

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ОТЛАДОЧНАЯ СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

*Карпович О.Я., Онищенко О.А.*

*Одесская государственная академия холода*

*olekar@freemail.ru, olegoni@mail.ru*

*Порайко А.С.*

*Одесский национальный политехнический университет*

*porayko@ukr.net*

*The practical realization of experimental control circuit of switched reluctance motor (SRM) is proposed in this paper. It permits to estimate SRM properties, optimize and debug control system, investigate processes in single elements of schematic circuit. The experimental characteristics of SRM is obtained.*

На мировом рынке вентильно-индукторные электродвигатели (ВИД), благодаря своей надежности и технологической простоте, активно конкурируют с асинхронными. Известные производители ВИД и систем на их основе утверждают, что в ближайшие годы во всех новых технологических разработках будут применяться ВИП - вентильно-индукторные электроприводы [1, 2]. На Украине имеется явное отставание в области исследований и производства ВИП, что связано с недостаточностью экспериментальных разработок, позволяющих оптимизировать конструкцию и схемные решения ВИП.

Основной целью статьи является представление экспериментальной разработки, позволяющей оценить возможности сконструированного ВИД, рационализировать и отладить его систему управления, исследовать процессы в отдельных узлах принципиальной схемы.

Объект экспериментального исследования – опытный образец ВИД с отношением чисел полюсов статора и ротора  $Z1:Z2 = 8:6$ , производства «Одесмонтажспецпроект». Расчетный номинальный момент двигателя – 2,2 Н·м, скорость – 210 рад/с при 280 В постоянного напряжения. Статорный пакет – прямоугольной формы. Листы статора и ротора изготовлены из электротехнической стали 2211 толщиной 0,5 мм.

Геометрические размеры магнитопровода статора и ротора ВИД, его обмоточные данные приведены в табл. 1 и 2, а внешний вид двигателя – на рис. 1

Таблица 1.

*Технические данные статора  
вентильно-индукторного двигателя ВИД56*

Статор	
наружные размеры, мм	112 × 112
внутренний диаметр яра статора, мм	98
внутренний диаметр выступов зубцов (полюсов статора), мм	60
ширина наконечник полюса, мм	11
длина пакета, мм	90
число витков обмотки полюсной катушки	125
число витков фазы обмотки	250
обмоточный провод марки ПЭВ-2, диаметр голого / изолированного, мм	0,71/0,79
средняя длина витка катушки, мм	270

Таблица 2.

*Технические данные ротора  
вентильно-индукторного двигателя ВИД56*

Ротор	
внешний диаметр выступов зубцов (полюсов ротора), мм	59,3
внешний диаметр яра ротора, мм	40
внутренний диаметр яра ротора (под вал), мм	22
воздушный зазор между статором и ротором, мм	0,35

Принципиальная схема отладочной схемы управления ВИД на дискретных элементах приведена на рис.2.

*Инвертор.* Для коммутации одной фазы обмотки ВИД применяется схема Миллера, состоящая из верхних  $VT_H$  и нижних  $VT_L$  полевых MOSFET-транзисторов и быстродействующих обратных диодов. Используется режим "жесткой" коммутации фаз (P2/P0) обмоток ВИД при реализации одиночного симметричного способа управления. Питание силового инвертора осуществляется от трехфазного мостового выпрямителя.

Уменьшение взаимного влияния токов фаз достигнуто подключением к общему верхнему транзистору не соседних по расположению фаз обмоток двигателя: 1-ой и 3-ей, 2-ой и 4-ой фаз [3]. В инверторе применены транзисторы типа IRPF460 с максимальным напряжением  $U_{\text{н}}=500$  В и максимальным током коллектора  $I_{\text{к}}=20$

А. Обратные быстродействующие диоды - типа HFA15PB60, рассчитаны на напряжение 600 В и ток в прямом направлении 15 А при времени восстановления не превышающем 60 нс.

