

УДК 621.313.333

Ю.М. Кулаковский, А.В. Аристов

Вентильный электропривод колебательного движения с регулируемой собственной частотой

Разработана методика расчета выходных координат вентильного электропривода колебательного движения с учетом параметров электрической машины, нагрузки и функций регулирования. Установлена возможность регулирования собственной частоты вентильного электропривода за счет введения обратной связи по положению подвижного элемента привода. Дана сравнительная оценка эффективности работы электропривода при наличии обратной связи по положению. Приведена функциональная схема, реализующая способ управления собственной частотой колебательной электромеханической системы, выполненная на базе вентильного двигателя.

Ключевые слова: вентильный электропривод, колебательное движение, собственная частота, отрицательная обратная связь, резонансный режим работы.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-1-83-88

Работа приводов радиолокационных устройств, в частности следящих систем, основывается на оптико-корреляционном принципе определения направления на оптический излучатель. Исполнительный элемент в такой системе выполняет колебательное движение. Как правило, при выборе принципа построения такого электропривода чаще всего руководствуются условиями обеспечения широкого диапазона регулирования требуемой частоты и амплитуды колебаний, точности позиционирования исполнительного органа, минимизации энергопотребления [1–3].

В таких системах наиболее перспективно применять безредукторные электроприводы, в которых роль электромеханического преобразователя выполняют вентильные двигатели с постоянными магнитами. Помимо этого, для получения лучших энергетических показателей колебательной системы целесообразно обеспечить ее работу в резонансном режиме [4–6]. Однако реализация такого рода приводов часто осложняется из-за необходимости строгой резонансной настройки электромеханической системы, в состав которой, как правило, помимо электродвигателя, входят электрические и механические преобразователи, параметры которых также необходимо учитывать [7, 8].

Важно отметить, что в процессе работы электропривода изменяются некоторые его параметры, а следовательно, и собственная частота электромеханической системы, в результате чего остро встает вопрос о необходимости ее стабилизации [9].

Исходя из сказанного, разработана методика для оценки эффективности работы электропривода колебательного движения с электромеханическим преобразователем в виде вентильного двигателя с постоянными магнитами с регулируемой собственной частотой. Последнее заключается в ведении в колебательную систему «фиктивной жесткости» в виде отрицательной обратной связи по положению подвижного элемента привода.

Для этого в работе были решены следующие задачи:

– аналитически определены выражения для расчета выходных координат вентильного электро-

привода колебательного движения с обратной связью по положению;

– построены графики амплитудно-частотных характеристик электромагнитного момента, развиваемого двигателем при разных значениях глубины обратной связи;

– проведена сравнительная оценка энергетической эффективности электропривода при наличии электромеханической обратной связи и без нее.

Для формирования колебательного режима работы функции регулирования для фазных обмоток вентильного электродвигателя описываются выражениями вида [10]

$$\left. \begin{aligned} U_d(t) &= U_1 = \text{const}; \\ U_q(t) &= U_2 \sin(\Omega t + \alpha) - k_{oc} \text{sign} \chi. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где U_1 – напряжение обмотки d ; U_2 , α , Ω – амплитудное значение, начальная фаза и круговая частота напряжения по обмотке q ; k_{oc} – коэффициент, определяющий глубину отрицательной обратной связи по положению подвижного элемента привода; χ – угловое перемещение подвижного элемента.

Для упрощения дальнейших расчетов целесообразно представить сигнатуру обратной связи по положению в виде ряда Фурье [11]

$$\text{sign} \chi = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2(1-(-1)^i)}{\pi i} \sin(i\Omega t), \quad (2)$$

где i – множество натуральных чисел.

С помощью системы уравнений во вращающейся системе координат $d - q$, описывающей электромагнитные и электромеханические переходные процессы в вентильном двигателе [12–14], с учетом корней характеристических уравнений функций регулирования (1) определены фазные токи вентильного двигателя по обмоткам d и q :

