

*М.В. ГУЛЫЙ*, инженер

г. Одесса

## **ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С СИЛОВЫМ МОСТОМ МИЛЛЕРА**

Розглянуто роботу чотирьохфазного вентильно-реактивного двигуна на природній механічній характеристиці у складі електронного комутатора Міллера. Досліджено причини появи додаткових імпульсів струму та їх вплив на характеристики вентильно-реактивного двигуна.

Рассмотрена работа четырехфазного вентильно-реактивного двигателя на естественной механической характеристике в составе электронного коммутатора Миллера. Исследованы причины появления дополнительных импульсов тока и их влияние на характеристики вентильно-реактивного двигателя.

**Введение.** Вентильно-реактивный двигатель (ВРД) состоит из электромеханического преобразователя (ЭМП) и электронного коммутатора (ЭК). Наличие ЭК позволяет использовать ВРД в системах с регулированием скорости в широких пределах – от сверхнизкой до высокой скорости, ограниченной естественной механической характеристикой. В последнем случае за период коммутации к фазе прикладывается полное напряжение источника питания, а регулирование тока с помощью ЭК не производится.

**Цель работы** – анализ причин и условий, при которых возникают дополнительные импульсы тока при работе вентильно-реактивного двигателя с электронным коммутатором Миллера.

**Анализ схем вентильно-реактивных двигателей.** Обычно для коммутации тока фазы ЭМП применяется полумостовая схема включения, для которой необходимо 2 силовых транзистора VT1, VT2 и 2 обратных силовых диода VD1, VD2 (рис. 1).

Для четырехфазного ЭМП необходимо четыре таких комплекта полумостовых схем. На практике для четырехфазного ЭМП применяются схемы ЭК Миллера с меньшим количеством силовых элементов [1, 2] (рис. 2,а). В ЭК Миллера за счет объединения фаз четырехфазного ЭМП в группы используется 6 силовых транзисторов и 6 силовых диодов, что по сложности соответствует ЭК для трехфазного ЭМП.

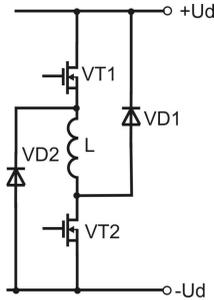


Рис. 1. Полумостовая схема включения фазы ЭМП.

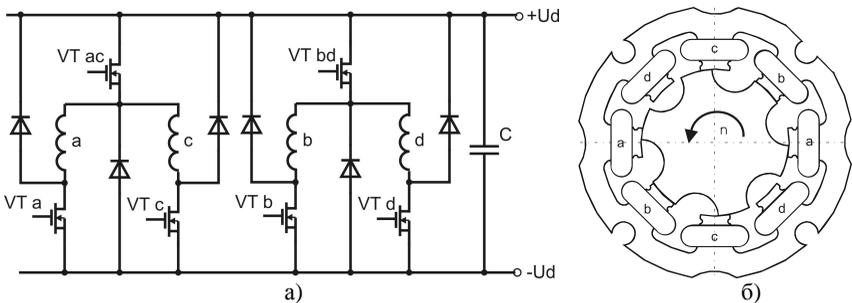


Рис. 2. Схема ЭК Миллера (а) и поперечный разрез четырехфазного ЭМП (б).

В группы с одним общим верхним транзистором объединяются фазы ЭМП, одновременная работа которых исключается. Для ЭМП на рис. 2,б, такими фазами будут "а" – "с" под общим транзистором VT ac и "b" – "d" под общим транзистором VT bd .

