

# Пуск и регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

# Основные способы пуска

При пуске двигателя по возможности должны удовлетворяться основные требования: процесс пуска должен быть простым и осуществляться без сложных пусковых устройств, пусковой момент — большим, а пусковые токи — по возможности малыми. Иногда к этим требованиям добавляют и другие, обусловленные особенностями конкретных приводов, в которых используют двигатели: необходимость плавного пуска, максимального пускового момента и др.

Практически используют следующие способы пуска: непосредственное подключение обмотки статора к сети (прямой пуск), понижение напряжения, подводимого к обмотке статора при пуске, и реостатный пуск.

# Пуск двигателей с кз ротором

$$d\Omega_2/dt = (M - M_{ст})/J,$$

Ускорение при разгоне

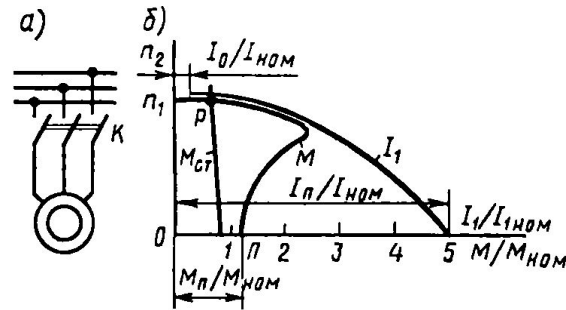


Рис. 5.1. Схема прямого пуска асинхронного двигателя (а) и графики изменения моментов и тока (б)

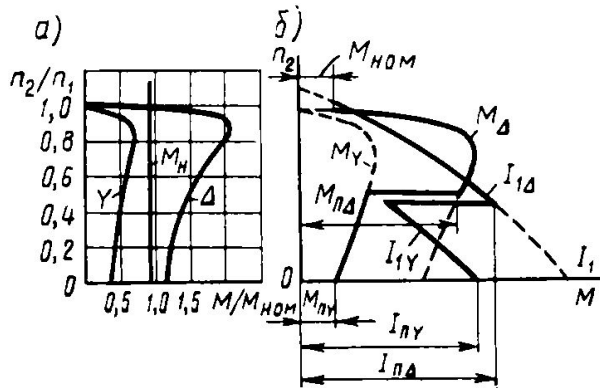


Рис. 5.3. Механические характеристики при включении обмотки статора по схемам Y и Δ (а) и графики изменения момента M и тока I<sub>1</sub> при пуске с переключением обмотки статора со Y на Δ (б)

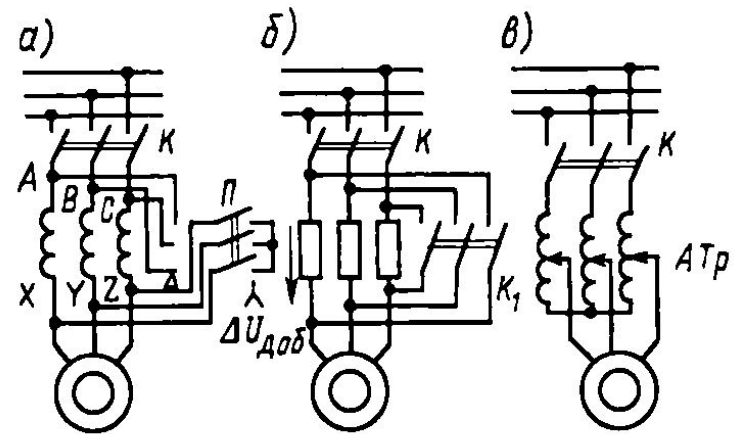


Рис. 5.2. Схемы включения асинхронного двигателя при пуске с пониженным напряжением

# Пуск двигателя с фазным ротором

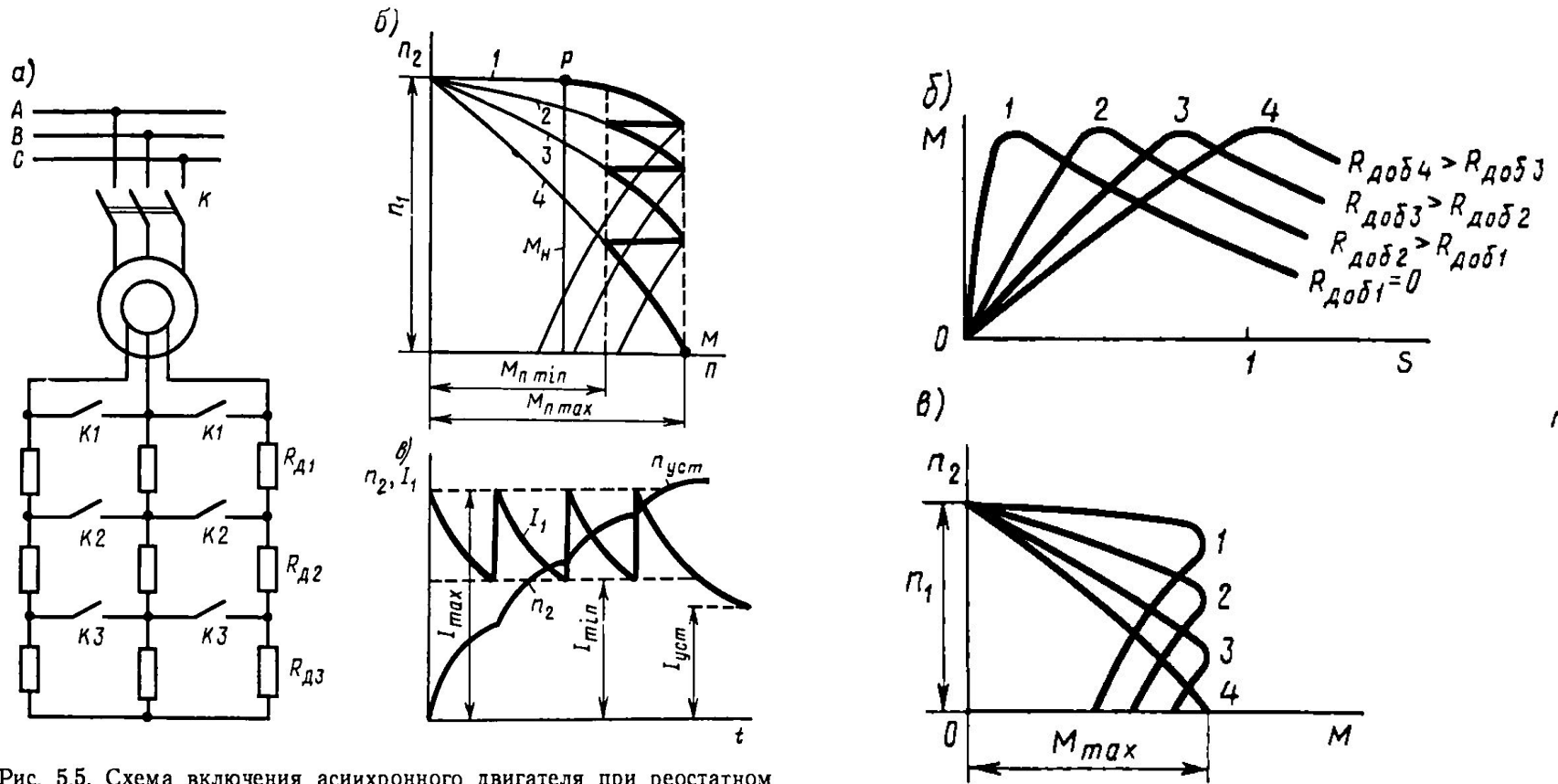


Рис. 5.5. Схема включения асинхронного двигателя при реостатном пуске (а), его пусковая диаграмма (б), графики изменения частоты вращения и тока (в)

# Устройство плавного пуска мощных АДФР

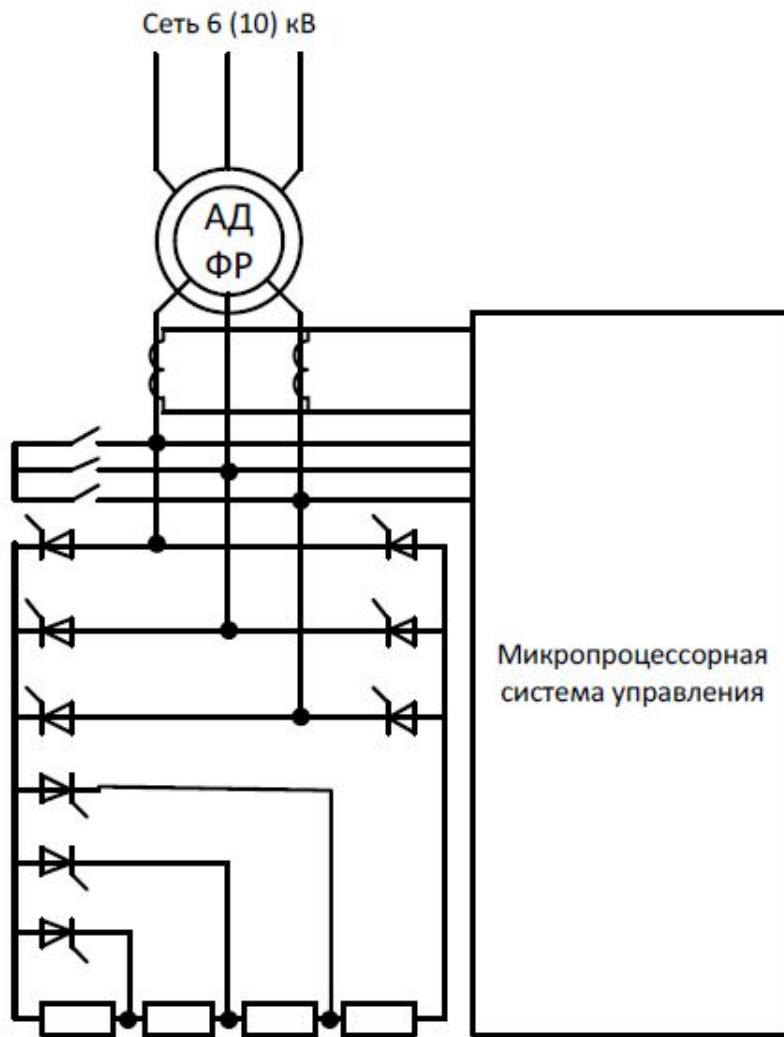


Рис. 1 Структурная схема ЕК-АV6-хх-RS-Vх.

