

жения ротора изменяется на  $\pm 15\%$  по отношению к среднему значению, что ухудшает пусковые свойства двигателя. Для устранения этого недостатка необходимо изменить соотношение чисел пазов статора и ротора или снизить амплитуду высших гармоник статора 3, 5, 23, 25, уменьшив их обмоточный коэффициент.

## ВЫВОДЫ

1. Обмотка типа «беличья клетка» создает большой спектр высших и низших гармоник по отношению к индуктировавшему их магнитному полю.

2. Порядок этих гармоник зависит от соотношения числа полюсов магнитного поля и числа стержней «беличьей клетки».

3. Гармоники ротора, взаимодействуя с гармониками статора, создают паразитные синхронные и асинхронные моменты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кучера Я., Гапл Й. Обмотки электрических вращательных машин. — Изд-во Чехословацкой АН, 1963. — 683 с.

2. Рыжик И. М., Градштейн И. С. Таблицы интегралов, рядов, сумм и произведений. — М.: Гостехиздат, 1951. — 547 с.

3. Вольдек А. И. Электрические машины. — М.: Энергия, 1974. — 832 с.

Представлена кафедрой  
электроснабжения

Поступила 14.02.2000

УДК 621.313

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКООРДИНАТНОГО ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Докт. техн. наук, проф. ФИЛОНОВ И. П.,  
канд. техн. наук КУРЧ Л. В.,  
асп. ВЕРИГО Е. Б., студ. МОЩЕНСКИЙ Д. Н.

*Белорусская государственная политехническая академия*

Основное применение шаговые электроприводы находят в гибком автоматизированном производстве. Повышение требований к энергосбережению ставит задачу поиска оптимальных связей между энергетическими и механическими характеристиками шаговых электроприводов.

В связи с быстрым развитием в области шагового электропривода в настоящее время появилась возможность проектирования гибких производственных систем с использованием широкой серии модулей движения различного типа (линейных, планарных, поворотных и т. д.) на базе шаговых электродвигателей со встроенными датчиками и индивидуальной системой микропроцессорного управления. Из таких разнообразных

модулей движения проектируются системы воспроизведения взаимосвязанных движений деталей и инструментов автоматизированной системы с одновременной оптимизацией числа степеней подвижности в системе и соответственно энергетических и материальных затрат.

Дополнительным преимуществом модулей движения на базе шаговых электродвигателей является использование аэростатических опор. Такие опоры делают модули движения по существу не изнашивающимися. Это позволяет проектировать автоматизированные системы без кинематических преобразователей движения, что снижает энергетические потери на трение и повышает надежность системы. В соответствии с указанным выше подходом к проектированию автоматизированных систем концерном «Планар» был разработан автоматизированный сборочный центр на базе шаговых электродвигателей.

Для возможности выполнения заданных технологических требований автоматизированная система исследуется как однородная взаимосвязанная электромеханическая система с проведением численных исследований динамической модели системы, где принимаются во внимание энергетические, геометрические, кинематические, массовые и силовые характеристики исполнительных двигателей.

С целью выявления связей между энергетическими и механическими характеристиками сборочного центра, а также определения их влияния на точностные характеристики движения рабочего органа сборочного центра были проведены теоретические и экспериментальные исследования шагового привода сборочного центра и построена математическая модель приводных механизмов. Кинематическая схема сборочного центра показана на рис. 1. Сборочный центр имеет пять степеней подвижности: три поступательные вдоль осей  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$  и две вращательные вокруг осей  $OZ$  и  $O_1N$ . На рис. 1 также показаны возможные положения центров масс  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$ ,  $m_\phi$ ,  $m_\alpha$ ,  $m_c$  и  $m_{дет}$  соответственно исполнительных механизмов, схвата и детали.

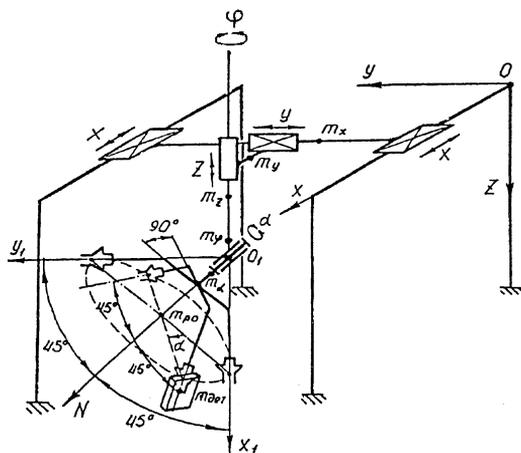


Рис. 1

Математическая модель поступательного движения исполнительного механизма вдоль оси  $OX$  может быть представлена системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{дв}^п = \frac{N_{дв}}{v_c}; \\ F_c^п = F_c + F_{тр}; \\ m_0 = m_x + m_y + m_z + m_\phi + m_\alpha + m_c + m_{дет}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $F_{дв}^п$  — обобщенная движущая сила вдоль оси  $OX$ ;

$F_c^п$  — обобщенная сила реакции;

$N_{дв}$  — мощность шагового электродвигателя, необходимая для обработки траектории вдоль оси  $OX$ ;

$F_c$  — сила технологического сопротивления;

$F_{тр}$  — сила трения;

$v_c$  — скорость перемещения схвата вдоль оси  $OX$ ;

$m_0$  — обобщенная масса, равная сумме масс поступательных механизмов перемещений вдоль осей  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  и вращательных механизмов вокруг осей  $OZ$  и  $O_1N$ , а также массы схвата и массы транспортируемой детали.

