

## ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.313.62.83

Сарваров А.С., Омельченко Е.Я., Васильев А.Е., Белый А.В., Фомин Н.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Поставлена задача исследования механических и энергетических показателей модуля привода по системе «двигатель постоянного тока – волновой редуктор», применяемого в качестве базового при разработке современных конструкций антропоморфных роботов НПО «Андроидная техника». Исследования проводятся для уточнения технических характеристик волнового редуктора. Приведены кинематическая схема установки, технические данные коллекторных электродвигателей и редуктора. Выполнены исследования для расчета механических характеристик в системе двигатель – волновой редуктор на различных ступенях питающего напряжения. Построены механические характеристики в виде зависимости момента на валу двигателя от частоты вращения при различных статических нагрузках. Проведен расчет момента потерь в волновом редукторе от скорости вращения двигателя и получено математическое описание зависимости момента потерь от скорости вращения, что позволяет учесть свойства волнового редуктора при моделировании работы модулей привода по системе «двигатель постоянного тока – волновой редуктор».

**Ключевые слова:** мехатронный модуль привода, робототехнический комплекс, антропоморфный робот, электродвигатель, волновой редуктор, экспериментальная установка, механические характеристики, момент потерь редуктора.

## ВВЕДЕНИЕ

В одной из позиций указа президента РФ «О национальном центре развития технологий и базовых элементов робототехники» отмечается необходимость разработки эффективных компонентов робототехники российского производства и методического сопровождения испытаний робототехники и составных частей (модулей) робототехнических комплексов [1].

Базовым элементом современных робототехнических комплексов являются мехатронные модули, обеспечивающие выполнение заданных технологических функций, осуществляя движение по одной из управляемых координат. Из таких модулей, как из функциональных кубиков komponуются сложные системы модульной архитектуры. Одним из ключевых модулей мехатронной системы является **мехатронный модуль привода**. Основными типами приводов, применяемых в силовых модулях мехатронных систем, являются электрические, гидравлические и пневматические. Сравнительный анализ приводов мехатронных модулей, проведенный в [2], показывает преимущества электрического привода по многим показателям. На первый план выдвигаются такие показатели, как хорошая управляемость, высокий КПД и наилучшая массогабаритная эффективность. Все эти позиции являются предпочтительными для применения электропривода в мобильных робототехнических системах с автономным питанием.

На сегодняшний день в мехатронике применяются приводы нового поколения, такие как смартприводы (реализованы на базе двигателей с коммутирующей электроникой, с собственной управляющей электроникой, включая контроллеры скорости и движения, а также сетевые интерфейсы. В качестве базовых двигателей в мобильных робототехнических системах в большинстве случаев применяются коллекторные, шаговые и бесколлекторные электромагнитные двигатели мощностью от 0,1 до 530 Вт.

Наряду с электродвигателем в состав модуля привода входит передаточный механизм, который действует как интерфейс между приводом и физической системой, приводимой в движение. В качестве примера реализации в дальнейшем целесообразно рассмотреть мехатронные модули привода, входящие в состав современных конструкций антропоморфных роботов, разработанных и изготовленных в НПО «Андроидная техника». Модули привода в них состоят из электрического двигателя постоянного тока и волнового редуктора с высоким передаточным отношением. Мощность приводных электродвигателей в таких мехатронных модулях составляет несколько десятков и сотен ватт.

## ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

В настоящее время в теории электропривода нет достаточного опыта исследований работы высокоточных электроприводов с маломощными электродвигателями с волновыми редукторами. При разработке математического описания мехатронного модуля «двигатель постоянного тока – волновой редуктор» (ДПТ-ВР) возникла необходимость исследования механических и энергетических показателей данного модуля. Для уточнения математической модели мехатронного модуля ДПТ-ВР в НПО «Андроидная техника» были выполнены лабораторные исследования различных режимов работы мехатронного модуля. Кинематическая схема простейшей по конструкции установки для экспериментального определения характеристик модуля привода представлена на **рис. 1**.