$$\left. \begin{aligned} i_d(t) &= \left[\begin{aligned} &A \cos(\Omega t + \alpha) + B \sin(\Omega t + \alpha) + E + \\ &+ \sum_{i=1}^{\infty} (C \cos(i\Omega t) + D \sin(i\Omega t)) \end{aligned} \right]; \\ i_q(t) &= \left[\begin{aligned} &A_1 \cos(\Omega t + \alpha) + B_1 \sin(\Omega t + \alpha) - E_1 + \\ &+ \sum_{i=1}^{\infty} (C_1 \cos(i\Omega t) + D_1 \sin(i\Omega t)) \end{aligned} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Значения коэффициентов $A, A_1, B, B_1, C, C_1, D, D_1, E, E_1$ зависят от параметров вентильного двигателя, скорости и частоты колебаний подвижного элемента привода и определяют амплитуды фазных токов двигателя:

$$A = \frac{-U_2 \Omega \omega L_q R_s (L_d + L_q)}{(\omega^2 L_d L_q + R_s^2 - \Omega^2 L_d L_q)^2 + \Omega^2 R_s^2 (L_d + L_q)^2};$$

$$B = \frac{U_2 \omega L_q (\omega^2 L_d L_q + R_s^2 - \Omega^2 L_d L_q)}{(\omega^2 L_d L_q + R_s^2 - \Omega^2 L_d L_q)^2 + \Omega^2 R_s^2 (L_d + L_q)^2};$$

$$C = \frac{-2k_{oc} \omega L_q (1 - (-1)^i) i \Omega R_s (L_d + L_q)}{\pi i \cdot (\omega^2 L_d L_q + R_s^2 - (i\Omega)^2 L_d L_q)^2 + (i\Omega)^2 R_s^2 (L_d + L_q)^2};$$

$$D = \frac{2k_{oc} \omega L_q (1 - (-1)^i) \cdot (\omega^2 L_d L_q + R_s^2 - (i\Omega)^2 L_d L_q)}{\pi i \cdot (\omega^2 L_d L_q + R_s^2 - (i\Omega)^2 L_d L_q)^2 + (i\Omega)^2 R_s^2 (L_d + L_q)^2};$$

$$A_1 = \frac{U_2 \Omega L_q (\omega^2 L_d^2 - \Omega^2 L_d^2 - R_s^2)}{(\omega^2 L_d L_q + R_s^2 - \Omega^2 L_d L_q)^2 + \Omega^2 R_s^2 (L_d + L_q)^2};$$

$$B_1 = \frac{U_2 R_s (\omega^2 L_d L_q + \Omega^2 L_d^2 + R_s^2)}{(\omega^2 L_d L_q + R_s^2 - \Omega^2 L_d L_q)^2 + \Omega^2 R_s^2 (L_d + L_q)^2};$$

$$C_1 = \frac{2k_{oc} L_q i \Omega (1 - (-1)^i) (\omega^2 L_d^2 - (i\Omega L_d)^2 - R_s^2)}{\pi i \cdot (\omega^2 L_d L_q + R_s^2 - (i\Omega)^2 L_d L_q)^2 + (i\Omega)^2 R_s^2 (L_d + L_q)^2};$$

$$D_1 = \frac{2k_{oc} R_s (1 - (-1)^i) (\omega^2 L_d L_q + (i\Omega L_d)^2 + R_s^2)}{\pi i \cdot (\omega^2 L_d L_q + R_s^2 - (i\Omega)^2 L_d L_q)^2 + (i\Omega)^2 R_s^2 (L_d + L_q)^2};$$

$$E = \frac{U_1 R_s - \omega^2 \Psi_m L_q}{\omega^2 L_d L_q + R_s^2}, \quad E_1 = \frac{\omega (U_1 L_d + \Psi_m R_s)}{\omega^2 L_d L_q + R_s^2}.$$

Здесь R_s – активное сопротивление обмотки статора; L_q, L_d – поперечная и продольная составляющие индуктивности; Ψ_m – максимальное потокоцепление обмотки статора с потоком ротора; ω – электрическая скорость изменения обобщенной координаты подвижного элемента.

