

ЭЛЕКТРОПРИВОД С ВЕНТИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ НА БАЗЕ СЕРИЙНОЙ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Инж. ТАРАСОВ А. Н.

РУП «Приборостроительный завод "Оptron"»

Канд. техн. наук, доц. ШАФРАНСКИЙ В. И.,
канд. техн. наук, проф. ПЕТРЕНКО Ю. Н.

Белорусский национальный технический университет

Вентильные двигатели (ВД) с магнитоэлектрическим возбуждением (от постоянных магнитов) имеют практически такие же пусковые и регулировочные свойства, как и коллекторные двигатели постоянного тока. В то же время они обладают рядом преимуществ:

- повышенные надежность и долговечность;
- меньшие эксплуатационные расходы;
- большой КПД;
- массогабаритные показатели в определенном диапазоне вращающего момента.

В связи с этим вентильные двигатели находят широкое применение.

Как известно, электромеханическая часть (ЭМЧ) вентильного двигателя представляет собой синхронную машину, статор которой такой же, как у асинхронной машины. Поэтому с целью ускорения процесса проектирования и уменьшения затрат при производстве вентильных двигателей, что особенно важно при неопределенности серийности производства, целесообразно использовать статор, корпус и подшипниковые щиты серийно выпускаемых асинхронных двигателей. При этом нужно учитывать особенности проектирования таких двигателей.

Для вентильных двигателей справедлива машинная постоянная Арнольда, которая может быть представлена в виде:

$$C_A = \frac{D^2 l_\delta n}{P} = \frac{6,1 \cdot 10^7}{\alpha_\delta K_\phi K_o A B_\delta}, \quad (1)$$

где D , l_δ – диаметр и длина якоря соответственно; n , P – частота вращения и расчетная мощность двигателя соответственно; α_δ , K_ϕ , K_o – коэффициенты полюсной дуги, формы поля и обмоточный соответственно; A – линейная нагрузка обмотки якоря; B_δ – максимальная индукция в воздушном зазоре.

При использовании статора серийного асинхронного двигателя заданы D (внутренний диаметр статора) и l_δ , а также наружный диаметр статора D_n

$$D_n = D + 2(h_z + h_a), \quad (2)$$

где h_z , h_a – высота зубцов ярма и статора соответственно.

Задано также число пазов статора

$$Z = 2pmq, \quad (3)$$

где p, m, q – число пар полюсов, фаз и пазов на полюс и фазу соответственно.

Как известно [1], индукция в зубцах B_z и в ярме B_δ статора определяется следующим образом:

$$B_z = \frac{B_\delta t}{b_z K_c}; \quad (4)$$

$$B_\delta = \frac{\alpha_\delta B_\delta \tau}{2h_a K_c} = \frac{\alpha_\delta B_\delta (\pi D / 2p)}{2h_a K_c}, \quad (5)$$

где $t = \frac{\pi D}{Z}$ – зубцовый шаг; K_c – коэффициент заполнения пакета сталью;

$\tau = \frac{\pi D}{2p}$ – полюсное деление.

Так как все размеры в (4) и (5) уже заданы, то:

$$B_z \sim B_\delta; \quad (6)$$

$$B_a \sim B_\delta / 2p. \quad (7)$$

Коэффициенты в (1) изменяются в узких пределах, т. е. $\alpha_\delta K_\phi K_o \approx \text{const}$, поэтому при заданной частоте вращения

$$P \sim AB_\delta. \quad (8)$$

Как видно из (6)–(8), увеличение индукции в воздушном зазоре приводит к повышению индукции в зубце и ярме статора, что недопустимо с точки зрения роста потерь в стали и насыщения, а ее уменьшение приводит к снижению мощности. Из (7) следует, что увеличение числа пар полюсов в вентильном двигателе по сравнению с базовым асинхронным двигателем желательно с точки зрения уменьшения индукции в ярме статора, но при этом возрастает частота перемангничивания

$$f = pn, \quad (9)$$

следовательно, и потери в стали

$$\Delta P_{\text{ст}} \sim B^2 f^\alpha, \quad (10)$$

где $\alpha = 1,3 \dots 1,5$ – коэффициент, зависящий от марки стали.