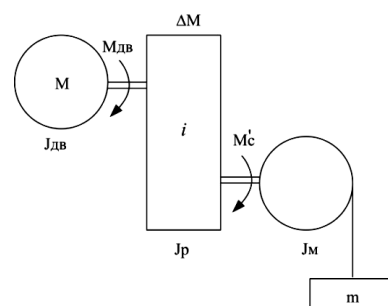


Рис. 1. Кинематическая схема установки

На рисунке введены следующие обозначения: М - испытуемый электродвигатель,  $i$  - волновой редуктор с соответствующим передаточным отношением и шкив с грузом массой  $m$ . При проведении исследований масса груза меняется в пределах перегрузочной способности двигателя.

В модулях исследуемых приводов применяются коллекторные электродвигатели постоянного тока типа RE35 мощностью 90 Вт и RE40 мощностью 150 Вт [3], технические данные которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические данные электродвигателей RE 35 и RE40

Параметр	RE 35	RE 40
Номинальное напряжение, В	48	48
Скорость холостого хода (хх), об/мин	7300	7590
Номинальная скорость $n_n$ , об/мин	6530	7000
Ток хх, мА	77,5	68,6
Номинальный ток, А	1,67	3,17
Ток пусковой, А	15,8	42,4
Момент номинальный, мНм	<b>99,4</b>	<b>187</b>
Момент пусковой, мНм	980	2560
КПД, %	86	92
Сопротивление ротора, Ом	3,05	1,13
Индуктивность ротора, мГн	0,87	0,329
Моментная постоянная $C_m$ , (ΔМ/ΔI) мНм/А	<b>62,2</b>	<b>60,3</b>
Скоростная постоянная $C_n$ , (Δn/ΔU), об/мин/В	154	158
Крутизна механической характеристики (Δn/ΔM), об/мин/мНм	7,52	2,97
Момент инерции $J_{дв}$ , гсм <sup>2</sup>	67,9	137

Экспериментальные исследования выполнялись с двигателем типа RE 35, мощностью 90 Вт в режимах подъема и опускания грузов с калиброванными грузами (массами 1,244, 3х1,244 и 10 кг) при различных величинах напряжения, подводимого к двигателю. При этом фиксировались значения величины якорного тока двигателя при установившейся скорости вращения. Результаты эксперимента представлены в табл. 2. Эксперимент проводился при отключенном редукторе (идельный холостой ход - ток  $I_0$ ), при присоединенном редукторе без груза (режим холостого хода - ток  $I_{хх}$ ), при подъеме и опускании грузов с различными массами при изменении напряжения питания двигателя от 5 до 48 В с дискретой 5 В.

В модуле привода применяется волновой редуктор типа CSG 2А с передаточным отношением  $i = 160$ , момент инерции редуктора  $J_p = 0,413 \times 10^{-4}$  кгм<sup>2</sup> и шкив с радиусом  $R_{ш} = 45$  мм.

Статический момент от нагрузки на выходном валу редуктора  $M'_c$  определяется величиной массы груза  $m$  [4]:

$$M'_c = mgR_{ш}, \quad (1)$$

где  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>.

Момент нагрузки, приведенный к валу электродвигателя, рассчитывается по формуле

$$M_c = M'_c / i, \quad (2)$$

где  $i = 160$  – передаточное отношение волнового редуктора.

Момент, развиваемый электродвигателем, зависит от величины якорного тока  $I$  и моментной постоянной двигателя  $C_m$ :

$$M_{дв} = C_m I. \quad (3)$$

Для известных значений якорного тока при необходимости можно рассчитать ЭДС двигателя по выражению

$$E = U - IR_a, \quad (4)$$

где  $R_a = 3,05$  Ом – сопротивление якорной цепи двигателя.

Соответствующая ЭДС скорость вращения двигателя ( $N$ , об/мин) рассчитывается по соотношению

$$N = C_n E. \quad (5)$$

Расчет ЭДС, скорости вращения и моментов двигателя проводился с учетом значений тока, полученных при изменении напряжения питания двигателя от 5 до 48 В с дискретой 5 В. Для расчета ЭДС и момента были использованы значения токов из табл. 2, полученные на основе экспериментов в системе «двигатель RE 35 – волновой редуктор CSG 2А». Для краткости представления в табл. 3 приведен фрагмент результатов расчетов для значений питающего напряжения 10,20 ... 40 и 48 В.

