

УДК 621.833.6

Экспериментальное исследование коэффициента полезного действия интегрального волнового зубчатого механизма

В.Б. Тарабарин, З.И. Тарабарина

Двухдвигательный привод с интегральным волновым механизмом был разработан на кафедре «Теория механизмов» МГТУ им. Н.Э. Баумана для двухканальной следящей системы управления. Исследуемый механизм образован двумя волновыми передачами с внутренним деформированием и с дисковыми генераторами волн. Он обеспечивает алгебраическое суммирование мощностей двух двигателей на одном выходном валу. Описано экспериментальное исследование КПД привода и волнового зубчатого механизма.

Ключевые слова: двухканальные системы управления, интегральный волновой зубчатый механизм, экспериментальные исследования, КПД механизма.

Experimental investigation of the integral wave gear mechanism efficiency

V.B. Tarabarin, Z.I. Tarabarina

The twin drive with the integral wave mechanism for the dual-servo control system has been designed at the Bauman MSTU, the chair of TMM. The investigated mechanism is formed by two gears with internal deformation and the disk wave generator. It provides for an algebraic summation of two engines powers on one output shaft. The paper describes the experimental investigation of the drive gear and the wave gear mechanism efficiency.

Keywords: dual control system, integral wave gear mechanism, experimental investigation, mechanism efficiency.

Точность следящей системы управления определяется как способом управления, так и точностью всех элементов системы. Комбинированное двухканальное управление [1, 2] позволяет значительно повысить точность системы. В таких системах сигнал обычно делится на каналы «грубого и точного» управления. Основная разновидность данных схем управления — двухканальные следящие системы с силовым интегральным механизмом. Определяющее влияние на точность системы управления оказывает ее последнее звено: механическая система, преобразующая и суммирующая движения приводных двигателей на выходном валу. Обычно эти системы создавались на базе планетарных зубчатых передач с жесткими звеньями. Такие механизмы



ТАРАБАРИН
Валентин Борисович
кандидат технических наук, доцент



ТАРАБАРИНА
Зинаида Ивановна
старший преподаватель кафедры «Теория механизмов и машин» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
e-mail: konsvbt@mail.ru

имели большую массу и габариты, обладали большим моментом инерции, не обеспечивали необходимую точность. Разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана интегральный волновой зубчатый механизм с дисковыми генераторами волн [3—6] позволил существенно улучшить основные качественные показатели механической части привода. Необходимо отметить, что для механизмов с двумя подвижностями, которые суммируют движения двух двигателей на одном валу, часто используют термин «дифференциальный механизм» [7], который соответствует понятию «разделяющий механизм». В случае суммирования движений более подходит термин «интегральный механизм», который и используется далее. В предлагаемой статье описано экспериментальное исследование коэффициента полезного действия (КПД) привода и механизма с интегральной волновой зубчатой передачей.

Постановка задачи и описание объекта исследования. Цель данной статьи — изложить методику эксперимента по определению КПД интегрального волнового редуктора и привести его результаты [8].

Важной характеристикой любой технической системы является ее эффективность. Для систем передачи и преобразования механической энергии таким показателем является КПД — отношение работы сил полезного сопротивления на выходе системы к работе, затраченной на входе. Обычно используется среднее значение КПД, которое определяется за целое число циклов работы при установившемся движении. В этом случае отношение работ можно заменить отношением средних мощностей. Тогда для механизма с двумя степенями подвижности КПД можно записать в виде

$$\eta = \frac{A_{п.с}}{A_{д}} = \frac{N_{п.с}}{N_{д}} \approx \frac{M_{с3ср} d\varphi_3}{M_{д1ср} d\varphi_1 + M_{д2ср} d\varphi_2}, \quad (1)$$

где $A_{п.с}$ и $A_{д}$ — работа сил полезного сопротивления и работа движущих сил; $N_{п.с}$ и $N_{д}$ — средние мощности сил полезного сопротивления и движущих сил; φ_1 и φ_2 — углы поворота входных валов; φ_3 — угол поворота выходного вала; $M_{д1ср}$ и $M_{д2ср}$ — средние движущие моменты на вход-

ных валах; $M_{с3ср}$ — средний момент сопротивления на выходном валу.

