Иванов С. Н., Дадынский А. А., Дацко К. Д., Клеменко В. К.
S. N. Ivanov, A. A. Dadynsky, K. D. Datsko, V. K. Klemenko

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ С ЛИНЕЙНЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

EFFICIENCY ANALYSIS OF ELECTROMECHANICAL DRIVES WITH EXECUTIVE ELEMENT LINEAR MOVEMENT

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.

Mr. Sergey N. Ivanov – Dr. hab. of Engineering, Professor, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

Дадынский Алексей Алексеевич – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mr. Aleksey A. Dadynsky – a student, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Дацко Константин Дмитриевич – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mr. Konstantin D. Datsko – a student, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Клеменко Владимир Константинович – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mr. Vladimir K. Klemenko – a student, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Аннотация. В статье приведён анализ и рассмотрены основы оценки эффективности электромеханических преобразователей с линейным перемещением исполнительного элемента в сравнении с традиционными (пневматическими, гидравлическими и т. д.) линейными приводами. Приведены результаты расчёта теоретических тяговых усилий, обеспечиваемых рассматриваемыми устройствами. Дано краткое описание существующих конструкций. Обоснован выбор ограничивающих факторов применительно к объекту исследования. Рассмотрена физическая реализация преобразователя и приведены рекомендации по его проектированию и эксплуатации. Установлены основные критерии функциональной эффективности и проведён структурный анализ рассматриваемого привода с целью выделения стандартных элементов для выбора адаптированных методик и последующего использования при проектировании. В частности, синтез механизма линейного перемещения может быть проведён на основе известных в машиностроении подходов. В статье показано, что данный класс устройств может проектироваться и исследоваться на основе классического электромеханического преобразователя переменного тока (ЭМПЛП). Определены основные этапы разработки и установлены соответствия между техническими характеристиками базовых электромеханических преобразователей и выходными параметрами ЭМПЛП.

Summary. The article analyzes and discusses the basics of evaluating the efficiency of electromechanical drives with the executive linear movement in comparison with traditional (pneumatic, hydraulic, etc.) linear drives. The results of the calculation of the theoretical traction forces provided by the considered devices are given. A brief

description of the existing structures is presented. The choice of limiting factors in relation to the object of study is substantiated. The physical implementation of the converter is considered and recommendations for its design and operation are given. The main criteria of functional efficiency are established and a structural analysis of the considered drive is carried out with the aim of identifying standard elements for the selection of adapted techniques and subsequent use in the design. In particular, the synthesis of the linear displacement mechanism can be carried out based on approaches known in mechanical engineering. The article shows that this class of devices can be designed and investigated on the basis of the classical electromechanical converter of alternating current (EMPLP). The main stages of development and determination of the correspondence between the technical characteristics of the basic electromechanical transducers and the output parameters of the EMPLP are determined.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, приводной механизм, тяговые характеристики.

Key words: electromechanical converter, drive mechanism, traction characteristics.

УДК 621.31: 621.25

Введение

Одним из структурных элементов современных технических комплексов, применяемых в различных сферах человеческой деятельности, традиционно составляют приводы, использующие электромеханические преобразователи.

В табл. 1 показаны области применения приводов и приведено сравнение некоторых характеристик существующих приводов.

Таблица 1

Области применения и характеристики приводов линейного перемещения

Вид привода	Области применения	Достоинства	Недостатки
Грузовой	Возвратные механизмы	Автономность; электро- и пожаробезопасность; отсутствие специальных источников энергии	Низкие динамические и регулировочные характеристики
Пружинный	Электротехнические изделия	Электро- и пожаробезопасность; отсутствие специальных источников энергии, простота конструкции	Усталость материала пружин; невысокое быстродействие
Тепловой	Системы автоматики и защиты	Простота конструкции; не требуется первичный источник электрической энергии; пожаро- и электробезопасность; автономность;	Старение исполнительного элемента; низкая чувствительность и быстродействие
Пневматический	Промышленное оборудование, транспорт	Относительная простота конструкции исполнительного механизма и его технического обслуживания; пожаро- и взрывобезопасность; широкий диапазон рабочих температур; возможность эксплуатации в условиях загрязнённой среды; высокое быстродействие; отсутствие необходимости в защитных устройствах от перегрузки давлением; безопасность	Высокая стоимость пневмоэнергии; относительно большой вес и габариты; нестабильность скорости перемещения; высокий уровень шума; низкая скорость передачи сигнала

