

УДК 621.313.3

DOI 10.46960/2658-6754\_2021\_4\_90

## ЧЕТЫРЕХФАЗНЫЙ ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**В.М. Гридин**

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
Москва, Россия  
e-mail: gridin1940@mail.ru

В статье представлена конструкция двигателя, у которого обмотка выполнена несимметричной: ее вторая, третья и четвертая фазы смещены относительно первой фазы азы на угол, равный соответственно  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  и  $225^\circ$  электрических градусов. Рассмотрены особенности устройства и работы такого двигателя.

Составлены выражения для фазных токов и магнитных индукций в моментных четырехфазном и трехфазном двигателях в виде рядов Фурье. Получены выражения для электромагнитного момента и пульсации этого момента. При анализе этих выражений установлено, что пульсация момента у четырехфазного двигателя примерно в 2,4 раза меньше, чем у трехфазного. Также установлено, что четырехфазный двигатель создаёт такой же удельный момент, как и трехфазный двигатель, и является более надежным.

**Ключевые слова:** вентильный двигатель, пульсация момента, удельный момент, четырехфазный двигатель, четырехфазная несимметричная и трехфазная обмотки, электромагнитный момент.

**Для цитирования:** Гридин В.М. Четырехфазный вентильный двигатель переменного тока // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 4. С. 90-100. DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_4\_90

## FOUR PHASE VENT AC MOTOR

**V.M. Gridin**

Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russia  
e-mail: gridin1940@mail.ru

**Abstract.** The article presents the design of a motor with an asymmetrical winding: its second, third and fourth phases are shifted relative to the first phase by an angle equal to  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  and  $225^\circ$  electrical degrees, respectively. The features of the device and the operation of such motor are considered.

The expressions for phase currents and magnetic inductions in torque four-phase and three-phase motors in the form of Fourier series are compiled. Expressions for the electromagnetic moment and pulsation of this moment are obtained. When analyzing these

expressions, it was found that the ripple of the moment in a four-phase motor is approximately 2.4 times less than in a three-phase motor. It has also been found that a four-phase motor produces the same specific torque as a three-phase motor and is more reliable.

**Keywords:** electromagnetic moment, four-phase motor, four-phase unbalanced and three-phase windings, ripple of torque, specific moment, vent motor.

**For citation:** V.M. Gridin, “Four phase vent AC motor”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 90-100, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_4\_90

## I. Введение

Вентильные двигатели (ВД) по сравнению с двигателями постоянного тока обладают подобными характеристиками, но не имеют скользящих контактов. Поэтому они работают более надежно, особенно при вибрациях, ускорениях, после ударов, в вакууме и т.п.

ВД содержит синхронный двигатель (СД), инвертор тока (ИТ), формирующий значения фазных токов в соответствии с положением ротора, датчик положения ротора (ДПР) и преобразователь сигналов ДПР в напряжения, управляющие ИТ. ВД можно разделить на два типа: ВД постоянного тока и ВД переменного тока [1].

Здесь рассматриваются моментные, т.е. низкоскоростные ВД, у которых скорость вращения вала может быть, например, (0,01-0,1) об/с и, следовательно, ЭДС вращения является ничтожной по сравнению с напряжением питания. Такие двигатели применяют, например в гироскопических системах как коррекционные для удержания оси гироскопа в заданном направлении. Основными характеристиками моментных ВД являются удельный момент (отношение момента к объему активной, электромеханической части двигателя) и пульсация момента.

ВД постоянного тока – бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ). Для моментных БДПТ [2-5] характерно трапецевидное распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора и постоянные фазные токи при соответствующих положениях ротора. Так как реальное распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора – не строго трапецеидальное, то при повороте ротора момент пульсирует. Пульсацию можно уменьшить, изменяя при повороте ротора фазные токи плавно или ступенчато, как это показано в [3, 4].