# Машины двойного питания. Вентильный каскад

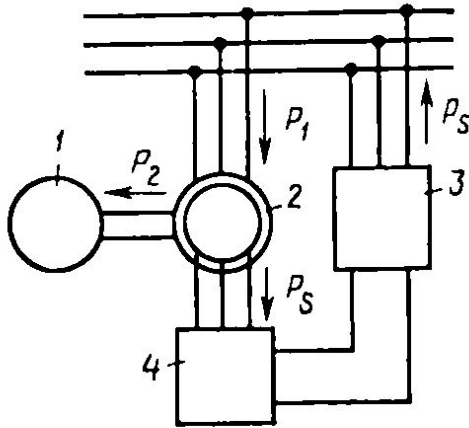


Рис. 8.12. Принципиальная схема вентильного каскада

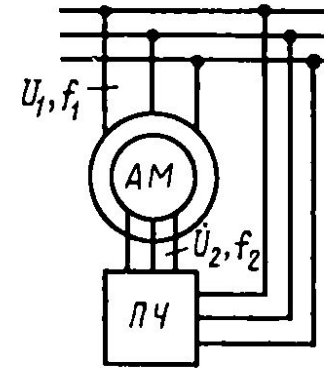
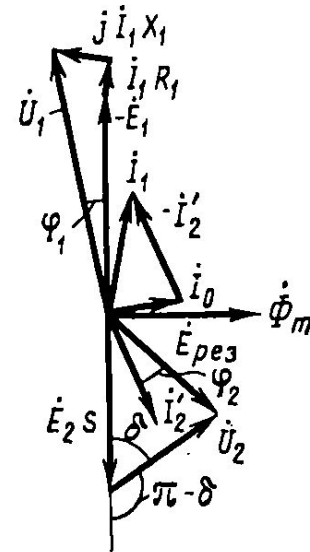
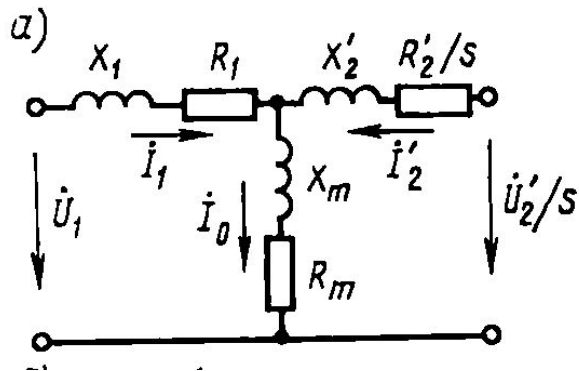


Рис. 8.9. Принципиальная схема асинхронного двигателя двойного питания



# Двигатели с повышенным пусковым МОМЕНТОМ

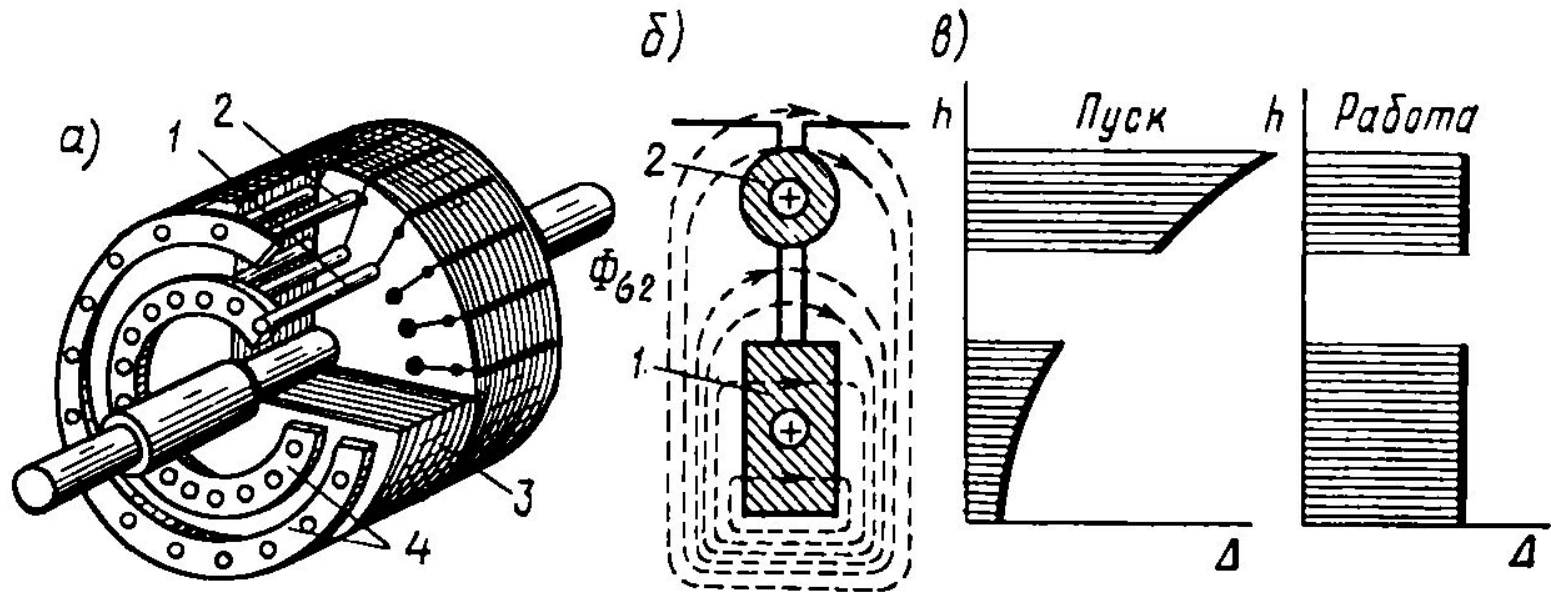


Рис. 5.7. Общий вид (а) и разрез паза (б) ротора двигателя с двойной беличьей клеткой и распределение плотности тока  $\Delta$  по высоте  $h$  в клетках при пуске и работе двигателя (в):

1 — рабочая клетка; 2 — пусковая клетка; 3 — сердечник ротора; 4 — короткозамыкающие кольца

$$I_{2п}/I_{2р} = Z_{2р}/Z_{2п} = \sqrt{R_{2р}^2 + X_{2р}^2} / \sqrt{R_{2п}^2 + X_{2п}^2}$$

# Механические характеристики

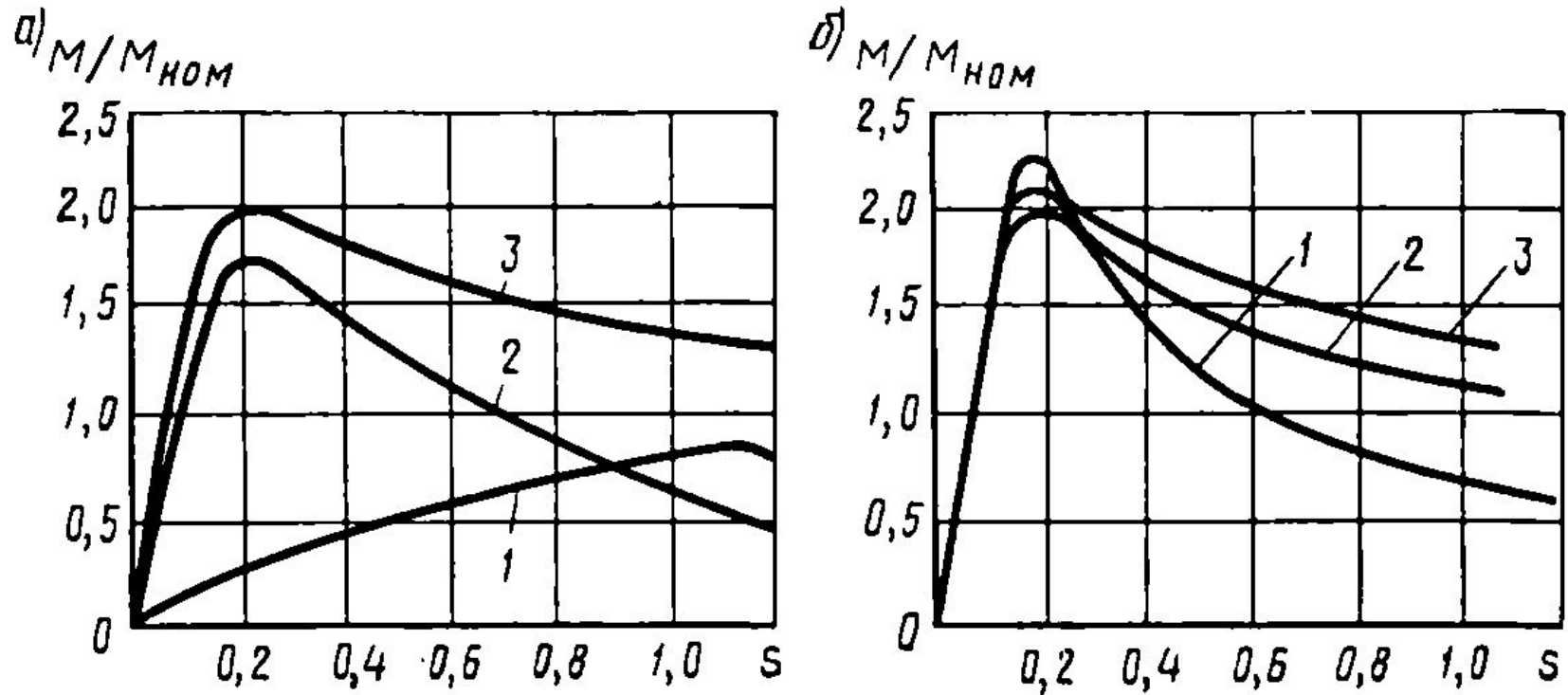


Рис. 5.8. Зависимости  $M=f(s)$  двигателя с двойной беличьей клеткой (а) и для машин с различным конструктивным выполнением ротора (б)



