

**Иванов С. Н., Колесник М. Б., Колошенко Ю. Б.**  
**S. N. Ivanov, M. B. Kolesnik, Yu. B. Koloshenko**

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СОВМЕСТИМОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЛИНЕЙНЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА**

## **ENSURING THE OPERATIONAL COMPATIBILITY OF ASYNCHRONOUS MOTORS WITH LINEAR DISPLACEMENT OF THE ACTUATOR**

**Иванов Сергей Николаевич** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Sergey N. Ivanov** – Doctor of Engineering, Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Колесник Максим Борисович** – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

**Maxim B. Kolesnik** – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

**Колошенко Юлия Борисовна** – старший преподаватель кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8(4217)241-118. E-mail: koloschenko2011@yandex.ru.

**Yulya B. Koloshenko** – Senior Lecturer, Aircraft Construction Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel. 8(4217)241-118. E-mail: koloschenko2011@yandex.ru.

**Аннотация.** Рассмотрены существующие механические передачи преобразователей движения, обоснован выбор передачи винт-гайка скольжения. Рассмотрена задача определения выходных параметров асинхронного двигателя по заданным условиям, получена область решения для выбора стандартного двигателя.

**Summary.** The existing mechanical transmissions of motion converters are considered, the choice of the screw-nut sliding transmission is justified. The problem of determining the output parameters of an asynchronous motor under specified conditions is considered, and the solution area for choosing a standard motor is obtained.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, механическая характеристика, механический момент, номинальная мощность.

**Key words:** asynchronous motor with a closed-loop rotor, mechanical characteristic, mechanical torque, rated power.

УДК 621.31:621.25

### **Введение**

При создании автоматизированных электроприводов, использующих передаточные элементы для преобразования вращательного движения в поступательное, могут быть использованы различные типы механических передач, классификация которых приведена на рис. 1.

Преобразование вращательного движения в поступательное с использованием кулачковых и кривошипно-шатунных механизмов малоэффективно при необходимости больших перемещений. Передачи с гибкой связью (тросовые, цепные, ременные) обеспечивают высокие нагрузки и перемещения, но, как правило, они используются совместно с редуктором. На рис. 2 приведена кинематическая схема зубчато-реечной передачи (ГОСТ 10242-81) [9].

