб. Правильное отношение  $U/f$  гарантирует постоянно генерируемый момент ( $T$ ). Постоянное отношение  $U/f$  необходимо, чтобы избежать ослабления момента на всём диапазоне частот (от 0 Гц до основной частоты 50 Гц).

Неправильно установленное на преобразователе частоты значение  $U/f$  приводит к некорректному намагничиванию двигателя.

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

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

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.

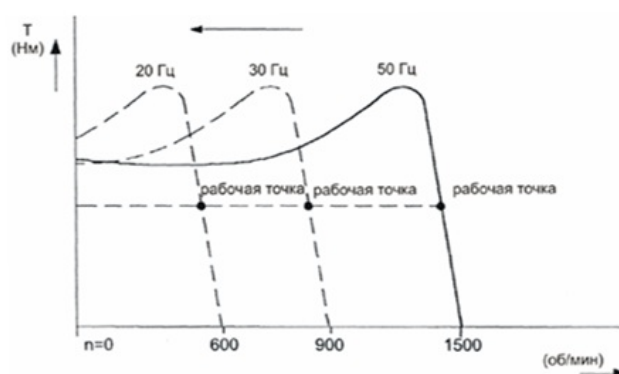


Рис. 10. Кривая момент/скорость перемещается влево

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

### $I \cdot R$ компенсация

Если двигатель, подключённый к преобразователю частоты, вращается с маленькой частотой (от 0 до 5-10 Гц), производимый двигателем момент ( $T$ ) имеет 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  $I \cdot R$  компенсация. В этом случае становится возможным

$$XL = 2\pi \cdot f \cdot L$$

где:  $XL$  - 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  $I \cdot R$  компенсация. В этом случае становится возможным

получить более «сильный» момент (Т) при низкой скорости.

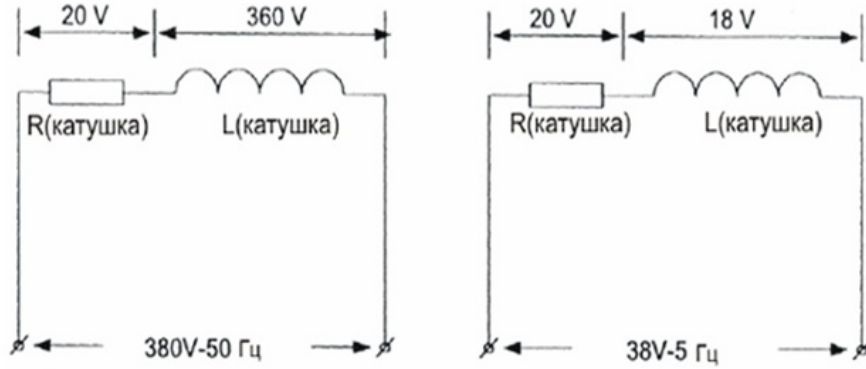


Рис. 11. Упрощённая схема замещения обмотки двигателя

На рисунке 11 представлена схема замещения обмотки двигателя. Падение напряжения на реактивной части определяет силу магнитного поля. Рассчитаем дополнительное напряжение, необходимое для генерации номинального магнитного поля, например, при 5 Гц. Отношение  $U/f$  для рисунка 11:

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

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

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 должно быть 56 В, т.к.  $U/f = (56 - 20) \text{ (В)}/5 \text{ (Гц)} = 36/5 = 7.2 \text{ В/Гц}$

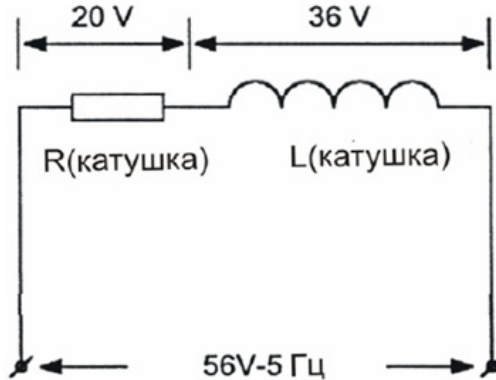


Рис. 12. Дополнительное напряжение снова обеспечивает номинальное поле

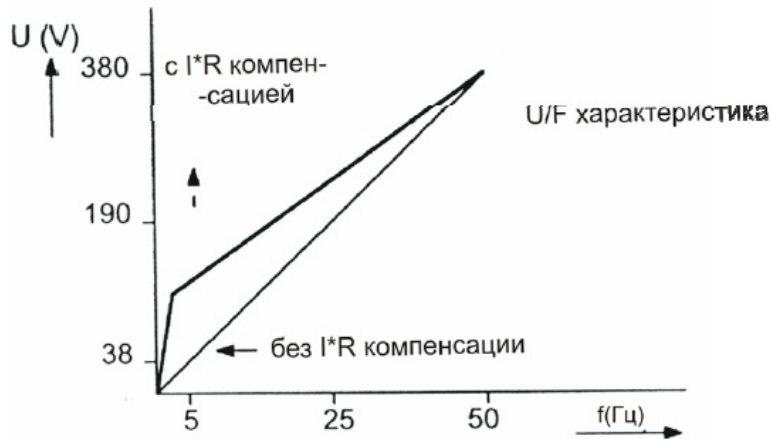


Рис. 13. Дополнительное напряжение при низкой частоте

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  $I \cdot R$  — это установка, при которой данная  $I \cdot R$  компенсация, достаточна для того, чтобы гарантировать, что двигатель очень близок к магнитному насыщению при низких значениях пускового момента. К сожалению, это означает, что  $I \cdot R$  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 (Тн) при полторократном 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.

