

# Асинхронизированный вентильный двигатель как многоканальный объект управления

ТУТАЕВ Г.М.

*Показано, что применение двух преобразователей для питания цепей статора и ротора асинхронизированного вентильного двигателя позволяет осуществлять управление двигателем по четырем каналам. Это дает возможность расширить диапазон регулирования скорости, увеличить перегрузочную способность при тяжелом пуске и достичь высоких энергетических показателей. При регулировании частоты возбуждения вплоть до перехода на встречное вращение магнитного поля ротора можно уменьшить установленные мощности преобразователей частоты до половины мощности базовой машины. Реализация концепции многоканального управления требует синтеза сложной системы регулирования, учитывающей нелинейность характеристики намагничивания и потери в стали статора.*

**Ключевые слова:** асинхронизированный вентильный двигатель, управление, скорость, перегрузочная способность, энергетические показатели

Регулируемый электропривод переменного тока является наиболее надежным и экономически целесообразным способом преобразования электрической энергии в механическую. Развитие микроэлектроники, силовой преобразовательной техники, микроконтроллеров и применение теории векторного управления придали мощный импульс более широкому внедрению регулируемого электропривода во многие отрасли промышленности. Созданы предпосылки для разработок как частично, так и полностью управляемых электромеханических систем, функционирующих в соответствии с заданными законами.

В [1] полностью управляемая машина переменного тока определена как машина, у которой на напряжения управления, являющиеся составляющими напряжений, приложенных к статору и ротору, не наложены какие-либо ограничения. Вообще говоря, к машине переменного тока можно предъявить четыре основных требования:

высокий КПД; возможность регулирования реактивной мощности; возможность регулирования скорости; возможность влияния на характер переходного процесса.

Ни асинхронная, ни синхронная машины не отвечают полному комплексу этих требований [1].

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, питаемый от сети, вообще не позволяет воздействовать на параметры электропривода. При его питании от преобразователя частоты имеется

*It is shown that the use of two converters for supplying power to the stator and rotor circuits of an asynchronous converter-fed motor allows four-channel control of the motor to be implemented. As a result, it becomes possible to extend the speed adjustment range, to obtain a higher overloading capacity in case of severe startup conditions, and to achieve high power performance characteristics. With excitation control performed up to a shift for rotating the rotor magnetic field in the opposite direction, the installed capacities of the frequency converters can be decreased to half the base machine capacity. Implementation of the multichannel control concept implies the need to synthesize an intricate control system that must take into account the magnetization characteristic and losses in the stator core.*

**Key words:** asynchronous converter-fed motor, control, speed, overloading capacity, power performance indicators

возможность управления угловой скоростью ротора и активными потерями. Синхронная машина не позволяет регулировать скорость, но обеспечивает изменение в широких пределах  $\cos \varphi$ . Классический двигатель двойного питания (ДДП) или асинхронизированная синхронная машина также не удовлетворяют указанным требованиям, поскольку имеют лишь две управляющие переменные. Это дает возможность регулировать скорость и реактивную мощность.

Таким образом, все упомянутые выше машины можно назвать частично управляемыми.

Вентильный двигатель (ВД) постоянного тока имеет более широкие возможности для регулирования – амплитуда и фаза напряжения якоря обеспечивают изменение скорости и потребление реактивной мощности, а изменением магнитного потока можно достичь минимума потерь. Но ВД, несмотря на хорошие регулировочные свойства и высокие энергетические показатели, имеет серьезный недостаток – отсутствие коммутации тока в выходном инверторном звене ПЧ якоря при неподвижном роторе, что затрудняет его пуск из тяжелого режима упора.

В максимальной степени основные требования к машине переменного тока могут быть удовлетворены применением асинхронизированного вентильного двигателя (АВД), который можно отнести к управляемым машинам. Он представляет собой вариант ДДП со статическими преобразователями

частоты на статоре и роторе (рис. 1) [2, 3]. Его можно рассматривать как результат синтеза вентильного двигателя постоянного тока и асинхронизированной синхронной машины, призванного устранить главный недостаток ВД – отсутствие коммутации тока в инверторе при тяжелом пуске.