Выходные параметры вентильного электропривода колебательного движения можно определить, решив уравнение движения, которое представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка [10]:

$$L_m \frac{d^2 \chi}{dt^2} + \frac{(R_m - F_d) d\chi}{dt} + C_m \chi = M_{\Pi}, \quad (4)$$

где L_m – инерционная составляющая нагрузки; R_m – демпфирующая составляющая нагрузки; C_m – позиционная составляющая нагрузки; M_{Π} и F_d – соответственно пусковой момент и коэффициент электромагнитного демпфирования вентильного двигателя. Последние определяются путем разложения электромагнитного момента в ряд Маклорена по степеням скорости ω в окрестностях $\omega=0$ согласно выражениям

$$M_{\Pi} = \left[\begin{array}{l} M_{\Pi 1} \sin(\Omega t) + M_{\Pi 2} \cos(\Omega t) + \\ + \sum_{i=2}^{\infty} (M_{\Pi 3} \sin(i\Omega t) + M_{\Pi 4} \cos(i\Omega t)) \end{array} \right];$$

$$F_d = \left[\begin{array}{l} U_1 k_{\Pi 1} - k_{\Pi 2} - U_1^2 k_{\Pi 3} + U_2^2 k_{\Pi 4} - k_{oc} U_2 k_{\Pi 5} - \\ - U_2 k_{oc} \sum_{i=2}^{\infty} \left(\begin{array}{l} k_{\Pi 6} \cos(\Omega t + \alpha - i\Omega t) + \\ + k_{\Pi 7} \cos(\Omega t + \alpha + i\Omega t) + \\ + k_{\Pi 8} \sin(\Omega t + \alpha + i\Omega t) + \\ + k_{\Pi 9} \sin(\Omega t + \alpha - i\Omega t) \end{array} \right) + \\ + (U_2^2 k_{\Pi 10} - k_{oc} U_2 k_{\Pi 11}) \sin(2\Omega t) + \\ + (U_2^2 k_{\Pi 12} - k_{oc} U_2 k_{\Pi 13}) \cos(2\Omega t) + \\ + \left(\begin{array}{l} (k_{\Pi 14} \sin(\Omega t) - k_{\Pi 15} \cos(\Omega t)) \times \\ \times \sum_{i=2}^{\infty} (k_{\Pi 16} \sin(i\Omega t) + k_{\Pi 17} \cos(i\Omega t)) + \\ + (k_{\Pi 18} \sin(\Omega t) - k_{\Pi 19} \cos(\Omega t)) \times \\ + k_{oc}^2 \times \sum_{i=2}^{\infty} (k_{\Pi 20} \sin(i\Omega t) - k_{\Pi 21} \cos(i\Omega t)) + \\ + \sum_{i=2}^{\infty} (k_{\Pi 22} \sin(i\Omega t) - k_{\Pi 23} \cos(i\Omega t)) \times \\ \times \sum_{i=2}^{\infty} (k_{\Pi 24} \sin(i\Omega t) + k_{\Pi 25} \cos(i\Omega t)) \end{array} \right) \end{array} \right].$$

Амплитудные значения гармоник пусковой составляющей электромагнитного момента определяются коэффициентами $M_{\Pi 1}, M_{\Pi 2}, M_{\Pi 3}, M_{\Pi 4}$:

$$M_{\Pi 1} = h_1 (\Psi_m + U_1 h_4) \left(U_2 (R_s \cos \alpha + \Omega L_q \sin \alpha) - \frac{4R_s k_{oc}}{\pi} \right);$$

$$M_{\Pi 2} = h_2 (\Psi_m + U_1 h_4) \left(U_2 (R_s \sin \alpha - \Omega L_q \cos \alpha) + \frac{4\Omega L_q k_{oc}}{\pi} \right);$$

$$M_{\Pi 3} = -k_{oc} (\Psi_m + U_1 h_4) h_3 R_s;$$

$$M_{\Pi 4} = k_{oc} (\Psi_m + U_1 h_4) h_3 i \Omega L_q.$$

Коэффициенты $h_1 \dots h_4, k_{\Pi 1} \dots k_{\Pi 25}$ зависят от параметров вентильного двигателя и частоты источника питания.

Необходимо отметить, что при расчетах коэффициента электромагнитного демпфирования вентильного двигателя целесообразно учитывать только составляющие с постоянными коэффициентами $k_{\Pi 1} - k_{\Pi 5}$, поскольку весовой вклад составляющих модуляции не более 3%.

