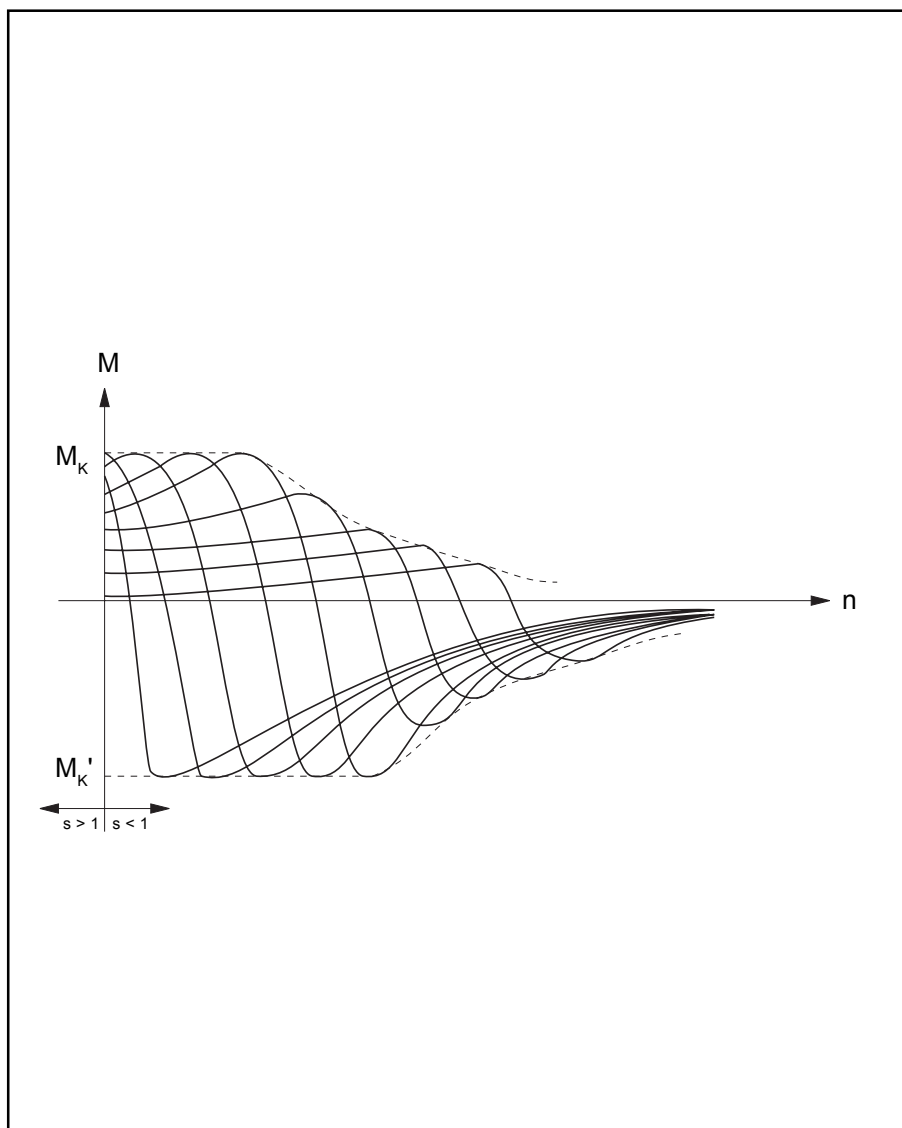


ТРЕХФАЗНЫЙ ПРИВОД

ОСНОВЫ



	СТР.
1. Значимость асинхронных приводов переменного тока	6
2. Трехфазный асинхронной двигатель переменного тока	7
2.1 Устройство и режим работы	7
2.2 Модель	9
2.3 Расшифровка шильдика двигателя	10
3. Работа АС-двигателя от сети	12
3.1 Однофазная схема замещения	12
3.2 Характеристики асинхронного двигателя	14
3.3 Режим работы: двигатель / генератор	16
3.4 Характеристики двигателя при падении напряжения	17
3.5 Характеристики некоторых двигателей	18
4. Режимы работы двигателя	19
5. Другие типы двигателей и их характеристики	21
5.1 Двигатель с тормозом со скольжащим ротором	21
5.2 Двигатель с тормозом	22
5.3 Синхронный двигатель	23
5.4 Реактивный синхронный двигатель	23
5.5 Двигатели с вращающимся полем магнитов	25

6.	Преобразователь частоты (ПЧ)	26
6.1	Принципиальная схема	26
6.2	Трёхфазное напряжение с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ)	27
6.3	Входные и выходные значения	30
6.3.1	Входное напряжение, входной ток	30
6.3.2	Звено постоянного тока	31
6.3.3	Выходное напряжение, выходной ток	31
6.4	Измерение токов и напряжений	33
6.5	Внутренние защитные функции / КЕВ-COMBIVERT	35
7.	Режим работы преобразователя частоты (ПЧ) и асинхронного двигателя (АС-двигателя)	38
7.1	Принципы регулирования скорости	38
7.2	Характеристики двигателя при работе с инвертером	39
7.3	Установка буста	46
7.4	Работа 230 В - двигателя с 400 В - инвертером / 87 Гц - характеристика	45
7.5	Работа в генераторном режиме	52
7.5.1	Расчет тормозного резистора	54
7.6	Нагрузочная характеристика / "Опрокидывание" двигателя	59
7.7	Динамические процессы (ускорение / замедление)	63
7.8	Значение защитных функций ("Сохранить в работе")	65

	СТР.
7.9 Торможение постоянным током	71
7.10 Переключение на выходе / длинный двигательный кабель	73
7.11 Реакции инвертера	75
7.12 Специальные задачи	76
7.13 Сравнение работ без инвертера и с инвертером	80
8. Работа реактивных синхронных двигателей с преобразователями частоты	81
9. Типичные ошибки при подключении и параметризации преобразователей частоты	83
10. Окружение преобразователя частоты	86
10.1 Сетевое подключение преобразователей частоты, последовательный интерфейс	86

KEB не несет ответственности за ошибки и "неправильное толкование" в инструкциях, каталогах, руководствах или других печатных материалах.

1. **Значимость асинхронных приводов переменного тока**

Всегда существовала потребность в регулировании скорости двигателей, чтобы оптимально управлять технологическим процессом. Раньше это делалось механически, например, с помощью механического вариатора. Благодаря большим преимуществам электроники возможны более универсальные приложения и общие понятия современного привода.

Раньше для решения задачи регулирования скорости использовались только приводы постоянного тока. Теперь асинхронные приводы становятся все более популярными с каждым днем. Они состоят из преобразователя частоты и асинхронного двигателя. Причины этого развития следующие:

- Асинхронные машины нетребовательны к техобслуживанию,
- Возможно эксплуатирование во взрывоопасной зоне,
- Высокий коэффициент мощность/масса для асинхронного двигателя,
- Возможность управления при максимальной скорости,
- Низкая стоимость асинхронных двигателей,
- Постоянное улучшение технологии преобразователя с одновременным понижением цены.

Основные сферы применения преобразователей частоты следующие:

- Насосы, вентиляторы, компрессоры,
- Конвейер и транспортное оборудование,
- Текстильные машины,
- Механические станки и деревообрабатывающие машины,
- Упаковочные машины,
- Роботы and транспортные системы,
- Оборудование для белильной и бумажной промышленности.

Большинство приводов находятся в диапазоне до 4 кВт.

2. Трех-фазный асинхронный двигатель переменного тока (AC-Motor)

Электрические двигатели обычно разделяются на две группы:

- Двигатели постоянного тока (d.c. motors)
- Двигатели переменного тока (a.c. motors)

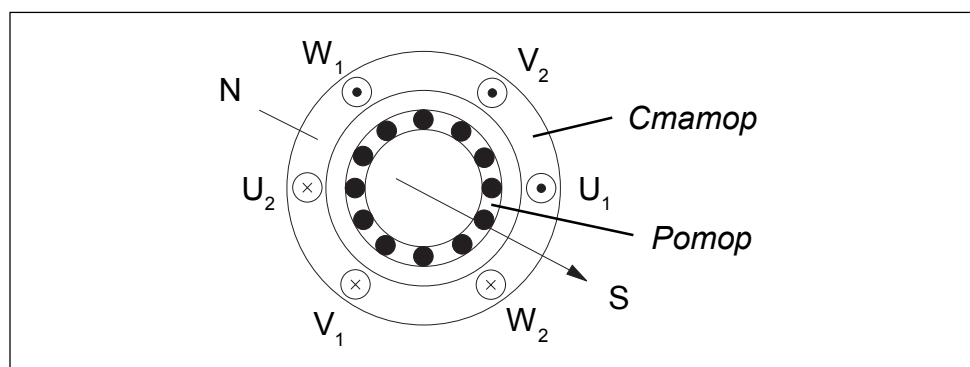
Вторая группа очень важная. Особенно, трех-фазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Благодаря их прочной структуре и невысокой стоимости они приобрели большое значение и описываются более подробно ниже.

2.1 Устройство и режим работы

Статор AC-Motor состоит из пластинчатого сердечника. Трех-фазная обмотка состоит из трех намотанных проводов U, V и W, которые уложены в пазах с внутренней стороны статора. Концы обмоток выходят в клемную колодку и могут быть соединены в звезду или треугольник.

Ротор состоит из пластинчатого сердечника, в которой встроено много стержней. Их концы соединены кольцевыми обоями (рис.1) (беличье колесо).

Рис. 1
Схема беличьего колеса



Когда на двигатель подается трех-фазное напряжение появляется круговое вращающееся поле вызванное геометрическим расположением статорной обмотки. Вращающееся магнитное поле статора наводит э.д.с. в обмотке ротора. Э.д.с. вызывает ток ротора I_2 , который вместе с магнитным потоком статора f производит момент M_1 .

Формула 1

$$M_1 \sim f \cdot I_2$$

Пока магнитное поле статора f вращается с угловой скоростью ω , ротор должен стремиться к этой скорости. Это применимо когда двигатель работает на холостом ходу, т.е. без нагрузки. Затем, двигатель получает синхронную скорость.

Формула 2

$$n_1 = \frac{f_1 [\text{Hz}]}{p} = \frac{60 \cdot f_1}{p} \left[\frac{1}{\text{min}} \right]$$

n_1 : Синхронная скорость (на холостом ходу)

f_1 : Частота питающего напряжения

$2p$: Число пар полюсов двигателя

Если двигатель нагружен, то ротор не может следовать за полем статора больше. Э.д.с. ротора возрастает, что ведет к увеличению тока в роторе, пока не наступит динамическое равновесие момента двигателя M_i и момента нагрузки.

Разница между скоростью ротора n и синхронной скоростью n_1 характеризуется величиной **скольжения скорости** n_s .

Формула 3

$$n_s = n_1 - n$$

Скольжение s - это отношение скольжения скорости к синхронной скорости.

Формула 4

$$s = \frac{n_s}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

Формула 5

$$\text{В тоже время: } n = n_1 \cdot (1-s)$$

Формула 6

$$\text{Ротор имеет скольжение частоты } f_2 = s \cdot f_1$$

2.2 Модель

Существуют два типа асинхронных двигателей:

- Двигатели с короткозамкнутым ротором (беличье колесо)
- Двигатели с фазовым ротором

Двигатели с короткозамкнутым ротором имеют обмотку сделанную из медных или алюминиевых прутьев, которые не доступны с наружи. Двигатели с фазовым ротором имеют трех-фазную обмотку ротора концы которой соединены с контактными кольцами расположенными на валу. Если эти концы короткозамкнуты, то характеристики двигателя такие-же, как и для двигателя с короткозамкнутым ротором. Возможно соединить контактные кольца с реостатом, чтобы изменять сопротивление ротора и характеристику двигателя. Также процедура может быть использована для обратного преобразования энергии ротора в сеть (субсинхронный выпрямительный каскад). В то же время скорость может варьироваться в определенных пределах. Несмотря на эти преимущества, почти всегда используются двигатели с короткозамкнутым ротором, т.к. они имеют более низкую стоимость и меньше изнашиваются (нет контактных колец). Для регулирования скорости применяют преобразователи частоты. Специальная подгруппа-это барабанные двигатели. Статорная обмотка находится на жестко закрепленном валу. Ротор (оправа) расположен с внешней стороны и непосредственно приводит в движение механизм, например, ленту транспортера.

Рис. 2
Сравнение
фазового ротора
с
короткозамкнутым
ротором

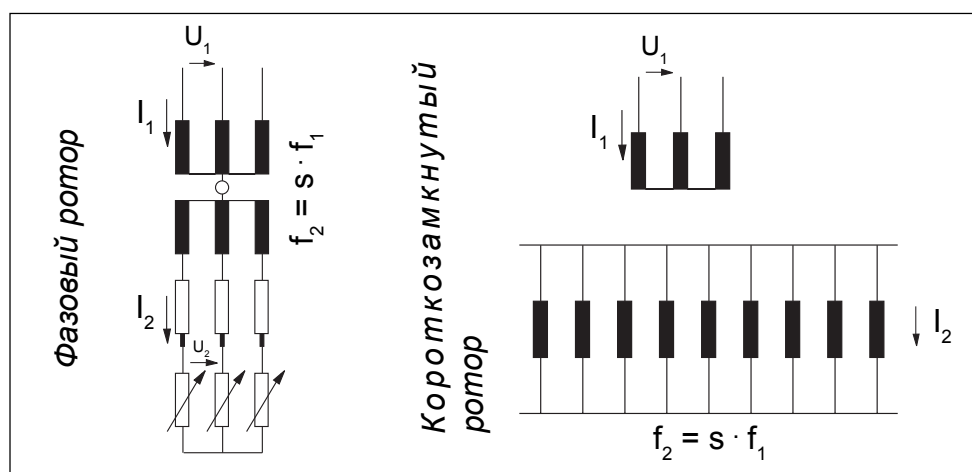
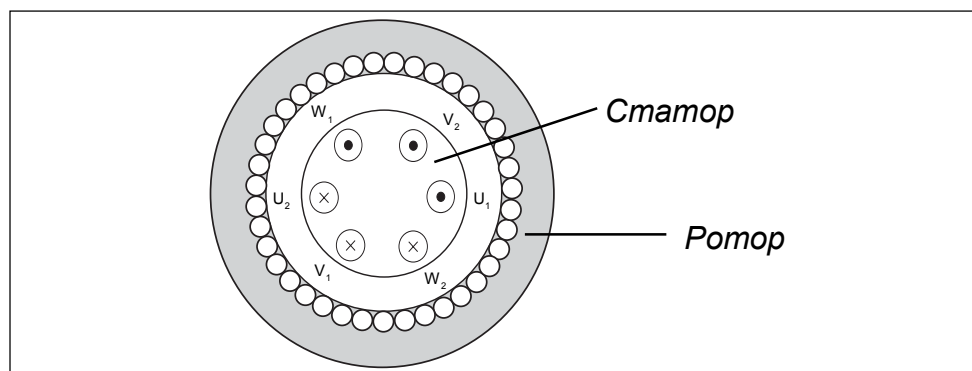


Рис. 3
Барабанный
двигатель



2.3 Расшифровка шильдика двигателя

Основные характеристики двигателя находятся на шильдике двигателя (см. Рис.4). Они соответствуют VDE 0530.

Рис. 4
Шильдик

$\text{min}^{-1} = \text{rpm}$

3 ~ Mot. 71
1,10 / 1,95 A **1410 min⁻¹**
Y/D 380/220 V **cosφ 0,75**
0,37 kW
Is.KI. B IP 54 **50 Hz** **VDE 0530/84**

3 ~ Mot.71: Трех-фазный двигатель с высотой 71 мм (от середины вала до поверхности крепления).

1.10/1.95 A: Номинальный ток при соединении звездой 1.1A
Номинальный ток при соединении треугольником 1.95 A

1410 rpm: Номинальные обороты двигателя 1410 об/мин

Y/D 380/220 V: Соединение звездой для 380 В и соединение треугольником для 220 В.

cosφ 0.75: Значение коэффициента мощности двигателя 0.75

$$\cos\varphi = \frac{\text{актив. мощность}}{\text{полн. мощность}} = \frac{P}{S}$$

0.37 kW: Номинальная мощность на валу двигателя 0.37 кВт

Is.Kl. B: Последняя буква определяет допускаемую температуру обмоток двигателя при продолжительном режиме работы. Существуют следующие изоляционные классы:

E	=	120 ° C	
B	=	130 ° C	(Стандарт)
F	=	155 ° C	
H	=	180 ° C	

IP 54: Степень защищенности двигателя
IP 54 = пыле и брызгостойкая обшивка

50 Hz: Номинальная частота двигателя

VDE 0530/84: Сертификат соответствия VDE

Номинальный момент двигателя может быть легко вычислен используя спетификацию шильдика.

Формула 7

$$M_n [\text{Nm}] = \frac{P_n [\text{kW}] \cdot 9550}{n_n [\text{rpm}]} = \frac{0.37 \text{ кВт} \cdot 9550}{1410 \text{ об/мин}} = 2.5 \text{ Н*м}$$

Следующая формула определяет полную мощность двигателя:

Формула 8

$$S = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot 380 \text{ В} \cdot 1.1 \text{ А} = 724 \text{ Вт}$$

Активная мощность рассчитывается так:

Формула 9

$$P = S \cdot \cos\varphi = 724 \text{ Вт} \cdot 0.75 = 543 \text{ Вт}$$

К.П.Д. двигателя:

Формула 10

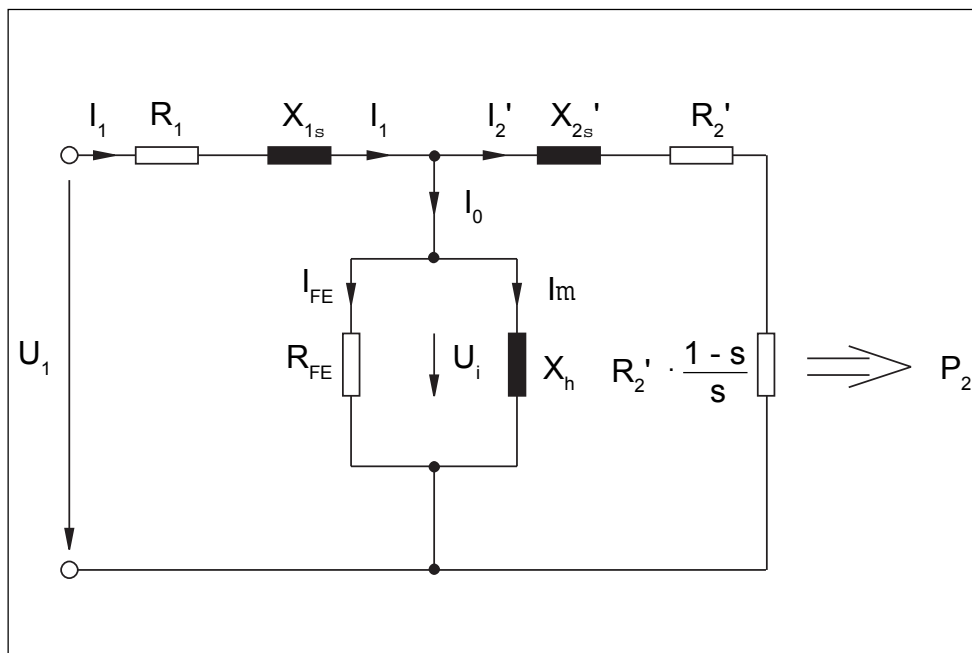
$$h = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{370 \text{ Вт}}{543 \text{ Вт}} = 0.68 = 68 \%$$

3. Работа АС-двигателя от сети

3.1 Одно-фазная схема замещения

Электрическое поведение асинхронного двигателя показано на одно-фазной эквивалентной диаграмме (-->Рис. 5).

Рис. 5



где:

R_1 = активное сопротивление статора

X_{s1} = реактивное сопротивление статора

R_{Fe} = потери в железе

X_h = Reactance of the main inductance

X_{s2}' = реактивное сопротивление ротора

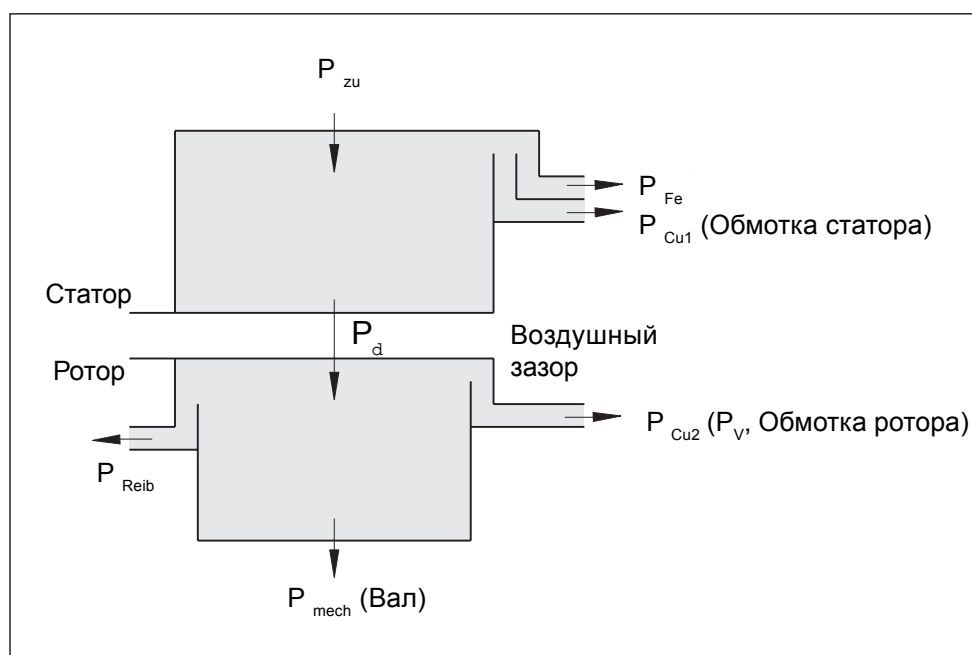
R_2' = Эквивалентное активное сопротивление определяющее потери мощности в роторе (потери в меди)

$R_2' \cdot \frac{1-s}{s}$ = Эквивалентное активное сопротивление определяющее изменение мощности на валу двигателя P_2

Преобразование энергии асинхронного двигателя показано на эквивалентной энергетической диаграмме.

Часть потребляемой электрической энергии преобразуется в тепло (P_{Cu1}) в сопротивлении обмоток статора R_1 . Другая (меньшая) часть есть потери в железе (P_{Fe}) на сопротивлении R_{Fe} . Оставшаяся часть энергии (P_d) передается через воздушный зазор на ротор. В роторе часть энергии (P_{Cu2}) сжигается на сопротивлении R_2' . Оставшаяся энергия, уменьшенная на величину фрикционных потерь P_{frict} (потери в подшипниках и в вентиляторе), составляет механическую энергию на валу двигателя (--> Рис. 6).

Рис. 6
Энергетическая
диаграмма
асинхронного
двигателя



3.2 Характеристики асинхронного двигателя

Формула 11

Внутренний момент M_i асинхронного двигателя вычисляется по следующей формуле:

$$M_i = \frac{3}{2\pi n_1} \cdot U_i^2 \cdot \frac{1}{X_{2s}' \left(\frac{R_2'}{s \cdot X_{2s}'} + s \cdot \frac{X_{2s}'}{R_2'} \right)}$$

Формула 12

Он связан с напряжением: $M_i \sim U_i^2$

Формула 13

Максимально возможный момент асинхронного двигателя характеризуется максимальным моментом M_k , который также связан с напряжением: $M_k \sim U_i^2$

По формуле Kloss'sche момент связан с максимальным моментом двигателя так:

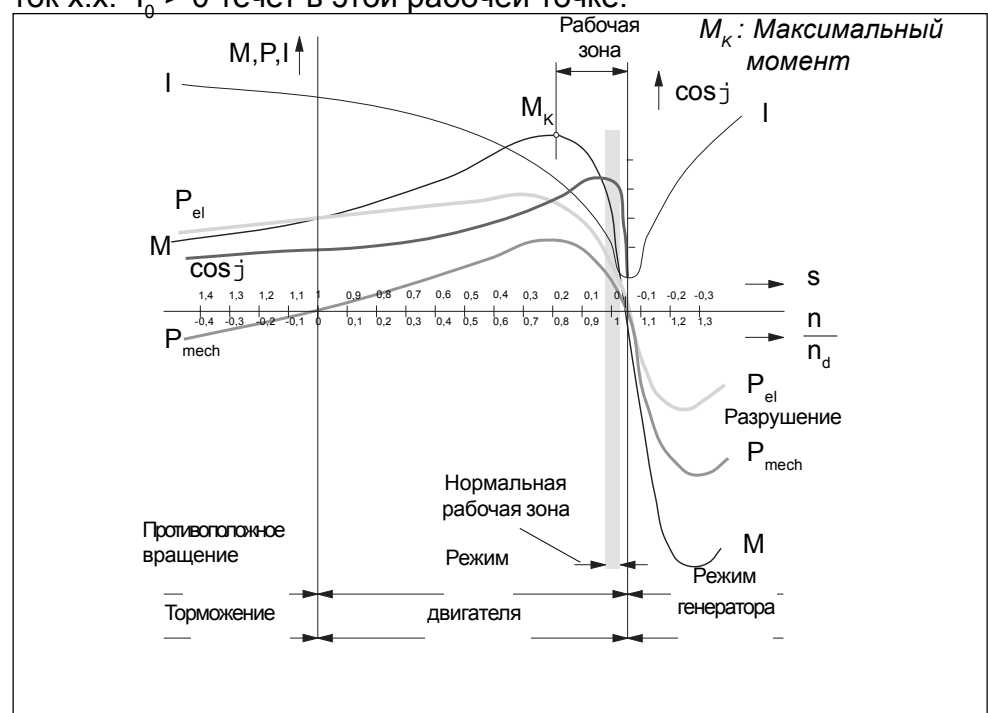
Формула 14

$$M = M_k \cdot \frac{2}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} \quad (s_k : \text{максимальное скольжение})$$

Это уравнение дает характеристику зависимости скорости двигателя от момента (--> Рис. 7).

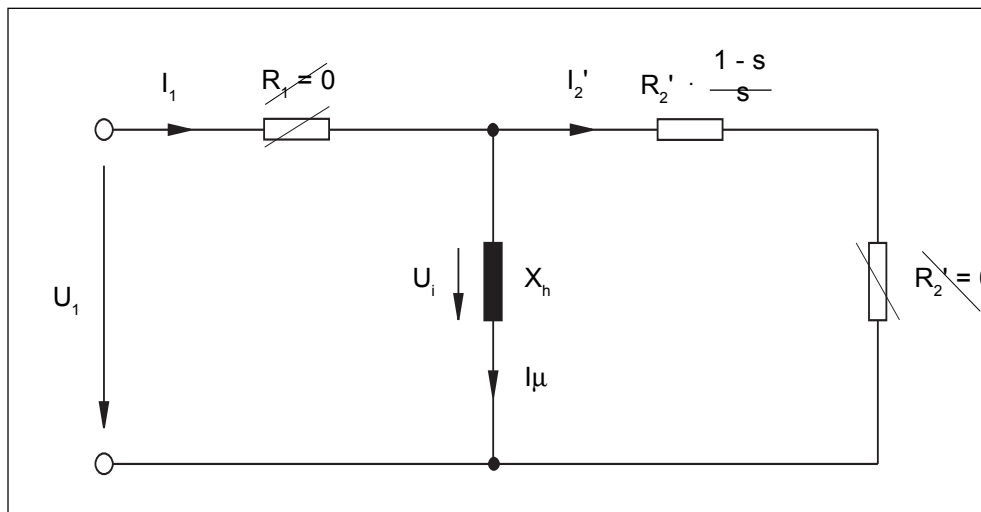
Как видно из Рис. 7 ток двигателя постоянно растет с увеличением скольжения. Он в 2,5 - 9 раз превышает номинальный ток в начальной точке ($s = 1$). Поскольку двигатель также нуждается в реактивной энергии намагничивания при холостом ходе, поэтому ток х.х. $I_0 > 0$ течет в этой рабочей точке.

Рис. 7
Характеристики трехфазного асинхронного двигателя



Если побочный сопротивления и сопротивления потерь не включены в схему (Рис. 5), которая может применяться для большинства двигателей, тогда следующая упрощенная схема используется:

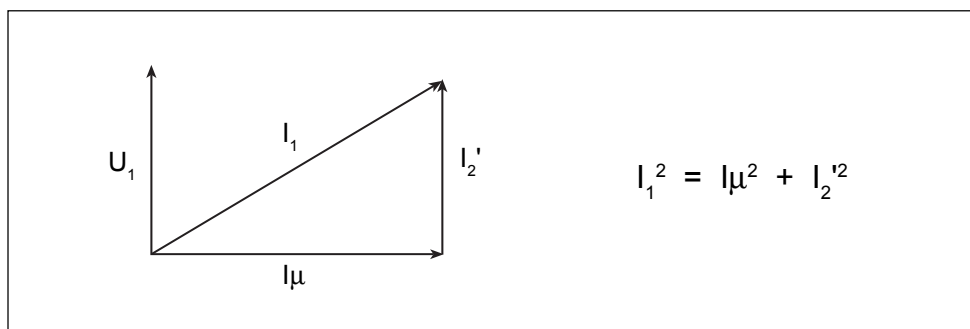
Рис. 8



Ток статора I_1 разделяется на постоянный ток намагничивания I_μ и зависимый от нагрузки ток ротора I_2' . Поскольку оба этих тока сдвинуты по фазе на 90° , они должны быть геометрически сложены (Рис.9).

Рис. 9

Формула 15



Формула 16

При маленьком скольжении (заштрихованная область см. Рис. 7) соотношение $I_2' \sim s$ имеет место.

Формула 17

Если $M \sim \phi \cdot I_2'$ и $\phi = \text{const.}$ то:
 $M \sim s$ (линейная зависимость).

3.3 Режимы работы: двигатель/генератор

В зависимости от направления момента нагрузки асинхронный двигатель работает как двигатель или как генератор. Для этих режимов имеем следующее:

- Двигательный режим: Момент и скорость имеют одинаковый знак (действуют в одном направлении); двигатель потребляет энергию от сети.
 $0 < s < 1$ $n < n_1$
- Генераторный режим: Момент и скорость имеют разные знаки (действуют в противоположных направлениях); двигатель отдает энергию в сеть. $s < 0$
 $n > n_1$

Рабочий диапазон при $s > 1$ характеризуется как диапазон встречного вращения, в то время как магнитное поле и скорость вращения ротора имеют различные направления. Изменение направления вращения осуществляется переключением 2-х фаз. Существуют движения по часовой стрелке и против часовой стрелки.

