

11. Шаркеев Ю.П., Ерошенко А.Ю., Данилов В.И. и др. Микроструктура и механические свойства наноструктурированных и ультрамелкозернистых титана и циркония, сформированных методом интенсивной пластической деформации//Изв. Высш. Учеб. заведений. Физика – 2013 – Т. 56 – №10 – С. 47–53
12. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля – М.: Техносфера – 2006 – 384 с.
13. Skripnyak V.A. Mechanical behavior of nanostructured and ultrafine-grained materials under shock wave loadings. Experimental data and results of computer simulation//Proc. Shock Compression of Condensed Matter. AIP Conf. Proc. – 2012 – V. 1426 –P. 965 –970
14. Herzig N., Meyer L.W., Musch D., et al. Modeling of Mechanical behavior of ultra-fine grained titanium alloys at high strain rates // Proc. 3-rd Int. Conf. on High Speed Forming. March 11-12, Dortmund, Germany – 2008 — 14 p.
15. Данилов В.И., Ерошенко А.Ю., Шаркеев Ю.П. и др. Особенности деформации и разрушения ультрамелкозернистых сплавов на основе титана и циркония//Физическая мезомеханика – 2014 – Т.17 – №4 – С. 77–85

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИ БЕЗУДАРНОМ ПУСКЕ

*Паюк Л.А., Гальцева О.В., Воронина Н.А.*  
Томский политехнический университет, г. Томск

Современная концепция расчета и проектирования электроприводов колебательного движения (ЭПКД) опирается на принципы энергетической и ресурсоэффективности, что находит своё отражение в методиках их анализа и синтеза. ЭПКД широко применяется в современной промышленности: от вибрационных систем проверки электрооборудования до систем вентиляции легких и жизнеобеспечения человека [1–4]. Колебания измеряются от нескольких микрон до метра [1, 5]. И в том и в другом случае, необходимо учитывать особенности данных ЭПКД (несинусоидальность питающего напряжения, гармонический состав токов в обмотках статора и ротора исполнительного двигателя, наличие двойной частоты в электромагнитном моменте).

Исходя из вышесказанного, общепринятые критерии эффективности электроприводов для данного вида электропривода не пригодны, так как не учитывают их специфику. Поэтому предлагается использовать методику оценки энергетических характеристик управляемого ЭПКД на базе серийного асинхронного двигателя, включённого по схеме машины двойного питания (МДП), колебательный режим в котором возбуждается с помощью периодического мягкого реверса [6]. Отличительной особенностью данной методики является учет гармонического состава питающего напряжения и, как следствие, результирующего электромагнитного момента, угловой скорости вращения и закона движения подвижного элемента приводного двигателя с учетом наличия искажения и несимметрии.

Известно, что наибольшее потребление мощности при работе любого электропривода происходит при его пуске за счёт возникновения пусковых токов и момента, которые могут отличаться от номинальных значений в несколько раз. Поэтому нами был предложен способ обеспечения безударного пуска ЭПКД с МДП по току и моменту. Согласно [7, 8] коррекция фаз питающих напряжений позволяет уменьшить величину ударного значения тока статора на 30 %, а электромагнитного момента – в 3,01 раза.

Выражения для пусковых токов и момента здесь приводить не будем, отметим лишь условия безударного пуска по току и моменту, исходя из условия [1] (табл. 1).

Таблица 1. Условия безударного пуска по току и моменту

Безударный пуск ЭПКД с МДП	
По току	По моменту
$\alpha' = \arctg\left(\frac{\omega_1}{\alpha_1}\right); \quad \beta' = \arctg\left(\frac{-\omega_2}{\alpha_3}\right).$	$\alpha' = \arctg\left(\frac{\omega_1}{\alpha_2}\right); \quad \beta' = \arctg\left(\frac{-\omega_2}{\alpha_4}\right).$

Здесь  $\alpha_i$  – коэффициенты затухания свободных составляющих токов статора и ротора МДП, которые были найдены ранее [7], как корни характеристических уравнений при условии заторможенности вала исполнительного двигателя.

