

В.Б. Финкельштейн, А.Б. Егоров

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЕТЫРЕХФАЗНОГО ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПИТАНИИ ОТ БЕСКОНДЕНСАТОРНОГО КОММУТАТОРА

*Розглянуто електромеханічні процеси в вентильному реактивному двигуні і його характеристики при живленні від комутатора фірми Graseby Controls Ltd з вилученими з його схеми конденсаторами. Розроблено математичну модель, проведено чисельний і експериментальний аналіз характеристик і параметрів вентильного реактивного двигуна. Результати, які представлені в статті, дозволяють проводити вибір числа витків і потужність двигуна в порівнянні з двигуном, що живиться від комутатора за схемою асиметричного моста в залежності від технічних вимог. Бібл. 9, табл. 1, рис. 10.*

**Ключові слова:** вентильний реактивний двигун, комутатор, потокозчеплення фаз, кут повороту ротора, потужність двигуна.

*Рассмотрены электромеханические процессы в вентильном реактивном двигателе и его характеристики при питании от коммутатора фирмы Graseby Controls Ltd с изъятными из его схемы конденсаторами. Разработана математическая модель, проведен численный и экспериментальный анализ характеристик и параметров вентильного реактивного двигателя. Результаты, которые представлены в статье, разрешают проводить выбор числа витков и мощности двигателя в сравнении с двигателем, который питается от коммутатора по схеме асимметрического моста в зависимости от технических требований. Библ. 9, табл. 1, рис. 10.*

**Ключевые слова:** вентильный реактивный двигатель, коммутатор, потокозчепление фаз, угол поворота ротора, мощность двигателя.

**Введение. Постановка задачи.** В настоящее время все чаще в различных машинах и механизмах применяются вентильные реактивные двигатели (ВРД), известные в западных странах и в США как Switched Reluctance Motor (SRM) [7-9], в России – как вентильно-индукторные двигатели [6] (ВИД) и вентильные индукторно-реактивные двигатели [2] (ВИРД), в Украине – ВРД. При проектировании этих двигателей решается вопрос выбора коммутатора.

**Анализ последних достижений и публикаций по данному вопросу.** В то время, как коммутатор по схеме асимметричного моста [9] (рис. 1) включает восемь транзисторов и восемь диодов; коммутатор Миллера [9] (рис. 2) содержит шесть транзисторов и шесть диодов; в схему коммутатора фирмы Graseby Controls Ltd [9] (рис. 3), кроме четырех транзисторов и четырех диодов, входят два конденсатора. Кроме того, в коммутаторе (рис. 3) имеет место дисбаланс напряжений, что приводит к увеличению пульсаций момента и к существенному снижению мощности двигателя.

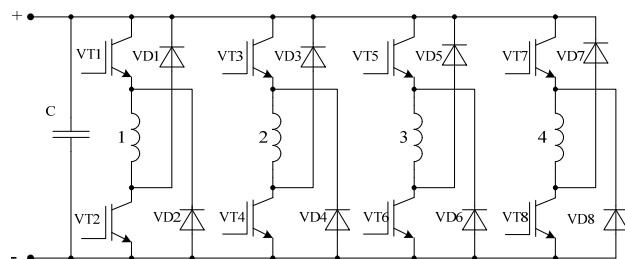


Рис. 1. Коммутатор по схеме асимметричного моста

При питании двигателя по схеме Миллера его мощность уменьшается на 20 % по сравнению с мощностью двигателя при его питании от коммутатора по схеме асимметричного моста [4]. Наибольшая мощность двигателя получается при его питании по схеме асимметричного моста по сравнению с мощностью

двигателя при питании от любых коммутаторов по иным схемам. В значительной степени свойствами коммутатора определяются характеристики двигателя.