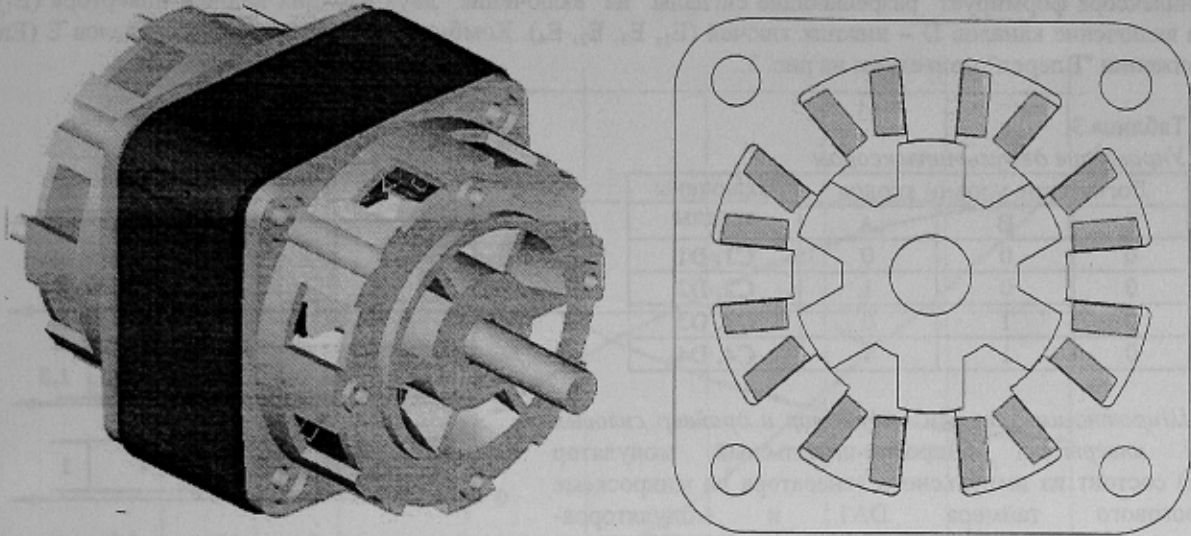


Рисунок 1 – Внешний вид двигателя и его поперечный разрез

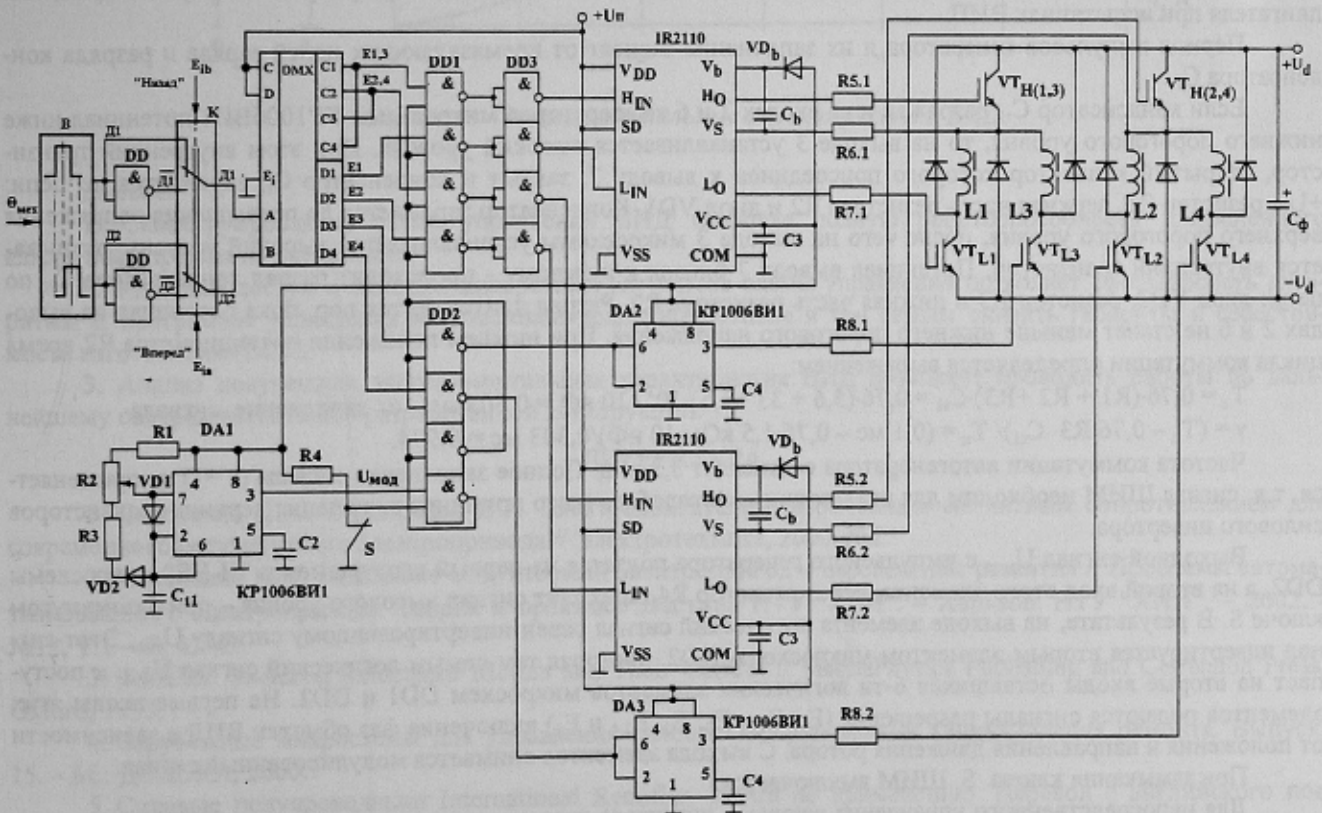


Рисунок 2 – Принципиальная схема управления экспериментальным образцом ВИД

**Распределитель импульсов.** Для распределения управляющих импульсов по фазам обмотки статора в функции положения ротора применены два оптоэлектронных датчика. Число периодов коммутации фаз обмотки на один оборот ротора - шесть. Схема состоит из "квадратурного" оптоэлектронного датчика В положения ротора (сигналы Д1 и Д2 смещены по фазе на 1/4 периода), двух элементов инвертирования сигналов DD, из коммутатора К прямых и инверсных сигналов датчика - устройства выбора направления движения, распределителя DD1-DD3 разрешающих импульсов по фазам обмотки.

С целью выбора направления вращения, прямые или инверсные сигналы датчика положения обрабатываются микросхемой K561ЛС2. На рис. 2 показано подключение прямых сигналов Д1 и Д2 датчика положения - движение "Вперед".

Сигналы квадратурного датчика - двухразрядные коды управления каналами DMX - демультиплексора K561КП1. Выходы включенных каналов, соответствующие кодам входов А и В микросхемы K561КП1 приве-