Кроме того, как видно из (3), при этом изменяется

$$q = \frac{Z}{2pt}. \quad (11)$$

Число q в (11) в общем случае может быть целым или дробным

$$q = \frac{N}{d}, \quad (12)$$

где N и d – взаимно простые числа.

При дробном q обмотка выполнима, если $[1] \frac{2p}{d}$ – целое число.

При заданном диаметре увеличение линейной нагрузки недопустимо по условиям нагрева, а уменьшение приводит к снижению мощности. Таким образом, при использовании статора асинхронного двигателя для вентильного целесообразно оставить неизменными значения A , B_δ и p . Сохранение значений линейной нагрузки A и числа пар полюсов p для вентильного двигателя такими же, как и у базового асинхронного, не вызовет затруднений. Труднее это сделать для индукции в воздушном зазоре B_δ . Часть магнитного потока магнита замыкается по путям рассеяния, поэтому полезный магнитный поток двигателя

$$\Phi_\delta = \frac{\Phi_m}{\sigma} = \frac{B_m S_m}{\sigma}, \quad (13)$$

где Φ_m – магнитный поток магнита; $\sigma > 1$ – коэффициент рассеяния; B_m , S_m – индукция и площадь магнита соответственно.

Так как $\Phi_\delta = \alpha_\delta \tau l_\delta B_\delta$, то

$$B_\delta = \frac{B_m S_m}{\alpha_\delta \tau l_\delta \sigma}. \quad (14)$$

В индукторе с радиально намагниченными магнитами (ротор с цилиндрическим или со звездообразным магнитом)

$$S_m = b_m l_\delta < \alpha_\delta \tau l_\delta, \quad (15)$$

где b_m – длина дуги магнита; l_δ – длина статора, поэтому $B_\delta < B_m$.

У серийных асинхронных двигателей даже небольшой мощности (100...300 Вт) индукция в воздушном зазоре $B_\delta > 0,4...0,5$ Тл, поэтому для вентильных двигателей с ротором такой конструкции целесообразно использовать магниты с большой остаточной индукцией, особенно высококоэрцитивные, например КС37 (остаточная индукция $B_r = 0,77$ Тл, коэрцитивная сила по индукции $H_{cb} = 540$ кА/м) или H_m 30ДибР ($B_r \geq 1,0$ Тл, $H_{cb} \geq 750$ кА/м) [2].

В индукторе с аксиально намагниченными магнитами (когтеобразный ротор) или с тангенциально намагниченными магнитами возможно

$$S_m > \alpha_s \tau l_s, \quad (16)$$

поэтому при такой конструкции ротора можно получить $B_\delta > B_m$. Однако эти возможности можно реализовать только в многополюсных двигателях с относительно большим диаметром ротора.

На заводе «Оптрон» был разработан вентильный двигатель ДБУ-135 на базе асинхронного двигателя АИР63В4. Данные этих двигателей, полученные экспериментально, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип двигателя	P , Вт	n , об/мин	КПД	Момент, Нм
АИР63В4	360	1320	0,68	2,6
ДБУ-135	600	1800	0,8	3,2

Разработанный электропривод предназначен для легких транспортных средств: тележек внутрицехового транспорта, инвалидных колясок, а также для вспомогательных механизмов автомобилей при питании от аккумуляторной батареи напряжением 12...48 В. Из известных способов регулирования скорости ВД [3–5] целесообразным с точки зрения массогабаритных и энергетических показателей является регулирование напряжения.

Функциональная схема электропривода, содержащая силовой преобразователь мощности (СПМ), на основе автономного инвертора напряжения (АИН) и интегрального микроконтроллера (ИМК) приведена на рис.1. Применение полностью управляемых ключей для коммутации обмоток ВД позволяет в отличие от тиристорных коммутаторов реализовать высокую частоту широтно-импульсного модулятора (ШИМ) и обеспечить качественную работу СПМ.

Мощные биполярные транзисторы в ключевом режиме, полевые транзисторы MOSFET и биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT можно использовать как ключи. Детальное сравнение показывает, что для низковольтного электропривода целесообразно применение транзисторов MOSFET, которые имеют низкое сопротивление в открытом состоянии (0,03...0,07 Ом) и достаточно высокую частоту коммутации (до 30 кГц).