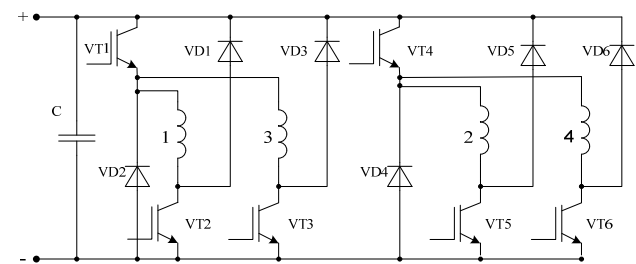


Рис. 2. Коммутатор Миллера

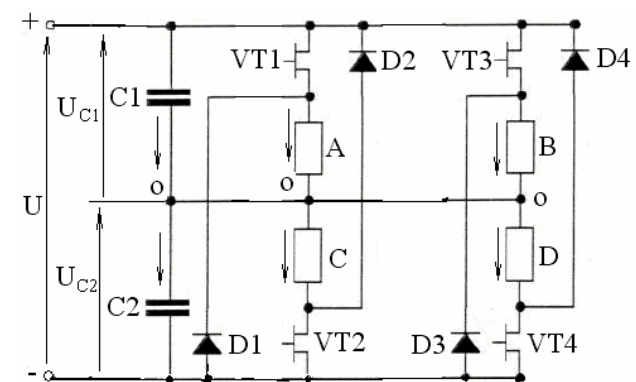


Рис. 3. Коммутатор фирмы Graseby Controls Ltd

В [5, 6] для питания четырехфазного ВРД применен коммутатор (рис. 5). Этот коммутатор состоит из четырех транзисторов и четырех диодов, но особенности работы схемы, математическая модель и характеристики двигателя, как с обычным, так и с клювообразным ротором, при питании от этого коммутатора не рассмотрены.

**Целью работы** является разработка математической модели для расчета электромеханических харак-

теристик ВРД при питании от коммутатора с четырьмя транзисторами и четырьмя диодами для определения параметров обмоток двигателей, позволяющих улучшить виброакустические характеристики и получить высокие экономические показатели.

**Разработка математической модели.** Магнитная цепь двигателя с размещенными обмотками фаз представлена на рис. 4.

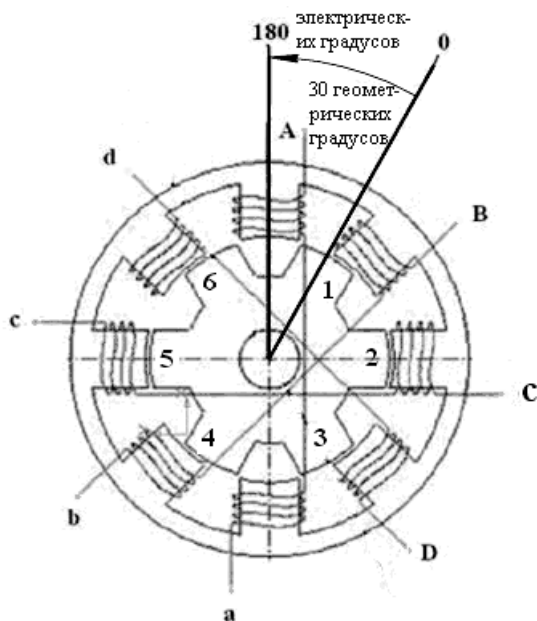


Рис. 4. Магнитная цепь двигателя

Схема коммутатора показана на рис. 5, отдельные звенья схемы состоят из фаз *A* и *D*; *C* и *B*.

Принято, что сопротивление транзисторов в открытом состоянии и диодов для прямого тока равно нулю, а сопротивление транзисторов в закрытом состоянии и диодов для обратного напряжения равно бесконечности. При питании одной фазы двигателя и при питании одновременно двух соседних фаз (рис. 4) определен поток через зубец [2]. При подключении второй фазы поток первой фазы изменился на 2,5%. Это позволяет принять допущение об отсутствии взаимной индуктивности фаз.

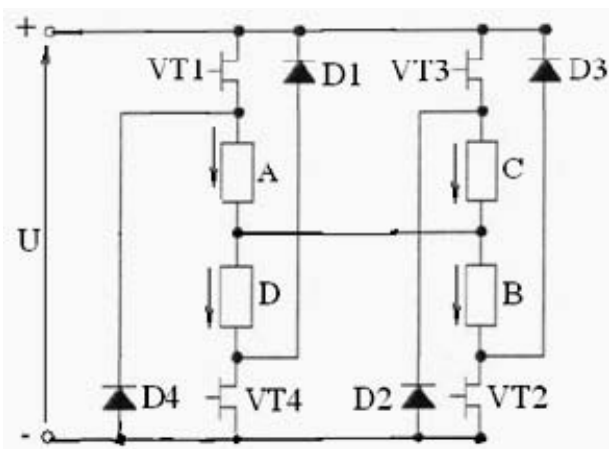


Рис. 5. Схема примененного коммутатора

Когда угол поворота ротора  $\zeta$  в электрических радианах находится в диапазоне  $0 \leq \zeta \leq \pi/2$ , то тран-

зисторы *VT1* и *VT2* открыты и, если при этом токи в фазах *D* и *C* не равны нулю, то фаза *D* через диод *D1* и транзистор *VT1* подключается параллельно к фазе *A*, а фаза *C* через транзистор *VT2* и диод *D2* подключается параллельно к фазе *B*. Транзисторы *VT4* и *VT3* заперты.

