

## ОДНОВРЕМЕННАЯ КОММУТАЦИЯ ФАЗ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРД

*Васильев Л.А., Мнускин Ю.В., Лужнев А.И.*  
*Донецкий национальный технический университет*

*Рассмотрены возможности повышения эффективности преобразования энергии в вентильных реактивных двигателях. Проанализированы схемы питания двигателей с емкостными буферами энергии и с одновременной коммутацией фаз. Рассчитаны выходные характеристики и показано преимущество схемы с одновременной коммутацией фаз для двигателей средней и большой мощности.*

Получение конкурентоспособных технических показателей вентильных реактивных двигателей (ВРД) при питании от низковольтных источников ЭДС требует формирования фазных токов с максимальным заполнением токовой диаграммы для увеличения момента и механической мощности. Известно, что при изменении частоты вращения двигателя изменяются значения фазного тока и коэффициента токозаполнения. Для улучшения условий формирования фазных токов ВРД в [1] было предложено использование последовательных и параллельных емкостных буферов энергии (БЭ). Сделан вывод, что последовательное включение емкостных буферов повышает «коэффициент отдачи» двигателя в 1,2 ... 1,3 раза и использование активного объема электромеханического преобразователя в 1,6 ... 1,7 раза, тогда как параллельное включение БЭ не дает значительного эффекта. Положительное действие последовательных емкостных буферов энергии (ПБЭ) проявляется в повышении напряжения питания при включении фаз ВРД за счет последовательного подключения источника питания и напряжения заряженного БЭ. Применение предложенных в [1] схем силовых полупроводниковых преобразователей (СПП) с емкостными БЭ ограничивается маломощными ВРД и имеет недостаток, связанный с разделением во времени процесса накопления энергии буфером при выключении одной фазы и процесса включения другой фазы с использованием уже накопленной энергии буфером, т.е. две фазы не могут работать одновременно, что приводит к провалам момента. В [2] для устранения этого недостатка предлагается применить два последовательных БЭ в четырехфазном ВРД, благодаря чему становится возможной одновременная работа фаз с использованием энергии буферов при повышении мощности маломощного двигателя на 35...38%.

На основе анализа процессов, протекающих в схемах питания ВРД с последовательными емкостными БЭ, можно сделать вывод, что вышеописанные схемы применимы только для двигателей небольшой мощности. При увеличении мощности двигателя требуется существенное увеличение емкости и реактивной мощности буфера, при этом увеличиваются его стоимость и массогабаритные показатели. Поэтому авторами статьи было выбрано другое направление исследований по повышению эффективности ВРД средней и большой мощности, связанное с использованием одновременной коммутации фаз (ОКФ), которая способствует значительному улучшению качества переходных процессов.

Сущность данного способа заключается в непосредственной передаче электромагнитной энергии от предыдущей фазы к последующей, минуя буфер энергии и источник питания ВРД. При этом происходит форсированное переключение участвующих в передаче энергии фаз, вследствие чего улучшается коэффициент заполнения токовой диаграммы и увеличивается момент двигателя. Для реализации способа подходят известные схемы СПП без БЭ (например, асимметричного полумоста, в дальнейшем тексте – базовая схема (БС)), в которые добавляется диод, «развязывающий» источник питания и СПП на время форсированного переключения фаз при одновременной коммутации. Поскольку в начальный момент времени при одновременной коммутации в выключаемой фазе протекает значительный по величине ток насыщения, а во включаемой фазе ток равен нулю, то необходимо принять меры по обеспечению безопасной траектории переключения фаз, которую можно обеспечить созданием дополнительного контура протекания тока. Дополнительный контур удобно создать с помощью емкости, подключаемой параллельно цепи питания СПП. Таким образом, получаем схему питания ВРД с ОКФ, показанную на рисунке 1.