Принимая во внимание систему уравнений (1) и уравнения кинетической энергии, можно записать уравнение, которое связывает энергетические, массовые, геометрические и кинематические характеристики движения схвата вдоль оси  $OX$  и энергетические характеристики исполнительного двигателя, обеспечивающего перемещение вдоль этой оси. В дифференциальной форме это уравнение может быть представлено как [1]:

$$\frac{dm_0 (v_c)^2}{ds_c} + m_0 \frac{dv_c}{dt} = \frac{N_{дв}}{v_c} - F_c^п,$$

где  $s_c$  — перемещение схвата с деталью вдоль оси  $OX$ .

Математическая модель вращения вокруг оси  $OZ$  (угол  $\phi$ ) может быть определена системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{дв}^в = \frac{N_{дв}}{\omega_\phi}; \\ M_{ср}^в = M_c + \frac{N_{тр}}{\omega_\phi}; \\ I_\phi^в = I_{дв} \left( \frac{\omega_\phi}{\omega_c} \right) + I_{пм} \left( \frac{\omega^i_{в}}{\omega^i_{с}} \right)^2 + I_c + I_{дет}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $M_{дв}^в$  — обобщенный момент движущих сил;

$M_{ср}^в$  — то же, сил реакции;

$N_{дв}$  — мощность шагового электродвигателя;

$M_c$  — момент сил технологического сопротивления;

$N_{тр}$  — мощность сил трения;

$\omega_c$  — частота вращения схвата относительно оси  $OZ$ ;

$\omega_{\varphi}$  – то же, исполнительного механизма вокруг оси  $OZ$ ;

$i$  –  $i$ -й передаточный механизм;

$I_{\varphi}^B$  – обобщенный момент инерции;

$I_{дв}$  – момент инерции двигателя;

$I_{пм}$  – то же, передаточного механизма;

$I_c$  – то же, схвата относительно оси  $OZ$ ;

$I_{дв}$  – то же, детали относительно оси  $OZ$ .

Дифференциальное уравнение, устанавливающее взаимосвязь между энергетическими, массовыми, геометрическими и кинематическими характеристиками на основе системы уравнений (2) и уравнений кинетической энергии для вращательной степени подвижности можно записать как

$$\frac{dI_{\varphi}^B}{d\varphi_c} \frac{(\omega_c)^2}{2} + I_{\varphi}^B \frac{d\omega_c}{dt} = \frac{N_{дв}}{\omega_c} - M_c^B,$$

где  $\varphi_c$  – угол поворота схвата с деталью относительно оси  $OZ$ .

Математическая модель исполнительных механизмов сборочного центра позволяет установить взаимосвязи между энергетическими и механическими характеристиками для получения требуемых кинематических и динамических свойств приводных механизмов [1].

Система управления шаговыми двигателями является мультимикропроцессорной, построенной по иерархическому трехуровневому принципу. На нижнем уровне управления реализуется принцип прямого цифрового управления одной осью электропривода с помощью микропроцессорного контроллера. На верхнем уровне управления осуществляется согласованное управление группами электроприводов и технологическим оборудованием, подключенным к осевым контроллерам групп [2, 3].

При позиционном управлении осевой контроллер обрабатывает задание на перемещение. В состав программного обеспечения осевого контроллера входит ряд рабочих программ, обеспечивающих управление двигателем по его математической модели с различными траекториями движения, основными из которых являются:

с трапецеидальным или треугольным графиком скорости и возможностью независимого задания ускорения на разгон и торможение привода;

с предельным быстродействием, когда при разгоне и торможении привода используются максимальные динамические возможности двигателя; при этом траектории разгона и торможения являются экспоненциальными и пользователь имеет возможность задать в качестве параметров электромеханические постоянные времени привода при разгоне и торможении (данный закон в основном используется для шаговых двигателей с аэростатическими опорами).

Во всех случаях файл параметров привода, на основе которого строится управление по модели, предварительно загружается в осевые контроллеры. Этот файл содержит такие параметры как момент инерции привода, полюсное деление машины и др.