Полный массив полученных результатов использован в дальнейшем для построения механических характеристик системы «двигатель – волновой редуктор». При этом сразу необходимо отметить, что в теории электрических машин и электропривода [2] под механической характеристикой понимается зависимость частоты вращения от приложенного момента нагрузки  $N=F(M)$  при заданном значении питающего напряжения и постоянстве сопротивления цепи якоря и тока возбуждения (рис. 2). Для рассматриваемого случая под механической характеристикой системы «двигатель-волновой редуктор» понимается зависимость момента на валу двигателя от частоты вращения  $M=F(N)$ . При этом в системе частота вращения двигателя задается величиной подводимого напряжения питания, а момент статической нагрузки задается грузами различных масс. Такой подход позволяет исследовать свойства волнового редуктора при изменении частоты вращения.

Предварительный анализ характеристик позволяет сделать замечание о нелинейности механических характеристик системы «двигатель - волновой редуктор». Механические характеристики двигателя постоянного тока, как известно, имеют линейный характер. В этой связи можно в дальнейшем считать, что в данной системе нелинейность обусловлена свойствами волнового редуктора. Особо явное проявление нелинейности наблюдается в режиме холостого хода (характеристика 1).

Таблица 2

Результаты исследования системы «двигатель RE 35 – волновой редуктор»

Значения напряжения питания	Значения якорного тока двигателя при различных условиях работы и нагрузках				
	Холостой ход		Работа с массой, кг		
	без редуктора	с редуктором	1,244	3,732	10
$U, \text{В}$	$I_0, \text{А}$	$I_{xx}, \text{А}$	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$I_3, \text{А}$
5	0,045	1,1	1	1,08	1,2
10	0,045	1,73	1,32	1,41	1,6
15	0,045	2,05	1,53	1,6	1,82
20	0,045	2,3	1,72	1,8	2
25	0,045	2,24	1,84	1,96	2,15
30	0,045	2,0	1,95	2,1	2,31
35	0,045	2,1	1,95	2,13	2,36
40	0,045	2,07	1,9	2,18	2,32
48	0,045	2,0	1,97	2,2	2,4
-5	-0,045	-1,1	-0,92	-0,83	-0,57
-10	-0,045	-1,72	-1,2	-1,08	-0,81
-15	-0,045	-2,05	-1,42	-1,26	-1,0
-20	-0,045	-2,1	-1,62	-1,44	-1,14
-25	-0,045	-2,0	-1,73	-1,57	-1,32
-30	-0,045	-2,2	-1,87	-1,7	-1,4
-35	-0,045	-2,2	-1,85	-1,68	-1,4
-40	-0,045	-2,0	-1,8	-1,7	-1,36
-48	-0,045	-2,07	-1,9	-1,76	-1,47

Таблица 3

Фрагмент расчетных данных для построения механических характеристик

$U, \text{В}$	ЭДС двигателя				Частота вращения, об/мин				Момент на валу двигателя, мНм			
	$E_0$	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$M_{xx}$	$M_{c1}$	$M_{c2}$	$M_{c3}$
10	4,72	5,97	5,69	5,12	727	919	877	788	107	82	88	99
20	12,9	14,7	14,5	13,9	2000	2272	2234	2140	130	106	111	124
30	23,9	24,0	23,5	22,9	3680	3704	3633	3534	137	121	130	143
40	33,6	34,2	33,3	32,9	5187	5267	5136	5070	124	118	135	144
48	41,9	41,9	41,2	40,6	6452	6466	6358	6264	128	118	136	149