Решением уравнения (4), при наличии в электромеханической системе отрицательной обратной связи будет закон движения подвижного элемента вентильного двигателя:

$$\chi(t) = \left[\begin{array}{l} H_1 \sin(\Omega t) + H_2 \cos(\Omega t) + \\ + \sum_{i=2}^{\infty} (H_3 \sin(i\Omega t) + H_4 \cos(i\Omega t)) \end{array} \right], \quad (5)$$

где коэффициенты $H_1 - H_4$ представлены в виде составляющих амплитуды колебания:

$$\begin{aligned}
 H_1 &= \left[\frac{h_1(\Psi_m + U_1 h_4)}{(C_M - \Omega^2(J + L_M))^2 + \Omega^2(R_M - F_d)^2} \times \right. \\
 &\quad \left. \Omega \left(\frac{U_2(R_s \cos \alpha + \Omega L_q \sin \alpha) - 4R_s k_{oc}}{\pi} \right) (C_M - \Omega^2(J + L_M)) + \right. \\
 &\quad \left. + \left(U_2(R_s \sin \alpha - \Omega L_q \cos \alpha) + \frac{4\Omega L_q k_{oc}}{\pi} \right) (R_M - F_d) \right]; \\
 H_2 &= \left[\frac{h_1(\Psi_m + U_1 h_4)}{(C_M - \Omega^2(J + L_M))^2 + \Omega^2(R_M - F_d)^2} \times \right. \\
 &\quad \left. \left(U_2(R_s \sin \alpha - \Omega L_q \cos \alpha) + \frac{4\Omega L_q k_{oc}}{\pi} \right) (C_M - \Omega^2(J + L_M)) - \right. \\
 &\quad \left. - \Omega \left(U_2(R_s \cos \alpha + \Omega L_q \sin \alpha) - \frac{4R_s k_{oc}}{\pi} \right) (R_M - F_d) \right]; \\
 H_3 &= \left[\frac{-k_{oc} h_3 (\Psi_m + U_1 h_4) \times}{R_s (C_M - (i\Omega)^2 (J + L_M)) - (i\Omega)^2 L_q (R_M - F_d)} \right. \\
 &\quad \left. \times \frac{(C_M - (i\Omega)^2 (J + L_M))^2 + (i\Omega)^2 (R_M - F_d)^2}{(C_M - (i\Omega)^2 (J + L_M))^2 + (i\Omega)^2 (R_M - F_d)^2} \right]; \\
 H_4 &= \left[\frac{-k_{oc} h_3 (\Psi_m + U_1 h_4) \times}{-i\Omega L_q (C_M - (\Omega i)^2 (J + L_M)) - R_s i\Omega (R_M - F_d)} \right. \\
 &\quad \left. \times \frac{(C_M - (\Omega i)^2 (J + L_M))^2 + (\Omega i)^2 (R_M - F_d)^2}{(C_M - (\Omega i)^2 (J + L_M))^2 + (\Omega i)^2 (R_M - F_d)^2} \right].
 \end{aligned}$$

Взяв производную по времени от полученного выражения координаты (5), определим скорость подвижного элемента вентильного двигателя и значение колебательного электромагнитного момента:

$$M_3(t) = \left[\begin{aligned} &(M_{п1} - H_2 \Omega F_d) \sin(\Omega t) + \\ &+ \sum_{i=2}^{\infty} \left((M_{п3} - H_4 i \Omega F_d) \sin(i\Omega t) + \right. \\ &\left. (M_{п4} + H_3 i \Omega F_d) \cos(i\Omega t) \right) + \\ &\left. + (M_{п2} + H_1 \Omega F_d) \cos(\Omega t) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Следует отметить, что при учете в выражениях (5) и (6) только первой гармонической составляющей ряда Фурье погрешность расчета не превышает 2%.

Тогда с учетом вышеуказанного выражения для вычисления амплитудных значений электромагнитного момента, развиваемого вентильным двигателем, и координаты подвижного элемента привода можно записать как

$$\left. \begin{aligned} M_m &= \sqrt{(M_{п1} - H_2 \Omega F_d)^2 + (M_{п2} + H_1 \Omega F_d)^2}, \\ \chi_m &= \sqrt{H_1^2 + H_2^2}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Полученные выражения (5)–(7) составляют теоретическую основу для определения выходных параметров вентильного электропривода колебательного движения. Помимо этого, они могут быть использованы при определении динамических и энергетических показателей электропривода.