Поскольку КПД в эксперименте измерить непосредственно невозможно, то его обычно рассчитывают косвенным методом. В эксперименте определяют моменты и угловые скорости, а КПД рассчитывают по формуле через средние мощности:

$$\eta \approx \frac{M_{с3ср} \omega_3}{M_{д1ср} \omega_1 + M_{д2ср} \omega_2}, \quad (2)$$

где ω_1 , ω_2 и ω_3 — угловые скорости входных валов и выходного вала.

Привод ВМ-1 (рис. 1) состоит из двух электродвигателей Д-600ТФ, двух тахогенераторов обратной связи ТГП-1 и интегрального волнового механизма. Вал центрального двигателя 1 соединен с валом генератора волн 15 сильфонной муфтой, а с валом тахогенератора 3 — конической прямозубой передачей 4 с передаточным отношением, равным единице. Вал двигателя 2 соединен с валом второго генератора волн и вторым тахогенератором 5 цилиндрическими косозубыми передачами 6 с общим передаточным отношением равным единице. Интегральный волновой механизм образован двумя волновыми зубчатыми передачами с дисковыми генераторами волн 7, 8 и гибкими колесами 9, 10, выполненными в виде тонкостенных стаканов. Одно из гибких колес 9 закреплено на корпусе 11, второе 10 — на выходном валу механизма 12. Зубчатые венцы жестких колес имеют внутренние зубья и нарезаны на одном кольце 13, которое установлено в корпусе на шарикоподшипниках. Выходной вал механизма 12 выполнен в форме стакана, охватывающего гибкое колесо 10. Он установлен в корпусе на двух подшипниках, таких же, на каких установлен блок жестких колес 13. Входные валы волновых передач 14 и 15 соосны, поэтому один из них выполнен со сквозным отверстием, а второй располагается внутри первого. Валы установлены на подшипниках в специальных стаканах. Один стакан закреплен на корпусе, второй — на выходном валу. Основные параметры исследуемого привода приведены в табл. 1.

Методика проведения эксперимента. Особенности конструкции интегрального волнового

Таблица 1

Основные параметры привода

Модуль в волновых передачах, мм	0,6
Передаточное отношение в волновых передачах	120
Номинальный момент на выходном валу, Н·м	200
Момент инерции в приведении к входным валам, кг·м ²	0,9·10 ⁻⁴
Люфт выходного вала, угл. мин	2,4'
Крутильная жесткость, Н·м/рад	6,3·10 ⁴
Габаритные размеры (с двигателями), мм	∅310×690
Масса, кг	65,6

механизма не позволяют провести эксперимент непосредственно по измерению КПД механизма. Поэтому определение КПД механизма проводилось в несколько этапов: на первом определялся общий КПД привода, затем КПД двигателей и по полученным результатам рассчитывался КПД механизма. КПД привода и механизма определялся для трех режимов работы: при работе одного двигателя (вначале первого, а потом второго) и при одновременной работе двух двигателей. Исследовалось влияние на КПД момента сопротивления на выходном валу механизма и частоты вращения валов двигателей. Общий КПД привода определялся как отношение мощности сил сопротивления на выходном валу N к электрической мощности P , расходуемой на питание двигателей. Расчет КПД привода рассчитывался по следующей зависимости:

$$\eta_{пр} = \frac{N_{пс}}{P} \approx \frac{M_{с3ср} \omega_3}{U_{я} I_{я} + U_{в} I_{в}}, \quad (3)$$

где P — электрическая мощность, потребляемая двигателями; $U_{я}$ и $U_{в}$ — напряжения на обмотке якоря и на обмотке возбуждения; $I_{я}$ и $I_{в}$ — ток в обмотке якоря и в обмотке возбуждения.