# Глубокопазные двигатели

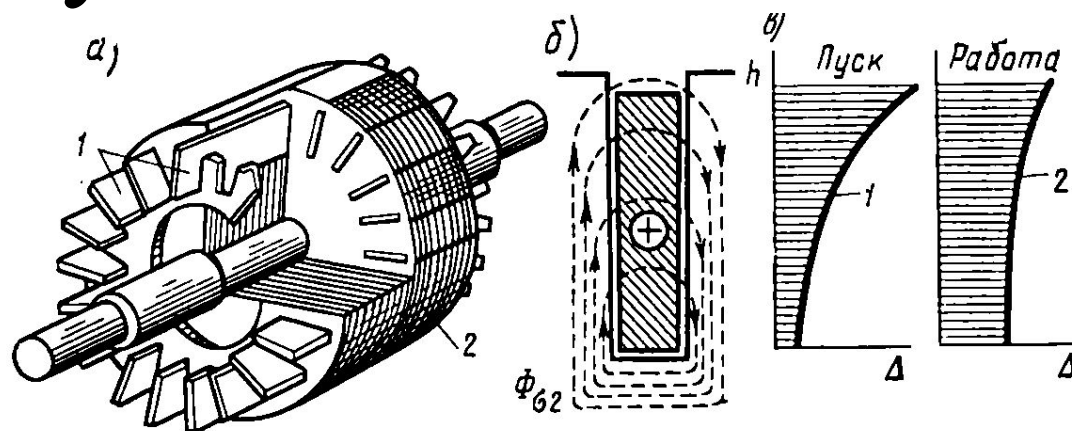


Рис. 5.9. Общий вид (а), разрез паза (б) ротора глубокопазного двигателя и разновидности пазов глубокопазных двигателей (в):  
1 — стержни беличьей клетки; 2 — сердечник ротора

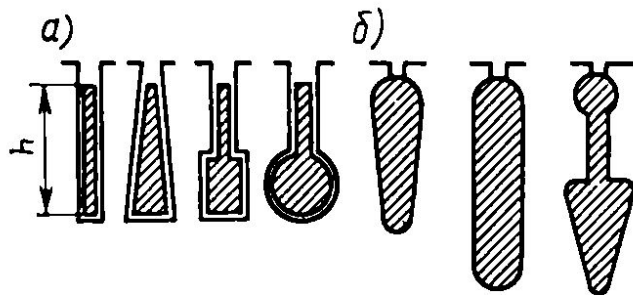
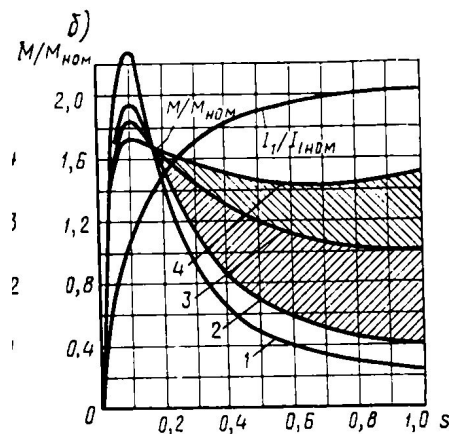
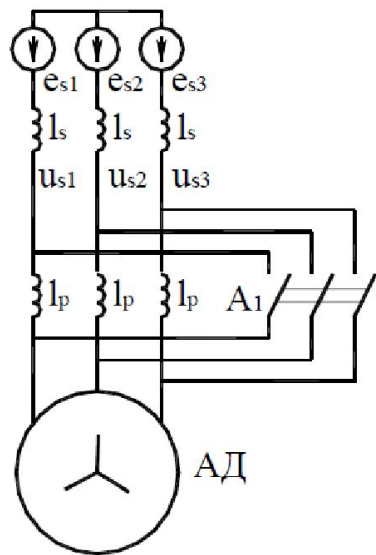


Рис. 5.12. Формы поперечного сечения стержней обмотки ротора асинхронных двигателей

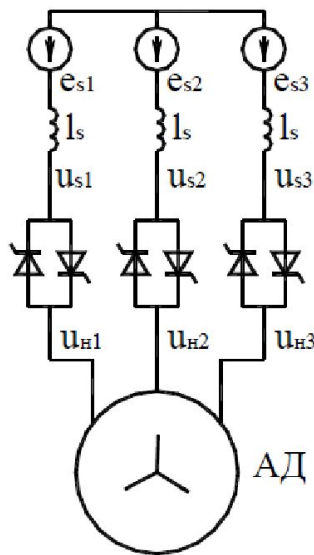


Кривая 1 относится к двигателям с круглыми пазами. Зону между кривыми 2 и 3 занимают двигатели с трапециевидными пазами и глубокопазные; между кривыми 3 и 4 — двигатели с двойной беличьей клеткой и пазами колбообразной формы.

# Устройства для ограничения пускового тока



Реакторный пуск



Плавный пуск

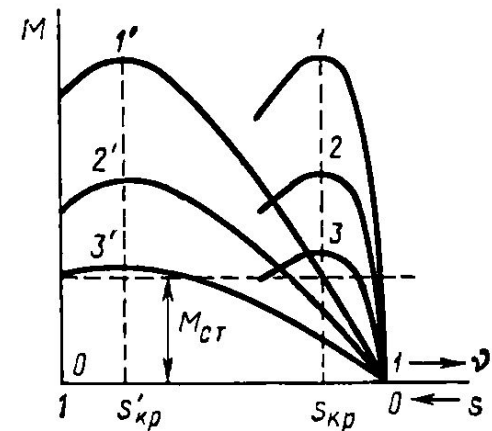


Рис. 6.30. Механические характеристики при регулировании частоты вращения путем изменения питающего напряжения

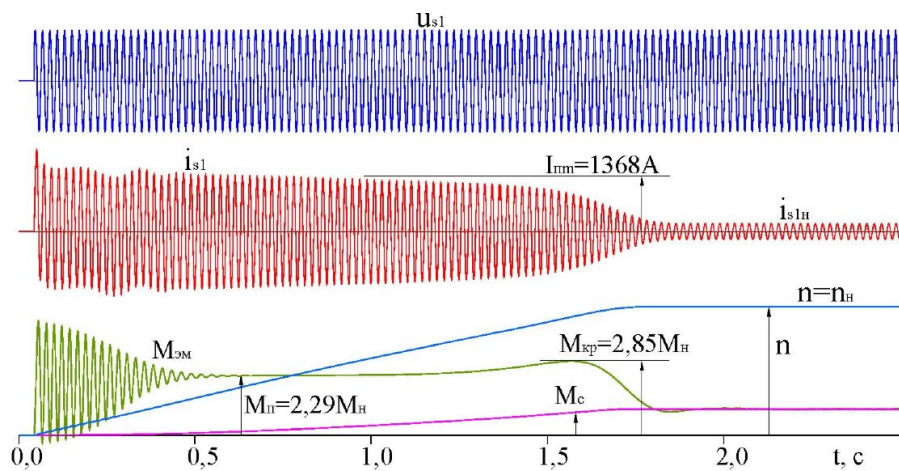


Рис. 7.1.3 Пуск двигателя мощностью 1250 кВт без ограничения тока

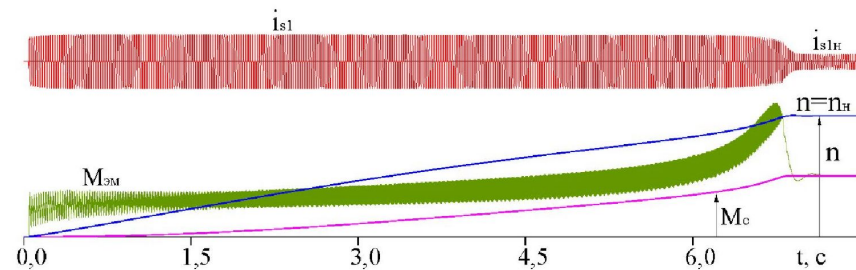


Рис. 7.1.4 Пуск асинхронного двигателя мощностью 1250 кВт с ограничением пускового тока 5-кратным значением

# Регулирование частоты вращения

$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 (X_1 + X_2')^2} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{8\pi^2 f_1^2 (L_1 + L_2')^2} = \frac{c U_1^2}{f_1^2},$$

$$M_{\max 1} / M_{\max 2} = (U_{11} / U_{12})^2 (f_{12} / f_{11})^2,$$

$$U_{11} / U_{12} = (f_{11} / f_{12}) \sqrt{M_{н1} / M_{н2}}.$$

ЗАКОН М.П. КОСТЕНКО

Регулирование при постоянном моменте

$$U_{11} / f_{11} = U_{12} / f_{12} = \text{const}, \quad (6.6)$$

*т. е. питающее напряжение следует изменять прямо пропорционально его частоте. При этом мощность двигателя увеличивается прямо пропорционально возрастанию частоты вращения.*