Интегральный микроконтроллер обеспечивает управление в разомкнутой структуре трехфазным ВД. ИМК содержит дешифратор DC для преобразования сигналов датчика положения ротора (ДПР) и управления реверсом двигателя (ВП/НЗ, кнопка SA1), генератор пилообразных сигналов, компаратор с внешними входами на операционном усилителе, генератор ШИМ-сигналов. ИМК осуществляет также защитные функции от: понижения напряжения источника питания с индикацией, перегрузки по току с регулированием времени срабатывания, перегрева микросхемы.

Дешифратор DC вместе с блоком логики D формирует необходимую последовательность импульсов на выходах $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$ ИМК для управления транзисторными ключами верхней VT1, VT3, VT5 и нижней

VT2, VT4, VT6 групп трехфазного мостового инвертора. Выходы A₁, B₁, C₁ выполнены по типу «открытый коллектор». Следовательно, разрешающим является низкий уровень сигнала. Для согласования их уровней при управлении MOSFET-транзисторами и обеспечения требуемой траектории коммутации на выходе ИМК включен блок драйверов БД.

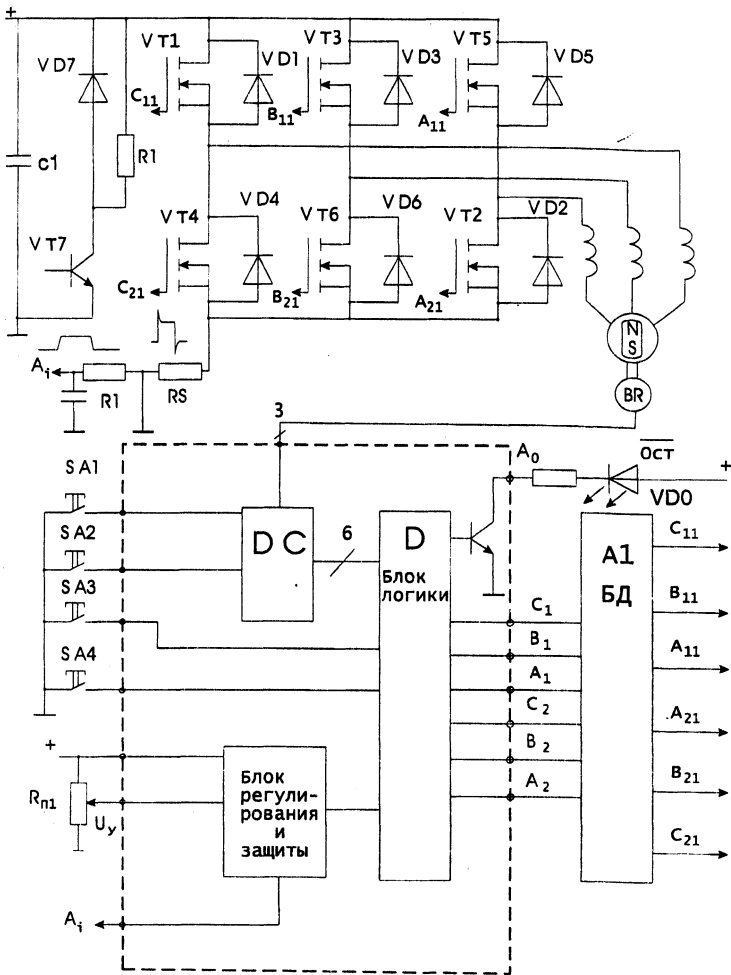


Рис. 1. Схема электропривода с ВД

На вход DC подаются сигналы от ДПР на основе датчиков Холла или оптоэлектрических. ИМК осуществляет управление трехфазными двигателями, используя наиболее распространенные варианты сигналов ДПР. Переключатель SA2 (60°/120°) позволяет выбрать управление двигателями, имеющими сдвиг сигналов ДПР в 60° или 120° (электрические градусы). При наличии трех входных сигналов ДПР возможно восемь выходных кодовых комбинаций, шесть из которых являются разрешенными; неразрешенные коды соответствуют обрыву или короткому замыканию входных сигналов.

Используя шесть разрешенных кодов DC, можно обеспечить управление положением ротора с разрешающей способностью 60°. Диаграмма входных и выходных сигналов ИМК приведена на рис. 2.

