

## Influence of Physical Mechanical Characteristics of Titanium Alloys on Stress-Strain State and Load-Carrying Capacity of Press-Fit Joint

The paper describes the technique of calculating the stress-strain state and load-carrying capacity of press-fit joints of titanium alloy parts. Analysis of simulation results revealed peculiarities of the influence of physical mechanical characteristics of titanium alloys on load-carrying capacity of press-fit joints.

**Key words:** press-fit joint, friction factor, stress-strain state, load-carrying capacity.

УДК 681.2.08

**А. В. Егоров**, кандидат технических наук, доцент, Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола

**К. Э. Козлов**, аспирант, Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола

## ИНЕРЦИОННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННОГО ЦЕПНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Предложена методика и теоретическое обоснование инерционного метода оценки энергетических характеристик цепных передач в составе цепного электропривода. На основе разработанной методики, оснатив привод аппаратно-программным комплексом, имеет-ся возможность измерения приведенного момента инерции потерь в цепных передачах в широком диапазоне скоростных, нагрузочных и переходных режимов работы электропривода.

**Ключевые слова:** инерция, инерционная диагностика, энергоэффективность, цепные передачи.

Всестороннее исследование характеристик цепных передач в широком диапазоне скоростных, нагрузочных и переходных режимов работы является основой для решения проблемы повышения энергетической эффективности цепных приводов. Однако в большинстве публикаций, посвященных исследованию цепных передач, мало уделено внимания вопросам измерения их энергетических параметров. Известные методы и средства исследования энергетической эффективности цепных электроприводов не позволяют с высокой точностью исследовать механические потери цепных передач на большинстве скоростных, нагрузочных и переходных режимах работы, и их применение затруднено сложностью и дороговизной измерительной аппаратуры [1].

Целью настоящей статьи является разработка инерционного метода и методики оценки энергетических характеристик цепных передач в асинхронном цепном электроприводе в широком диапазоне скоростных, нагрузочных и переходных режимов работы.

Реализация метода оценки энергетической эффективности асинхронного цепного электропривода, включающем асинхронный электрический двигатель и цепную передачу с параллельным расположением ведущего и ведомого валов, возможна на основе стендового, бестормозного метода определения момента инерции вращающихся масс двигателей вращательного действия [2, 3, 4]. На основании определения механических потерь в цепной передаче представляется возможным судить об энергоэффективности цепного привода.

Рассмотрим реализацию метода более подробно. На рис. 1 представлена схема цепной передачи с электроприводом от асинхронного электродвигателя.

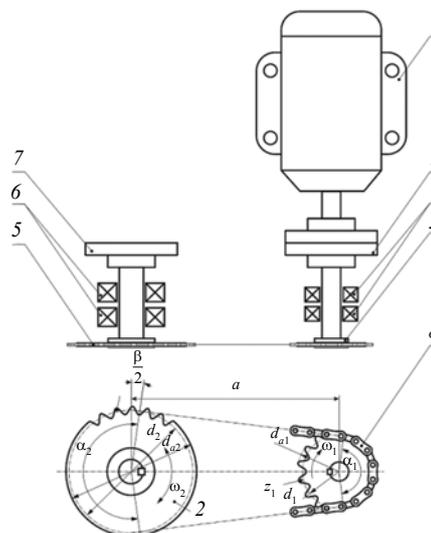


Рис. 1. Схема цепной передачи с электроприводом от асинхронного электродвигателя: 1 – асинхронный электродвигатель; 2 – предохранительная муфта электродвигателя; 3 – быстроходный вал с надетой на него ведущей звездочкой; 4 – опорные подшипники быстроходного вала; 5 – тихоходный вал с надетой на него ведомой звездочкой; 6 – опорные подшипники тихоходного вала; 7 – полумуфта тихоходного вала; 8 – цепь

На первом этапе определяем момент инерции  $J_1$  системы вращающихся масс «ротор асинхронного двигателя 1 – подшипниковые узлы асинхронного двигателя – предохранительная муфта 2 –

быстроходный вал с надетой на него ведущей звездочкой 3 – опорные подшипники быстроходного вала 4» с учетом потерь на трение в его опорах в соответствии с рис. 2.