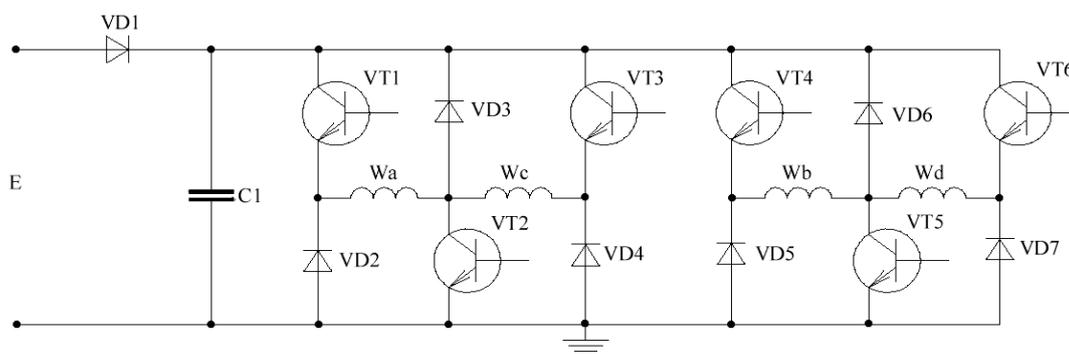


Рисунок 1 – Схема питания обмоток четырехфазного ВРД с ОКФ

Принципиальным отличием работы ВРД с ОКФ от работы с БЭ является отсутствие промежуточного преобразования запасенной электромагнитной энергии фаз в электрическую энергию емкостных буферов, а применяемая в схеме питания емкость обеспечивает безопасную траекторию переключения фаз и защищает цепи питания от возникающих перенапряжений. Таким образом, величина этой емкости определяется допустимым напряжением полупроводниковых ключей, используемых в СПП, и при ее расчете не возникает противоречия, характерного для БЭ, когда, с одной стороны, для увеличения напряжения на БЭ требуется уменьшать емкость, а с другой стороны, для увеличения времени разряда емкости буфера, необходимо ее увеличивать.

Основные закономерности протекания переходных процессов при одновременной коммутации фаз проанализируем по эквивалентной электрической схеме СПП для двух фаз, например, С и D (рисунок 2). Расчет переходных процессов и выходных характеристик ВРД выполнен методом математического моделирования.

На рисунке 3 представлены графики изменения токов фаз С, D и напряжения на емкости С1 в номинальном режиме работы ВРД с ОКФ.