Данные истинности интегрального микроконтроллера

Входные сигналы						Выходные сигналы (*)							Примечание				
Сигналы ДПП						Вп/Hz SA2	Пуск SA3	Торм. SA4	Сигн. ДТ	На верхние СТК				На нижние СТК			ОСТ
60°, SA1 = 0			120°, SA1 = 1							VT1	VT3	VT5		VT4	VT6	VT2	
SA	Sb	Sc	SA	Sb	Sc												
1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	SA1=1
1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	
1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	
0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	
0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	
0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	
1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	SA1=0
1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	
1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	
0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	
0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	
0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	
1	0	1	1	1	1	X	X	0	X	1	1	1	0	0	0	0	SA4=0
0	1	0	0	0	0	X	X	0	X	1	1	1	0	0	0	0	
1	0	1	1	1	1	X	X	1	X	1	1	1	1	1	1	0	SA4=1
0	1	0	0	0	0	X	X	1	X	1	1	1	1	1	1	0	
V	V	V	V	V	V	X	1	1	X	1	1	1	1	1	1	1	
V	V	V	V	V	V	X	0	1	X	1	1	1	1	1	1	0	
V	V	V	V	V	V	X	0	0	X	1	1	1	0	0	0	0	
V	V	V	V	V	V	X	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	

Примечания: X – независимо от сигналов; V – при любой разрешенной комбинации.
* – выходы A₀, A₁, B₁, C₁ выполнены по типу «открытый коллектор», т. е. транзистор верхней группы включен при соединении одного из указанных выходов к корпусу.

ИМК обеспечивает динамическое торможение, для чего переключатель SA4 размыкается (SA4 = 0). При этом на выходах A₁, B₁, C₁ формируется сигнал высокого уровня, запирающий три верхних ключа VT1, VT3, VT5; нижние транзисторы VT2, VT4, VT6 открываются, и ЭДС двигателя замыкается через открытые транзисторы и диоды. Учитывая, что при работе вхолостую ЭДС близка по величине к питающему напряжению, в первый момент ток динамического торможения может намного превышать номинальное значение. Это необходимо принимать во внимание при выборе нижней группы транзисторов. Сигнал на динамическое торможение является приоритетным; логическая часть схемы предотвращает начало торможения, т. е. отпирание всех транзисторов нижней группы до тех пор, пока открыт хотя бы один транзистор верхней группы.

Частота встроенного генератора пилообразного напряжения программируется внешними элементами C1 и R1; заряд C1 производится от источника напряжения U_{п1}, а разряд – через встроенный транзистор.

Для предотвращения перегрева двигателя и перегрузки транзисторов осуществляется токоограничение, работающее по мгновенному значению тока. Для измерения тока последовательно с инвертором включается измерительное сопротивление RS, падение напряжения с которого через интегрирующую цепь подается на компаратор (вход A_i), где сравнивается с эталонным напряжением, поступающим от внутреннего источника.

В состоянии перегрузки появляется сигнал «останов» A_0 (рис. 1), о чем сигнализирует светодиод VD0. Схематическими приемами предотвращается повторное отпирание силовых ключей в течение периода ШИМ в случае перегрузки.

Для сглаживания острых кратковременных пиков тока нагрузки между RS и входом A_i включается интегрирующая цепь, состоящая из элементов $C2-R2$. Форма сигналов на RS и на выходе $C2$ этой цепи показана на рис 1.

Выходная цепь «останов» A_0 (ОСТ) служит для диагностики правильности функционирования ИМК. Токовая нагрузка этой цепи позволяет включать светодиод для визуальной индикации. Данный сигнал может быть использован также для системы управления верхнего уровня. Цепь выполнена по типу «открытый коллектор», и сигнал A_0 имеет низкий уровень при следующих условиях: 1) запрещенный код входных сигналов, что является нарушением функционирования ДПП по ряду причин (обрыв одной из цепей, замыкания и др.); 2) цепь пуска замкнута на корпус (SA3 замкнут, на входе 3 сигнал логического 0); 3) сигнал с измерительного сопротивления RS превышает установленный уровень; 4) срабатывание защиты от минимального напряжения; 5) срабатывание температурной защиты ИМК.