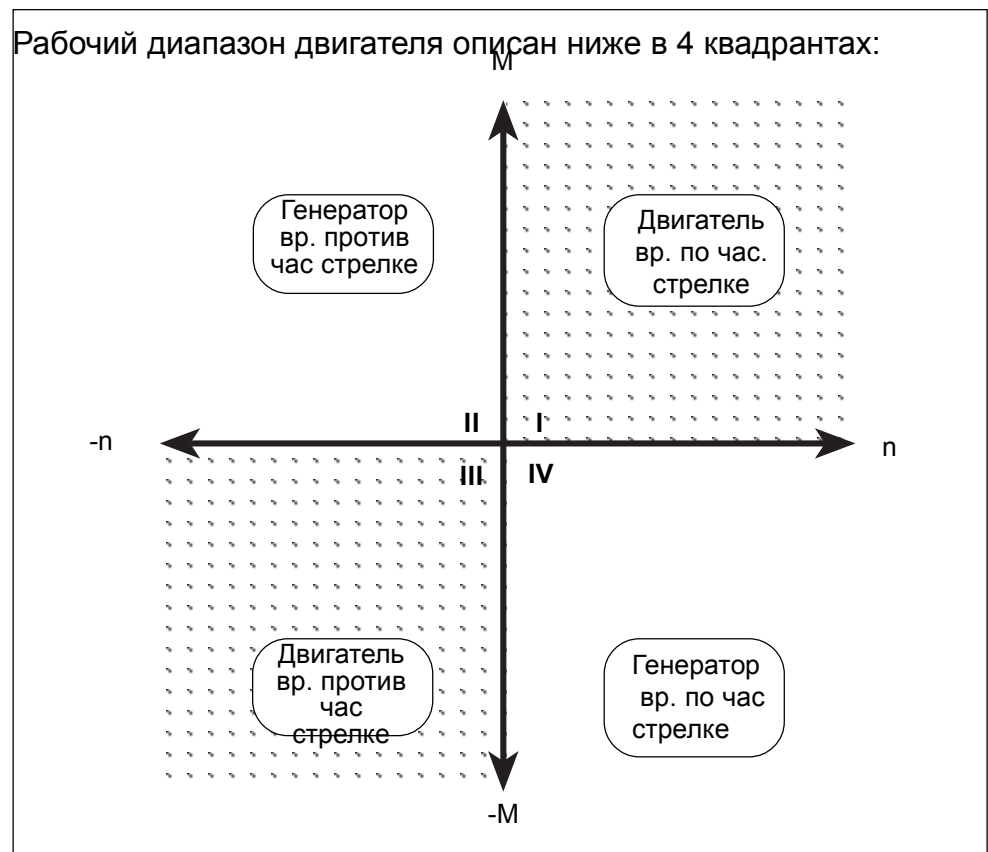


Рис. 10

3.4
**Характеристики
двигателя
при падении
напряжения**

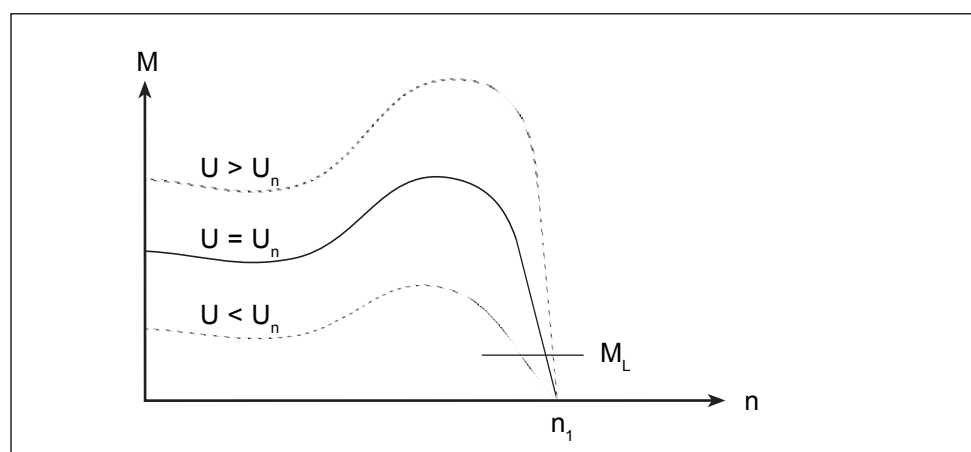
Согласно уравнению (12) $M_i \sim U_i^2$. Если активное сопротивление статора R_1 мало, то $U_i = U_1$.

Когда входное напряжение уменьшается, тогда магнитный поток уменьшаются (ослабление поля) и ток ротора I_2 тоже уменьшаются. Это изменение действует на момент т.к. $M \sim \phi \cdot I_2'$.

Например, падение напряжения на 10 % вызывает уменьшение момента примерно на 19 %.

На Рис. 11 можно видеть влияние падения напряжения на моментно-скоростную характеристику асинхронного двигателя.

Рис. 11



Пусковой момент и максимальный момент уменьшаются пропорционально квадрату напряжения. В диапазоне между максимальной точкой и точкой холостого хода график более пологий, чем при полном сетевом напряжении.

Как видно из Рис. 11 скольжение двигателя, при постоянной нагрузке, увеличивается с уменьшением напряжения U . Это может быть объяснено тем, что ток ротора I_2 обеспечивающий момент, с уменьшением напряжения U , может сохранен меньшим сопротивлением ротора R_2'/s , а следовательно большим скольжением s .

Также как уменьшение напряжения вызывает пологость графика M - n характеристики, увеличение напряжения делает график круче и в то же время уменьшает скольжение при неизменной нагрузке. Убедитесь, что двигатель не перенасыщается когда напряжение увеличивается, пока увеличение напряжения может только вызывать прибавление потерь в железе (большой ток намагничивания). Результаты увеличения напряжения при работе двигателя с преобразователем частоты будут показаны ниже (--> буст, генераторный режим).

3.5 Характеристики некоторых двигателей

Таблица ниже предоставляет основные характеристики 4-х полюсных асинхронных двигателей различных размеров

Данные двигателя	Номинальная мощность двигателя			
	0.37 kW	1.5 kW	11 kW	75 kW
s_n	» 8 %	» 6 %	» 2.7 %	» 1.5 %
n_n	» 1380 мин ⁻¹	» 1410 мин ⁻¹	» 1460 мин ⁻¹	» 1480 мин ⁻¹
M_n	» 2.5 Н*м	» 10.2 Н*м	» 72 Н*м	» 484 Н*м
η	» 62 %	» 75 %	» 86 %	» 95 %
$\cos\varphi$	» 0.76	» 0.82	» 0.85	» 0.86
R_1	» 20 Ом	» 5 Ом	» 0.8 Ом	» 0.1 Ом

$$\frac{M_A}{M_n} \gg 1.5 \dots 3$$

$$\frac{M_k}{M_n} \gg 1.8 \dots 3.5$$

$$\frac{I_A}{I_n} \gg 2.5 \dots 9.0 \quad (\text{увеличивается с увелич. мощности})$$

s_n : номинальное скольжение

n_n : номинальное число оборотов

M_n : номинальный момент

η : к.п.д.

$\cos\varphi$: коэффициент мощности

R_1 : активное сопротивление статора

M_A : стартовый момент

M_k : пусковой момент

I_A : пусковой ток (работа от сети)

I_n : номинальный ток

4. Режимы работы двигателя

Существует четыре режима работы двигателя. Они различаются фактором протяженности цикла работы и нагревом.

Фактор протяженности вычисляется следующим образом:

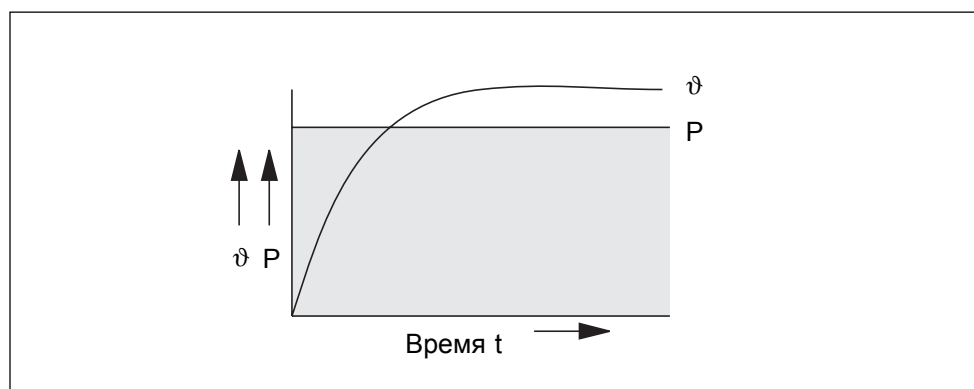
$$\text{протяженность цикла} = \frac{\text{Время загрузки}}{\text{Время загрузки} + \text{пауза}} \cdot 100 \%$$

Четыре режима работы следующие: продолжительный режим, кратковременный режим, прерывистый режим и продолжительный режим с периодической нагрузкой.

В течении продолжительного режима S1 время работы с номинальной мощностью настолько велико, что температурный баланс достигнут. Этот режим является обычным для стандартных двигателей. Они могут быть постоянно нагружены своим номинальным моментом.

Рис. 12а

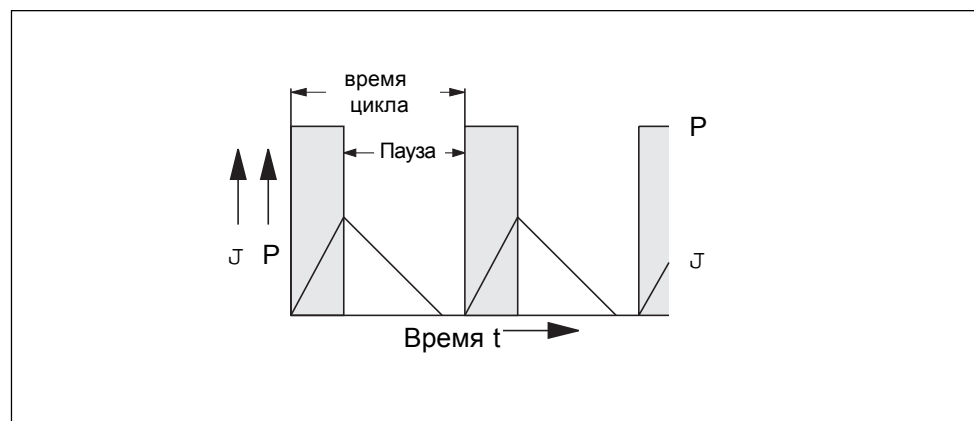
Продолжительный режим S1



Во время кратковременного режима S2 время работы с номинальной мощностью так мало, что температурный баланс не достигается. В течении длительных пауз двигатель полностью охлаждается.

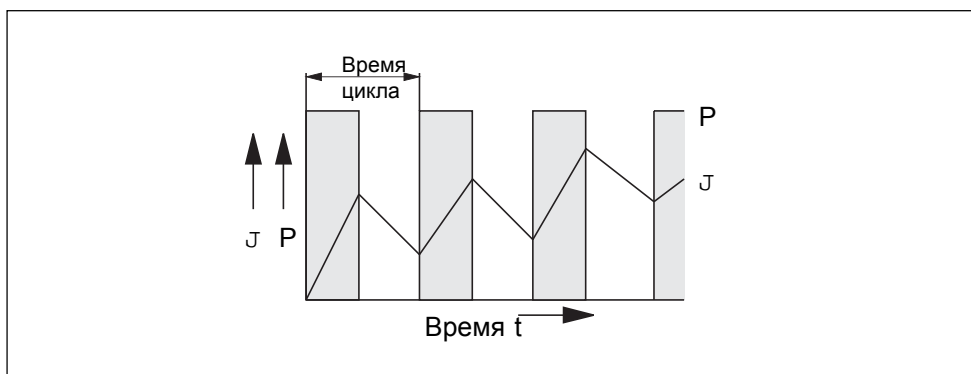
Рис. 12b

кратковременный режим S2



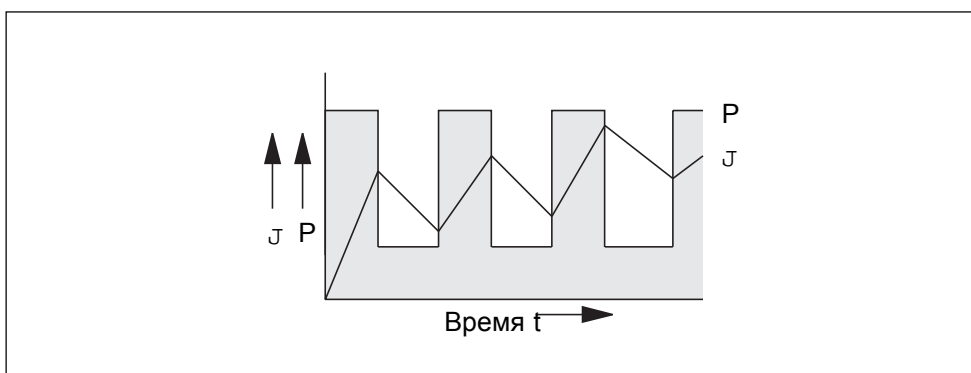
Во время прерывистого режима S3 паузы так малы, что двигатель не успевает охладиться до комнатной температуры.

Рис. 12с
Прерывистый
режим
S3, S4, S5



Во время продолжительного режима с периодической нагрузкой S6 двигатель не может охладиться, в течении интервалов холостого хода, до окружающей температуры.

Рис. 12d
Продолжительный
режим с
периодической
нагрузкой S6

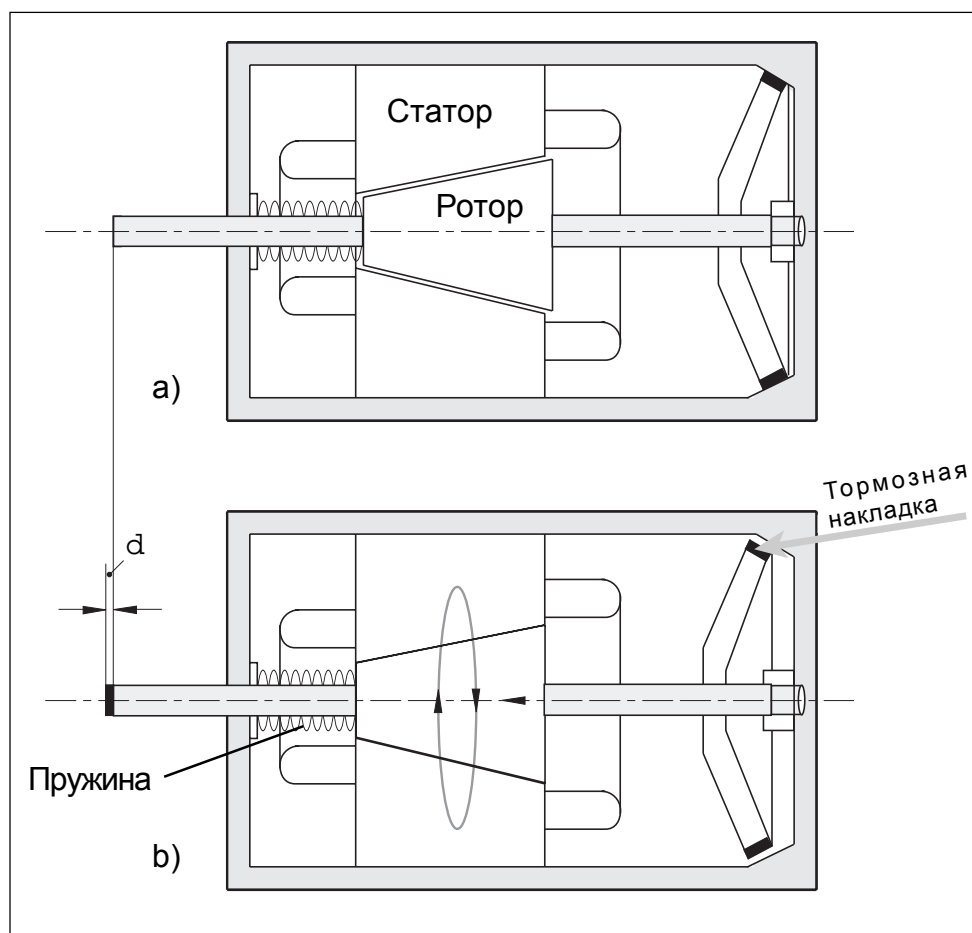


Двигатели, которые управляются преобразователями частоты, работают длительное время в продолжительном режиме S1 и периодически в прерывистом режиме S3.

5. Другие типы двигателей и их характеристики

5.1 Двигатель с тормозом со скользящим ротором

Рис. 13



Статор и ротор конически смонтированные на двигателе с тормозом со скользящим ротором. С одной стороны ротора находится тормозная накладка, а с другой, противоположной стороны, пружина сжатия.

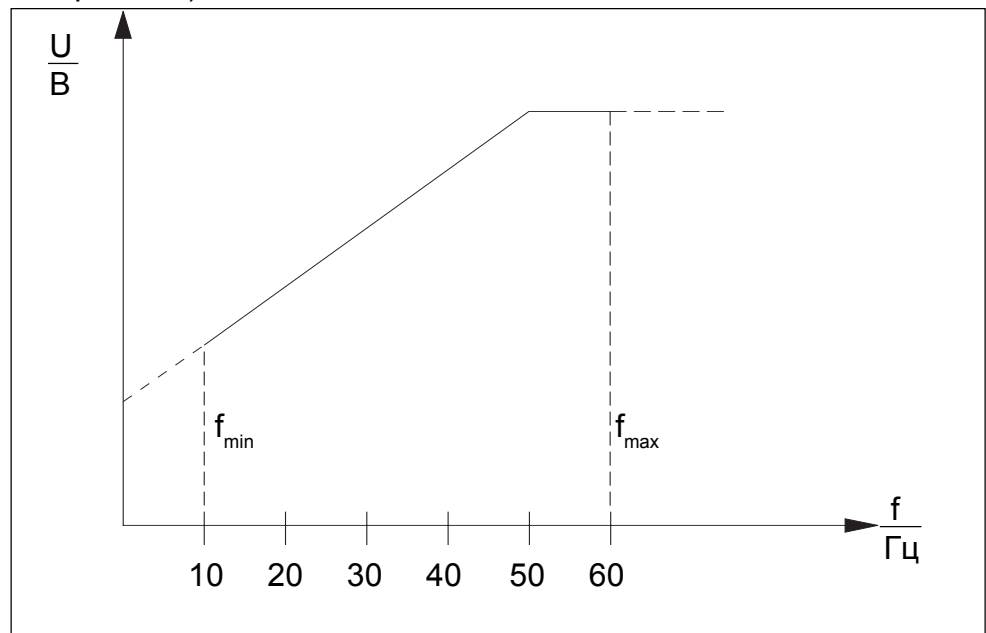
Если двигатель находится в состоянии покоя, то ротор прижимается пружиной к тормозному диску и находится в заторможенном состоянии.

Когда двигатель включается ротор отходит от нейтрального положения из-за магнитного поля статора. Теперь возможна стандартная работа двигателя (воздушный зазор уменьшается).

Чтобы ротор двигателя вышел из нейтрального положения, необходим больший ток, чем при старте обычного асинхронного двигателя. Это достигается установлением буста при работе двигателя с преобразователем частоты. ПЧ должен быть на 2 размера больше при работе с такими двигателями.

Работа двигателя с тормозом со скользящим ротором возможна только в определенном диапазоне частот. Нижний предел ограничен, примерно 5 - 10 Гц, потому что, ротор сдвигается к позиции торможения. Это происходит потому что, момент уже больше недостаточно большой, чтобы удержать ротор в свободном состоянии против силы действия пружины и/или ток увеличивается не пропорционально. Верхний предел примерно 55 - 65 Hz и определяется ослабленностью поля и моментом нагрузки (ротор заторможен) --> Рис. 14.

Рис. 14



5.2 Двигатель с тормозом

Двигатели с тормозом оборудованы пружинными тормозами. Они имеют следующие задачи:

- Ограничение перемещения после выключения двигателя
- Удержание привода в определенном положении
- Увеличение частоты включения двигателя

Существуют два способа управления при работе с ПЧ:

1. ПЧ может управлять тормозом когда модуляция отключена или зависит от частоты, и когда случается индикация ошибок.
2. Двигатель может быть заторможен одновременным снятием напряжения и включением тормоза.

Двигатели с тормозом имеют различные использования, например:

- как следящие приводы и приводы подачи,
- с механическими станками
- с кранами и лифтами
- для ленточных транспортёров

5.3 Синхронный двигатель

Синхронные двигатели имеют постоянную рабочую скорость, которая не меняется во время стандартных изменений нагрузки. Они работают со скольжением $s = 0\%$.

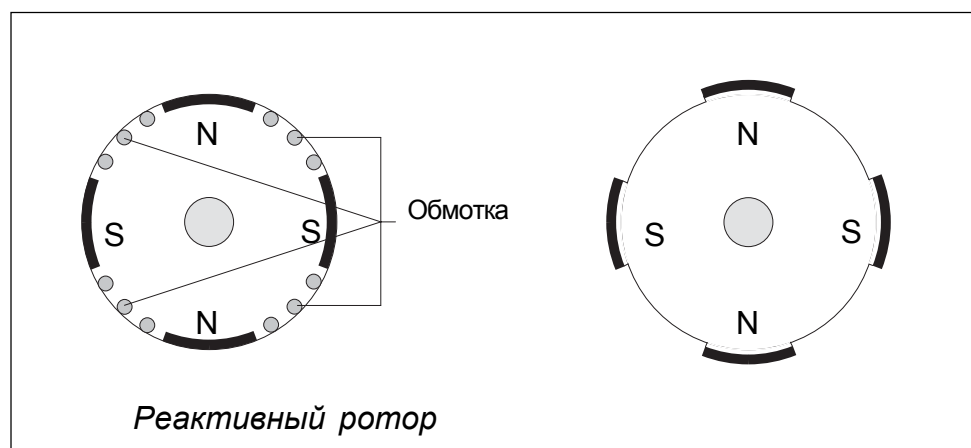
Синхронные двигатели при асинхронной работе выдают многократный номинальный ток. Во время перегрузки они теряют синхронность.

ПЧ должен выбираться по току в синхронных двигателях и соответственно завышенного габарита.

В основном синхронные двигатели более часто используются как генераторы электрической мощности, чем как приводные двигатели, поскольку они намного дороже, чем асинхронные двигатели.

5.4 Реактивный синхронный двигатель

Рис. 15



Реактивные синхронные двигатели - это самозапускающиеся, невозбуждающиеся синхронные двигатели. Механическая структура идентична стандартным трехфазным двигателям. Однако, ротор состоит из $2p$ реактивных пазов и в результате становится магнитно эксцентричным. (--> Рис. 15).

Если такой ротор находится во вращающемся магнитном поле с $2p$ полюсами, то он всегда старается принять позицию наибольшей магнитной энергии. Это означает, что ротор вращается синхронно.

Хорошая рабочая характеристика получается только когда число полюсов статора и ротора совпадает. Таким образом, невозможно конструировать реактивные двигатели с переключением полюсов с рабочими характеристиками для обеих скоростей.

После включения двигатель работает асинхронно. Это вызвано имеющимся коротко-замкнутым ротором. В этой рабочей точке на асинхронный момент накладывается маятниковый момент с остаточным скольжением частоты.

Работает ли двигатель синхронно ("впадает в шаг"), зависит от того, достаточен ли остаточный ускоряющий момент (= асинхронный момент + положительный маятниковый момент - момент нагрузки) для ускорения полного момента инерции, в время последнего (электрического) оборота при синхронной скорости. Таким образом, условие так называемого "втягивающего момента" как правило не возможно.

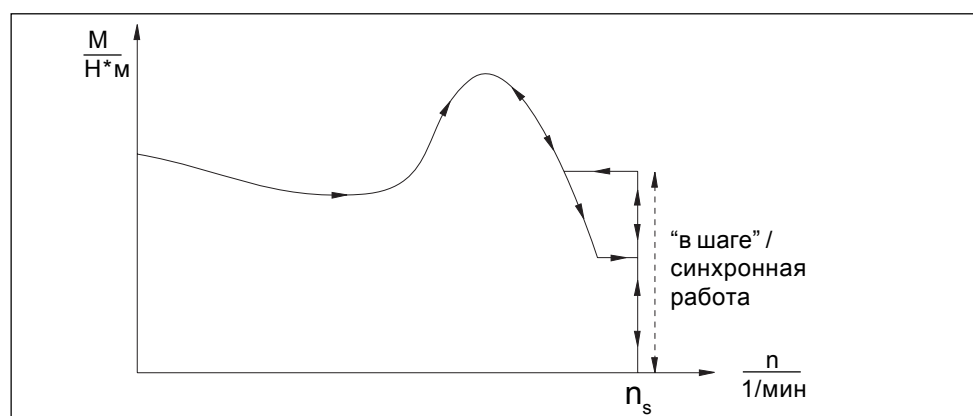
Во время синхронной работы двигатель имеет сходство с крутящей пружиной, когда под нагрузкой происходит поворот противоположно направлению вращения поля. Если опрокидывающий момент достигнут при этом, то двигатель "выпадает из шага", и продолжает работать асинхронно. Такое рабочее состояние ведет к тепловому разрушению, в результате повышенного входного тока, и должно быть предотвращено.

При определенных скоростях может возникнуть резонанс, как для реактивного синхронного двигателя, так и для любых других синхронных двигателей, вместе с внешними центробежными массами, представляющими собой колебательную пружинную систему масс. Эта проблема может возникнуть, особенно, для больших скоростных диапазонов, во время регулирования скоростей приводов, и поэтому необходимо производить тщательную проверку перед применениями.

Благодаря простой структуре, реактивные моторы относительно недорогие и надежные, в сравнении с синхронными двигателями. Недостатком является то, что КПД ниже, и, в основном, фактор мощности намного хуже ($\cos\phi = 0.3 \dots 0.7$). Масса больше, чем у стандартных асинхронных двигателей.

Реактивные двигатели обычно подключаются звездой на 220 В. Ток должен быть отмечен (например 1.4 kW/10.5 A). ПЧ для этого типа двигателя должен быть спроектирован на это ток. Следует убедиться возможен ли ремонт. Двигатели могут использоваться везде, где необходимы синхронные приводы, например, ленты транспортеров, ткацкое оборудование и т. д.

Рис. 16
Моментно-
скоростная
характеристика
реактивного
синхронного
двигателя

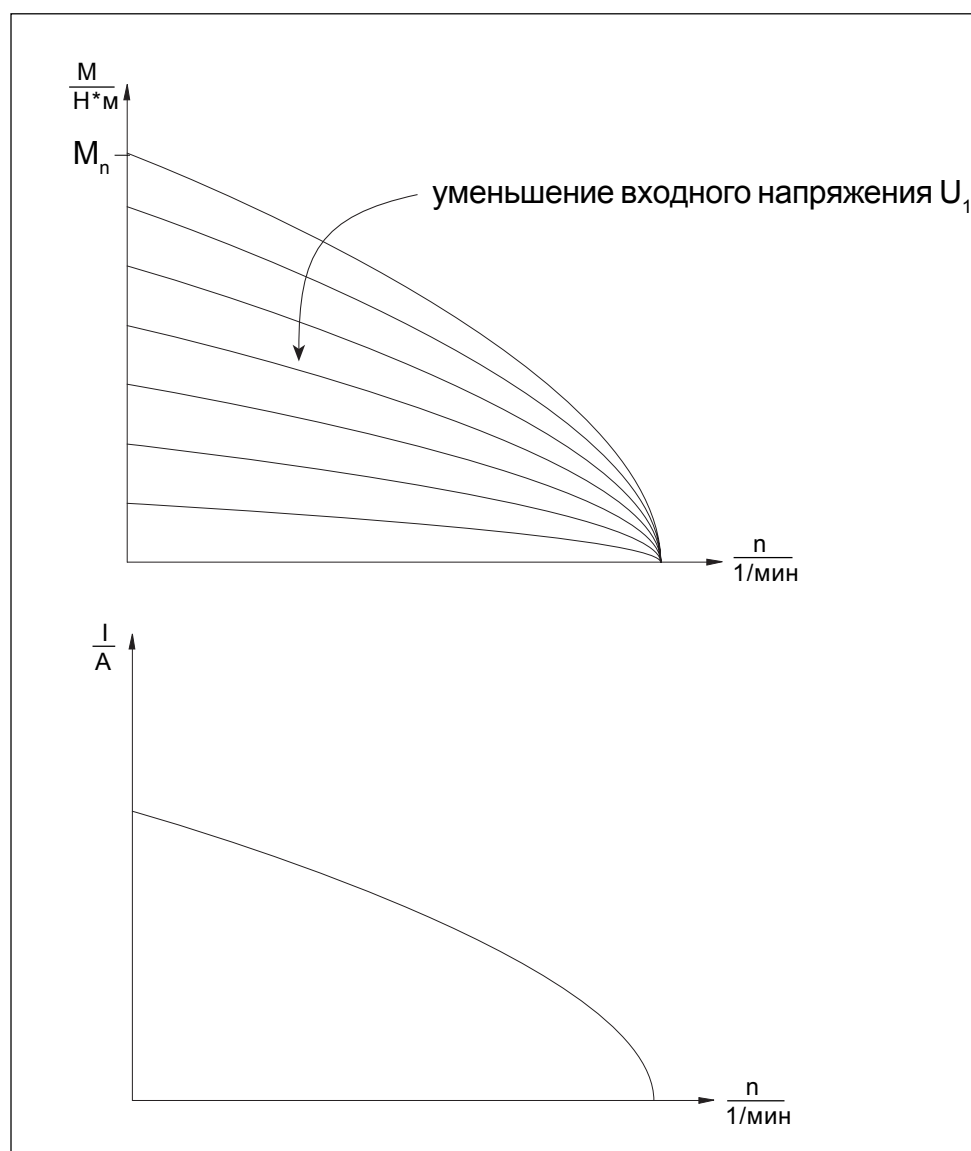


5.5 Двигатели с вращающимся полем магнитов

Двигатели с вращающимся полем магнитов - это трехфазные асинхронные двигатели со специальным ротором. Они электрически промаштабированы так, что они могут оставаться включенными при номинальном напряжении с заблокированным валом во время продолжительного или прерывистого режимов. В тоже время они обеспечивают максимальный момент; момент удержания. Номинальный ток двигателя дается для неподвижного состояния. Эти двигатели в основном используются для:

- Сервоприводов,
- Удерживающих приводов,
- Намоточных приводов,
- Приводы с чрезмерными переключениями на сеть

Рис. 17
 M_n = момент в продолжительном режиме

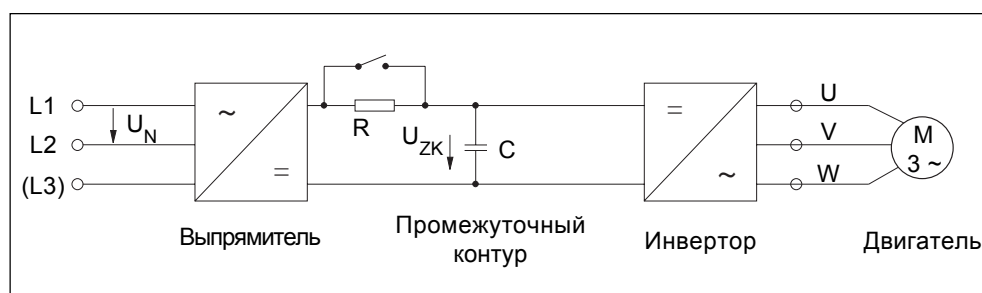


6. Преобразователь частоты (ПЧ)

6.1 Принципиальная схема

На рис.18 см. ниже, представлена блок-схема силовой части преобразователя с промежуточным звеном постоянного тока (так называемый U - инвертор)

Рис. 18



Выпрямитель состоит из неуправляемого одно или трехфазной мостовой схемы. Однофазная версия используется только для низких мощностей. Выпрямитель преобразует переменное напряжение сети в постоянное напряжение. Далее оно сглаживается в промежуточном контуре конденсатором, в идеальном случае напряжение промежуточного контура составляет:

Формула 18

$$U_{ZK} = \sqrt{2} \cdot U_N$$

Во время зарядки конденсатора промежуточного контура протекает очень большой кратковременный ток. Это может вывести из строя входной предохранитель или, даже, выпрямитель. Ток зарядки должен быть ограничен допустимой величиной. Это достигается включением балластного резистора R последовательно с конденсатором, который активизируется только при включении преобразователя. После зарядки конденсатора резистор выключается, например, контактным реле.