На данном интервале угла поворота ротора токи фаз, потокосцепления и момент ВРД описываются системой дифференциальных уравнений (1)

$$\begin{aligned} i_A \cdot r + \frac{d\Psi_A(i_A, \zeta)}{dt} + i_B \cdot r + \frac{d\Psi_B(i_B, \zeta)}{dt} &= U; \\ i_C \cdot r + \frac{d\Psi_C(i_C, \zeta)}{dt} &= -i_B \cdot r - \frac{d\Psi_B(i_B, \zeta)}{dt}; \\ i_D \cdot r + \frac{d\Psi_D(i_D, \zeta)}{dt} &= -i_A \cdot r - \frac{d\Psi_A(i_A, \zeta)}{dt}; \\ i_D &= i_A + i_C - i_B, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $i_A, i_B, i_C$  и  $i_D$  – токи фаз,  $\Psi_A(i_A, \zeta), \Psi_B(i_B, \zeta); \Psi_C(i_C, \zeta), \Psi_D(i_D, \zeta)$  – потокосцепления фаз как функции их токов и угла поворота ротора;  $r$  – активное сопротивление обмотки фазы (все величины – в системе СИ).

Четвертое уравнение в (1) справедливо во всех диапазонах углов поворота ротора.

В диапазоне углов поворота ротора в электрических радианах  $\pi/2 \leq \zeta \leq \pi$  транзисторы *VT1* и *VT4* открыты, а транзисторы *VT2* и *VT3* – заперты. При этом, фаза *B* подключена параллельно фазе *A*, а фаза *C* – параллельно фазе *D*. Исходная система уравнений для указанного интервала углов поворота ротора может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} i_D \cdot r + \frac{d\Psi_D(i_D, \zeta)}{dt} + i_A \cdot r + \frac{d\Psi_A(i_A, \zeta)}{dt} &= U; \\ i_B \cdot r + \frac{d\Psi_B(i_B, \zeta)}{dt} &= -i_A \cdot r - \frac{d\Psi_A(i_A, \zeta)}{dt}; \\ i_C \cdot r + \frac{d\Psi_C(i_C, \zeta)}{dt} &= -i_D \cdot r - \frac{d\Psi_D(i_D, \zeta)}{dt}. \end{aligned} \quad (2)$$

В диапазоне углов поворота ротора в электрических радианах  $\pi \leq \zeta \leq 3\pi/2$  транзисторы *VT3* и *VT4* открыты, фаза *A* через транзистор *VT4* и диод *D4* подключена параллельно фазе *D*, а фаза *B* через диод *D3* и транзистор *VT3* подключена параллельно фазе *C*. Транзисторы *VT1* и *VT2* заперты. Электромагнитные процессы в ВРД в этом диапазоне углов поворота ротора описываются системой

$$\begin{aligned} i_C \cdot r + \frac{\partial \Psi_C(i_C, \zeta)}{\partial i_C} + i_D \cdot r + \frac{\partial \Psi_D(i_D, \zeta)}{\partial i_D} &= U; \\ i_A \cdot r + \frac{d\Psi_A(i_A, \zeta)}{dt} &= -i_D \cdot r - \frac{d\Psi_D(i_D, \zeta)}{dt}; \\ i_B \cdot r + \frac{d\Psi_B(i_B, \zeta)}{dt} &= -i_C \cdot r - \frac{d\Psi_C(i_C, \zeta)}{dt}. \end{aligned} \quad (3)$$