Таблица 1 – Основные технические данные исследуемого ВРД

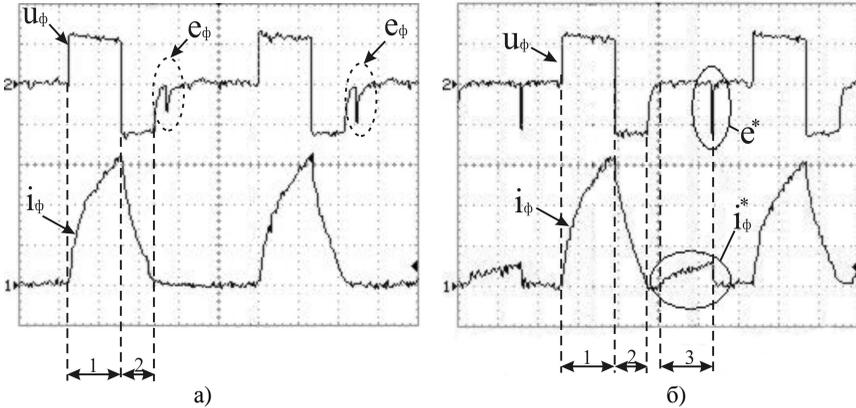
Напряжение питания, В	24
Количество полюсов статора	8
Количество полюсов ротора	6
Номинальный вращающий момент, Нм	0,05
Внешний диаметр статора, мм	53
Активная длина статора, мм	28
Воздушный зазор, мм	0,15
Число витков фазы	60

Для исследуемого четырехфазного ВРД, технические данные которого приведены в табл. 1, экспериментально получены осциллограммы напряжения  $u_\phi$  и тока фазы  $i_\phi$  (рис. 3) при его работе на естественной механической характеристике с номинальной нагрузкой для двух схем – ЭК

с полным числом транзисторов и с ЭК Миллера. Исследование ВРД проводилось при углах включения и выключения фаз, которые составили 22,5 и 7,5 механических градусов соответственно. За начало отсчета принято согласованное положение полюсов статора и ротора.

Схема с полным числом транзисторов

ЭК Миллера



Масштабы: время –  $0,5 \frac{мс}{дел}$ , напряжение –  $20 \frac{В}{дел}$ , ток –  $2 \frac{А}{дел}$ .

Рис. 3. Осциллограммы напряжения и тока фазы ЭМП при работе исследуемого ВРД в составе полумостовой схемы с полным числом транзисторов (а) и с ЭК Миллера (б) при  $U_d=24В$  и номинальном вращающем моменте.

На участке 1 (рис. 3,а,б) на фазу "а" подается напряжение источника питания  $U_d$  и происходит нарастание тока фазы  $i_φ$ . Спадание тока фазы "а" (участок 2 на рис. 3,а,б) происходит на источник питания через обратные диоды ЭК, при этом ЭДС самоиндукции фазы принимает отрицательное значение и по величине превышает напряжение источника питания на величину падения напряжения на обратных диодах. На осциллограмме напряжения фазы "а" (рис. 3,а) наблюдается всплеск ЭДС  $e_φ$ . А при работе ВРД с ЭК Миллера (рис. 3,б) – на осциллограмме тока (участок 3) присутствует дополнительный импульс тока  $i_φ^*$ . Спадание тока  $i_φ^*$  на источник питания происходит быстро и сопровождается наличием отрицательной ЭДС самоиндукции  $e^*$ .

Как видно из осциллограммы (рис. 3,б), дополнительный импульс то-

ка  $i_{\phi}^*$  в фазе "а" возникает между ее рабочими периодами в момент времени, когда возбужденной оказывается соседняя по группе фаза "с" (рис. 2,б). Учитывая, что при одновременном возбуждении и указанном направлении вращения ротора ВРД фазы "а" и "с" создают разные по знаку электромагнитные моменты – ток  $i_{\phi}^*$  приводит к возникновению кратковременного генераторного (тормозного) режима работы фазы. В результате уменьшается электромагнитный момент ЭМП.