Продолжение таблицы 1

Вид привода	Области применения	Достоинства	Недостатки
Гидравлический	Горнодобывающая промышленность; машиностроение; авиационная и автомобильная промышленность	Способность развивать очень большое усилие при низких размерных соотношениях; возможность удалённости от насосной станции; низкое время развития усилия; плавная регулировка; широкий температурный диапазон; высокий КПД	Возможность утечки рабочей жидкости, особенно при высоком давлении; большие потери мощности при большой протяжённости; высокая температурная зависимость; высокая стоимость оборудования и его техобслуживания; постоянное потребление энергии; структурная сложность
Электромагнитный	Электрические аппараты; технологическое оборудование; охранные комплексы	Простота конструкции и эксплуатации; высокая надёжность; высокая совместимость; возможность самовосстановления исходного состояния	Большое время включения для мощных нагрузок; высокое потребление энергии
Электромеханический	Промышленное оборудование; транспорт; коммунальное хозяйство; бытовая техника	Структурная простота конструкции всей системы; высокие регулировочные характеристики; возможность полной автоматизации; низкий уровень шума и вибрации; экологичность	Сложность применения в пожароопасных зонах, взрывоопасных средах и при повышенной влажности защищённого привода исполнения; относительно высокая стоимость; возможность перегрева при длительной работе с перегрузкой; создание электромагнитных помех

Большинство из приведённых в табл. 1 видов приводов обеспечивает линейное перемещение исполнительного механизма. Такие приводы находят применение практически во всех технических системах: от механизма стеклоподъёмника автомобиля до установок перемещения уникальных зданий и сооружений. Сравнение характеристик приводов различного типа показывает, что наиболее эффективным по большинству показателей является электромеханический привод, поскольку именно он имеет наиболее широкий диапазон регулирования и максимально адаптирован для применения в автоматизированных комплексах. При этом, несмотря на очевидную целесообразность конструктивного исполнения рассматриваемого приводного устройства линейного перемещения, проектируемого на основе классического электромеханического преобразователя переменного тока (ЭМПЛП), в научно-технической литературе отсутствует не только количественный анализ технико-экономических показателей таких приводов по сравнению с традиционными (пневматическими, гидравлическими и т. д.), но и даже примеры возможного использования аналогичных конструкторских решений, что подтверждает актуальность их исследования и разработки.

Постановка задачи исследования

Начальным этапом исследования является установление основных критериев функциональной эффективности и проведение структурного анализа рассматриваемого привода с целью выделения стандартных элементов для выбора адаптированных методик их последующего использования при проектировании. В частности, синтез механизма линейного перемещения может быть проведён на основе известных в машиностроении подходов [1; 2].

Следующим этапом является установление соответствия техническими характеристиками базовых электромеханических преобразователей и выходными параметрами ЭМПЛП и разработка инженерной методики. В табл. 2 приведены расчётные (без учёта потерь в винтовом сопряжении)

характеристики электромеханических преобразователей с линейным перемещением исполнительного механизма на базе энергосберегающих асинхронных двигателей серии 7AVE.

Таблица 2

Расчётные характеристики электромеханических преобразователей с линейным перемещением исполнительного механизма

$P_{2н}$, кВт	V , м/с	F_p , кН		$P_{2н}$, кВт	V , м/с	F_p , кН		$P_{2н}$, кВт	V , м/с	F_p , кН
2p=2				2p=4				2p=6		
4	0,02	220		8	0,02	400		4	0,04	42,6
9	0,05	180		11,2	0,04	280		7	0,06	60,4
12	0,08	150		12,5	0,06	210		11	0,083	132,53
15	0,2	75		15	0,125	120		15	0,083	180,72
18,5	0,2	92,5		18,5	0,125	148		18,5	0,092	201,1
22	0,25	88		22	0,1375	160		22	0,092	239,13
30	0,25	120		30	0,1375	218,2		30	0,092	326,1
37	0,275	134,54		37	0,1375	269,1		37	0,1	370
45	0,275	163,64		45	0,1375	327,3		45	0,1	450
48	1	48		68,5	1	68,5		75	1	75
48	2	22		81,5	2	40,7		87,5	2	43,75
50,5	3	16,8		97,5	3	32,5		105	3	35
52,8	4	13,2		106,7	4	26,6		110	4	27,5
60	5	12		116	5	23,2		118,7	5	23,75
65	6	10,8		118,3	6	19,7		120	6	20

На рис. 1 показаны результаты аппроксимации расчётных данных с использованием пакета Statistica 12. Анализ расчётных данных показывает, что развиваемые ЭМПЛП удельные тяговые характеристики существенно превышают аналогичные параметры традиционных пневматических и гидравлических приводов.