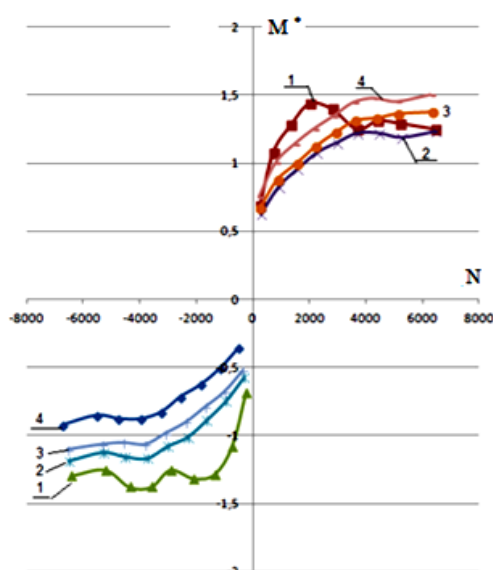


Рис. 2. Механические характеристики  $M^*=f(N)$ : 1 - холостой ход редуктора; 2 – работа с грузом массой 1,244 кг; 3 – работа с грузом массой 3,732 кг; 4 – работа с грузом массой 10 кг

Для удобства сравнения и большей наглядности механические характеристики целесообразно представить в относительных единицах (табл. 4). При этом в качестве базовых величин приняты номинальная частота вращения двигателя  $N_n$  и номинальный момент  $M_n$ , значения которых приведены в табл. 1.

Поскольку реальный режим работы мехатронного модуля невозможен без статической нагрузки на выходном валу редуктора, то в дальнейшем будем рассматривать только режимы работы с нагрузкой.

На рис. 3 представлены механические характеристики в относительных величинах, соответствующие режимам подъема (I квадрант) и спуска (II квадрант) груза.

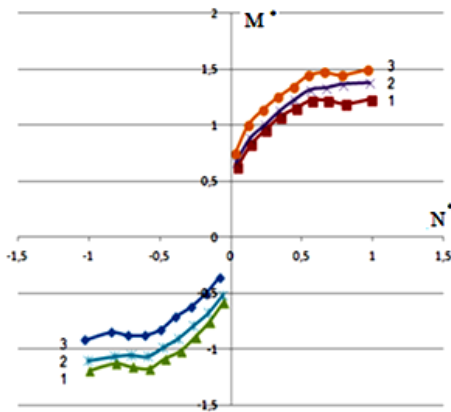


Рис. 3. Механические характеристики  $M^*=f(N^*)$ :  
1 – работа с грузом массой 1,244 кг;  
2 – работа с грузом массой 3,732 кг;  
3 – работа с грузом массой 10 кг

Как видно из рис. 3, зависимости момента от скорости вращения двигателя являются нелинейными и сходятся при понижении скорости.

В дальнейшем, если из величины момента, развиваемого двигателем, вычесть момент, обусловленный весом груза, то можно рассчитать момент потерь  $\Delta M_n$  непосредственно в самом редукторе. Результаты расчетов момента потерь при соответствующих значениях скорости вращения представлены в табл. 5.

Зависимости момента потерь от скорости вращения двигателя представлены на рис. 4, откуда видно, что момент потерь в редукторе превышает величину номинального момента при работе под нагрузкой; характеристики при работе с грузом массами 1,224, 3,732 и 10 кг, практически совпадают (отличие можно объяснить погрешностью измерений).