#### Ослабление поля

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 (Т). Поэтому, если скорость выше номинальной частоты, - это называется ослаблением поля. Это чётко показывает рисунок 14.

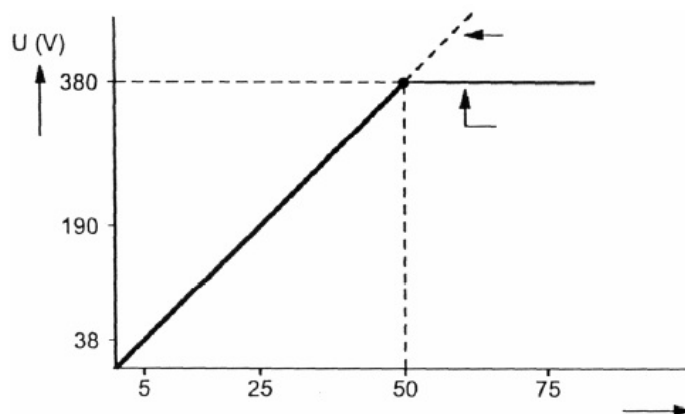


Рис. 14. При выходной частоте выше номинальной величина отношения напряжение/частота уменьшается

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 приблизительно равен (магнитное поле)<sup>2</sup>.

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.

Если нарисовать кривую момент/скорость, можно увидеть, что кривая момент/скорость падает при частотах больше, чем 50 Гц. Это демонстрирует рисунок 15.

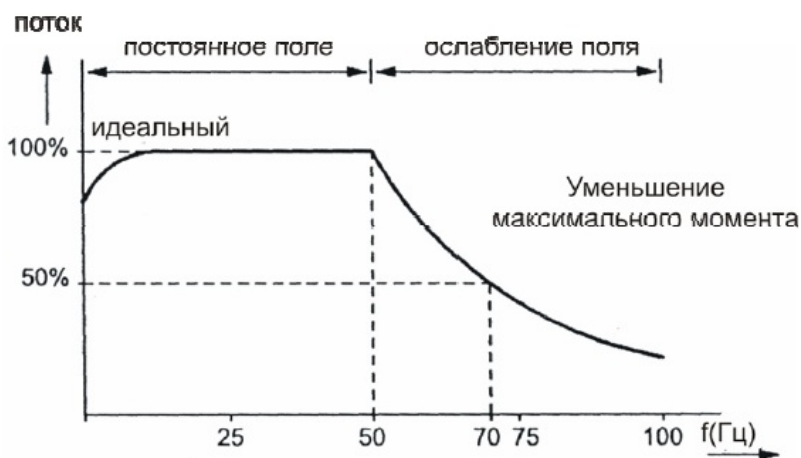


Рис. 15. Падение кривой момент/скорость, при частотах больше 50 Гц

Напряжение питающей сети не может больше возрастать (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  $T/2$ . 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.

### Ограничение тока

Преобразователь частоты изменяет частоту и удерживает постоянной величину отношения напряжение/частота. Кривая момент/скорость сдвигается согласно рисунку 3 горизонтально влево, при этом свойства двигателя остаются неизменными. Ток двигателя, вырабатываемый преобразователем частоты, ограничен до  $1,5 \cdot I_{ном}$ . Этим способом двигатель и преобразователь частоты защищаются от чрезмерно больших токов. При более высокой нагрузке двигателя преобразователь будет вырабатывать больший ток. В определенный момент инвертор выйдет на ограничение тока, вот почему частотный инвертор не вырабатывает ток выше, чем  $1,5 \cdot I_{ном}$ .

В преобразователе частоты происходит следующее: Инвертор начинает вырабатывать максимальный ток  $1,5 \cdot I_{ном}$ , и также  $1,5 \cdot T_n$ .

Преобразователь частоты уменьшает частоту и, как результат, кривая момент/скорость и кривая ток/скорость движутся влево.

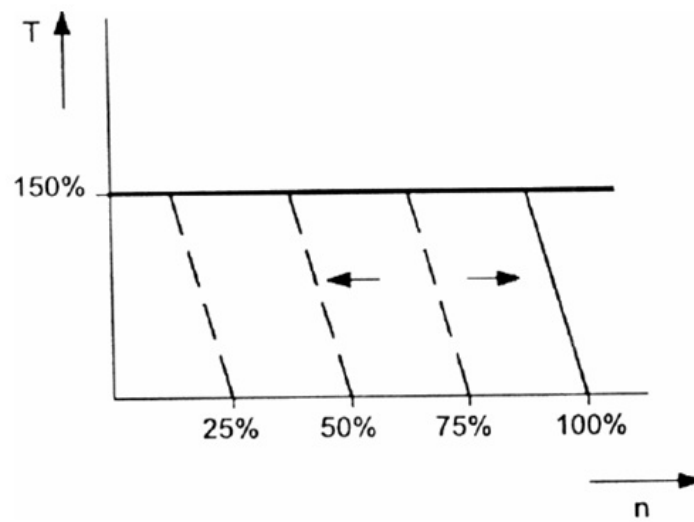


Рис. 16 Уменьшение частоты при ограничении тока

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.