Для моментных ВД переменного тока [1, 6-8] характерны синусообразное распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора и синусообразные фазные токи. ИТ может быть выполнен линейным при относительно небольших значениях момента или с широтно-импульсным модулятором (ШИМ) фазных напряжений [1]. Так как реальное рас-

пределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора и фазные токи – не строго синусоидальные, то при повороте ротора момент пульсирует. Пульсацию можно уменьшить, применяя для ИТ отрицательную обратную связь по току. В этом случае ВД содержит датчик тока, а схема ВД усложнена [1], [7]. С той же целью можно калибровать преобразователь сигналов ДПР в напряжения, управляющие ИТ, т.е. корректировать форму фазных токов. Но устройство и процесс калибровки весьма громоздки [1].

## II. Четырехфазного вентильный двигатель переменного тока

На рис. 1 показана упрощенная электрическая схема четырехфазного ВД переменного тока с ИТ, содержащим ШИМ.

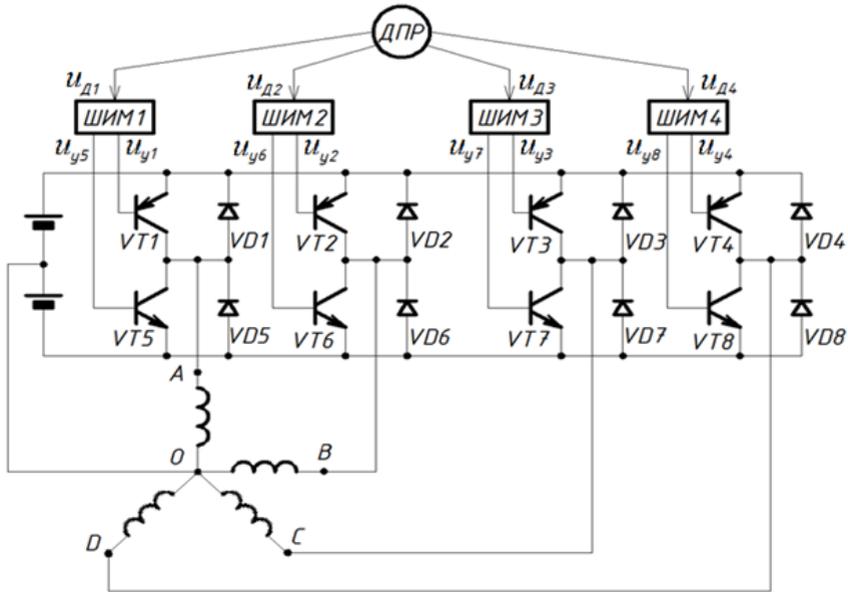


Рис. 1. Упрощенная электрическая схема ВД переменного тока:

$AO, BO, CO, DO$  – фазы обмотки; ДПР – датчик положения ротора;

ШИМ1 – ШИМ4 – широтно-импульсные модуляторы

Fig. 1. Simplified electrical circuit of valve AC motor:

$AO, BO, CO, DO$  – winding phases; DPR – rotor position sensor;

PWM1 – PWM4 – pulse width modulators

Силовая часть этой схемы, содержащая обмотку, транзисторы  $VT1 - VT8$  и диоды  $VD1 - VD8$ , вместе с источником питания изображена в виде принципиальной электрической схемы. Остальная часть, содержащая ДПР и ШИМ1 – ШИМ4, изображена в виде упрощенной функциональной схемы

управления транзисторами  $VT1 - VT8$ . Преобразователь сигналов ДПР не показан. На входы ШИМ подаются также пилообразные напряжения, с которыми сравниваются преобразованные сигналы ДПР. Из-за несимметрии обмотки применен источник питания со средней точкой, которая соединена с общим выводом  $O$  фаз обмотки.

Обмотка – четырехфазная несимметричная предложена в [9]. Ее фазы  $BO$ ,  $CO$  и  $DO$  смещены относительно фазы  $AO$  на электрический угол, равный соответственно  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  и  $225^\circ$ . Обмотка выполнена распределенной с укороченным шагом. Она может быть уложена в пазы, скошенные на одно пазовое деление, или на внутренней цилиндрической поверхности гладкого магнитопровода якоря для исключения пульсации момента, обусловленной зубчатым строением магнитопровода. Индуктор выполнен в виде цилиндрического постоянного магнита с радиальными неявно выраженными полюсами или состоящим из внутреннего магнито-мягкого основания, наружных полюсов – магнитом и профилированных полюсных наконечников [7].