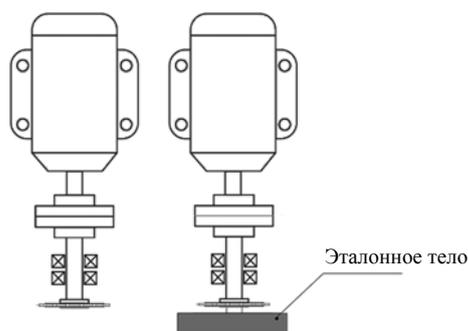


Рис. 2. Схема определения зависимости момента инерции системы вращающихся масс «ротор асинхронного двигателя 1 – подшипниковые узлы асинхронного электродвигателя – предохранительная муфта 2 – быстроходный вал с надетой на него ведущей звездочкой 3 – опорные подшипники быстроходного вала 4» от угловой скорости вала электродвигателя

Сначала определяем динамику угловых ускорений системы вращающихся масс с установленным на выходном вале телом с эталонным моментом инерции  $\varepsilon_1(\omega)$ , а затем без него  $\varepsilon_2(\omega)$ . Учитывая, что свободный разгон осуществляется фактически в режиме холостого хода, то произведения составляющих крутящего момента на валу ведущей звездочки, моменты инерции и угловые ускорения при первом и втором разгоне могут быть приравнены друг другу:

$$(J_3 + J_1(\omega)) \cdot \varepsilon_1(\omega) = J_1(\omega) \cdot \varepsilon_2(\omega). \quad (1)$$

Зная расчетный или экспериментально определенный методом крутильных колебаний согласно ГОСТ 11828–86 момент инерции  $J_3$  эталонного тела, из равенства (1) рассчитываем зависимость момента инерции рассматриваемой системы вращающихся масс с учетом потерь на трение в опорах:

$$J_1(\omega) = \frac{J_3 \cdot \varepsilon_1(\omega)}{\varepsilon_2(\omega) - \varepsilon_1(\omega)}.$$

Аналогичным образом определяем моменты инерции системы вращающихся масс «ротор асинхронного электродвигателя 1 – подшипниковые узлы асинхронного электродвигателя – предохранительная полумуфта»  $J_{эд}$  и системы вращающихся масс «ротор асинхронного двигателя 1 – подшипниковые узлы асинхронного электродвигателя – предохранительная муфта – тихоходный вал с надетой на него ведомой звездочкой 5 – опорные подшипники тихоходного вала 6»  $J_{т.эд}$ . Зная  $J_{эд}$  и  $J_{т.эд}$ , определяем динамику момента инерции системы вращающихся масс «предохранительная полумуфта тихоходного вала – тихоходный вал с надетой на него ведомой звездочкой 5 – опорные подшипники тихоходного вала 6»:

$$J_2(\omega) = J_{т.эд}(\omega) - J_{эд}(\omega).$$

На основании полученных данных определяем суммарный приведенный к оси вращения вала асинхронного электродвигателя момент инерции вращающихся масс всего привода согласно общепринятой методике на основе закона сохранения энергии без учета момента инерции потерь в цепном зацеплении:

$$J_{пр}(\omega) \cdot \frac{\omega^2}{2} = (J_1(\omega) + J_{ц1}) \cdot \frac{\omega^2}{2} + (J_2(\omega) + J_{ц2}) \cdot \frac{\omega^2}{2i^2} + E_{к1} + E_{к2},$$

где

$$E_{к1} = E_{к2} = \frac{L_{ц} - l_{ц1} - l_{ц2}}{2} \cdot m_{ц} \cdot \left( \frac{\omega \cdot d_1}{2} \right)^2 - \text{кинетическая энергия ведущей и ведомой частей цепи соответственно.}$$

