

Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 621. 313. 323


DOI: 10.18698/0536-1044-2015-12-27-34

Исследование колебаний вентильного двигателя при импульсном регулировании фазных токов

А.Б. Красовский

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

A Study of Oscillations of a Converter-Fed Motor with Impulse Control of Phase Currents

A.B. KrasovskyBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1 e-mail: krasovsky@bmstu.ru

i Рассматривается вентильный двигатель (ВД) с синусоидальным токовым питанием, широко используемый в электроприводах станочных линий, роботов, в аэрокосмическом приборостроении и т. п. При некоторой идеализации дано математическое описание колебательных процессов подвижной части ВД, вызванных пульсирующей составляющей фазных токов. Изучена зависимость частоты и амплитуды пульсирующей составляющей электромагнитного момента ВД от соотношения частот пульсаций токов в фазах ВД при широтно-импульсном и релейном способах регулирования фазных токов. С применением имитационного моделирования и теории планирования эксперимента в среде MATLAB-SIMULINK для типовых параметров электропривода получены уравнения его проектирования в удобной полиномиальной форме, позволяющие при известных его параметрах и параметрах управления оценивать амплитуды пульсаций момента, скорости и положения ротора ВД либо при допустимых значениях амплитуд этих пульсирующих составляющих обоснованно выбирать параметры электропривода.

Ключевые слова: вентильный двигатель, импульсное регулирование, пульсации фазного тока, колебания момента, скорости и положения ротора, имитационное моделирование.

i A converter-fed motor with sinusoidal current supply is considered in the article. The motor is widely used in electric drives of machine lines, robots, in aerospace instrument engineering, etc. The authors present a somewhat idealized mathematical description of the oscillating processes of the movable part of the motor that are caused by the pulsating component of the phase currents. A dependence of the frequency and amplitude of the electro-magnetic torque pulsating component on the correlation of the phase current pulsation frequencies is studied with regard to impulse and relay control of the phase currents. Using simulation modelling and theory of design of experiments in MATLAB-SIMULINK environment, design equations are obtained for standard parameters of the electric drive. The equations are presented in a convenient polynomial form and can be used for estimating pulsation amplitude of the torque, speed and position of the motor rotor

when the drive control parameters are known. They can also be used for choosing electric drive parameters at allowable amplitude values of the pulsating components.

Keywords: converter-fed motor, impulse control, phase current pulsations, torque oscillations, rotor speed and position, simulation modelling.

К вентильным двигателям (ВД) относят синхронные электрические машины, у которых фазные токи формируются с помощью электронных средств управления в функции положения ротора [1–4]. Эти двигатели применяют в электроприводах станочных линий, роботов, в аэрокосмическом приборостроении и т. п. Особую категорию составляют прямые (безредукторные) прецизионные электроприводы различного оборудования, используемого для изготовления оптических изделий, при лазерной обработке материалов в измерительной технике и т. д. с точностью углового позиционирования на уровне единиц секунд или линейного перемещения на уровне единиц микрометров и менее [2].

Предпочтительная форма фазных токов ВД зависит от их конструктивного исполнения и предъявляемых требований. Наибольшими возможностями обладают ВД с синусоидальным токовым питанием, называемые в технической литературе также ВД переменного тока. При некоторой идеализации процессов получено, что наилучшие условия электромеханического преобразования энергии в них обеспечиваются, если токи во все фазы синусоидальной формы с необходимыми фазовыми сдвигами заданы программно. Это относится как к наиболее распространенным традиционным ВД непрерывного движения, так и к выделяемым иногда в отдельный класс шаговым ВД с глубоким электрическим дроблением шага перемещения [5–7].

Современные электронные средства управления при надлежащем выборе уровня напряжения силового источника питания позволяют формировать заданную форму выходного тока с высокой точностью. Наибольшую точность обеспечивают преобразователи, в которых регулирующие силовые полупроводниковые элементы работают в непрерывном или усилительном режиме. Однако при этом в них имеются значительные потери мощности. Для повышения энергетической эффективности привода при выходной мощности примерно 100 Вт и напряжении более 30 В обычно переходят к импульсному регулированию фазных токов ВД. В результате в фазном токе кроме непрерывной или

гладкой составляющей, пропорциональной задающему сигналу, появляется высокочастотная пульсирующая составляющая [8].