Обмотка статора – якорь АВД – питается от ПЧ<sub>с</sub>, инвертор тока которого управляется по фазе напряжения якоря, чем имитируется положение щеток на коллекторе двигателя постоянного тока (ДПТ). Обмотка ротора – обмотка возбуждения – подключена к собственному преобразователю ПЧ<sub>р</sub> с низкой фиксированной частотой в режиме пуска либо в алгоритмах энергоэффективного управления регулируется вплоть до перехода на встречное вращение магнитного поля и ротора. Это позволяет снизить потери в двигателе и преобразователях частоты.

Кроме имитации положения щеток на коллекторе, аналогия свойств АВД и ДПТ обусловлена возможностью регулирования скорости как изменением напряжения якоря, так и тока возбуждения, а при изменении нагрузки на валу АВД происходит изменение и угла нагрузки, и частоты вращения ротора [2].

Наличие двух преобразователей, усложняя в целом машинно-вентильный комплекс, в то же время открывает принципиально новые возможности построения регулируемых электроприводов, поскольку при питании обмоток синусоидальным напряжением имеется шесть доступных для управления величин – две амплитуды, две частоты и две фазы питающих напряжений, что дает возможность реализовать различные алгоритмы управления в зависимости от решаемых технологических задач. Две переменные – частота напряжения статора и сдвиг фаз между током и напряжением ротора – будут зависимыми, так как в АВД реализуется принцип частотно-зависимого управления, и частота питания обмоток статора определяется текущей угловой скоростью ротора и частотой возбуждения:

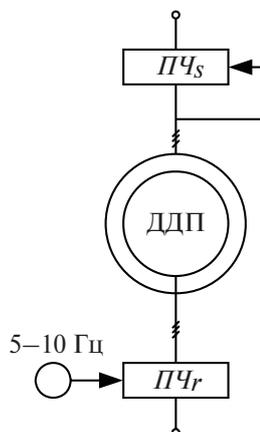


Рис. 1. Структурная схема АВД

$$w_1 = w_r + w_2.$$

В свою очередь, сдвиг фаз между током и напряжением ротора также зависит от частоты возбуждения и нагрузки на валу [4]. Оставшиеся переменные образуют четыре канала управления – угловой скоростью, магнитным потоком, активными потерями и реактивной мощностью.

Рассмотрим организацию многоканального управления асинхронизированным вентильным двигателем (рис. 2).

Скалярная форма записи уравнений математической модели АВД для установившегося режима в ориентированной по вектору главного магнитного потока ( $Y_{dy} = 0$ ) системе координат  $xu$  имеет вид:

$$\begin{aligned} U_{sx} &= R_s i_{sx} - w_1 L_{ls} i_{sy}; & \ddot{u} \\ U_{sy} &= R_s i_{sy} - w_1 L_{ls} i_{sx} + w_1 Y_{dx}; & \ddot{u} \\ U_{rx} &= \frac{R_r}{L_m} Y_{dx} - R_r i_{sx} + w_2 L_{lr} i_{sy}; & \dot{u} \\ U_{ry} &= -R_s i_{sy} - w_2 L_{lr} i_{sx} + w_2 \frac{L_r}{L_m} Y_{dx}; & \ddot{u} \end{aligned} \quad (1)$$

$$M_{эм} = \frac{3}{2} p_{п} Y_{dx} i_{sy}. \quad (2)$$

В системе (1) знаки приведения параметров ротора опущены.