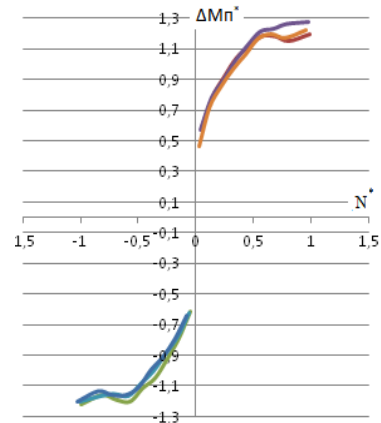


Рис. 4. Зависимости момента потерь от скорости потерь  $\Delta M_n^*=f(N^*)$

Таблица 4

Механические параметры в относительных величинах

$U, \text{В}$	$N_0^*, \text{oe}$	$M_{xx}, \text{oe}$	$N_1^*, \text{oe}$	$M_{c1}, \text{oe}$	$N_2^*, \text{oe}$	$M_{c2}, \text{oe}$	$N_3^*, \text{oe}$	$M_{c3}, \text{oe}$
5	0,03879	0,68833	0,04598	0,62575	0,04023	0,67581	0,03160	0,75090
10	0,11139	1,08255	0,14088	0,82599	0,13441	0,88231	0,12074	1,00120
15	0,20629	1,28279	0,2437	0,95740	0,23866	1,00120	0,22284	1,13887
20	0,30623	1,43923	0,34795	1,07629	0,34219	1,12635	0,32781	1,25150
25	0,42846	1,40169	0,45723	1,15138	0,44860	1,22647	0,43493	1,34537
30	0,56364	1,25150	0,56724	1,22022	0,55645	1,31408	0,54134	1,44549
35	0,67436	1,31408	0,68515	1,22022	0,67221	1,33285	0,65566	1,47678
40	0,79444	1,29531	0,80667	1,18893	0,78653	1,36414	0,77646	1,45175
48	0,98814	1,25150	0,99030	1,23273	0,97376	1,37666	0,95937	1,50181
-5	-0,0387	-0,6883	-0,0517	-0,5756	-0,0582	-0,5193	-0,0769	-0,3566
-10	-0,1121	-1,076	-0,1495	-0,7509	-0,1581	-0,6758	-0,1775	-0,5068
-15	-0,206	-1,282	-0,2516	-0,8885	-0,2631	-0,7884	-0,2818	-0,6257
-20	-0,3206	-1,3140	-0,3551	-1,0137	-0,3680	-0,9010	-0,3896	-0,7133
-25	-0,4457	-1,2515	-0,4651	-1,0825	-0,4766	-0,9824	-0,4946	-0,826
-30	-0,5492	-1,3766	-0,573	-1,1701	-0,5852	-1,0637	-0,606	-0,8760
-35	-0,6671	-1,3766	-0,6923	-1,1576	-0,7045	-1,0512	-0,7247	-0,8760
-40	-0,7994	-1,2515	-0,8138	-1,1263	-0,8210	-1,0637	-0,8455	-0,8510
-48	-0,9831	-1,2953	-0,9953	-1,1889	-1,0054	-1,1013	-1,0262	-0,9198

Таблица 5

Зависимости момента потерь от скорости вращения двигателя

$U, \text{В}$	$N_1^*$	$\Delta M_{п1}=M_{с1}-M_{г1}$	$N_2^*$	$\Delta M_{п2}=M_{с2}-M_{г2}$	$N_3^*$	$\Delta M_{п3}=M_{с3}-M_{г3}$
5	0,0460	0,5912	0,0402	0,5722	0,0316	0,4685
10	0,1409	0,7915	0,1344	0,7787	0,1207	0,7188
15	0,2437	0,9229	0,2387	0,8976	0,2228	0,8565
20	0,3480	1,0418	0,3422	1,0228	0,3278	0,9691
25	0,4572	1,1169	0,4486	1,1229	0,4349	1,0630
30	0,5672	1,1857	0,5565	1,2105	0,5413	1,1631
35	0,6852	1,1857	0,6722	1,2293	0,6557	1,1944
40	0,8067	1,1544	0,7865	1,2606	0,7765	1,1694
48	0,9903	1,1982	0,9738	1,2731	0,9594	1,2194
-5	-0,0517	-0,6102	-0,0582	-0,6230	-0,0769	-0,6391
-10	-0,1495	-0,7854	-0,1582	-0,7794	-0,1776	-0,7892
-15	-0,2516	-0,9231	-0,2631	-0,8920	-0,2818	-0,9081
-20	-0,3551	-1,0483	-0,3681	-1,0047	-0,3897	-0,9957
-25	-0,4651	-1,1171	-0,4767	-1,0860	-0,4946	-1,1084
-30	-0,5730	-1,2047	-0,5852	-1,1674	-0,6068	-1,1584
-35	-0,6924	-1,1922	-0,7046	-1,1549	-0,7247	-1,1584
-40	-0,8139	-1,1609	-0,8211	-1,1674	-0,8455	-1,1334
-48	-0,9953	-1,2235	-1,0054	-1,2049	-1,0263	-1,2022