Для определения влияния скорости перемещения исполнительного механизма на точность позиционирования и отработки заданной скорости движения схвата были проведены экспериментальные исследования на сборочном центре СБ-001. На прямолинейном участке длиной 10,1 мм была 10 раз отработана траектория с постоянным ускорением 50 м/с<sup>2</sup> (на участках разгона и торможения) и скоростью перемещения в диапазоне от 24,5 до 50,5 мм/с. С помощью датчика положения (синусной линейки) были определены фактические значения положения  $s_{\text{ф}}$  и скорости приводного механизма  $v_{\text{ф}}$ . На основе сравнения полученных фактических значений и заданных заранее теоретических  $s_{\text{т}}$  и  $v_{\text{т}}$ , определенных в соответствии с [2], были сформированы ошибки  $\Delta s$  и  $\Delta v$ , некоторые из которых представлены на графиках на рис. 2 и 3.

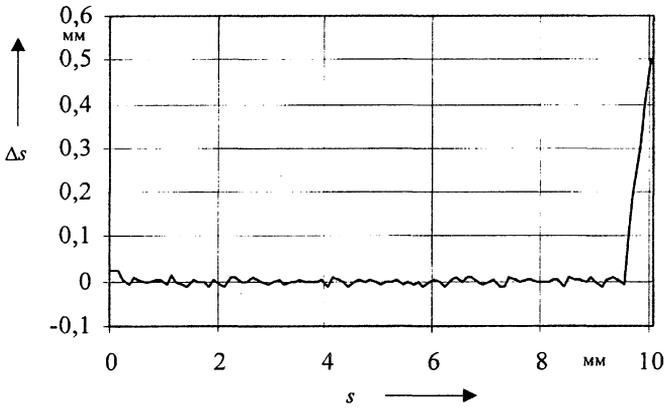


Рис. 2. Зависимость  $\Delta s$  ( $s_{\text{т}} - s_{\text{ф}}$ ) от  $s$

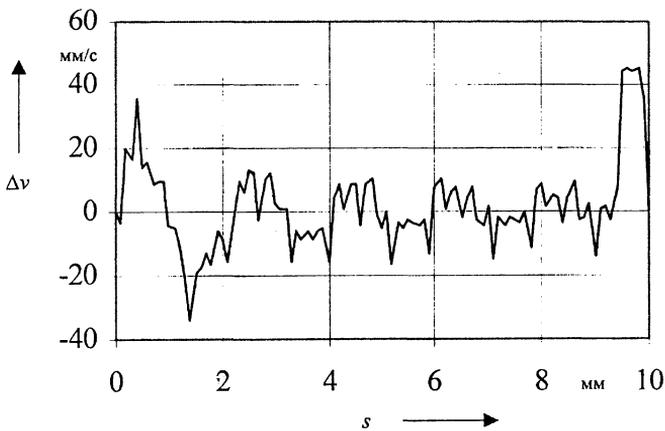


Рис. 3. Зависимость  $\Delta v$  ( $v_{\text{т}} - v_{\text{ф}}$ ) от  $s$

Результаты полученных экспериментальных данных показывают, что точность позиционирования и точность отработки скорости уменьшается пропорционально с увеличением скорости перемещения приводного механизма от 24,5 до 42,5 мм/с. Начиная со значения скорости 44,5 мм/с, точность позиционирования и отработки скорости значительно падает, ошибки достигают высоких значений.

## В Ы В О Д

В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований сборочного центра с шаговыми электроприводами. Были установлены связи между энергетическими, геометрическими, кинематическими и массовыми характеристиками исполнительных механизмов. Численные исследования различных законов движения исполнительных механизмов позволили определить их влияние на точность отработки траектории. Полученные результаты экспериментальных исследований могут быть использованы для нахождения оптимальных законов движения рабочего органа сборочного центра с требуемыми энергетическими и механическими характеристиками.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ф и л о н о в И. П., Г е р а с и м о в Ю. Б., К у р ч Л. В. Моделирование движения и управления манипуляторами в технологических процессах. Ч. 1: Математическое моделирование силовых, скоростных и энергетических связей манипуляторов, способы управления. – Мн.: БГПА, 1993. – 215 с.
2. С а ф о н о в Ю. М. Электроприводы промышленных роботов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
3. И в о б о т е н к о Б. А., К о з а ч е н к о В. Ф. Шаговый электропривод в робототехнике. – М.: МЭИ, 1984. – 215 с.

Представлена кафедрой  
технологии машиностроения

Поступила 14.02.2000

УДК 621.548.6

## **АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРНЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

**Канд. техн. наук, доц. ОЛЕШКЕВИЧ М. М.,  
студ. МАКОСКО Ю. В.**

*Белорусская государственная политехническая академия*

Роторные ветроэнергетические установки – это ветродвигатели с вращающимися цилиндрическими или коническими роторами Флеттнера, использующие в качестве движущей силу Магнуса. Конструктивно они могут быть выполнены с горизонтальной или вертикальной осями вращения, могут работать уже при слабом ветре и, по мнению некоторых авторов, очень эффективны в использовании ветрового потока.

Ветроколесо с роторами горизонтально-осевой четырехроторной ветроэнергетической установки (ВЭУ) показано на рис. 1.