При условии компенсации влияния моментобразующей составляющей тока статора  $i_{sy}$  на формирование главного магнитного потока третье и четвертое уравнения системы (1) преобразуем к виду [5]:

$$\begin{aligned} Y_{dx} &= \frac{L_m}{R_r} U_{rx} + L_m i_{sx}; \\ Y_{dx} &= \frac{L_m}{w_2 L_r} U_{ry} + \frac{L_m L_{lr}}{L_r} i_{sx}. \end{aligned}$$

Таким образом магнитное состояние АВД определяется током ротора и корректируется в зависимости от выбранного закона управления воздействием на продольную составляющую вектора тока статора  $i_{sx}$ . Это воздействие формируется углом опережения коммутации тиристоров  $b$  в зависимом инверторе тока ПЧ<sub>с</sub> статора. Управление электромагнитным моментом (2) и, соответственно, угловой скоростью ротора осуществляется регулированием поперечной составляющей вектора тока статора  $i_{sy}$ , т.е. амплитудой его напряжения.

В ориентированной по вектору главного магнитного потока системе координат  $xu$  справедливы равенства:

$$\begin{aligned} Y_{dx} &= L_m (i_{sx} + i_{rx}) = L_m I_m; \\ Y_{dy} &= L_m (i_{sy} + i_{ry}) = 0, \end{aligned}$$

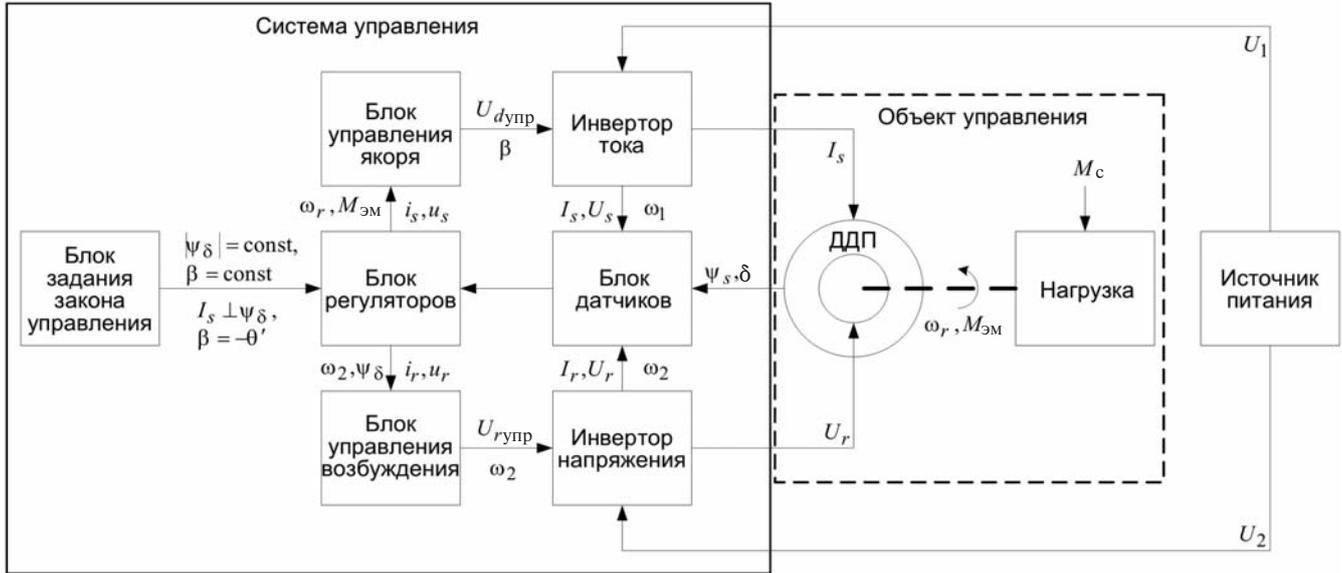


Рис. 2. Функциональная схема системы управления АД

где  $i_{sy} = -i_{ry}$ ;  $I_m$  – суммарный ток намагничивания.

Возможны два способа формирования тока  $I_m$ . В первом случае его значение остается постоянным во всех режимах работы АД, обеспечивая постоянное значение магнитного потока  $\Psi_d = \text{const}$ , во втором – регулируется в соответствии с выбранным энергетическим критерием.