ДПР может быть выполнен, например в виде синус-косинусного вращающегося трансформатора или в виде двухфазного микросина. При вращении ротора напряжения на выходе преобразователя сигналов ДПР изменяются по законам, близким к синусоидальным:

$$\begin{aligned} u_{д1} &\approx U_{дм} \cdot \sin \alpha; & u_{д2} &\approx U_{дм} \cdot \sin(\alpha - 90^\circ); \\ u_{д3} &= \frac{(-u_{д1} + u_{д2})}{\sqrt{2}} \approx U_{дм} \cdot \sin(\alpha - 135^\circ); \\ u_{д4} &= \frac{-(u_{д1} + u_{д2})}{\sqrt{2}} \approx U_{дм} \cdot \sin(\alpha + 135^\circ), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $U_{дм}$  – амплитуда выходных напряжений преобразователя,  $\alpha$  – угловое положение ротора.

ШИМ1 – ШИМ4 создают последовательности импульсов напряжений  $u_{y1} - u_{y8}$ , у которых отношение  $\gamma$  их длительности к интервалу времени между соседними импульсами соответствует напряжениям  $u_{д1} - u_{д4}$  и равно соответствующей синусоидальной функции от угла  $\alpha$ .

На одном полупериоде изменения напряжений  $u_{д1} - u_{д4}$  импульсы напряжений  $u_{y1} - u_{y4}$  с изменяемым отношением  $\gamma$  поступают на входы транзисторов  $VT1 - VT4$ , а на другом полупериоде аналогичные импульсы напряжений  $u_{y5} - u_{y8}$  поступают на входы транзисторов  $VT5 - VT8$ , и последние в это время открываются и проводят ток. В результате по фазам обмотки, представляющим активно-индуктивную нагрузку, через транзи-

сторы  $VT1 - VT8$  и диоды  $VD1 - VD8$  протекают непрерывные синусообразные токи, и двигатель создает электромагнитный момент. Более подробно устройство и работа ВД с ШИМ описаны в [6].

ВД переменного тока, в том числе четырехфазный, может быть выполнен и без ШИМ, с линейным ИТ при относительно небольших значениях момента [1].

Электромагнитный момент  $m$  можно выразить следующим образом:

$$m = A \cdot I_m \cdot w \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

где:

$$A = D \cdot L \cdot B_m \cdot \rho; \quad \varepsilon = \sum_{k=1}^S \bar{i}_k \cdot \bar{b}_k; \quad \bar{i}_k = \frac{i_k}{I_m}; \quad \bar{b}_k = \frac{b_k}{B_m}, \quad (3)$$

где  $D$  – диаметр воздушного зазора между якорем и индуктором,  $L$  – длина магнитопровода якоря,  $B_m$  – максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре,  $\rho \approx 0,95-0,97$  – коэффициент, учитывающий скос пазов или укладку обмотки на гладком магнитопроводе якоря,  $I_m$  – максимальный ток в фазах обмотки,  $w$  – число витков в каждой фазе,  $S$  – число фаз обмотки,  $i_k$  – ток в  $k$ -й фазе,  $b_k$  – результирующая магнитная индукция для  $k$ -й фазы обмотки (равная сумме магнитных индукций в местах расположения  $q$  катушек этой фазы, деленной на  $2 \cdot q$ ).

### III. Сравнение характеристик четырехфазного и трехфазного ВД

Сравним основные характеристики четырехфазного и трехфазного моментных ВД переменного тока. У обоих ВД ИТ, ДПР и преобразователь сигналов ДПР – однотипные. Например, ИТ выполнены как линейные. СД имеют одинаковую конструкцию и выполнены в одинаковых габаритах, а их обмотки потребляют одну и ту же энергию от источников питания с одинаковым напряжением. При этом считаем, что у обоих ВД одинаковы распределения магнитной индукции по окружности воздушного зазора. Учитываем, что фазные токи в трехфазных ВД не содержат гармоники, кратные трем, и содержат таковые в четырехфазных ВД.

Для сравниваемых ВД сомножитель  $A$  – одинаковый, а произведения  $I_m \cdot w \cdot \varepsilon$  – различные в формуле для электромагнитного момента. Будем обозначать характеристики трех и четырехфазного ВД с индексом 3 и 4 соответственно.