Регулирование при постоянной мощности

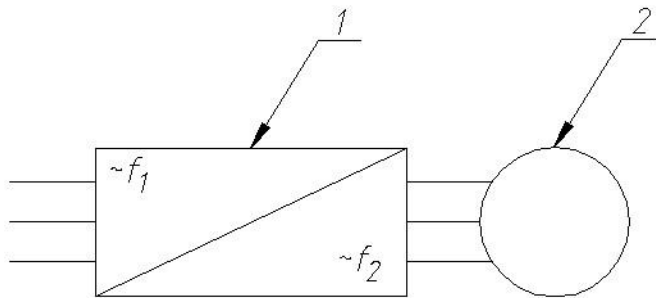
$$M_{н1} f_{11} = M_{н2} f_{12}$$

$$U_{11} / U_{12} = \sqrt{f_{11} / f_{12}}.$$

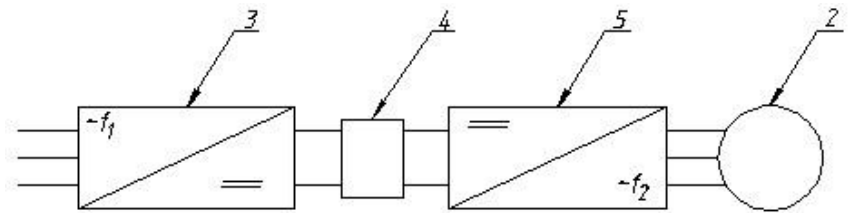


М.П. Костенко

# Структурные схемы ПЧ



а)



б)

Структурные схемы преобразователей частоты: а) циклоконвертора, б) преобразователя со звеном постоянного тока. 1-циклоконвертор; 2- асинхронный двигатель; 3- управляемый выпрямитель; 4- звено постоянного тока; 5- автономный инвертор.

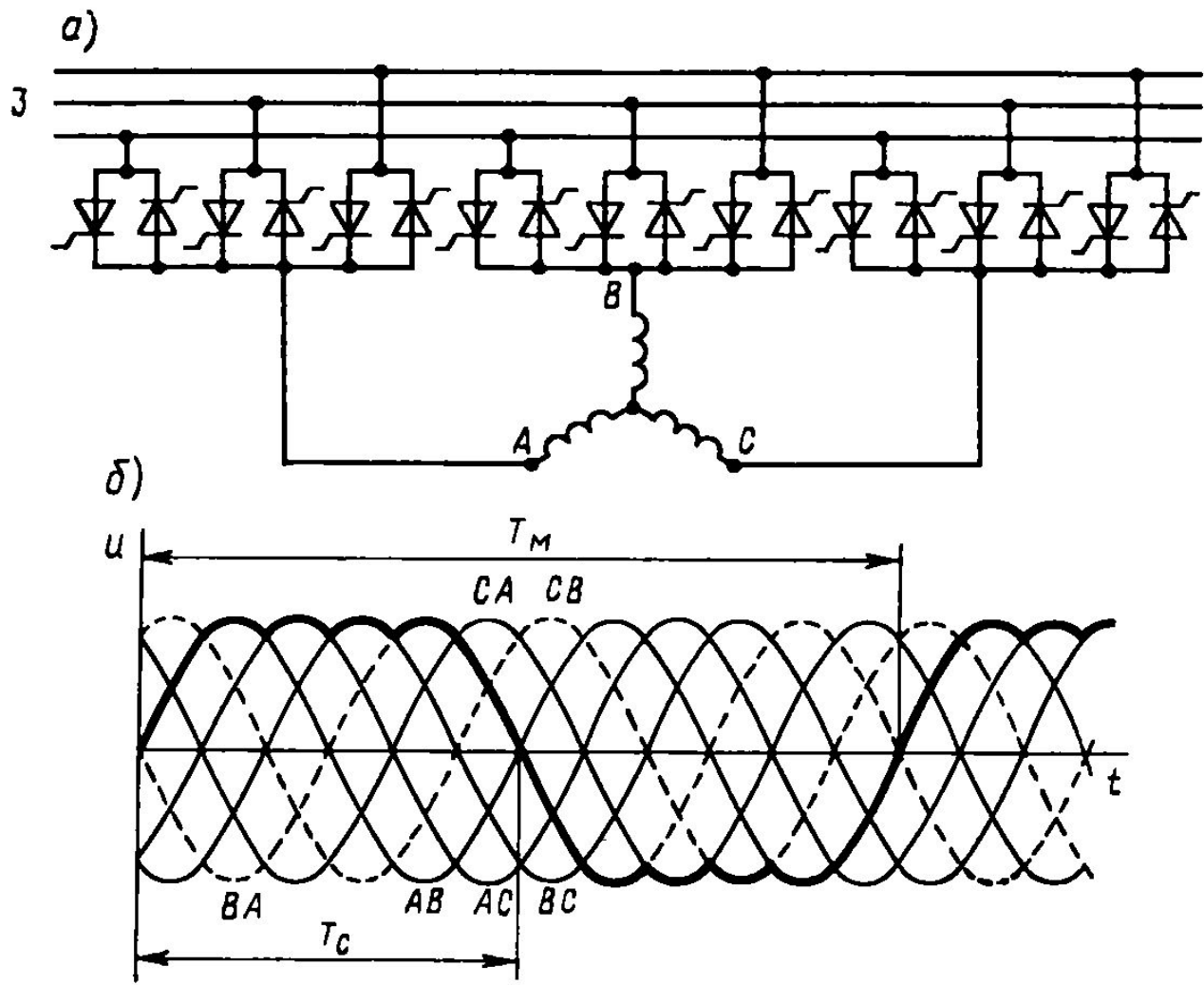
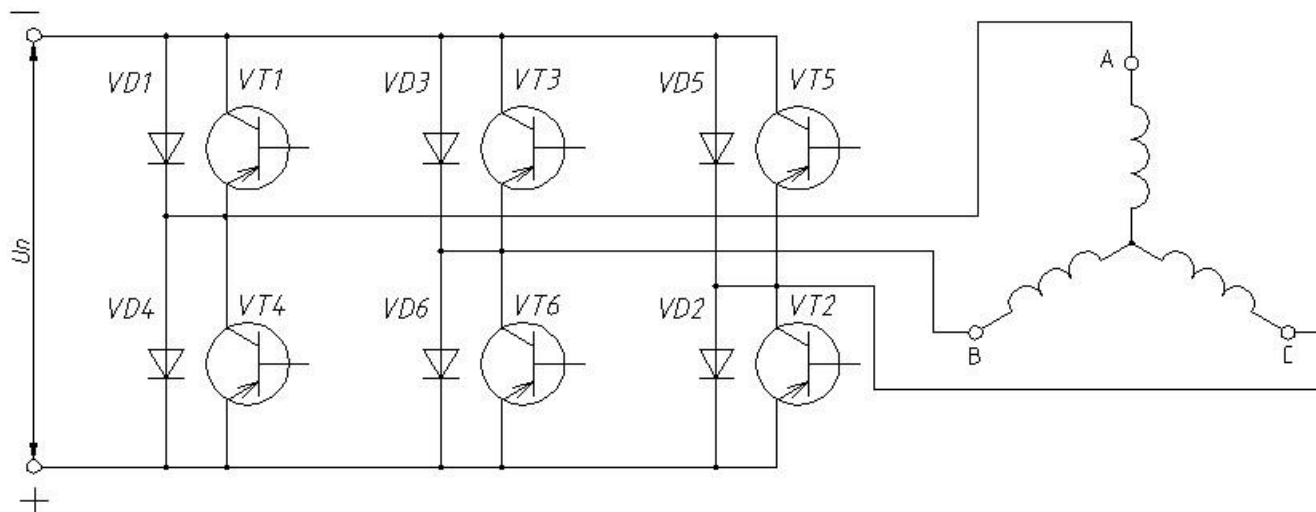
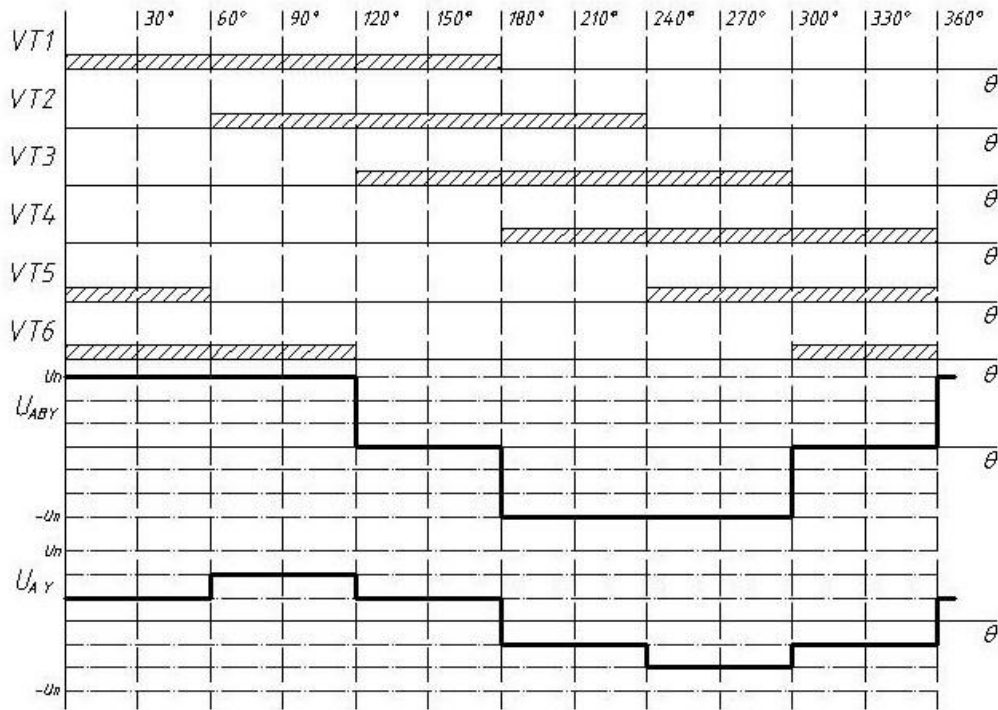