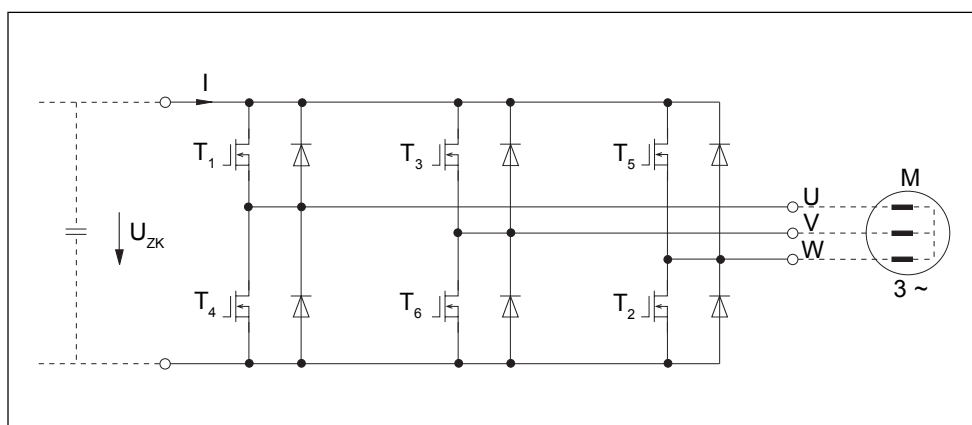
Большая емкость конденсатора требуется для сглаживания напряжения промежуточного звена. После выключения инвертора из сети, конденсатор сохраняет высокое напряжение в течении определенного времени. Это отображается зарядным светодиодом. Основное назначение преобразователя частоты - это получение переменного по частоте и амплитуде напряжения для управления трехфазным асинхронным двигателем. Поэтому на выходе устанавливается инвертор. См. следующую главу.

6.2 Трехфазное напряжение с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ)

При инвертировании постоянного тока в переменный в ПЧ используются транзисторы, которые работают в переключающем режиме. В начале 90-х доминировали биполярные транзисторы с относительно малыми частотами переключения, до 2 кГц. Сегодня, используется полевые транзисторы с низкими потерями, а также IGBT транзисторы. Эти типы транзисторов обеспечивают частоты переключения до 16 кГц с очень низким уровнем шума.

Коммутационная схема инвертирования представлена на рис 19.

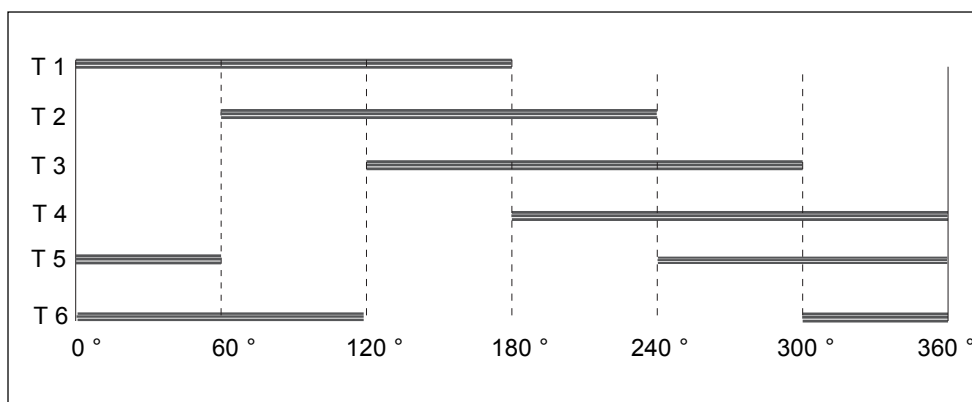
Рис. 19



Как видно из рис. 19, ток через обмотку двигателя может протекать только тогда, когда, по меньшей мере, один из верхних (T1, T3 и T5) и один из нижних транзисторов (T4, T6 and T2) включены.

Одновременно включены три транзистора. Диаграмма включения показана на рис. 20.

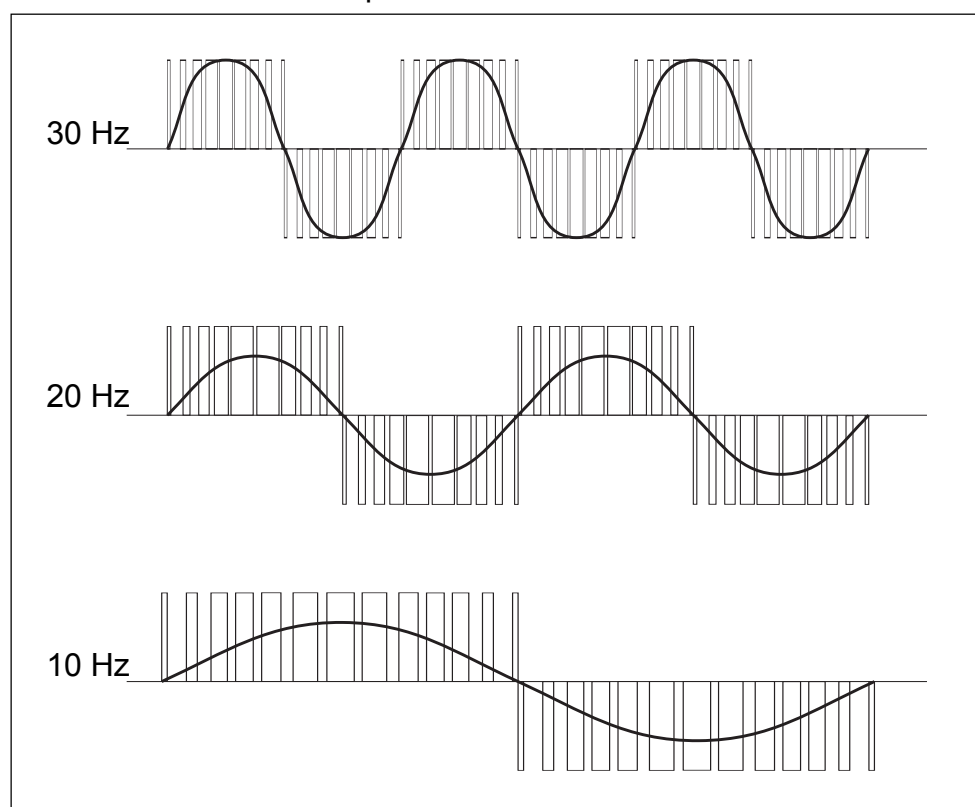
Рис. 20
Порядок срабатывания выходных ключей инвертора (1 цикл)



Из-за индуктивности двигателя, ток не может резко упасть до нуля, когда транзистор выключается. Требуются антипараллельные диоды, которые могут быть коммутированы на ток в момент включения (сравните Рис. 22).

Посредством циклического переключения силовых ключей, ток меняется в трех выходных фазах, которые постоянно сдвинуты на 120° относительно друг друга. Получается симметричная трехфазная система, частота которой зависит от длительности цикла срабатывания выходных ключей инвертора (--> Рис. 20). Амплитуда определяется величиной отношения времени включения ко времени выключения транзисторов.

Это отношение, при широтно-импульсной модуляции синусоидального сигнала, мало в начале и конце полуволны, и велико в середине. Это делает возможным получить синусоидальную форму с минимальным числом гармоник.



*Рис. 21
Выходное
напряжение U-
инвертора
(импульсный
инвертор),
принципиальная
диаграмма с
основной
гармоникой*

Полные графики токов и напряжений для одной фазы U показаны на рис. 22.

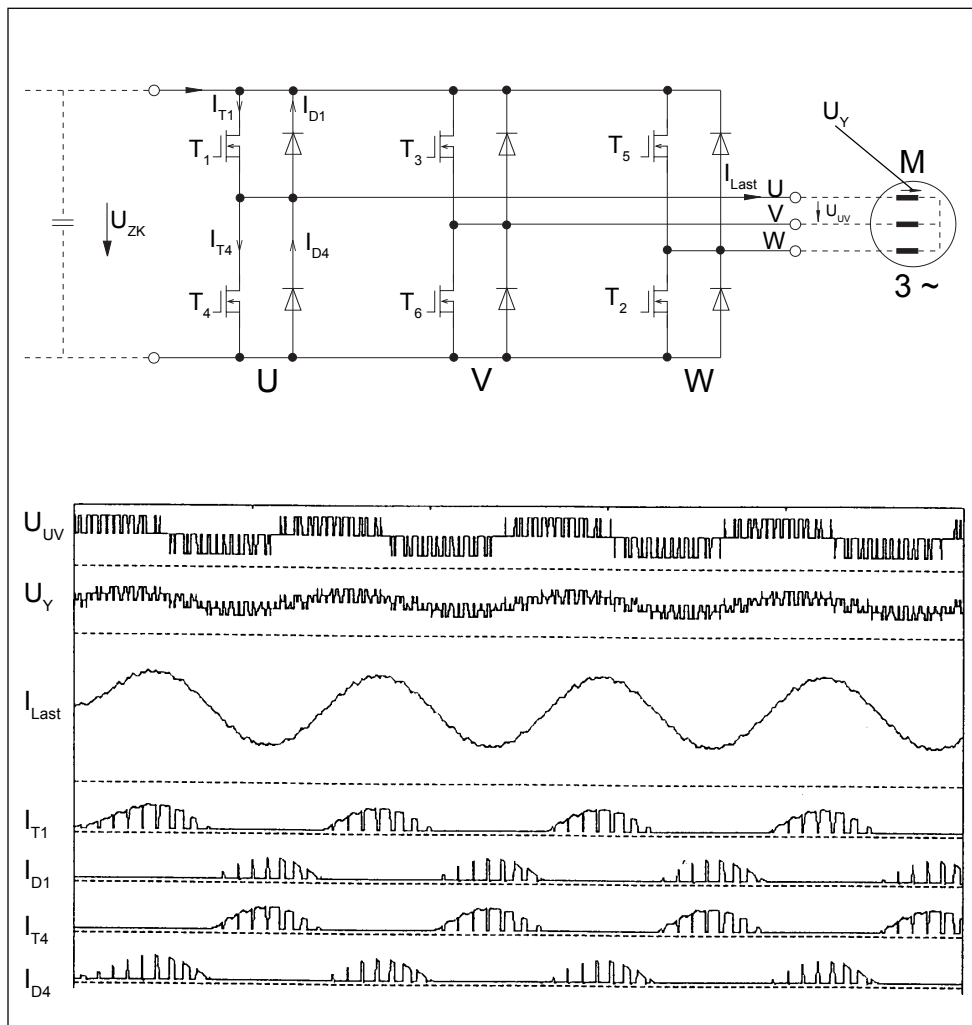


Рис. 22

Болеe высокая несущая частота, т.е. частота с которой транзисторы включаются и выключаются в течении полуволны, может более точно приблизить ток к синусоидальной форме, и, следовательно, меньшим дополнительным потерям в двигателе.

В тоже время гармоники сдвигаются к более высокой частоте, которая при несущей частоте 16 кГц, лежит за пределами нормального температурного диапазона.

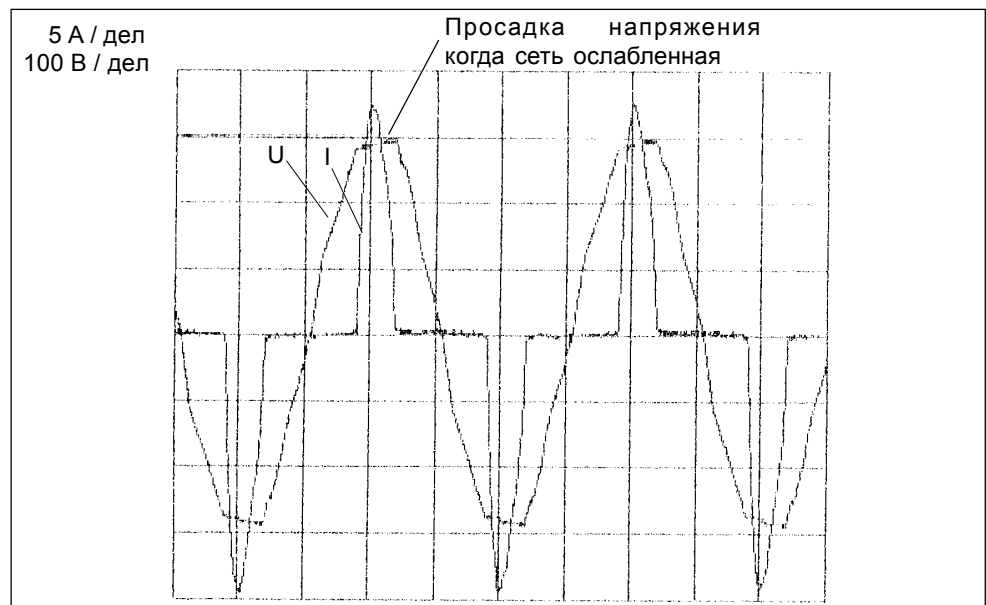
6.3 Входные и выходные значения

В то время как ток и напряжение проходят через преобразователь, они имеют более или менее сильные отклонения от синусоидальной формы. Подробное описание см. ниже.

6.3.1 Входное напряжение, входной ток

Входное напряжение - это значение преобразователя, которое наиболее точно приближается к синусоидальной форме. Отклонения случаются только, когда в районе максимального значения существенно падает напряжение в сети или питающих линиях, из-за зарядного тока конденсатора в промежуточном контуре, когда полное сопротивление сети и проводов слишком велико (\Rightarrow Рис. 23).

Рис. 23
Входные величины инвертора с однофазным подключением



Входной ток состоит из токовых пиков, которые всегда происходят, когда конденсатор промежуточного контура перезаряжается через входной выпрямитель. Эта перезарядка начинается, когда напряжение промежуточного контура $U_{ЗК}$ становится равным величине мгновенного сетевого напряжения U_N и выпрямительный мост переключается с закрытого состояния в проводящее.

Пиковое значение тока I_1 примерно в 3...5 больше эффективного значения. Обращайте внимание на это при выборе поперечного сечения силовых проводов и предохранителей.

Амплитуда токовых пиков увеличивается при номинальной нагрузке инвертора. Это происходит потому что, выпрямитель должен обеспечить выходной ток инвертора во время фазы перезарядки для промежуточного конденсатора и зарядного тока.

Графики тока и напряжения на рис. 23 справедливы не только для ПЧ, но и для почти всех приборов с неуправляемыми выпрямителями. Фактор мощности $\cos \varphi$ для преобразователя равен приблизительно 1. Однако, сеть должна обеспечивать значительную величину искажения реактивной мощности, которая может быть уменьшена линейными стабилизаторами, когда мощность большая.

Таким образом, выходное напряжение состоит из четных сегментов при чисто индуктивной нагрузке. При омическо - индуктивной нагрузке, например, представленной асинхронным двигателем, выходной ток состоит из сегментов экспоненциальных функций. Более высокая несущая частота и индуктивная нагрузка приводят к более синусоидальной форме.

Когда используются двигательные дроссели, особенно со средне частотными двигателями (маленькая индуктивность), волны тока и время нарастания для блоков напряжения уменьшаются. Падение напряжения вызванное двигательным дросселем должно быть отслежено.

Рис. 25
Графики
выходного тока

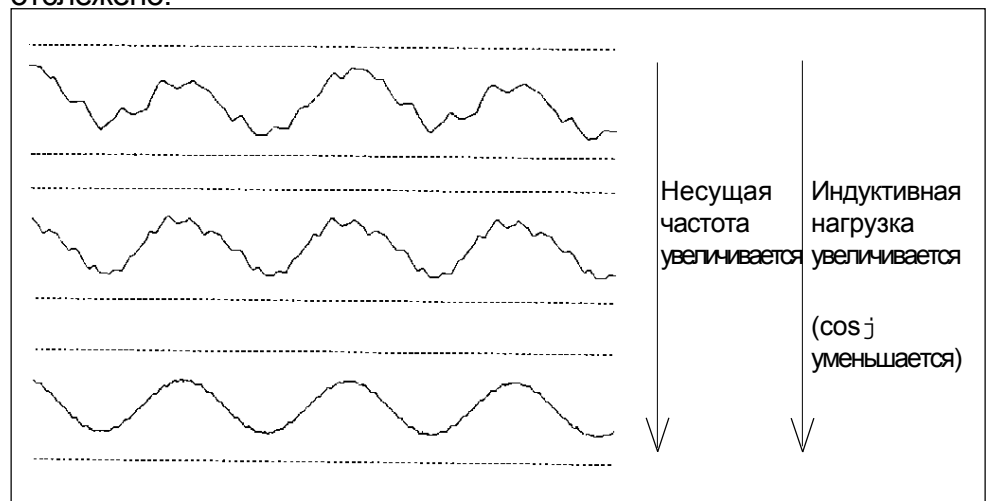
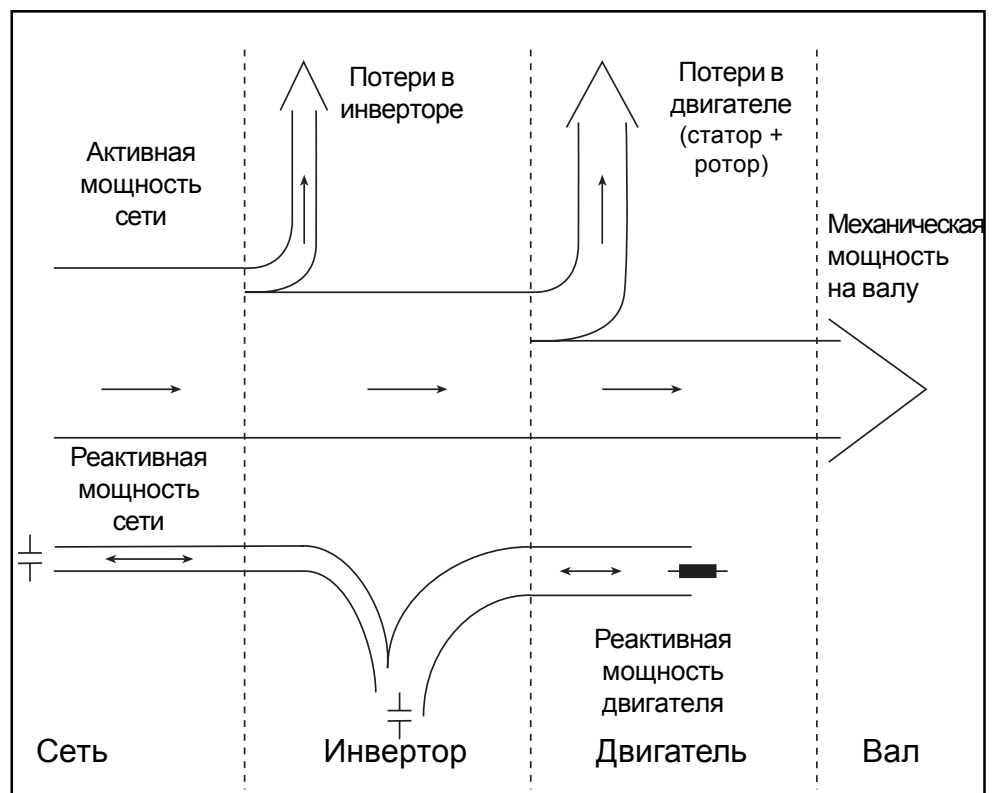


Рис. 26
Энергетический
баланс
частотного
привода



6.4 Измерение токов и напряжений

Из-за не синусоидальных форм токов и напряжений частотного преобразователя не все измерительные приборы подходят для измерения. Когда важно не только измерение входного эффективного напряжения, которое может быть определено обычным мультиметром, а также, пиковая величина напряжения. Она определяет напряжение промежуточного контура, а также выходное напряжение. Резкое уменьшение этого пикового напряжения, вызванное перезарядочными токами промежуточного контура, может быть определено измерением входного напряжения (при загруженном инверторе) осциллографом. Кроме того, точка замера не может быть подключена к основному заземлению (это может быть достигнуто, например, установкой разделительного трансформатора для питания осциллографа). Также, контрольную фотоголовку следует использовать 1 : 100.

Пиковое значение очень важно при измерении входного тока. Оно может быть определено токовым измерительным зажимом с аналоговым выходом напряжения (пропорц. мгновенному значению) осциллографа. Токовый измерительный зажим должен иметь достаточно большой диапазон, чтобы пиковое значение “не обрезалось”. Если необходимо измерить эффективное значение, то токовый измерительный зажим должен иметь возможность обрабатывать большой коэффициент амплитуды.

Измерение эффективных значений выходного напряжения цифровыми измерительными инструментами обычно очень неточное. Даже если выходная частота лежит в допустимом частотном диапазоне измерительного устройства, который обычно не для частот $\ll 50$ Hz. Высокий коэффициент включения также делает это трудным для измерения. Простые аналоговые инструменты (вращающаяся катушка и подвижный сердечник) дают наилучший результат. Чтобы проверить одинаково ли выходное напряжение во всех 3 фазах, двигатель должен быть отделен от инвертора. Это предотвращает гальваническое соединение фаз через обмотку двигателя, и, таким образом, препятствует неточным результатам измерения.

Точный промежуток времени выходного напряжения и форма пульсации сохраняются в памяти осциллографа, поэтому важно иметь не заземленное соединение и использовать контрольную фотоголовку 1 : 100. Пиковое значение вых. напряжения равно напряжению промежуточного контура.

Измерение выходного тока идентично измерению вых. напряжения. Используйте инструменты вращающуюся катушку и подвижный сердечник для измерения эффективного значения. Более точный ток может быть виден, используя токовый измерительный зажим с аналоговым выходом напряжения (пропорц. мгновенному знач.).

Шунтированные измерения обычно неаккуратные, в соответствии с чем ЕМС помехи имеют отрицательное влияние на измеряемый участок. В большинстве случаев одиночное измерение выходного эффективного тока не достаточно, поскольку инвертер регистрирует и вычисляет мгновенные величины и, таким образом, пиковые токи. Ошибки перегрузки по току могут быть предвидены и предотвращены только точной регистрацией пиковых величин.

Для точного измерения на инвертере очень важно использовать хороший токовый измерительный зажим с аналоговым выходом и запоминающий осциллограф. Также справедливо для грубого измерения эффективного значения применять аналоговые приборы: вращающаяся катушка или движущийся сердечник.

Токи и напряжения, которые измеряются в инвертере для защиты прибора:

- Напряжение промежуточного контура (d.c.-bus voltage)
- Ток между конденсатором d.c. и а.с. инвертером (зависит от прибора)
- Сумма трех выходных напряжений (определение замыкания на землю) (зависит от прибора)
- Токи выходных фаз (зависит от прибора)

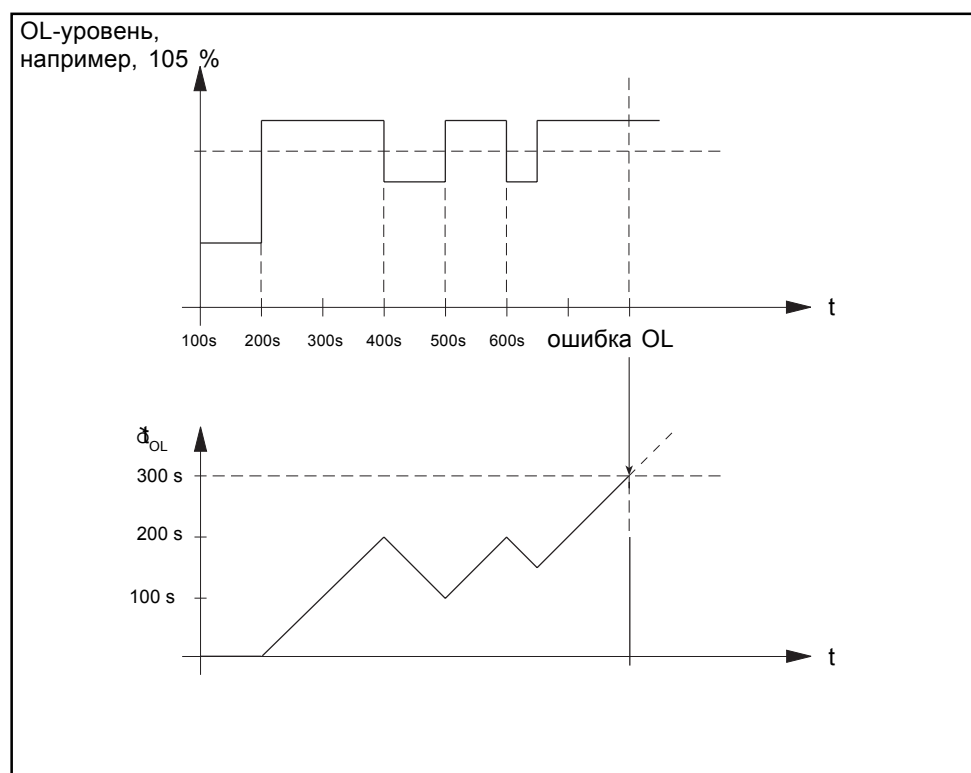
6.5 Внутренние защитные функции / КЕВ-COMBIVERT

Чтобы защитить прибор против высоких токов, напряжений и температур многочисленные мониторинг и защитные функции встроены в преобразователь частоты.

При загрузке, в зависимости от номинала, от, например > 150 % и/или > 200 % (= 1,5 раза и/или 2 раза тока инвертера), инвертер выключается в течении нескольких микросекунд с сообщением ошибки перегрузки по току (OC). Пиковая токовая величина критична для этого.

Если величина загрузки лежит в перегрузочном диапазоне, но ниже критического уровня, тогда через определенный период времени появится ошибка OL (overload). В результате будет предотвращен перегрев полупроводникового модуля. OL защитная функция имеет встроенный эффект. Это означает, что времена перегрузки складываются, а времена без перегрузки вычитаются (см.Рис. 27). Это особенно важно для динамических процессов(цикл. привода).

Рис. 27
 Пример:
 Перегрузка-(OL)-
 уровень = 105 %;
 Выключение
 время = 300 s



Для предотвращения разогрева компонентов далее после OL и возможного разрушения, инвертер должен защитить себя от непосредственного сброса ошибки. Он выполняет это с помощью внутреннего счетчика времени, который предотвращает немедленный сброс. После истечения периода охлаждения, который индицируется миганием на дисплее "nOL", ошибка OL будет сброшена и преобразователь может быть перезапущен.

Ошибка OL может быть сброшена сбросом по включению питания, т.е. переключением вкл/выкл только после фазы охлаждения. После возникновения ошибки OL функция счетчика времени активна когда есть напряжение питания и/или прибор перезапускается снова после преждевременного сброса по включению питания, преобразователь частоты не следует отсоединять от сети во время фазы охлаждения.

Защитная функция ОС определяет ток, в зависимости от типа инвертера, в фазе промежуточного контура (см. Рис. 28a) или в обеих фазах промежуточного контура (Рис. 28b) или в выходных фазах (Рис.28c).

Рис. 28a

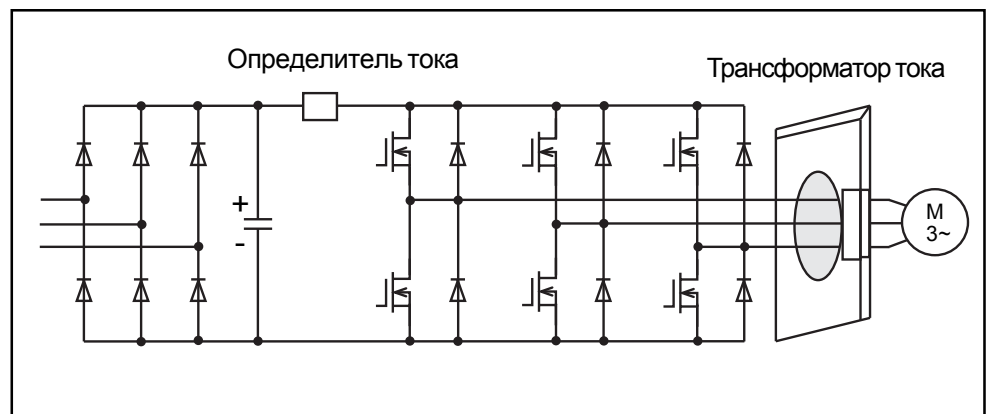


Рис. 28b

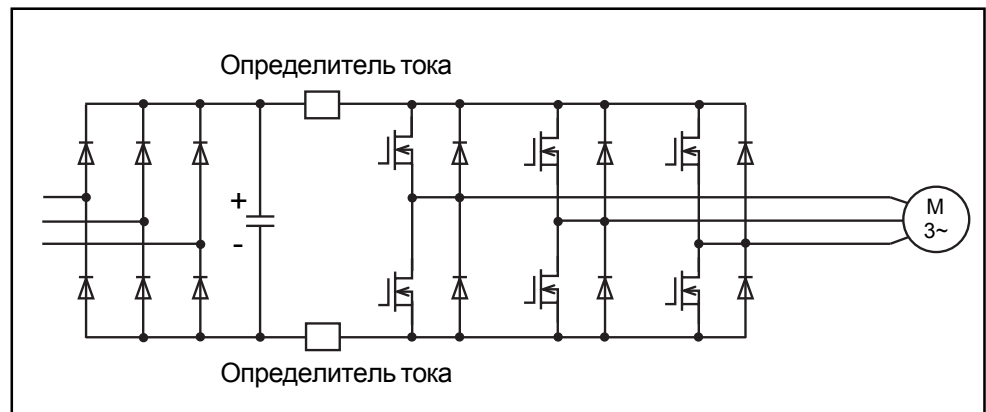
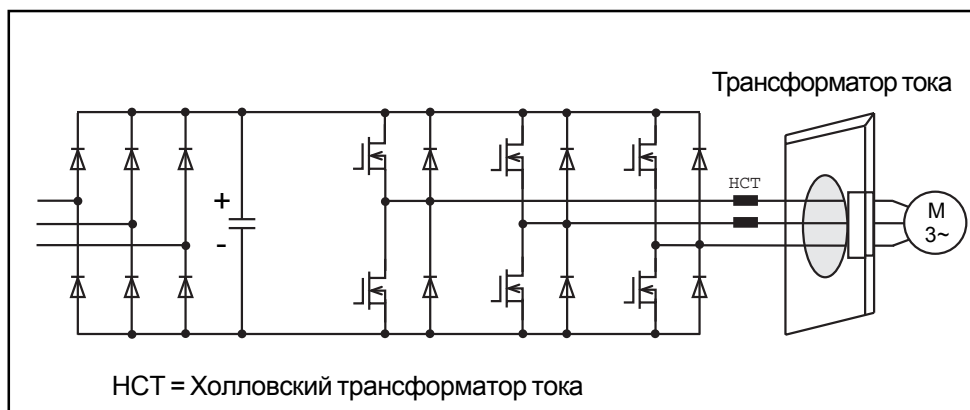


Рис. 28с



Здесь показано как определяются все нагрузочные токи, которые слишком высоки и имеют короткий цикл между фазами. Замыкание на землю определяется в Рис. 28а и Рис. 28с через трансформатор тока, который записывает сумму выходных токов. Этот трансформатор тока установлен на 50 Гц, поскольку токи замыкания на землю всегда имеют частоту сети. Максимальный потенциал относительно земли 325 В во всех точках энергетического контура (с напряжением сети 230В).