Оценка правомерности рассмотренной методики расчета выходных параметров вентильного электропривода колебательного движения с возможностью регулирования его собственной частоты была проведена с помощью численных расчетов в математической среде MathCAD–2015. В качестве объекта исследования был выбран вентильный электродвигатель с постоянными магнитами [15], данные которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Конструктивные параметры двигателя

Параметр	Значение	Параметр	Значение
R_s , Ом	0,96	Ψ_m , Вб	0,183
L_d , Гн	5,25e-3	J , кг·м ²	13e-3
L_q , Гн	2,25e-3	p	4
m	3	–	–

В соответствии с изложенной методикой для данного двигателя были рассчитаны выходные параметры и построена амплитудно-частотная характеристика электромагнитного момента вентильного электропривода колебательного движения при различных значениях глубины обратной связи по положению и отсутствию позиционной нагрузки (рис. 1).

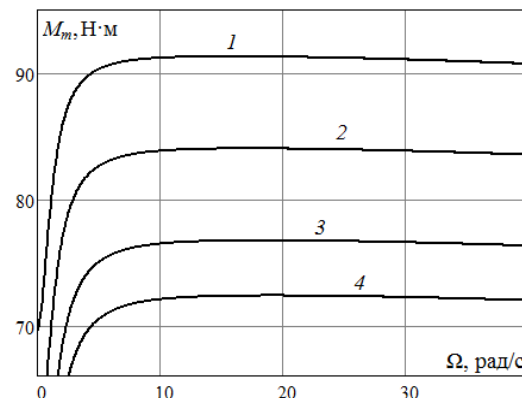


Рис. 1. График зависимости амплитудного значения электромагнитного момента от частоты:

1 – $k_{oc} = 0$; 2 – $k_{oc} = 1$; 3 – $k_{oc} = 2$; 4 – $k_{oc} = 3$

График зависимости $M_m(\Omega)$ показывает, что за счет изменения глубины отрицательной обратной связи по координате подвижного элемента двигателя k_{oc} можно регулировать собственную резонансную частоту электромеханической системы, обеспечивая тем самым наиболее выгодный с энергетической точки зрения режим работы.

При инженерных расчетах количественную оценку эффективности работы вентильного электропривода колебательного движения с обратной связью по положению можно провести по коэффициенту эффективности амплитуды колебаний или момента, численные значения которых определяются выражениями

$$k_{эфл} = \frac{\chi_{m,oc}}{\chi_m} 100\%; \quad k_{эфM} = \frac{M_{m,oc}}{M_m} 100\%, \quad (8)$$

где $\chi_{m,oc}$, $M_{m,oc}$; χ_m , M_m – амплитудные значения законов движения подвижного элемента и электро-

магнитного момента, развиваемого вентильным двигателем на заданной частоте колебаний Ω при наличии и отсутствии обратной связи по положению соответственно.

В соответствии с выражением (8) для выбранного ранее двигателя были рассчитаны коэффициенты эффективности при работе двигателя в дорезонансном ($\Omega_1 = 10$ рад/с) и зарезонансном режимах ($\Omega_2 = 20$ рад/с) относительно естественной собственной резонансной частоты электромеханической системы $\Omega_p = 18,458$ рад/с. По полученным расчётным данным построены графики (рис. 2), отражающие изменение эффективности работы вентильного электродвигателя колебательного движения при введении отрицательной обратной связи.

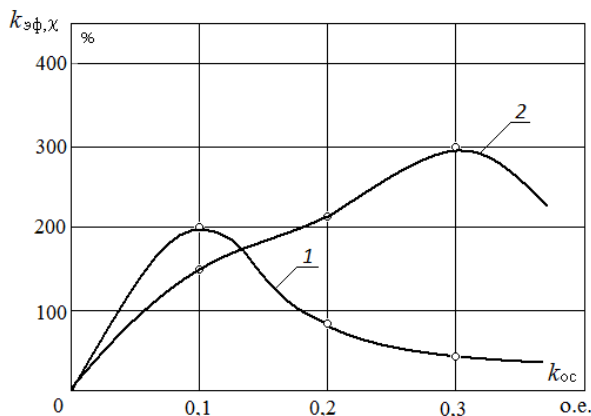


Рис. 2. График зависимости коэффициента эффективности от коэффициента обратной связи по координате подвижного элемента двигателя при частоте колебаний:

1 – $\Omega_1=10$ рад/с; 2 – $\Omega_2=20$ рад/с

Было установлено, что эффективность работы вентильного электродвигателя в режиме колебаний с частотой $\Omega_1 < \Omega_p$ (кривая 1) при увеличении коэффициента обратной связи уменьшается. Это объясняется тем, что в этом случае разность между рабочей частотой и собственной резонансной частотой электродвигателя увеличивается. В то же время эффективность работы вентильного электродвигателя, работающего в режиме колебаний с частотой $\Omega_2 > \Omega_p$, при увеличении глубины обратной связи по положению (рис. 3), будет увеличиваться, так как в этом случае разность между рабочей частотой и собственной резонансной частотой электродвигателя стремится к нулю.