Рис. 6.9. Схема питания асинхронного двигателя от инвертора с непосредственной связью с сетью переменного тока (а) и графики напряжения, подаваемого на его фазы (б)

# Принципиальная схема инвертора

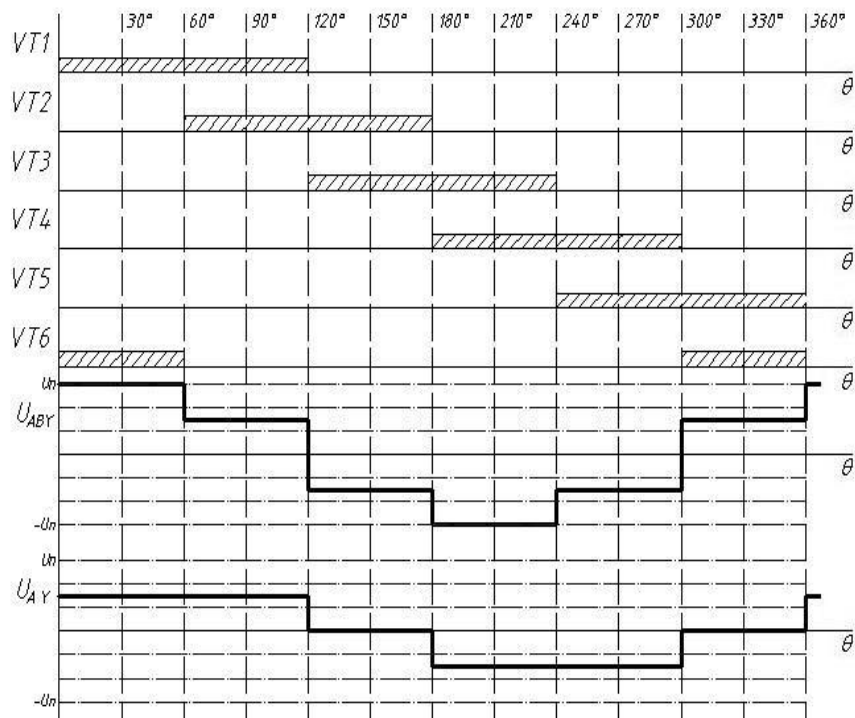


Принципиальная схема автономного инвертора, выполненного на транзисторах.  
 $U_n$  – напряжение звена постоянного тока; VT1-VT6- транзисторы; VD1-VD6- диоды обратного тока.

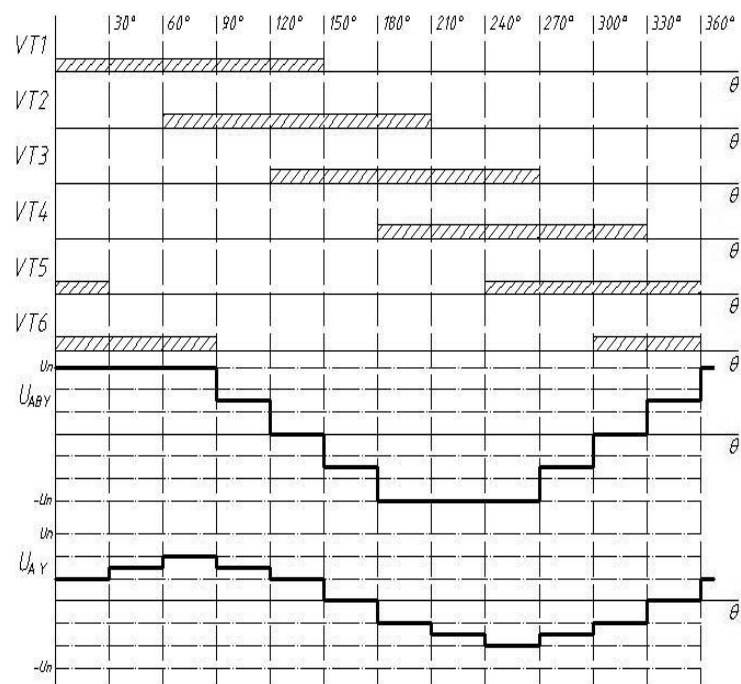


Принцип формирования напряжения при симметричном управлении.

$U_n$  – напряжение звена постоянного тока,  $U_{ABY}$ ,  $U_{AY}$  – соответственно линейное и фазное напряжения на активной нагрузке, соединенной звездой.

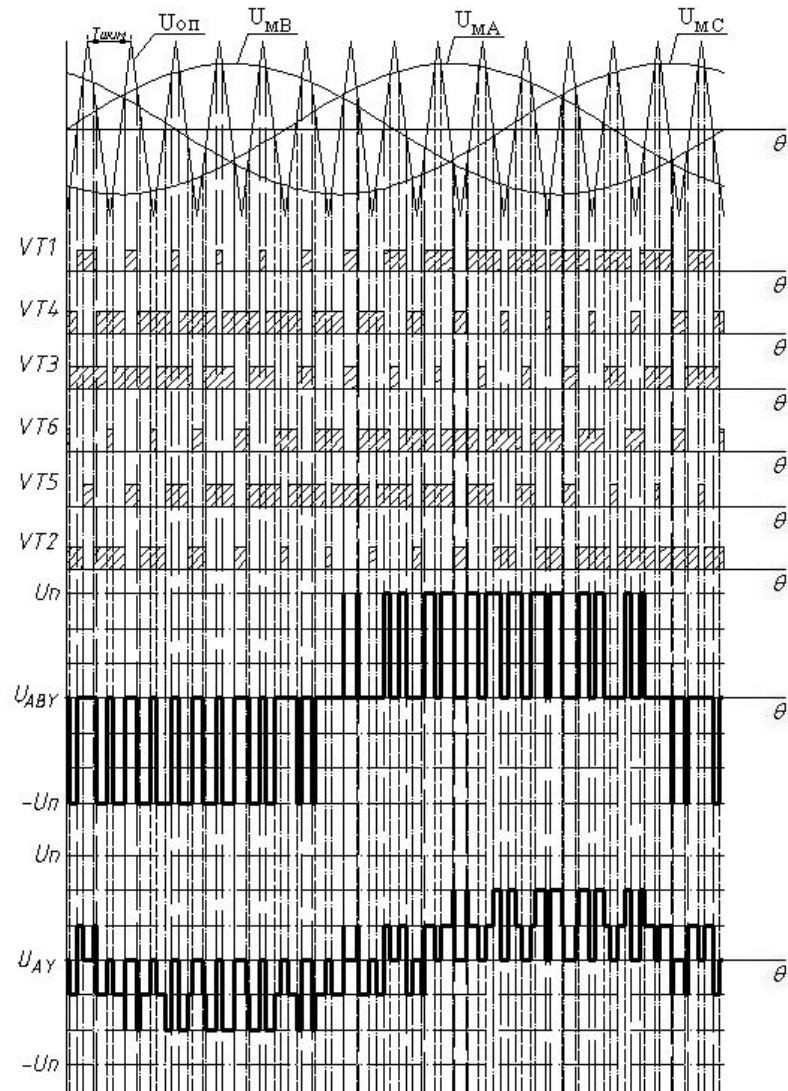


Алгоритм формирования напряжения при несимметричном управлении. Угол открытия 120град.  $U_n$ —напряжение звена постоянного тока,  $U_{ABY}$ ,  $U_{AY}$ —соответственно линейное и фазное напряжения на активной нагрузке, соединенной звездой.