Схема экспериментальной установки для определения КПД привода представлена на рис. 2. Перед проведением эксперимента проводилась тарировка индикатора тормоза. С помощью рычага и грузов вал тормоза нагружался крутящим моментом $M_{кр}$. Момент изменялся от 20 до 100 Н·м с шагом 20 Н·м. Тарировочный

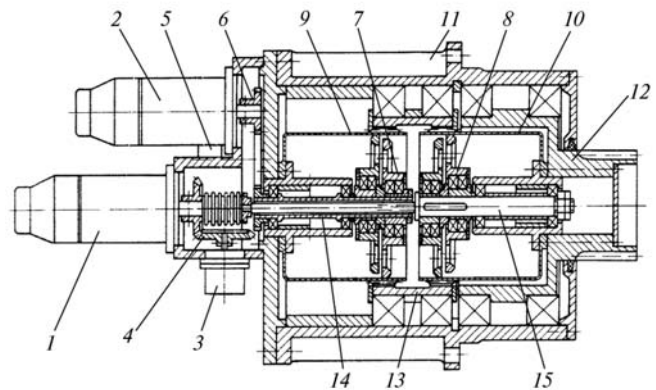
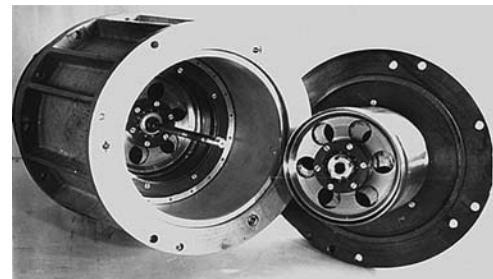
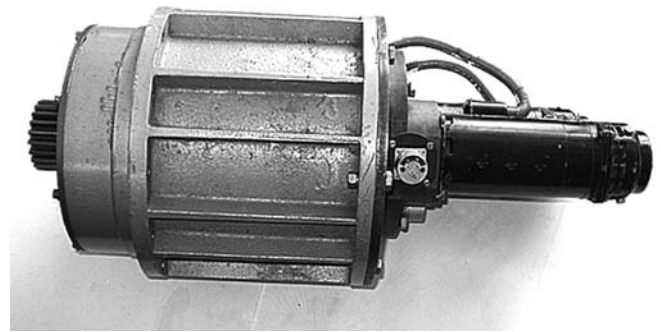


Рис. 1. Интегральный волновой механизм

график и фотография установки приведены на рис. 3.

Тарировка тахогенераторов проводилась с помощью стробоскопического тахометра СТ-5 в диапазоне от 0 до 9 000 об/мин. Тарировочные зависимости показаний вольтметра от частоты вращения приведены на рис. 4.

Эксперимент по определению КПД привода в зависимости от момента на выходном валу (при работе одного двигателя) проводился в такой последовательности:

1) вначале подавалось напряжение на обмотку возбуждения, а затем на обмотку якоря. Реостатом R1 устанавливалась заданная частота вращения вала двигателя (3 000 об/мин);

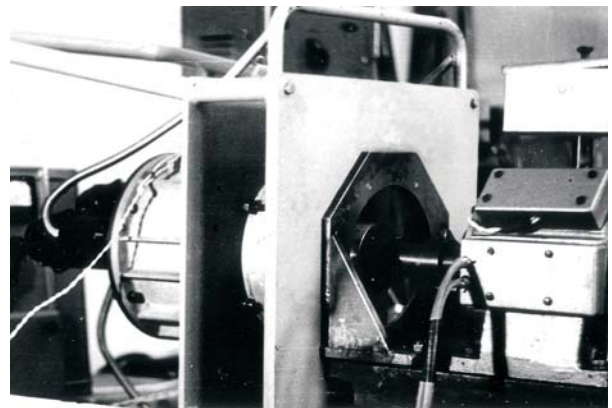
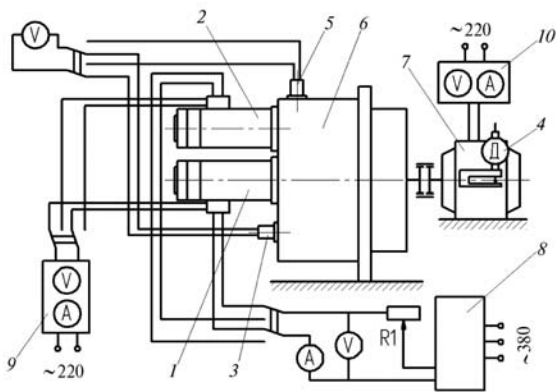


Рис. 2. Схема и фотография экспериментальной установки по определению КПД механизма:

1, 2 — двигатели постоянного тока с независимым возбуждением Д-600ТФ; 3, 5 — тахогенераторы ТГП-1; 4 — индикатор динамометра тормоза; 6 — интегральный волновой редуктор; 7 — электромагнитный порошок тормоз ПТ-16М; 8 — выпрямитель ВСА-6М; 9 — выпрямитель ВУ-42/72А; 10 — щит выпрямительный школьный; V — вольтметр; А — амперметр, R1 — реостат

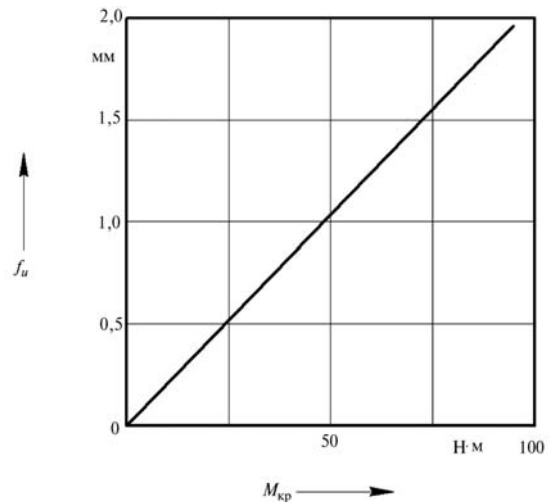
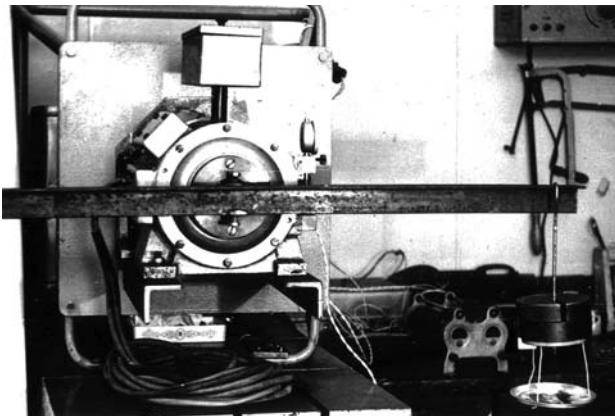


Рис. 3. Фотография установки для тарировки тормоза и тарировочная зависимость

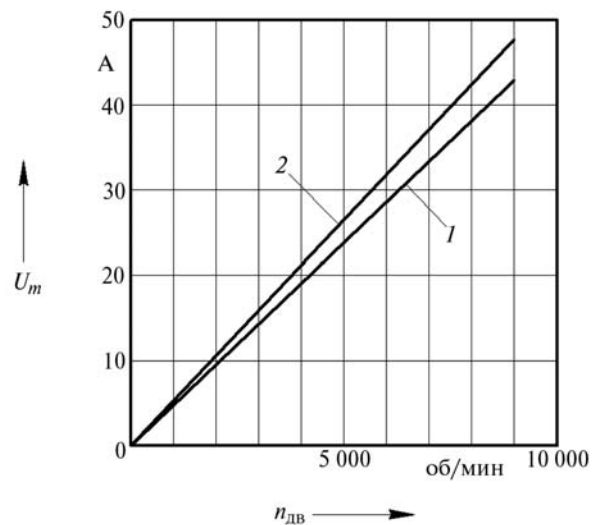


Рис. 4. Тарировочные зависимости для тахогенераторов:

1 — центральный двигатель; 2 — второй двигатель

2) включался тормоз и устанавливалось напряжение, соответствующее моменту нагрузки. Обороты вала двигателя, которые уменьшились при приложении нагрузки, увеличивались до заданного значения;

3) в журнале регистрировались показания вольтметров и амперметров в цепях якоря и возбуждения, напряжения на тахогенераторе и тормозе. При каждом значении нагрузки опыт повторялся 3 раза;

4) по средним значениям результатов опытов рассчитывался КПД привода и строилась зависимость КПД от момента нагрузки.

В эксперименте по определению КПД привода в зависимости от частоты вращения вала двигателя на постоянном уровне поддерживалась нагрузка ($M_{кр} = 50 \text{ Н}\cdot\text{м}$), а обороты изменялись от 1 000 до 8 000 об/мин с шагом 1 000 об/мин.