В диапазоне углов поворота ротора в электрических радианах  $3\pi/2 \leq \zeta \leq 2\pi$  транзисторы *VT3* и *VT2* открыты, а транзисторы *VT1* и *VT4* – заперты. При этом фаза *A* подключена параллельно фазе *B*, а фаза *D* – параллельно фазе *C*. Уравнения ВРД могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned}
 i_B \cdot r + \frac{d\Psi_B(i_B, \zeta)}{dt} + i_C \cdot r + \frac{d\Psi_C(i_C, \zeta)}{dt} &= U \\
 i_D \cdot r + \frac{\partial \Psi_D(i_D, \zeta)}{\partial i_D} &= -i_C \cdot r - \frac{\partial \Psi_C(i_C, \zeta)}{\partial i_C}; \\
 i_A \cdot r + \frac{d\Psi_A(i_A, \zeta)}{dt} &= i_B \cdot r + \frac{d\Psi_B(i_B, \zeta)}{dt}.
 \end{aligned} \quad (4)$$

Аналитические зависимости потокосцепления фазы от тока и угла поворота ротора представлены в [3].

Для решения систем (1 – 4) методом Рунге-Кутты их необходимо представить как системы линейных алгебраических уравнений относительно производных от токов фаз по времени. С учетом того, что

$$\begin{aligned}
 \frac{d\Psi(i, \zeta)}{dt} &= \frac{\partial \Psi}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} + \omega \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial \zeta}; \\
 \omega &= \frac{d\zeta}{dt}.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Системы дифференциальных уравнений (1 – 4), разрешенные относительно первых производных токов, совместно с четвертым уравнением (1), вторым уравнением (5) и уравнением (6) позволяют, применяя метод Рунге-Кутты, получить зависимости токов, моментов и потокосцеплений фаз от времени и угла поворота ротора, а также частоты вращения от времени.

$$\begin{aligned}
 \frac{d\omega}{dt} &= \left( \int_0^{i_A} \frac{\partial \Psi_A(i_A, \zeta)}{\partial \zeta} \cdot di_A + \int_0^{i_B} \frac{\partial \Psi_B(i_B, \zeta)}{\partial \zeta} \cdot di_B + \right. \\
 &\left. + \int_0^{i_C} \frac{\partial \Psi_C(i_C, \zeta)}{\partial \zeta} \cdot di_C + \int_0^{i_D} \frac{\partial \Psi_D(i_D, \zeta)}{\partial \zeta} \cdot di_D - M_c \right) / J,
 \end{aligned} \quad (6)$$

где  $M_c$  – момент сопротивления на валу двигателя;  $J$  – момент инерции вращающихся масс.

В соответствии с изложенной математической моделью составлена программа расчета в среде MathCAD 2001.

На рис. 6 показана зависимость момента фазы от угла поворота ротора при питании ВРД от коммутатора по рис. 5 при наибольшей мощности (сплошная кривая), при равных удельных потерях (штрих пунктирная кривая) с удельными потерями при питании ВРД от коммутатора по схеме асимметричного моста, при наименьшей пульсации момента (пунктирная кривая).

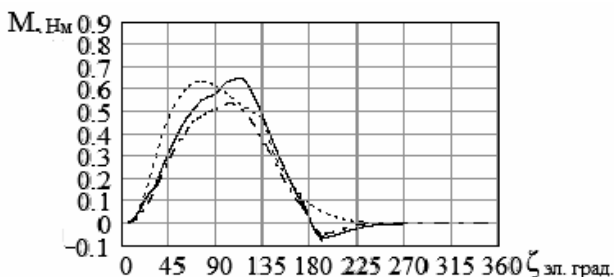


Рис. 6. Зависимость момента фазы от угла поворота ротора при питании ВРД от коммутатора по рис. 5

На рис. 7 показана зависимость результирующего момента от угла поворота ротора при питании ВРД от коммутатора по рис. 5 при наибольшей мощности (сплошная кривая), при равных удельных потерях

(штрих пунктирная кривая) с удельными потерями при питании ВРД от коммутатора по схеме асимметричного моста, при наименьшей пульсации момента (пунктирная кривая).

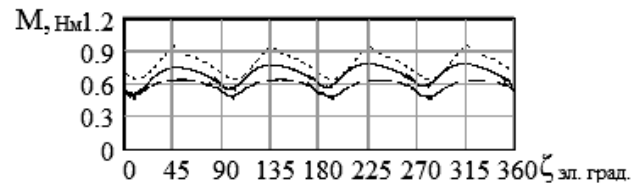


Рис. 7. Зависимость результирующего момента от угла поворота ротора при питании ВРД от коммутатора по рис. 5

На рис. 8 и 9 показаны кривые изменения тока и потокосцепления фазы соответственно.

