

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОММУТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОННОМ ВЕНТИЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ С ИСКУССТВЕННОЙ КОММУТАЦИЕЙ ТОКА В ИНВЕРТОРЕ И ВЫПРЯМИТЕЛЕ

КЕЛЕБАЕВ К.К.  
[izvestiva@ktu.aknet.kg](mailto:izvestiva@ktu.aknet.kg)

*Предложен принципиально новый тип двигателей двойного питания - асинхронный вентильный двигатель (АВД), имеющий на статоре дополнительную обмотку, которая подключается к обмотке ротора через выпрямитель, дроссель и инвертор. Рассмотрены процессы, протекающие в схеме АВД с искусственной коммутацией тока.*

Как показано в [1,2], наиболее целесообразным вариантом регулируемого электропривода для центробежных насосов является машина двойного питания (МДП), представляющая собой обычный асинхронный двигатель с фазным ротором, к обмотке ротора которого через контактные кольца подводится регулируемое напряжение. Для улучшения технико-экономических показателей МДП был разработан асинхронный вентильный двигатель (АВД). В этом электродвигателе в пазы статора укладываются две обмотки, одна из которых представляет обычную обмотку статора, а другая является преобразовательной и подключается к обмотке ротора через выпрямитель, дроссель и инвертор. Обе обмотки имеют одинаковое число полюсов и шаг по пазам. Таким образом, в АВД обмотка ротора питается через контактные кольца регулируемым по амплитуде, частоте и фазе напряжением. Во всех известных конструкциях асинхронных двигателей при частотах вращения меньше синхронной электромагнитная мощность равна (за вычетом потерь в стали и в обмотке статора) потребляемой мощности. Принципиальная особенность АВД заключается в том, что его электромагнитная мощность имеет две составляющие:

- а) мощность, потребляемая двигателем из сети;
- б) мощность, передаваемая с преобразовательной обмотки статора.

Таким образом, в номинальном режиме работы двигателя при искусственной коммутации вентилями инвертора его преобразовательная (инверторная) обмотка работает в режиме генератора реактивной мощности, разгружая обмотку статора от реактивной намагничивающей мощности. Это свойство предопределяет высокие энергетические показатели АВД в двигательном режиме при частоте вращения ротора  $n_p$  ниже синхронной  $n_c$ . При работе АВД при частоте вращения  $n_p$  выше синхронной  $n_c$  скольжение отрицательно и ЭДС имеет знак, противоположный знаку ЭДС ротора в двигательном режиме при частоте вращения ротора  $n_p < n_c$ . Поэтому для обеспечения двигательного режима при частоте вращения  $n_p > n_c$  в цепь ротора должна быть введена добавочная ЭДС, направленная навстречу ЭДС ротора и превосходящая ее по величине. Энергия должна поступать в роторную обмотку от преобразователя. При этом роторная группа вентилялей должна работать в инверторном режиме, а статорная – в выпрямительном, получая питание от преобразовательной обмотки статора, а последняя – как вторичная обмотка трансформатора – от основной обмотки статора.

Электромагнитная мощность, передаваемая с обмотки статора АВД

$$P_s = M\omega_1. \quad (1)$$

Электромагнитная мощность, передаваемая с обмотки ротора

$$P_{sp} = P_s S. \quad (2)$$

Мощность, потребляемая обмоткой статора

$$P_1 = P_s(1 + S) + P_{эм}, \quad (3)$$

где  $P_{эм}$  – сумма всех электромагнитных потерь.

Таким образом, при неизменном моменте мощность, потребляемая обмоткой статора из сети в рассматриваемом режиме при  $n_p > n_c$ , больше мощности, потребляемой двигателем в режиме работы при частоте вращения  $n_p < n_c$ .

Отсюда следует ряд важных выводов:

1. Реализация режима работы при частотах вращения выше синхронной  $n_p > n_c$  неизбежно связана (при неизменном моменте) с увеличением установленной мощности двигателя. При этом

энергетические характеристики будут менее привлекательными, чем в режиме работы при частоте вращения меньше синхронной.

2. Режим работы АД при частотах вращения  $n_p < n_c$  с энергетической точки зрения, с позиций минимизации стоимостных показателей установки является более предпочтительным, что необходимо учитывать при разработке электропривода.