При работе двух двигателей они подключались к источнику питания параллельно и регулировались общим реостатом R1. Так как ток через реостат при этом сильно возрастал, то для двух двигателей эксперимент по определению зависимости КПД от нагрузки удалось провести только до момента $M_{кр} = 75 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Исследование зависимости КПД от частоты для двух двигателей не проводилось, так как используемое оборудование обеспечивало малый диапазон изменения частоты. Диаграммы зависимости КПД привода от нагрузки и частоты приведены на рис. 5.

Наша задача — определение КПД интегрального волнового механизма. КПД привода — это общий КПД, который включает потери в двигателе (электрические и механические) и потери в механизме. Так как двигатели с механизмом соединены последовательно, то КПД привода можно представить как произведение КПД двигателя и КПД механизма:

$$\eta_{пр} = \eta_m \eta_d, \quad (4)$$

где $\eta_{пр}$ — КПД привода; η_m — КПД механизма; η_d — КПД двигателя.

Чтобы определить КПД механизма, нужно для данного режима работы определить КПД двигателя и вычислить КПД механизма:

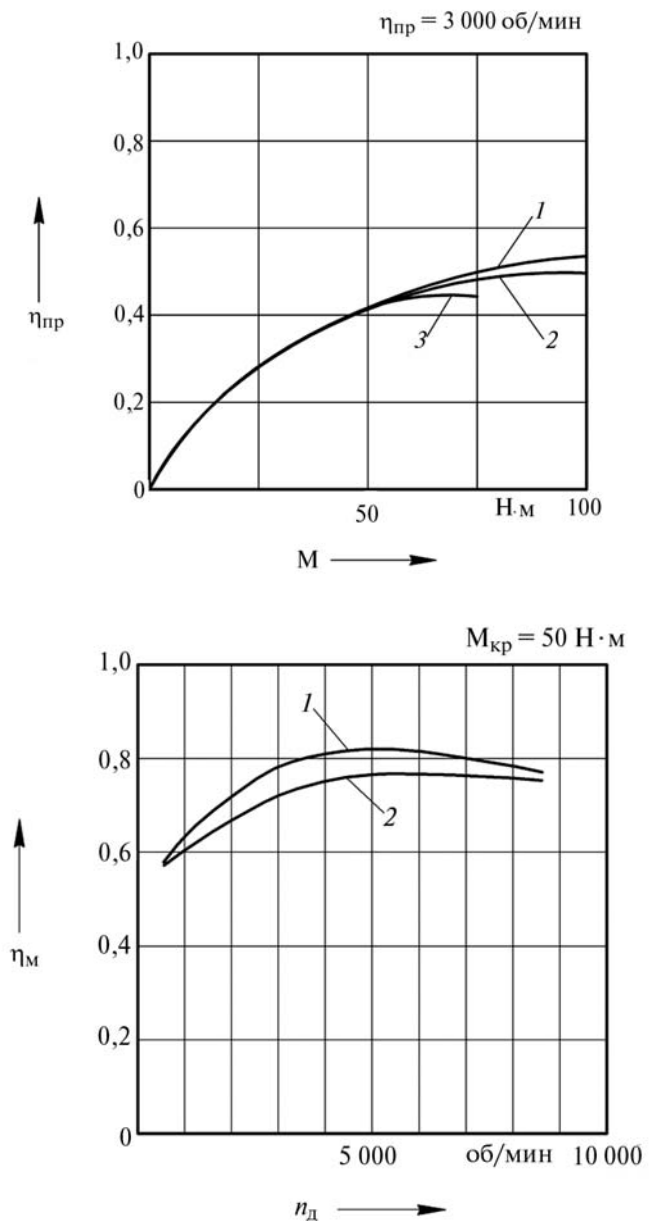


Рис. 5. Зависимости КПД привода от момента нагрузки на выходном валу и от частоты вращения входного вала:

1 — центральный двигатель; 2 — смещенный двигатель; 3 — два двигателя вместе

$$\eta_m = \frac{\eta_{пр}}{\eta_d}. \quad (5)$$

КПД двигателя определялся экспериментально на установке, схема которой приведена на рис. 6.