Зависимость момента потерь от скорости вращения может быть представлена следующей формулой:

$$\Delta M_{п}^* = \text{sign}(N^*) \times \times [M_0^* + M_1^* \cdot (1 - \exp(\text{abs}(N^*)/T))], \quad (6)$$

где  $M_0^*$  – относительная величина момента потерь при скорости, равной нулю;  $M_1^*$  – относительная величина момента потерь, дополняющая потери до установившегося значения скорости;  $N^*$  – относительное значение скорости.

Для механических характеристик момента потерь, представленных на **рис. 4**, формула (1) может быть представлена зависимостью

$$\Delta M_{п}^* = \text{sign}(N^*) \times \times [0,5 + 0,8(1 - \exp(\text{abs}(N^*)/0,3))] \quad (7)$$

На **рис. 5** представлены характеристики экспериментальные и рассчитанные по формуле (2) при работе под нагрузкой.

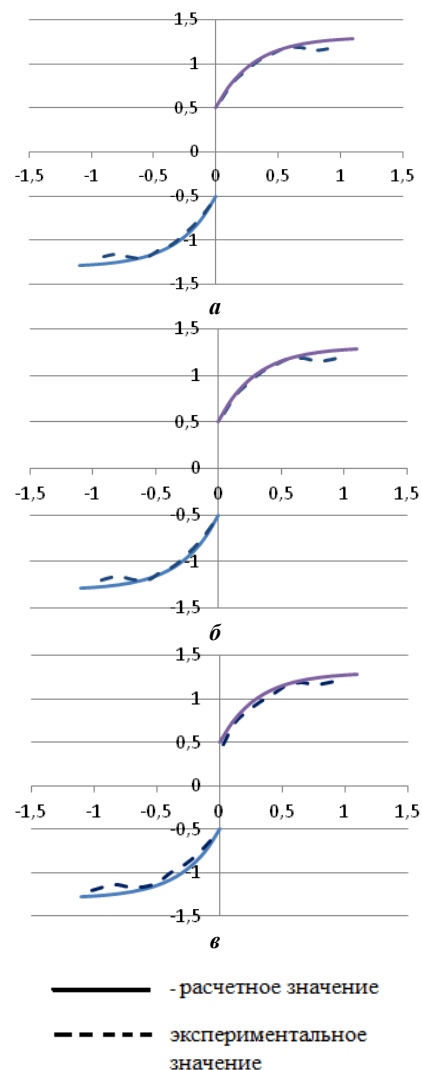
Как видно из **рис. 5**, представленная математическая зависимость (2) с достаточной точностью описывает характеристики момента потерь в редукторе при работе под нагрузкой и может быть использована при моделировании работы редуктора в мехатронном модуле «двигатель постоянного тока - волновой редуктор».

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Момент на валу двигателя в системе «двигатель - волновой редуктор» существенно зависит от скорости вращения двигателя и не зависит от величины момента, обусловленного статической нагрузкой.

Энергетические характеристики волнового редуктора крайне низки (момент потерь в редукторе превышает величину номинального момента электродвигателя примерно в 1,2 раза при работе на скоростях выше 0,5 от номинальной скорости двигателя).

Момент потерь в редукторе нелинейно зависит от



**Рис.5.** Сравнение экспериментальных и расчетных моментов потерь в редукторе: а – работа с грузом массой 1,244 кг; б – работа с грузом массой 3,732 кг; в – работа с грузом массой 10 кг

скорости вращения двигателя, а при работе без нагрузки момент сопротивления редуктора при изменении скорости имеет колебательный характер.