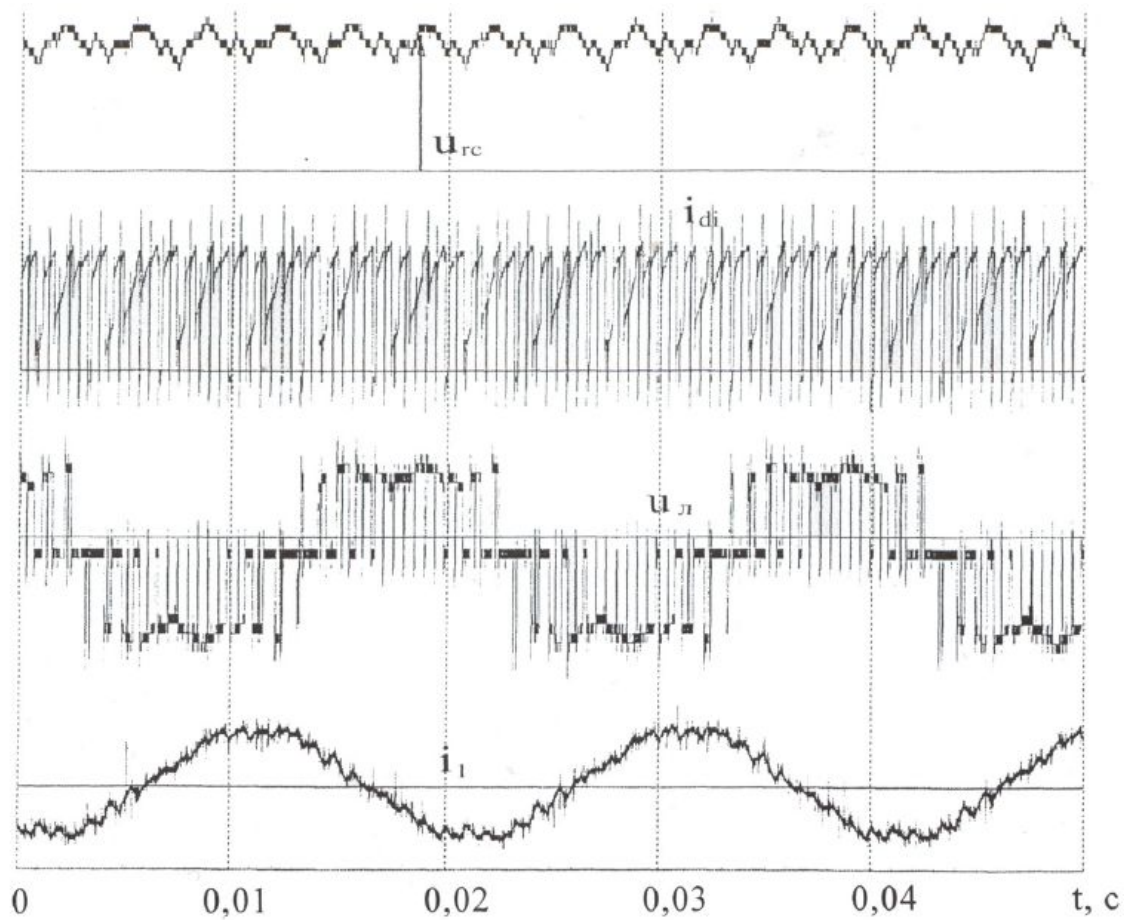


Алгоритм формирования напряжения при несимметричном управлении. Угол открытия 150град  $U_n$ —напряжение звена постоянного тока,  $U_{ABY}$ ,  $U_{AY}$ —соответственно линейное и фазное напряжения на активной нагрузке, соединенной звездой.



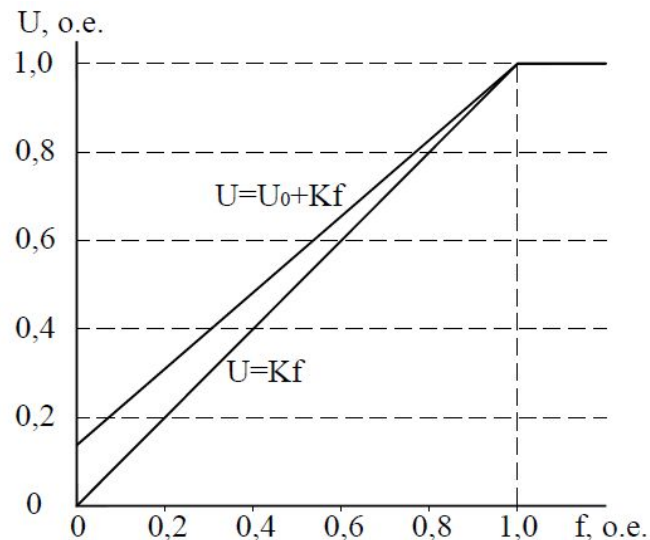
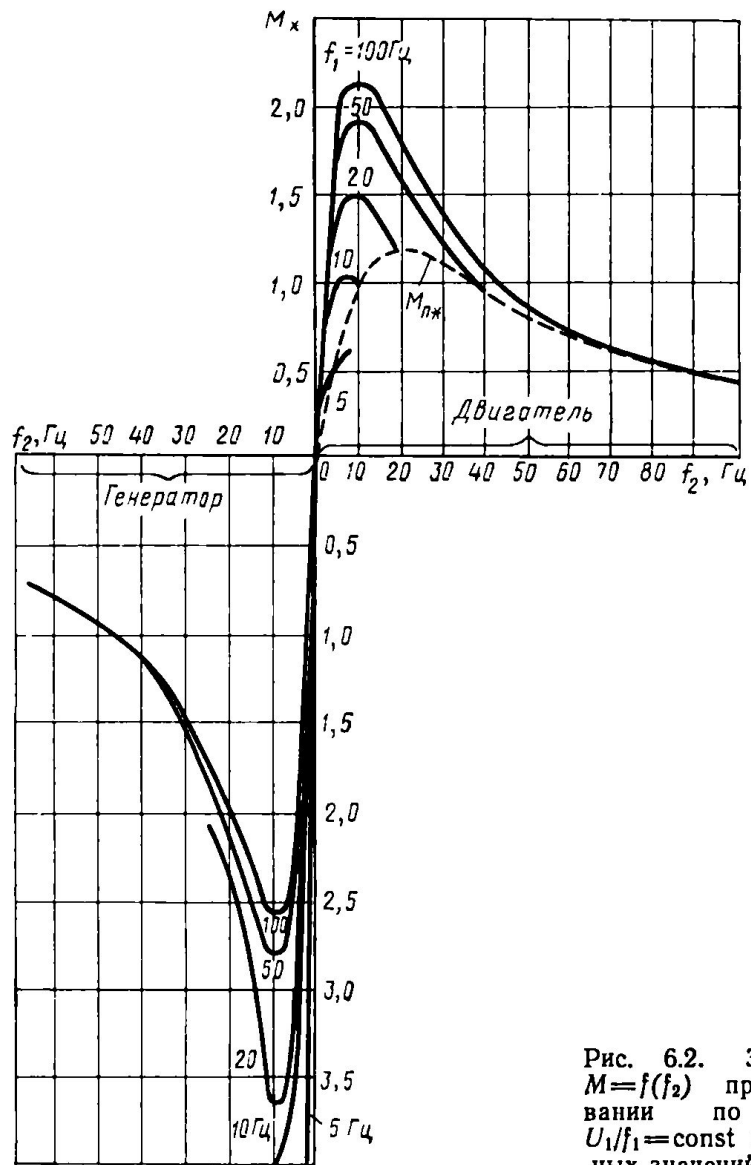


Алгоритм формирования напряжения при ШИМ по синусоидальному закону.  $U_n$  – напряжение звена постоянного тока,  $U_{АВУ}$ ,  $U_{АУ}$  – соответственно линейное и фазное напряжения на активной нагрузке, соединенной звездой.  $U_{мА}$ ,  $U_{мВ}$ ,  $U_{мС}$  – модулирующие напряжения.  $U_{оп}$  – опорное напряжение ШИМ;  $T_{шим}$  – период опорного напряжения ШИМ.



. 7.5 Осциллограмма токов и напряжений ТПЧ-250-380 в номинальном режиме работы

# Скалярное управление $U/f = \text{const}$



$$\left. \begin{aligned} U &= Kf, \\ U &= Kf^2, \\ U &= U_0 + Kf, \end{aligned} \right\}$$

$U_0$  – напряжение IR-компенсации.

IR-компенсация позволяет увеличить момент на низких скоростях

Рис. 6.2. Зависимости  $M=f(f_2)$  при регулировании по условию  $U_1/f_1 = \text{const}$  при различных значениях частоты  $f_1$

# Векторное управление с ориентацией по потокосцеплению ротора

Выражение для электромагнитного момента:

$$M = \frac{mpL_m}{2L_r} \Psi_{rm} I_{s2}$$

$$I_{s1} = \frac{1}{L_m} \Psi_{rm} \quad I_{s2} = \frac{2}{mpK_r} \cdot \frac{M}{\Psi_{rm}}$$

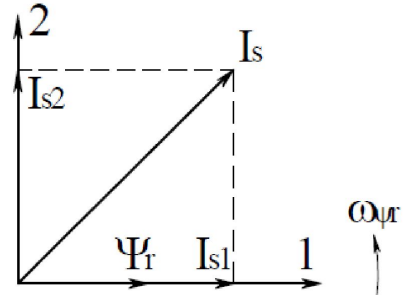


Рис.8.3.1 Векторная диаграмма

$$\left. \begin{aligned} U_{s1} &= R_s I_{s1} - \omega_{\psi r} L'_s I_{s2}, \\ U_{s2} &= R_s I_{s2} + \omega_{\psi r} \Psi_{rm} \left( \frac{L'_s}{L_m} + K_r \right). \end{aligned} \right\}$$

$$\omega_{\psi r} = p\omega + \frac{L_m R_r}{L_r} \cdot \frac{I_{s2}}{\Psi_{rm}}$$

$$\varphi = \int_0^{\infty} \omega_{\psi r} dt$$

$$\left. \begin{aligned} W(s) &= \frac{L_m}{L_r s + 1}, \\ \Psi_{rm} &= W(s) I_{s1}. \end{aligned} \right\}$$

