

СИНТЕЗ ДИСКРЕТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С КОСВЕННЫМ ЗАМЫКАНИЕМ ПУТЕВОЙ КООРДИНАТЫ

Лалетин В.И., Сбоев В.М., Рычков В.В.

*ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет», г. Киров, Россия (610000, Киров, ул. Московская, 36)
e-mail: laletin.vi@yandex.ru, sboev@vyatsu.ru*

Представлен синтез и анализ процессов дискретного электропривода с шаговым двигателем с косвенным замыканием путевой координаты (по положению) на основании информации с датчика–акселерометра, который используется в локальной обратной связи для демпфирования колебательных процессов. Задача решается путем организации ортогональной ориентации электрической и механической осей шагового двигателя поисковой системой регулирования величины электромагнитного усилия (момента) с последующей программной коррекцией установленной динамической ошибки. Предложено математическое описание дискретного электропривода с косвенным замыканием путевой координаты, аналогичного приводу с бесконтактным двигателем постоянного типа с использованием пропорционально-интегрального регулятора. Представлены структурные схемы привода и характеристики управляемого инвертора тока как основание для определения областей устойчивой работы привода. Показаны основные результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие степень устойчивости привода в зависимости от условий его работы и подтвердившие работоспособность дискретного электропривода в заданной структуре.

Ключевые слова: дискретный электропривод, шаговый двигатель, инвертор тока, акселерометр, косвенное замыкание, путевая координата, передаточная функция, граничная характеристика, устойчивость

THE SYNTHESIS OF DISCRETE STEPPER MOTOR DRIVE WITH INDIRECT PATH COORDINATE CLOSURE

Laletin V.I., Sboev V.M., Ryichkov V.V.

FGEI HPE “Vyatka State University”, Kirov, Russia (610000, Kirov, 36 Moskovskaya Str.), e-mail: laletin.vi@yandex.ru, sboev@vyatsu.ru

The Synthesis and analysis of process in discrete stepper motor drive with indirect (on-position) path coordinate closure based on accelerometer data is shown, which is used in local feedback to dampen the oscillation processes. The problem is solved by organizing orthogonal orientation of the electric and mechanical axes of a stepper motor using search engine, that regulates electromagnetic torque with later program correction of the known dynamic error. Mathematical formulation of discrete stepper motor drive with indirect path coordinate closure, similar to non-contact DC electric motor with proportional-integral controller is suggested. Structural drive schematic and controllable current inverter characteristic are shown as a basis to designate electric drive stable operation areas. Main results of experimental research are shown to demonstrate level of stability depending on its working condition and to confirm discrete electric drive efficiency in a given structure.

Keywords: discrete drive, stepper motor, current inverter, g-meter, indirect closure, path coordinate, transfer function, boundary characteristic, stability

Концепция построения дискретного электропривода (ДЭП) с шаговым двигателем (ШД) в робототехнических комплексах направлена на упрощение структуры привода, повышение его гибкости, унификации в программном и аппаратном обеспечении, на полный или частичный отказ от стандартных датчиков положения, в частности, с реализацией контроля путевой координаты на основе косвенной информации. Такая информация может быть получена в результате обработки сигнала штатного пьезоэлектрического датчика ДЭП – акселерометра, который используется в контуре локальной обратной связи для демпфирования колебаний якоря (ротора) ШД. Система организуется как поисковая с экстремальным регулированием момента (усилия – для линейных двигателей). Преследуется

цель достижения ортогонального положения электрической и механической осей шагового двигателя и программной коррекции известной величины динамической ошибки. Однако достижение устойчивой работы такого привода требует глубокого синтеза структуры и определения целого комплекса условий, в частности, связанных с ограничениями со стороны инвертора тока.

Синтез структурной схемы дискретного электропривода

Задача повышения статических и динамических качеств дискретного электропривода с шаговым двигателем в замкнутой структуре с косвенным контролем путевой координаты, определяет необходимость применения методов исследования системы с учетом ее импульсного характера по управлению и питания обмоток шагового двигателя от управляемого инвертора тока, сохраняющего свои свойства в ограниченном частотном диапазоне. Синтез электропривода целесообразно осуществить, используя математическое описание в преобразованных координатах d , q , связанных с подвижным элементом двигателя.