КПД двигателя по результатам эксперимента рассчитывался по следующей формуле:

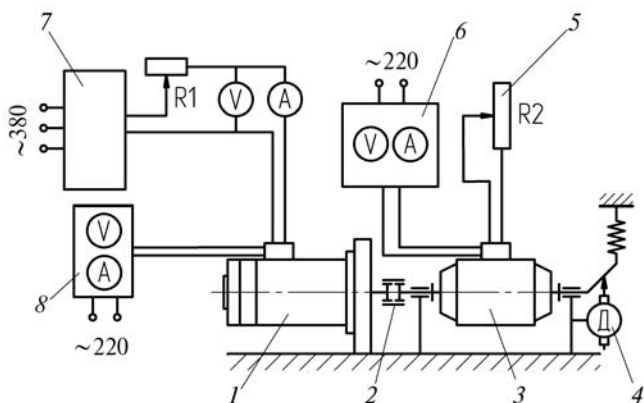


Рис. 6. Схема экспериментальной установки по определению КПД двигателя Д-600ТФ:

- 1 — двигатель Д-600ТФ; 2 — муфта; 3 — генератор постоянного тока с балансирным подвесом;
- 4 — динамометр; 5 — реостат; 6 — выпрямитель школьный; 7 — выпрямитель ВУ-42/70А;
- 8 — выпрямитель ВСА6-М

$$\eta_d = \frac{0,033\pi n_d l_n G_{дин}}{U_y I_y + U_b I_b}, \quad (6)$$

где n_d — частота вращения вала двигателя, об/мин; l_n — длина измерительного рычага, м; $G_{дин}$ — показания динамометра, Н.

Эксперимент по определению КПД двигателя в зависимости от тока якоря проводился в такой последовательности:

1) вначале подавалось напряжение на обмотку возбуждения, а затем на обмотку якоря. Реостатом R1 устанавливалась заданная частота вращения вала двигателя (3 000 об/мин), которая контролировалась по строботажному СТ-5;

2) подавалось напряжение на обмотку возбуждения и на обмотку якоря генератора и реостатом R2 устанавливалась величина тока якоря от 3 до 18 А с шагом 3 А. Обороты вала двигателя, которые уменьшились при приложении нагрузки, увеличивались до заданного значения;

3) в журнале регистрировались показания вольтметров и амперметров в цепях якоря и возбуждения, напряжения на тахогенераторе и сила на динамометре. При каждом значении тока якоря опыт повторялся 3 раза;

4) по средним значениям результатов опытов рассчитывался КПД двигателя и строилась зависимость КПД двигателя от тока якоря.

При среднем значении тока якоря $I_{я\text{ ср}} = (10 \pm 1)$ А (примерно соответствующему среднему крутящему моменту на выходном валу $M_{кр} = 50$ Н·м) проведено исследование зависимости КПД двигателя от частоты вращения его вала. Во всем диапазоне изменения частоты вращения n_d (от 1 000 до 9 000 об/мин) значение КПД двигателя оставалась примерно постоянным $\eta = 0,52 \pm 0,04$. Диаграммы зависимости КПД двигателя от тока якоря и частоты приведены на рис. 7.

Результаты эксперимента и их интерпретация.

По данным, полученным в экспериментах для КПД привода и двигателей, по формуле (5) был рассчитан КПД интегрального волнового механизма. Полученные результаты представлены на рис. 8 в виде зависимостей КПД механизма в функции момента нагрузки и КПД механизма в функции частоты вращения входного вала.

Анализ полученных зависимостей показал:

1) с увеличением нагрузки КПД механизма вначале резко возрастает от 0 до значений 0,7...0,75, затем рост замедляется и достигает максимума на границе зоны исследования (при 100 Н·м). Вероятно, что при дальнейшем увеличении нагрузки рост КПД продолжится;

2) при работе смещенного двигателя КПД механизма примерно на 5...10% меньше, чем при работе центрального. Это объясняется тем, что передача и преобразование потока мощности происходит последовательно в двух волновых зубчатых зацеплениях;

3) при работе двух двигателей КПД кривая 3 в большей части исследуемого диапазона располагается между кривыми 1 и 2 (см. рис. 8). Падение КПД в конце рассматриваемого интервала можно объяснить снижением точности измерений (значения измеряемых токов для используемой аппаратуры приближались к максимально допустимым);

4) с увеличением частоты вращения вала двигателя КПД механизма вначале плавно возрастает и достигает максимума при 5 000 об/мин. При дальнейшем увеличении частоты КПД несколько падает.