Нередко при частоте коммутации современных ключевых полупроводниковых элементов — транзисторов на уровне 5...10 кГц и выше — для упрощения анализа пульсирующей составляющей фазных токов пренебрегают, полагая, что электропривод по отношению к ним обладает свойствами фильтра. Однако для обоснования допустимости применения такого упрощения в каждом конкретном случае необходимо иметь простые, удобные для практического применения соотношения, позволяющие количественно оценить влияние пульсаций фазных токов двигателя на параметры его движения. Это особенно актуально, в частности, для прецизионного планарного электропривода на воздушной опоре, отличающегося слабым внешним демпфированием [6]. В нем даже относительно небольшие возмущения, вызванные пульсациями фазных токов, могут приводить к заметным колебательным процессам, а при определенных условиях и к резонансным явлениям. Сопоставлению особенностей ВД с непрерывным и импульсным питанием посвящен ряд работ, в частности [9], однако они в основном касаются энергетических показателей работы привода. Анализ доступных источников показал, что оценке параметров колебательных процессов ВД при импульсном питании должно уделяться внимание.

При наличии пульсирующих составляющих в фазных токах развиваемый ВД момент может рассматриваться также состоящим из двух составляющих: первая обусловлена программным изменением фазных токов и соответствует движению по программе, вторая вызвана пульсациями фазных токов и соответствует периодическим отклонениям параметров движения (скорости, ускорения и т. п.) от программируемых. Ниже с учетом нелинейности объекта исследования на качественном уровне дано аналитическое описание колебательных процессов в ВД и приведены результаты их моделирования в удобной для практического применения форме, позволяющие получать необходимые количественные оценки.

Аналитическая оценка колебательных процессов в ВД. Рассмотрим идеализированную двухфазную модель ВД. Собственные и взаимные индуктивности такого двигателя описываются соотношениями, приведенными в [5], а программные составляющие фазных токов могут быть представлены как

$$\begin{aligned} i_{01} &= I_m \cos \gamma; \\ i_{02} &= I_m \sin \gamma, \end{aligned} \quad (1)$$

где I_m — амплитудное значение тока; γ — угол, характеризующий пространственное положение результирующего вектора тока статора.

Пульсирующую составляющую фазных токов представим в виде первых гармоник их разложения в ряд Фурье:

$$\begin{aligned} \Delta i_{01} &= \Delta I_m \sin(v_1 t + \varphi); \\ \Delta i_{02} &= \Delta I_m \cos v_2 t, \end{aligned} \quad (2)$$

где v_1, v_2 — частоты пульсаций токов в фазах; φ — фазовый угол; ΔI_m — амплитуда пульсирующей составляющей фазного тока.

С учетом (1) и (2) мгновенные значения фазных токов

$$\begin{aligned} i_1 &= I_m \cos \gamma + \Delta I_m \sin(v_1 t + \varphi); \\ i_2 &= I_m \sin \gamma + \Delta I_m \cos v_2 t, \end{aligned} \quad (3)$$

В рассматриваемой модели ВД электромагнитный момент [6, 10]

$$M = p_n \Psi_{sr} (i_2 \cos \Theta - i_1 \sin \Theta), \quad (4)$$

где p_n — число пар полюсов ВД; Ψ_{sr} — потокосцепление ротора с одной фазой статора; Θ — угол, определяющий положение ротора относительно статора. Подставив токи из (3) в выражение (4), после тригонометрических преобразований получим

