

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Гетя А.Н.

ГП "Харьковское агрегатное конструкторское бюро"
Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 132, ГП "ХАКБ"
тел. (057) 707-02-71, факс (057) 707-02-73, E-mail: khadb@ukr.net

Финкельштейн В.Б., д.т.н., проф.

Харьковская Национальная академия городского хозяйства
Украина, 61002, Харьков, ул. Революции, 12, ХНАГХ, кафедра "Электротехника"
тел. (057) 732-93-69, E-mail: final@kharkov.ukrpack.net

В статті розглянуто вплив перехідних процесів у вентильному електродвигуну на характер його механічної характеристики. Отримана крива зміни струму на інтервалі комутації. Запропонована методика розрахунку механічної характеристики з врахуванням перехідних процесів.

В статье рассмотрено влияние переходных процессов в вентильном электродвигателе на характер его механической характеристики. Получена кривая изменения тока на интервале коммутации. Предложена методика расчета механической характеристики с учетом переходных процессов.

Вентильные электродвигатели находят применение в современной авиационной технике в качестве привода насосных станций, в гидравлических и электромеханических следящих приводах, в различных электромеханизмах поступательного и вращательного действия и других устройствах и уверенно вытесняют коллекторные электродвигатели постоянного тока. Однако дискретность электромагнитных процессов в вентильном электродвигателе обусловленная малым числом фаз, а также совместная работа электродвигателя с полупроводниковым коммутатором и обратной связью по положению ротора, приводит к необходимости учета влияния переходных процессов в многофазной обмотке при расчете механической и рабочих характеристик.

Цель настоящей работы заключается в учете влияния переходных процессов в обмотке вентиального электродвигателя на характер его механической и рабочих характеристик.

В вентильных электродвигателях разработки ГП "ХАКБ" применяется трехфазная однослойная обмотка, соединенная в звезду. У такой обмотки в любой момент времени подключены две фазы, а третья либо замкнута накоротко с одной из работающих фаз через шунтирующий диод, либо разомкнута и ток в ней равен нулю. В процессе коммутации фаз обмотки имеют место участки нарастания и спада тока, длительность которых определяется частотой вращения электродвигателя, которая в свою очередь зависит от индуктивности и сопротивления обмотки, характеристик силовых транзисторов и шунтирующих диодов. В литературе [1], при описании переходных процессов на различных участках коммутации, делаются допущения в части того, что силовой переключающий транзистор и шунтирующий диод являются идеальными, т.е. падение напряжения на них в открытом состоянии пренебрежимо мало. Однако такое допущение справедливо только для вентильных электродвигателей малой мощности, которые имеют сопро-

тивление обмотки, превышающее сопротивление открытого канала транзистора в десятки и сотни раз. В мощных вентильных электродвигателях, предназначенных для работы от системы электроснабжения самолета с номинальным напряжением 27 В, сопротивление обмотки соизмеримо с сопротивлением открытого канала транзистора и его необходимо учитывать при расчете механической и рабочих характеристик. Для примера, сопротивление двух, последовательно соединенных, фаз трехфазной обмотки вентиального электродвигателя мощностью 3 кВт, напряжением питания 27 В, составляет 7 мОм, а сопротивление открытого канала транзистора FB180SA10 International rectifier, предназначенного для коммутации обмоток такого электродвигателя - 6,5 мОм.

В вентильных электродвигателях, с энергетической точки зрения, наиболее выгодной является двухполупериодная коммутация [2], [3], когда ток в фазе обмотки на периоде коммутации меняет свое направление. Поскольку электромагнитные процессы в вентильном электродвигателе характеризуются повторяемостью с периодом 360 электрических градусов, то время пребывания фазы под током при двухполупериодной шестишаговой коммутации определится выражением:

$$t_i = 2 \cdot t_k, \quad (1)$$

где: t_k – длительность одного шага коммутации.

$$t_k = \frac{10}{p \cdot n}, \quad (2)$$

где: p – число пар полюсов; n – частота вращения ротора, об/мин.

При такой коммутации один шаг состоит из двух интервалов [4], [5], [6]. На одном интервале рис. 1а, ток протекает в двух фазах соединенных последовательно. На другом интервале рис. 1б, происходит нарастание тока в подключаемой фазе, изменение тока в работающей фазе и спадание тока в фазе замкнутой с работающей фазой через шунтирующий диод.