Получено математическое описание зависимости момента потерь от скорости вращения, что позволяет учесть свойства волнового редуктора при моделировании работы модулей привода по системе «двигатель постоянного тока - волновой редуктор».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента РФ от 16.12.2015 № 623 «О Национальном центре развития технологий и базовых элементов робототехники». М., 2015.
2. Сравнительный анализ приводов мехатронных систем / А.С. Сарваров, А.Е. Васильев, К.В. Даниленко, Е.В. Меньшикова // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №4(25). С.21-25.
3. Программа 2012/13. Высокоточные приводы и системы // Каталог фирмы «Максон».
4. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода : учеб. пособие. М.: МЭИ, 2003. 220 с.

#### INFORMATION IN ENGLISH

#### ANALYSIS OF OPERATION OF ELECTRIC DRIVE OF ROBOTIC SYSTEM MECHATRONIC MODULE

Sarvarov A.S., Omelchenko E.Ya., Vasilyev A.E., Belyi A.V., Fomin N.V.

The main task of the research work was to analyze mechanical and energy characteristics of the electric drive module constructed according to the scheme «direct current motor – harmonic drive», which is used as a basic unit in the process of modern anthropomorphic robots design at the scientific-production association «Android Engineering». The research work was carried out to specify the technical characteristics of the harmonic drive. The kinematic chain of the unit, technical information about the commutator motors and the harmonic drive are given in the article. The research group performed calculations of mechanical characteristics in the system motor-harmonic drive for different levels of supply voltage. The authors determined mechanical characteristics as a relationship between the torque on the motor shaft and the rotational velocity for different static loads. They also calculated the torque losses in the harmonic drive depending on the rotational velocity of the motor and offered mathematical description of the relationship between the torque losses and the rotational velocity, which makes it possible to take into account the characteristics of the harmonic drive in the process of simulation of operation of the drive modules constructed according to the scheme «direct current motor – harmonic drive».

**Keywords:** mechatronic drive module, robotic system, anthropomorphic robot, electric motor, harmonic drive, experimental facility, mechanical characteristics, torque losses of harmonic drive.

#### REFERENCES

1. Decree of the President of the Russian Federation signed on 16.12.2015 № 623 «Concerning the National center of technology and robotic system elements development», Moscow, 2015.
2. Sarvarov A.S., Vasilyev A.E., Danilenko K.V., Menshikova E.V. *Sravnitelnyi analiz privodov mekhatronnykh sistem* [Comparative Analysis of Drives for Mechatronic Systems], Electrotechnical systems and complexes, 2015, no.4(25), pp. 21-25.
3. Program 2012/13. High-precision drives and systems. «Makson» company catalogue.
4. Ilyinskiy N.F. *Osnovy elektroprivoda* [Fundamentals of Electric Drive], textbook, Moscow, MPEI, 2003, 220 p.

#### Информация о других журналах издательства

«Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова» – научный рецензируемый журнал, в котором публикуются результаты прогрессивных научных и проектных работ известных ученых, промышленников, молодых ученых России и зарубежья по широкому спектру исследований в области металлургии, машиностроения, металлообработки и в смежных отраслях. Тематика публикаций охватывает весь комплекс актуальных вопросов от разработки полезных ископаемых, получения чугуна, стали и проката до производства продукции с глубокой степенью переработки для различных отраслей экономики. Большое внимание в журнале уделяется современным тенденциям развития сырьевой базы, энергосбережения, автоматизации, экономики и экологии, стандартизации и управления качеством продукции, подготовки и обучения кадров в области металлургии, машиностроения и металлообработки.

Издается с 2003 г.

Журнал с 2007 года включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, а также в Базы данных ВИНТИ и РИНЦ.

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

В редакционный совет журнала входят авторитетные ученые из России, Японии, Индии, Италии, Польши, Южно-Африканской Республики, Казахстана.

Электронная версия журнала доступна:

- на информационном портале ФГБОУ ВПО «МГТУ» [www.magtu.ru](http://www.magtu.ru) (раздел «Журнал Вестник МГТУ»);
- на сайте журнала [www.vestnik.magtu.ru](http://www.vestnik.magtu.ru);
- на платформе eLIBRARY.