Если при вращении ротора магнитные индукции  $b_k$  и токи  $i_k$  изменялись бы строго синусоидально, то были бы справедливы следующие выражения и значения:

$$\varepsilon_4 = \sum_1^4 \bar{i}_k \cdot \bar{b}_k = \sin^2 \alpha + \sin^2 (\alpha - 90^\circ) + \sin^2 (\alpha - 135^\circ) + \sin^2 (\alpha + 135^\circ) = 2, 0; \quad (4)$$

$$\varepsilon_3 = \sum_1^3 \bar{i}_k \cdot \bar{b}_k = \sin^2 \alpha + \sin^2 (\alpha - 120^\circ) + \sin^2 (\alpha + 120^\circ) = 1, 5. \quad (5)$$

Очевидно, что сомножители  $\varepsilon_4$  и  $\varepsilon_3$ , а следовательно, и электромагнитные моменты (далее – моменты) не зависели бы от положения ротора и отсутствовала бы пульсация моментов.

Но реально фазные токи  $i_k$  и магнитные индукции  $b_k$  как периодические функции от угла  $\alpha$  содержат высшие нечётные гармоники. С другой стороны, принципиально невозможно устранить хотя бы все значимые высшие гармоники или идеально откорректировать преобразователь сигналов ДПР, т.е. откорректировать форму фазных токов. Поэтому при вращении ротора момент всегда пульсирует.

Нахождение выражений для момента и пульсации момента с учетом всех дестабилизирующих момент факторов является очень сложной задачей. Искомые выражения были бы также очень сложными для анализа. А нахождение значений пульсаций вообще является неопределенной задачей, так как неизвестны гармонические составы (ряды) для относительных фазных токов  $\bar{i}_k$  и магнитных индукций  $\bar{b}_k$ . Однако все же можно определить, оценить отношение пульсаций моментов сравниваемых ВД, а также отношение моментов, что и сделано далее. Отношение пульсаций моментов гораздо менее критично к значениям коэффициентов Фурье для гармонических рядов, чем сами пульсации моментов.

Для относительных фазных токов и магнитных индукций в четырехфазном ВД ( $S = 4$ ) можно записать следующие выражения (ряды Фурье), считая, что  $\bar{i}_k = \bar{b}_k$ :

$$\bar{b}_1 = \bar{i}_1 = \sin \alpha + C_3 \cdot \sin 3\alpha + C_5 \cdot \sin 5\alpha + C_7 \cdot \sin 7\alpha + C_9 \cdot \sin 9\alpha + \dots; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \bar{b}_2 = \bar{i}_2 = \sin (\alpha - 90^\circ) + C_3 \cdot \sin (3\alpha + 90^\circ) + C_5 \cdot \sin (5\alpha - 90^\circ) + \\ + C_7 \cdot \sin (7\alpha + 90^\circ) + C_9 \cdot \sin (9\alpha - 90^\circ) + \dots; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \bar{b}_3 = \bar{i}_3 = \sin (\alpha - 135^\circ) + C_3 \cdot \sin (3\alpha - 45^\circ) + C_5 \cdot \sin (5\alpha + 45^\circ) + \\ + C_7 \cdot \sin (7\alpha + 135^\circ) + C_9 \cdot \sin (9\alpha - 135^\circ) + \dots; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \bar{b}_4 = \bar{i}_4 = \sin (\alpha + 135^\circ) + C_3 \cdot \sin (3\alpha + 45^\circ) + C_5 \cdot \sin (5\alpha - 45^\circ) + \\ + C_7 \cdot \sin (7\alpha - 135^\circ) + C_9 \cdot \sin (9\alpha + 135^\circ) + \dots; \end{aligned} \quad (9)$$

Абсолютные фазные токи и магнитные индукции – результат умножения относительных фазных токов и индукций на максимальный ток  $I_m$  и на максимальную индукцию  $B_m$  соответственно.