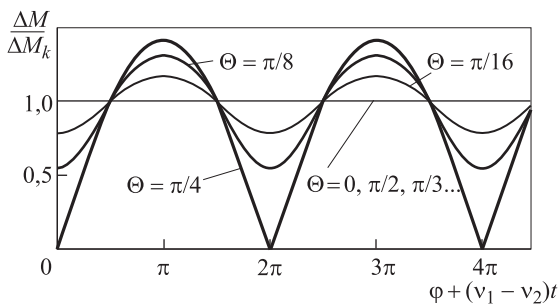


Рис. 1. Зависимость относительной амплитуды пульсаций момента $\Delta M/\Delta M_k$ от аргумента $[\varphi + (v_1 - v_2)t]$ для различных положений подвижной части ВД

$$\begin{aligned} M &= M_m \sin(\gamma - \Theta) + \Delta M_k \times \\ &\times [\sin v_2 t \cos \Theta - \sin(v_1 t + \varphi) \sin \Theta], \end{aligned} \quad (5)$$

где $M_m = p_n \Psi_{sr} I_m$ — амплитуда гладкой составляющей синхронизирующего момента; $\Delta M_k = p_n \Psi_{sr} \Delta I_m$.

Из (5) следует, что при импульсном регулировании тока в фазах ВД электромагнитный момент содержит две составляющие:

1) $M_m \sin(\gamma - \Theta)$ — электромагнитный момент, развиваемый ВД при отсутствии пульсаций тока;

2) $\Delta M_k [\sin v_2 t \cos \Theta - \sin(v_1 t + \varphi) \sin \Theta]$ — составляющая электромагнитного момента, обусловленная пульсациями тока.

Преобразуем выражение для пульсирующей составляющей момента к виду, более удобному для анализа:

$$\begin{aligned} \Delta M &= \Delta M_k \left[\sin^2 \left(\frac{\pi - \varphi}{4} + \frac{v_2 - v_1}{2} t - \Theta \right) + \right. \\ &+ \left. \cos^2 \left(\frac{\pi - \varphi}{4} + \frac{v_2 - v_1}{2} t + \Theta \right) \right]^{1/2} \times \\ &\times \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} + \frac{v_1 + v_2}{2} t + \frac{\varphi}{2} + \Psi \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\operatorname{tg} \Psi = - \frac{\cos \left(\frac{\pi - \varphi}{4} + \frac{v_2 - v_1}{2} t + \Theta \right)}{\sin \left(\frac{\pi - \varphi}{4} + \frac{v_2 - v_1}{2} t - \Theta \right)}.$$

Часть выражения (6)

$$\begin{aligned} \Delta M_k \left[\sin^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} + \frac{v_2 - v_1}{2} t - \Theta \right) + \right. \\ \left. + \cos^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} + \frac{v_2 - v_1}{2} t + \Theta \right) \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (7)$$

условно можно рассматривать как амплитуду пульсаций момента; частота пульсаций момента в общем случае содержит две составляющие:

1) входящую в неявном виде в выражение для Ψ ;

2) определяемую как среднее арифметическое значение частот пульсаций тока в фазах v_1 и v_2 .

Прделав дополнительные тригонометрические преобразования, выражение для пульсаций момента можно переписать иначе (рис. 1):

$$\Delta M = \Delta M_k \sqrt{1 - \cos(\varphi + (\nu_2 - \nu_1)t \sin 2\Theta)} \times \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} + \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}t + \Psi\right).$$

Из рис. 1 ясно, что значение $\Delta M/\Delta M_k$ изменяется в $\sqrt{2}$ раз, причем, как и следовало ожидать, оно нелинейно зависит от времени, а также от разности частот пульсаций тока в фазах двигателя $\nu_1 - \nu_2$ и положения ротора относительно статора (угол Θ). Более наглядное представление о характере изменения амплитуды пульсирующей составляющей момента дают зависимости $\Delta M/\Delta M_k(\Theta)$.

На рис. 2, а, б показаны две характерные зависимости $\Delta M/\Delta M_k(\Theta)$ для ВД с типовыми параметрами, полученные из выражения (6) с привлечением математического пакета MATLAB при линейном законе изменения угла Θ , что соответствует равномерному вращению ротора ВД. Рис. 2, а отражает равенство частот пульса-

ций токов ν_1 и ν_2 ($\nu_1 - \nu_2 = 0$). На практике это соответствует импульсному регулированию фазных токов ВД с использованием широтно-импульсной модуляции. На рис. 2, а видно, что изменение амплитуды колебаний момента имеет периодический характер.