На рис. 8 показана зависимость тока фазы от угла поворота ротора при питании ВРД от коммутатора по рис. 5 при наибольшей мощности (сплошная кривая), при равных удельных потерях (штрих пунктирная кривая) с удельными потерями при питании ВРД от коммутатора по схеме асимметричного моста, при наименьшей пульсации момента (пунктирная кривая).

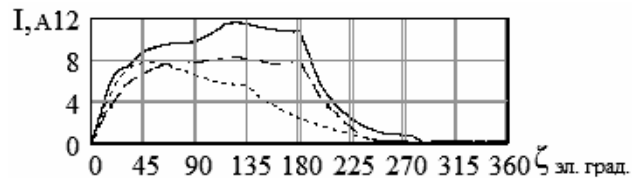


Рис. 8. Зависимость тока фазы от угла поворота ротора при питании ВРД от коммутатора по рис. 5

На рис. 9 показана зависимость потокосцепления фазы от угла поворота ротора при питании ВРД от коммутатора по рис. 5 при наибольшей мощности (сплошная кривая), при равных удельных потерях (штрих пунктирная кривая) с удельными потерями при питании ВРД от коммутатора по схеме асимметричного моста, при наименьшей пульсации момента (пунктирная кривая).

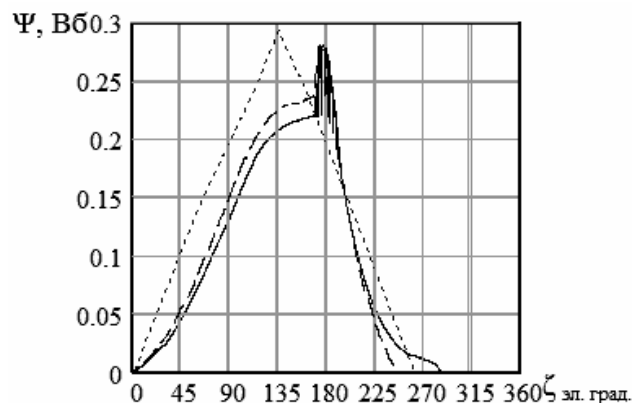


Рис. 9. Зависимость потокосцепления фазы от угла поворота ротора при питании ВРД от коммутатора по рис. 5

На рис. 10 представлена зависимость фазного напряжения от угла поворота ротора. Результаты расчета момента одной фазы ВРД представлены на рис. 6, результирующего момента двигателя – на рис. 7.

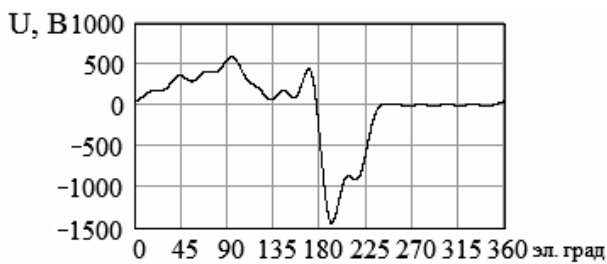


Рис. 10. Зависимость фазного напряжения от угла поворота ротора

Расчетные данные двигателей приведены в табл. 1, где  $P_2$  – полезная мощность;  $n$  – частота вращения;  $I_{ph}$  – фазный ток;  $P_o$  – потери в обмотке;  $P_{Fe}$  – потери в стали;  $P_{sch}$  – потери в схеме коммутатора;  $P_{mech}$  – механические потери;  $\Delta M$  – величина пульсаций момента;  $p_t$  – потери, приходящиеся на единицу внешней боковой поверхности сердечника статора (удельные потери – отношение суммарных потерь в двигателе к площади внешней боковой поверхности сердечника статора);  $W_p$  – число витков в фазе обмотки.

Таблица 1

$P_2$ , Вт	$n$ , об/мин	$I_{ph}$ , А	$\eta$ , %	$P_o$ , Вт	$P_{Fe}$ , Вт	$P_{sch}$ , Вт	$P_{mech}$ , Вт	$\Delta M$ , %	$p_t$ , Вт/см <sup>2</sup>	$B$ , Тл	$W_p$	Схема коммутатора
1665	6006	3,863	61,6	59,8	540	114	325	38,8	1,621	1,121	130	Ас. мост (рис. 1)
1066	5997	2,67	60,7	34,56	256	79	322	21,18	1,07	0,772	143	Ас. мост (рис. 1)
1066	5937	3,464	53,2	29,61	524	30,4	325	12,18	1,59	1,128	102	4 диода, 4 транзистора (рис. 5)

\*Примечание. Расчет потерь в стали производился по [1].