дены в табл. 3.

При подключении канала, например между D и D1, его сопротивление составляет около 250 Ом и потенциал  $+U_n$  с входа D пропускается на выход D1 демультиплексора. Включение каналов С микросхемы демультиплексора формирует разрешающие сигналы на включение двух верхних ключей инвертора ( $E_{1,3}$  или  $E_{2,4}$ ), а включение каналов D – нижних ключей ( $E_1, E_3, E_2, E_4$ ). Комбинации разрешающих сигналов E (Enable) при движении "Вперед" приведены на рис. 3.

Таблица 3.

Управление демультиплексором

Логические уровни входов			Включены каналы
$E_i$	B	A	
0	0	0	C1, D1
0	0	1	C2, D2
0	1	0	C3, D3
0	1	1	C4, D4

Широтно-импульсный модулятор и драйвер силовых ключей инвертора. Широтно-импульсный модулятор (ШИМ) состоит из импульсного генератора на микросхеме двупорогового таймера DA1 и модуляторов-распределителей "И-НЕ" на микросхемах DD1 и DD2.

Импульсный генератор позволяет изменять, при постоянной частоте коммутации, заполнение выходного сигнала и, тем самым, регулировать скорость вращения двигателя при испытаниях ВИП.

Период импульсов генератора и их заполнение зависят от времязадающих цепей заряда и разряда конденсатора  $C_{11}$ .