Электропривод создан с максимальным использованием комплектующих отечественного производства. Исключение составляют постоянные магниты (РФ) и ИМК.

Конструктивно электропривод выполнен в двух вариантах:

- ВД и преобразователь мощности в отдельном конструктиве (рис. 4);
- интегральное исполнение, когда преобразователь мощности располагается непосредственно на распределительной коробке двигателя. Этим достигаются удобство монтажа и сокращение потерь в питающих проводниках (рис. 3).

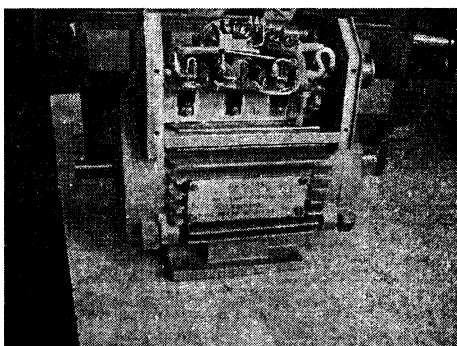


Рис. 3. Интегральное исполнение электропривода

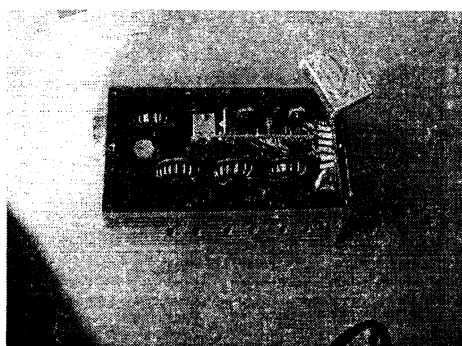


Рис. 4. Общий вид преобразователя мощности с интегральным микроконтроллером

ВЫВОДЫ

1. На основе статора серийного асинхронного двигателя изготовлен вентильный двигатель, имеющий более высокое значение КПД и лучшие массогабаритные показатели.

2. Разработанный электропривод может найти применение в самых различных установках при питании от аккумуляторной батареи напряжением 12...48 В.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование электрических машин: Учеб. пособ. для вузов / Под ред. И. П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 495 с.
2. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю. М. Пятина – М.: Энергия, 1980. – 486 с.
3. Гульков Г. И., Гульков А. Г., Шайби Р. Формирование тяговой характеристики бесконтактного двигателя постоянного тока // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 6. – С. 24–32.
4. Лебедев Н. И., Гандшу В. М., Явдошак Я. И. Вентильные электрические машины. – СПб.: Наука, 1996. – 252 с.
5. Лебедев А. Н. Характеристики тягового вентильного двигателя с постоянными магнитами при регулировании напряжением питания // Электромеханика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1989. – № 1. – С. 49–51.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 30.05.2002

УДК 621.313.314

СРОК СЛУЖБЫ ИЗОЛЯЦИИ ПОКРЫТЫХ ПРОВОДОВ ВЛП 10 кВ ПРИ КАСАНИИ ВЕТОК ДЕРЕВЬЕВ И ДРУГИХ ЗАЗЕМЛЕННЫХ ПРЕДМЕТОВ

**Докт. техн. наук, проф. СТЕПАНЧУК К. Ф.,
кандидаты техн. наук, доценты КЛИМОВИЧ Г. С., КРАСЬКО А. С.**

Белорусский национальный технический университет

Применение на ВЛП 10 кВ изолированных, покрытых слоем полиэтилена проводов обеспечивает повышенную надежность и экономичность линий. Допускаются падение на провода деревьев, касание веток, что позволяет уменьшить ширину просек при прохождении ВЛ по лесным массивам, садам или населенным пунктам [1–3]. Такие провода выпускаются во многих странах, включая Финляндию, Россию и Республику Беларусь. В Беларуси завод «Белсельэлектросетьстрой» выпускает покрытый провод АСИ. В качестве токопроводящей жилы в нем используется стандартный сталеалюминиевый провод.

Основное внимание в стандартах и технических условиях уделяется электрическим характеристикам покрытия [2, 3]. При падении на провода деревьев, касании веток, что возможно из-за уменьшенной ширины просек, покрытие должно не допускать значительных токов утечки, выдерживать