При разночастотном питании МДП в составе ЭПКД возможно произвести оценку показателей качества проектируемой системы, используя метод дискретного синтеза.

При работе электромеханических преобразователей энергии в динамических режимах кроме потребления активной мощности происходит потребление или генерирование реактивной мощности [6]. В таком случае полная потребляемая мощность двигателя характеризуется мощностями искажения и несимметрии. Поэтому коэффициенты: мощности ( $K_m$ ), сдвига ( $K_c$ ), искажения ( $K_{и}$ ) и несимметрии ( $K_n$ ), характеризуют соотношения между активной и реактивной мощностями, мощностью искажения и несимметрии. Особенность данного подхода к оценке энергетических характеристик позволяет оценить качество потребления электроэнергии ЭПКД.

Коэффициент мощности определяем по формуле:

$$K_{mi} = \frac{P_i}{S_{i\text{ср}}} = \frac{P_i}{\sqrt{P_i^2 + Q_{i\text{ср}}^2 + T_{i\text{ср}}^2}} \quad (1)$$

где  $P_i$ ,  $Q_{i\text{ср}}$ ,  $T_{i\text{ср}}$  – активная мощность и средние за период колебания значения реактивной, полной мощностей искажения  $i$ -ой фазы.

Коэффициент сдвига  $K_c$  характеризует соотношение между активной и реактивной потребляемыми мощностями фазы и определяется по формуле:

$$K_{ci} = \sqrt{\frac{P_i^2}{P_i^2 + Q_{i\text{ср}}^2}} \quad (2)$$

Коэффициент искажения  $K_{и}$  определяет степень искажения потребляемой мощности фазой тока и рассчитывается по выражению:

$$K_{иi} = \sqrt{\frac{P_i^2 + Q_{i\text{ср}}^2}{P_i^2 + Q_{i\text{ср}}^2 + T_{i\text{ср}}^2}} \quad (3)$$

Коэффициент несимметрии  $K_n$  рассчитывается по выражению:

$$K_n = \frac{S}{S_{\text{дв}}} \quad (4)$$

К критериям количественной оценки относят обобщенный коэффициент полезного действия, который определяет полезную часть расходуемой мощности, забираемой из сети:

$$\eta_E = \frac{P_{\text{мех}}}{S} = \sqrt{\frac{P_{\text{мех,а}}^2 + P_{\text{мех,р}}^2 + P_{\text{мех,и}}^2}{S^2}} \quad (5)$$

где  $P_{\text{мех,а}}$ ,  $P_{\text{мех,р}}$ ,  $P_{\text{мех,и}}$  – механические мощности приводного электродвигателя: активная, реактивная и искажения соответственно,  $S$  – полная условно потребляемая мощность двигателя.

Так как механическая мощность электродвигателя в колебательном режиме работы включает активную  $P_{\text{мех,а}}$ , реактивную  $P_{\text{мех,р}}$  составляющие и мощность искажения  $P_{\text{мех,и}}$ . В зависимости от целевой задачи привода и характера нагрузки любая из составляющих механической мощности участвует в совершении полезной работы. Обобщенный

коэффициент полезного действия  $\eta_E$  учитывает, как качественную сторону процесса ( $K_M$ ), так и количественную ( $\eta$ ). Поэтому рекомендуется поддерживать в процессе работы машины в колебательном режиме работы значение его максимальным (обеспечивать резонансный режим).