Если учесть только 1-ю, 3-ю, 5-ю, 7-ю и 9-ю гармоники, пренебречь квадратами и произведениями выражений для высших гармоник как малыми членами и использовать формулу:

$$\sin(\alpha - \beta) \cdot \sin n(\alpha - \beta) = \frac{\cos[(n-1) \cdot (\alpha - \beta)] - \cos[(n+1) \cdot (\alpha - \beta)]}{2}, \quad (10)$$

где  $\beta = 0, 90^\circ, 135^\circ, 225^\circ, n = 3, 5, 7, 9, \dots$

то можно получить выражения:

$$\varepsilon_4 = \sum_1^4 \bar{i}_k \cdot \bar{b}_k = \varepsilon_{\text{ср4}} \cdot (1 - v_4 \cdot \cos 8\alpha); \quad (11)$$

$$\varepsilon_{\text{ср4}} = 2; \quad v_4 = 2 \cdot (C_7 - C_9), \quad (12)$$

где  $\varepsilon_{\text{ср4}}$  – среднее значение сомножителя  $\varepsilon_4$ ,  $v_4$  – пульсация сомножителя  $\varepsilon_4$ . Так как момент  $m$  пропорционален сомножителю  $\varepsilon$ , то  $v_4$  есть пульсация момента четырехфазного ВД.

Для относительных магнитных индукций  $\bar{b}_k$  в трехфазном ВД ( $S = 3$ ) можно записать аналогичные выражения (ряды Фурье):

$$\bar{b}_1 = \sin \alpha + C_3 \cdot \sin 3\alpha + C_5 \cdot \sin 5\alpha + C_7 \cdot \sin 7\alpha + C_9 \cdot \sin 9\alpha + \dots; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \bar{b}_2 = \sin(\alpha - 120^\circ) + C_3 \cdot \sin 3\alpha + C_5 \cdot \sin(5\alpha + 120^\circ) + \\ + C_7 \cdot \sin(7\alpha - 120^\circ) + C_9 \cdot \sin 9\alpha + \dots; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \bar{b}_3 = \sin(\alpha + 120^\circ) + C_3 \cdot \sin 3\alpha + C_5 \cdot \sin(5\alpha - 120^\circ) + \\ + C_7 \cdot \sin(7\alpha + 120^\circ) + C_9 \cdot \sin 9\alpha + \dots \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь весовые коэффициенты Фурье при синусах такие же, как и для ВД с четырехфазной обмоткой. Считаем, что выражения для относительных фазных токов  $\bar{i}_1, \bar{i}_2, \bar{i}_3$  отличаются от приведенных выражений для относительных индукций только отсутствием гармоник, кратных трем. Действуя аналогично случаю  $S = 4$ , можно получить выражения:

$$\varepsilon_3 = \sum_1^3 \bar{i}_k \cdot \bar{b}_k = \varepsilon_{\text{ср3}} \cdot (1 - v_3 \cdot \cos 6\alpha); \quad (16)$$

$$\varepsilon_{\text{ср3}} = 1,5; \quad v_3 = 2 \cdot (C_5 - C_7). \quad (17)$$

Из (12) и (17) получим искомое отношение пульсаций момента:

$$\frac{v_3}{v_4} = \frac{(C_5 - C_7)}{(C_7 - C_9)}. \quad (18)$$

Так как  $C_5 > C_7 > C_9$ , то  $(C_7 - C_9) < (C_5 - C_7)$ .

Следовательно,  $v_4 < v_3$ .

Если, например  $C_5 = 1/25$ ,  $C_7 = 1/49$ ,  $C_9 = 1/81$ , то по (12) и (17) получим следующие значения:

$$v_4 = 0,016 \text{ или } 1,6 \%, \quad v_3 = 0,039 \text{ или } 3,9 \%.$$

Следовательно:  $v_4 < v_3$ ,  $v_3 / v_4 = 3,9 / 1,6 = 2,44$ .

Этот результат близок к результатам испытаний моментных вентильных двигателей в НИИ прикладной механики. В результате испытаний установлено, что:  $v_4 \approx 1,5 \%$ ,  $v_3 \approx 3,5 \%$ ,  $v_3 / v_4 \approx 2,3$ .

Если в гармонических рядах Фурье для относительных фазных токов и магнитных индукций весовые коэффициенты различные, то можно получить выражения, аналогичные (12) и (17):

$$v_4 = C_{7i} + C_{7b} - C_{9i} - C_{9b}, \quad v_3 = C_{5i} + C_{5b} - C_{7i} - C_{7b}, \quad (19)$$

где коэффициенты с индексом  $i$  относятся к относительному току, а коэффициенты с индексом  $b$  относятся к относительной магнитной индукции.