При этом управление углом опережения коммутации тиристоров  $b$  в зависимом инверторе тока ПЧ<sub>5</sub> статора позволяет получать различные значения составляющей вектора тока статора  $i_{sx}$  – положительные и отрицательные, постоянные и изменяющиеся в зависимости от нагрузки, а также равные нулю. Векторная диаграмма АД при ортогональном управлении током намагничивания ( $i_{sx} = 0, b = j_1 = -\varphi\phi$  приведена на рис. 3, где  $\varphi\phi$  – угол нагрузки АД;  $a$  – фаза вектора напряжения ротора, определяемая частотой возбуждения;  $l$  – фаза тока возбуждения;  $j_r$  – фазовый угол сдвига вектора тока возбуждения  $I_r$  относительно вектора напряжения возбуждения  $U_r$ .

Исследования показали, что реализация ортогонального управления ( $\Psi_d \wedge I_s, i_{sx} = 0$ ) позволяет получить при одинаковой нагрузке на валу меньшие значения токов статора и ротора, чем при других вариантах формирования тока  $i_{sx}$ . Развиваемый при этом электромагнитный момент не зависит от частоты возбуждения  $\omega_2$  и теоретически ограничен лишь ресурсами преобразователей частоты и конструкцией базовой машины [2, 6, 7].

Следует отметить, что режим ортогональности векторов тока статора и магнитного потока принципиально невозможен в АД с короткозамкнутым ротором и его максимальный электромагнитный момент  $M_{эм\max}$  будет меньше, чем в АД [8].

На практике закон управления с постоянством магнитного потока широко применяется для электроприводов, работающих с постоянным моментом сопротивления на валу и с частыми ударными приложениями нагрузки. Недостатком его являются повышенные потери при работе двигателя с нагрузкой меньше номинальной, что вызвано необходимостью поддержания постоянного номинального потокосцепления во всех режимах работы.

Существенно повысить КПД двигателя можно, регулируя магнитный поток в функции электромагнитного момента и скорости. В этом случае продольная составляющая тока якоря формируется по следующим законам:

критерий минимума тока якоря  $I_{sm} \text{ @ } \min$ , где  $I_{sm}$  – амплитуда тока якоря, обеспечивает максимальный электромагнитный момент при фиксиро-

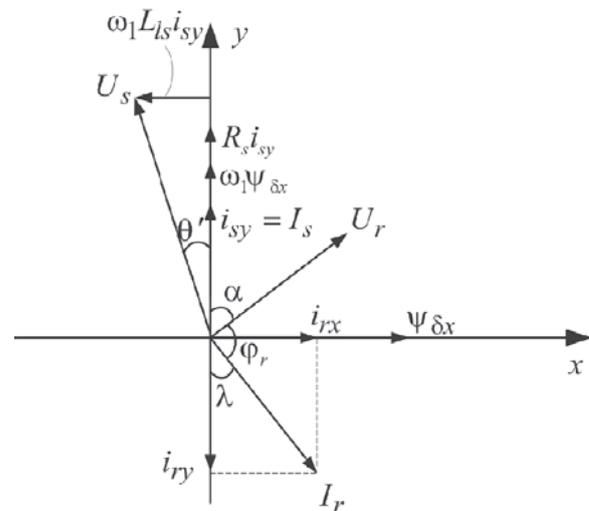


Рис. 3. Векторная диаграмма АД при ортогональном управлении

ванном значении тока якоря; критерий минимума суммарных потерь  $DP_S @ \min$ , что соответствует минимуму суммарных потерь в меди обмоток статора и ротора и в стали статора.

Значение частоты возбуждения изменяется вплоть до перехода на встречное вращение магнитного поля и ротора и подчиняется соотношению [4]:

$$w_1 = -w_2 = w_r / 2. \quad (3)$$

Исследования [4, 9] установили значительное влияние частоты возбуждения  $w_2$  на энергетические характеристики АД.

Особенностью АД является наличие в обмотке возбуждения ЭДС скольжения фиксированной частоты, которая обуславливает возможность возврата части активной мощности скольжения в питающую сеть либо ее потребление при определенных значениях угловой скорости ротора, частоты возбуждения, нагрузки на валу и направления вращения ротора относительно магнитного поля.