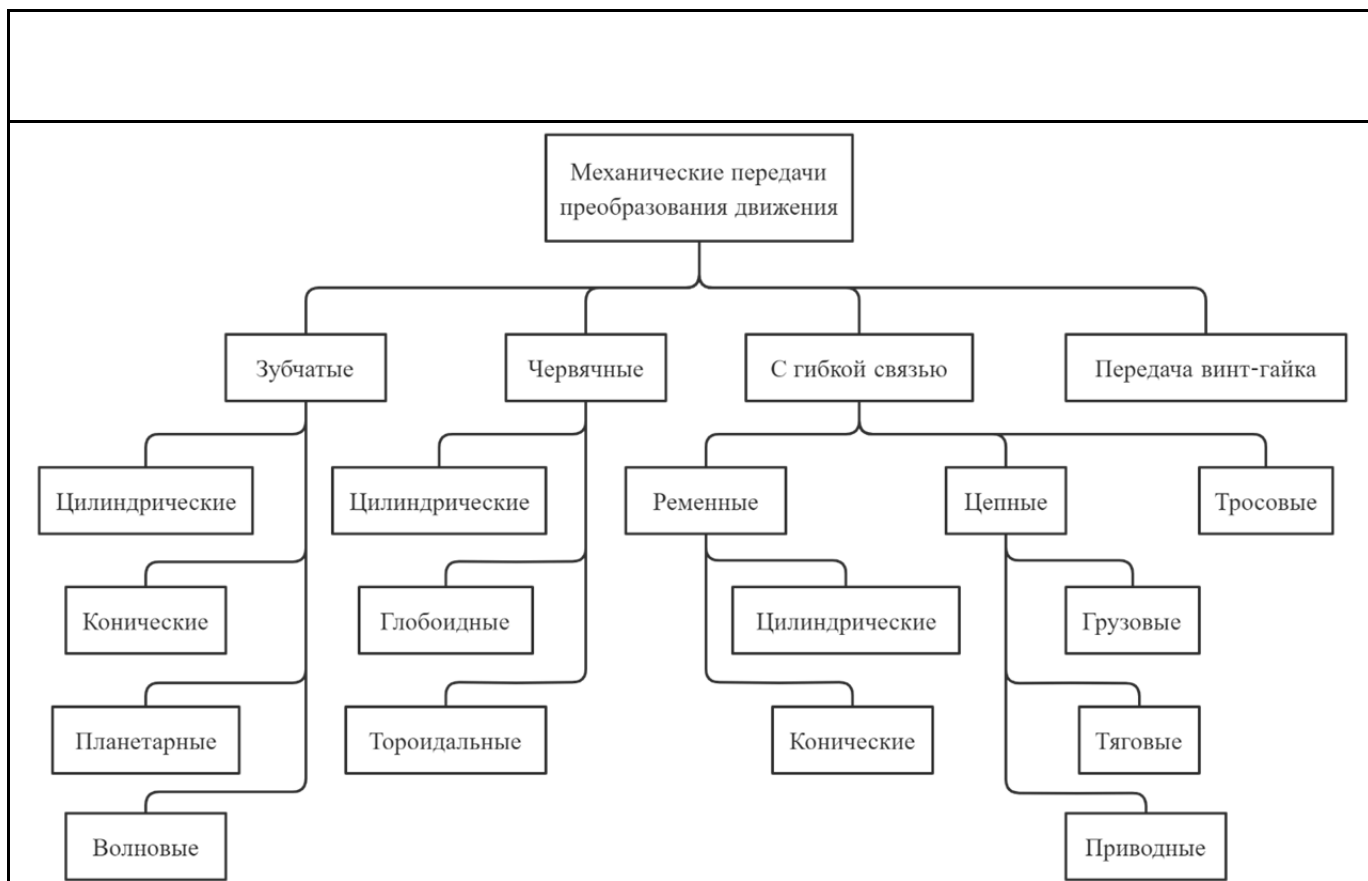


Рис. 1. Классификация механических передач преобразователей движения

Несмотря на относительную простоту конструкции, передача имеет ряд существенных недостатков: ограниченный изгибающими напряжениями диапазон линейных усилий, разрушение зубьев даже при небольшой перегрузке, повышенный уровень люфтов и шума, сложный и дорогостоящий процесс изготовления элементов сопряжения.

Кинематическая схема передачи винт-гайка представлена на рис. 3 [1].

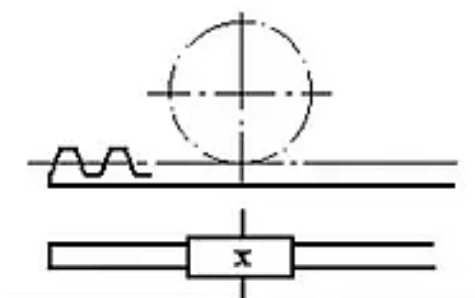


Рис. 2. Кинематическая схема зубчато-реечной передачи



Рис. 3. Кинематическая схема передачи винт-гайка

Передача винт-гайка качения, несмотря на более высокий КПД и малый износ рабочих поверхностей, значительно уступает передаче винт-гайка скольжения по грузоподъёмности при аналогичных размерах. К преимуществам последней относят: возможность получения больших усилий за счёт передаточного числа, составляющего 200...3000, точность перемещения и возможность обеспечения сверхнизких скоростей перемещения, плавность и низкая шумность, малые габариты.

Таким образом, в автоматизированном приводе на базе асинхронного электродвигателя для преобразования вращательного движения в поступательное целесообразно использование передачи винт-гайка скольжения.

В отличие от большинства редукторных электротехнических установок особенностью асинхронных двигателей с линейным перемещением исполнительного элемента является конструктивное объединение двигателя и передаточного механизма, как это показано в [1-5; 7].