Так, при питании обмоток статора и ротора токами частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$  и ограничиваясь первым приближением, получим выражение для определения механической мощности МДП:

$$P_{\text{мех}} = \frac{M_{\text{эм.м}} \omega_m \sin(\phi - \alpha)}{2} \cdot [1 + \cos 2(\Omega t + \alpha)] + \frac{M_{\text{эм.м}} \omega_m \cos(\phi - \alpha)}{2} \cdot \sin 2(\Omega t + \alpha) \quad (6)$$

Здесь  $\Omega = \omega_2 - \omega_1$  – частота колебаний подвижного элемента исполнительного двигателя;  $\alpha, \phi$  – начальные фазы первых гармонических составляющих закона движения и электромагнитного момента МДП. Аналитические выражения для определения электромагнитного момента  $M_{\text{эм.м}}$  и угловой скорости вращения  $\omega_m$  были определены ранее [7, 9] и здесь приведем лишь их конечные варианты.

Электромагнитный момент двигателя в выражении (6) определяем по формуле:

$$M_{\text{эм.м}} = k \left[ M_{\text{пуск}} + M_{\text{демп}} \cdot \frac{d\chi}{dt} \right]$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий особенности двигателя,  $M_{\text{пуск}}$ ,  $M_{\text{демп}}$  – пусковой и демпфирующий электромагнитные моменты двигателя.

Угловая скорость вращения  $\omega_m$  (для выражения 6) определяется по формуле:

$$\omega_m = \int \left( \frac{1}{J_{\Sigma}} (L_m (i_{\beta s} i_{\alpha r} - i_{\alpha s} i_{\beta r})) - R_g \omega - C_m^{-1} \chi - M_c \right) dt,$$

где  $R_g$  – коэффициент демпфирующего момента нагрузки,  $C_m^{-1}$  – коэффициент позиционного момента нагрузки,  $M_c$  – момент статической нагрузки на валу двигателя,  $\chi$  – координата подвижного элемента двигателя,  $J_{\Sigma}$  – суммарный момент инерции, который состоит из момента инерции двигателя  $J_{\text{дв}}$  и нагрузки  $J_{\text{н}}$ .

Мгновенная потребляемая мощность электрической цепи переменного тока при разночастотном питании определяется как:

$$P_n(t) = U_n(t) \cdot i_n(t), \quad (7)$$

где  $n$  – принимает значения 1, 2, 3, 4, которым соответствуют фазные токи и напряжения. Здесь применяем выражения для токов статора и ротора, который были найдены в работах [7, 8].

$$i_1(t) = i_{\alpha s}(t); \quad i_2(t) = i_{\beta s}(t); \quad i_3(t) = i_{\alpha r}(t); \quad i_4(t) = i_{\beta r}(t); \quad (8)$$

$$U_1(t) = U_{\alpha s}(t); \quad U_2(t) = U_{\beta s}(t); \quad U_3(t) = U_{\alpha r}(t); \quad U_4(t) = U_{\beta r}(t);$$

Используя формулы (8), определяющие мгновенные значения фазных токов для заданных функций регулирования, выражение мгновенной мощности, например, фазы  $\alpha$  можно записать в виде:

$$P_{\alpha s}(t) = P_1 [1 - \cos 2(\omega_1 t + \alpha)] - Q_1 \sin 2(\omega_1 t + \alpha) - T_1, \quad (9)$$

Суммарные активные и реактивные мощности по осям  $\alpha$  и  $\beta$  определяются как:

$$P_{\alpha} = P_{\alpha s} + P_{\alpha r}; \quad Q_{\alpha} = Q_{\alpha s} + Q_{\alpha r}; \quad P_{\beta} = P_{\beta s} + P_{\beta r}; \quad Q_{\beta} = Q_{\beta s} + Q_{\beta r}.$$

Функциональная схема электропривода колебательного движения с потенциально-фазовой модуляцией и возможностью реализации безударного пуска представлена на рис. 1.