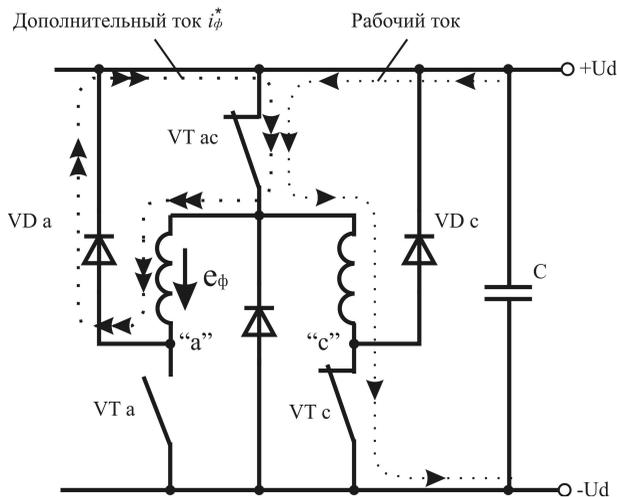


Рис. 4. Протекание импульса тока  $i_{\phi}^*$  в фазе "с" при работе ВРД в составе ЭК Миллера.

При протекании рабочего тока фазы "с" (на рис. 4 рабочий тока фазы указан пунктирной линией с одной стрелкой) транзистор  $VT_{ac}$  включен в течение всего периода работы фазы. При этом под действием наведенной ЭДС  $e_{\phi}$  в фазе "а" (на рис. 4 показана стрелкой) возникает ток через обратный диод  $VD_a$  и включенный транзистор  $VT_a$ . Путь замыкания дополнительного тока  $i_{\phi}^*$  на рис. 4 показан пунктирной линией с двумя стрелками. Так как при этом фаза "а" с током  $i_{\phi}^*$  находится на участке спада магнитной проводимости, то создаются условия для самовозбуждения с лавинообразным нарастанием тока. Таким образом, при работе ВРД на естественной механической характеристике, т.е. при полном под-

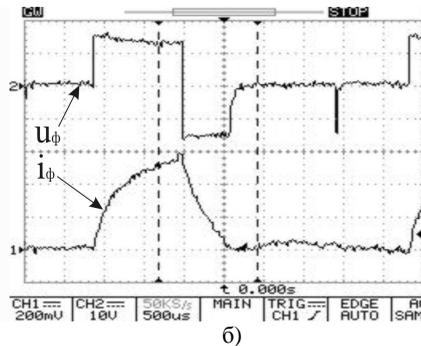
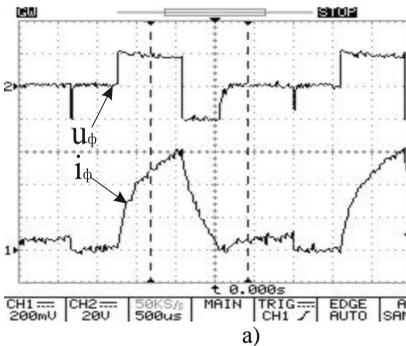
веденном напряжении источника питания  $U_d$  к фазе за цикл ее работы, существует путь для протекания и нарастания дополнительного тока  $i_{\phi}^*$ .

При работе ВРД с регулированием тока, силовой транзистор "VT ac" за период работы как фазы "а", так и фазы "с" постоянно переключается с частотой ШИМ. За период включенного состояния силового транзистора "VT ac" не успевает сформироваться лавинообразный процесс возбуждения, и ток  $i_{\phi}^*$  отсутствует, что подтверждается проведенными экспериментальными исследованиями.

Величина тока  $i_{\phi}^*$  зависит от частоты вращения ротора ВРД. На рис. 5 приведены осциллограммы тока и напряжения фазы ЭМП при его работе с ЭК Миллера и двумя частотами вращения: 3500 об/мин (рис. 5,а) и 2500 об/мин (рис. 5,б).

$U_d=20\text{ В}, n=3500\text{ об/мин.}$

$U_d = 15\text{ В}, n=2500\text{ об/мин.}$



Масштабы:

время –  $0,5 \frac{\text{мс}}{\text{дел}}$ , напряжение –

$20 \frac{\text{В}}{\text{дел}}$ , ток –  $2 \frac{\text{А}}{\text{дел}}$ .

время –  $0,5 \frac{\text{мс}}{\text{дел}}$ , напряжение –

$10 \frac{\text{В}}{\text{дел}}$ , ток –  $2 \frac{\text{А}}{\text{дел}}$ .