## Параметризация асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором под заданные эксплуатационные условия

В качестве определяющих эксплуатационных условий принимаются:

-  $t$  – время, за которое должен быть осуществлён переход исполнительного механизма из начального положения в конечное, с;

-  $l$  – ход исполнительного механизма, м;

-  $F$  – номинальное усилие, требуемое для перехода из начального положения в конечное, Н;

-  $L$  – расстояние между опорами, м.

Дополнительным определяющим параметром является линейная скорость перемещения, м/с,

$$v = \frac{l}{t}.$$

Для определения размерных соотношений передаточных элементов *асинхронного* двигателя с короткозамкнутым ротором с учётом действующих напряжений разработана программа на объектно-ориентированном языке Java (Sun Microsystems) [2].

Для формализации и соответствия ГОСТ 24737-81 результаты расчёта представляются следующими величинами:

–  $P$  – шаг резьбы, мм;

–  $d$  – наружный диаметр наружной резьбы (винта), мм;

–  $d_2$  – средний диаметр наружной резьбы, мм;

–  $d_3$  – внутренний диаметр наружной резьбы, мм;

–  $D_1$  – внутренний диаметр внутренней резьбы (гайки), мм;

–  $D_2$  – средний диаметр внутренней резьбы, мм;

–  $D_4$  – наружный диаметр внутренней резьбы, мм.

Число оборотов ротора двигателя, необходимое для перехода исполняющего механизма из начального положения в конечное,

$$N = \frac{l \cdot 10^3}{P}.$$

Соответственно, частота вращения ротора,  $\text{мин}^{-1}$ ,

$$w = \frac{60 \cdot N}{t}.$$

Частота вращения позволяет определить число пар полюсов  $p$  асинхронного двигателя.

Требуемый момент вращения для перемещения тяги с использованием винтовой пары  $M$ , Н·м [8],

$$M = \frac{F \cdot d_2 \cdot \text{tg}(\psi + \varphi)}{2},$$

где  $\psi$  – угол подъёма винтовой пары;  $\varphi$  – угол трения в резьбе.

Тангенс угла подъёма винтовой пары

$$\text{tg}\psi = \frac{P \cdot n}{\pi \cdot d_2},$$

где  $n$  – количество заходов резьбы.

Тангенс угла трения в резьбе равен

$$\text{tg}\varphi = \frac{f}{\cos\left(\frac{\psi}{2}\right)},$$

где  $f = 0,15$  – коэффициент трения в винтовой паре сталь-сталь.

Формула тангенса суммы двух аргументов равна

$$\operatorname{tg}(\psi + \varphi) = \frac{\operatorname{tg}\psi + \operatorname{tg}\varphi}{1 - \operatorname{tg}\psi \cdot \operatorname{tg}\varphi}$$

Отсюда выражение  $\operatorname{tg}(\psi + \varphi)$  принимает вид

$$\operatorname{tg}(\psi + \varphi) = \frac{\frac{P \cdot n}{\pi \cdot d_2} + \frac{f}{\cos\left(\frac{\operatorname{arctg}\left(\frac{P \cdot n}{\pi \cdot d_2}\right)}{2}\right)}}{1 - \frac{P \cdot n}{\pi \cdot d_2} \cdot \frac{f}{\cos\left(\frac{\operatorname{arctg}\left(\frac{P \cdot n}{\pi \cdot d_2}\right)}{2}\right)}}$$

Подстановка в выражение для момента вращения формулы тангенса суммы двух аргументов приводит к выражению

$$M = \frac{F \cdot d_2 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{\frac{P \cdot n}{\pi \cdot d_2} + \frac{f}{\cos\left(\frac{\operatorname{arctg}\left(\frac{P \cdot n}{\pi \cdot d_2}\right)}{2}\right)}}{1 - \frac{P \cdot n}{\pi \cdot d_2} \cdot \frac{f}{\cos\left(\frac{\operatorname{arctg}\left(\frac{P \cdot n}{\pi \cdot d_2}\right)}{2}\right)}} \quad (1)$$

Полученные величины вращающего момента на валу и скорости ротора служат основой для выбора ближайшего типоразмера стандартного асинхронного двигателя. Справочные характеристики выбранного двигателя являются основой проектного расчёта для двигателя с учётом винтовой пары и заданных эксплуатационных условий. Для определения пространства проектирования выполняется расчёт ещё двух двигателей с ближайшей большей и меньшей номинальной мощностью в соответствии с ГОСТ 12139-84 [10].

