

УДК 681.5

В.А. МАТУСЕВИЧ<sup>1</sup>, А.Н. ГЕТЯ<sup>1</sup>, Е.В. ПАВЛЮК<sup>1</sup>, С.Н. ФИРСОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>Государственное предприятие «Харьковское агрегатное конструкторское бюро»,  
Украина<sup>2</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

## РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Разработана компьютерная модель вентильного электродвигателя постоянного тока с трехфазной якорной обмоткой и постоянными магнитами на роторе, которая реализована в среде Matlab-Simulink. Рассчитаны переходные процессы в электродвигателе и электромеханическом приводе на базе вентильного электродвигателя. Получены зависимости изменения токов в фазах электродвигателя без нагрузки и в составе привода, частоты вращения и угла поворота выходного звена электромеханического привода.

система автоматического управления, электромеханический привод, вентильный электродвигатель постоянного тока, регулятор, переходный процесс

### Введение

Государственное предприятие «Харьковское агрегатное конструкторское бюро» (ГП «ХАКБ») занимается разработкой электромеханических приводов для систем управления полетом летательных аппаратов. Применение электромеханических приводов в авиационной технике связано с простотой и относительной дешевизной их изготовления по сравнению с электрогидравлическими приводами, лучшими массогабаритными показателями для низких потребных усилий на выходном звене, а также с постоянным развитием вентильных электродвигателей постоянного тока на основе электронной элементной базы с высокими удельными энергетическими характеристиками. Решение задач анализа и синтеза систем автоматического управления с исполнительным механизмом на основе вентильного электродвигателя требует разработки математических моделей, адекватно описывающих динамику электродвигателя с электронным коммутатором с учетом нелинейности его характеристик и поведения в области малых частот вращения ротора.

Для решения таких сложных задач целесообразно объединение усилий технических и научных школ, связанных с современными направлениями в области управления, к которым относится кафедра систем управления летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».

### 1. Постановка проблемы

Первые публикации, касающиеся устройства и принципа действия вентильных электродвигателей постоянного тока, относятся к 30-м годам XX века [1]. Однако совершенствование электронных блоков и методов управления приводит к необходимости постоянного уточнения математических моделей вентильных электродвигателей с учетом нелинейности его характеристик и поведения в области малых частот вращения ротора. Рассматриваемая в данной статье модель и ее компьютерная реализация разрабатывалась совместно специалистами кафедры систем управления летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета и специалистами Государственного предприятия «Харьковское агрегатное конструкторское бюро».

## 2. Разработка компьютерной модели вентильного электродвигателя

Вентильный электродвигатель постоянного тока конструктивно представляет собой ротор с закрепленными на нем постоянными магнитами и неподвижную трехфазную якорную обмотку, расположенную на статоре. Коммутация фаз обмотки осуществляется в замкнутой системе с использованием датчика положения ротора (ДПР) дискретного действия, системы управления и силового полупроводникового преобразователя. Напряжение питания обмоток электродвигателя формируется в зависимости от положения ротора по сигналам ДПР в соответствии с таблицей коммутации, запрограммированной в микросхеме управления. Таблица шестишаговой коммутации, реализованная в микросхеме UC 1625 производства фирмы UNITRODE, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Тип вращения	Сигналы ДПР			Состояние «нижних» транзисторов			Состояние «верхних» транзисторов		
	S <sub>A</sub>	S <sub>B</sub>	S <sub>C</sub>	A	B	C	A	B	C
Прямое вращение	0	0	1	0	1	0	1	0	0
	0	1	1	0	0	1	1	0	0
	0	1	0	0	0	1	0	1	0
	1	1	0	1	0	0	0	1	0
	1	0	0	1	0	0	0	0	1
Обратное вращение	1	0	1	0	0	1	0	1	0
	1	0	0	0	0	1	1	0	0
	1	1	0	0	1	0	1	0	0
	0	1	0	0	1	0	0	0	1
	0	0	1	1	0	0	0	0	1

Непрерывность подключения фаз обмотки к питающему напряжению обеспечивает система управления вентильным электродвигателем в отличие от коллекторного электродвигателя постоянного тока, где для этой цели служит коллекторный узел.