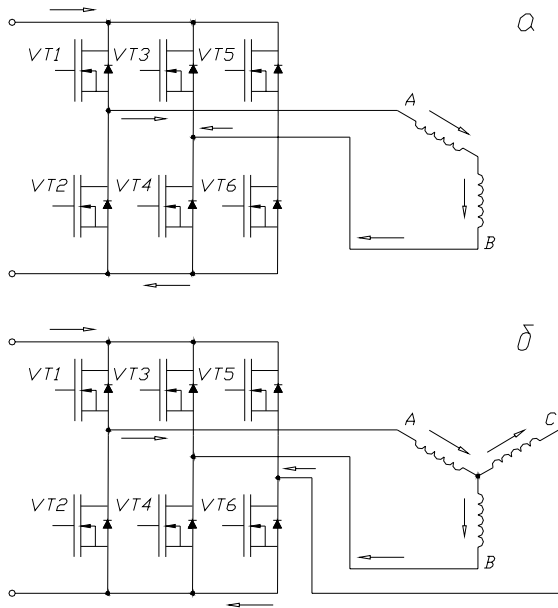


Рис. 1. Схемы подключения фаз обмотки электродвигателя на различных интервалах коммутации

При рассмотрении первого шага коммутации из рис. 1 видно первоначальное подключение к источнику питания фаз А и В через транзисторы VT1 и VT4 соответственно. После поворота ротора на 60 электрических градусов, по сигналам с датчика положения ротора, происходит отпирание транзистора VT6 и подключение к источнику питания фазы С. При этом, фаза В отключается и замыкается через шунтирующий диод транзистора VT3. В фазе А наблюдается провал тока. Минимальное и максимальное значения изменения тока в фазе А, определяется длительностью второго интервала коммутации, на котором ток протекает в трех фазах одновременно рис. 1б. В момент запуска или изменения нагрузки на валу электродвигателя, первоначальное значение тока в фазе и значение к которому он возвращается после провала, отличается друг от друга. В установившемся режиме работы эти значения тока совпадают.

Для определения мгновенных значений тока, частоты вращения и электромагнитного момента необходимо решить систему дифференциальных уравнений, описывающих процессы преобразования энергии в электродвигателе на каждом интервале коммутации с учетом падения напряжения на открытом канале транзистора и шунтирующем диоде.

На первом интервале коммутации, рис. 1а, система уравнений может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} 2 \cdot \frac{dI}{dt} \cdot (L + M) + 2 \cdot (R + R_{VT}) \cdot I + E_{AB} = U \\ J_{pr} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{дв} - M_n - M_{п} \\ M_{дв} = 2 \cdot I \cdot C_m \\ \frac{d\alpha}{dt} = \omega \end{cases} \quad (3)$$

для второго интервала согласно рис. 1б:

$$\begin{cases} (L + M) \cdot \left(\frac{dI_A}{dt} + \frac{dI_B}{dt} \right) + (R + R_{VT}) \cdot I_A + \\ + (R + R_{DVT}) \cdot I_B + E_{AB} = 0 \\ (L + M) \cdot \left(\frac{dI_A}{dt} + \frac{dI_C}{dt} \right) + \\ + (R + R_{VT}) \cdot (I_A + I_C) + E_{AC} = U \\ -I_A + I_B + I_C = 0 \\ J_{pr} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{дв} - M_n - M_{п} \\ M_{дв} = 2 \cdot I_A \cdot C_m \\ \frac{d\alpha}{dt} = \omega \end{cases} \quad (4)$$

где I_A, I_B, I_C – токи в фазах А, В, С; E_{AB}, E_{AC} – суммарная противо-ЭДС вращения наводимая в фазах А-В и А-С соответственно; $L=L_A=L_B=L_C$ – индуктивность фазы; M – взаимная индуктивность фаз обмотки; $R=R_A=R_B=R_C$ – сопротивление фазы; R_{VT}, R_{DVT} – сопротивление открытого канала силового транзистора и шунтирующего диода соответственно; U – напряжение питания; J_{pr} – приведенный момент инерции вала и нагрузки; C_m – коэффициент момента; $M_{дв}$ – электромагнитный момент; M_n – нагрузочный момент на валу электродвигателя; $M_{п}$ – момент потерь в электродвигателе.