Общее техническое решение электромеханического преобразователя с линейным перемещением исполнительного элемента показано на рис. 2 и подробно описано в работе [3]. Согласно рис. 2 показан привод с линейным перемещением исполнительного элемента на базе электромеханического преобразователя, состоящего из магнитопровода с размещённой на нём сетевой обмоткой 1, отделённой воздушным зазором 2 от вращающейся короткозамкнутой вторичной обмотки 3, на внутренней поверхности которой нанесена резьба, посредством которой перемещается вал 4. Такое устройство конструктивно объединяет приводной и исполнительный механизмы, что позволяет исключить дополнительное передаточное устройство и, соответственно, повышает эффективность привода.

Критериями работоспособности механизма линейного перемещения ЭМПЛП являются прочность элементов резьбовой части ротора и тяги, а также устойчивость тяги при продольных изгибающих усилиях в случаях нагружения изгибающими и растягивающими силами. Методика проектирования предусматривает проверочный расчёт, позволяющий определить и обеспечить параметры механизма линейного перемещения, соответствующие заданным критериям при заданных размерных соотношениях базового двигателя. Исходными данными для выполнения проектного расчёта дополнительно являются величина наибольшего осевого перемещения тяги относительно ротора, наибольшая осевая нагрузка с учётом направления её приложения. В случае электромеханического привода должна быть задана линейная скорость перемещения тяги в осевом направлении при постоянной частоте вращения ротора и рекомендуемом шаге резьбы, зависящем от диаметра вала двигателя. Такие эксплуатационные требования к приводу, как, например, необходимость выполнения условия электромагнитного торможения, задаются дополнительно и учитываются отдельно.

а)

б)

в)

Рис. 1. Визуализация расчётных характеристик привода:

а – $2p=2$; б – $2p=44$; в – $2p=6$

Рис. 2. Электромеханический преобразователь с линейным перемещением

Теоретические основы исследования

Теоретической основой исследования критерия эффективности является известная в электромеханике модель обобщённого электромеханического преобразователя [4]. Учёт особенностей исследуемого электропривода сводится к дополнению математической модели модифицированным уравнением тяговой характеристики механизма линейного перемещения, полученной на основе методики, приведённой в работе [1]:

$$M_{\text{вр}} = 0,5 F_p d_2 \left(\frac{D_{\text{ср}}}{d_2} f + \text{tg}(\nu + \varphi) \right), \quad (1)$$

где $M_{\text{вр}}$ – вращающий момент на валу; d_2 – диаметр резьбовой части вала; $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр нарезанной части вращающегося ротора; f – коэффициент трения в резьбовом соединении; ν – угол подъёма резьбы; $\varphi = \arctg f_{\text{пр}}$; $f_{\text{пр}}$ – приведённый коэффициент трения с учётом угла профиля.

Уравнения обобщённого электромеханического преобразователя совместно с уравнением (1) позволяют определить тяговую характеристику электромеханического преобразователя с линейным перемещением исполнительного элемента при заданных параметрах базового двигателя.

Принимая в качестве известной в теории надёжности модели «слабейшего звена» резьбовое соединение комбинированного привода и проводя анализ механических передач в условиях скольжения, можно считать, что для тяги, на которую действует растягивающая нагрузка, также как и для нагрузок сжатия, превышающих 20...25 кН для приведённых длин не более 0,5 м, основным критерием работоспособности является скорость износа резьбового сопряжения. Эти вопросы могут быть исследованы при использовании подходов, используемых при решении аналогичных задач в машиностроении [1; 2].

На основе предложенного подхода на базе стандартного шестиполусного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 1,1 кВт спроектирован и испытан ЭМПЛП, а вид приводной установки показан на рис. 3.

На рис. 4 приведена зависимость тягового усилия исследуемого устройства. В качестве управляющих переменных использованы величины полезной мощности P_2 и скольжения s , управляемой – тяговое усилие F_p .

Рис. 3. Общий вид преобразователя

Рис. 4. Тяговая характеристика экспериментального электромеханического преобразователя с линейным перемещением исполнительного механизма

Заключение

В статье представлен анализ эффективности тяговых характеристик электромеханических приводов с линейным перемещением исполнительного элемента. Рассмотрены основные этапы проектирования на основе апробированных методик, используемых в машиностроительных и электромеханических расчётах. Полученные результаты являются основой для создания автоматизированных механизмов линейного перемещения и позиционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, М. Н. Детали машин / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. – М.: Высш. шк, 2008. – 408 с.
2. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя / В. И. Анурьев. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 1-3.
3. Пат. № 2 651 531 С1 Российская Федерация, МПК7 В61L 29/04. Автоматизированная пропускная система / О. С. Амосов [и др.]; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. ун-т. – № 2017113804; заявл. 20.04.2017; опубл. 19.04.2018. Бюл. № 11. – 2 с.
4. Уайт, Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. – М.: Энергия, 1964. – 528 с.