Комплексную оценку эффективности работы электропривода колебательного движения с обратной связью по положению и без нее можно провести на основании расчета энергетического фактора

$$E = K_M \eta = \frac{M_{п\lambda m} \Omega}{S_{дв}}, \quad (9)$$

где K_M , η – коэффициенты мощности и полезного действия; $S_{дв}$ – условно потребляемая вентильным двигателем полная мощность.

Как было отмечено в работе [16], с помощью данного критерия можно дать наиболее полную оценку эффективности работы электромеханическо-

го преобразователя энергии, учитывая не только качественную (K_M), но и количественную (η) сторону колебательного процесса.

В табл. 2 приведены расчетные значения энергетического фактора электромеханической системы при наличии обратной связи по положению и при ее отсутствии, рассчитанные согласно (9) на частоте колебаний $\Omega=10$ рад/с при работе двигателя на чисто инерционную нагрузку.

Таблица 2
Значения энергетического фактора

№	$k_{ос}$, о.е.	E , о.е.
1	0	0,062
2	0,3	0,24

Полученные данные еще раз иллюстрируют преимущество поддержания резонансного режима работы в вентильном электроприводе колебательного движения за счет регулирования его собственной частоты путем изменения глубины отрицательной обратной связи по положению.

Реализовать способ управления собственной частотой электромеханической системы позволяет схема вентильного электропривода колебательного движения, включающая следующие функциональные узлы: двухфазный вентильный двигатель (ВД), задающий генератор переменного напряжения (ЗГ) с регулируемой частотой Ω , выпрямитель (В), фильтр низкой частоты (Ф), преобразователи переменного напряжения (ПН1, ПН2), релейный элемент, усилитель сигнала обратной связи (У), датчик положения ротора (ДПР), усилитель мощности (УМ).

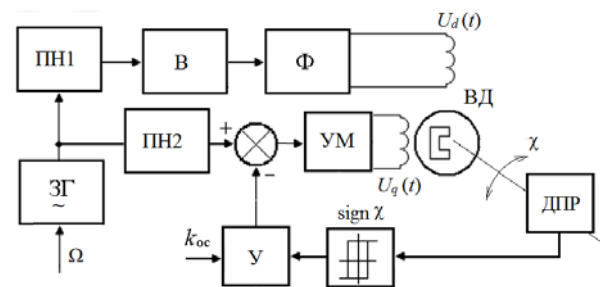


Рис. 3. Функциональная схема вентильного электропривода колебательного движения с регулируемой собственной частотой

Синусоидальное напряжение частоты Ω поступает с выхода ЗГ на преобразователи ПН1 и ПН2, выполняющие роль усилителей переменного напряжения. С выхода ПН1 напряжение поступает на выпрямитель (В), а затем на фильтр низкой частоты (Ф), где преобразуется в постоянное напряжение и запитывает одну из фазных обмоток вентильного двигателя (ВД).

Усиленное в ПН2 синусоидальное напряжение суммируется на сумматоре с сигналом единичной обратной связи, поступающим с датчика ДПР. Глубина обратной связи устанавливается с помощью регулирования коэффициента передачи по напряжению усилителя (У). Сформированное таким образом

на выходе сумматора напряжение поступает на вход УМ, где оно усиливается по мощности и запитывает вторую обмотку ВД. В результате взаимодействия фазных потокосцеплений в воздушном зазоре вентильного двигателя возникает колебательное электромагнитное поле, и ротор двигателя начинает совершать колебательные движения с частотой Ω . Регулируя коэффициент обратной связи $k_{ос}$ усилителя (У), обеспечивают настройку системы в резонансный режим для заданной частоты колебаний. Регулирование частоты колебаний производится задающим генератором, а амплитуды – за счет изменения коэффициента передачи усилителя мощности.

Заключение

Применение в приводах радиолокационных устройств безредукторных вентильных электроприводов, работающих непосредственно в режиме колебаний с регулируемой собственной частотой, обеспечивает широкий диапазон частот и ускорений при высоких энергетических показателях. В соответствии с проведенными исследованиями выходные характеристики такого вида электроприводов целесообразно рассчитывать по изложенной выше методике.