У двигателя, питающегося от коммутатора по схеме асимметричного моста (рис. 1), мощность, при которой обеспечивается максимально допустимая температура обмотки составляет 1,665 кВт. Но при этом пульсации момента составляют 38,8 %, что обуславливает высокие уровни шумов и вибраций. Благодаря установке углов коммутации, обеспечивающих снижение пульсаций момента и снижению мощности двигателя до уровня, ниже которого не имеет место снижение величины пульсации момента, получена мощность 1,066 кВт и величина пульсации момента 21,18%. Такая же мощность достигнута на двигателе при питании его от коммутатора на четырех транзисторах и четырех диодах. При этом стоимость коммутатора по схеме асимметричного моста на сегодняшний день составляет 1200 грн. Коммутатор по рис. 5 более дешевый, стоимость его составляет 540 грн. Пульсации же момента двигателя с этим коммутатором, как видно из табл. 1, почти вдвое меньше, чем наименьшие пульсации момента двигателя, питающегося от коммутатора по схеме асимметричного моста.

Следовательно, для двигателей с улучшенными виброакустическими характеристиками необходимо применять коммутатор по рис. 5.

#### Выводы.

1. Для получения улучшенных виброакустических характеристик ВРД целесообразно применять бесконденсаторный коммутатор на четырех транзисторах и четырех диодах, который позволяет получить вдвое меньшую величину пульсации момента, чем наименьшая величина пульсации момента двигателя, питающегося от коммутатора по схеме асимметричного моста.

2. Стоимость ВРД с бесконденсаторным коммутатором по схеме с четырьмя транзисторами и четырьмя диодами более чем в два раза меньше чем двигателя с коммутатором по схеме асимметричного моста.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галайко Л.П. Учет магнитных потерь при проектировании вентильных индукторных двигателей // *Электротехника і електромеханіка*. – 2003. – №2. – С. 17-18. doi: 10.20998/2074-272X.2003.2.04.

2. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. СПб: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 148 с.
3. Зинченко Е.Е., Финкельштейн В.Б. Методика аппроксимации кривых намагничивания вентильных индукторно-реактивных двигателей // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2009. – №1 – С. 13-16. doi: 10.20998/2074-272X.2009.1.03.
4. Зинченко Е.Е., Финкельштейн В.Б. Сравнение характеристик вентильного реактивного двигателя при его питании от коммутаторов по схемам Миллера и асимметричного моста // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2012. – №1. – С. 33-35. doi: 10.20998/2074-272X.2012.1.07.
5. Лучко А.Р. Повышение эффективности электропривода бытовых погружных насосов путем использования вентильных индукторных двигателей: дисс. ... канд. техн. наук (05.09.03). – Запорожье, 2005. – 160 с.
6. Патент РФ №2390085, МПК H02K19/10, H02K19/12, H02K29/00. Вентильно-индукторный четырехфазный нереверсивный двигатель / Шабаев В.А., Кругликов О.В., Тубис Я.Б. – Заявл. 24.07.2008. – Опубл. 20.05.2010.
7. Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications. – CRC Press, 2001. – 398 p. doi: 10.1201/9781420041644.
8. Lawrenson P.J., Stephenson J.M., Fulton N.N., Blenkinsop P.T., Corda J. Variable-speed switched reluctance motors // *IEE Proceedings B Electric Power Applications*. – 1980. – vol.127. – no.4. – p. 253. doi: 10.1049/ip-b.1980.0034.
9. Miller T.J.E. Switched reluctance motors and their control. Magna Physics Publishing and Clarendon Press. Oxford, 1993.

#### REFERENCES

1. Galaiko L.P. The account of magnetic losses for want of designing switched reluctance motors. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2003, no.2, pp. 17-18. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2003.2.04.
2. Gollandtsev Y.A. *Ventil'nye induktorno-reaktivnye dvigateli* [Valve inductor and jet engines]. St. Petersburg, GNC RF CNII Elektropribor Publ., 2003. 148 p. (Rus).
3. Zinchenko E.E., Finkelshtein V.B. T A technique of magnetization curve approximation for switched reluctance motors. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no.1, pp. 13-16. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2009.1.03.
4. Zinchenko E.E., Finkelshtein V.B. Performance analysis of a switched reluctance motor fed through an asymmetric half-bridge converter and a Millers bridge converter. *Elektrotehnika*

*i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.1, pp. 33-35. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2012.1.07.