Если конденсатор  $C_{11}$  разряжен и на входах 2 и 6 компараторов микросхемы KP1006ВИ1 потенциал ниже нижнего порогового уровня, то на выходе 3 устанавливается высокий уровень. При этом внутренний транзистор, открытый коллектор которого присоединен к выводу 7, закрыт и конденсатор  $C_{11}$  заряжается по цепи:  $+U_n$ , резистор R1, верхняя часть резистора R2 и диод VD1. Конденсатор заряжается до превышения напряжения верхнего порогового уровня, после чего на выходе 3 микросхемы устанавливается высокий уровень, открывается внутренний транзистор. Потенциал вывода 7 близок к нулевому - происходит разряд конденсатора  $C_{11}$  по цепи: диод VD2, резистор R3 и нижняя часть резистора R2. Разряд длится до тех пор, пока потенциал на выводах 2 и 6 не станет меньше нижнего порогового напряжения. При нижнем положении потенциометра R2 время цикла коммутации определяется выражением:

$$T_u = 0,76 \cdot (R1 + R2 + R3) \cdot C_{11} = 0,76 \cdot (5,6 + 33 + 1,5) \cdot 10^3 \cdot 10 \text{ нФ} = 0,303 \text{ мс}, \text{ а заполнение сигнала}$$

$$\gamma = (T_u - 0,76 \cdot R3 \cdot C_{11}) / T_u = (0,1 \text{ мс} - 0,76 \cdot 1,5 \text{ кОм} \cdot 10 \text{ нФ}) / 0,303 \text{ мс} = 0,974.$$

Частота коммутации автогенератора составляет 3,3 кГц. Полное заполнение сигнала ( $\gamma = 1$ ) не применяется, т.к. сигнал ШИМ необходим для реализации вольтодобавочного принципа включения верхних транзисторов силового инвертора.

Выходной сигнал  $U_{\text{мод}}$  с импульсного генератора подается на первый вход элемента "И-НЕ" микросхемы DD2, а на второй вход этого элемента, через резистор R4, приходит сигнал высокого уровня – при разомкнутом ключе S. В результате, на выходе элемента логический сигнал равен инвертированному сигналу  $U_{\text{мод}}$ . Этот сигнал инвертируется вторым элементом микросхемы DD2, повторяя тем самым логический сигнал  $U_{\text{мод}}$  и поступает на вторые входы оставшихся 6-ти логических элементов микросхем DD1 и DD2. На первые входы этих элементов подаются сигналы разрешения ( $E_1, E_{1,3}, E_3, E_2, E_{2,4}$  и  $E_4$ ) включения фаз обмотки ВИД в зависимости от положения и направления движения ротора. С выхода элементов снимается модулированный сигнал.

При замыкании ключа S ШИМ выключается.

Для непосредственного управления ключами инвертора применены два драйвера типа IR2110 [4,5] и две микросхемы KP1006ВИ1, как показано на схеме (рис. 2). Микросхема драйвера IR2110 имеет синфазные входы и выходы. Поэтому, для согласования управляющих сигналов, между логическими элементами "И-НЕ" микросхемы DD1 и входами драйвера включены инверторы DD3. Резисторы R5 и R7 ограничивают начальный ток заряда изолированного затвора, представляющего в электрическом отношении конденсатор. Резистор R6 ограничивает амплитуду тока разряда затвора. Микросхемы DA2, DA3 таймеров KP1006ВИ1 включены по схеме инвертирования и по своим характеристикам позволяют управлять мощными полевыми транзисторами: время переключения не более 100 нс, ток выхода 3 – не менее 200 мА.

Экспериментально определенные параметры фазы ВИД составили: сопротивление (среднее значение) –  $R_{\Phi} = 2,37 \text{ Ом}$ ; индуктивность  $L_A$  в согласованном положении – 92 мГн; индуктивность при рассогласованном положении –  $L_U = 17,7 \text{ мГн}$ .

Экспериментально были сняты моментная  $M(I)$  и электромеханическая  $p(I)$  характеристики, а также зависимость отношения тока источника  $I_d$  к току  $I_c$  статора (коэффициент мощности  $\varepsilon = I_d/I_c$ ) в функции нагрузочного момента (рис. 4). Ток обмоток ВИД больше тока потребления двигателем в связи с тем, что обмотки

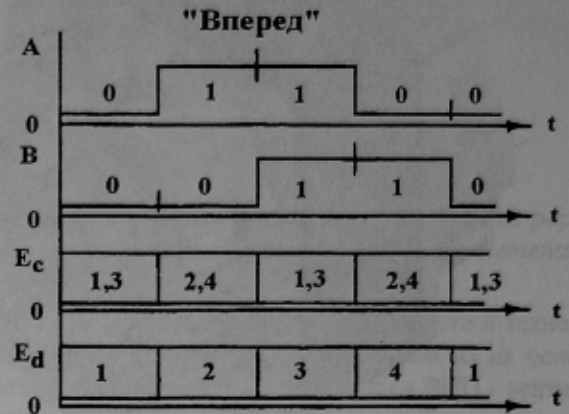


Рисунок 3- Комбинации включения фаз ВИД

обмениваются реактивной энергией с конденсатором  $C_{\phi}$ . Источник постоянного тока отдает только активную мощность, покрывающую механическую мощность на валу двигателя и мощность потерь.