Момент от потерь в стали и подшипниках электродвигателя можно записать следующим образом:

$$M_{п}(\omega) = k_{ст} \cdot \omega^{0,5} + k_{подш} \cdot \omega^{2/3} \quad (5)$$

где $k_{ст}$ – постоянный коэффициент, зависящий от геометрии магнитопровода, магнитных свойств стали и ее технологической обработки; $k_{подш}$ – коэффициент, зависящий от размеров подшипников, вязкости примененной смазки и нагрузки действующей на подшипники.

Системы уравнений (3) и (4) интегрируются численно, например методами Рунге-Кутты. Шаг интегрирования выбирается с учетом длительности одного шага коммутации определенного из уравнения (2). Например, для обеспечения требуемой точности решения уравнений, вентильного электродвигателя мощностью 3 кВт, достаточно иметь 100 точек на одном шаге коммутации.

Начальными условиями являются значения тока в каждой фазе на конце предыдущего интервала коммутации. При подключении электродвигателя токи в фазах равны нулю.

Электрические схемы, соответствующие системам уравнений (3) и (4) приведены на рис. 2.

Для численного решения системы уравнений (3) и (4) необходимо представить разрешенными относительно первых производных.

Для интервала коммутации, согласно рис. 1а имеем:

$$\begin{cases} \frac{dI}{dt} = \frac{U - 2 \cdot (R + R_{VT}) \cdot I - E_{AB}}{2 \cdot (M + L)} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{2 \cdot I \cdot C_m - M_H - M_{II}}{J_{pr}} \\ \frac{d\alpha}{dt} = \omega \end{cases} \quad (6)$$

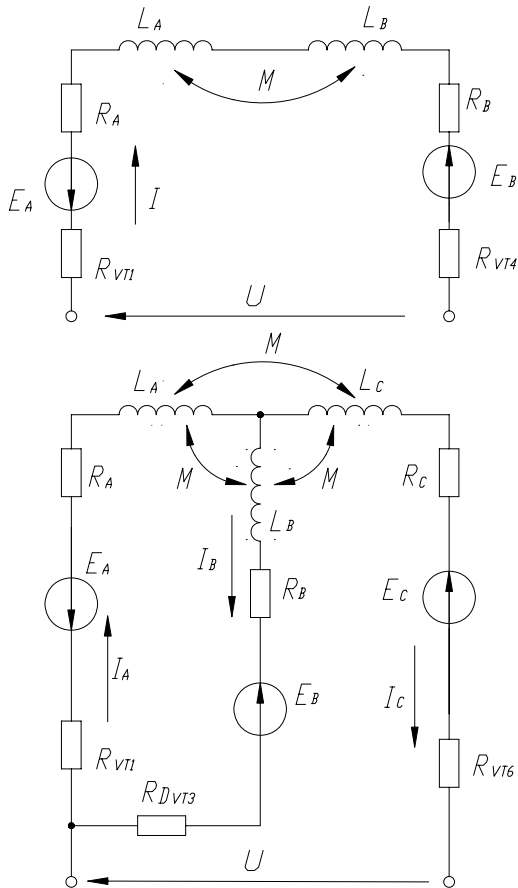


Рис. 2. Схемы обмотки и коммутатора для интервалов коммутации приведенных на рис. 1а и 1б

а, для интервала коммутации, согласно рис. 1б имеем:

$$\begin{cases} \frac{dI_A}{dt} = -\frac{1}{3 \cdot (M + L)} \cdot [(R + R_{VT}) \cdot (2 \cdot I_A + I_C) + (R + R_{D_{VT}}) \cdot I_B + E_{AC} + E_{AB} - U] \\ \frac{dI_B}{dt} = -\frac{1}{3 \cdot (M + L)} \cdot [(R + R_{VT}) \cdot (I_A - I_C) + U - E_{AC} + 2 \cdot E_{AB} + 2 \cdot (R + R_{D_{VT}}) \cdot I_B] \\ \frac{dI_C}{dt} = \frac{1}{3 \cdot (M + L)} \cdot [2 \cdot U - 2 \cdot E_{AC} + E_{AB} - (R + R_{VT}) \cdot (I_A + 2 \cdot I_C) + (R + R_{D_{VT}}) \cdot I_B] \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{2 \cdot I_A \cdot C_m - M_H - M_{II}}{J_{pr}} \\ \frac{d\alpha}{dt} = \omega \end{cases} \quad (7)$$

Решения систем дифференциальных уравнений (6), (7) при различных нагрузочных моментах позволяют получить механическую и рабочие характеристики вентильного электродвигателя.