Система уравнений, представляющая процессы в разомкнутом приводе в дифференциальной форме, имеет вид [1]

$$\left. \begin{aligned} L_{\phi} \frac{di_d}{dt} + R_{\phi} \cdot i_d - L_{\phi} i_q \frac{d\theta}{dt} &= u_d \cdot \cos(\gamma - \theta); \\ L_{\phi} \frac{di_q}{dt} + R_{\phi} \cdot i_q + L_{\phi} i_d \frac{d\theta}{dt} &= u_q \cdot \sin(\gamma - \theta) - \psi_m \frac{d\theta}{dt}; \\ \frac{J}{p_{\Pi}} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + \beta \cdot \frac{d\theta}{dt} + \mu_H &= \frac{m}{2} p_{\Pi} \psi_m i_q, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где R_{ϕ} – сопротивление обмотки ШД; L_{ϕ} – индуктивность обмотки; i_d и i_q – мгновенные токи в ортогональных фазах по осям d и q ; ψ_m – потокосцепление; J – момент инерции; μ_H – момент сопротивления нагрузки; p_{Π} – число пар полюсов; u_d , u_q – напряжения фаз по осям; θ – угол поворота ротора ШД; γ – управляющее воздействие; β – коэффициент вязкого трения.

Для привода, работающего в режиме квазизамкнутого режима, система уравнений (1) при условиях:

$$i_d = 0; \cos(\gamma - \theta) = 0; \sin(\gamma - \theta) = 1,$$

будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} R_\phi \left(\frac{L_\phi}{R_\phi} \frac{di_q}{dt} + i_q \right) &= u_q - \psi_m \frac{d\theta}{dt}; \\ \beta \left(\frac{J}{p_\Pi \beta} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{d\theta}{dt} \right) &= \frac{m}{2} p_\Pi \psi_m i_q - \mu_H \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Введя обозначения: $T_\Delta = L_\phi/R_\phi$; $T_M = J/(p_\Pi \beta)$; $\kappa_D = m/(2p_\Pi)$; $i = i_q$; $u = u_q$; $\dot{\theta} = p\theta$ и применив преобразование по Лапласу, получим систему вида

$$\left. \begin{aligned} R_\phi (T_\Delta p i + i) &= u - \psi_m \dot{\theta}; \\ \beta (T_M p^2 \theta + \dot{\theta}) &= \kappa_D \cdot \psi_m i - \mu_H \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Система дифференциальных уравнений (3) соответствует структурной схеме (рис. 1а).

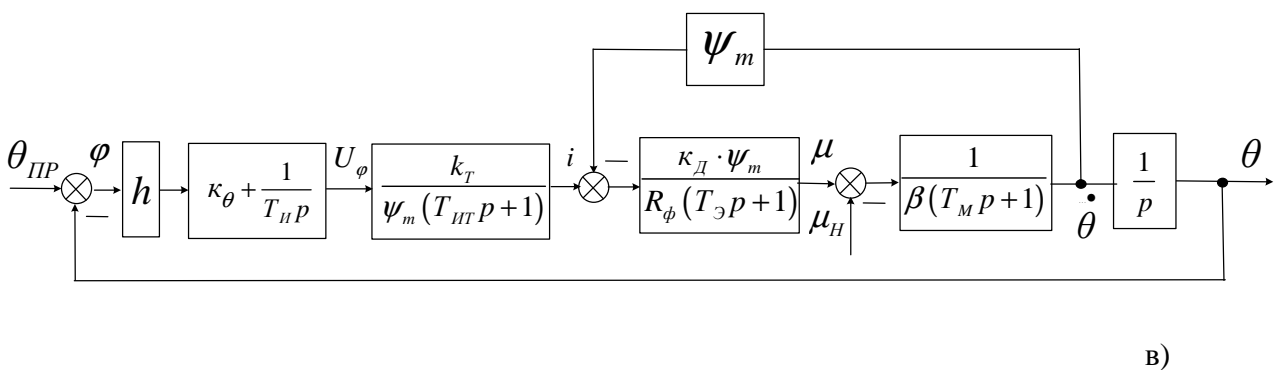
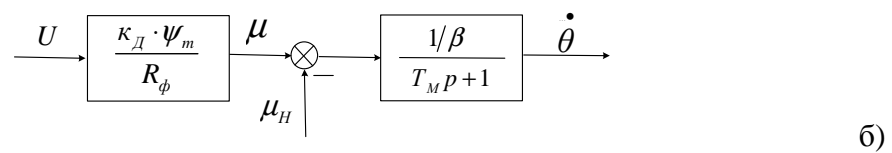
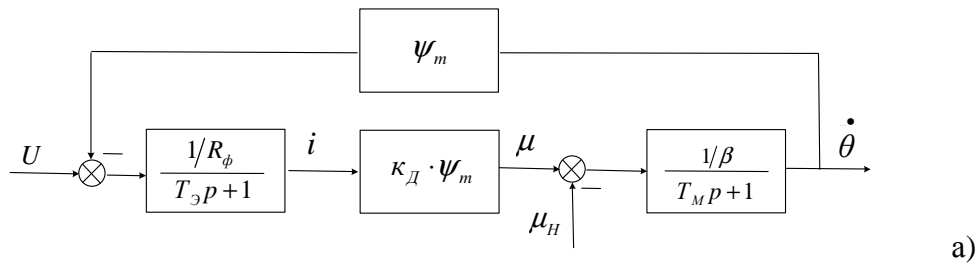