5. Luchko A.R. *Povyshenie effektivnosti electoprivoda bytovykh pogruznykh nasosov putem ispolzovaniya ventilnykh dvigatelei*. Diss. cand. techn. nauk [Increase of efficiency of the electric drive of household submersible pumps by use of valve inductor engines. Cand. tech. sci. diss.]. Zaporozhye, 2005. 160 p. (Rus).

6. Shabayev V.A., Kruglikov O.V., Tubis Ya.B. *Ventil'no-induktorniye chetyrekhfaznyi nereversivnyi dvigatel'* [Valve inductor 4-phase irreversible motor]. Patent Russian Federation, no. 2390085, 2010. (Rus).

7. Krishnan R. *Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications*. CRC Press, 2001. 398 p. doi: 10.1201/9781420041644.

8. Lawrenson P.J., Stephenson J.M., Fulton N.N., Blenkinsop P.T., Corda J. Variable-speed switched reluctance motors. *IEE Proceedings B Electric Power Applications*, 1980, vol.127, no.4, p. 253. doi: 10.1049/ip-b.1980.0034.

9. Miller T.J.E. *Switched reluctance motors and their control*. Magna Physics Publishing and Clarendon Press. Oxford, 1993.

Поступила (received) 22.03.2016

Финкельштейн Владимир Борисович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Егоров Алексей Борисович<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,

<sup>1</sup> Харьковський національний університет  
городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,  
61002, Харьков, ул. Революции, 12,  
тел/phone +38 057 7319528, e-mail: finalvb@gmail.com

<sup>2</sup> Українська інженерно-педагогічна академія,  
61003, Харьков, ул. Университетская, 16,  
тел/phone +38 066 7228206, e-mail: diaskk@yandex.ru

V.B. Finkelshtein<sup>1</sup>, A.B. Yegorov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> O.M. Beketov National University of Urban Economy  
in Kharkiv,

12, Revolution Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>2</sup> Ukrainian Engineering Pedagogics Academy,  
16, Universitetskaya Str., Kharkiv, 61003, Ukraine.

### Characteristics of a 4-phase valve reluctance motor when powered by uncapacitor switchboard.

**Purpose.** Nowadays more and more in a variety of machines and mechanisms applied switched reluctance motor. When designing these engines solve the problem selection switch. While the switch scheme comprises symmetrical bridge and eight transistors, eight diodes; Miller switch comprises six transistors and six diodes; in company Graseby Controls Ltd switch circuit but four transistors and four diodes includes two capacitors. The aim is to develop a mathematical model, calculation program, a numerical analysis of the characteristics and parameters of the WFD and the characteristics of their work. **Methodology.** It is assumed that the resistance in the open state transistors and diodes for direct current is zero and the resistance of the transistors in the closed state, and diode reverse voltage is infinity. When feeding a single-phase motor and power at the same time two adjacent phases determined by the flow through the tooth. **Results.** The motor powered by a switch on the circuit symmetrical bridge power, which provides a maximum permissible winding temperature is 1.665 kW. But at the same time the surge up to 38.8%, resulting in high levels of noise and vibration. Through the installation of switching angles, ensuring reduction of torque ripple and reduce engine power to a level below which there is a decrease in the value of torque ripple, received power of 1,066 kW and a torque ripple value of 21.18 %. For engines with improved vibration acoustic characteristics necessary to use a switch of four transistors and four diodes. **Practical value.** For motors with improved vibration acoustic characteristics appropriate to apply uncapacitor switch on four transistors and four diodes, which allows you to receive half the value of torque ripple than the lowest value of the motor torque ripple, eating from a switch on the circuit asymmetric bridge. The cost of reluctance motor with uncapacitor switch on the circuit with four transistors and four diodes is more than two times less than the motor with the switch on the circuit asymmetric bridge. References 9, tables 1, figures 10.

**Key words:** valve reluctance motor, switchboard, flux linkage of phases, rotor angle of rotation, motor power.