У трехфазной обмотки, соединенной в звезду, в любой момент времени подключены к источнику питания две фазы, а третья накоротко замкнута с одной из работающих фаз через шунтирующий диод. С энергетической точки зрения в вентильных электродвигателях наиболее выгодной является

двухполупериодная коммутация [2], когда ток в фазе обмотки на периоде коммутации меняет свое направление. При такой коммутации имеет место два интервала, на одном из которых, внекоммутационном, ток протекает в двух фазах, соединенных последовательно. На другом, коммутационном интервале происходит нарастание тока в подключаемой фазе, изменение тока в работающей фазе и спадание тока в фазе, замкнутой через шунтирующий диод. Падение тока до нуля соответствует переходу к внекоммутационному интервалу.

На рис. 1 показаны схемы подключения фаз обмотки электродвигателя к силовому полупроводниковому преобразователю для различных 12 интервалов коммутации. Изменение сигналов ДПР происходит при переходе с нечетного интервала коммутации на четный интервал.

В зависимости от значения электрического угла поворота ротора объект управления описывается различными системами дифференциальных уравнений. В общем виде система дифференциальных уравнений для участков коммутации записывается следующим образом:

$$\begin{cases}
 (L + M) \cdot \left( k_{1,1} \frac{dI_A}{dt} + k_{1,2} \frac{dI_B}{dt} + k_{1,3} \frac{dI_C}{dt} \right) + \\
 + (R + R_{VT}) \cdot (k_{1,4} \cdot I_A + k_{1,5} \cdot I_B + k_{1,6} \cdot I_C) + \\
 + (R + R_{DVT}) \cdot (k_{1,7} \cdot I_A + k_{1,8} \cdot I_B + k_{1,9} \cdot I_C) + \\
 + k_{1,10} \cdot C_A \cdot E_A + k_{1,11} \cdot C_B \cdot E_B + k_{1,12} \cdot C_C \cdot E_C = 0 \\
 (L + M) \cdot \left( k_{2,1} \frac{dI_A}{dt} + k_{2,2} \frac{dI_B}{dt} + k_{2,3} \frac{dI_C}{dt} \right) + \\
 + (R + R_{VT}) \cdot (k_{2,4} \cdot I_A + k_{2,5} \cdot I_B + k_{2,6} \cdot I_C) + \\
 + k_{2,7} \cdot C_A \cdot E_A + k_{2,8} \cdot C_B \cdot E_B + k_{2,9} \cdot C_C \cdot E_C = U \\
 k_{3,1} \cdot I_A + k_{3,2} \cdot I_B + k_{3,3} \cdot I_C = 0 \\
 J_{pr} \frac{d\omega_p}{dt} = M_{дв} - M_H - M_H \\
 M_{дв} = k_{3,4} \cdot C_A \cdot I_A + k_{3,5} \cdot C_B \cdot I_B + k_{3,6} \cdot C_C \cdot I_C \\
 \frac{d\alpha}{dt} = \omega_p
 \end{cases} \quad , (1)$$

где

$$\begin{cases}
 C_A = C \cdot \Phi_m \cdot \sin(p \cdot \alpha), \\
 C_B = C \cdot \Phi_m \cdot \sin(p \cdot (\alpha - 120^\circ)), \\
 C_C = C \cdot \Phi_m \cdot \sin(p \cdot (\alpha - 240^\circ)).
 \end{cases} \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2) приняты следующие условные обозначения:

$L$  – индуктивность фазы обмотки статора, Гн;  
 $R$  – сопротивление фазы обмотки статора, Ом;  
 $M$  – взаимная индуктивность фаз обмотки статора, Гн;  
 $R_{VT}, R_{DVT}$  – сопротивления открытого канала силового транзистора и шунтирующего диода соответственно, Ом;  
 $M_{дв}$  – электромагнитный момент двигателя, Н·м;  
 $M_n$  – момент нагрузки, Н·м;  
 $M_p$  – момент потерь в электродвигателе, Н·м;  
 $\omega_p$  – частота вращения ротора электродвигателя, рад/с;  
 $\alpha$  – угол поворота ротора в радианах;  
 $J_{pr}$  – приведенный момент инерции вращающихся частей к ротору электродвигателя, кг·м<sup>2</sup>;  
 $p$  – число пар полюсов электродвигателя;  
 $C$  – постоянный коэффициент, зависящий от полюсности электродвигателя и типа обмотки;  
 $\Phi_m$  – магнитный поток постоянных магнитов, Вб;  
 $I_A, I_B, I_C$  – ток в фазах А, В, С соответственно, А;  
 $U$  – напряжение питания электродвигателя, В;  
 $k_{i,j}$  – коэффициенты, определяющие состав дифференциальных уравнений для различных участков коммутации.