И в этом случае также  $v_4 < v_3$ .

Найдем отношение моментов  $M_4 / M_3$  сравниваемых ВД. Условия сравнения указаны ранее. При равенстве площадей всех пазов якоря для  $S = 4$  и  $S = 3$  справедливы выражения:

$$8 \cdot w_4 \cdot g_4 = 6 \cdot w_3 \cdot g_3; \quad \frac{g_4}{g_3} = \frac{3}{4} \cdot \frac{w_3}{w_4}, \quad (20)$$

где  $w_3$  и  $w_4$ ,  $g_3$  и  $g_4$  – числа витков в каждой фазе обмотки и площади поперечного сечения проводников обмотки при  $S = 3$  и  $S = 4$ .

При равенстве напряжений питания отношение максимальных токов в фазах обмоток:

$$\frac{I_{m4}}{I_{m3}} = \frac{R_3}{R_4} = \frac{w_3}{g_3} \cdot \frac{g_4}{w_4} = \frac{3}{4} \cdot \left( \frac{w_3}{w_4} \right)^2, \quad (21)$$

где  $R_3$  и  $R_4$  – сопротивления фаз при  $S = 3$  и  $S = 4$ .

С другой стороны, при равенстве напряжений питания и энергий, потребляемых обмотками, справедливо:

$$4I_{m4} = 3I_{m3}. \quad (22)$$

Из двух последних формул получим:

$$I_{m4} \cdot w_4 = \frac{3}{4} \cdot I_{m3} \cdot w_3. \quad (23)$$

Согласно вышеприведенной формуле для момента  $m$  справедливо выражение:  $M = A \cdot \varepsilon_{\text{ср}} \cdot I_m \cdot w$ .

Поэтому

$$\frac{M_4}{M_3} = \frac{\varepsilon_{\text{ср}4} \cdot I_{m4} \cdot w_4}{\varepsilon_{\text{ср}3} \cdot I_{m3} \cdot w_3}. \quad (24)$$

Нетрудно установить, что  $M_3 \approx M_4 \approx M$ . Следовательно, удельные моменты сравниваемых ВД одинаковы.

Оценим и сравним работу сравниваемых моментных ВД в случае отказа транзистора или схемы управления им. В этом случае для момента  $m$  справедливы выражения:

$$\begin{aligned} m_3 &= \left[ \sin^2 \alpha + \sin^2 (\alpha - 120^\circ) \right] \cdot \frac{M}{1,5} = \left[ 1 + 0,5 \cdot \cos(2\alpha + 60^\circ) \right] \cdot \frac{M}{1,5} = \\ &= \left( \frac{1}{3} \div 1 \right) \cdot M; \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} m_3 &\approx \left[ \sin^2 \alpha + \sin^2 (\alpha - 90^\circ) + \sin^2 (\alpha \mp 135^\circ) \right] \cdot \frac{M}{2} = \\ &= \left[ 1,5 + 0,5 \cdot \sin 2\alpha \right] \cdot \frac{M}{2} = \left( \frac{1}{2} \div 1 \right) \cdot M. \end{aligned} \quad (26)$$

При повороте ротора момент  $m$  будет изменяться от  $M_{\min}$  до  $M$ :

$$M_{\min 4} = \frac{M}{2}; \quad M_{\min 3} = \frac{M}{3}; \quad \frac{M/2}{M/3} = 1,5. \quad (27)$$

Следовательно, четырехфазный ВД является более надежным.

#### IV. Заключение

Рассмотрен четырехфазный вентильный двигатель переменного тока, у которого обмотка выполнена несимметричной: ее вторая, третья и четвертая фазы смещены относительно первой фазы азы на угол, равный соответственно  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  и  $225^\circ$  электрических градусов. Рассмотрены особенности устройства и работы такого двигателя.