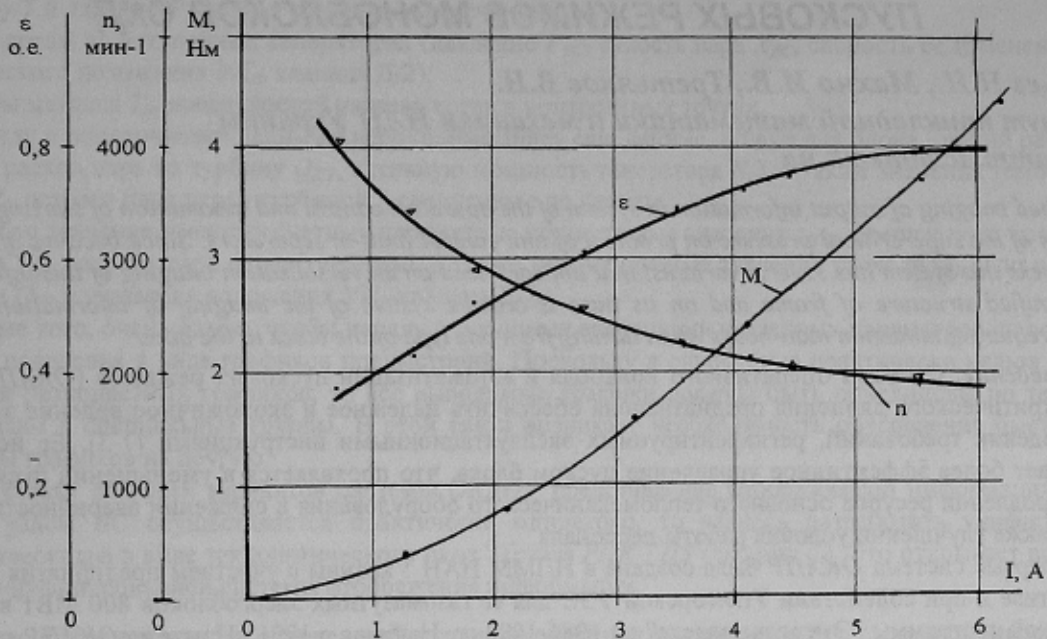


Рисунок 4 – Экспериментальные характеристики ВИД

#### Выводы.

1. Сконструированная схема управления ВИД показала полную работоспособность примененного алгоритма управления двигателем.
2. Удобный доступ к выводам дискретных элементов схемы управления позволяет сформировать алгоритмы и программы управления на микроконтроллерной основе и тем самым снизить габариты и себестоимость изготовления ВИП.
3. Анализ полученных экспериментальных характеристик ВИД позволяет проводить работы по дальнейшему совершенствованию разработанной конструкции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Садовский Л.А., Виноградов В.Л. Электродвигатели с переменным магнитным сопротивлением для современного регулируемого электропривода // *Электротехника*, 2000, №2.
2. Ильинский Н.Ф. Вентильно-индукторный электропривод – перспективы развития // *Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Вестник НТУ "ХПИ"*. – Харьков: НТУ "ХПИ", – 2002. – №12, Т.1 – С. 42-43.
3. T.Miller. *Switched Reluctance Motors and Their Control* // MagnaPhysics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1993.
4. Зарубежные микросхемы для управления силовым оборудованием. *Энциклопедия ремонта. Выпуск: 15.* – М.: ДОДЭКА, 2000.
5. Силовые полупроводники International Rectifier. Книга по применению. Перевод с английского под ред. Токарева В.В. -Воронеж: ТОО МП "Элист", 1995.

Надано до редакції:  
Рекомендовано до друку:

12.09.2003  
д.т.н., проф. Горб С.І.