Значения коэффициентов  $k_{i,j}$  для различных участков коммутации согласно рис. 1 для прямого вращения приведены в табл. 2.

ЭДС вращения, наводимая в одной фазе трехфазной обмотки при синусоидальном распределении магнитной индукции в зазоре электродвигателя, записывается следующим образом [3-5]:

$$\begin{aligned} E_A &= C_A \cdot \omega_p, \\ E_B &= C_B \cdot \omega_p, \\ E_C &= C_C \cdot \omega_p. \end{aligned} \quad (3)$$

На основе математической модели (1), а также схем подключения фаз обмотки для различных участков коммутации, показанных на рис. 1, в пакете математического моделирования Matlab-Simulink была разработана компьютерная модель вентильного электродвигателя, которая изображена на рис. 2.

Таблица 2

Коэффициенты $k_{i,j}$ в системе уравнений (1)													
$j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Номер схемы на рис. 1	i=1												
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	6	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	8	-1	-1	0	-1	0	0	0	-1	0	1	1	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	-1	0	-1	0	0	-1	-1	0	0	1	0	1
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	-1	-1	0	-1	0	0	0	-1	0	1	1
	i=2												
	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0			
	2	1	0	1	1	0	1	0	1	1			
	3	1	0	1	1	0	1	0	1	0			
	4	0	1	1	0	1	1	1	0	1			
	5	0	1	1	0	1	1	0	0	1			
	6	1	1	0	1	1	0	1	1	0			
	7	1	1	0	1	1	0	1	0	0			
	8	-1	0	-1	-1	0	-1	0	1	1			
	9	1	0	1	1	0	1	0	1	0			
	10	0	-1	-1	0	-1	-1	1	0	1			
	11	0	1	1	0	1	1	0	0	1			
	12	-1	-1	0	-1	-1	0	1	1	0			
	i=3												
	1	0	0	0	1	1	0						
	2	-1	1	1	1	0	0						
	3	0	0	0	1	0	1						
	4	-1	-1	1	0	0	1						
	5	0	0	0	0	1	1						
	6	1	-1	-1	0	1	0						
	7	0	0	0	1	1	0						
	8	1	-1	-1	1	0	0						
	9	0	0	0	1	0	1						
10	1	1	-1	0	0	1							
11	0	0	0	0	1	1							
12	-1	1	-1	0	1	0							

Модель состоит из блока синхронного электродвигателя, силового полупроводникового преобразователя, логического блока, моделирующего взаимодействие ДПР и силовых транзисторов преобразователя, источника питания, различных логических элементов, а также устройств вывода графической информации.