Полученные механические характеристики двигателей определяют область выбора стандартного двигателя, которая определяется в результате комплексного анализа рабочих и технико-экономических характеристик каждого варианта (размерных соотношений, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, кратности пускового тока, момента и т. д.).

Примером рассмотренной методики является выбор асинхронного двигателя с линейным перемещением исполнительного элемента при условиях эксплуатации, приведённых в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные

$t, \text{с}$	$l, \text{м}$	$F, \text{Н}$	$L, \text{м}$
5	0,2	3500	0,4

Определяется линейная скорость перемещения, м/с,

$$v = \frac{l}{t}$$

$$v = \frac{0,2}{5} = 0,04.$$

Параметры передаточных элементов с учётом действующих напряжений (в данном случае выбрана резьба под условие нагрузки 10 кН [5; 6]):  $P = 2$  мм;  $d = 16$  мм;  $d_2 = 15$  мм;  $d_3 = 13,5$  мм;  $D_1 = 14$  мм;  $D_2 = 15$  мм;  $D_4 = 16,5$  мм.

Число оборотов ротора двигателя, необходимое для перехода исполняющего механизма из начального положения в конечное,

$$N = \frac{l}{P},$$

$$N = \frac{0,2 \cdot 10^3}{2} = 100.$$

Угловая скорость вращения ротора, об/мин,

$$\omega = \frac{60 \cdot N}{t},$$

$$\omega = \frac{60 \cdot 100}{5} = 1200.$$

Число пар полюсов асинхронного двигателя  $p = 2$ .

По формуле (1) определяется необходимый момент вращения  $M$ , Н · м:

$$M = \frac{3500 \cdot 15 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{\frac{2 \cdot 1}{\pi \cdot 15} + \frac{0,15}{\cos\left(\frac{\arctg\left(\frac{2 \cdot 1}{\pi \cdot 15}\right)}{2}\right)}}{1 - \frac{2 \cdot n}{\pi \cdot 15} \cdot \frac{0,15}{\cos\left(\frac{\arctg\left(\frac{2 \cdot 1}{\pi \cdot 15}\right)}{2}\right)}} = 5,085,$$

где  $f = 0,15$  – коэффициент трения в винтовой паре сталь-сталь;  $n = 1$  – количество заходов резьбы.

Результаты расчёта в виде механических характеристик приведены на рис. 4.