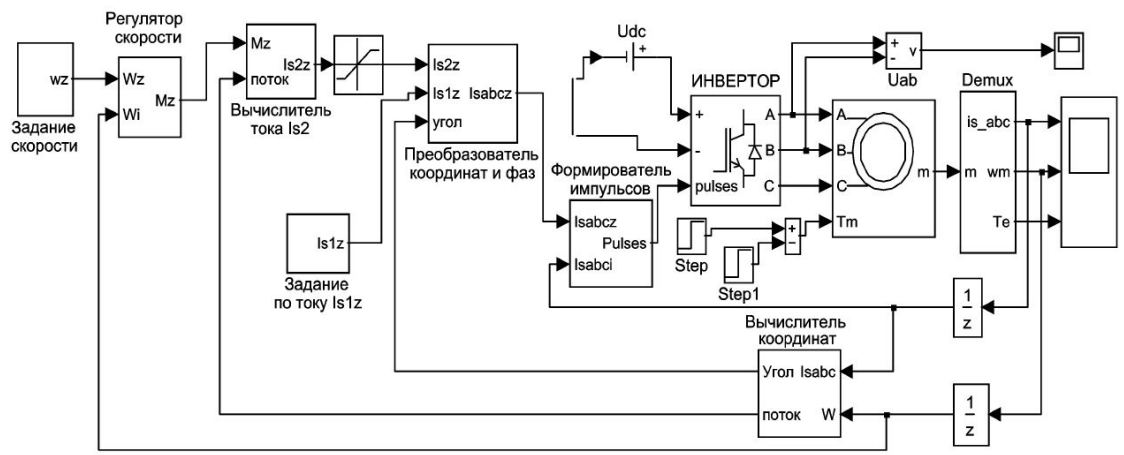


Рис.8.3.3 Структурная схема векторной системы управления

# Многоскоростные двигатели

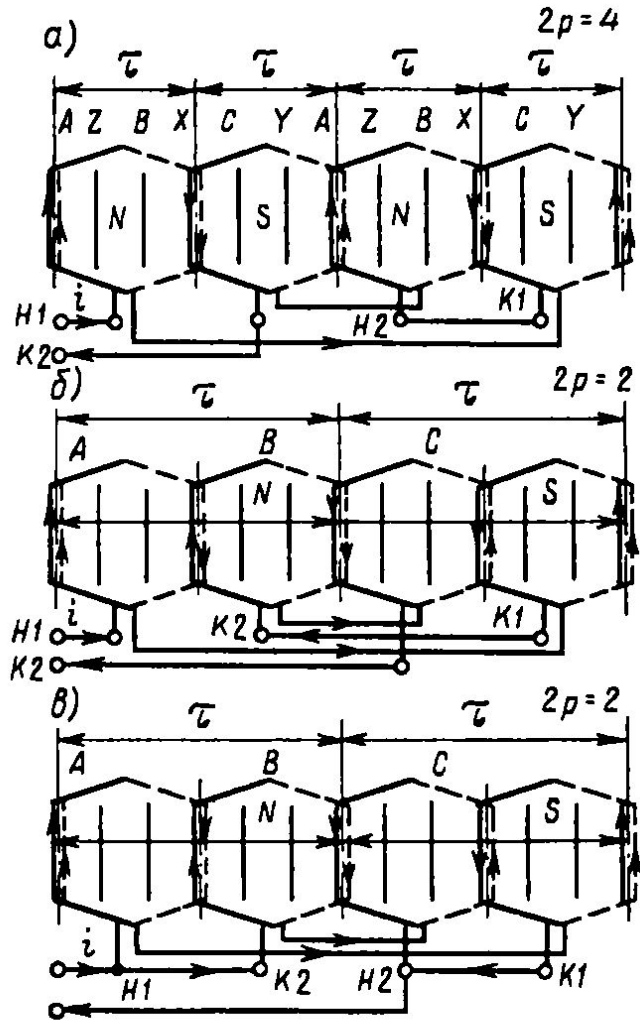


Рис. 6.17. Схема одной фазы полюсно-переключаемой обмотки:  
 а — при  $2p=4$ ; б, в — при  $2p=2$

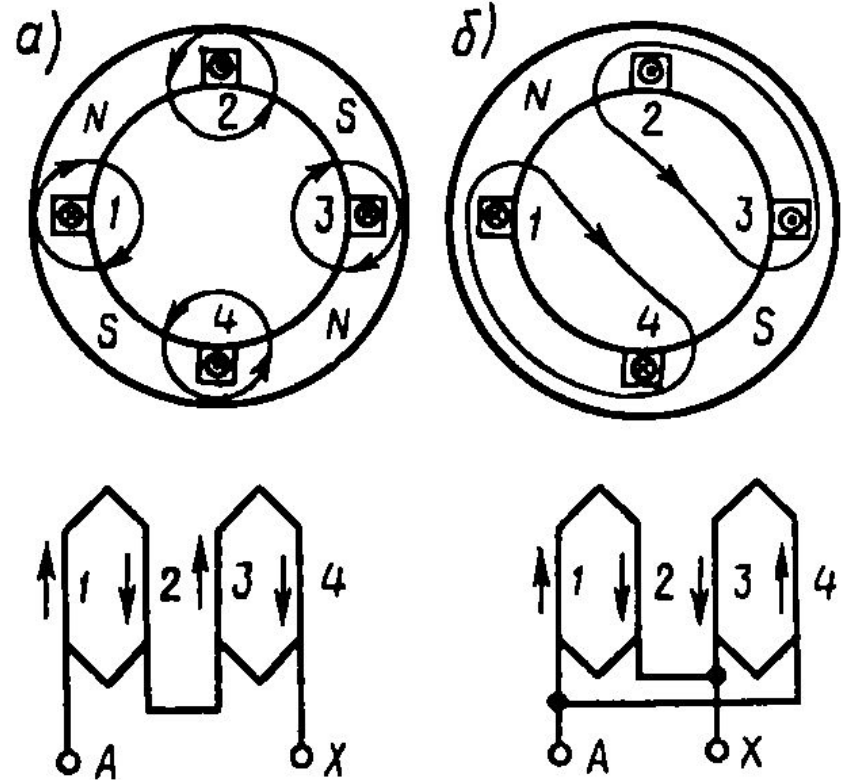


Рис. 6.16. Схема переключения одной фазы обмотки статора для изменения числа полюсов:

а — при  $2p=4$ ; б — при  $2p=2$

# Схема Даландера



Rob. Dahlander.  
Fotografi.

Роберт Даландер (1870-1935)

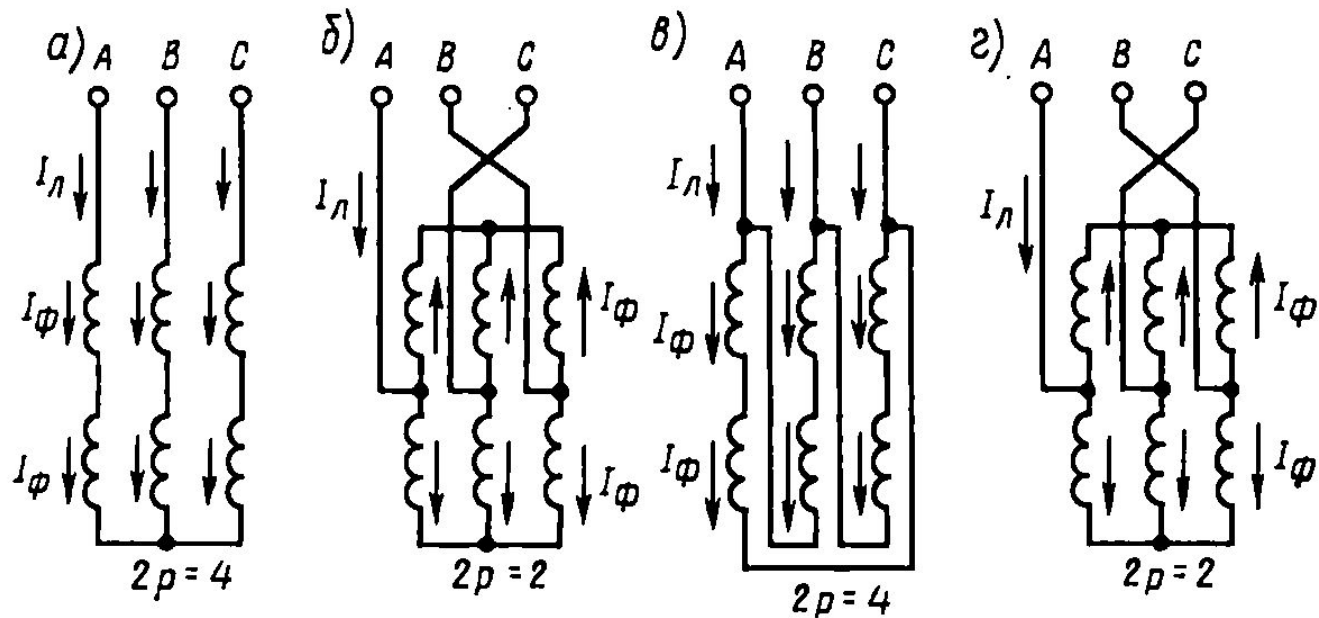


Рис. 6.19. Принципиальные схемы соединения обмотки статора при переключении числа полюсов в отношении 2 : 1

# Схема «Тройная звезда»

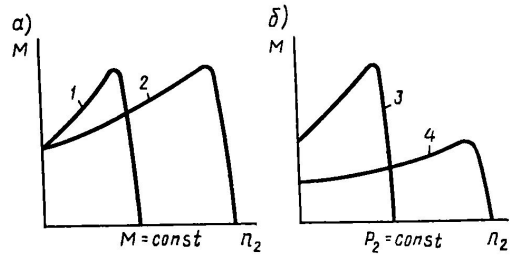


Рис. 6.20. Механические характеристики двухскоростного двигателя с переключением числа полюсов в отношении 2:1 при постоянном моменте (а) и при постоянной мощности (б)

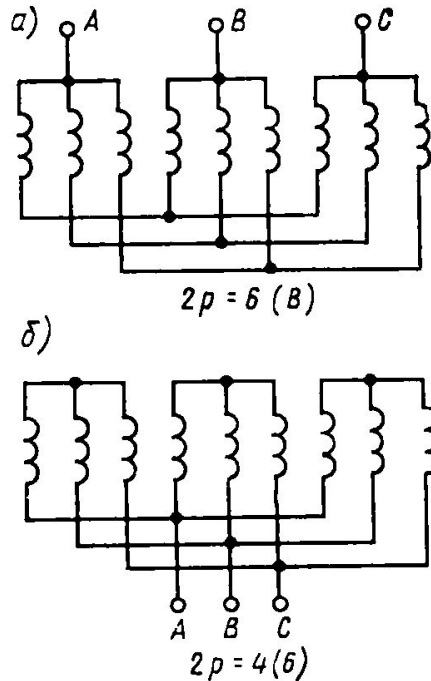


Рис. 6.21. Схема соединения катушек фаз при выполнении полюсно-переключаемой обмотки по схеме «тройная звезда с выводами из нулевых точек» (а) и кривые МДС (б)