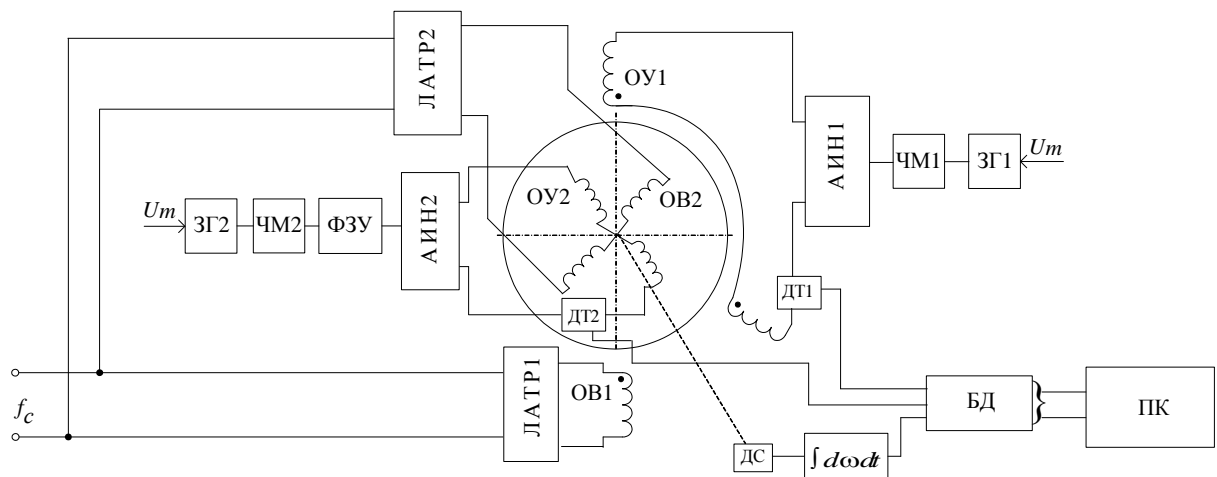


Рис.1. Функциональная схема ЭПКД с потенциально-фазовой модуляцией: 1 – задающий генератор 2; 2 – модулятор частоты 2; 3 – фазосдвигающее устройство; 4 – линейный автотрансформатор 2; 5 – автономный инвертор напряжения 2; 6 – обмотка управления статора; 7 – обмотка возбуждения ротора; 8 – автономный инвертор напряжения 1; 9 – модулятор частоты 1; 10 – задающий генератор 1; 11 – обмотка управления ротора; 12 – линейный автотрансформатор 1; 13 – датчик тока 2; 14 – обмотка возбуждения статора; 15 – датчик скорости; 16 – датчик тока 1; 17 – дифференциатор (интегратор); 18 – блок датчиков; 19 – персональный компьютер

ЭПКД состоит (рис. 1) из системы управления статором и ротором МДП, реализованной на базе асинхронного двигателя с фазным ротором, блока датчиков (БД) с системой преобразования аналогового сигнала в цифровой, персональный IBM-совместимый компьютер со встроенной платой ввода-вывода данных, обеспечивающий обратные связи по скорости и току.

В качестве МДП использовалась электрическая машина переменного тока типа МТН-011-6У1 со следующими параметрами:  $P_n=1400 \text{ Вт}$ , номинальное напряжение  $U_n=220 \text{ В}$ , номинальный ток статора  $I_n=3,35 \text{ А}$ ,  $\eta=76 \%$ ,  $\cos \varphi_n=0,78$ , номинальная частота вращения  $n_n=1250 \text{ об/мин}$  [8]. При расчете энергетических показателей были приняты следующие значения составляющих нагрузки (все величины указаны в относительных единицах): при безударном пуске по моменту  $R_g=1,35$ ,  $C_m^{-1}=1,3$ ,  $M_c=0,2$ ,  $J_\Sigma=1,25$ ; при безударном пуске по току  $R_g=0,54$ ,  $C_m^{-1}=0,45$ ,  $M_c=0,08$ ,  $J_\Sigma=1,25$ .

Результаты расчета энергетических показателей ЭПКД (выражения (1)-(5)) приведены в таблице 2.