На рис. 3 приведена расчетная и экспериментальная механические характеристики вентильного электродвигателя мощностью 3 кВт. Расчетная характеристика показана сплошной линией, а экспериментальные точки, полученные в процессе испытаний, изображены квадратами. Из рис. 3 видно, что расчет с достаточной для практических целей точностью, отражает процессы, проходящие в электродвигателе.

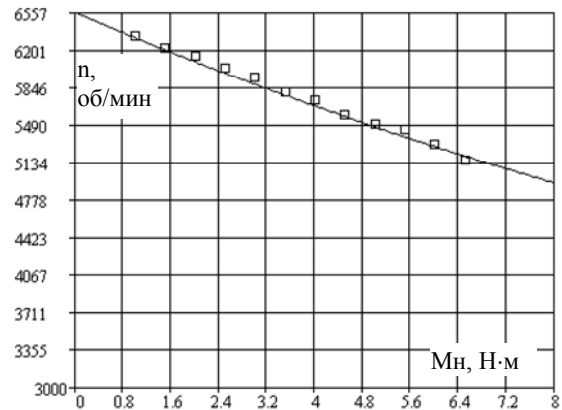


Рис. 3. Механическая характеристика вентильного электродвигателя номинальной мощностью 3 кВт
— расчетная механическая характеристика,
□ □ □ — измеренные значения зависимости $n=f(M)$

Характер изменения скорости ротора, в процессе запуска, показан на рис. 4, а кривые изменения тока в фазах электродвигателя в процессе разгона приведены на рис. 5.

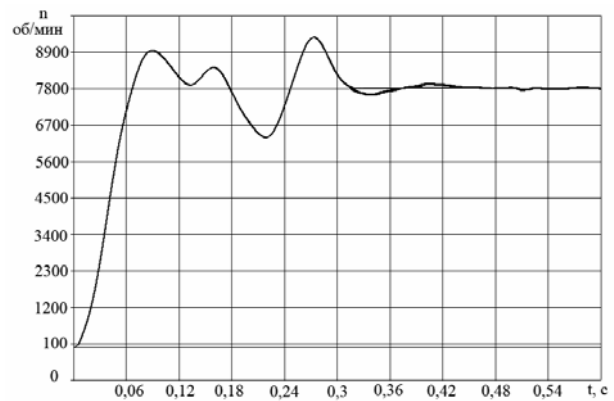


Рис. 4. Зависимость частоты вращения от времени

На рис. 5 показано нарастание тока в подключаемых фазах А и В, при этом ток в фазе С равен нулю. Далее виден второй участок коммутации на котором идет нарастание тока в подключаемой фазе С и спадание тока в отключаемой фазе В. В фазе А наблюдается колебание тока. Затем процесс повторяется.