Рис.1. Структурные схемы дискретного электропривода

Передаточная функция этой системы по управлению для выходной координаты $\dot{\theta}$ в операторной форме имеет вид

$$W(p) = \frac{k_d \psi_m / [R_\phi \beta (T_\Delta p + 1)(T_M p + 1)]}{1 + [k_d \psi_m^2 / (R_\phi \beta (T_\Delta p + 1)(T_M p + 1))]}$$

или

$$W(p) = \frac{k_\Pi}{\psi_m [T_\Delta T_M p^2 + (T_\Delta + T_M) p + k_\Pi + 1]}, \quad (4)$$

где $k_\Pi = k_d \psi_m^2 / (R_\phi \beta)$ – безразмерный коэффициент, определяемый параметрами привода.

Передаточная функция системы по нагрузке μ_H при выходной переменной $\dot{\theta}$ имеет вид

$$W(p) = \frac{\dot{\theta}(p)}{\mu_H(p)} = \frac{1}{\beta [T_\Delta T_M p^2 + (T_\Delta + T_M) p + k_\Pi + 1]}. \quad (5)$$

При питании обмоток ШД от инвертора тока обеспечивается компенсация ЭДС движения и, следовательно, отрицательной обратной связи по скорости. Результатом этого является существенное снижение постоянной времени T_Δ . В этом случае $T_\Delta = 0$, $\psi_m p \theta = 0$ система уравнений (2) трансформируется в выражение

$$\beta (T_M p^2 \theta + p \theta) = k_d \cdot \psi_m (U / R_\phi) - \mu_H, \quad (6)$$

которому соответствует структурная схема, показанная на рисунке 1б.

Передаточные функции инвертора тока $W_{ИТ(p)}$ по управлению и нагрузке соответственно [2]

$$\left. \begin{aligned} W_{ИТ}(p) &= \frac{\dot{\theta}(p)}{U(p)} = \frac{k_T}{\psi_m (T_{ИТ} p + 1)}; \\ W_{ИТ}(p) &= \frac{\dot{\theta}(p)}{\mu_H(p)} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{k_T}{\psi_m (T_{ИТ} p + 1)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где k_T , $T_{ИТ}$ – коэффициент передачи и постоянная времени инвертора тока.

Включение в структуру привода измерителя динамической ошибки позволяет осуществить контроль за рассогласованием по положению $\Delta U_\theta = (\theta_{пр} - \theta)h$, где h –

коэффициент преобразования, соответствующий величине сдвига щеток от нейтрали в бесконтактном двигателе постоянного тока [4].

Оптимизация привода по критериям качества требует выбора типа регулятора. В дискретном электроприводе в структуре с инвертором тока это может быть достигнуто при использовании ПИ-регулятора [3]. Передаточная функция по управлению будет иметь вид

$$W(p) = \frac{\theta(p)}{\theta_{ПИ}(p)} = \frac{h \cdot k_{II} (k_{\theta} p + 1 / T_{II})}{\psi_m T_M p^3 + \psi_m p^2 + h \cdot k_{II} k_{\theta} p + h \cdot k_{II} / T_{II}}. \quad (8)$$

Условия оптимизации могут быть представлены системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \psi_m h \cdot k_{II} k_{\theta} T_M &= 0,5 \cdot \psi_m^2; \\ \psi_m h \cdot k_{II} T_{II}^{-1} &= 0,5 \cdot h^2 k_{II}^2 k_{\theta}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

в соответствии с которыми параметры регулятора:

$$\left. \begin{aligned} k_{\theta} &= \psi_m / (2T_M \cdot h \cdot k_{II}); \\ T_{II} &= (8T_M^2 \cdot h \cdot k_{II}) / \psi_m. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Практическая реализация ПИ-регулятора может быть реализована как на аппаратном уровне, так и программными средствами и в общем виде представляется известным образом:

$$W_{ПИ}(p) = k_{\theta} + 1 / (T_{II} p). \quad (11)$$

Таким образом, замкнутому электроприводе соответствует структурная схема на рис.1в.