При неравенстве частот пульсаций тока в фазах, что является обычным при релейном способе регулирования фазных токов ВД, иногда называемом в технической литературе регулированием по принципу «токового коридора», регулярность в изменении соотношения $\Delta M/\Delta M_k(\Theta)$ нарушается, причем для фиксированного сочетания параметров электропривода период этих колебаний остается неизменным, а амплитуда плавно изменяется между некоторыми минимальным и максимальным значениями. Это демонстрируют рис. 2, б, построенный при $\nu_1 - \nu_2 = 5$, и рис. 2, в, построенный при $\nu_1 - \nu_2 = 20$, что отвечает превышению в 5 и 20 раз соответственно разности угловых частот пульсаций тока $\nu_1 - \nu_2$ над угловой частотой вращения ВД.

Таким образом, даже при упрощенном анализе рассматриваемых процессов в ВД подтверждается предварительный вывод о весьма сложном характере изменения пульсирующей составляющей его электромагнитного момента. Реальная картина гораздо сложнее, поскольку, как следует из соотношения (6), относительно низкочастотные колебания пульсирующей составляющей момента, имеющей частоту $\nu_1 - \nu_2$, дополнительно модулируются высокочастотной составляющей, частота которой $\nu_1 + \nu_2$.

Для пессимистической оценки влияния пульсаций момента на характер движения ВД можно принять амплитуду пульсаций момента постоянной и равной максимальному значению $\Delta M_m = \Delta M_k \sqrt{2}$. Частота пульсаций момента изменяется в некоторых пределах от ν_{\min} до ν_{\max} в зависимости от параметров ВД, инвертора и положения ротора. В простейшем случае можно также принять, что электромагнитный момент

$$M = M_m \sin(\gamma - \Theta) + \Delta M_m \sin(\nu t + \Psi).$$

Реакция электропривода на такой характер изменения момента может быть определена решением уравнения движения подвижных частей электропривода, которое после перехода к относительным единицам при базовых величинах, как в [5], приобретает вид

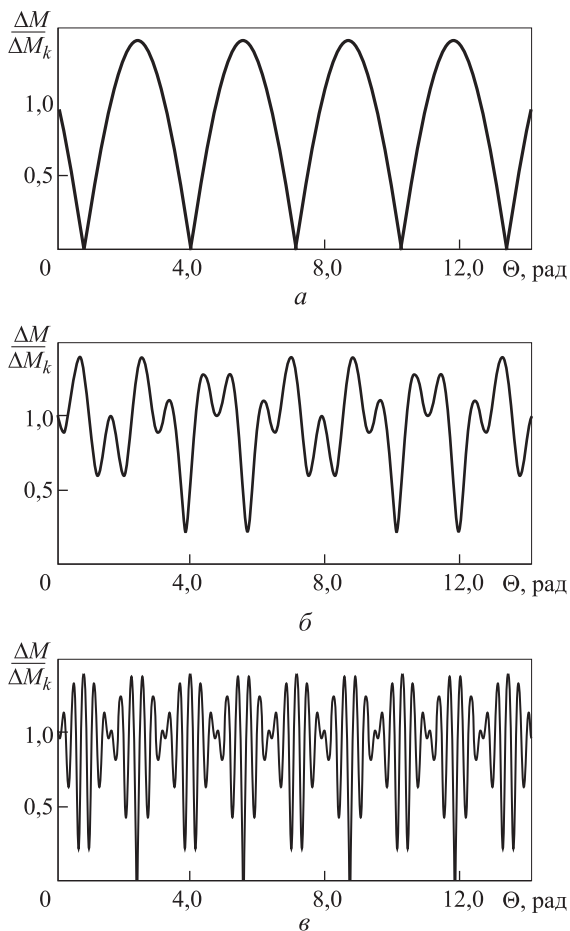


Рис. 2. Характерные зависимости $\Delta M/\Delta M_k(\Theta)$ при различных соотношениях частот пульсаций тока в фазах ВД:

а — $\nu_1 - \nu_2 = 0$; б — $\nu_1 - \nu_2 = 5$; в — $\nu_1 - \nu_2 = 20$

$$\frac{d^2\Theta}{d\tau^2} + \beta \frac{d\Theta}{d\tau} + \mu_n = \sin(\gamma - \Theta) + \Delta\mu_m \sin(v'\tau + \Psi), \quad (8)$$

где β — безразмерный коэффициент внешнего вязкого демпфирования; μ_n — относительный момент нагрузки в долях M_m ; $\Delta\mu = \Delta M_m / M_m$ — относительная амплитуда пульсаций момента; τ — безразмерное время.

Если задана программная траектория движения $\Theta_{пр}(\tau)$, то пульсации момента вызовут периодические отклонения траектории движения от заданной:

$$\begin{aligned} \Theta &= \Theta_{пр} + \Delta\Theta; \\ \frac{d\Theta}{d\tau} &= \frac{d(\Theta_{пр} + \Delta\Theta)}{d\tau}; \\ \frac{d^2\Theta}{d\tau^2} &= \frac{d^2(\Theta_{пр} + \Delta\Theta)}{d\tau^2}. \end{aligned}$$

Перепишем уравнение (8) в отклонениях, предварительно линеаризуя момент в окрестности точки динамического равновесия Θ_d :

$$\frac{d^2\Delta\Theta}{d\tau^2} + \beta \frac{d\Delta\Theta}{d\tau} + \cos\Theta_d \Delta\Theta = \Delta\mu_m \sin(v'\tau + \Psi), \quad (9)$$

где

$$\Theta_d = \arcsin\left(\mu_n + \frac{d^2\Theta_{пр}}{d\tau^2} + \beta \frac{d\Theta_{пр}}{d\tau}\right).$$

Дифференциальное уравнение (9) описывает процесс вынужденных колебаний подвижной части электропривода с ВД с частотой v . Характеристическое уравнение

$$p^2 + \beta p + \cos\Theta_d = 0$$

имеет корни

$$p_{12} = -\frac{\beta}{2} \pm \sqrt{\frac{\beta^2}{4} - \cos\Theta_d} = \alpha \pm j\epsilon.$$

При $\beta^2/4 < \cos\Theta_d$ корни — комплексные числа и общее решение (9) имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta\Theta &= Ae^{-\alpha\tau} \sin(\epsilon\tau + \phi_0) + \\ &+ \frac{\Delta\mu_m \sin(v'\tau + \Psi)}{\sqrt{(\cos\Theta_d - v'^2)^2 + (\beta v')^2}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Первое слагаемое в (10) описывает затухающие колебания, второе — вынужденные. Таким образом, окончательно можно записать:

$$\Delta\Theta_{вын} = \frac{\Delta\mu_m \sin(v'\tau + \Psi)}{\sqrt{(\cos\Theta_d - v'^2)^2 + (\beta v')^2}}; \quad (11)$$

$$\left(\frac{d\Delta\Theta}{d\tau}\right)_{вын} = \frac{\Delta\mu_m v' \sin(v'\tau + \Psi)}{\sqrt{(\cos\Theta_d - v'^2)^2 + (\beta v')^2}}; \quad (12)$$

$$\left(\frac{d^2\Delta\Theta}{d\tau^2}\right)_{вын} = \frac{\Delta\mu_m (v')^2 \sin(v'\tau + \Psi)}{\sqrt{(\cos\Theta_d - v'^2)^2 + (\beta v')^2}}. \quad (13)$$

Соотношения (11)–(13) получены в результате ряда допущений и тем не менее, как видно, весьма приблизительны, громоздки, неудобны для практического применения и позволяют лишь проследить общие тенденции и закономерности. Цель дальнейшего исследования — поиск количественных соотношений, максимально приспособленных для решения задач анализа и синтеза электропривода. Объект исследования — имитационная модель электропривода на базе ВД.