На Рис. 28b трансформатор тока пропущен, поскольку токи земли могут регистрироваться одним из двух определителей токов.

Кроме защиты самого себя от токов, которые слишком высокие, инвертер должен также защитить себя от высокого и низкого напряжений. Оба определяются постоянной регистрацией напряжения промежуточного тока. Контролированием колебания напряжения промежуточного контура может быть определено фазовое повреждение на входе инвертера, когда двигатель загружен. Отображаемое напряжения на выходе вычисляется программно исходя из процесса модуляции. Точка срабатывания для тормозного транзистора (GTR7) лежит примерно на 5% ниже ОП-уровня.

7. Режим работы преобразователя частоты (ПЧ) и трехфазного асинхронного двигателя (АС-двигатель)

7.1 Принципы регулирования скорости

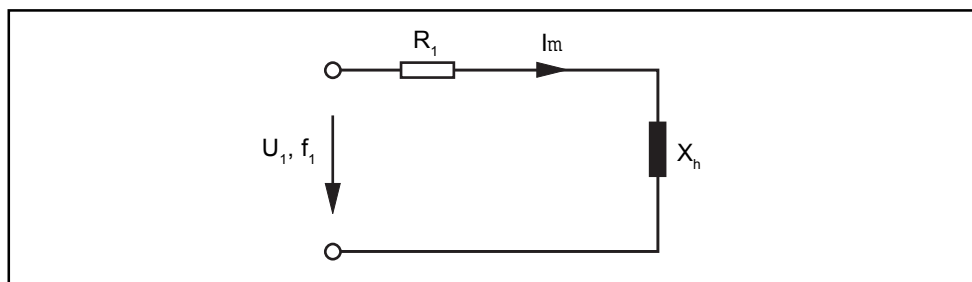
Формула 20

При испытании не нагруженного АС-двигателя могут быть установлены следующие скорости:

$$n_0 = \frac{f_1}{p} \quad \begin{array}{l} n_0: \text{ скорость холостого хода (в сек}^{-1}\text{)} \\ f_1: \text{ частота напряжения питания} \\ p: \text{ число пар полюсов (например 4-полюс. двиг } \Rightarrow p = 2) \end{array}$$

При изменении частоты питания f_1 вы можете изменить скорость двигателя. Примите во внимание, что ток намагничивания I_m также зависит от частоты питания. Это показано на эквивалентной схеме постоянного напряжения (Рис.29).

Рис. 29
Эквивалентная схема для холостого хода АС-двигателя



Формула 21

$$I_m = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + X_h^2}} = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + (2p f L_h)^2}} \quad \begin{array}{l} L_h: \text{Осн. индуктивность} \\ R_1: \text{Соппротивление статора} \end{array}$$

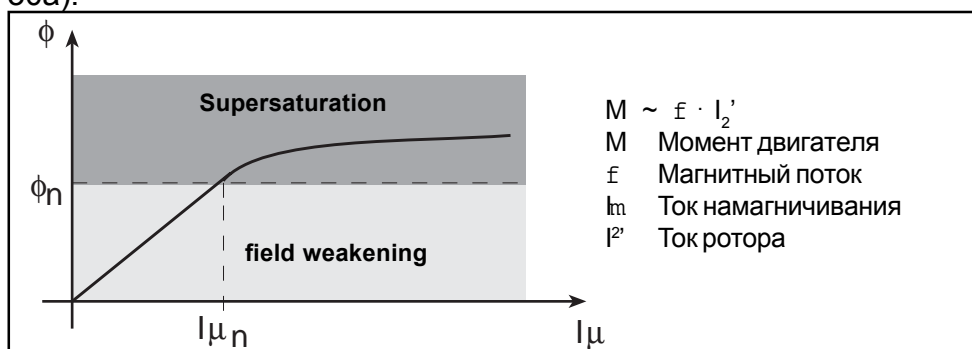
Если пренебречь сопротивлением статора R_1 в формуле 21, тогда:

Формула 22

$$I_m \gg \frac{U_1}{2 p f \cdot L_h} \quad \text{и} \quad I_m \sim \frac{U_1}{f}$$

Задача, удержать этот ток намагничивания I_m постоянным на номинальную величину I_{m_n} , так чтобы асинхронный двигатель всегда работал при номинальном потоке Φ_n и, таким образом, можно реализовать номинальный момент во всем диапазоне скорости (Рис. 30а).

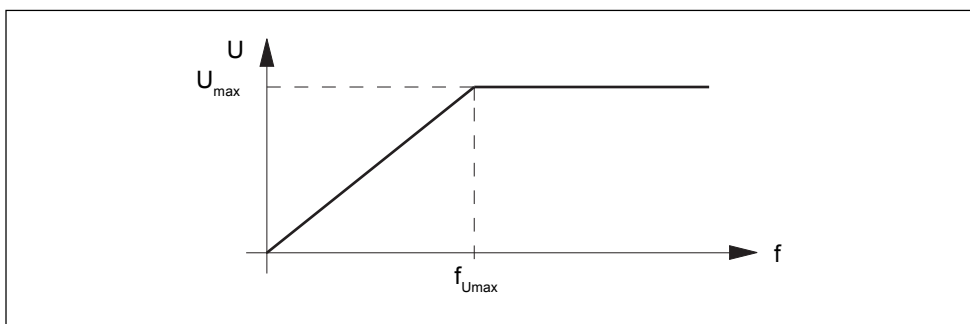
Рис. 30а



Чтобы сохранить ток намагничивания постоянным, напряжение U_1 должно быть пропорционально частоте, согласно формуле 22. Если это не выполняется, то ток намагничивания становится либо меньше (ослабленное поле), либо больше (перенасыщение).

По этой причине U/f -характеристика для инвертера обычно линейная в интервале до угловой частоты $f_{U_{max}}$ (==> Рис.30b).

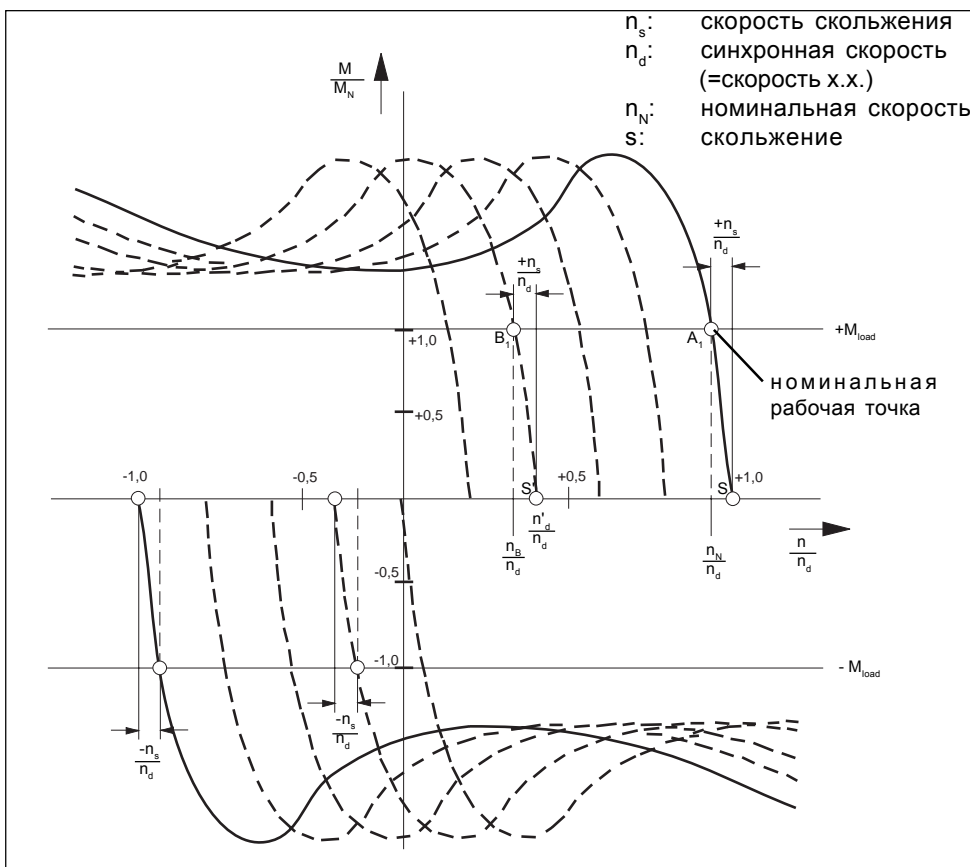
Рис. 30b



7.2 Характеристики двигателя при работе с инвертером

Когда используется инвертер, так что ток намагничивания остается постоянным на всем интервале частоты, тогда получается следующая моментно-скоростная характеристика (==> Рис. 31)

Рис. 31



Можно видеть, что уменьшение частоты вызвано параллельным сдвигом характеристики. В идеальном случае максимальный момент остается постоянным на всех частотах. При этих допущениях двигатель может быть нагружен его максимальным моментом во всем интервале частот.

Действительно же, мы имеем отклонения от этих идеальных характеристик. Как видно из Рис. 29, активное сопротивление статора R_1 должно быть принято во внимание. Пока оно **не зависит** от частоты, основное реактивное сопротивление X_n увеличивается линейно с частотой, в соответствии с чем, частотно-зависимое напряжение разделяется на R_1 и X_n .

При высоких частотах почти все напряжение падает на индуктивном сопротивлении, R_1 мало влияет на ток намагничивания. Когда частоты слишком маленькие, тогда X_n уменьшается линейно с частотой. R_1 остается постоянным, так что падение напряжения U_{R1} по сравнению с U_{Xn} значительно возрастает, и поэтому должно быть скомпенсировано (\Rightarrow fig. 32) увеличением входного напряжения (**буст**).

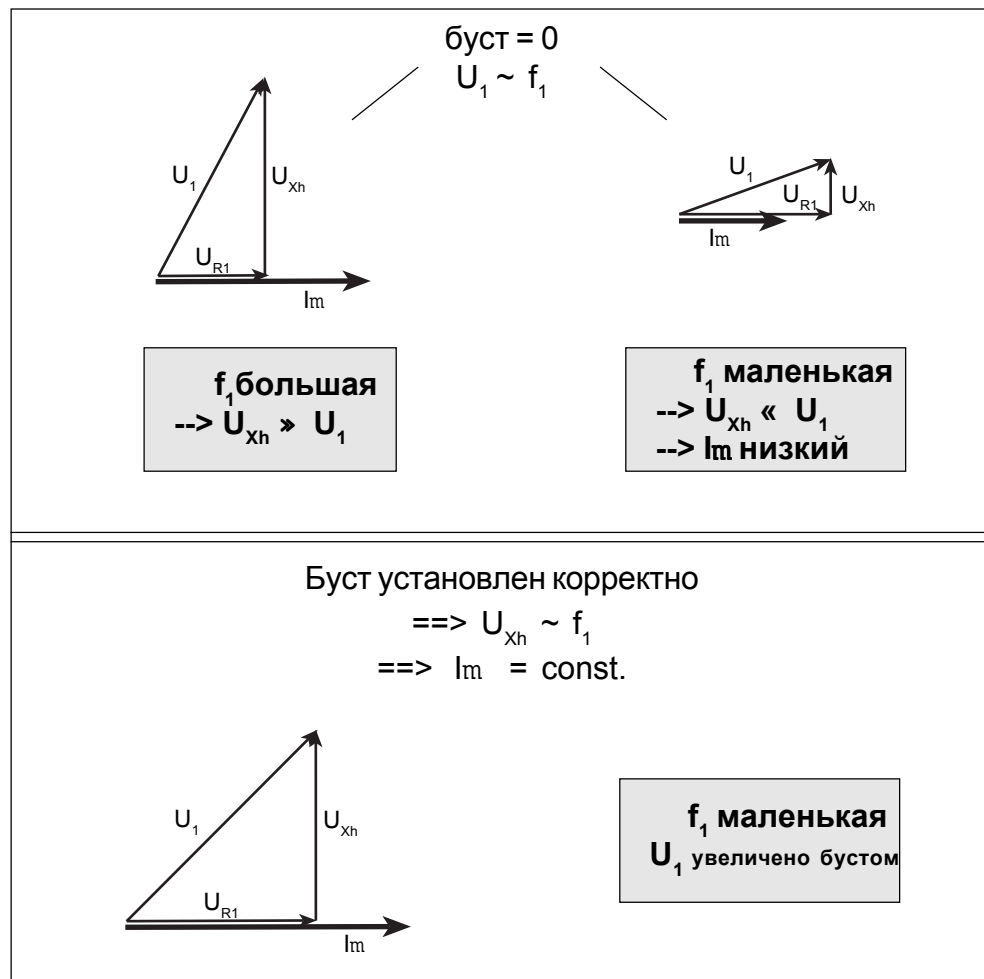
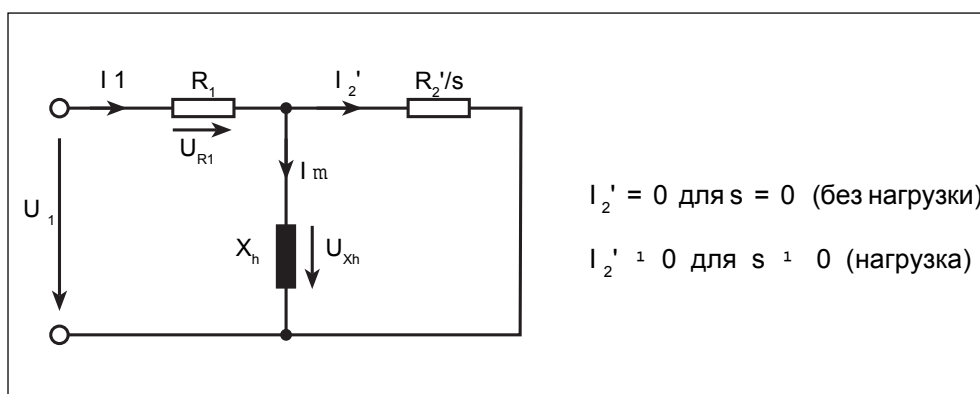


Рис. 32

Только при регулировании напряжения U_{Xh} пропорционально частоте, дает постоянство тока намагничивания I_m , а с ним и магнитного потока. Поскольку напряжение U_{Xh} не может быть измерено, и, в основном, величины R_1 и X_h для двигателей не известны, то необходимый буст должен выбираться эмпирически (==> Раздел 7.3).

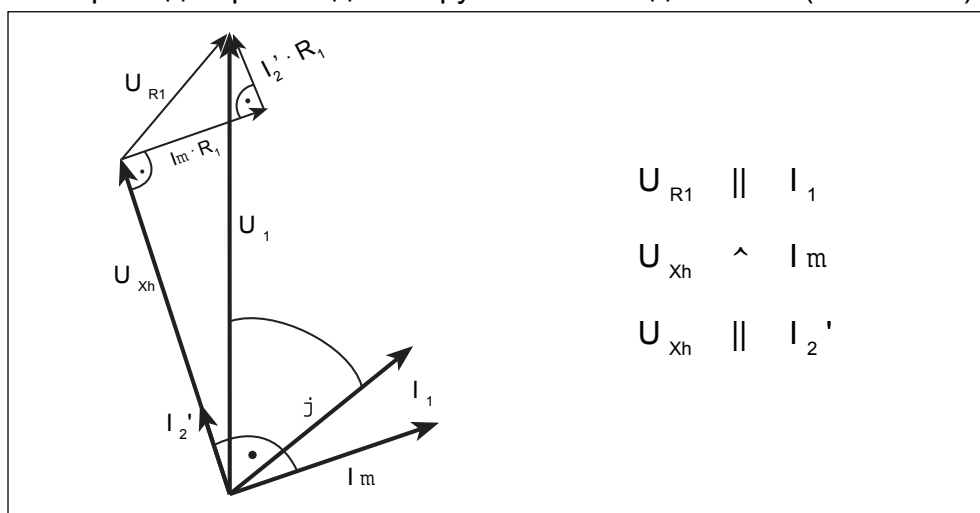
До сих пор, мы рассматривали работу ненагруженного двигателя. Если двигатель нагружен, то скольжение $s \neq 0$ вызывает ток ротора I_2' , как видно из эквивалентной схемы (Рис. 33).

Рис. 33
Упрощенная эквивалентная схема нагруженного АС-двигателя



Этот дополнительный ток ротора, только активный ток, вызывает дополнительное падение напряжения на R_1 , поэтому необходим дополнительный буст, чтобы удержать постоянным ток намагничивания I_m . Строго говоря, это увеличение зависит от момента нагрузки (и/или от скольжения). Поскольку величина буста фиксированная, то необходимо выбирать компромисс между нагруженным и ненагруженным приводом (==> Раздел 7.3). Векторная диаграмма для нагруженного АС-двигателя (см.Рис. 34).

Рис. 34
Векторная диаграмма нагруженного АС-двигателя



Диапазон частоты от 0 до $f_{U_{max}}$ (==> Рис. 30b), т.е. интервал в котором напряжение U_1 пропорционально увеличивается, называется диапазон положения ротора. Частота при которой выходное напряжение инвертера достигает макс. значения, называется граничной частотой или номинальной точкой. Выясним поведение при частотах выше $f_{U_{max}}$, в так называемом диапазоне ослабленного поля.

Поскольку невозможно увеличивать напряжение больше, ток намагничивания I_m уменьшается с увеличением частоты, таким образом, магнитный поток двигателя ослабляется. В результате, из формулы

Формула 23

$$M \sim F \cdot I_2' \quad // \quad F \sim \frac{U_{Xh}}{f}$$

имеем, что момент также уменьшается пропорционально частоте. Для максимального момента, если пренебречь сопротивлением статора R_1 , имеем следующую формулу

Формула 24

$$M_k \sim \frac{U_1^2}{f_1^2}$$

В результате, максимальный момент в диапазоне ослабленного поля уменьшается пропорционально $1/f^2$ ($U_1 = \text{const.}$). Таким образом, имеем следующую моментно/скоростную характеристику при работе с инвертером

Рис. 35

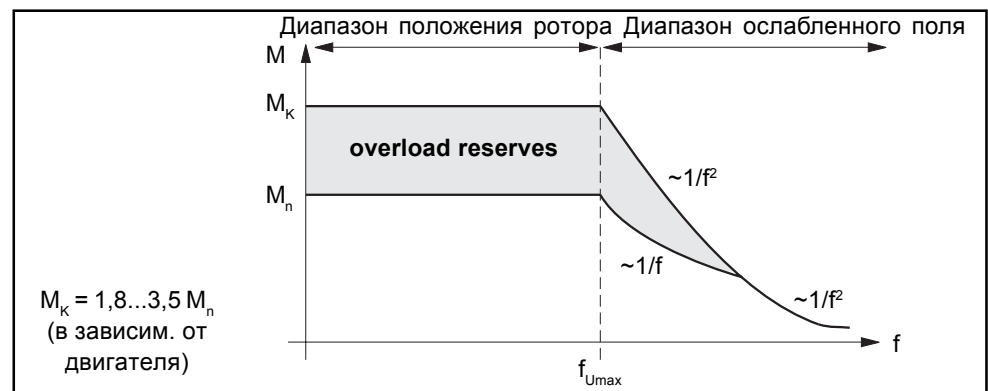
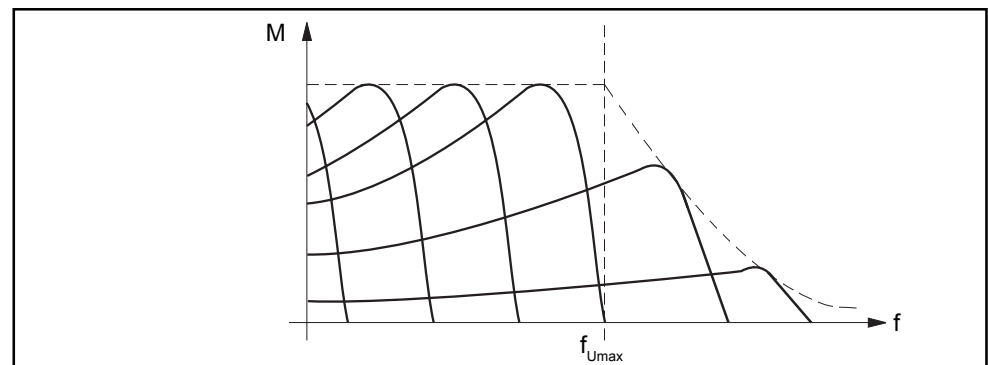


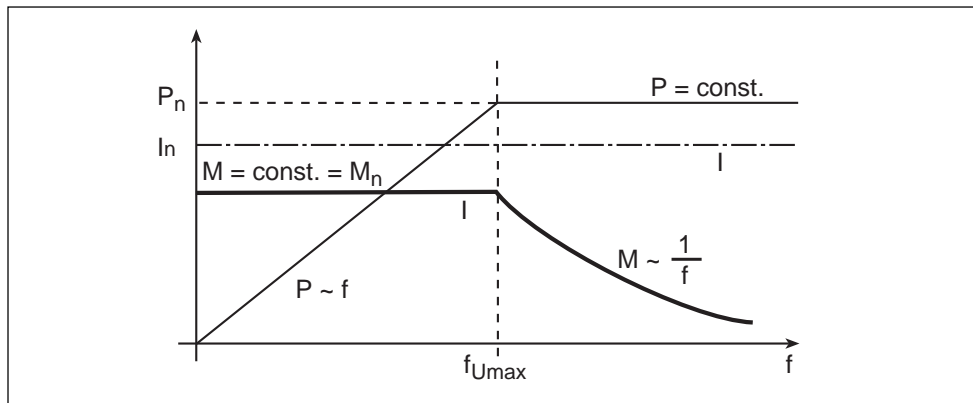
Рис. 36



Видно резкое уменьшение момента в диапазоне ослабленного поля. Также при увеличении частоты характеристика становится положе ($s < s_{brk}$) и в связи с этим скольжение увеличивается (Рис. 36).

Характеристики тока и мощности зависят в зависимости от частоты представлены ниже:

Рис. 37

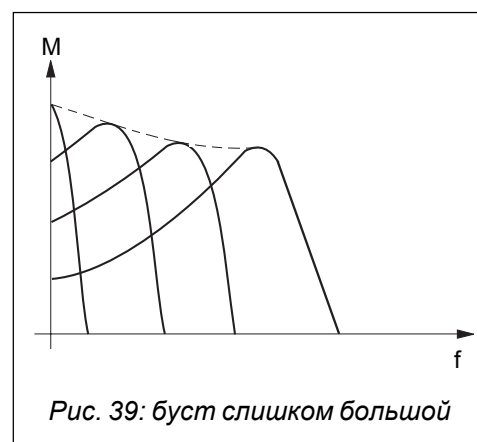
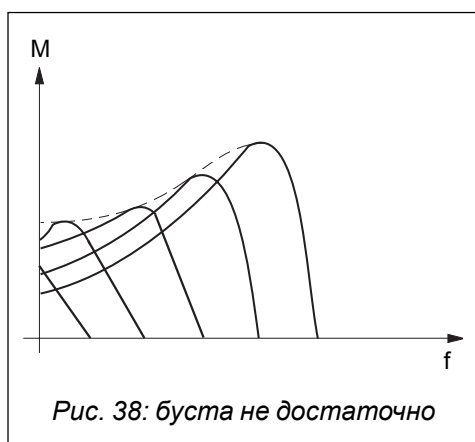


Когда установка буста некорректна, может наблюдаться следующее:

- буст слишком мал (==> ослабление поля) --> Рис. 38
 - Максимальный момент уменьшается при низких частотах
 - Наклон характеристик в рабочем диапазоне становится положе ==> больше скольжение
- буст слишком большой --> Рис. 39
 - В некоторых случаях максимальный момент увеличивается при низких частотах
 - Наклон характеристик становится круче ==> меньше скольжение
 - Машина становится перенасыщенной, т.е. ток намагничивания значительно возрастает ==> перегрев.

Рис. 38

Рис. 39



Поскольку буст работает только до угловой частоты, он не влияет на характеристики в диапазоне ослабленного поля.

Измерения влияния Буста на Момент

Исходные данные: 2,2 кВ - Инвертер

Двигатель: 2.2 кВ

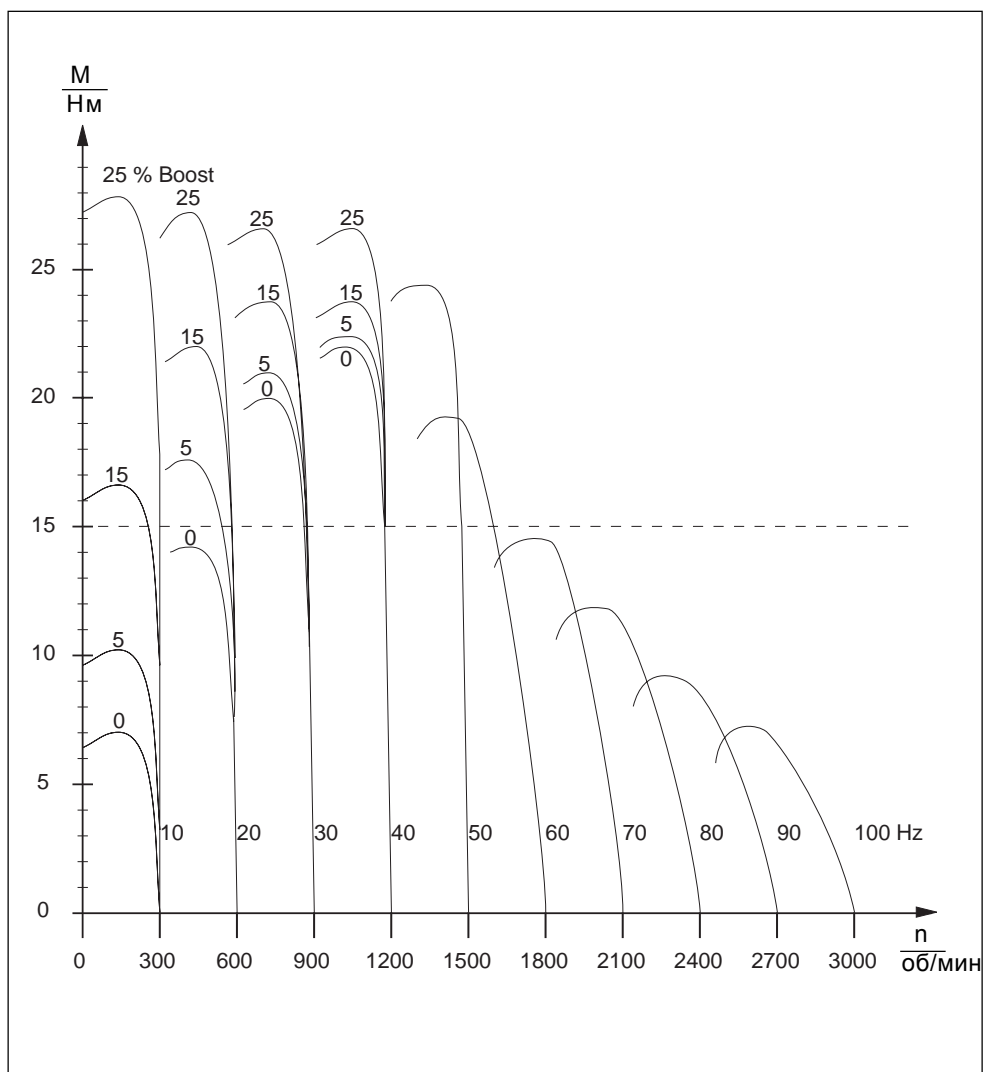
$$M_N = 15 \text{ Нм}$$

$$I_N = 9.4 \text{ А}$$

$$U_{\text{Main}} = 220 \text{ В}$$

$$n_N = 1420 \text{ об/мин}$$

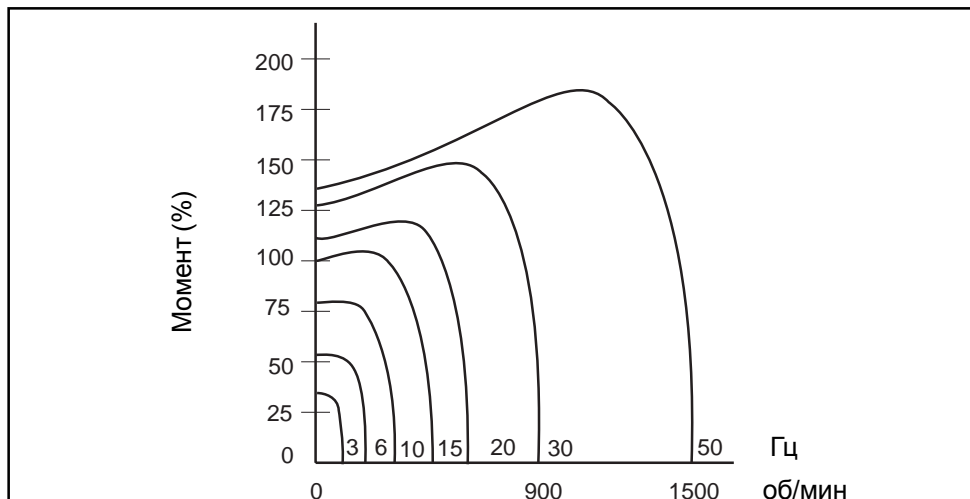
Рис. 40



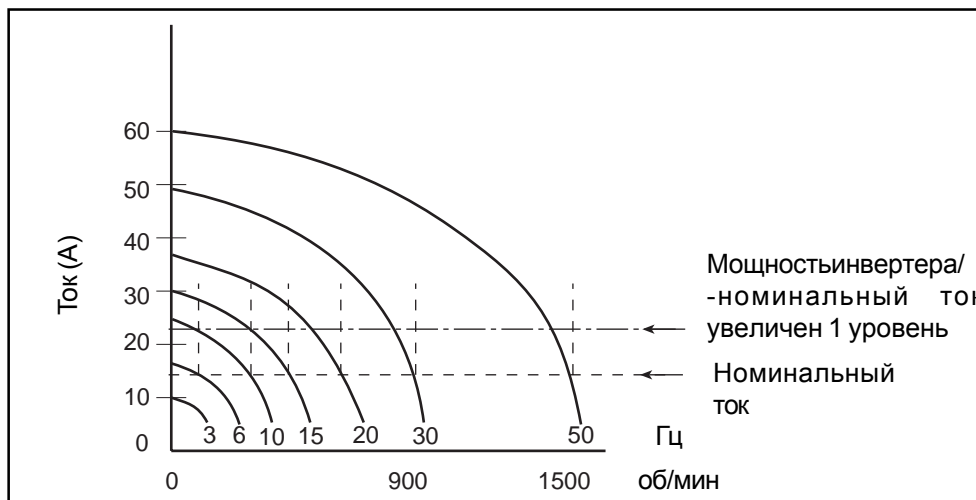
Обычно двигатель не может работать при малых частотах и высоком бусте, когда нет независимого охлаждения или двигатель недогружен и/или холостой режим (тепловое разрушение двигателя). Поэтому более низкий скоростной диапазон имеет меньший максимальный момент по сравнению с нормальной работой. Это показано ниже.