где  $J_{ц1}$  – момент инерции части цепи, охватывающей ведущую звездочку, относительно оси ее вращения;  $J_{ц2}$  – момент инерции части цепи, охватывающей ведомую звездочку, относительно оси ее вращения;  $L_{ц}$  – общая длина цепи;  $l_{ц1}$  – длина окружности обхвата ведущей звездочки по средней линии цепи;  $l_{ц2}$  – длина окружности обхвата ведомой звездочки по средней линии цепи;  $m_{ц}$  – удельная масса единицы длины цепи;  $d_1$  – диаметр ведущей звездочки по средней линии цепи;  $i$  – передаточное отношение цепной передачи.

$$J_{пр}(\omega) = J_1(\omega) + J_{ц1} + \frac{J_2(\omega) + J_{ц2}}{i^2} + (L_{ц} - l_{ц1} - l_{ц2}) \cdot m_{ц} \cdot \frac{d_1^2}{4}, \quad (2)$$

где  $J_{ц1}$  – момент инерции части цепи, охватывающей ведущую звездочку, относительно оси ее вращения;  $J_{ц2}$  – момент инерции части цепи, охватывающей ведомую звездочку, относительно оси ее вращения;  $L_{ц}$  – общая длина цепи;  $l_{ц1}$  – длина окружности обхвата ведущей звездочки по средней линии цепи;  $l_{ц2}$  – длина окружности обхвата ведомой звездочки по средней линии цепи;  $m_{ц}$  – удельная масса единицы длины цепи;  $d_1$  – диаметр ведущей звездочки по средней линии цепи;  $i$  – передаточное отношение цепной передачи.

На заключительном этапе передачу полностью собираем, асинхронный электродвигатель 1 снова подсоединяем к быстроходному валу с надетой на него звездочкой 3 через предохранительную муфту электродвигателя 2.

С помощью инерционного метода определяем зависимость момента инерции всего электропривода:

$$J_3(\omega) = \frac{J_3 \cdot \varepsilon_4(\omega)}{\varepsilon_3(\omega) - \varepsilon_4(\omega)}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_3(\omega)$  – динамика угловых ускорений всего электропривода;  $\varepsilon_4(\omega)$  – динамика угловых ускорений всего электропривода с установленным на выходном валу эталонным телом.

На основе полученных значений выражений (2) и (3) определяем динамику приведенного к оси вращения ротора асинхронного электродвигателя момента инерции потерь в цепном зацеплении:

$$J_{п}(\omega) = J_3(\omega) - J_{пр}(\omega).$$

Зависимость коэффициента полезного действия цепной передачи от угловой скорости вращения быстроходного вала:

$$\eta(\omega) = \frac{P(\omega) - P_n(\omega)}{P(\omega)} = \frac{M(\omega) \cdot \omega - M_n(\omega) \cdot \omega}{M(\omega) \cdot \omega} =$$

$$= \frac{J_3(\omega) \cdot \varepsilon_3 - J_n(\omega) \cdot \varepsilon_3}{J_3(\omega) \cdot \varepsilon_3} = \frac{J_3(\omega) - J_n(\omega)}{J_3(\omega)} = \frac{J_{пр}(\omega)}{J_3(\omega)},$$

где  $P(\omega)$  – мощность цепного электропривода с учетом мощности потерь;  $P_n(\omega)$  – мощность потерь в цепном зацеплении;  $M(\omega)$  – крутящий момент на валу ведущей звездочки при полностью собранном электроприводе;  $M_n(\omega)$  – тормозной момент в цепном зацеплении, создаваемый за счет действия сил сопротивления в цепи.

Для определения и регистрации момента инерции цепного электропривода бестормозным методом предлагается использовать аппаратно-программный комплекс, состоящий из энкодера, измерительного преобразователя (блока регистрации) и персонального компьютера (ПК) с установленной программой регистрации и анализа цифрового сигнала (рис. 3).