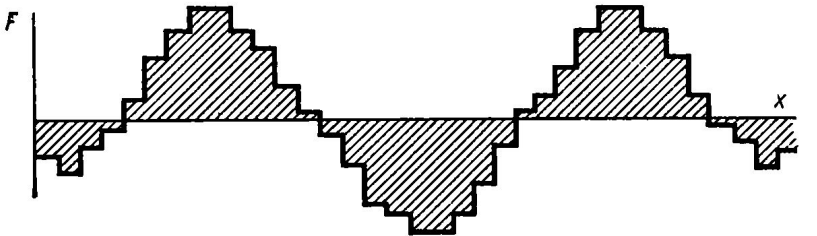
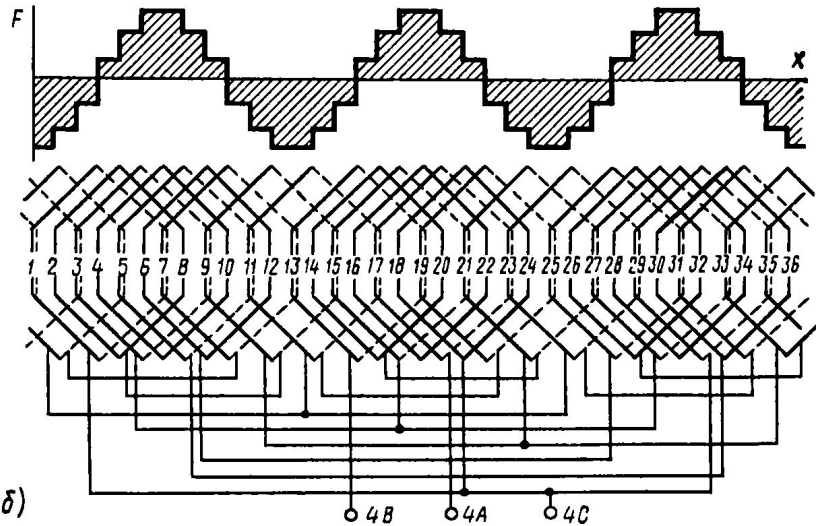
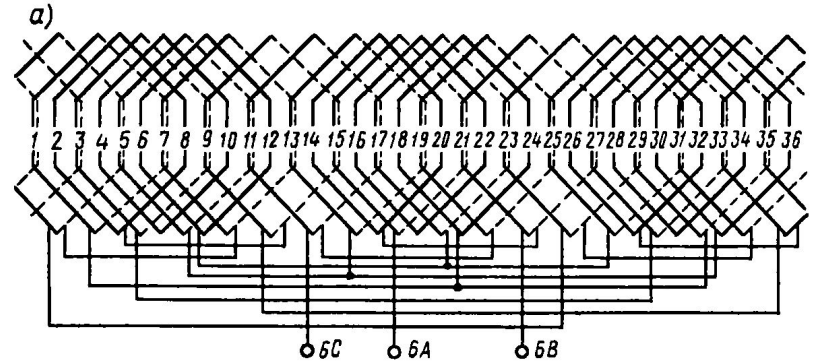


Рис. 6.22. Развернутые схемы и кривые МДС одно-двухслойной полюсно-переключаемой обмотки, выполненной по схеме «тройная звезда с выводами из нулевых точек» с параметрами  $m=3$ ,  $z=36$ ,  $a=3$ :  
а — при числе полюсов  $2p=6$ ; б — при  $2p=4$

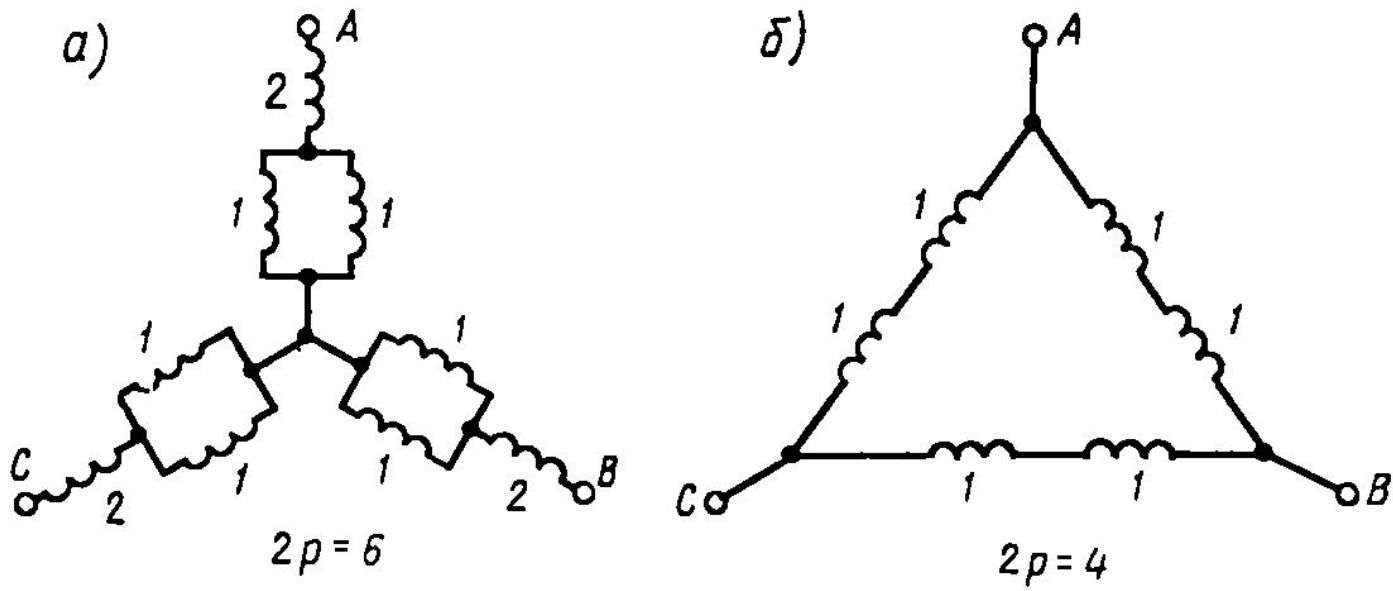


Рис. 6.24. Схемы соединения катушек фаз при выполнении полюсно-переключаемой обмотки по схеме Харитонова



Ток в некоторых катушках  
каждой фазы меняет направление  
на противоположное.  
При этом изменяется распределение  
МДС и число пар полюсов.  
Это  
ПОЛЮСНО-АМПЛИТУДНАЯ  
МОДУЛЯЦИЯ

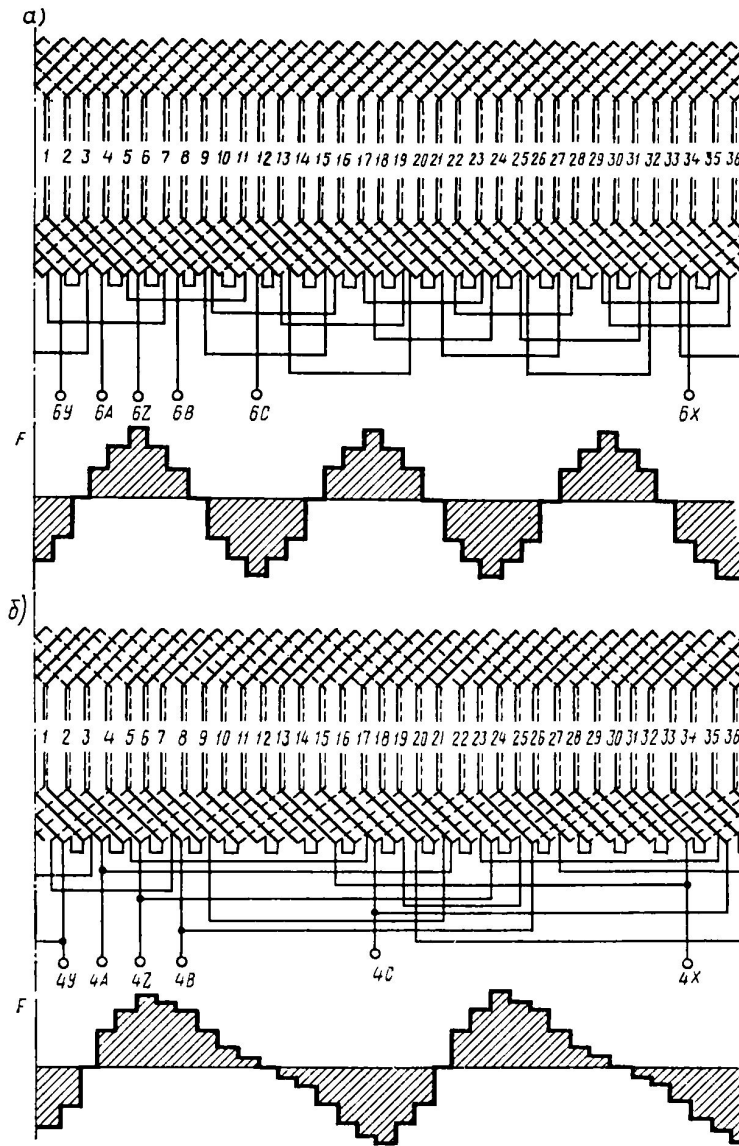


Рис. 6.26. Развернутые схемы и кривые МДС полюсно-переключаемой обмотки, выполненной по принципу полюсно-амплитудной модуляции с параметрами  $m=3$ ;  $z=36$ :  
а — при  $2p=6$ , б — при  $2p=4$