При выполнении условия (3) возможно применение двух преобразователей, установленные мощности которых равны половине мощности базовой машины [10].

Таким образом, рассматривая асинхронизированный вентильный двигатель с позиций теории управления, можно предложить концепцию, определяющую его как многоканальный объект управления, отличающийся от других типов электрических машин большим числом доступных каналов управления.

Анализ вариантов формирования воздействий по этим каналам позволяет определить весь спектр регулирования:

изменением амплитуды напряжения статора управляем скоростью ротора и парировем изменения нагрузки на валу;

изменением угла сдвига фаз между первыми гармониками тока и напряжения статора путем варьирования угла опережения коммутации силовых ключей в выходном звене ПЧ обеспечиваем ортогональность векторов тока статора и основного магнитного потока, что позволяет минимизировать потери в меди при заданном значении электромагнитного момента и обеспечивает высокую перегрузочную способность при работе привода на упор;

изменением амплитуды напряжения ротора управляем намагничиванием машины, обеспечивая либо постоянство магнитного потока, либо его регулирование в функции требуемого электромагнитного момента и скорости. Это позволяет улучшить энергетические показатели в области малых нагрузок, повысить при необходимости перегрузочную способность АД за счет увеличения магнитного потока выше номинального и расширить диапазон

регулирования скорости ротора выше двух номинальных;

изменением частоты возбуждения вплоть до перехода на встречное вращение магнитного поля и ротора минимизируем потери в стали статора, регулируем потребление активных и реактивных мощностей и обеспечиваем расширение диапазона регулирования скорости ротора во вторую зону при номинальном электромагнитном моменте.

Для формирования энергоэффективных законов математическая модель объекта должна учитывать нелинейность характеристики намагничивания аппроксимирующей функцией, которая приближенно изображает исходную характеристику. Кроме того, при управлении по минимуму суммарных потерь в уравнения модели необходимо ввести составляющие, характеризующие потери в стали статора, что усложняет синтез системы управления приводом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г. Управляемая машина переменного тока. — М.: Наука, 1969.
2. Сонин Ю.П., Гуляев И.В. Асинхронизированный вентильный двигатель. — Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1998.
3. Гуляев И.В. Обобщенная электромеханическая система на основе асинхронизированного вентильного двигателя. — Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2004.
4. Гуляев И.В., Тутаев Г.М., Маняев И.В. Влияние частоты возбуждения на энергетические характеристики асинхронизированного вентильного двигателя. — Изв. ТулГУ. Технические науки, 2010, вып. 3, ч. 2.
5. Тутаев Г.М. Варианты векторного управления электроприводом с асинхронизированным вентильным двигателем. — Электротехнические комплексы и системы управления, 2009, № 3.
6. Копылов И.П., Сонин Ю.П., Гуляев И.В., Вострухин А.А. Асинхронизированный вентильный двигатель с ортогональным управлением. — Электротехника, 2002, № 9.
7. Гуляев И.В., Тутаев Г.М. Системы векторного управления электроприводом на основе асинхронизированного вентильного двигателя. — Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2010.
8. Загорский А.Е., Шакарян Ю.Г. Управление переходными процессами в электрических машинах переменного тока. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
9. Тутаев Г.М. Двухзонное регулирование скорости в электроприводе на базе асинхронизированного вентильного двигателя. — Автоматизация и современные технологии, 2012, № 7.
10. Тутаев Г.М., Гуляев И.В., Маняев И.В. Исследование энергетических характеристик асинхронизированного вентильного двигателя на статической модели. — Электротехнические комплексы и системы управления, 2010, № 4.

[28.03.13]

*Автор: Тутаев Геннадий Михайлович окончил факультет электроники и автоматики Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва в 1986 г. В 2002 г. защитил кандидатскую диссертацию в Нижегородском государственном техническом университете. Доцент кафедры автоматики МГУ им. Н.П. Огарёва.*