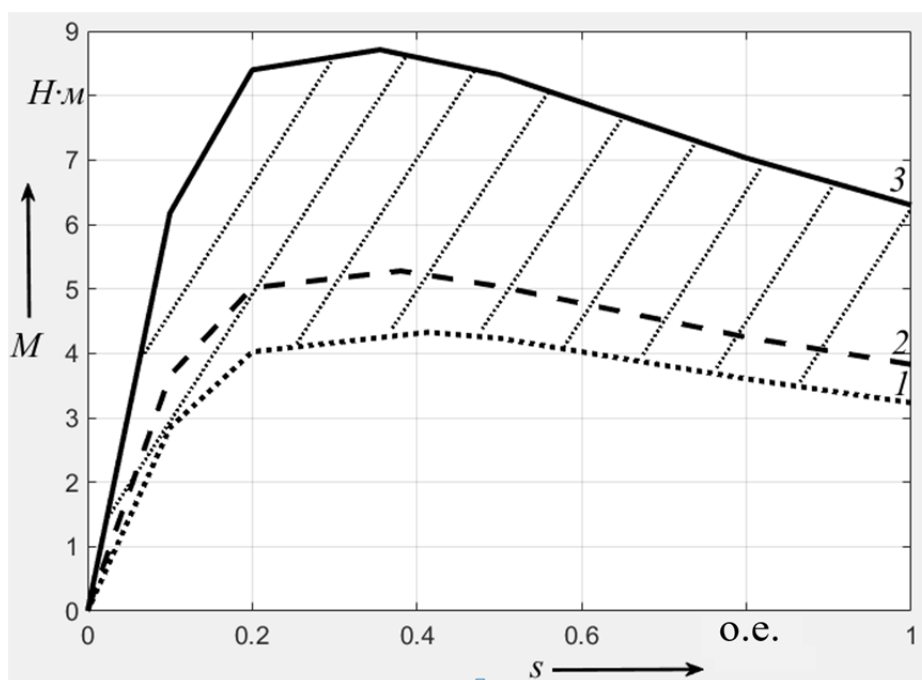


Рис. 4. Зависимость  $M = f(s)$ : 1 –  $P_2 = 0,37$  кВт; 2 –  $P_2 = 0,5$  кВт; 3 –  $P_2 = 0,75$  кВт

## **Заключение**

В статье решена задача обеспечения эксплуатационной совместимости асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с линейным перемещением исполнительного элемента на основе передачи винт-гайка скольжения.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Определение потерь в передаточных механизмах специальных электромеханических приводов / С. Н. Иванов, М. Б. Колесник, В. А. Макаренко, Т. К. Фискова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № V-1 (45). – С. 107-114.
2. Постановка задачи выбора и алгоритм определения параметров передаточных элементов электромеханических преобразователей с учётом действующих напряжений / С. Н. Иванов, М. Б. Колесник, Ю. Б. Колошенко, А. А. Просолович, К. К. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № I-1 (49). – С. 29-36.
3. Ivanov, S. N. Synthesis of the control device of the electromechanical drive of the main valve / S. N. Ivanov, K. K. Kim, A. V. Gorbunov // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 18-22 May. 2020.
4. Автоматизированный электромеханический привод вагонных дверей / К. К. Ким, С. Н. Иванов, А. В. Горбунов, Т. С. Титова, В. В. Никитин, И. Г. Киселев // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 11-16.
5. Колесник, М. Б. Анализ совместимости в задаче управления безредукторным приводом стрелочного перевода / М. Б. Колесник, Ю. Б. Колошенко, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 14-19.
6. Биргер, И. А. Расчёт на прочность деталей машин: справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
7. Ким, К. К. Анализ эффективности линейных электромеханических приводов стрелочных переводов / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. Б. Колесник // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте: труды XXIV Всерос. научно-практ. конф. КРИЖТ ИрГУПС (г. Красноярск, 25-27 ноября 2020 г.). Т. 2 / редкол.: В. С. Ратушняк (отв. ред.) [и др.]. – Красноярск: КРИЖТ ИрГУПС, 2020. – С. 61-64.
8. Технический каталог электродвигателей [Электронный ресурс] / ООО ЭДС, 2012-2020. – Режим доступа: [https://www.eds-msk.ru/index.php?site\\_page=motors](https://www.eds-msk.ru/index.php?site_page=motors) (дата обращения: 21.12.2020).
9. ГОСТ 10242-81 (СТ СЭВ 312-76, СТ СЭВ 644-77). Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые реечные. Допуски [Электронный ресурс] / GostExpert.ru – единая база ГОСТов РФ. – Режим доступа: <https://gostexpert.ru/gost/gost-10242-81> (дата обращения: 01.04.2021).
10. ГОСТ 12139-84 (СТ СЭВ 4434-83). Машины электрические вращающиеся. Ряды номинальных мощностей, напряжений и частот / GostExpert.ru – единая база ГОСТов РФ. – Режим доступа: <https://gostexpert.ru/gost/gost-12139-84> (дата обращения: 01.04.2021).