Таблица 2. Расчетные энергетические показатели ЭПКД

Показатели	Безударный пуск по току ЭПКД	Безударный пуск по моменту ЭПКД	Стандартный пуск ЭПКД
$K_M$	0,5	0,53	0,56
$K_C$	0,55	0,5	0,64
$K_{и}$	0,35	0,37	0,4
$K_H$	0,45	0,4	0,5
$\eta_E, \%$	73,5	77	65

## Выводы

1. Анализ полученных энергетических характеристик ЭПКД при реализации безударного пуска по току и моменту показал, что применение данной методики позволяет улучшить: обобщенный коэффициент полезного действия  $\eta_E$  в среднем на 10 %, коэффициенты мощности  $K_M$  уменьшить на 0,4 о.е., сдвига  $K_C$  на 0,8 о.е., искажения  $K_{и}$  на 0,035 о.е. и несимметрии  $K_H$  на 0,055 о.е. В целом улучшается гармонический состав

питающего напряжения, который влияет на конечное потребление активной и реактивной мощности.

2. При реализации безударного пуска по моменту наблюдается наибольшее увеличение обобщенного коэффициента полезного действия  $\eta_E$  на 12 % и наибольшее уменьшение коэффициента несимметрии на 0,1 о.е.; это говорит о том, что количественно и качественно процесс энергопотребления происходит наилучшим образом при реализации алгоритма безударного пуска по моменту.

3. Полученные зависимости (1) - (5) позволяют достаточно точно оценить энергетические характеристики электропривода колебательного движения (любого периодического движения), получить адекватный результат и провести анализ энергоэффективности проектируемых электроприводов.

#### **Список использованных источников**

1. Луковников В. И. Электропривод колебательного движения. – М.: Энергоатомиздат–1984 – 152 с.
2. Pat. 6777895 USA, H 02 F 33/00. Vibrating linear actuator / Matsushita Electric Ind. Co. Ltd, Shimoda Kazuhiro, Kawano Shinichiro, Nishiyama Noriyoshi, Iwahori Toshiyuki. – № 10/300411 ; stated. 20.11.2002 ; Published. 17.08.2004 ; Priority. 22.11.2001, № 2001-358109 (Japan); НПК 318/114.
3. Senulis A., Guseinovieñe E., Jankūnas V., Urmonienė L., Andziulis A., Didžiokas R. // Elektron. ir elektrotech–2007 – № 7 – Pp. 63–66
4. Payuk L., Grechko O., Voronina N. Grid Wind Power Plant with Compensation of Active and Reactive Power // Applied Mechanics and Materials– 2015– V. 792 – Pp. 379–385
5. Wu Li, Wang Zhi-xin. Wind generator stabilization with doubly-fed asynchronous machine // J. Shanghai Jiaotong Univ. Sci–2007 – T. 12–№ 2 – P. 271–282
6. Аристов А.В. Электропривод колебательного движения с машиной двойного питания. Томск: Издательско-полиграфическая фирма ТПУ–2000–176 с.
7. Аристов А.В., Паюк Л.А. Управление переходными процессами в электрических машинах периодического движения // Известия Томского политехнического университета – 2009 – Т. 314 – № 4 – С. 59–64
8. Паюк Л.А., Воронина Н.А. Безредукторный электропривод периодического движения переменного тока// Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых– 2012–С. 306 – 310
9. Аристов А.В, Воронина Н.А. Анализ точности позиционирования двухфазного асинхронного двигателя в режиме прерывистого движения// Известия ТПУ – 2013 – Т 322– №4 – С. 116–120

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРАНСФОРМАЦИИ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ В СТАЛИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

*Анасов А.М.*

Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского  
Томского политехнического университета

#### **Введение**

Несмотря на успехи, достигнутые в области разработки и применения новейших технологий, отказы изделий, специальной техники и объектов ответственного назначения, сопровождаемые часто человеческими жертвами и значительными материальными потерями, все еще происходят. Аварии таких систем или определенные отклонения в