Составлены выражения для фазных токов и магнитных индукций в моментных четырехфазном и в трехфазном двигателях в виде рядов Фурье. Используя их, получены выражения для электромагнитного момента и пульсации этого момента. При анализе этих выражений установлено, что пульсация момента у четырехфазного двигателя примерно в 2.4 раза меньше, чем у трехфазного. Также установлено, что четырехфазный двигатель создаёт такой же удельный момент, что и трехфазный двигатель, и является более надежным.

Поэтому четырехфазный моментный вентильный двигатель переменного тока, несмотря на более сложное устройство, чем у трехфазного двигателя, может и должен найти применение.

© Гридин В.М., 2021

Поступила в редакцию 15.09.2021

Received 15.09.2021

#### Библиографический список

- [1] Балковой А.П., Цаценкин В.К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 328 с.
- [2] Гридин В.М. Электромагнитные характеристики моментных бесконтактных двигателей постоянного тока // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2011. № 2. С. 75–86.
- [3] Гридин В.М. Способы уменьшения пульсации момента и выходного напряжения бесконтактных моментных двигателей и тахогенераторов постоянного тока // Электричество. 2016. № 4. С. 56–61.
- [4] Гридин В.М. Моментные бесконтактные двигатели постоянного тока с дискретным и дискретно-аналоговым управлением по положению ротора // Электричество. 2017. № 4. С. 50–55. DOI: 10.24160/0013-5380-2017-4-50-55
- [5] Гридин В.М. Характеристики моментных бесконтактных двигателей постоянного тока с симметричной и несимметричной обмотками // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 2. С. 28-31.
- [6] Косулин В.Д., Михайлов Г.Б., Омельченко В.В., Путников В.В. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов. Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 184 с.
- [7] Столов Л.И., Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 223 с.

- [8] Баранов М.В., Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 240 с.
- [9] Гридин В.М. Вентильный электродвигатель, Пат. SU 1270846, заявл. 06.04.1984; опубл. 15.07.1986. – Открытия. Изобретения. 1986, № 42.

#### References

- [1] A.P. Balkova and V.K. Tsatsenkin, *Precizionnyj elektroprivod s ventil'nymi dvigatelyami [Precision electric drive with valve motors]*. Moscow: Publishing house MEI, 2010 (in Russian).
- [2] V.M. Gridin, “Elektromagnitnye harakteristiki momentnyh beskontaktnyh dvigatelej postoyannogo toka [Electromagnetic characteristics of torque contactless DC motors]”, *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, no. 2, pp. 75-86, 2011 (in Russian).
- [3] V.M. Gridin, “Ways for decreasing torque pulsations and output voltage ripple in contactless torque motors and DC tachogenerators”, *Elektrichestvo*, no. 4, pp. 56-61, 2016.
- [4] V.M. Gridin, “Contactless torque DC motors with discrete and discrete-analog control with respect to rotor position”, *Elektrichestvo*, no. 4, pp. 50-55, 2017. DOI: 10.24160/0013-5380-2017-4-50-55
- [5] V.M. Gridin, “Characteristics of the contactless torque DC motors with symmetric and asymmetrical windings”, *Electronics and Electrical Equipment of Transport*, no. 2, pp. 28-31, 2017.
- [6] V.D. Kosulin, G.B. Mikhailov, V.V. Omelchenko and V.V. Putnikov, *Ventil'nye elektrodvigateли maloj moshchnosti dlya promyshlennyh robotov [Valve electric motors of low power for industrial robots]*. Leningrad: Energoatomizdat, 1988 (in Russian).
- [7] L.I. Stolov and A.Yu. Afanasyev, *Momentnye dvigateli postoyannogo toka [DC torque motors]*. Moscow: Energoatomizdat, 1989 (in Russian).
- [8] M.V. Baranov, V.N. Brodovsky, A.V. Zimin and B.N. Karzhavov, *Elektricheskie sledyashchie privody s momentnym upravleniem ispolnitel'nymi dvigatelyami [Electric servo drives with torque control of executive motors]*. Moscow: MGТУ n.a. N.E. Bauman, 2006 (in Russian).
- [9] V.M. Gridin, “Rectifier electric motor”, Patent SU 1270846, July 15, 1986, in *Discoveries. Inventions*, no. 42, 1986.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Гридин Владимир Михайлович**, кандидат технических наук, доцент Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

**Vladimir M. Gridin**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.