Использование управляемого выпрямителя расширяет диапазон регулирования частоты вращения, а при искусственной коммутации с опережающим углом управления позволяет улучшить технико-экономические показатели АД, значительно улучшить коэффициент мощности и повысить коэффициент полезного действия. Следовательно, для повышения энергетических характеристик асинхронных вентильных двигателей необходимо использование искусственной коммутации тока инвертора и выпрямителя для реализации опережающего угла открытия вентилей в выпрямителе и отстающего в инверторе. Именно при таком управлении реактивные составляющие инвертора и выпрямителя имеют емкостный характер. Коммутация тока в таких режимах может быть выполнена в системах, собранных на полностью управляемых вентилях (реализация их на тиристорах требует специальных схем запираания тиристоров, поэтому рассматриваться не будет). На рис. 1 приведена схема АД с искусственной коммутацией тока и в выпрямителе, и в инверторе. Кроме основных полностью управляемых вентилей выпрямителя  $V_{16} \div V_{66}$  схема имеет отсекающие диоды  $V'_{16} \div V'_{66}$  и коммутирующие конденсаторы. Аналогичным образом выполнена схема инвертора.

Коммутационные процессы рассмотрим на примере инвертора. Пусть в исходном состоянии работают вентили  $V_{И1}$  и  $V_{И6}$ . Коммутация тока производится с вентиля  $V_{И1}$  на вентиль  $V_{И3}$ . Для этого сначала подается открывающий управляемый сигнал на вентиль  $V_{И3}$ . Естественная коммутация тока с вентиля  $V_{И1}$  на вентиль  $V_{И3}$  произойти не может, так как потенциал на вентиле  $V_{И3}$  меньше потенциала на вентиле  $V_{И1}$ . Поэтому процесс коммутации пойдет следующим образом. При закрытии вентиля  $V_{И1}$  ток фазы "а" пойдет по цепи «фаза "а", конденсатор  $C_{И1}$ , открытый вентиль  $V_{И1}$ , дроссель». При этом ток фазы "а" остается практически неизменным, равным  $I_d$ .

Напряжение на конденсатор  $C_{И1}$  увеличивается по линейному закону. Потенциал на выводах фазы "а" обмотки 3 АД увеличивается. После выравнивания потенциалов на выводах фаз "а" и "b" инверторной обмотки – обмотки 3 АД начинается процесс коммутации тока с фаз "а" на фазу "b".

Процесс искусственной коммутации отличается быстрым нарастанием напряжения на коммутирующем конденсаторе, поэтому он укорочен. Угол искусственной коммутации тока равен один - три градуса, поэтому изменением линейного напряжения самой обмотки за время коммутации пренебрегаем.

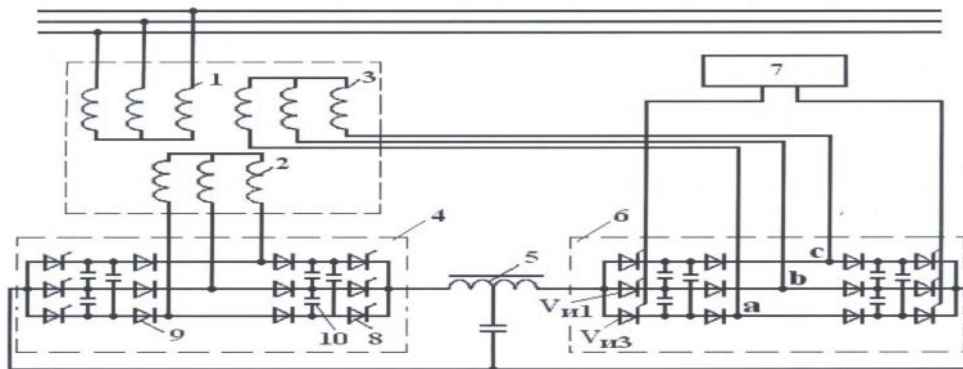


Рис. 1. Схема АД с искусственной коммутацией тока: 1 – высоковольтная обмотка, включенная на питающую сеть; 2 – обмотка ротора; 3 – низковольтная обмотка, подключенная к инвертору; 4 – выпрямитель, 5 – дроссель; 6 – инвертор; 7 – система управления; 8 – тиристоры; 9 – диоды; 10 – коммутирующая ёмкость

В такой постановке коммутационный процесс описывается дифференциально - интегральным уравнением:

$$\frac{I_d t}{C_k} - R_k i_k - L_k \frac{di_k}{dt} - \frac{1}{C_k} \int_0^t i_k dt = 0. \quad (4)$$

Здесь  $R_k, L_k, C_k$  – эквивалентные параметры коммутируемой цепи.

Пренебрегая величинами второго порядка, решение уравнения (5) можно привести к виду:

$$i_k = I_d - I_d e^{-\frac{t}{\tau}} \cos(\omega' t), \quad (6)$$

где  $\tau = \frac{2L_k}{R_k}$  - постоянная времени;  $\omega' = \sqrt{\frac{1}{L_k C_k} - \frac{R_k}{2L_k}}$  - угловая частота.

Принимая во внимание, что  $\frac{R_k}{2L_k} \ll \frac{1}{L_k C_k}$ , выражение (6) можно записать:

$$i_k = I_d - I_d e^{-\frac{t}{\tau}} \cos\left(\frac{1}{\sqrt{L_k C_k}} t\right), \quad (7)$$

где  $L_k = \frac{x_{k3}}{\pi f_1}$ .  $C_k = \frac{2}{3} C_n$ .