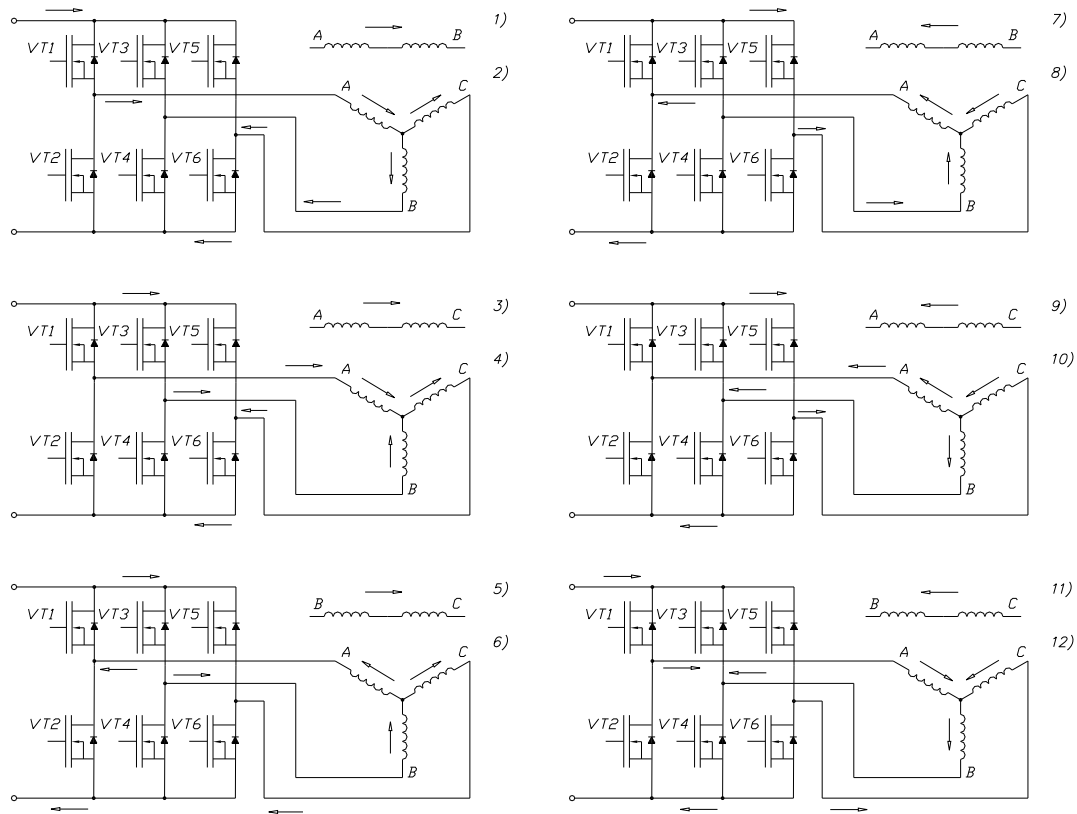


Рис. 1. Схема подключения фаз обмотки электродвигателя к силовому преобразователю для различных участков коммутации