Моделирование колебательных процессов в ВД. Наиболее удобной средой для реализации имитационной модели электропривода с ВД является математический пакет MATLAB с приложением SIMULINK [11]. В двухфазной модели привода в дополнение к уравнению движения (8) использованы уравнения электрического равновесия фаз ВД в относительных единицах для фазных напряжений u_1, u_2 в виде [4]

$$\begin{aligned} u_1 &= i_1 + \chi \frac{di_1}{d\tau} - \delta \sin\Theta \frac{d\Theta}{d\tau}; \\ u_2 &= i_2 + \chi \frac{di_2}{d\tau} + \delta \cos\Theta \frac{d\Theta}{d\tau}, \end{aligned}$$

где i_1, i_2 — фазные токи соответственно в фазах 1 и 2 в долях тока короткого замыкания цепи фазы; χ — электромагнитная постоянная времени фазы в долях периода круговых колебаний привода; δ — относительная ЭДС движения при скорости, равной круговой частоте колебаний привода. В этой системе уравнений нет параметров, отражающих структуру и алгоритм работы импульсного регулятора фазного тока ВД. Данные параметры в неявном виде учитываются в зависимостях фазных напряжений от времени $u_1(\tau)$ и $u_2(\tau)$. Эти зависимости реализуются в модели соответствующим образом благодаря выбору ее структуры и параметров с помощью SIMULINK.

Исследования были проведены для релейного закона регулирования фазных токов ВД — наиболее общего и сложного для анализа. Для определенности принято, что каждая фаза ВД питается от однофазного мостового

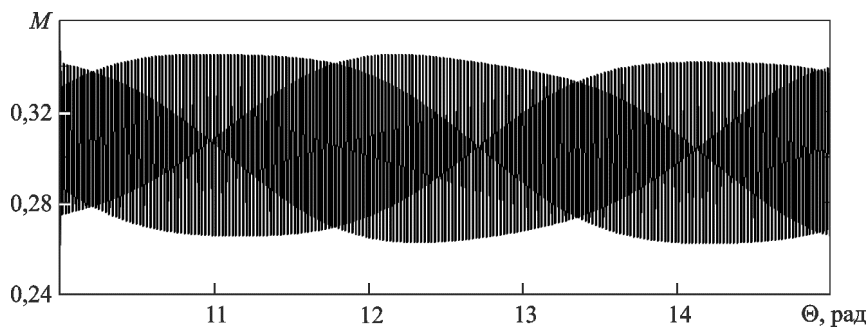


Рис. 3. Фрагмент кривой мгновенного момента ВД при релейном законе регулирования фазных токов, полученный на модели для типовых параметров электропривода:

$$\mu_n = 0,3; \chi = 1; \Delta I_m^* = \Delta I_m / I_m = 0,04; \delta = 0,5$$

инвертора тока с симметричным алгоритмом коммутации ключей, когда к обмотке попеременно прикладываются импульсы напряжения противоположной полярности (рис. 3). На рисунке, в частности, видно, что изменение амплитуды пульсирующей составляющей электромагнитного момента ВД имеет сложный циклический характер и кривая внешне схожа с кривой на рис. 2, в, а их расхождение обусловлено принятыми при построении зависимости на рис. 2, в дополнительными упрощающими допущениями.

Для получения количественных соотношений использованы методы планирования эксперимента, в соответствии с которыми на модели реализован полный факторный эксперимент [12, 13]. В качестве независимых факторов выбраны следующие параметры привода: коэффициент форсировки напряжения силового источника питания k_ϕ , определяющий кратность превышения этим напряжением амплитудного значения падения напряжения на активном сопротивлении фазной обмотки двигателя; безразмерная постоянная времени χ ; относительное значение амплитуды пульсаций фазного тока ВД ΔI_m^* в долях амплитудного значения гладкой составляющей тока фазы. Выбранные диапазоны изменения этих параметров отражают наиболее типичные ситуации:

$$k_\phi = 5 \dots 20; \chi = 0,5 \dots 2,5; \Delta I_m^* = 0,03 \dots 0,15.$$

Исследования, проведенные на модели, позволили исключить из числа факторов относительный момент нагрузки μ_n и коэффициент внутреннего электромагнитного демпфирования δ , поскольку в выбранном диапазоне изменения независимых факторов их влияние на колебательные процессы незначительно. Моделирование проводилось в диалоговом режиме,