Выбранный метод исследования КПД нельзя признать оптимальным. Определение КПД механизма косвенным методом по результатам

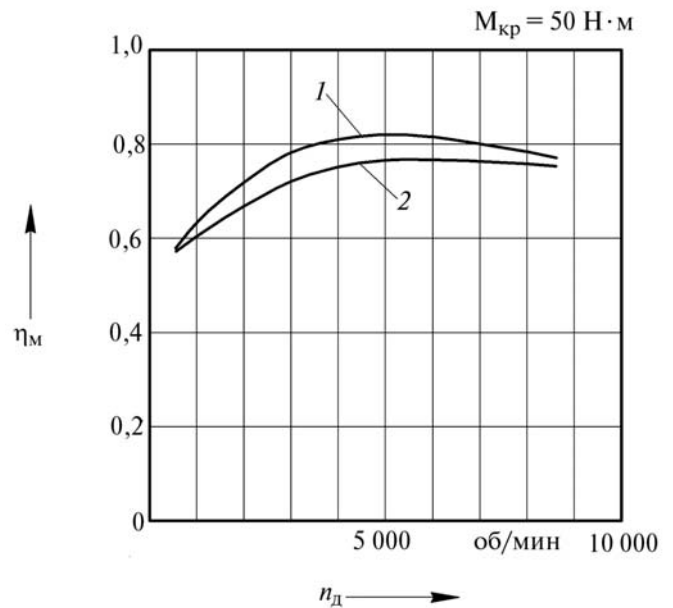
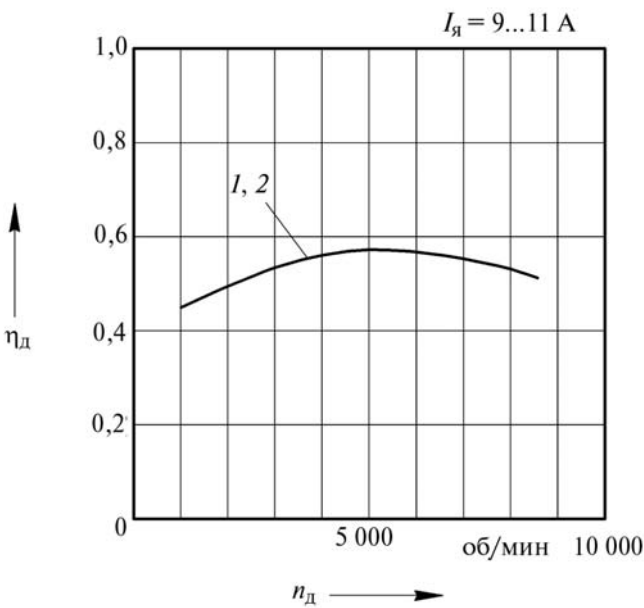
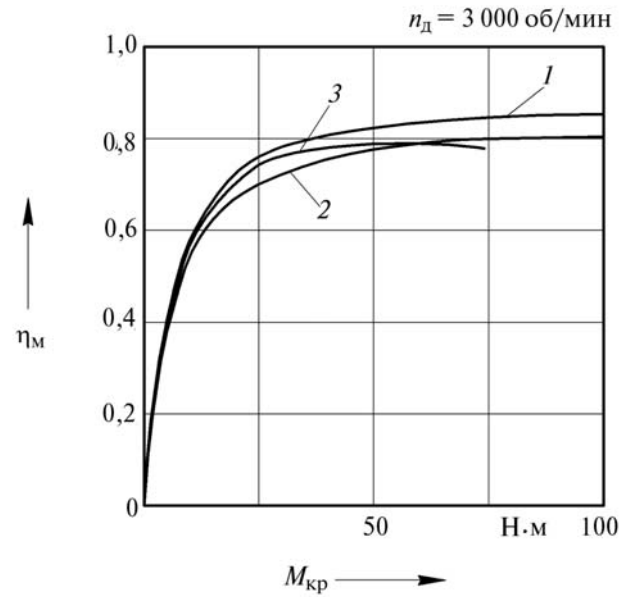
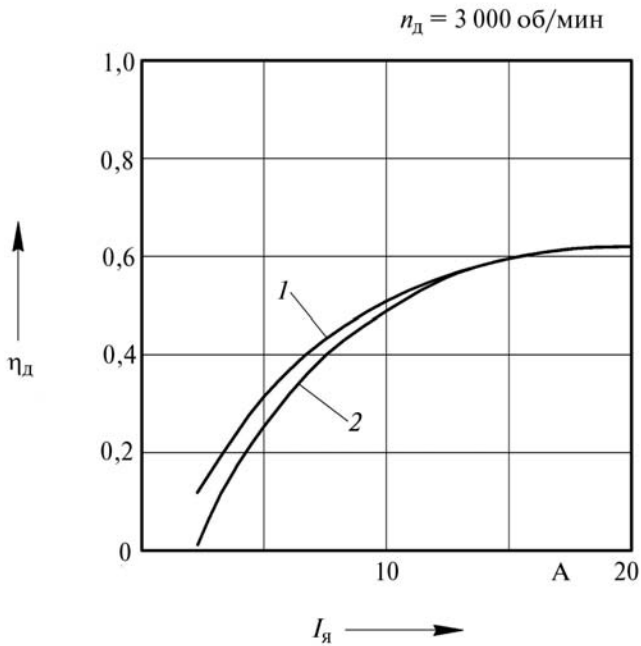