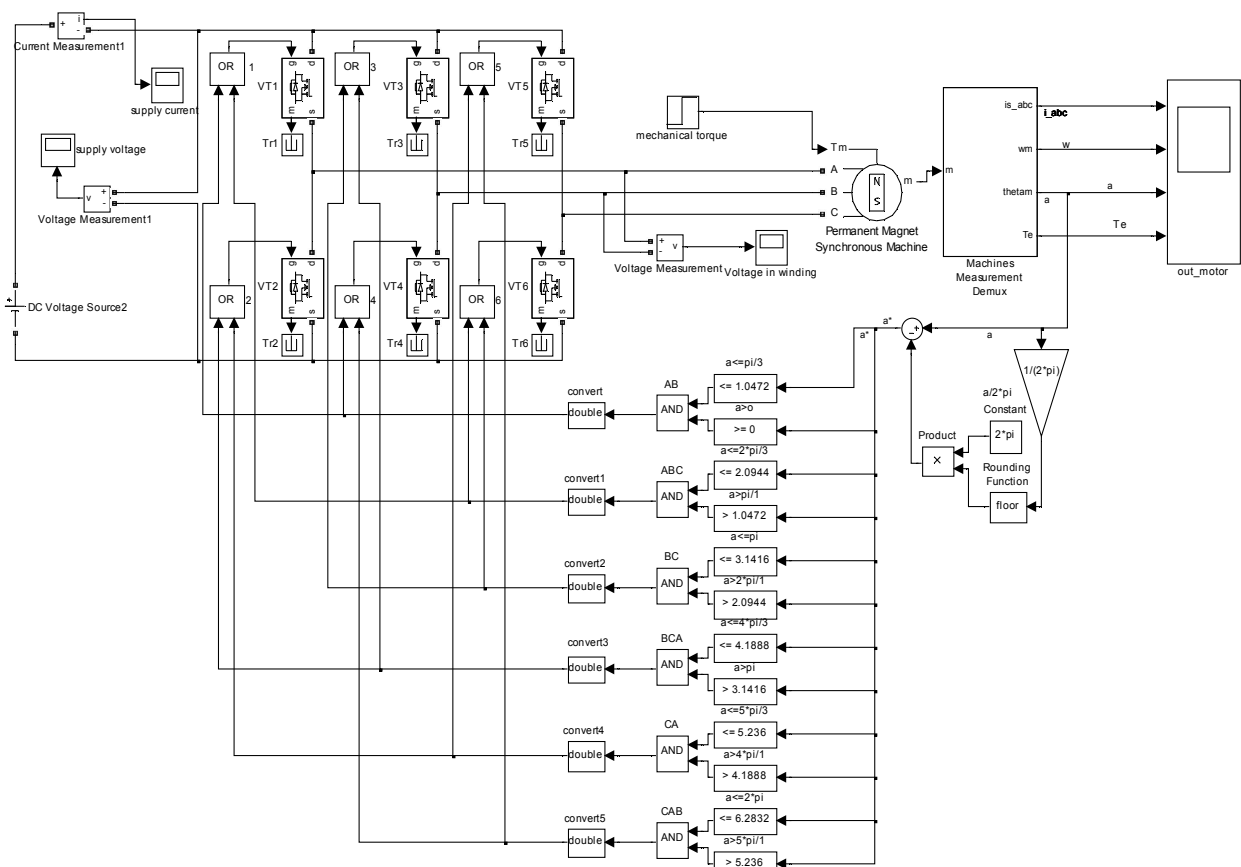


Рис.2. Модель вентильного электродвигателя в среде Matlab-Simulink

Для моделирования электромеханической части вентильного электродвигателя был использован блок, моделирующий синхронный электродвигатель с постоянными магнитами на роторе и трехфазной соединенной в звезду обмоткой на статоре из пакета расширения SimPowerSystems. Магнитное поле в зазоре этого электродвигателя носит синусоидальный характер. Входящими параметрами для блока служат: сопротивление, индуктивности по осям d и q, магнитный поток возбуждения, момент инерции ротора, число пар полюсов и коэффициент трения.

Для моделирования силовых транзисторов преобразователя использовались имитационные ключи MOSFET со встроенным обратным диодом.

ДПП представлен логическими элементами, формирующими управляющие команды для силового полупроводникового преобразователя в зависимости от угла положения ротора вентильного электродвигателя.

В результате математического моделирования в пакете Matlab-Simulink получены переходные характеристики электродвигателя. На рис. 3 показаны зависимости токов в фазах электродвигателя в процессе запуска и изменение частоты вращения ротора.

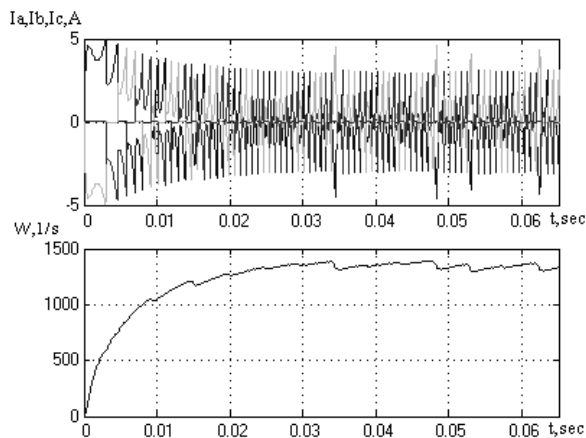


Рис. 3. Переходные процессы в вентильном электродвигателе при запуске

Полученная модель была использована для моделирования работы электромеханического привода с вентильным электродвигателем в качестве исполнительного элемента. Для управления использовался пропорционально-дифференциальный закон

$$U = (\alpha_{прог}(t) - \alpha_{факт}) \cdot k_{проп} - \frac{d\alpha_{факт}}{dt} \cdot k_{диф},$$

где  $\alpha_{прог}(t)$  – программный закон изменения координаты выходного звена привода;

$\alpha_{факт}$  – текущая координата выходного звена привода;

$k_{проп}$  – коэффициент усиления пропорциональной составляющей;  $k_{диф}$  – коэффициент усиления дифференциальной составляющей.

На рис. 4 показаны переходные характеристики электромеханического привода без нагрузки при ступенчатом входном воздействии, равном 2°.