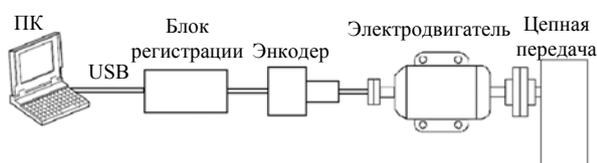


Рис. 3. Структура аппаратно-программного комплекса для определения и регистрации момента инерции цепного электропривода

Энкодер соединяется посредством переходной муфты с валом электродвигателя. Принцип действия комплекса основан на измерении длительности импульсов, генерируемых электромагнитным датчиком. Генерация электрического сигнала датчиком происходит при изменении магнитного поля в его рабочей зоне. Изменение магнитного поля инициируется последовательным прохождением через рабочую зону датчика зубцов измерительного диска. При вращении измерительного диска в установленном датчике генерируется сигнал в виде синусоидальных импульсов, длительность которых пропорциональна времени прохождения зубца измерительного диска зоны датчика. Измеренная длительность импульса является характеристикой скорости вращения двигателя. Разница последовательных измерений длительности двух импульсов является характеристикой углового ускорения вращения двигателя. Энкодер генерирует 100 импульсов на один оборот вала, что повышает точность измерения комплекса. При этом допустимая относительная погрешность измерения углового ускорения  $\pm 0,2\%$ .

Затем аналоговый сигнал с энкодера поступает на вход блока регистрации. Измерительный микроконтроллер блока регистрации производит измерение длительности аналогового сигнала, и цифровой сигнал поступает в блок интерфейса USB. Затем массив данных поступает в ПК и записывается с помощью терминальной программы.

В терминальной программе на ПК осуществляется математическая обработка массива данных, вычисление угловых скоростей и ускорений вращающегося двигателя для каждого зубца измерительного диска. Относительно данных об угловых ускорениях, полученных при разгоне двигателя с эталонным диском и без него, вычисляется момент инерции.

Относительная систематическая погрешность определения момента инерции оценивается как

$$\delta = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial J}{\partial \varepsilon_3} \frac{\Delta \varepsilon}{J}\right)^2 + \left(\frac{\partial J}{\partial \varepsilon_0} \frac{\Delta \varepsilon}{J}\right)^2 + \left(\frac{\partial J}{\partial J_3} \frac{\Delta J_3}{J}\right)^2} =$$

$$= \pm \sqrt{\left(\frac{1 + \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_3 - \varepsilon_3^2}{\varepsilon_3 \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_3)} \cdot \Delta \varepsilon\right)^2 + \left(\frac{1}{(\varepsilon_0 - \varepsilon_3)} \cdot \Delta \varepsilon\right)^2 + \left(\frac{\Delta J_3}{J_3}\right)^2},$$

где  $\varepsilon_3$  и  $\varepsilon_0$  – угловые ускорения системы вращающихся масс с установленным на выходном валу телом с эталонным моментом инерции и без него соответственно;  $\Delta \varepsilon$  – абсолютная систематическая (приборная) погрешность при измерении углового ускорения;  $\Delta J_3$  – абсолютная систематическая погрешность при измерении момента инерции эталонного тела.

Таким образом, на основании разработанного метода и методики, используя телу с эталонным моментом инерции, можно оценивать влияние отдельных факторов на энергоэффективность работы цепной передачи благодаря определению момента инерции потерь в цепном зацеплении в широком диапазоне скоростных, нагрузочных и переходных режимов работы. Метод применим как для цепных редукторов, так и для мультипликаторов.

На уровне отдела технического контроля предприятия – изготовителя цепей и цепных приводов, определив динамику значений момента инерции цепных передач и допуск на изменение этого показателя, а также оснастив привод аппаратно-программным комплексом определения и регистрации момента инерции цепного электропривода, имеется возможность оперативного реагирования на ухудшение энергетических характеристик работы привода, что позволяет увеличивать надежность работы и поддерживать высокую энергетическую эффективность цепного привода на протяжении всего срока эксплуатации.

#### Библиографические ссылки

1. Мевша Н. В. Методы исследования и оценки технического состояния цепных передач: дис. ... канд. техн. наук. – Краснодар, 2005. – 213 с.
2. Егоров А. В., Белогусев В. Н. Определение коэффициента полезного действия асинхронных электрических машин с помощью эталонного момента инерции // Изв. Самарского науч. центра Рос. акад. наук. – 2010. – Т. 12(33). – № 1(2). – С. 349–352.
3. Егоров А. В., Белогусев В. Н. Бестормозное определение эффективных характеристик электрических двигателей вращательного действия // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 7. – С. 66–72.