Исследования дискретного электропривода

Экспериментальные исследования дискретного электропривода проводились с шаговым двигателем типа ДШИ-200-2. Основные технические характеристики привода: $m = 2$; $R_{\phi} = 3,12 \text{ Ом}$; $T_{\Sigma} = 0,43 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; $T_M = 38 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; $M_{MAX} = 0,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $\psi_m = 4,5 \text{ мВ/эл.рад}\cdot\text{с}^{-1}$; $\beta = 10^{-5} \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$; $k_{II} = 1,22$; $h = 0,63 \text{ В/эл.рад.}$; $k_{\theta} = 1,24$; $T_{II} = 2,5 \text{ мс}$.

Устойчивая работа рассматриваемой системы в значительной степени зависит от характеристик управляемого инвертора тока, который генерирует приводу свойства источника момента (усилия – для линейных ШД). ДЭП сохраняет таковые в области работы до ограничительной механической характеристики $\dot{\theta}_{MG} = f(\mu)$ (рис. 2, кривая 1), подчиняющейся закону [1]

$$\left(\dot{\theta}_M + R_{\phi} \mu \right)^2 + \left(\frac{\Psi}{\delta} \dot{\theta} \mu \right)^2 = U_{ИТ}^2,$$

где χ – ЭДС в о. е.; δ – безразмерный коэффициент внутреннего и внешнего вязкого трения; $U_{ИТ}$ – напряжение питания инвертора тока.

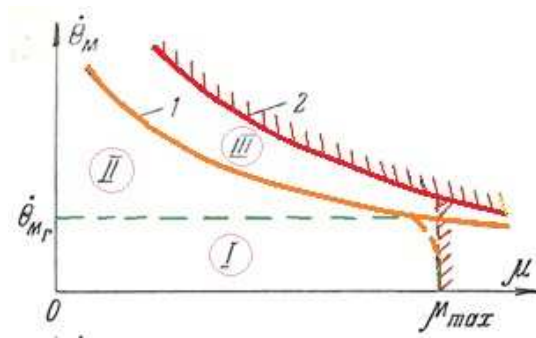


Рис. 2. Граничные механические характеристики ДЭП

Исследования показывают, что в области вблизи ограничительной механической характеристики привода начинает проявляться колебательность процессов $\dot{\theta}_M(t)$, $i_\phi(t)$ (рис. 3а, $U_{3C}(t)$ – задание $\dot{\theta}_M$).

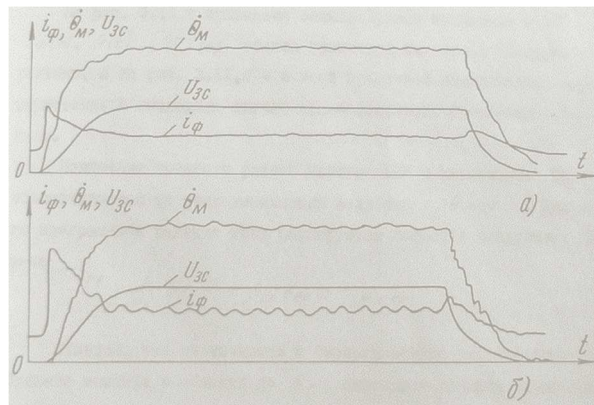


Рис. 3. Осциллограммы $\dot{\theta}_M$, U_{3C} , i_ϕ в функции времени

Работа привода выше ограничительной механической зависимости характеризуется снижением динамического коэффициента передачи инвертора $W_{ИТ}(p)$ и вызывает значительные отклонения регулируемого параметра θ_H от заданного $\theta_{пр}$. Это связано с тем, что для данного значения μ_H в пространстве состояний существует такое граничное значение $\dot{\theta}_r$, при превышении которого за счет компенсации ЭДС вращения напряжения питания инвертора $U_{ИТ}$ искажаются формируемые программными средствами кривые токов в фазах ШД. В результате появляется дополнительный фазовый сдвиг между током фазы и ЭДС ортогональной фазы, не соответствующий значению $\varphi = \pi/2$ (рис. 4). Ортогональность электрической и механической осей шагового двигателя нарушается. Динамическая ошибка привода уже не равна заявленной программной величине.