регистрировались максимальные амплитуды колебаний угла $\Delta\Theta$, скорости $d\Delta\Theta/dt$ и момента $\Delta\mu$ после затухания их свободных составляющих. В результате обработки результатов моделирования получены следующие полиномиальные зависимости:

$$\Delta\Theta_{\text{вын}} = 0,003 + 0,0027x'_1 + 0,0028x'_2 + 0,0029x'_3 + 0,00225x'_1x'_2 + 0,0028x'_2x'_3 + 0,0027x'_1x'_3 + 0,0024x'_1x'_2x'_3;$$

$$\left(\frac{d\Delta\Theta}{dt}\right)_{\text{вын}} = 0,013 + 0,0085x''_1 + 0,0092x''_2 + 0,0126x''_3 + 0,006x''_1x''_2 + 0,008x''_1x''_3 + 0,0086x''_2x''_3 + 0,0056x''_1x''_2x''_3;$$

$$\Delta\mu = 0,126 + 0,085x_3^\Delta.$$

Формулы перехода от кодированных значений факторов к истинным:

$$x'_1 = \frac{1/k_\phi^2 - 0,021}{0,019}; \quad x'_2 = \frac{\chi^2 - 3,25}{3};$$

$$x'_3 = \frac{\Delta I_m^{*3} - 0,0017}{0,0017}; \quad x''_1 = \frac{1/k_\phi - 0,125}{0,12};$$

$$x''_2 = \chi - 1,5; \quad x''_3 = \frac{\Delta I_m^{*2} - 0,0117}{0,0108};$$

$$x_3^\Delta = \frac{\Delta I_m^* - 0,09}{0,06}.$$

Таким образом, полученные соотношения позволяют количественно оценивать колебательные процессы в электроприводе с ВД.

Выводы

1. При наличии пульсирующих составляющих фазных токов ВД относительно программных развиваемый двигателем электромагнит-

ный момент может быть представлен в виде программной и пульсирующей составляющих, причем частота изменения высокочастотной пульсирующей составляющей момента зависит от мгновенного соотношения частот пульсаций фазных токов.

2. При равных или близких по значениям частотах пульсаций токов в фазах ВД, что характерно для широтно-импульсного способа их регулирования, частота изменения высокочастотной пульсирующей составляющей момента практически совпадает с частотой пульсаций фазных токов.

3. При значительном различии частот пульсаций токов в фазах ВД, что характерно для ре-

лейного способа их регулирования (например, по принципу «токового коридора»), частота и амплитуда пульсаций момента переменны, причем в первом приближении можно считать, что они зависят как от среднеарифметического значения этих частот, так и от их разности.

4. Получены уравнения проектирования электропривода в удобной для применения полиномиальной форме, позволяющие при известных его параметрах и параметрах управления оценивать амплитуды пульсаций момента, скорости и положения ротора ВД либо при допустимых значениях этих амплитуд пульсирующих составляющих обоснованно выбирать параметры электропривода.