Рис. 41
Характеристики двигателя при разных частотах инвертера

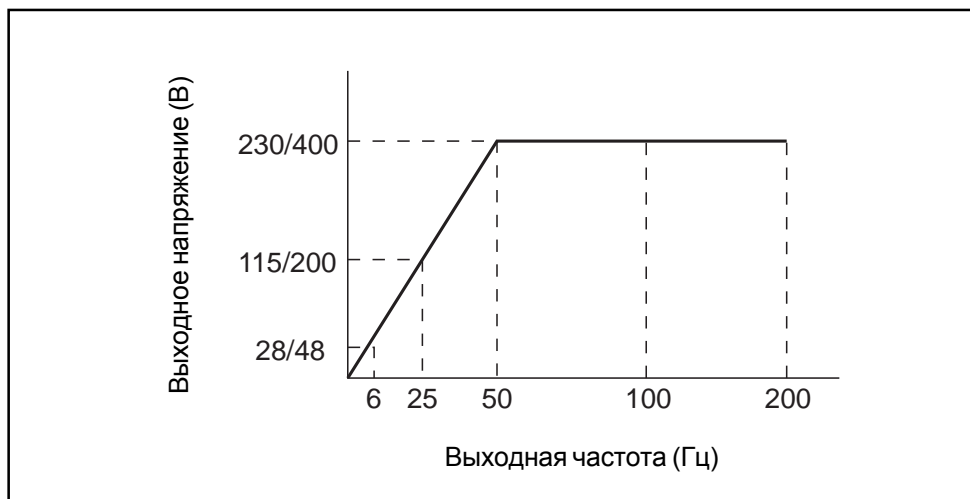
a) Скорость/Момент



b) Скорость / Выходное напряжение



c) U/f-характеристика



7.3 Установка буста

Как было описано, буст до такой степени увеличивает напряжение двигателя, которая зависит от следующих параметров:

- Отношения сопротивления статора R_1 к реактивному сопротивлению X_h ,
- Частоты f_1 инвертора выходного напряжения,
- Загрузки двигателя (--> скольжения s).

Можно получить хорошую установку буста для всех рабочих состояний двигателя. Это может быть сделано следующим образом:

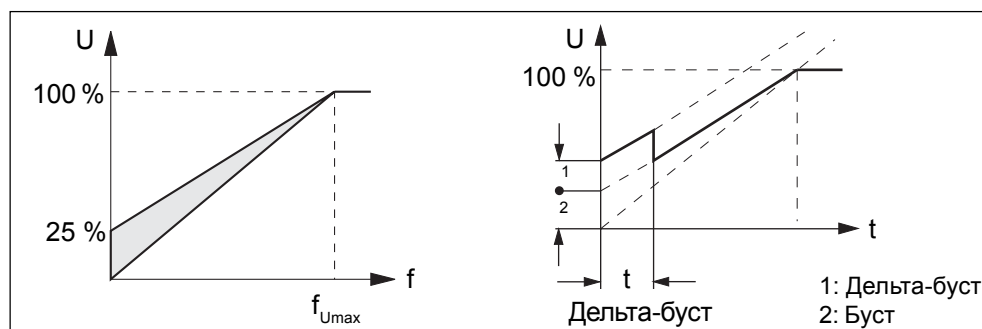
- Измерьте нагрузку инвертера на холостом ходу двигателя при стандартной угловой частоте (= 50 Hz для стандартных двигателей).
- Установите буст так, чтобы на малых частотах ($f \gg 5...10$ Гц), и работе без нагрузки, выводилась такая же нагрузка инвертера как и при стандартной угловой частоте. Таким образом, это гарантирует, что ток намагничивания остается почти постоянным на всех частотах при холостом ходе.
- Чтобы компенсировать воздействие момента нагрузки на величину потока Φ увеличьте величину буста примерно на 50 %.

Чтобы обойти трудности, которые могут возникнуть во время установки буста, все серии новых инвертеров оборудованы автоматической установкой буста (автобуст). Необходимая величина буста автоматически вычисляется из данных двигателя, и измерения тока двигателя. Функция может быть включена или выключена если необходимо.

Два способа установки буста:

- Установка постоянного буста
- Установка ограниченного по времени буста (дельта буст)

Рис. 42



Хорошая идея использовать дельта буст для предотвращения увеличенного начального момента (пускового момента), поскольку он активен только в определенный интервал времени от начала пуска. Поскольку двигатель работает с постоянным током, установленный буст и установленная величина 0 Гц, тогда при определенных условиях, это может привести к перегреву двигателя. Для того, чтобы ускорить двигатель с бустом, а работать без буста, лучше использовать дельта буст. Возможно использование комбинации буста и дельта буста, тогда величины складываются.

7.4 Работа 230 В-двигателя с 400 В-инвертером/ 87 Гц-характеристика

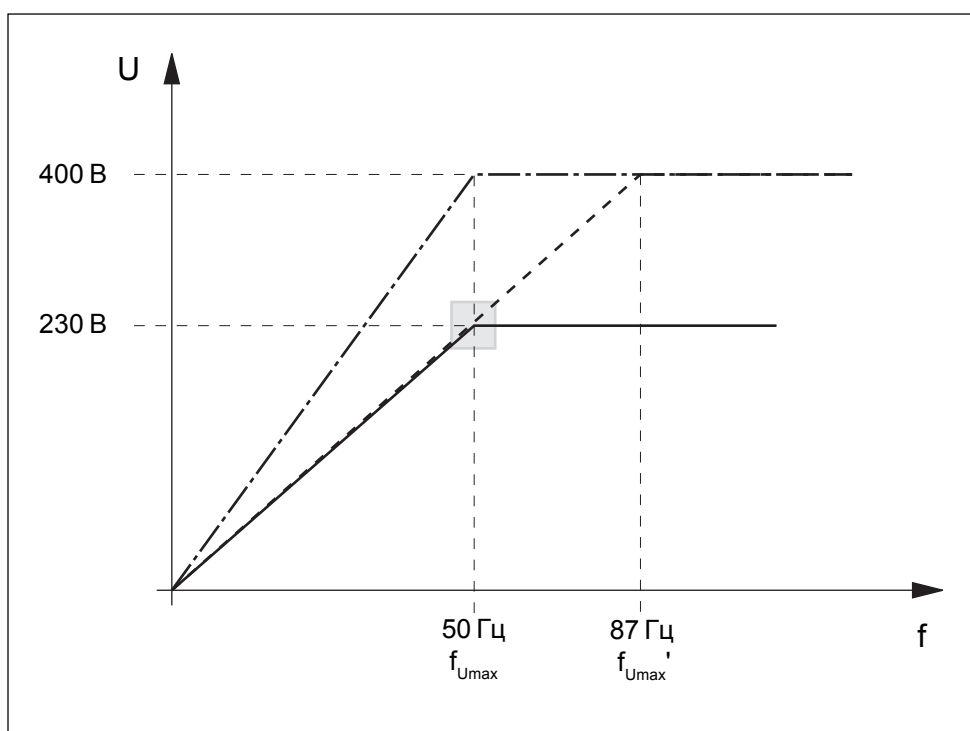
Стандартные трех-фазные двигатели 230/400 В работают с 230 В инвертерами в соединении треугольником, а 400 В инвертерами в соединении звездой. При таком соединении угловая частота должна быть установлена на 50 Гц, чтобы двигатель работал с номинальным потоком.

Делая маленький трюк, можно работать при соединении треугольником 230/400В двигателей с 400 В инвертерами без перенасыщения двигателя. При использовании такого сочетания, u/ f характеристика должна быть уменьшена на $\sqrt{3}$, чтобы получить номинальный ток намагничивания. Это достигается сдвигом угловой частоты к более высокой частоте $f_{U_{max}}'$ (==> Рис. 43).

Формула 25

$$f_{U_{max}}' = 50 \text{ Гц} \cdot \sqrt{3} = 87 \text{ Гц}$$

Рис. 43
87 Гц-характеристика



В результате для этого режима работы получаем:

- Ⓜ Двигатель работает с номинальным потоком до 87 Гц, ($\dot{\Phi} \sim U/f \text{ const.}$) и с номинальным моментом.
- Ⓜ Выходная мощность двигателя при 87 Гц увеличивается в $\ddot{O}3$ раз, по сравнению с номинальной (==> Рис. 44). Ток возрастает в $\ddot{O}3$ раза во всем скоростном диапазоне, и инвертер должен быть выбран в соответствии с током.

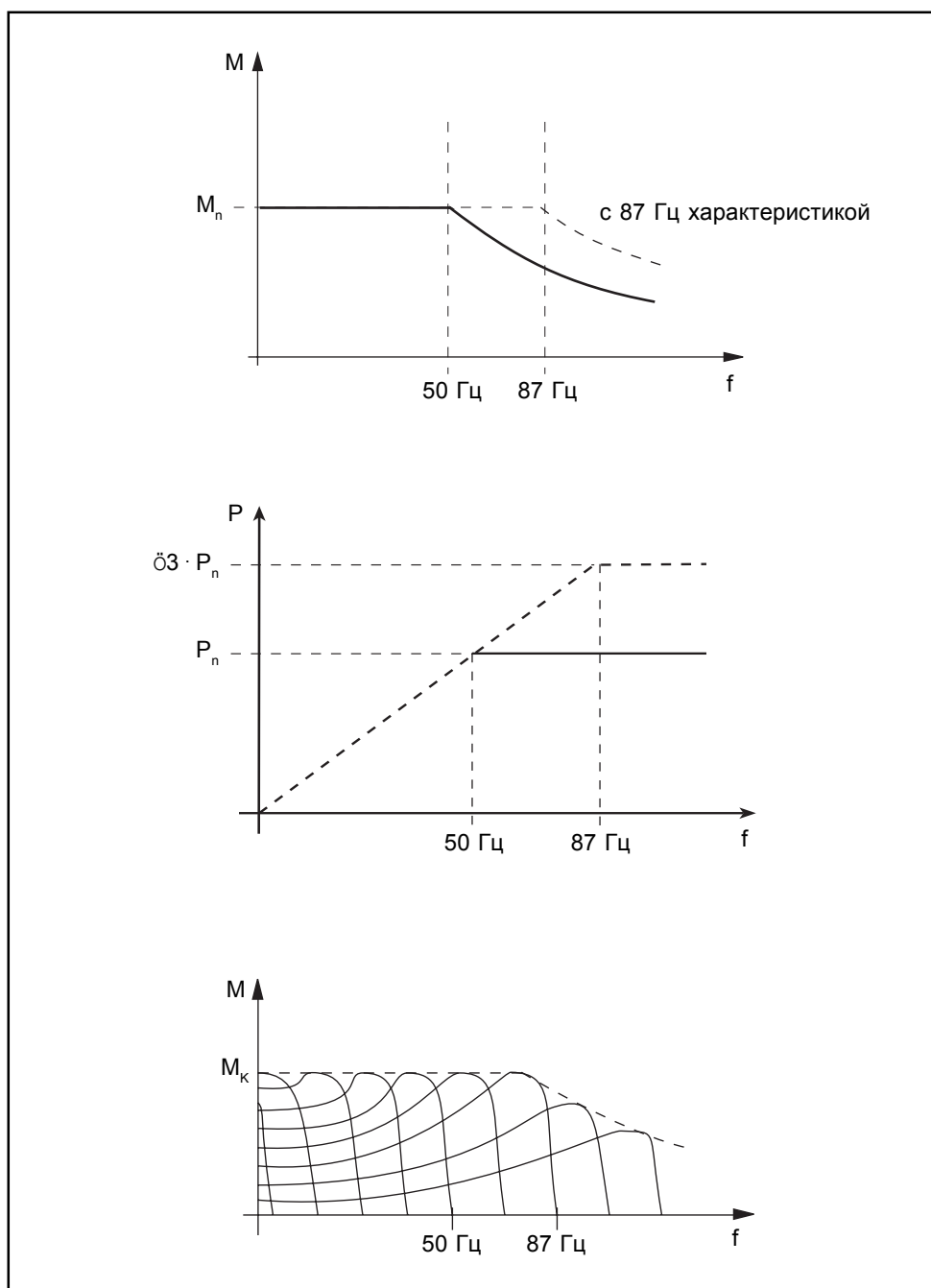


Рис. 44
Идеальные
M-, P- диаграммы
работы с 87 Гц
характеристикой

- ® Необходима более высокая межобмоточная изоляция, чем для стандартного режима с Y-соединением, поскольку при активизации двигателя возникает пиковое фазовое напряжение 560 вместо 320 В (==> Рис. 45 + 46). Во время генераторного режима, в промежуточном контуре, может возникнуть напряжение до макс. 800 В. Оно сказывается на обмотке, как пиковое значение. Напряжение может быть значительно превышено, из-за резонанса при длинных кабелях. Удедитесь, что изоляция может выдержать это высокое напряжение. Более точная информация о допустимом максимальном напряжении доступна на заводе изготовителе двигателя.

Рис. 45
Стандартная
работа
инвертера (с
угловой
частотой 50 Гц)

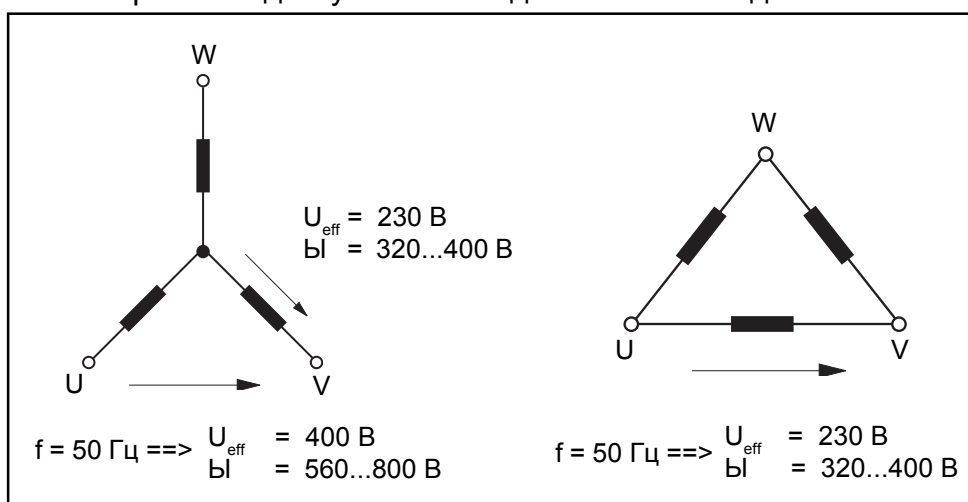
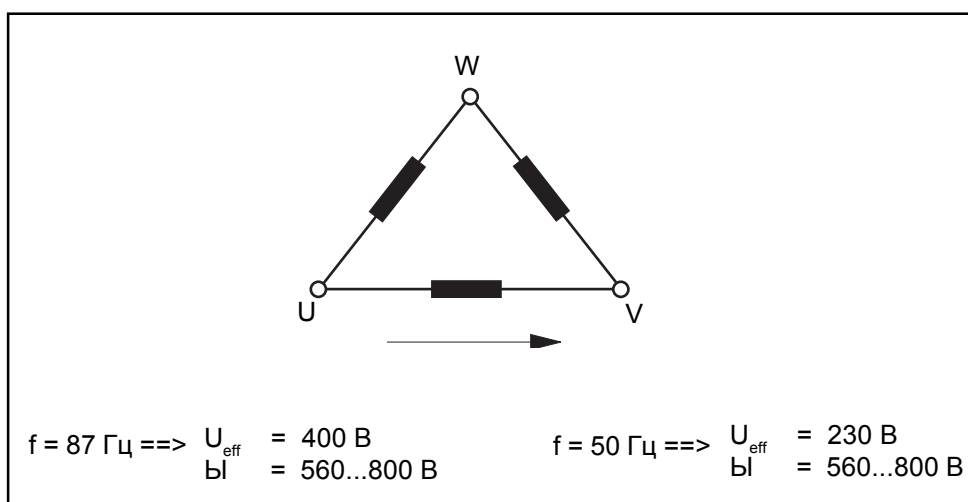


Рис. 46
Нагрузка на
межобмоточную
изоляцию при
87 Гц
характеристике



- ® При работе с 87 Гц характеристикой содержание гармоник для напряжения и тока двигателя увеличивается, поскольку эффективное индуктивное сопротивление в D-соединении примерно в $1/\sqrt{3}$ меньше, чем в Y-соединении, и блочки напряжения становятся меньше при том же самом эффективном значении (==> Рис. 47). В результате, concentricность двигателя ухудшается, и незначительно увеличиваются потери мощности при меньших частотах.

- ® Поскольку потери в железе
$$\frac{P_{Fe}}{P_{Fen}} \sim \left(\frac{f}{f_n} \right)$$

преимущественно в роторе, которые посредством существующего теплообмена передается на корпус только частично, и, таким образом, не могут быть рассеяны вентиляцией. При частотах выше номинальной возникает тепловая проблема, вызванная увеличением потерь в железе. Она не может быть решена увеличением самовентиляции, в результате более высокой скорости вентилятора. Поскольку нагревание ротора происходит постоянно, этот тип соединения может быть использован для кратковременного режима. Для продолжительной работы следует согласоваться с заводом изготовителем двигателя, и часто возможно увеличение выходной мощности только на 20 % . . . 40 %.

Рис. 47
Форма
напряжения
двигателя при
работе с 87 Гц
характеристикой

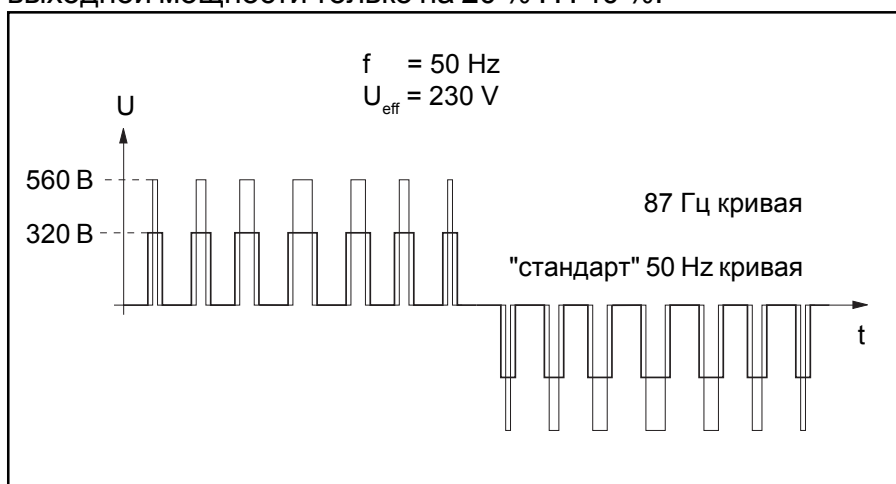


Рис. 48
4 кВ инвертер с
1,5 кВ
двигателем;
соединение
треугольником,
угловая частота
50 Гц

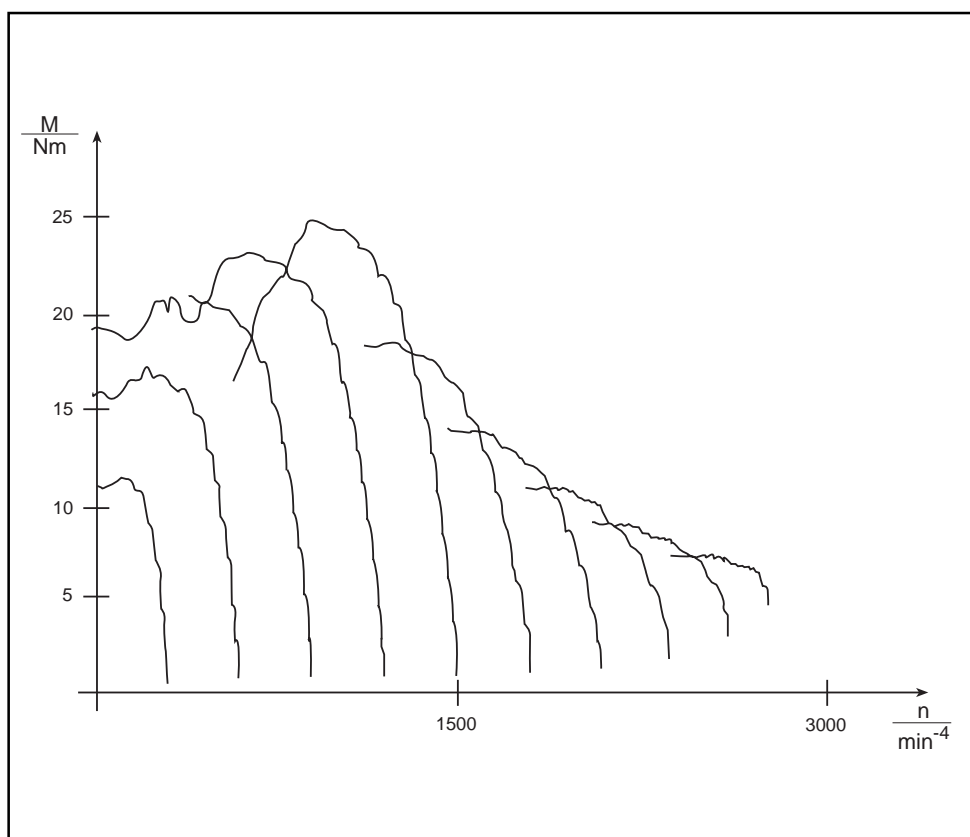
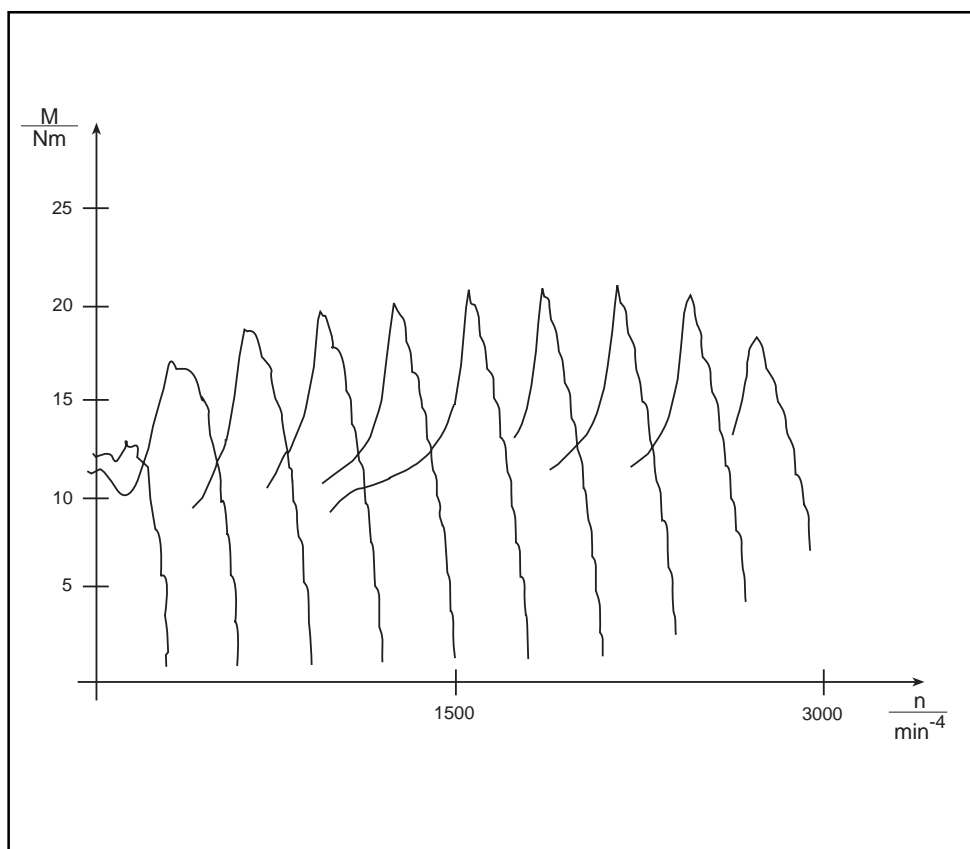


Рис. 49
4 кВ инвертер с
1,5 кВ
двигателем;
соединение
треугольником,
угловая частота
87 Гц



7.5 Работа в генераторном режиме

Все предыдущие утверждения относятся к двигательному режиму работы мотора, т.е. когда момент и скорость двигателя имеют одинаковый знак.

Как при работе обычного АС - двигателя (==> Раздел 3.3), так и при работе с инвертером возможен генераторный режим работы. Однако, энергия не может быть возвращена обратно в сеть, при использовании стандартного инвертера, поскольку неуправляемый входной выпрямитель позволяет течь току только в одном направлении. Обратное питание в сеть возможно только при использовании догогого 4Q токового выпрямителя. Это не выгодное вложение денег для малой мощности.

Чтобы тормозить двигатель при генераторном режиме со стандартным инвертером, энергия торможения должна конвертироваться в преобразователь.

Это происходит так:

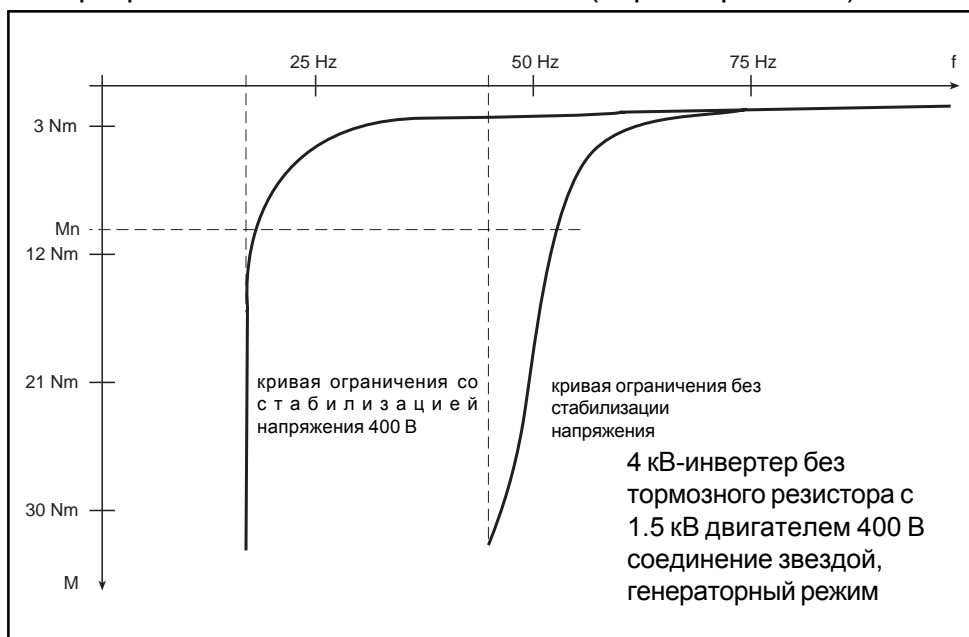
- возвращающаяся активная энергия поступает от двигателя в промежуточный контур преобразователя;
- реактивная энергия в конденсаторе промежуточного контура трансформируется в активную мощность двигателя, и двигатель снова намагничен реактивной энергией;
- в течении обоих процессов происходит потеря энергии на активном сопротивлении двигателя. Она увеличивается обратно пропорционально коэффициенту мощности двигателя.

В заключении можно отметить следующее:

Каждый привод состоящий из преобразователя частоты и АС-двигателя имеет определенный момент самоторможения (собственные потери системы). Без модуля торможения возможный самотормозящий момент маленьких двигателей (с худшим коэффициентом мощности) составляет примерно 25% от M_n , с большими двигателями, например 75 кВт, по меньшей мере 5% от M_n . Этот тормозной момент очень сильно зависит от частоты (==> Рис. 50). Он возрастает при малых частотах и уменьшается при больших частотах.

Если требуется больший тормозной момент, тогда необходимо использовать тормозной модуль. Он преобразует энергию, поступающую обратно в промежуточный контур, в тепло. Это предотвращает перегрузку конденсатора, в результате которой инвертер выключается с ошибкой E.OP (перенапряжение).