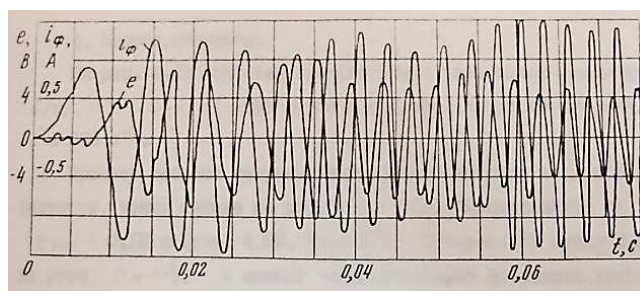


Рис. 4. Осциллограммы $\dot{\theta}_M$, e_ϕ , i_ϕ в функции времени в области выше $\dot{\theta}_T$

Степень колебательности процессов возрастает (см. осциллограммы на рис. 3б), хотя при детерминированной величине μ_H устойчивость привода существенно не нарушается, – возрастает лишь ошибка воспроизведения движения [5]. Основным условием работы в области 3 (рис. 2) – с постоянной мощностью $P = const$ – является ограничение величины нагрузки μ_H , которую необходимо снижать при увеличении частоты вращения оси ШД.

Экспериментами и моделированием показано [6], что для снижения времени установления требуемого значения динамической ошибки в нестационарных режимах работы привода необходимо при пуске осуществлять программный сдвиг поля ШД на угол $\theta_{ПП} = \pi / 2$. На рисунке 5 продемонстрированы осциллограммы переходных процессов пуска $\dot{\theta}_M$, e_ϕ , i_ϕ в функции времени с программным изменением скорости по экспоненциальному закону до значения $\dot{\theta}_M = 40 \text{ c}^{-1}$.

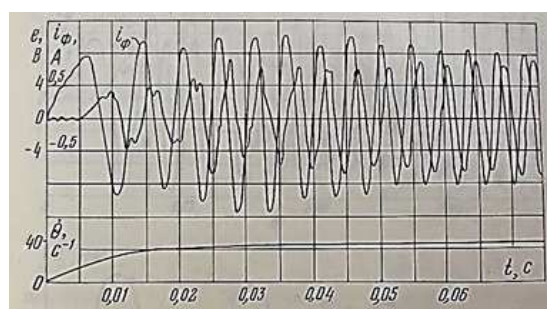


Рис. 5. Осциллограммы $\dot{\theta}_M$, e_ϕ , i_ϕ в функции времени в области до $\dot{\theta}_T$

Ортогональная ориентация электрической и механической осей шагового двигателя после завершения переходных процессов (время переходного процесса $t_{ПП} = 0,07 \text{ c}$) соответствует норме, о чем свидетельствует фазовый сдвиг между током фазы i_ϕ и ЭДС ортогональной фазы e_ϕ $\varphi = \pi/2$.

Заключение

Управление с косвенным замыканием путевой координаты устраняет основной недостаток разомкнутого ДЭП – влияние нагрузки на величину динамической ошибки и точность воспроизведения движения.

Эмпирическая методика исследований доказательно показывает возможность воспроизведения траекторных перемещений в установившемся режиме с ошибкой, не зависящей от изменяющейся величины нагрузки при условии сохранения источником тока заданных свойств.

Список литературы

1. Ивоботенко Б.А., Козаченко В.Ф. / Под ред. Л.А. Садовского. Шаговый электропривод в робототехнике [Текст]. - М: МЭИ, 1984. -100 с.
2. Лалетин В.И. Разработка средств и методов адаптации многокоординатного дискретного электропривода гибких автоматизированных производств к задачам контурного управления: Автореф. дис. канд. техн. наук [Текст] – Москва, МЭИ, 1988, – 20 с.
3. Лалетин В.И. Хорошавин В.С. Синтез регуляторов для мультикоординатных дискретных электроприводов // Высокие технологии в радиоэлектронике, информации и связи: Вестник ВНИЦ ВВО АТН РФ [Текст]. – Вып. 1/01.– С. 104- 110.
4. Патент РФ № 1795861/5.05.1993. Хорошавин В.С., Лалетин В.И., Грудинин В.С. Способ программного управления шаговым перемещением посредством шагового двигателя и устройство его осуществления [Текст].
5. Лалетин В.И. Хорошавин В.С. Математическая модель квазизамкнутого планарного дискретного электропривода со стабилизацией программного движения при внешних стохастических поворотных воздействиях // Управление и обработка информации: Сб. научн. тр. / ВятГТУ [Текст]. – Киров, – 1998 – Вып.3.– С.120-124.
6. Лалетин В.И. Хорошавин В.С. Динамические модели дискретного электропривода в цифровых системах воспроизведения движения // Проблемы обработки информации. Вестник ВНИЦ ВВО АТН РФ [Текст]. – Вып. 1/98. – С. 111- 117.

Рецензенты:

Присмотров Н.И., д.т.н., профессор ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет», г. Киров;

Хорошавин В.С., д.т.н., профессор ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет», г. Киров.