Литература

- [1] Овчинников И.Е. *Вентильные электрические двигатели и привод на их основе*. Санкт-Петербург, Корона. Век, 2006. 336 с.
- [2] Балковой А.П. *Прецизионный электропривод с вентильными двигателями*. Москва, Издательский дом МЭИ, 2010. 327 с.
- [3] Аракелян А.К., Афанасьев А.А. *Вентильные электрические машины в системах регулируемых электроприводов*. В 2 т. Москва, Высшая школа, 2006, т. 1. 546 с., т. 2. 518 с.
- [4] Firoozian R. *Servo Motors and Industrial Control Theory*. Springer Science Business Media, LLC, 2009. 229 p.
- [5] Чиликин М.Г., ред. *Дискретный электропривод с шаговыми двигателями*. Москва, Энергия, 1971. 624 с.
- [6] Ивоботенко Б.А., Козаченко В.Ф. *Шаговый электропривод в робототехнике*. Москва, МЭИ, 1984. 101 с.
- [7] Acarnley P.P. *Stepping motors: a guide to theory and practice*. London, Published Institution of engineering and technology publ., 2007. 159 p.
- [8] Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. *Силовая электроника*. Москва, Издательский дом МЭИ, 2007. 632 с.
- [9] Ланген А.М., Соловьев В.А. Анализ эффективности преобразования электроэнергии при импульсном и непрерывном управлении вентильным двигателем. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2011, спец. вып. «Электротехника и электроника», с. 44–55.
- [10] Stephen J. *Chapman Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill Companies, 2003. 746 p.
- [11] Красовский А.Б. Применение имитационного моделирования для исследования вентильно-индукторного электропривода. *Электричество*, 2003, № 3, с. 35–45.
- [12] Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. *Планирование эксперимента в электромеханике*. Москва, Энергия, 1978. 184 с.
- [13] Ильинский Н.Ф. *Моделирование в технике*. Москва, Изд-во МЭИ, 2004. 83 с.

References

- [1] Ovchinnikov I.E. *Ventil'nye elektricheskie dvigateli i privod na ikh osnove* [Valve electric motors and drive on their basis]. Sankt-Peterburg, Korona. Vek publ., 2006. 336 p.
- [2] Balkovoi A.P. *Pretsizionnyi elektroprivod s ventil'nymi dvigateliami* [Precision electric drive with brushless motor]. Moscow, MEI publ., 2010. 327 p.
- [3] Arakelian A.K., Afanas'ev A.A. *Ventil'nye elektricheskie mashiny v sistemakh reguliruemykh elektroprivodov* [Valve electrical machinery systems controlled drives]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 2006, vol. 1. 546 p., vol. 2. 518 p.

- [4] Firoozian R. *Servo Motors and Industrial Control Theory*. Springer Science Business Media, LLC, 2009. 229 p.
- [5] *Diskretnyi elektroprivod s shagovymi dvigateliami* [Digital drive with stepper motors]. Ed. Chilikin M.G. Moscow, Energiia publ., 1971. 624 p.
- [6] Ivobotenko B.A., Kozachenko V.F. *Shagovyi elektroprivod v robototekhnike* [Stepper actuator in robotics]. Moscow, MEI publ., 1984. 101 p.
- [7] Acarnley P.P. *Stepping motors: a guide to theory and practice*. London, Institution of engineering and technology publ., 2007. 159 p.
- [8] Rozanov Iu.K., Riabchitskii M.V., Kvasniuk A.A. *Silovaia elektronika* [Power Electronics]. Moscow, MEI publ., 2007. 632 p.
- [9] Langen A.M., Solov'ev V.A. Analiz effektivnosti preobrazovaniia elektroenergii pri impul'snom i nepreryvnom upravlenii ventil'nym dvigatelem [Analysis of the electric power conversion efficiency under pulsed and continuous control brushless motor]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Estestvennye nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences], 2011, special iss., pp. 44–55.
- [10] Stephen J. *Chapman Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill Companies, 2003. 746 p.
- [11] Krasovskii A.B. Primenenie imitatsionnogo modelirovaniia dlia issledovaniia ventil'no-induktornogo elektroprivoda [Use of simulation for the study of valve-inductor electric]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2003, no. 3, pp. 35–45.
- [12] Ivobotenko B.A., Il'inskii N.F., Kopylov I.P. *Planirovanie eksperimenta v elektromekhanike* [Experimental Design in Electromechanics]. Moscow, Energiia publ., 1978. 184 p.
- [13] Il'inskii N.F. *Modelirovanie v tekhnike* [Simulation technique]. Moscow, MEI publ., 2004. 83 p.

Статья поступила в редакцию 22.09.2015

Информация об авторе

КРАСОВСКИЙ Александр Борисович (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Электротехника и промышленная электроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана (Россия, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: krasovsky@bmsu.ru).

Information about the author

KRASOVSKY Aleksandr Borisovich (Moscow) – Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Electrical Engineering and Industrial Electronics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: krasovsky@bmsu.ru).