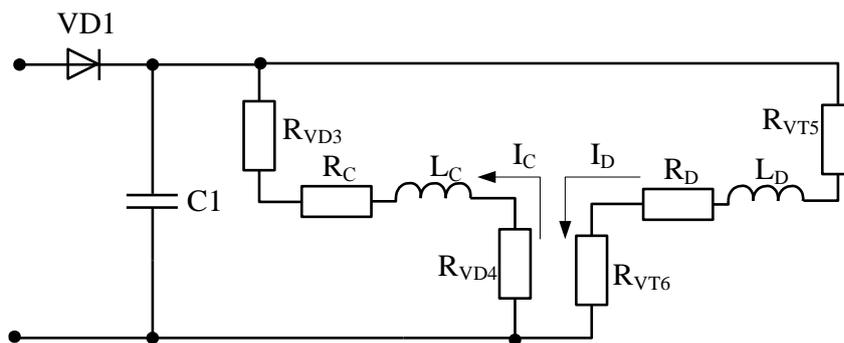


Рисунок 2 – Эквивалентная электрическая схема СПП для двух фаз

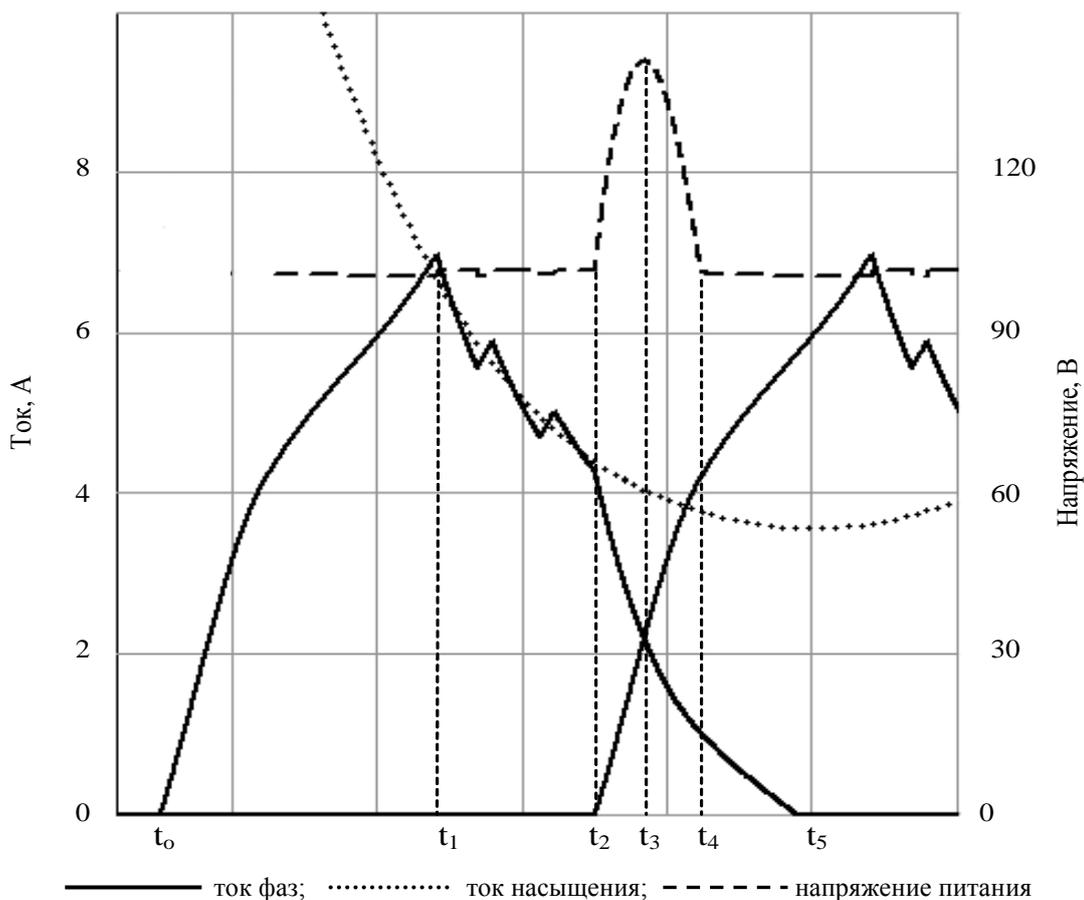


Рисунок 3 – Переходные процессы при одновременной коммутации фаз

Цикл коммутации начинается в момент времени  $t_0$ , когда подается питание на возбуждаемую фазу, например, С, и ее ток начинает возрастать. К моменту времени  $t_1$  магнитная система двигателя насыщается, ток фазы достигает максимального значения и далее формируется по кривой тока насыщения.

В момент времени  $t_2$  ротор занимает угловое положение, соответствующее углу выключения, и одновременно начинаются процессы выключения активной фазы С и включения следующей фазы D. К этому моменту времени ток фазы С не превышает значение  $i_{нас}$ , соответствующее току насыщения магнитной системы двигателя для угла выключения. По эквивалентной схеме (см. рисунок 2) видно, что диод VD1 закрыт ЭДС самоиндукции фазы С, превышающей ЭДС источника питания, а ток фазы С определяется суммой токов выключаемой фазы D и емкости С1:

$$i_C(t) = i_D(t) + i_{C1}(t). \quad (1)$$

Из равенства (1) следует, что в момент коммутации  $t_2$  ток выключаемой фазы полностью протекает через емкость, затем он начинает уменьшаться при одновременном увеличении тока включаемой фазы и уменьшении зарядного тока емкости. В момент времени  $t_3$  выравниваются токи фаз, ток емкости становится равным нулю, а напряжение на ней достигает максимального значения  $U_{Cmax}$ . Таким образом, за короткий промежуток времени напряжение на емкости увеличивается до  $U_{Cmax}$ , которое может в несколько раз превышать ЭДС источника питания двигателя, и этим повышенным напряжением питается включаемая фаза, что приводит к форсированному увеличению тока. После выравнивания фазных токов продолжается уменьшение тока отключаемой фазы и увеличение тока включаемой фазы, что в соответствии с (1) приводит к изменению направления тока емкости, которая начинает разряжаться и отдает накопленный заряд включаемой фазе. На этом промежутке времени продолжается форсированное увеличение тока включаемой фазы до момента времени  $t_4$ , когда емкость разряжается до величины ЭДС источника питания двигателя. При этом открывается диод VD1, и далее процесс включения фазы протекает обычным образом при питании от источника ЭДС. Одновременно подзарядается емкость и уменьшается до нуля ток отключаемой фазы.