Рис. 50
Типичные кривые ограничения для ОР-ошибки в генераторном режиме



7.5.1 Расчет тормозного резистора

Упомянутые ранее тормозные моменты от 5 % до 25 % относятся только к диапазону ослабленного поля. В диапазоне положения ротора вы можете получить гораздо больший тормозной момент, так что использование тормозного модуля обычно требуется в диапазоне ослабленного поля. Вычисление тормозного резистора происходит в таком порядке:

- | | | |
|-----|--|---|
| 1. | Определение макс. скорости двигателя n_{max} | - |
| 2. | Определение макс. тормозного момента M_{Bmax} | $M_{Bmax} = \frac{J_{ges} \cdot (n_1 - n_2)}{9.55 \cdot t_B} - M_{load}$ |
| 3. | Определение макс. энергии торможения P_{Bmax} | $P_{Bmax} = \frac{M_{Bmax} \cdot n_1}{9.55}$ |
| 4. | Определение коэффициента уменьшения для генераторного режима согласно таблице 1 | - |
| 5. | Вычисление макс. электрич. энергии торможения учитывая внутренние потери в двигателе | $P_{electr.} = P_{Bmax} - k \cdot P_{nmotor}$ <p>$P_{electr.} < 0$ означает, что электрич. энергия не возвращается
==> не нужен тормозной модуль</p> |
| 6. | Определение омического сопротивления тормозного модуля | $R_B < \frac{U_B^2}{P_{electr.}}$ <p>$U_B = 760$ В для 400 В класса
$U_B = 380$ В для 200 В класса</p> |
| 7. | Вычисление периода включения тормозного резистора | $ON\text{-период} = \frac{\text{время торможения } t_B}{\text{время цикла } t_z}$ <p>для $t_z < 120$ с</p> |
| 8. | Определение периода работы зависимой константы f_k в соответствии с Рис. 51 | $ON\text{-период} = \frac{\text{время торможения } t_B}{120 \text{ с}}$ <p>для $t_z < 120$ с</p> |
| 9. | Определение номинальной мощности тормозного резистора | $P_{Bn} = \frac{P_{electr.}}{f_k}$ |
| 10. | Выбор тормозного резистора используя R_B , P_{Bn} и $P_{electr.}$ (пиковая мощность) | - |

Таблица 1 Фактор уменьшения для генераторного режима асинхронного двигателя

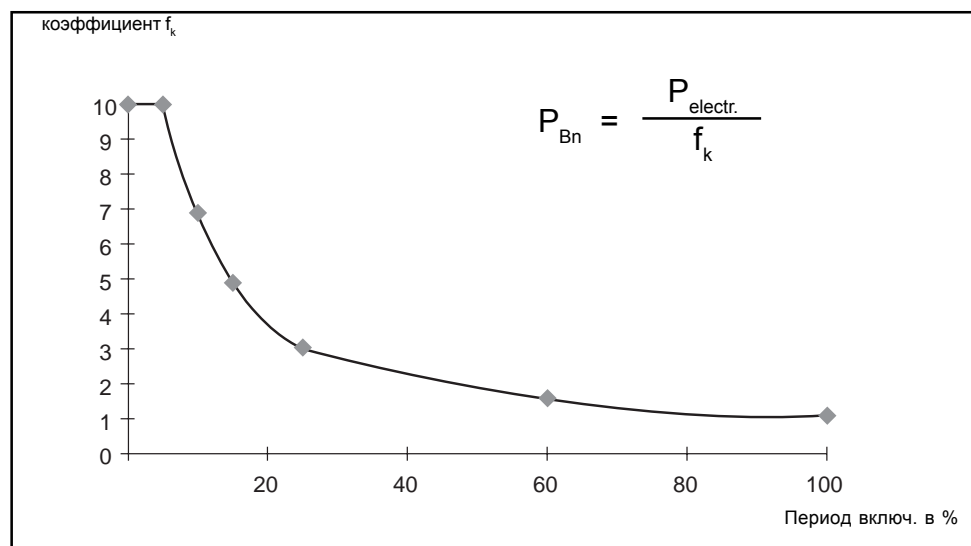
Мощность двиг.		Кoeffиц. k
до	1.5 кВ	0.25
2.2 ... 4	кВ	0.20
5.5 ... 11	кВ	0.15
15 ... 45	кВ	0.08
>	45 кВ	0.05

Кoeffициент в таблице это только стандартная величина, и он может быть больше, в зависимости от КПД двигателя, скорости и выходного напряжения инвертера.

Кoeffициент k увеличивается когда:

- КПД двигателя уменьшается
- скорость меньше
- выходное напряжение инвертера выше

Рис. 51
Период работы зависимой константы f_k тормозного резистора



Еще один эффект можно наблюдать при генераторном режиме:

Промежуточный контур загружен существенно большим напряжением, чем в режиме двигателя. Это напряжение может максимально достиг ОР уровня, и/или когда сработает тормозной модуль (GTR7), оно может увеличиться в 1.2 ... 1.5 раза в зависимости от типа прибора. В результате этого высокого напряжения двигатель перемагничивается в диапазоне положения ротора; диапазон ослабленного поля начинается при заметно больших частотах (приблизительно 60...75 Гц).

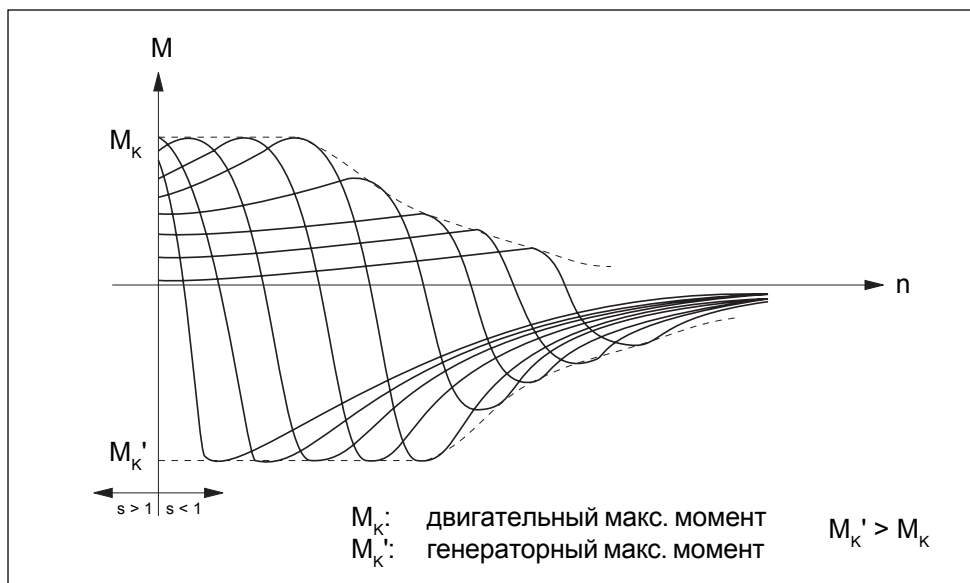
Двигатель потребляет значительно больший ток намагничивания, чем во время номинальной работы, из-за перемагничивания. Частотный преобразователь должен быть выбран на этот увеличенный ток, чтобы предотвратить остановку по ошибке ОС.

Этот негативный эффект можно предотвратить путем активизации функции „стабилизации выходного напряжения“ (регулирование выходного напряжения, в зависимости от колебаний напряжения промежуточного контура).

При более высоком напряжении максимальный генераторный момент очевидно выше, поэтому тормозной момент может быть существенно выше момента ускорения. Это может продолжаться пока не произойдет полное преобразование энергии торможения в двигатель и/или тормозной резистор, и двигатель, также как и инвертер, не перегружены током.

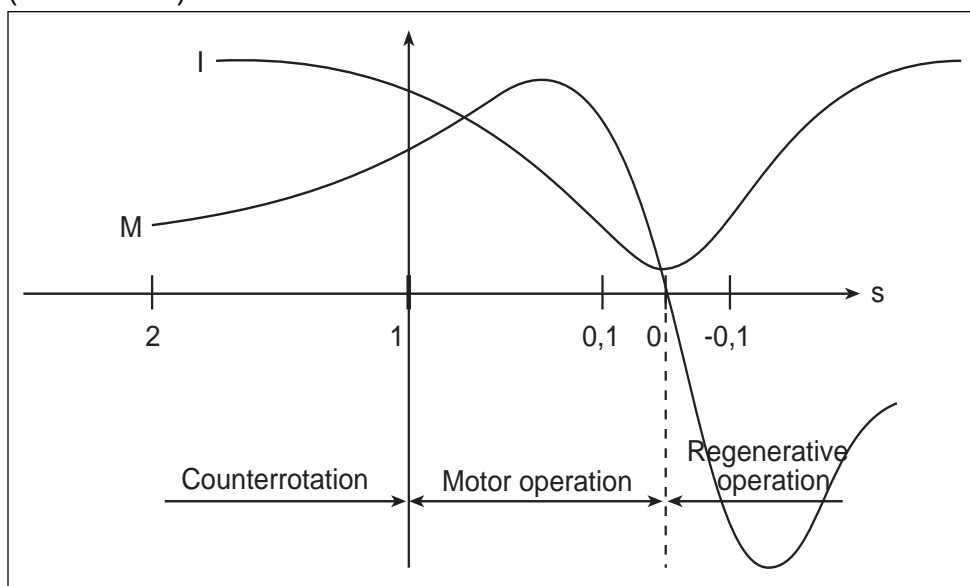
Полная моментно-скоростная характеристика показана ниже:

Рис. 52
Моментно-скоростная характеристика в двигательном и генераторном режимах



Интервал $s > 1$ характеризуется *встречным вращением*, поскольку вращение двигателя и вращение поля имеют противоположные знаки. Хотя тормозной момент производится, этот режим работы должен быть предотвращен при работе с инвертером из-за высоких токов (==> Рис.53).

Рис. 53
Рабочие диапазоны двигателя

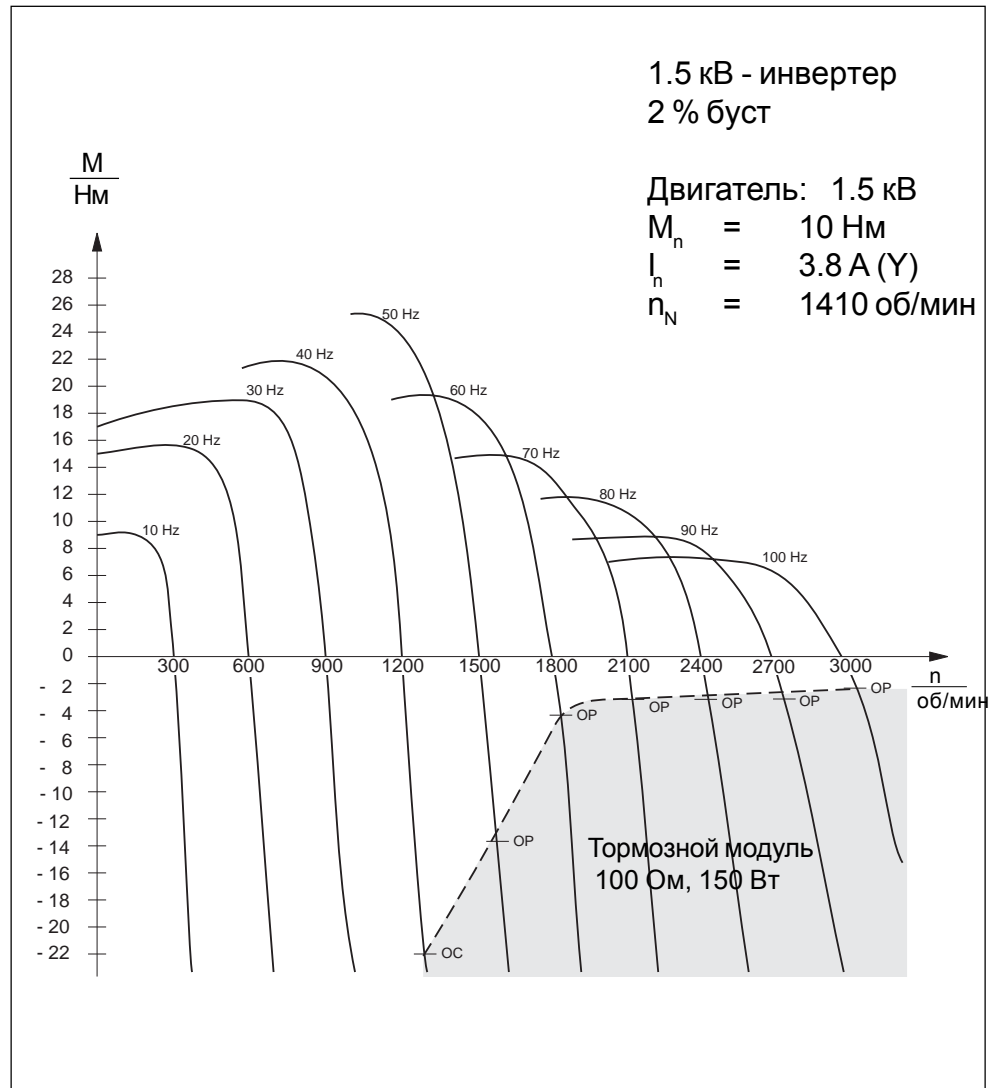


Измерение поведения двигателя при работе с инвертером

$M > 0$ = Двигательный режим

$M < 0$ = Генераторный режим

Рис. 54

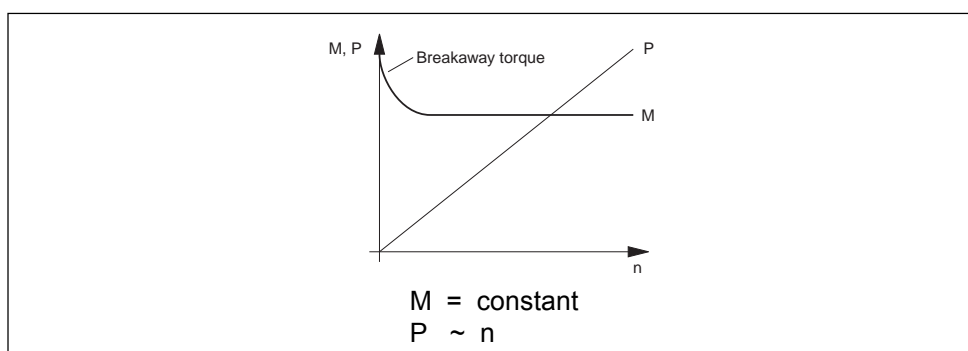


7.6 Нагрузочная характеристика/ „Опрокидывание” двигателя • Существуют четыре основных типа нагрузочных характеристик:

Момент постоянный при изменении скорости

- В случае с:
- Подъемными механизмами
 - Конвейерным оборудованием (лента транспортера)
 - Прокатными станками
 - Насосной штангой

Рис. 55

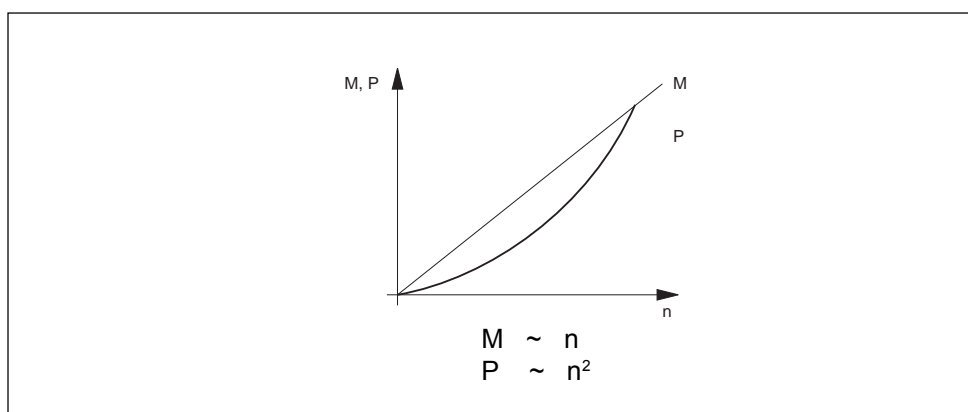


Необходимо иметь в виду, в некоторой степени, высокий пусковой момент когда выбираешь инвертер. Преобразователь частоты должен иметь резерв по перегрузке, чтобы справиться с этим. Если привод будет работать на малых частотах в продолжительном режиме, тогда двигатель должен иметь независимое охлаждение или необходимо уменьшить момент.

• **Момент возрастает пропорционально скорости**

- В случае с:
- Бумагообрабатывающими машинами
 - Торможениями вихревыми токами

Рис. 56

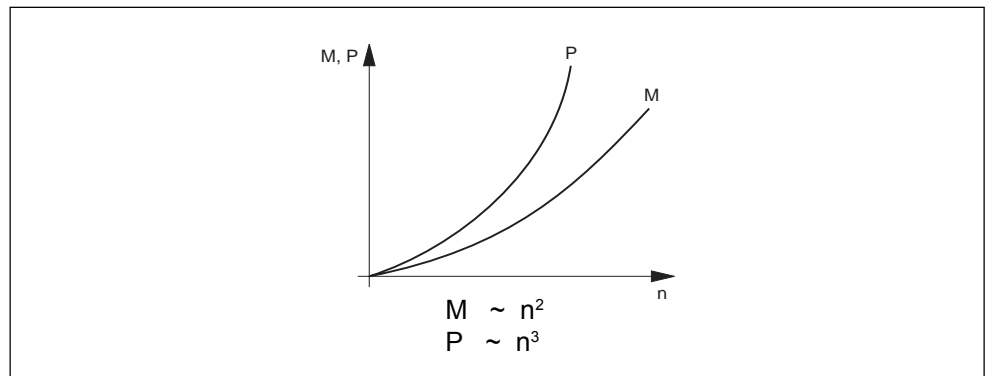


Выбор размера инвертера согласовывается с максимальной скоростью привода; пусковой момент, в основном, следует игнорировать.

- **Момент нагрузки увеличивается пропорционально квадрату скорости**

- В случае с:
- Вентиляторами
 - Ротационными насосами
 - Центрифугами
 - Смесителями

Рис. 57

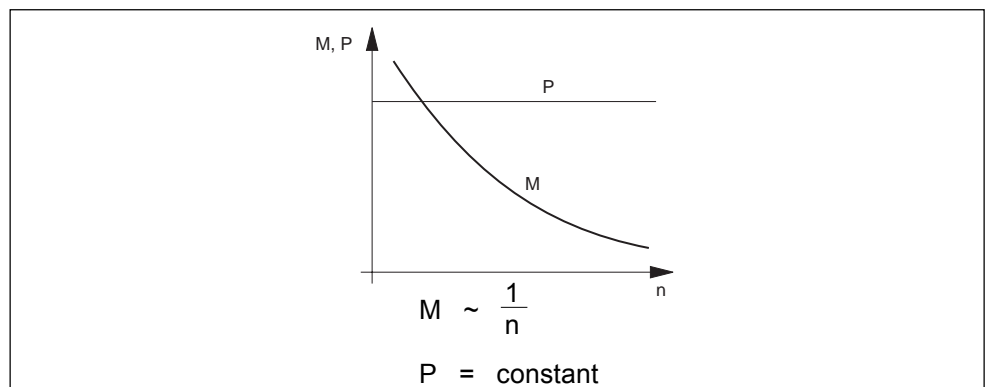


С этой характеристикой инвертер следует выбирать по максимальной скорости; пусковой момент не принимается во внимание. Если нужно, то выходное напряжение может быть уменьшено, при частично загруженном режиме, чтобы уменьшить потери двигателя (энерго-сохраняющая функция). Работа в диапазоне ослабленного поля это не нормальная работа, потому что при уменьшении момента двигателя происходит одновременное увеличение момента нагрузки.

- **Постоянная мощность при изменении скорости**

- В случае с:
- Мотальными машинами
 - Сверлильными станками
 - Резальными машинами

Рис. 58



Инвертер должен выбираться для момента при минимальной скорости. Если низкая скорость используется для продолжительного режима, тогда необходима принудительная вентиляция. Работа в режиме ослабленного поля, в основном, не критична.

Обычно описанные четыре характеристики редко случаются в полной мере, но они могут быть использованы для приближенных расчетов. При проектировании, привод с инвертером должен иметь достаточный резерв безопасности для момента опрокидывания двигателя, чтобы выдержать кратковременную перегрузку или падение напряжения. Обратите внимание, что момент опрокидывания квадратично зависит от напряжения двигателя, которое, в свою очередь, зависит от колебаний напряжения сети, и падения напряжения в проводах и фильтрах.

Двигатели должны иметь, согласно VDE 0530, момент опрокидывания по меньшей мере 180 % от номинального момента (во время основного процесса). Чтобы безопасно запустить привод, необходимо произвести вычисления с учетом выходного напряжения инвертера, которое, в худшем случае (колебания напряжения сети и падения напряжений должны быть приняты во внимание) составляет примерно 80 % от напряжения сети.

Пример:

$$\frac{M_K}{M_{Kn}} = \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 = (0.8)^2 = 0.64$$

$$\Rightarrow M_K = 0.64 \cdot M_{Kn}$$

при $M_{Kn} > 1.8 \cdot M_n$ имеем

$$\Rightarrow M_K > 0.64 \cdot 1.8 \cdot M_n > 1.15 \cdot M_n$$

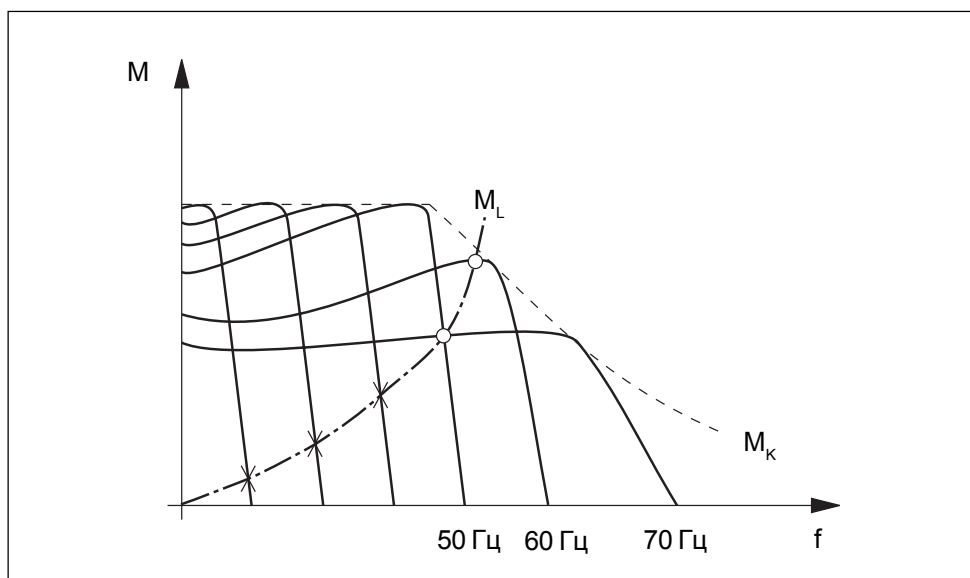
M_n : Номинальный момент двигателя M_{Kn} : Номинальный момент опрокидывания
 U_n : Номинальное напряжение сети двигателя согласно каталогу
 U : Напряжение инвертера

Для того, чтобы обеспечить желаемый резерв безопасности для момента опрокидывания, двигатель может быть загружен, в этом случае, только приблизительно на 95 % от его номинального момента. Поэтому следует выбирать двигатели с большим отношением

$$\frac{M_K}{M_n}$$

Скольжение и, в тоже время, реальная скорость двигателя могут быть определены точкой пересечения соответствующей характеристики двигателя и нагрузочной характеристики (Рис. 59).

Рис. 59
Точка пересечения нагрузки и характеристики двигателя при работе с инвертером (например, работа вентилятора)



- X: допустимые рабочие точки
- O: рабочие точки с *опрокидыванием* двигателя (недопустимые)

Если момент нагрузки выше, чем момент опрокидывания двигателя, тогда скорость двигателя уменьшается ниже скорости момента опрокидывания (в экстремальном случае до 0); привод опрокидывается. С этим связано большее скольжение и больший ток двигателя, который, при определенных обстоятельствах, вызывает остановку инвертера. Даже когда инвертер может выдержать ток, произойдет поломка привода через короткий промежуток времени, из-за теплового разрушения двигателя. Путем активизации защитных функций в инвертере поломку привода можно обычно избежать при заданных нагрузочных характеристиках ($M \sim n$, $M \sim n^2$), таких как ускорение (==> Раздел 7.8).

7.7 Динамические процессы (ускорение/замедление)

Основная функция инвертера - это регулирование скорости приводов. Чтобы ускорить привод до большей скорости, двигатель должен обеспечить как статический момент нагрузки, так и дополнительный момент для ускорения динамического момента инерции привода.

Для этого справедливо следующее:

Формула 26

$$M_{\text{Mot}} = M_L + M_{\text{dyn}} \quad \text{при} \quad M_{\text{dyn}} = \frac{1}{9.55} \cdot J \cdot \frac{dn}{dt}$$

J момент инерции привода (приведенный к валу двигателя) в кгм²

$\frac{dn}{dt}$ изменение скорости в единицу времени $\frac{\text{об/мин}}{\text{сек}}$

M_L статический момент нагрузки (приведенный к валу двигателя) в Нм

M_{Mot} момент двигателя в Нм

M_{dyn} динамический момент

В выражении 26 вы можете видеть параметры, которые влияют на увеличение момента на валу двигателя при ускорении:

- высокий статический момент нагрузки,
- большой момент инерции,
- большое значение разницы скоростей (dn)
- малое время ускорения (dt)

При установке скорости и времени ускорения можно наблюдать ускорение до установленной скорости только тогда, когда $M_{\text{Mot}} < M_{\text{Kipp}}$ допустимо во всех рабочих точках, и ток двигателя не выше, чем максимальный ток инвертера. Иначе, привод сломается или инвертер выдаст ошибку перегрузки по току (OC) или войдет в токовое ограничение. Необходимо вводить коэффициент безопасности при динамическом процессе.

Нагрузка в пределах диапазона перегрузки, выше номинального тока инвертера, может привести к OL ошибки, когда перегрузка дольше допустимого периода.

При замедлении привода, также как и при ускорении, либо замедление помогает приводу, либо препятствует.

Следующее справедливо:

Формула 27

$$M_{\text{МОТ}} = \frac{1}{9.55} \cdot J \cdot \frac{dn}{dt} + M_L$$

Момент нагрузки препятствует замедлению

Формула 28

$$M_{\text{МОТ}} = \frac{1}{9.55} \cdot J \cdot \frac{dn}{dt} - M_L$$

Момент нагрузки помогает замедлению

Иллюстрация примера поднимания и опускания нагрузки:

Рис. 60

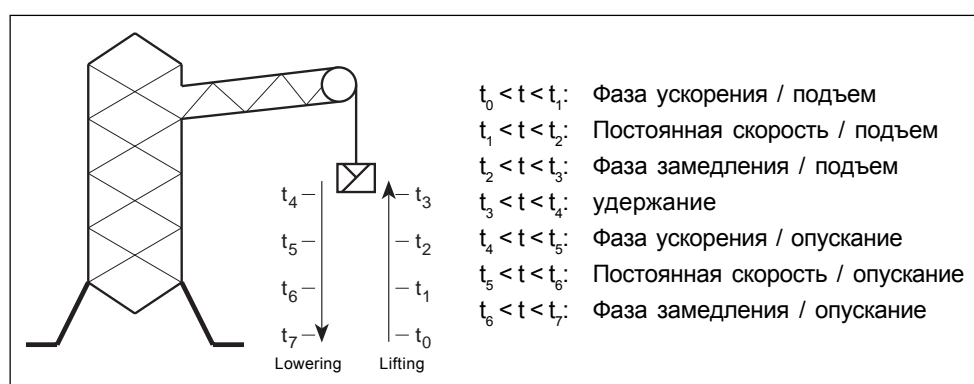
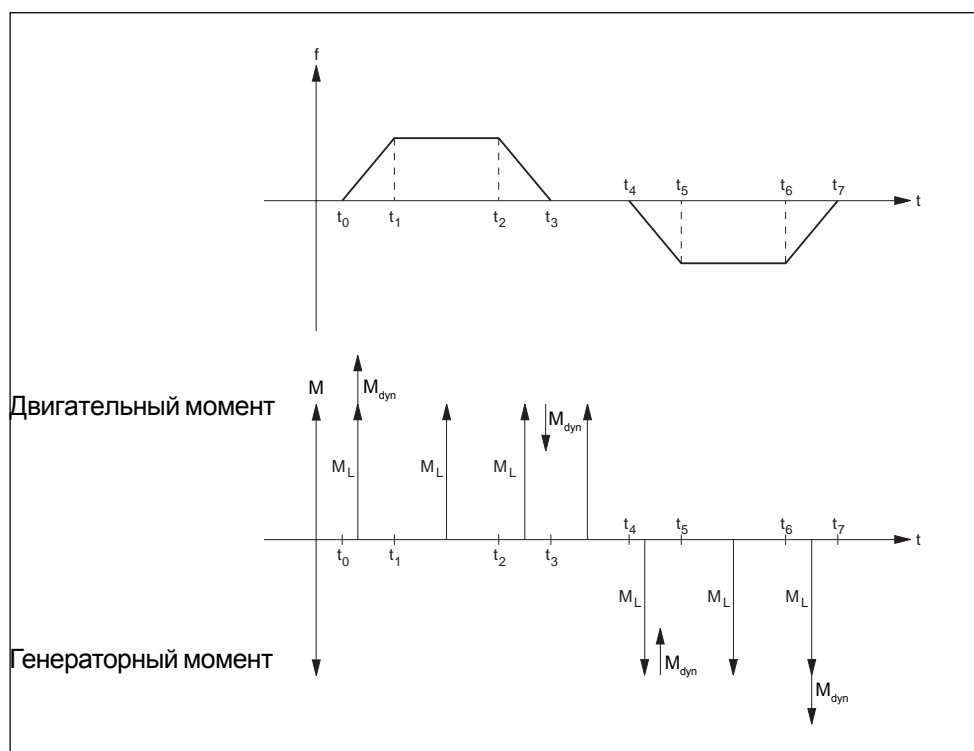


Рис. 61



Формула 28 для $t_2 < t < t_3$ и $t_4 < t < t_5$

Формула 27 для $t_0 < t < t_1$ и $t_6 < t < t_7$

7.8 Значение защитных функций (Сохранить в работе)

ФУНКЦИЯ	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ	Рабочий режим
1. LA Стоп	Входной ток привода слишком высокий во время фазы ускорения.	При достижении установленного уровня тока рампа прерывается пока ток не понизится снова.
2. Останов замедления	Генераторная перегрузка привода во время фазы замедления.	При достижении установленного уровня напряжения промежуточного контура замедление прерывается пока напряжение не станет ниже уровня снова.
3. Ограничение тока во время пост. работы	Перегрузка привода в продолжительном режиме.	Изменение вых. частоты, когда установл. уровень тока достигнут. После устранения перегрузки частота устанавливается на заданное значение снова.
4. Аппаратное ограничение тока	Очень быстрый перехват и регулирование высоких пиковых токов (например, при включении выхода инвертера)	Когда макс. допустимый ток инвертера достигнут в выходной фазе, управляющий импульс соответствующих транзисторов мгновенно уничтожается.
5. Поиск скорости	Подсоединение преобразователя к работающему двигателю	После активизации этой функции вых. частота и частота двигателя синхронизируются (захватываются). После этого, двигатель разгоняется до установленной величины снова.
6. Автоматический перезапуск после ошибок	Падение напряжения, электрический пробой, неисправная работа.	Автоматический перезапуск возможен после устранения нарушения. Поскольку двигатель может медленно перезапускаться после ресета, то хорошо использовать эту функцию в комбинации с поиском скорости.

К 1. LA Стоп

Хорошая идея использовать защитную функцию LA-стоп, когда привод должен ускоряться с неизвестной нагрузкой, или при сильно колеблющейся нагрузке. Если привод, например, не может увеличить момент ускорения при большей нагрузке, тогда скольжение и ток резко увеличиваются. Преобразователь воспринимает это, приостанавливает рампу ускорения при предустановленном уровне тока пока скольжение не уменьшится, так чтобы ток стал ниже установленного уровня снова. Затем рампа ускорения продолжается (==> Рис. 62a).

Даже когда происходит включение на движущийся двигатель LA стоп функция может, при определенных условиях, предотвратить выключение инвертера, если установленное время ускорения не слишком мало. В этом случае, возникает большее скольжение (f_{FU} мален, n_{Motor} большие), так что ограничение тока достигается очень быстро. Двигатель почти останавливается до нуля с установленным уровнем тока, и затем, ускоряется снова по рампе.