Литература

- Jain A.K. On-line fingerprint verification / A.K. Jain, L. Hong, R.M. Bolle // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1997. – № 19 (04). – P. 302–313.
- Иваник В.В. Моделирование резонансного асинхронного электропривода возвратно-поступательного движения с алгоритмом управления по моменту // Записки Горного института. – 2009. – Т. 182. – С. 81–84.
- Acarnley P.P. Stepping motors: a guide to theory and practice. – London : The Institution of Engineering and Technology, 2007. – 159 p.
- Fashilenko V.N. Energy efficient resonant mode of electromechanical system mining machines based on management structures with PID-controller / V.N. Fashilenko, S.N. Reshetnyak // Miner's week–2015 : Reports of the XXIII International Scientific Symposium. – 2015. – P. 608–612.
- Study on the Characteristics of Electromagnetic Noise of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor / W. Wang, H. Wang, H. Karimi. – 2014. – Article ID 764105 – P. 8 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/aaa/2014/764105/>, свободный (дата обращения: 19.06.2018).
- Firoozian R. Servo Motors and Industrial Control Theory. – Cham: Springer International Publishing, 2014. – 237 p.
- Асташев В.К. Системы возбуждения авторезонансных вибротехнических устройств // Вестник научно-технического развития. – М., 2007. – С. 11–17.
- Ede J.D. Rotor Resonances of High-Speed Permanent-Magnet Brushless Machines / J.D. Ede, Z.Q. Zhu, D. Howe // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2002. – № 38 (6). – P. 1542–1548.
- Красовский А.Б. Исследования колебаний вентильного двигателя при импульсном регулировании фазных токов // Изв. вузов. Машиностроение. – 2015. – № 12 (669). – С. 27–34.
- Луковников В.И. Электропривод колебательного движения. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
- Аристов А.В. Разработка и исследование прецизионного асинхронного электропривода угловых синусоидальных колебаний : дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1982. – 177 с.
- Косулин В.Д. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов / В.Д. Косулин, Г.Б. Михайлов, В.В. Омельченко, В.В. Путников. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1988. – 184 с.
- High performance control of the permanent magnet synchronous motor using self-tuning resonant controllers / P. Degobert, G. Remy, Jing Zeng, P.-J. Barre, J.-P. Hautier // Proceeding of the Thirty-Eighth Southeastern Symposium on System Theory SSST. – 2006. – P. 382–386.
- System Efficiency Improvement for Electric Vehicles Adopting a Permanent Magnet Synchronous Motor Direct Drive System / C. Zhang, Q. Guo, L. Li, M. Wang, T. Wang // Energies. – 2017. – № 10. – P. 2030 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/12/2030>, свободный (дата обращения: 19.06.2018).
- Герман-Галкин С.Г. Проектирование мехатронных систем. – СПб.: КОРОНА-век, 2008. – 368 с.
- Аристов А.В. Электропривод колебательного движения с регулируемой собственной частотой // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 1 (23). – С. 5–9.

Кулаковский Юрий Михайлович

Инженер АО «НПЦ Полюс»

Кирова пр-т, д. 56в, г. Томск, Россия, 634041

Тел.: (382-2) 55-46-94

Эл. почта: [ymkulakovskiy@yandex.ru](mailto:ykulakovskiy@yandex.ru)

Аристов Анатолий Владимирович

Д-р техн. наук, профессор отделения электроэнергетики

и электротехники Национального исследовательского

Томского политехнического ун-та (НИ ТПУ),

Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-913-850-16-27

Эл. почта: parist@sibmail.com

Kulakovskiy Y.M., Aristov A.V.

Valve electric drive in oscillatory mode with variable natural frequency

The calculation procedure of item output of the valve electric drive in oscillatory mode subject to electric machine parameters, load and adjustment functions has been developed. The adjustability of the valve electric drive natural frequency through drive operating element's position feedback has been specified. The comparative evaluation of electric drive operating efficiency with position feedback has been conducted. The functional diagram that implements natural frequency control mode of electro-mechanical system has been given.