Таким образом, процессы в схеме с ОКФ существенно отличаются от процессов в схемах с БЭ, обеспечивая форсированное включение тока. В связи с этим представляет интерес сравнительный анализ выходных характеристик двигателей различной мощности с базовой схемой СПП, с последовательными буферами энергии и с одновременной коммутацией фаз для определения области рационального применения предложенного способа питания ВРД.

Таблица 1 – Номинальные данные ВРД

Номинальные данные	ВРД1	ВРД2
$P_n$ , кВт	0,13	15
$U_n$ , В	100	130
$n_n$ , об/мин	1500	615
Конфигурация	8/6	8/6
$w_{\text{фазы}}$ , витков	178	26
$S_{\text{пол}}$ , см <sup>2</sup>	5,23	150
$2\delta$ , мм	0,5	3
$K_\Delta$	4	8

Для сравнительного анализа использованы физические модели маломощного двигателя ВРД1 и силового ВРД2, данные которых представлены в таблице 1. Для этих физических моделей выполнен расчет электромагнитных процессов и получены характеристики, позволяющие оценить эффективность применения рассматриваемых схем питания ВРД при различных значениях емкости. Для обеспечения безопасного режима работы минимальная емкость ограничена максимальным допустимым напряжением питания СПП и электрической прочностью изоляции обмотки.

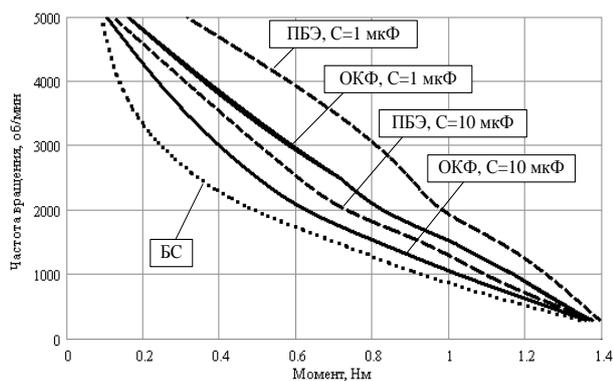
В таблице 2 представлены результаты расчета максимальной механической мощности  $p_{2max}$ , номинального момента  $m_n$  и частоты вращения  $\nu$ , соответствующей  $p_{2max}$ , (указаны в относительных единицах, за базисные приняты значения для БС СПП).

Таблица 2 – Выходные величины ВРД1 и ВРД2

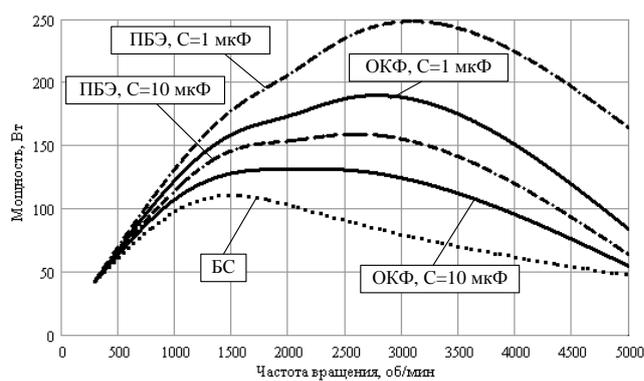
Схема питания ВРД	ВРД1				ВРД2			
	С, мкФ	$p_{2max}$	$\nu$	$m_n$	С, мкФ	$p_{2max}$	$\nu$	$m_n$
Базовая схема СПП	-	1,0	1,0	1,0	-	1,0	1,0	1,0
Схема с ОКФ	1	1,71	1,82	0,93	50	1,52	1,99	0,74
	10	1,19	1,44	0,82	200	1,30	1,73	0,73
Схема с ПБЭ	1	2,24	2,03	1,13	1000	1,48	1,77	0,81
	10	1,44	1,70	0,84	2000	1,32	1,64	0,78

На рисунках 4 и 5 построены естественные механические характеристики и характеристики механической мощности ВРД1 и ВРД2.