Рис. 62а
LA Стоп функция

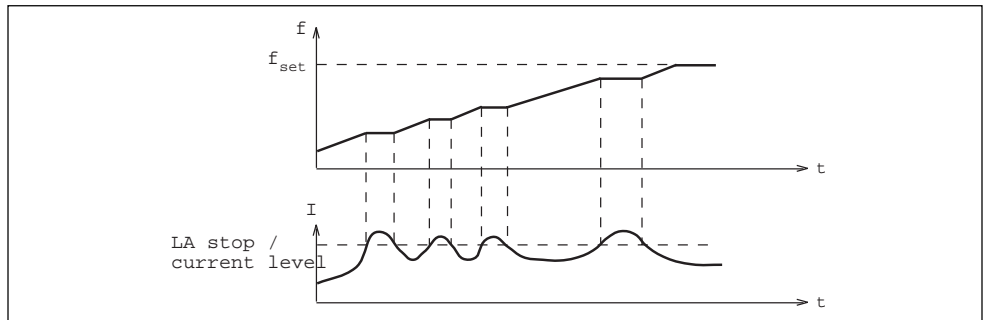


Рис. 62 б
Функция LA Стоп
и ограничение
тока

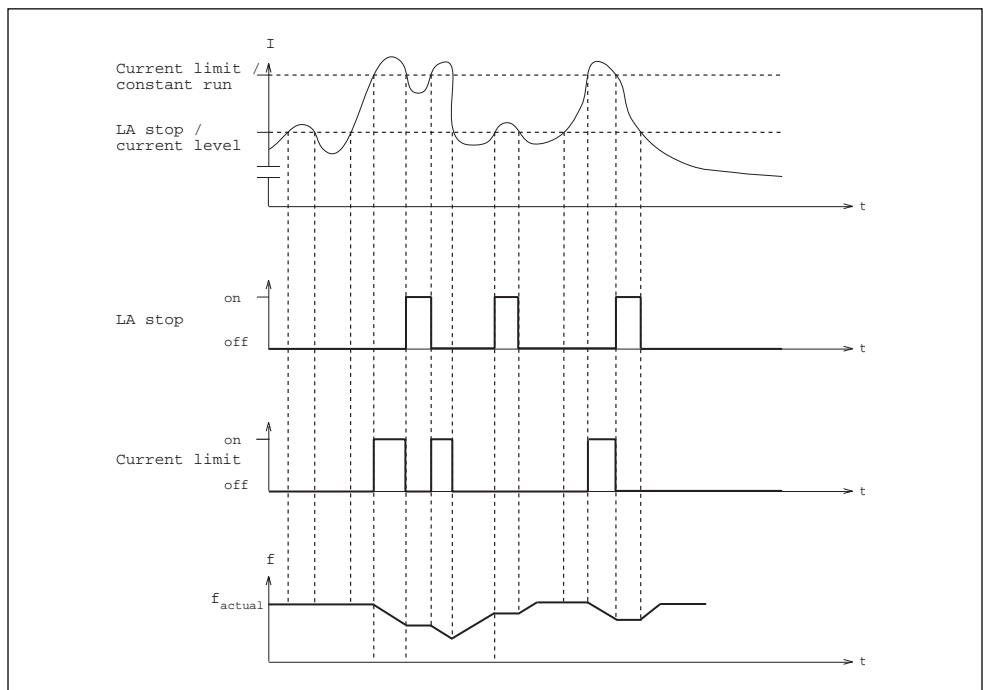
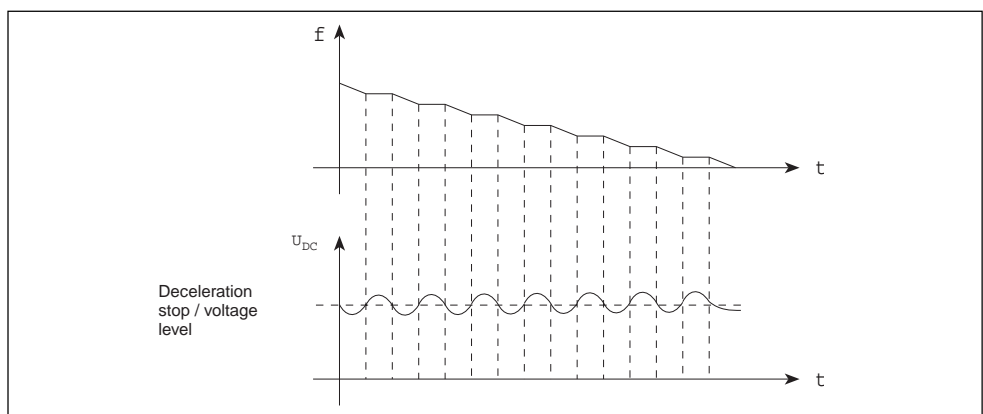


Рис. 62с
Режим работы
функции
останова
замедления



**К 2.
Останов
замедления**

При замедлении двигатель отдает энергию обратно в инвертер (генераторный режим), которая заряжает конденсатор промежуточного контура. Если обратная энергия слишком большая (малое время замедления, большие массы вращения) или конвертированные энергетические потери слишком малы в двигателе (особенно в продолжительном режиме в диапазоне ослабленного поля), тогда промежуточный контур загружен недопустимо высоким напряжением; инвертер выключается по перенапряжению с ошибкой E.OP.

Это можно предотвратить прерыванием рампы замедления (==> Рис. 62с). В результате, скольжение и обратная энергия ограничиваются. Защитная функция останова замедления особенно подходит, если колеблющаяся или неизвестная нагрузка и/или момент инерции должны быть вычислены во время замедления.

**К 3.
Ограничение
тока во время
постоянной
работы**

Если привод перегружен во время продолжительного режима, то скольжение и ток возрастают. Для предотвращения ОС ошибки, например, необходимо уменьшить выходную частоту инвертера, и следовательно скольжение. Это делается с помощью функции „ограничение тока во время постоянной работы“. В зависимости от характера нагрузочной характеристики, происходит увеличение / уменьшение частоты в течении запрограммированного времени. При резких скачках нагрузки этот процесс не должен быть слишком большим, чтобы гарантировать достаточную защиту.

Режим работы ограничения тока должен быть адаптирован к нагрузочной характеристике соответствующего привода (==> Раздел 7.6):

- большой момент нагрузки при малых скоростях
==> увеличение частоты, когда достигается токовое ограничение
- меньший момент нагрузки при малых скоростях
==> уменьшение частоты, когда достигается токовое ограничение

**К 4.
Аппаратное
ограничение
тока**

Для некоторых приложений критические пики тока не могут быть предотвращены, например, при запуске двигателя от инвертера с короткой рампой ускорения. В этом случае, LA-стоп функция и функция ограничения тока во время постоянной работы не достаточно быстрые, чтобы ограничить ток, из-за программного времени срабатывания. Инвертер будет остановлен с ошибкой ОС, несмотря на эти функции. Только непосредственное аппаратное влияние на соответствующие перегруженные транзисторы силового модуля в течении менее, чем мсек может предотвратить это сообщение ошибки. Это делается аппаратным ограничением тока. Заметте, что эта функция вызывает уменьшенное входное напряжение, уменьшенный момент и дополнительные шумы в двигателе.

**К 5.
Функция
поиска
скорости**

Функция поиска скорости делает возможным подключение на движущийся двигатель. Преобразователь частоты независимо ищет реальную скорости двигателя, и после нахождения ускоряет двигатель по своей рампе до установленного значения. Процесс синхронизации происходит так (==> Рис. 63):

- Начало поиска скорости с установленным значением;
- Достаточное повышение выходного напряжения, для того протекал максимальный номинальный ток;
- Если достигается номинальный ток, то частота немного уменьшается, и напряжение увеличивается, и так до тех пор, пока не будет достигнута подходящая величина напряжения для частоты;
- С этой точки снова происходит ускорение по установленной временной рампе.

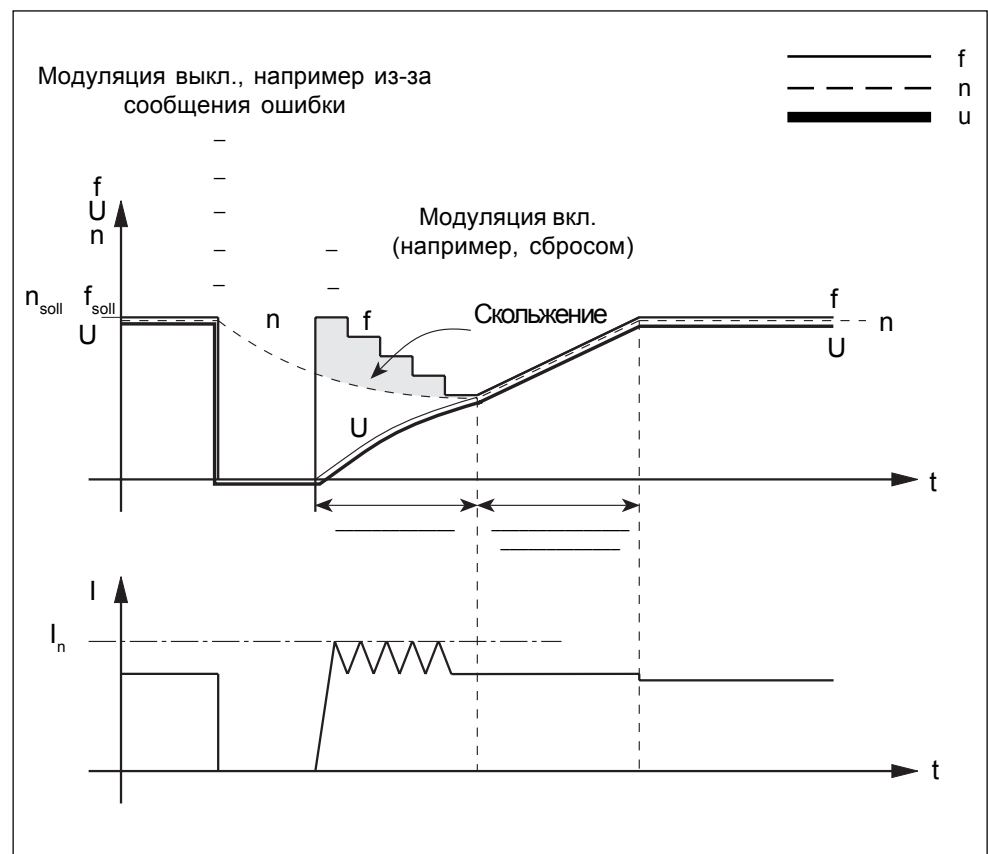


Рис. 63
Функция поиска
скорости

В зависимости от установки преобразователя частоты функция поиска скорости может быть приведена в действие при следующих условиях:

- Включение управления,
- Сброс ошибок,
- Включение питания инвертера (Power on),
- Автоматический перезапуск после ошибок.

Функция поиска скорости ищет скорость только в установленном в инвертере направлении вращения. Если вращение не соответствует действительному направлению вращения двигателя тогда, при определенных условиях, после задеиствия функции может появиться ошибка ОС. Например условия что, привод все еще вращается в противоположном направлении, и нет дополнительной защитной функции (например, LA стоп) останавливающей рампу ускорения (==> Рис. 64).

Рис. 64
Функция поиска скорости, когда направление вращения установлено не корректно, и нет защитной функции LA стоп

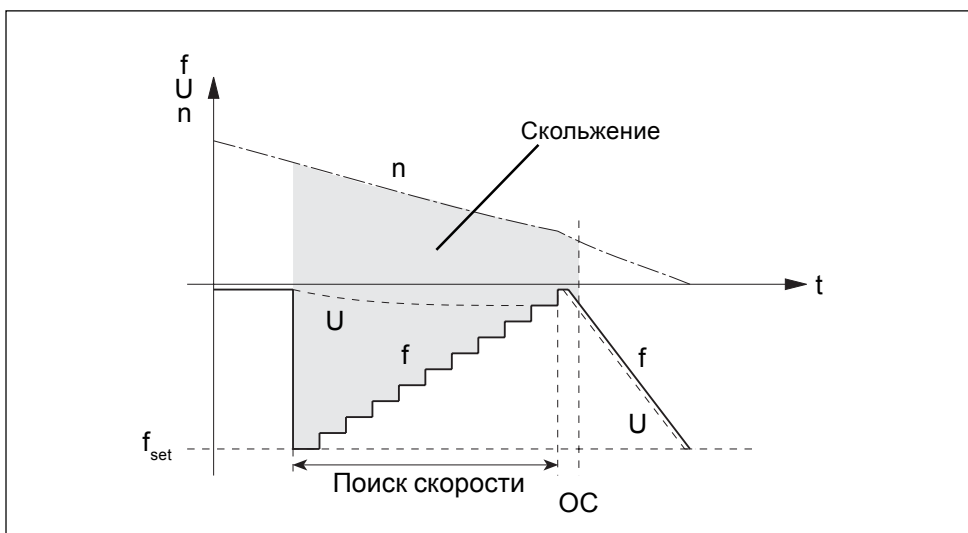
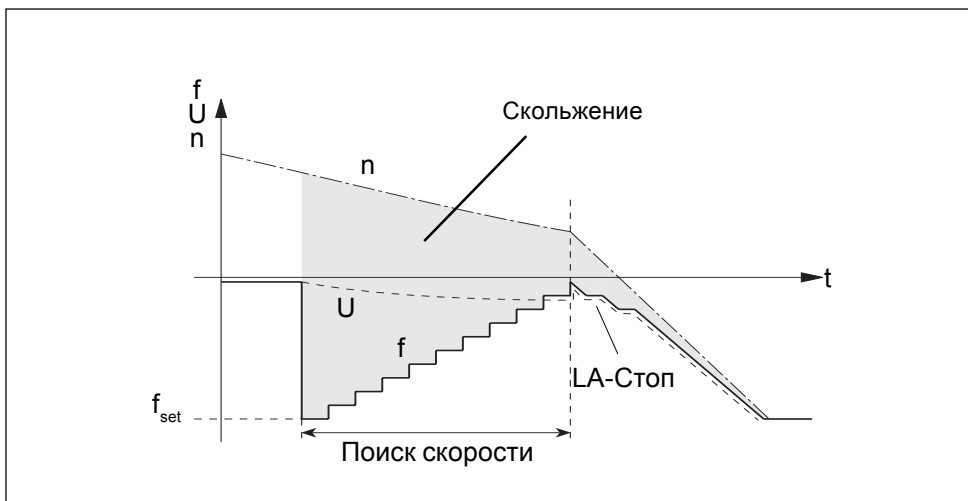


Рис. 65
Функция поиска скорости, когда направление вращения установлено, и функция LA стоп активна

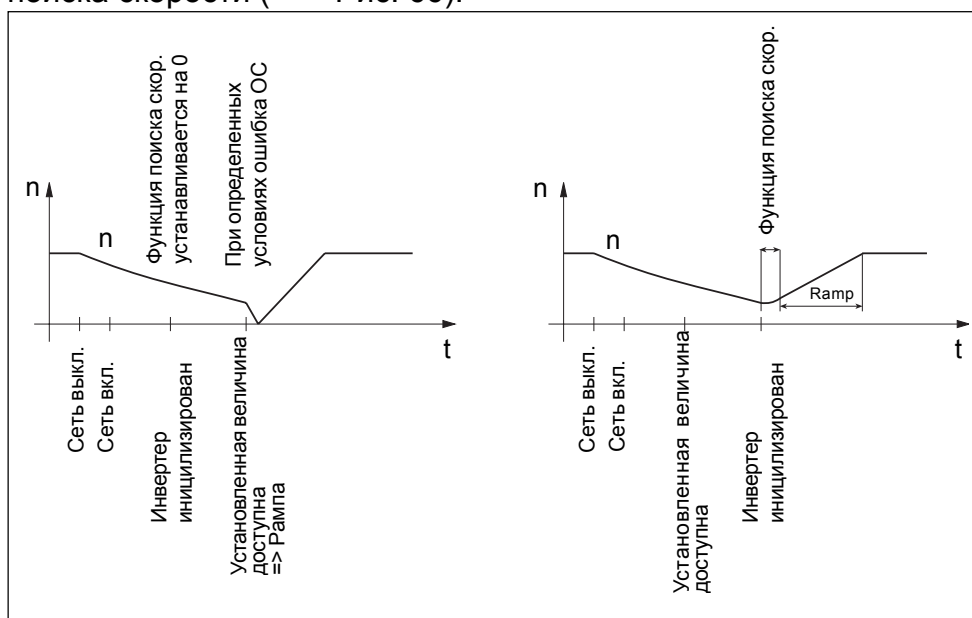


Поскольку функция поиска скорости всегда ищет скорость двигателя снизу от установленной частоты, установленная величина должна лежать выше действительной скорости. По этой причине функция поиска скорости не может быть использована с:

- приводами, скорость которых продолжает увеличиваться после отключения модуляции
- приводами, которые непосредственно нуждаются в полном моменте, и следовательно, полном напряжении двигателя (например, подъемные устройства)

При высшем управлении (например, PLC) необходимо гарантировать, что после электрического сбоя установленная величина должна быть установлена перед завершением фазы инициализации инвертера. Иначе, инвертер запишет установленную частоту как $f_{set} = 0$, и сразу же выйдет из фазы поиска скорости (==> Рис. 66).

Рис. 66
Поведение при отключении энергии, и активизации функции поиска скорости



Если направление вращения отключается во время фазы поиска скорости, тогда сначала завершается поиск частоты, а потом активизируется рампа.

К 6. Автоматический перезапуск после ошибок

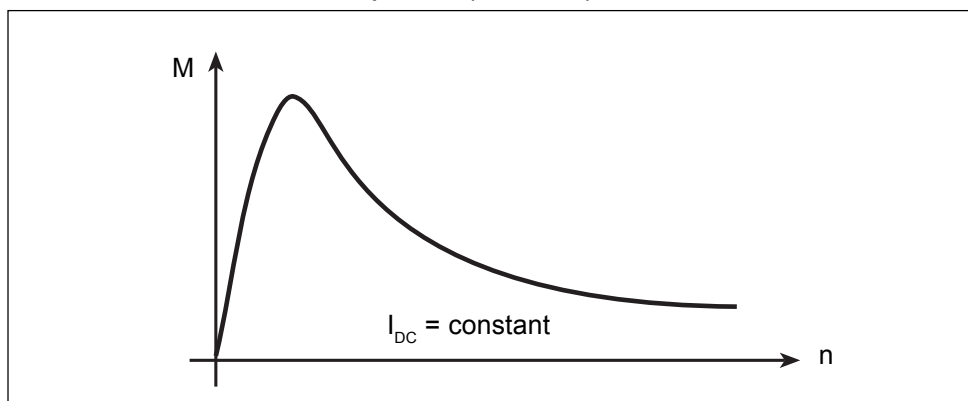
Выполняет немедленный перезапуск системы без внешнего сброса. Он может произойти при кратковременном падении напряжения и/или пропадании сети, или другой неправильной работе не критичной для привода. При этом свободно вращающийся двигатель может быть подхвачен снова, например, активизацией функции поиска скорости. Таким образом, процесс движения может быть сохранен.

Установка функции „автоперезапуск“ зависит от карт управления (см. руководство пользователя).

7.9 Торможение постоянным током

Для быстрого замедления при больших центробежных массах и высоких скоростях когда не используется тормозной модуль, лучше не применять генераторное торможение по рампе, а подавать постоянное напряжение на на обмотку двигателя. При этом так называемом торможении постоянным током, тормозной момент создается согласно принципу торможения вихревым током, чья величина зависит от скорости (Рис. 67).

Рис. 67
 Торможение постоянным током / зависимость момента торможения от скорости



При одинаковом токе достигаемый момент торможения, в диапазоне позиции ротора, больше при торможении по рампе, чем при торможении постоянным током. Во время генераторного торможения кинетическая энергия сжигается на тормозном резисторе, а при торможении постоянным током двигатель дополнительно обеспечивается энергией от инвертера. Поэтому, энергетический баланс ухудшается, и двигатель нагревается больше (важно при частом торможении!). При торможении постоянным током вся энергия конвертируется в двигателе, а не в промежуточном звене постоянного тока, таким образом, ошибка ОР не может появиться.

При торможении постоянным током важно так называемое основное время блокировки между включением и началом торможения. В течении этого времени блокируется весь транзисторный силовой модуль. Это делается для ожидания деактивизации обмотки двигателя над промежуточным звеном. Этот период времени, зависящий от размеров двигателя, лежит между 200 мс для 0.37 кВт двигателей, и несколькими секундами для 200 кВт. Транзистор может быть включен снова только после истечения этого времени без риска получения высокого кратковременного тока (Рис. 68). В течении этого времени кратковременный замыкающий ток не может быть зарегистрирован с помощью НСТ в промежуточном звене, следовательно нет защиты от перегрузки по току силового модуля. Это может привести к разрушению силовых ключей. По этой причине необходимо использовать большое время блокировки при котором силовой модуль отключается (например, ресет, вкл. управления, DC торможение). Установка основного времени блокировки происходит на заводе.

Рис. 68
Иллюстрация
Основного
времени
блокировки

Рис. 68а
Двигательный
режим

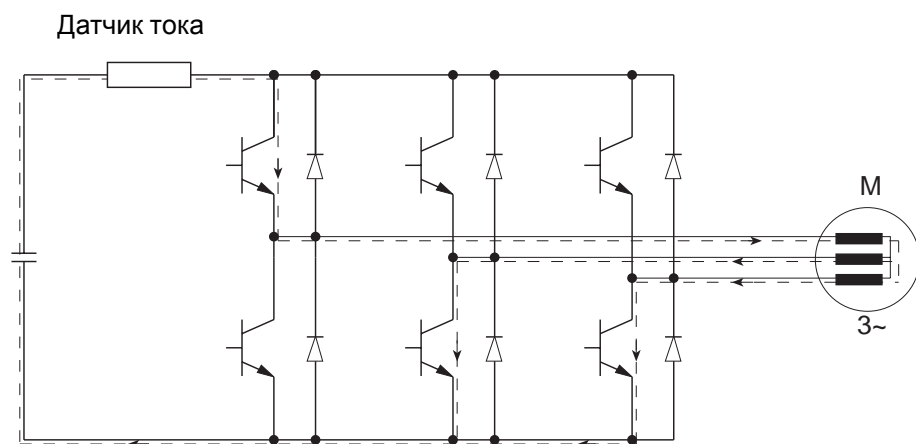


Рис. 68b
Деактивация
двигателя
(ток через
свободную
замкнутую
ветвь)

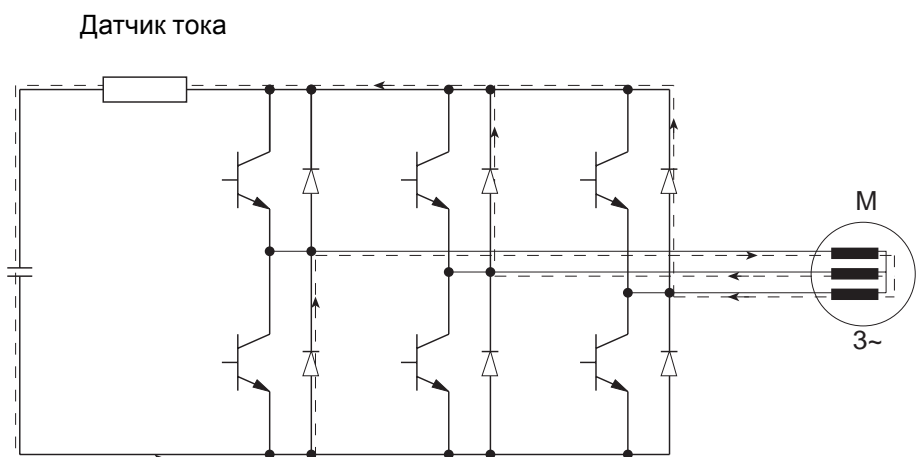
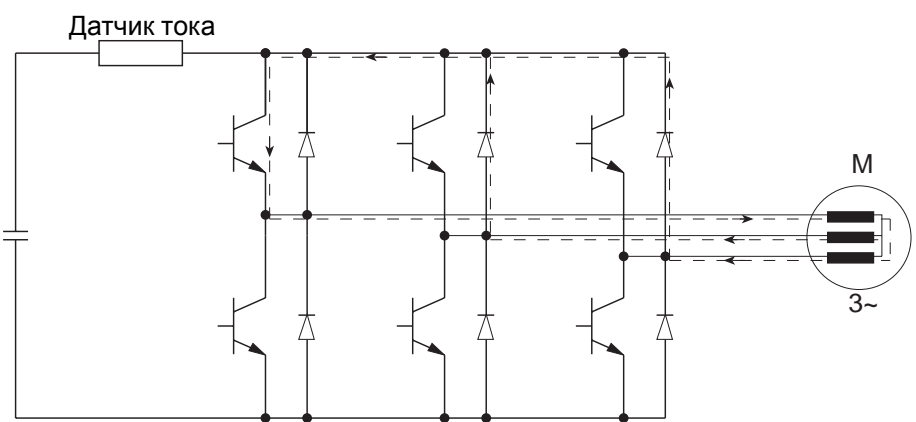


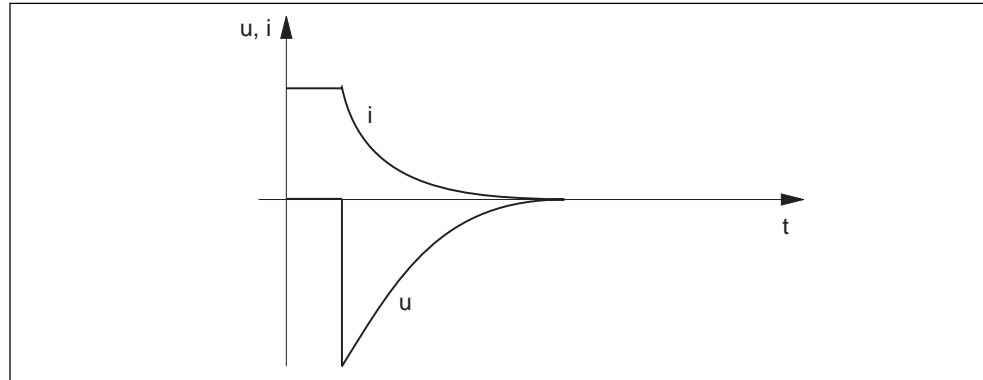
Рис. 68с
Кратковременный
замыкающий ток
с
преждевременным
самовключением
силового
транзисторного
модуля (с
меньшим или
отсутствующим
Основным
временем
блокировки)



7.10 Преключение на выходе / Длинный двигательный кабель

АС двигатель представляет активную и индуктивную нагрузку для инвертера. При включении на индуктивную нагрузку ток не может резко упасть до нуля, в течении короткого промежутка времени на главном контакте развивается высокое напряжение, которое поддерживает ток (искрение; Рис. 69).

Рис. 69
Ток и напряжение при включении на индуктивную нагрузку



Значение и направление этого компенсационного напряжения зависит от тока разъединения, а также активного и индуктивного сопротивлений в цепи.

Если провести гармонический анализ этого напряжения, то можно определить большое количество высокочастотных гармоник. Эти гармоники могут вызвать сбой в электронном контуре. Силовые ключи могут также выйти из строя из-за пиковых напряжений, которые слишком высокие.

Чтобы исключить этот риск, переключение на выходе осуществляется только если нет тока между преобразователем и двигателем. Это в случае если:

- нет работы (nOP), например, включение управления не активизировано
- низкая скорость (LS), например, не задано направление вращения
- 0 Гц, буст = 0 %

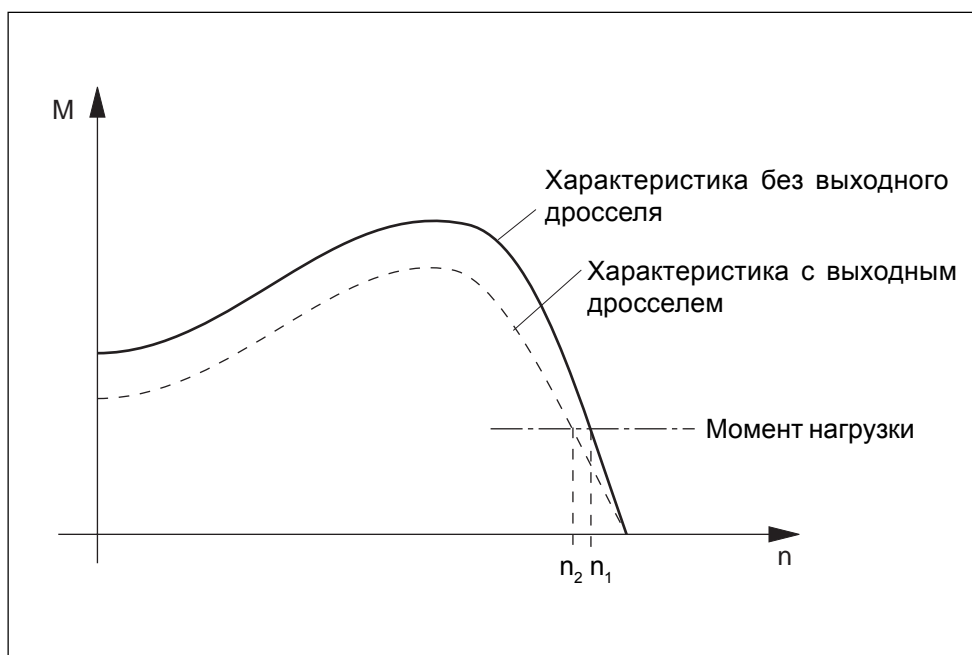
Если переключение на выходе неизбежно (например, когда несколько двигателей управляются одним инвертером), тогда можно использовать ферритовые кольца. Они надеваются на выходные кабели инвертера, и значительно уменьшают высокочастотные гармоники. Одно ферритовое кольцо может быть использовано для каждой выходной фазы или для всех фаз вместе. В первом случае уменьшаются симметричные гармоники, но есть вероятность, что ферритовые кольца перенасытятся и потеряют свою функциональную способность. В случае, когда одно ферритовое кольцо на все три фазы, перенасыщение не грозит, поскольку сумма токов равна 0, и феррит может быть загружен только несимметричными гармониками. Лучшее решение, это комбинация этих двух вариантов.

Когда используются длинные кабели двигателя возникают высокие разрядные токи игольчатой формы в кабеле двигателя, из-за быстрого нарастания выходного напряжения (другое $\frac{kB}{mсек}$!). В экстренной ситуации это может привести к замыканию на землю или к утечке на землю.

Это особенно заметно при работе с высокими частотами (например, 16кГц).

Для предотвращения этого можно использовать выходной фильтр или двигательный дроссель. В любом случае при длинных кабелях и /или выходных фильтрах происходит уменьшение напряжения двигателя, и изменение его характеристики (==> Рис. 70).

Рис. 70



7.11 Реакции инвертера

Как сказано в разделе 6.3, входной ток инвертера не синусоидален. Он может быть приближен к основной волне. Эта несинусоидальность вызывает гармонические напряжения на полном сопротивлении сети, которые, в свою очередь, могут вызвать сбой в работе других приборов. Если влияние гармоник существенное, как, например, в случае с большой присоединенной нагрузкой, тогда необходимо использовать сетевой дроссель или низкочастотный фильтр.