Рис. 7. Зависимости КПД двигателя Д-600ТФ от тока якоря и частоты вращения вала:
1 — центральный двигатель; 2 — смещенный двигатель

Рис. 8. Зависимости КПД интегрального волнового механизма от момента нагрузки на выходном валу и от частоты вращения входного вала:
1 — центральный двигатель; 2 — смещенный двигатель; 3 — два двигателя

двух экспериментов не может обеспечить высокой точности. Используемая в экспериментах измерительная аппаратура и регулирующие устройства не позволили выполнить запланированный эксперимент в полном объеме. Погрешность полученных результатов можно

оценить доверительным интервалом $\pm 5\%$. Однако, полученные результаты по значениям и характеру полученных зависимостей близки к результатам других исследователей волновых передач следящих приводов. Эти приводы проектируются по критериям жесткости и точно-

сти и обычно работают под нагрузками меньшими, чем допустимые по условиям прочности. Поэтому КПД механизмов этих приводов не достигает максимальных для волновых передач значений [9].

Литература

1. *Марголин Ш.М.* Дифференциальный электропривод. М.: Энергия, 1975. 168 с.
2. *Клубник П.Ф.* Объединенные следящие системы с двумя приводами // Автоматика и телемеханика. 1959. № 2. С. 161—175.
3. *Гавриленко В.А., Тарабарин В.Б.* Привод с дифференциальным волновым механизмом // Машины, приборы, стенды. № 6, Каталог разработок МВТУ. М.: МВТУ. 1978.
4. Разработка и экспериментальное исследование привода с дифференциальным волновым редуктором / П.И. Артамонов, В.М. Люляев, В.Б. Тарабарин и др. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехническая. 1976. № 11.
5. *Тарабарин В.Б.* Исследование волновых дифференциальных механизмов для следящих приводов. МВТУ им. Н.Э. Баумана. дисс. ... канд. техн. наук. М., 1976. 175 с.
6. *Тарабарин В.Б., Барбашов Н.Н.* Приводы с интегральными волновыми зубчатыми передачами // Сб. науч. тр. Вибрационные машины и технологии. Курск: Курск. гос. техн. ун-т. 2008.
7. *Tarabarin V., Tarabarina Z.* Alternative in Harmonic Train Design, Proceedings of EUCOMES 08 // The Second European Conference on Mechanism Science, editor Marco Ceccarelli, Springer, 2008.
8. Разработка дифференциального волнового редуктора (Привод ВМ-2) / В.А. Гавриленко, Н.А. Скворцова, В.Б. Тарабарин и др. Технический отчет по НИР, инв. № 73066034, МВТУ, Москва, 1976.
9. ГОСТ 30078.1—93. Межгосударственный стандарт. Передачи волновые. Общие технические требования. Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, Минск, 1993.

Статья поступила в редакцию 16.09.2012