Ток фазы, выходящий из работы (фазы "a")

$$i_a = I_d - I_k = I_d e^{-\frac{t}{\tau}} \cos\left(\frac{1}{\sqrt{L_k C_k}} t\right). \quad (8)$$

Ток фазы, поступающий в работу (фазы "b")

$$i_b = i_k. \quad (9)$$

Время коммутации  $T_\gamma$  определяется из условия равенства нулю тока выходящей из работы фазы (в рассматриваемом случае – фазы "a")

$$i_a = I_d - i_k = 0$$

или

$$I_d e^{-\frac{t}{\tau}} \cos\left(\frac{1}{\sqrt{L_k C_k}} T\right) = 0.$$

Откуда

$$T_k = \frac{\pi \sqrt{L_k C_k}}{2}. \quad (10)$$

Напряжение на коммутирующем элементе

$$U_c = \frac{1}{C_k} \int_0^{T_k} i_k(t) dt \quad (11)$$

На рис. 2 приведены кривые изменения тока фаз "a" и "b" в процессе коммутации и изменения напряжения на коммутируемом конденсаторе для номинального режим работы при  $S = 0,33$ .

Кривые представлены в относительных единицах, при этом за базовое значение напряжения принимается амплитудное линейное значение ЭДС  $E_2$  (при неподвижном роторе).

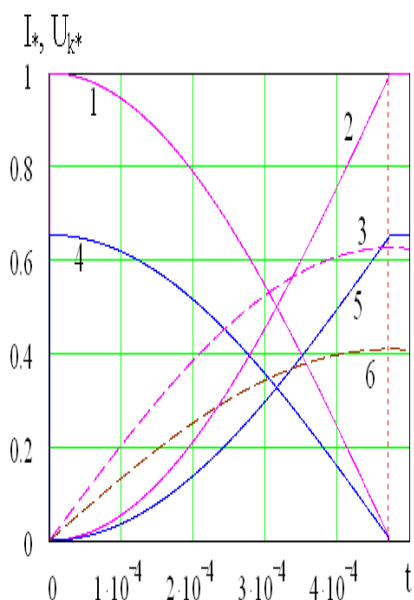


Рис. 2. Токи и напряжения в процессе коммутации: 1, 2 – токи коммутирующих фаз; 3 - напряжение на конденсаторе ( $S=S_H$ ); 4, 5, 6

#### Выводы

1. Предложен принципиально новый тип двигателей двойного питания – асинхронный вентильный двигатель (АВД). При питании его от сети высокого напряжения он имеет следующие преимущества:

- обмотка статора асинхронных двигателей большой мощности выполняется на высокое напряжение (до 10 кВ), а обмотка ротора по условиям надежности - на низкое напряжение. За счет использования преобразовательной обмотки на статоре исключается необходимость установки высоковольтного трансформатора, согласующего высокое напряжение обмотки ротора, а также сопутствующая высоковольтному трансформатору коммутационная аппаратура, за счет чего снижается общая стоимость привода;
- для установки высоковольтного трансформатора необходимо помещение, выполненное в соответствии с ПУЭ, необходима установка всего комплекта коммутационной аппаратуры, трансформаторов тока и напряжения. Все это чрезвычайно усложняет электропривод и резко увеличивает капитальные затраты на строительную часть подстанции. Предложенный АВД свободен от этих недостатков;
- снижаются потери в меди и стали (за счет исключения трансформатора);
- уменьшаются эксплуатационные расходы.

2. В номинальном режиме работы двигателя при искусственной коммутации вентилями инвертора его инверторная обмотка работает в режиме генератора реактивной мощности, разгружая обмотку статора от реактивной мощности намагничивания сердечника. Мощность скольжения непосредственно с инверторной обмотки передается на ротор, разгружая обмотку статора двигателя от части активной части мощности за вычетом потерь в цепи обмотки ротора и инвертора. Это обеспечивает высокие энергетические показатели АВД.

3. Рассмотрены процессы при искусственной коммутации на примере инвертора. Полученные аналитические выражения позволяют вычислить ток коммутирующей фазы, время коммутации  $T_\gamma$  и напряжение на коммутирующем элементе.

#### Литература

1. Келебаев К.К. Исследование электромагнитных процессов в электроприводе с машиной двойного питания для центробежных насосов // Известия КГТУ им. И.Раззакова 19/2009.
2. Бочкарев И.В., Келебаев К.К. Энергетические характеристики машины двойного питания привода центробежных насосов // Проблемы автоматики и управления: Научно-техн. журнал НАН КР. – Б.: Илим, 2010. С.