Гармоники есть также в выходном напряжении инвертера, и влияют на привод. Они вызывают шумы также как и дополнительные потери в двигателе, и в тоже время уменьшают КПД. При одинаковой нагрузке асинхронный двигатель имеет больший перегрев, и меньший срок службы. Гармоническое содержание тока двигателя существенно увеличивается, когда частота заполнения увеличивается (или выходная частота уменьшается). Это не играет важную роль в случае с современными IGBT инвертерами с частотой заполнения > 4 кГц и стандартными двигателями 50 Гц.

В комбинации с основной системой гармонические токи вызывают маятниковый момент. Этот момент имеет вредное влияние на концентричность двигателя, и может привести, в неблагоприятных случаях, к резонансу привода. Высокочастотные гармоники часто приводят к не приятному шуму в магнитопроводе двигателя. Профилированием откоса “бельевого колеса” и связыванием обмотки статора, гармоники уменьшаются.

Когда используется дроссель, он уменьшает перегрузку по току, а также снижает напряжение на зажимах и момент опрокидывания двигателя. Очень важно, что частоты гармонических токов находятся рядом, или кратны тактовой частоте инвертера. Благодаря высокой тактовой частоте гармоники также смещаются к большей частоте, и индуктивность двигателя уменьшается. Тактовая частота > 16 кГц лежит за пределами человеческого восприятия (это называется безшумный или низко шумный привод).

7.12 Специальные задачи

• Несколько двигателей для одного инвертера

Если несколько двигателей должны управляться одним инвертером, то необходимо гарантировать, чтобы преобразователь мог обеспечить все рабочие точки требуемым током. Если двигатели запускаются последовательно, тогда инвертер должен выбираться так, чтобы обеспечить токи для работы этих двигателей, а также пусковой ток. Эта функция должна работать в пределах своей перегрузочной способности, если ошибку перегрузки по току можно избежать такими защитными функциями как аппаратное и программное ограничение тока.

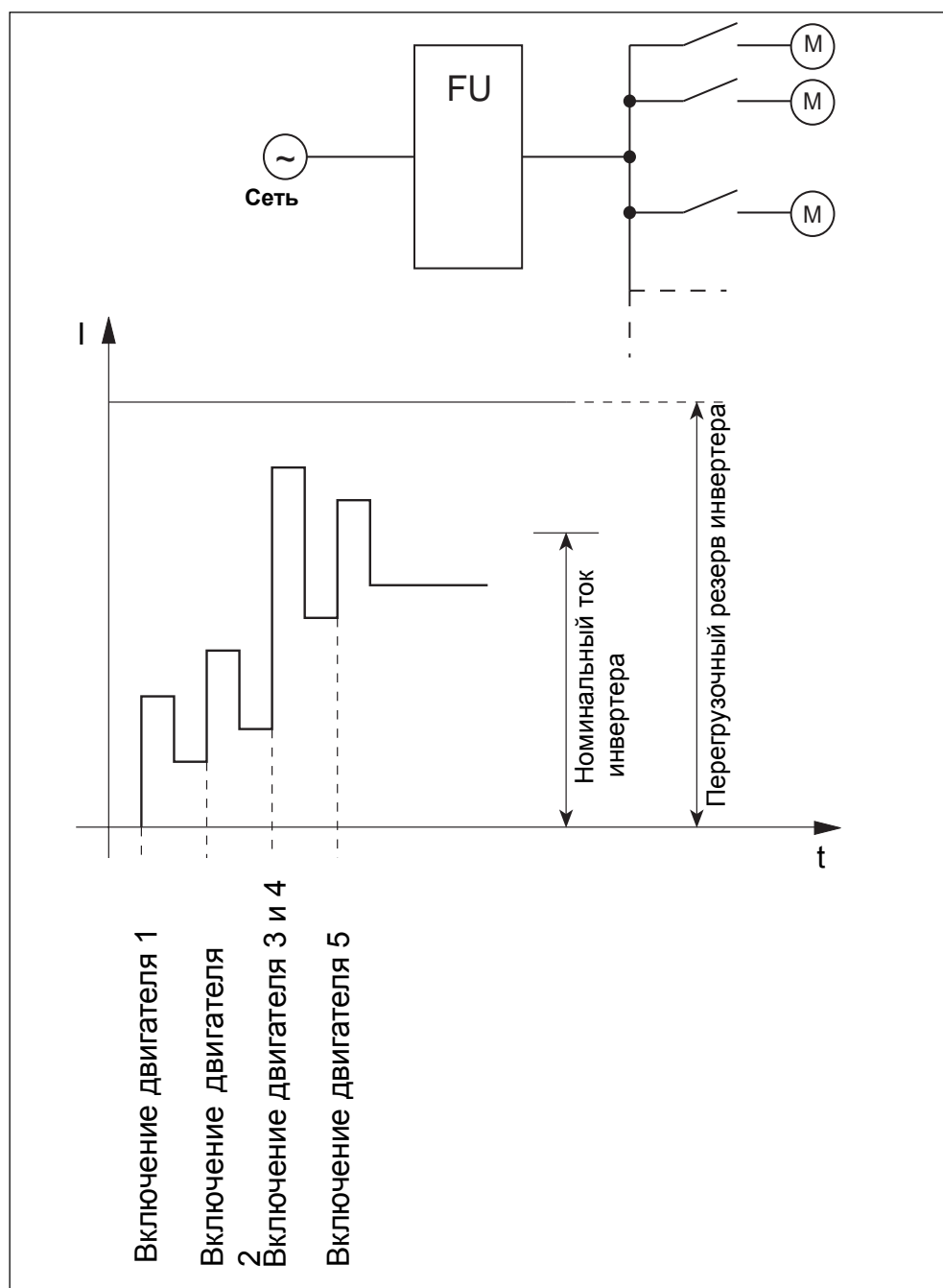
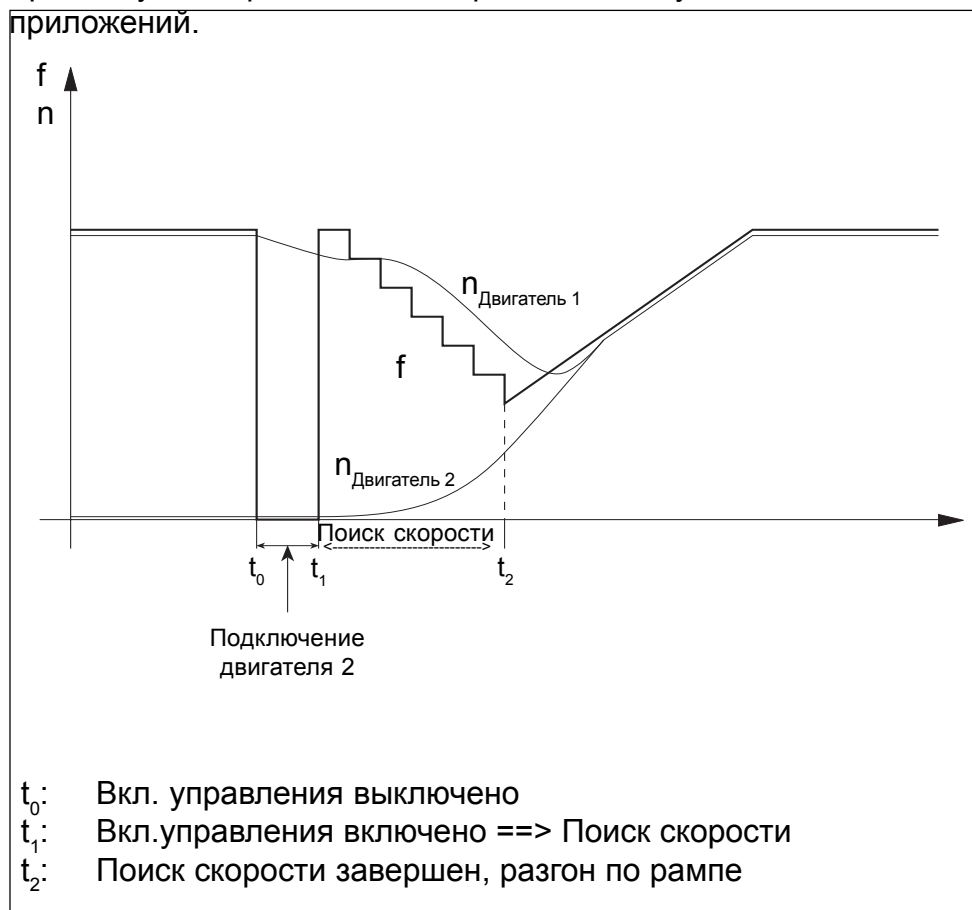


Рис. 71

Многодвигательный
привод

Если функция поиска скорости активна при запуске двигателей на “разогнаном” инвертере (например, вызванном кратковременным включением/выключением управления (ST)), тогда необходимо гарантировать, чтобы инвертер не отключался по ошибке ОС, поскольку поиск скорости ограничен током. Скорость вращения двигателя падает в течении короткого промежутка времени, который не допустим для многих приложений.

Рис.72
Запуск
двигателя, когда
Функция поиска
скорости
активна



Ограничение тока не обеспечивает достаточную защиту, когда двигатель подключается на работающий инвертер, потому что программное ограничение тока имеет не достаточную быструю реакцию, даже при оптимальной установке. Это возможно только при активизации аппаратного ограничения тока.

Если работающий двигатель отсоединяется от инвертера, то необходимо предусмотреть ограничения против пиковых напряжений (например, RC цепь, ферритовые кольца на выходе инвертера).

- **Вибрации двигателя**

Помимо механических резонансов, также, при определенных условиях, появляются электрические резонансы. В экстремальных случаях это может вызвать выключение инвертера с ошибкой E.O.C. Механический резонанс особенно активизируется низкочастотными токовыми гармониками, и в результате при определенных скоростях может возникнуть маятниковый момент. Электрический резонанс появляется, потому что конденсаторы, сопротивления двигателя и индуктивности в электрической системе, представляют медленный резонирующий контур способный к самогенерации. Колебания тока в результате этого резонанса приводят к колебаниям скорости двигателя.

Этот феномен особенно характерен когда:

- момент инерции привода - приведенный к валу двигателя - мал (--> малое механическое демпфирование),
- двигатель на холостом ходе или нагрузка мала (--> нет скольжение --> меньшее активное сопротивление двигателя --> малый электрический демпфир),
- двигатель имеет хороший КПД (--> малые активные сопротивления статора и ротора --> малый электрический демпфир),
- инвертер работает при большой тактовой частоте и/или компенсация времени задержки

Поскольку двигатели с большей мощностью имеют меньшее активное сопротивление и лучший КПД, чем маленькие двигатели, они более предрасположены к вибрациям. Реактивные двигатели и синхронные двигатели более предрасположены к вибрациям, чем асинхронные двигатели.

Возможные действия для уменьшения или устранения вибраций:

- Изменение U/f характеристики (Буст, сдвиг номинальной точки, стабилизация вых.напряжения),
- Применение др. двигателя - если можно - меньшего размера (--> большее скольжение --> большое актив. сопротивление --> лучшее электрическое демпфирование),
- Применение выходного дросселя, т. е. перемещение резонансной частоты,
- Если возможно, увеличение вращающихся масс привода,
- Если возможно, уменьшение тактовой частоты; изменение процесса модуляции, компенсации времени задержки,
- Программные или специальные управляющие меры, например, обход резонансной частоты.

- **Трансформатор на входе инвертера**

Если напряжение сети не соответствует входному напряжению инвертера, тогда необходимо применять входной трансформатор. Он должен быть завышенного размера в 1.5 раза больше полной мощности инвертера, так чтобы трансформатор не слишком перенасыщался большими входными пиковыми токами.

Возникновение насыщения критично, потому что максимальные токи ведут к насыщению, и следовательно, уменьшению максимального напряжения. Уменьшение напряжения промежуточного контура уменьшает выходное напряжение, а с ним и максимальный момент двигателя.

- **Трансформатор между инвертером и двигателем**

Если номинальное напряжение двигателя расходится с выходным напряжением инвертера, например, в случае со средними частотами и специальными двигателями, то необходимо поставить трансформатор между инвертером и двигателем. Обратите внимание на следующее:

- Трансформатор не может передавать какое-либо постоянное напряжение. Поэтому торможение постоянным током не может быть использовано.
- Даже при малых частотах трансформатор быстро насыщается, поэтому этот диапазон частот следует проходить быстро (короткая рампа, малый буст).
- $kV \cdot A$ мощность трансформатора должна, по меньшей мере, быть больше $kV \cdot A$ мощности инвертера (дополнительный резерв перегрузки).
- Трансформатор имеет такой же сглаживающий эффект для двигателя, как и выходной дроссель.

7.13 Сравнение работ без инвертера и с инвертером

Наиболее важные различия между работой от сети и от инвертера для асинхронного двигателя показаны ниже.

Работа от сети

Возможна только одна скорость или, при использовании смены полюсов двигателя, несколько фиксированных скоростей

Невозможно управлять разгоном, время разгона зависит от характеристики двигателя и момента нагрузки

Невозможно управлять торможением, время замедления зависит от соответствующего трения и момента нагрузки

Операция реверсирования возможна перестановкой фаз --> дополнительные затраты на переключатель

Фиксированный пусковой момент (определяется двигателем)

Высокий пусковой ток --> при определенных условиях переключение звезда/треугольник требуется

Трехфазные двигатели требуют трехфазной сети (или пусковой конденсатор --> двигатель с худшим КПД и меньшим моментом)

Увеличение мощности не возможно с помощью перекоммутации

Полное номинальное напряжение --> полный максимальный момент

Синусоидальный ток, синусоидальное напряжение

Требуется большая реактивная мощность ($\cos \varphi$ примерно 0.8), таким образом, необходима большая компенсация мощности

Худшая эффективность и увеличенная термическая нагрузка при тактовых операциях

Дополнительные функции (например, защита двигателя, плавный старт, торможение пост. током) требуют дополнительных затрат

Дополнительные шумы при тактовой частоте < 16 кГц

Работа от инвертера

Безступенчатое регулирование скорости двигателя

Управляемый разгон, время разгона регулируется

Три способа остановки:

1. управляемое замедление, время замедления регулируется (с тормозным модулем)
2. Торможение постоянным током
3. Движение по инерции (модуляция выкл)

Управляемое реверсирование благодаря электронному реверсированию вращающегося поля без доп. затрат

Регулирование пускового момента U/f-характеристикой инвертера

Ограничение пускового тока, ток зависит от разгона и момента нагрузки

Двигатели малой мощности (до макс. 2.2 кВт) могут работать от однофазного инвертера

При 400В работе и соединении треугольником для 230/400 В двигателя кратковременная мощность двигателя возрастает до 70% (87-Гц кривая)

Падения напряжения на подводящих породах и фильтрах --> меньший максимальный момент, чем при работе от сети

Несинусоидальный входной ток --> нагрузка сети гармониками, модулированное напряжение --> радио помеха --> высокое подавление помех $\cos \varphi$ прим. 1, таким образом компенсация не нужна, но thus no compensation needed

Оптимальная эффективность также при циклических операциях

Инвертер выполняет доп. функции (регистрация тока и напряжения, управляющие функции и т.д.)

Благоприятное шумовое поведение двигателя

8. Работа реактивных синхронных двигателей с преобразователями частоты

Реактивные синхронные двигатели успешно используются для изменения скорости приводов с преобразователями частоты, т. к. они не имеют скольжения, то можно точно определять скорость простыми методами. Когда несколько двигателей должны работать с одинаковой скоростью (текстильные машины, конвейерные системы), можно использовать реактивные двигатели вместо дополнительного синхронизационного контроля. Использование реактивных двигателей для синхронизации нескольких двигателей малой мощности- это часто экономное решение.

Поскольку максимальный момент двигателя зависит от квадрата напряжения на зажимах (для малых двигателей от куба), то особые требования предъявляются к инвертеру, главным образом к стабильности выходного напряжения (--> стабилизация напряжения).

Другие требования к инвертеру:

- Воспринимать короткие пиковые токи, до двухкратного номинального тока двигателя в двигательном и генераторном режимах, чтобы уменьшать вибрации (низкое выходное полное сопротивление).
- Уменьшать частоту при перегрузке (ограничение тока), чтобы предотвратить опрокидывание двигателя. Если требуется это опрокидывание, то не следует ничего делать.
- Легко приспособляемая характеристика напряжение - частота в широком диапазоне, который включает и малые частоты, чтобы гарантировать правильную синхронную работу (Буст).
- Нормальное движение без рывков на всем диапазоне частот, особенно при больших внешних центробежных массах.

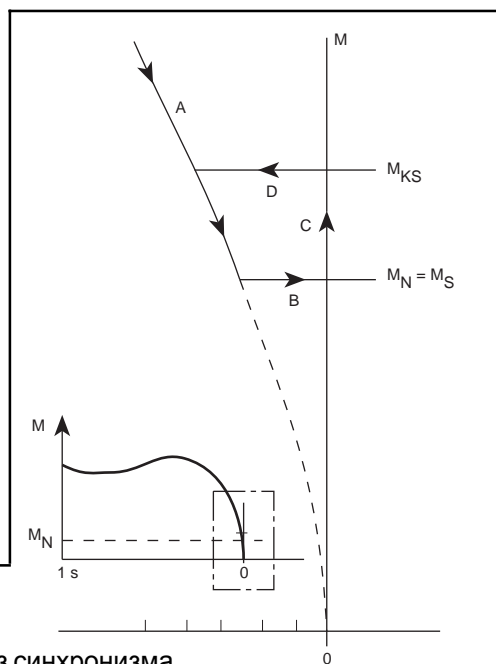
По экономическим соображениям реактивные синхронные двигатели производятся только для относительно небольших мощностей до 10 кВт, и поскольку они обычно имеют большой температурные резервы, в зависимости от конструкции, форма кривой напряжения не имеет существенного значения. Важно отметить, что независимо от формы кривой, период напряжения более или менее соответствует основной волне.

Чтобы достиг точной синхронизации нескольких реактивных двигателей, они должны управляться от одного инвертера. Дополнительно необходимо обеспечить следующие условия:

- В нижнем диапазоне частот (до 10 Гц) двигатели не должны быть загружены больше их номинального момента M_N , чтобы предотвратить рассинхронизацию.
- Момент нагрузки в диапазоне 10 - 50 Гц не может быть больше, чем момент выпадания из синхронизма M_{KS} . Отношение M_{KS} к M_N различно для разных производителей. Следует заметить, что M_N и M_{KS} могут быть значительно меньше при работе с инвертером, чем при работе от сети, из-за падений напряжения.
- Двигатель должен получать достаточный буст, для того чтобы воспроизводить динамический момент удержания при остановке и достаточный момент в диапазоне низких частот.
- При выключении управления двигателя работают с выбегом, покуда не сработает тормоз. При такой работе синхронизация не возможна. Тоже самое справедливо и для основного времени блокирования. (например, в начале торможения постоянным током).

Поскольку реактивные двигатели имеют худшие КПД и $\cos \varphi$, чем обычные асинхронные двигатели, они потребляют больший ток при той же самой мощности. Инвертор должен выбираться для этого тока, он должен быть выбран для тока в 1.5...2.0 большего. Моментно - скоростная характеристика реактивных двигателей показана на Рис. 73.

Рис. 73
Схема направления момента при ускорении, синхронизации и перегрузке реактивного синхронного двигателя.



- M_N = Номинальный момент
- s = Скольжение
- M_{KS} = Макс. момент выпадания из синхронизма
- M_S = Момент выпадания из синхронизма
- A = Рабочая характеристика (старт)
- B = Синхронизация (вхождение в синхронизм)
- C = Повышение нагрузки до макс. момента (синхронная работа)
- D = Рассинхронизация и асинхронная работа

9. Типичные ошибки при подключении и параметрировании преобразователей частоты

Когда возникают проблемы при запуске или постоянном использовании преобразователя частоты, тогда часто полагается, что они вызваны технической неисправностью инвертера. В большинстве случаев ошибка в результате некорректного подключения или неправильной параметризации и/или сбоя в работе инвертера. Ниже приведены наиболее часто встречающиеся причины этих ошибок.

- Некорректно выбранный привод
 - a) Двигатель слишком мал
 - > не может выдержать момент нагрузки (особенно в диапазоне ослабленного поля)
 - > опрокидывание двигателя
 - > инвертер может выключиться с ошибкой ОС или войти в токовое ограничение
 - b) Инвертер слишком мал
 - > не может обеспечить ток двигателя (смотри загрузку инвертера)
 - > выключение с ошибкой ОС или OL или токовое ограничение.
- Время ускорения слишком маленькое
 - > требуется слишком большой момент ускорения
 - > двигатель не может следовать по рампе ускорения
 - > большее скольжение
 - > большой ток
 - > выключение с ошибкой ОС или токовое ограничение
- Время замедления слишком маленькое
 - > требуется слишком большой тормозной момент
 - > двигатель не может следовать по рампе замедления
 - > большое генераторное скольжение
 - > большой обратный ток в промежуточный контур
 - > загрузка конденсатора промежуточного контура
 - > выключение с ошибкой ОС или ОР или токовое ограничение.

ПОДДЕРЖКА :

ошибка ОР: Используйте тормозной модуль
или увеличьте время замедления;
выключите стабилизацию напряжения

ошибка ОС: Увеличьте размер инвертера или время
замедления;

Когда используется тормозной модуль: Активизируйте стабилизацию напряжения

- Клеммы соединены не правильно:
 - > Входы не были установлены или перепутаны
 - > Короткое замыкание напряжения питания или перегрузка

- Включение на движущийся двигатель без активизации защитной функции (например поиска скорости)
 - > Инвертер ускоряется в противоположном направлении к вращению двигателя
 - > повышенное генераторное скольжение
 - > повышенный генераторный ток
 - > выключение с ошибкой ОС или ОР или токовое ограничение

- Неправильное подсоединение двигателя (Y/D)

Стандартные -230/400 V двигатели должны подключаться: с 230 В инвертерами в треугольник, с 400 В инвертерами в звезду.

Соединение звездой для 230 В инвертеров:

Фазовое напряжение уменьшается в $\sqrt{3}$ раза

- > магнитный поток уменьшается в $\sqrt{3}$ раза
- > максимальный момент падает в 3 раза
- > в основном двигатель не может обеспечить момент нагрузки
- > опрокидывание двигателя

Соединение треугольником для 400 В инвертеров:

Фазовое напряжение увеличивается примерно в $\sqrt{3}$ раза

- > Двигатель перемагничен, входит в насыщение
 - > Высокий ток намагничивания
 - > Инвертер выключается с ошибкой ОС или ограничивает ток. Если инвертер может справиться с током, то двигатель перегреется через короткое время и выйдет из строя. Если необходимо, то можно работать на угловой частоте 87 Гц (см. раздел 7.4). 400/690 В двигатели могут работать только с 400 В инвертерами в D-соединение.
- Попытка сбросить OL-ошибки ресетом или выключением питания, до завершения фазы охлаждения (когда мигает ошибка nOL на дисплее) безуспешна; в течении фазы охлаждения напряжение питания инвертера не должно отключаться.
 - Выходное напряжение слишком высокое, например, из-за буста, дельта-буста или стабилизированное выходное напряжение слишком высокое или угловая частота установлена слишком маленькая.
 - > Двигатель перемагничен
 - > Большой ток
 - > Ошибка ОС и/или OL или ограничение тока
 - При торможении постоянным током: напряжение торможения и/или время слишком малы
 - > Двигатель не останавливается полностью
 - > Двигается с выбегом (свободно)

Если в происходит поломка инвертера (например, короткое замыкание в силовом транзисторном модуле), попытайтесь включить инвертер без двигателя. Если инвертер не работает (например, E.ОС), тогда неисправность скорее всего в нем. Если инвертер только выключается с сообщением об ошибке, при подсоединенном двигателе, то проверьте: параметризацию (особенно U/f-кривую), подводящие провода двигателя, двигатель и фильтр.

10. Окружение преобразователя частоты

Многие приложения не могут быть решены с одним стандартным инвертером. Необходимы специальные функции, для которых инвертер должен быть оборудован специальной картой управления и/или расширенным аппаратным обеспечением. Если инвертеры используются в комплексном оборудовании, которое управляется контроллером, тогда рекомендуется, чтобы инвертеры были соединены в сеть. Необходимо предусмотреть для потребителей дальнейшую возможность расширения этой сети.

10.1 Сетевое подключение преобразователей частоты, последовательный интерфейс

Рис. 74а
Параллельное I/O соединение (Раздельные провода)

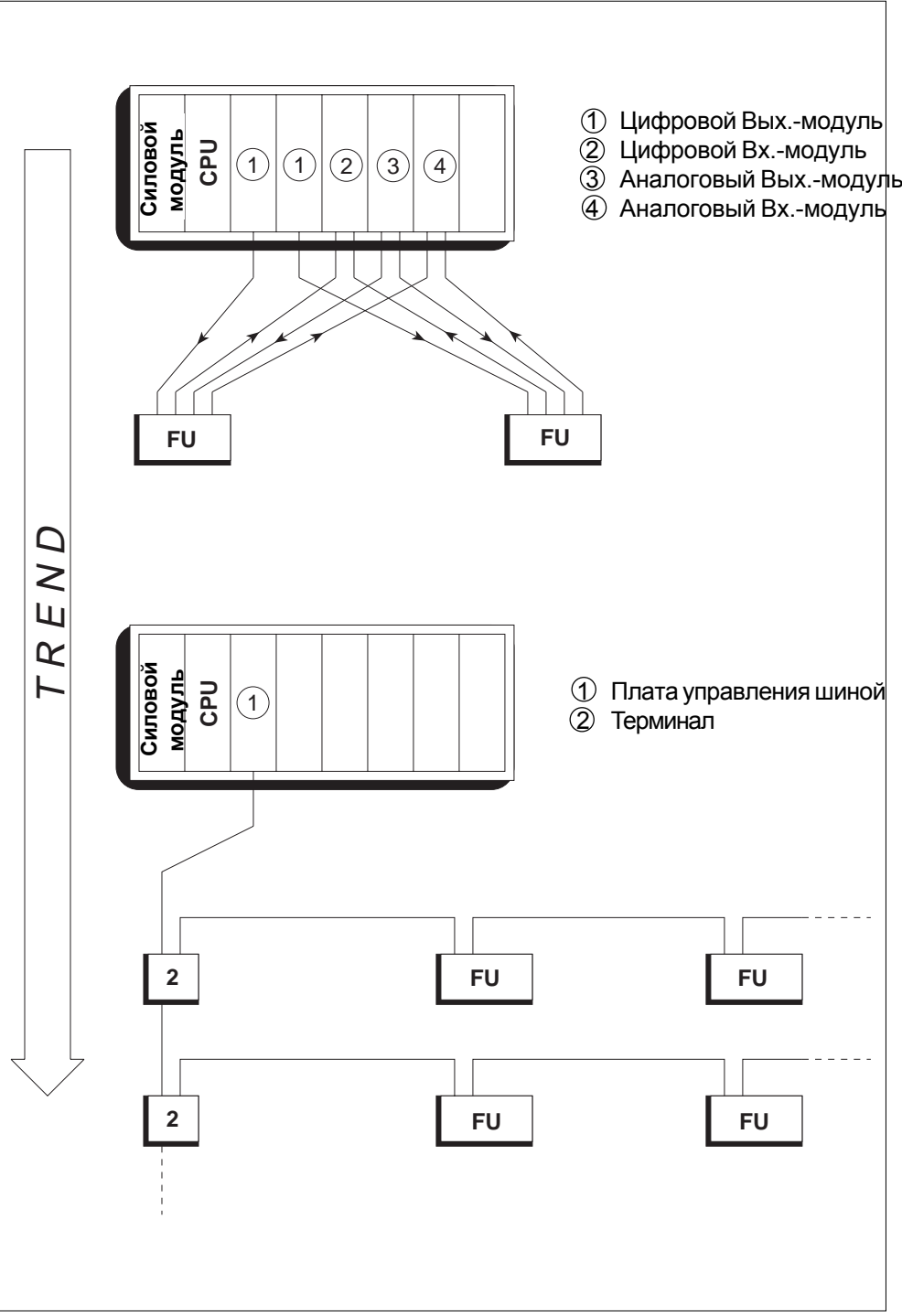


Рис. 74b
Последовательное соединение (Шина)

Современная автоматизация индустрии предъявляет все большие требования к центральному управлению всеми приводами, также как и датчиками и актуаторами (например, фотодатчики, температурные датчики, бесконтактные датчики и т. д.).

Эти требования могут быть реализованы стандартным параллельным соединением компонентов системы или интеллектуальной последовательной сетью.

Идет тенденция к использованию сетевых систем, KEB предлагает несколько решений в зависимости от платы управления:

- обычный RS 485-интерфейс с протоколом DIN 66019
- Profibus - интерфейс
- CAN-Bus - интерфейс
- InterBus-S - интерфейс
- LON - интерфейс

ANSI протокол X3.28 (DIN 66019) встроен во все стандартные карты управления. Он позволят организовать последовательную сеть до 30 инвертеров без дополнительного аппаратного оборудования. Разнообразные протоколы отличаются аппаратно (например, интерфейсами и соединениями), программно (например, передающим протоколом), возможностью подсоединения контроллеров разных производителей, а также различные технические данные (например, допустимое расстояние, скорость передачи, число участников).

Применение сетей для преобразователей частоты предоставляют пользователю разнообразные преимущества:

- Меньшее расходование кабеля по сравнению с традиционным соединением, большее число инвертеров объединены в сеть друг с другом. Также установка становится существенным образом проще.
- Инвертер становится “прозрачным” для контроллера, т. е. все параметры могут быть введены в инвертер и/или считаны по шине. Считываемые параметры (например, загрузка инвертера) могут быть прочитаны контроллером, и использованы, например, в качестве основы для изменения входных параметров. Загрузка полной параметризации происходит в течении короткого промежутка времени без каких-либо трудностей.
- Установленной значение устанавливается в цифровом виде и, таким образом, точно, и может быть воспроизведено без фоновых наводок и помех напряжений.
- Диагностировать ошибки проще, потому что ошибки могут быть сохранены. Также ранняя диагностика ошибок (например, значительное увеличение нагрузки в результате недостатка смазки в подшипниках и последующая поломка машины) может быть реализована при сетевом соединении инвертеров с соответствующим программным управлением.
- Добавление оборудования обычно не вызывает каких-либо проблем, поскольку дополнительные элементы легко подсоединяются к шине. И в основном, нет необходимости прокладывать длинные кабели от каждого инвертера к контроллеру.
- Благодаря цифровой передаче сигнала возможна передача на большие расстояния без особых проблем (в зависимости от способа передачи и интерфейса).
- Повышенная надежность против неправильной работы, поскольку все параметры могут быть перезагружены программно в любой точке (Функция загрузки). С помощью встроенных функций диагностики, например, можно сразу же определить прерывание линии.
- Не нужны аналоговые входные и выходные модули PLC, следовательно меньшие денежные и программные расходы.