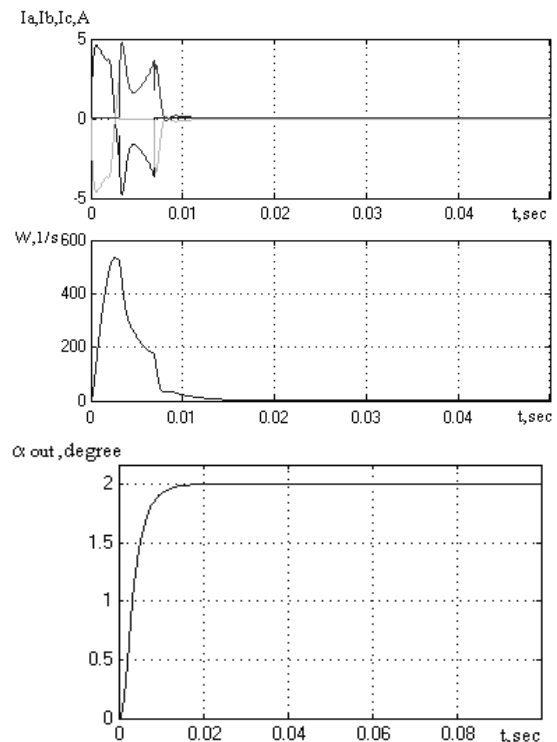


Рис. 4. Переходные характеристики привода при ступенчатом входном воздействии без нагрузки

На рис. 5 изображены переходные характеристики электромеханического привода при

номинальной нагрузке и ступенчатом входном воздействии, равном  $2^\circ$ .

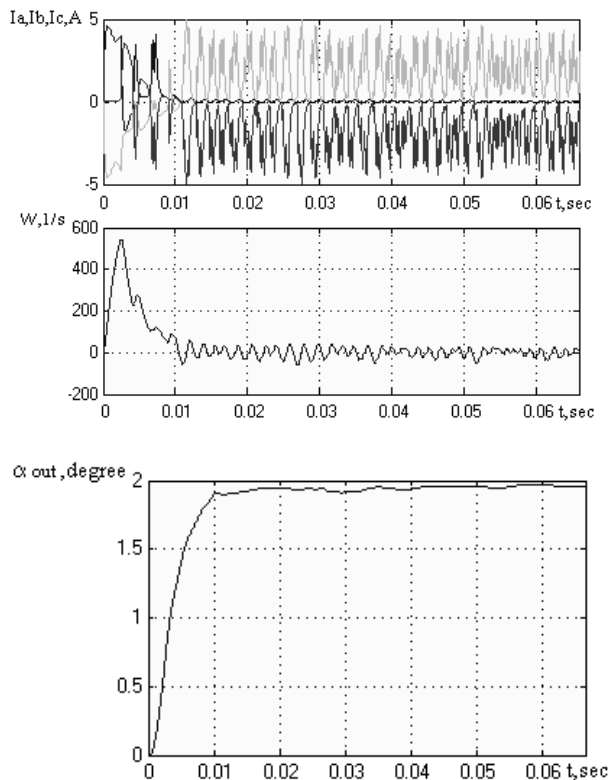


Рис. 5. Переходные характеристики привода при ступенчатом входном воздействии и номинальной нагрузке

### Заключение

Полученная компьютерная модель вентильного электродвигателя постоянного тока с достаточной для инженерных расчетов точностью описывает электромагнитные и электромеханические процессы в электродвигателе и может использоваться при анализе динамики и синтезе законов управления электромеханических приводов на его основе.

### Литература

1. Бугаев Ф.И., Эттингер Е.Л. Новые схемы вентильных двигателей // Вестник электропромышленности. – 1937. - № 2.
2. Гетья А.Н., Финкельштейн В.Б. Расчет характеристик вентильных электродвигателей с учетом переходных процессов // Электротехника и электромеханика. – 2005. – № 2. – С. 15-18.
3. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 364 с.
4. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
5. Гетья А.Н., Финкельштейн В.Б. ЭДС вращения вентильного электродвигателя с постоянными магнитами на роторе // Электротехника и электромеханика. – 2005. – № 3. – С. 17-19.

Поступила в редакцию 16.02.2007

**Рецензент:** лауреат Государственной премии Украины, д-р техн. наук, проф. Н.Д. Кошевой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.