Keywords: valve electric drive, natural frequency, oscillatory motion, resonant mode, reversed feedback.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-1-83-88

References

- Jain A.K. On-line fingerprint verification / A.K. Jain, L. Hong, R.M. Bolle // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, no. 19 (04), pp. 302–313.
- Ivanik V.V. Modelirovanie rezonansnogo asinhronnogo jelektroprivoda vozvratno-postupatel'nogo dvizhenija s

algoritmom upravljenja po momentu [Simulation of resonant, asynchronous electric drive of return-rotary movement with the torque control algorithm]. *Zapiski Gornogo instituta* [Proceedings of the Mining Institute], 2009, Vol. 182, pp. 81–84 (in Russ.).

3. Acarnley P.P. *Stepping motors: a guide to theory and practice*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2007. 159 p.

4. Fashilenko V.N. Energy efficient resonant mode of electromechanical system mining machines based on management structures with PID-controller / V.N. Fashilenko, S.N. Reshetnyak // *Miner's week-2015: Reports of the XXIII International Scientific Symposium*, 2015, pp. 608–612.

5. Study on the Characteristics of Electromagnetic Noise of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor / W. Wang, H. Wang, H. Karimi, 2014. Article ID 764105 – P. 8. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/aaa/2014/764105/> (accessed: June 19, 2018).

6. Firoozian R. *Servo Motors and Industrial Control Theory*. Cham: Springer International Publishing, 2014. 237 p.

7. Astashev V.K. Sistemy vozbuzhdeniya avtozonansnykh vib-rotehnicheskikh ustrojstv [Excitation systems of autoresonant vibrotechnical devices]. *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya* [Bulletin of Science and Technical Development]. Moscow: 2007, pp. 11–17 (in Russ.).

8. Ede J.D. Rotor Resonances of High-Speed Permanent-Magnet Brushless Machines / J.D. Ede, Z.Q. Zhu, D. Howe // *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, no. 38 (6), pp. 1542–1548.

9. Krasovsky A.B. A study of oscillations of a converted motor with impulse control of phase currents // *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij* [Proceedings of higher educational institutions], 2015, no. 12 (669), pp. 27–34 (in Russ.).

10. Lukovnikov V.I. *Jelektroprivod kolebatel'nogo dvizhe-nija* [Electric drive of oscillatory motion]. M.: Jenergoatomizdat, 1984. 152 p. (in Russ.).

11. Aristov A.V. *Razrabotka i issledovanie precizionnogo asinhronnogo jelektroprivoda uglovyh sinusoidal'nyh kolebanij*. Dis. kand. tehn. nauk. [Development and research of the precise asynchronous electric drive with angular sinusoidal vibrations. Cand. Diss. Tomsk, 1982. 177 p. (in Russ.).

12. Kosulin V.D., Mihajlov G.B., Omel'chenko V.V., Putnikov V.V. *Ventil'nye jelektroprivodnyye maloj moshhnosti dlja promyshlennykh robotov* [Low power valve motors for industrial robots]. Leningrad: Jenergoatomizdat, Leningr. otdnie, 1988. 184 p. (in Russ.).

13. High performance control of the permanent magnet synchronous motor using self-tuning resonant controllers / P. Degobert, G. Remy, Jing Zeng, P.-J. Barre, J.-P. Hautier // *Proceeding of the Thirty-Eighth Southeastern Symposium on System Theory SSST*, 2006, pp. 382–386.

14. System Efficiency Improvement for Electric Vehicles Adopting a Permanent Magnet Synchronous Motor Direct Drive System / C. Zhang, Q. Guo, L. Li, M. Wang, T. Wang // *Energies*, 2017, no. 10. P. 2030. Available at: <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/12/2030>, (accessed: June 19, 2018)

15. German-Galkin S.G. *Proektirovanie mehatronnykh sistem* [Design of mechatronic systems]. St. Petersburg: KORONA-vek, 2008. – 368 p. (in Russ.).

16. Aristov A.V. Oscillatory electric drive with variable eigenfrequency. *Proceedings of TUSUR University*. Tomsk, 2011, no. 1 (23), pp. 5–9 (in Russ.).

Yuriy M. Kulakovskiy

Engineer, JSC «SPC «Polus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634041
Phone: +7 (382-2) 55-46-94
Email: ymkulakovskiy@yandex.ru

Anatoliy V. Aristov

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Electroenergetics and Electrical engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (NI TPU) 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-850-16-27
Email: parist@sibmail.com