4. Егоров А. В., Белогусев В. Н. Инерционный метод оценки мощности механических потерь в асинхронном зубчатом электроприводе // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2011. – № 6. – С. 34–37.

5. Кацман М. М. Лабораторные работы по электрическим машинам и электроприводе : учеб. для электротехни-

ческих специальностей техникумов. – М. : Академия, 2004. – 252 с.

6. ГОСТ 11828–86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний [введ. 1987-01-07]. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 31 с.

A. V. Egorov, PhD in Engineering, Associate Professor, Volga State Technological University, Yoshkar Ola

K. E. Kozlov, Post-graduate, Volga State Technological University, Yoshkar Ola

### Inertial Method of Estimating Energy Efficiency of Asynchronous Chain Electric Drive

*The article suggests the methodology and theoretical justification for the inertial method for determining the energy characteristics of chain transmissions as part of a chain electric drive. Having equipped the drive with the hardware and software system, the developed technique allows measuring the moment of inertia of losses in chain transmissions within a wide range of speed, loaded and transient modes of electric drive operation.*

**Key words:** inertia, inertial diagnostics, energy efficiency, chain transmissions.

УДК 621.03: 621.3.08

**В. Е. Щавлев**, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

**Д. Н. Трушников**, кандидат технических наук, докторант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

**А. А. Южаков**, доктор технических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДАТЧИКА ВТОРИЧНОГО ТОКА В ПЛАЗМЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОКУСИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА\*

*Представлен анализ спектральных характеристик датчика-коллектора вторичного излучения в плазме, образующейся в зоне контакта электронного луча с изделием во время процесса электронно-лучевой сварки, разработана и проанализирована математическая модель датчика.*

**Ключевые слова:** электронно-лучевая сварка, математическая модель, ряд Фурье, вторично-эмиссионный ток в плазме.

**П**о сравнению с обычными способами сварки (электродуговая, газопламенная, электрошлаковая), применяемыми при соединении материалов, электронно-лучевая сварка (ЭЛС) имеет ряд преимуществ: высокая концентрация мощности в электронном пучке, малые размеры зоны термического влияния, равнопрочность металла шва и основного материала и др. Эти преимущества обуславливают широкие технологические возможности электронного пучка для сварки химически активных, цветных и высокопрочных металлов, тугоплавких и жаропрочных сплавов, применяемых для изготовления ответственных изделий [1].

При решении вопросов оптимизации процесса ЭЛС одними из основных задач являются минимизация ширины сварного шва и обеспечение воспроизводимости глубины проплавления, что тесно связано с выбором и управлением режимом фокусировки [2]. Воспроизведение режима фокусировки электронного пучка является сложной задачей, так как фокусировка сварочного пучка неоднозначно связана с током фокусирующей линзы электронной пушки [3]. В то же время изменение тока фокуси-

ровки на 1 % может приводить к изменению глубины проплавления на 20 %.

Следовательно, ЭЛС предъявляет высокие требования к параметрам качества систем управления, поскольку любые малейшие отклонения или неучтенные задержки могут привести к дефектам, недопустимым при использовании способов соединения материалов данного класса точности.

Таким образом, перед исследователями встает целый комплекс взаимосвязанных задач:

1) поиск параметров процесса сварки, на основе анализа которых можно было бы построить контур управления;

2) поиск способа измерения, методов предварительной обработки информационных сигналов (фильтрация, усиление), характеризующих процесс формирования сварного шва;

3) поиск закона управления параметрами электронного луча для получения швов с заданными характеристиками.

В предложенной работе рассматривается решение первых двух задач. Известно, что существенное влияние на форму канала проплавления оказывает

© Щавлев В. Е., Трушников Д. Н., Южаков А. А., 2013

Получено 08.05.13

\* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ-Урал № 11-08-96016, РФФИ № 13-08-00397А и при финансовой поддержке Министерства образования Пермского края.