Рис. 5. Влияние частоты вращения вала ЭМП на величину тока  $i_{\phi}^*$  при работе ВРД с ЭК Миллера.

Изменение частоты вращения вала ВРД производилось с помощью регулирования напряжения питания ЭК. При практически одинаковой амплитуде рабочего тока в фазе  $i_{\phi} = 6\text{ А}$ , амплитуда тока  $i_{\phi}^*$  при частоте

вращения 3500 об/мин составляет 1А, а при частоте вращения 2500 об/мин – 0,5А. В процентном соотношении амплитуда дополнительного импульса тока по отношению к рабочему составила 16,7 % и 8,3 % соответственно.

**Оценка влияния импульсов тока.** Протекание импульса тока  $i_{\phi}^*$  под действием наведенной ЭДС в фазе "с" при работе фазы "а" возможно при выполнении условий:

1. Наведенная ЭДС должна иметь такую полярность, чтобы ток  $i_{\phi}^*$  мог замкнуться через силовой обратный диод "VD а" (рис. 4).

2. Величина наведенной ЭДС в фазе должна превысить величину падения напряжения на силовом диоде "VD а" в прямом направлении, т.е. быть больше, чем 0,6 В.

Результаты полевых расчетов показывают, что при определенных условиях магнитный поток, сцепленный с невозбужденными фазами достаточен для того, чтобы наведенная ЭДС превысила прямое падение напряжения на силовом диоде и вызвала начальное значение тока  $i_{\phi}^*$ .

Проведенные экспериментальные исследования позволяют оценить влияние возникающего дополнительного импульса тока  $i_{\phi}^*$  на характеристики исследуемого четырехфазного ВРД при его работе на естественной механической характеристике. Как видно из рис. 3, при переходе ВРД из работы с полумостовым ЭК к работе с ЭК Миллера, амплитуда рабочего тока фазы практически не изменилась и составила 6,3 А. Результаты измерений показателей ВРД при проведении эксперимента занесены в табл. 2.

Появление дополнительных импульсов тока  $i_{\phi}^*$  при работе ВРД с номинальной нагрузкой в составе ЭК Миллера приводит к падению КПД ВРД на 1,4 %. Скорость вращения вала ЭМП при этом упала менее чем на 1%, а средний ток источника питания  $I_{III}$  вырос на 2 %.

Таблица 2 – Результаты экспериментального исследования ВРД

Силовая схема	$M_n$ , Нм	$I_{III}$ , А	$U_d$ , В	$n$ , об/мин	КПД*, %	$P_2$ , Вт
Полумостовая схема	0,05	2,27	24	4318	41,5	22,6
Схема Миллера	0,05	2,33	24	4280	40,1	22,4

### Выводы:

1. Установлено, что при работе четырехфазного ВРД с ЭК Миллера на естественной механической характеристике возникают дополнительные импульсы тока  $i_{\phi}^*$  в неактивной фазе. Возникновение дополнительных

ных импульсов тока  $i_{\phi}^*$  происходит по причине наличия взаимной магнитной связи между обмотками ЭМП и специфики алгоритма коммутации силовых транзисторов ЭК Миллера.

2. Определены условия возникновения дополнительных импульсов тока  $i_{\phi}^*$  в неактивной фазе ЭМП. Подтверждено, что при регулировании тока фазы ЭМП с помощью ШИМ возникновение дополнительных импульсов тока  $i_{\phi}^*$  не происходит.

3. Проведенный анализ работы исследуемого ВРД показал, что наличие дополнительных импульсов тока  $i_{\phi}^*$  не привело к заметному ухудшению характеристик двигателя. Это позволяет рекомендовать его использование совместно с ЭК Миллера.

**Список литературы:** 1. *Krishnan R.* Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications. – CRC Press, 2001. – 398 p. 2. *Miller T.J.E.* Switched Reluctance Motors and their Control. – Magna Physics publishing and Clarendon Oxford Press, 1993. – 203 p. 3. *Ткачук В.* Електромеханотроніка: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2006. – 440 с.

*Поступила в редколлегию 04.09.08*