Полученные результаты свидетельствуют о значительном повышении эффективности преобразования энергии при использовании как ОКФ, так и ПБЭ. Однако следует заметить, что буферы энергии позволяют получить большую мощность ценой усложнения схемы (т.к. необходимы две емкости) и увеличения емкости буферов (т.е. массогабаритных показателей и стоимости). Поэтому критерии выбора схемы питания двигателей разной мощности будут различными.



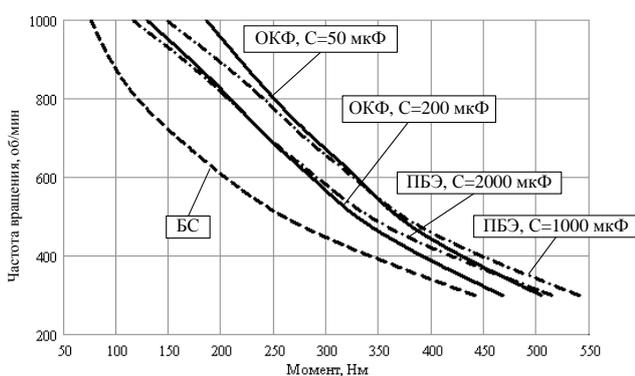
а)



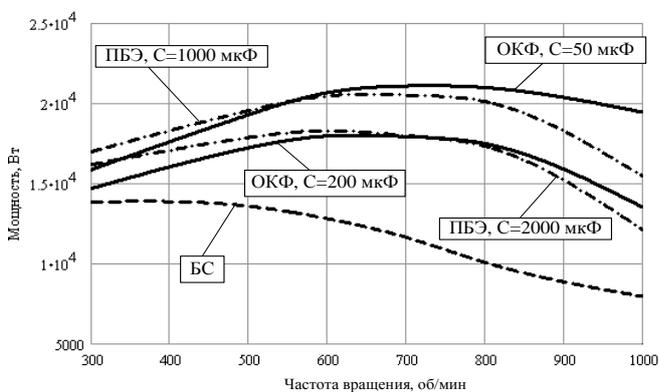
б)

а) механические характеристики  
б) характеристики механической мощности

Рисунок 4 – Характеристики ВРД 1



а)



б)

а) механические характеристики  
б) характеристики механической мощности

Рисунок 5 – Характеристики ВРД 2

Для двигателей малой мощности указанные выше недостатки применения ПБЭ не оказывают решающего влияния, поэтому данную схему рекомендуется использовать в большинстве случаев при питании от источников постоянного напряжения. Однако при питании ВРД от сети переменного тока [3] применение последовательных буферов не представляется возможным, поэтому целесообразно использовать схему с ОКФ.

Для двигателей средней и большой мощности проанализированы характеристики, полученные для рассматриваемых схем питания при существенно отличающихся величинах емкостей. Так, согласно таблице 2, практически одинаковую мощность ВРД2 можно получить при использовании емкости 50 мкФ для ОКФ и 1000 мкФ для схемы питания с ПБЭ. С учетом того, что требуется два буфера, имеющих в 20 раз большую емкость каждый, массогабаритные показатели и стоимость схемы питания ВРД2 с ПБЭ значительно больше, чем схемы питания с ОКФ. Следовательно, для двигателей средней и большой мощности схема питания с ОКФ имеет преимущество.

**Выводы.** Предложенная схема питания с одновременной коммутацией фаз позволяет существенно улучшить выходные характеристики ВРД за счет использования энергии отключаемой фазы для форсированного включения тока возбуждаемой фазы. При одинаковых энергетических характеристиках схем с ОКФ и ПБЭ первая имеет лучшие экономические и массогабаритные показатели. Схема с ОКФ перспективна для применения в ВРД средней и большой мощности, а также при питании ВРД от сети переменного тока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ткачук В.І. Явнополосні вентильні реактивні двигуни з буферами енергії. Автореферат дисертації. Львів, 1999.
2. Захарченко П.І., Васильев Л.А., Мнускин Ю.В. Перспективные схемы силовых преобразователей вентильных реактивных двигателей. // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: "Електротехніка і енергетика", випуск 50: Донецьк: ДонДТУ, 2003. – С. 15-18.
3. Васильев Л.А., Мнускин Ю.В., Лужнев А.И. Особенности работы вентильного реактивного двигателя от сети переменного тока. // Праці Луганського відділення Міжнародної академії інформатизації № 2 (19): Луганськ, 2009. – С. 24-28.