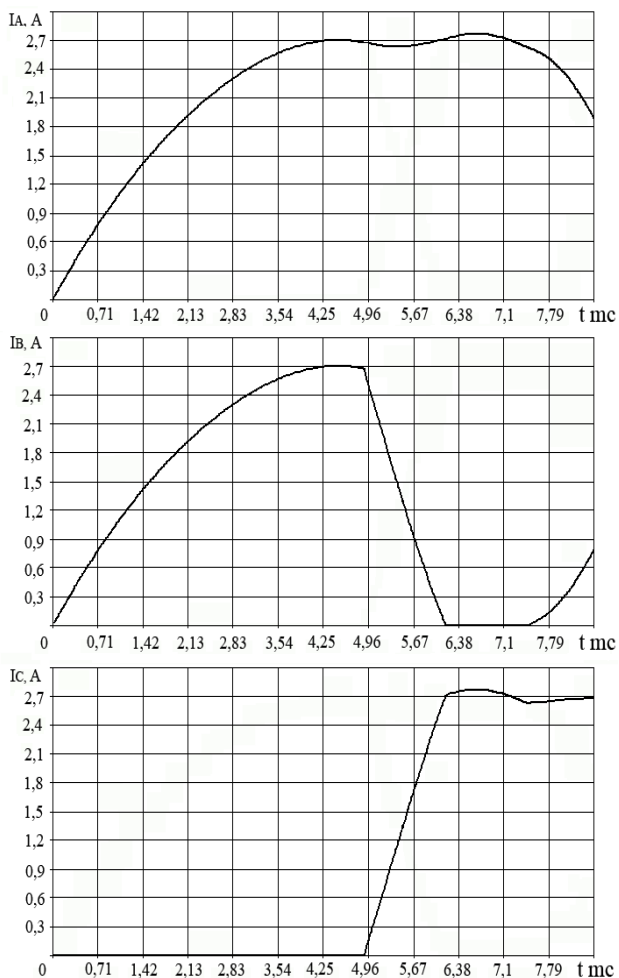


Рис. 5. Токи в фазах обмотки в процессе коммутации

Характер протекающих процессов, приведенных на рис. 4 и 5, обусловлен индуктивностью, взаимной индуктивностью и сопротивлением фаз, а также сопротивлением ключей и шунтирующего диода.

На рис. 6 представлен авиационный вентильный электродвигатель ДВ-3000 разработки и производства ГП "ХАКБ", расчет которого, выполнен по приведенной методике. КПД электродвигателя при напряжении питания 27 В и номинальной мощности 3 кВт – 83 %, а удельная мощность 0,57 кВт/кг. При напряжении питания 56 В и номинальной мощности на валу 6,8 кВт КПД составил 88 %, а удельная мощность 1,28 кВт/кг [7].

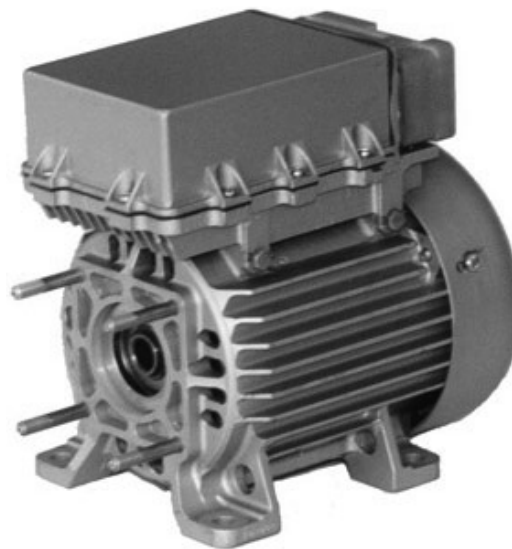


Рис. 6. Электродвигатель ДВ-3000

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты расчета по предложенной методике с учетом сопротивления открытого канала силового транзистора и сопротивления перехода шунтирующего диода соответствуют измеренным параметрам вентильного электродвигателя с необходимой для инженерных расчетов точностью.

2. Вентильный электродвигатель, с параметрами, рассчитанными по данной методике, выдержал все виды испытаний и успешно эксплуатируется на самолете АН-140.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Хрушев В.В. Электрические машины систем автоматики Л.: Энергоатомиздат, 1985. 364с.
- [2] Овчинников И.Е., Лебедев Н.И. Бесконтактные двигатели постоянного тока Л.: Наука, 1979. 270с.
- [3] Адволоткин Н.П., Гращенков В.Т. и др. Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока Л.: Энергоатомиздат, 1984. 160с.
- [4] Brushless DC motor controller. Motorola.
- [5] J. Figueroa, J. Cros, P. Viarouge "Current control strategies for seven phase brushless DC motors" 15th International conference on electrical machines, August, 2002, Brugge, Belgium
- [6] Implementation of a sensorless speed controlled brushless DC drive using TMS320F240. Texas Instrument Europe. November 1997
- [7] Гетья А.Н., Шарабан Ю.В. Перспективы применения вентильных электродвигателей в агрегатах авиационной техники // Электротехника и электромеханика. – 2003. - № 1. –С. 26-28.

Поступила 11.01.2005