

УДК 621.83

Результаты испытаний макетного образца передачи с бесконтактным зацеплением на основе постоянных магнитов

Д. С. Тарицын, Д. А. Орлов, А. И. Петухов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Тарицын Д. С., Орлов Д. А., Петухов А. И. Результаты испытаний макетного образца передачи с бесконтактным зацеплением на основе постоянных магнитов // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 706–717. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-706-717

Аннотация

Цель: в работе исследуются свойства коаксиальной магнитной передачи с постоянными магнитами и подмагничивающими обмотками. Выявляются зависимости КПД от частоты вращения и мощности нагрузки, а также зависимость максимального момента, предшествующего нарушению зацепления, от тока подмагничивания и частоты вращения. **Методы:** экспериментальное исследование на стенде путем нагрузки приводного двигателя через испытуемую передачу на генератор, работающий на резистор. Также описывается процесс исследования стенда, включающий определение потерь в испытательных электрических машинах методом отдельных потерь, а также установление соответствия частоты напряжения тахогенератора и частоты вращения приводного двигателя. **Результаты:** было установлено, что магнитная передача способна работать как в режиме редуктора, так и в режиме мультипликатора, при этом КПД в режиме редуктора в целом выше и в большей степени зависит от частоты вращения передачи, чем в режиме мультипликатора. Также можно сказать, что применение подмагничивания позволяет увеличить максимальный момент, отдаваемый нагрузке, но снижает КПД ввиду увеличения потерь в стали. **Практическая значимость:** результаты работы могут быть применены в машиностроении при проектировании нагруженных магнитных передач, работающих в режиме неравномерных нагрузок в приводах машин.

Ключевые слова: коаксиальная магнитная передача, редуктор, мультипликатор, постоянный магнит, коэффициент полезного действия, максимальный момент

Постановка задачи

Во многих современных устройствах применяются механические передачи (зубчатые, цепные, ременные), в которых движение передается за счет контактного взаимодействия звеньев. Из этого взаимодействия вытекает ряд недостатков, вызванных наличием трения: снижение КПД, износ, вибрация и шум.

Одним из возможных способов снизить потери и увеличить ресурс агрегата является применение магнитной передачи с бес-

контактным зацеплением (МПБЗ) на основе постоянных магнитов (рис. 1) [1, 2].

Однако у данной конструкции есть существенные ограничения по максимальному моменту, который можно получить на ведомом валу, обусловленные возможностями магнитного взаимодействия звеньев. В результате при работе МПБЗ в условиях резконравномерных нагрузок может потребоваться существенное увеличение размеров передачи для создания запаса по максимальному моменту, что также

повлечет повышенный расход материалов. Одним из возможных решений этой проблемы является использование подмагничивания (рис. 2) [2, 3].

Рассмотрим функционирование МПБЗ с подмагничиванием в режиме редуктора. Ротор (11) приводится во вращение приводным двигателем. Создаваемое постоянными магнитами ротора (5) поле с числом пар полюсов p_1 (на рис. $p_1 = 2$) взаимодействует через стальные сегменты (10) низкоскоростного ротора (модулятора) (8) с полем, создаваемым маг-

нитами (4) статора (2) с числом пар полюсов p_2 (на рис. $p_2 = 4$). При этом за счет взаимодействия магнитных полей ротора и статора с разным числом пар полюсов и модулятора с числом сегментов, равным половине суммарного числа полюсов статора и ротора на модуляторе, создается результирующее поле, частота вращения основной гармоники которого будет меньше частоты вращения поля ротора. Создаваемый этим полем электромагнитный момент заставляет модулятор вращаться сонаправленно с ротором

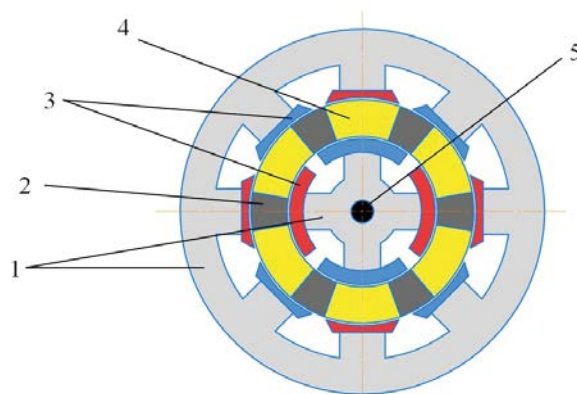


Рис. 1. Коаксиальная магнитная передача. 1 — сердечники; 2 — активные сегменты модулятора; 3 — постоянные магниты; 4 — немагнитный корпус модулятора; 5 — вал ротора

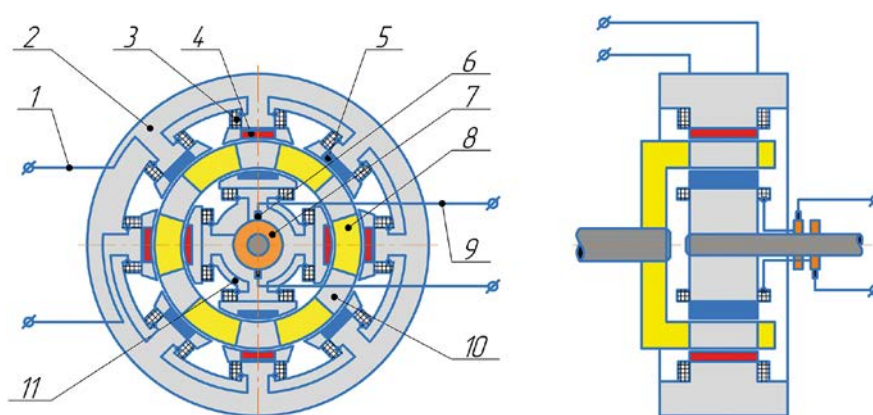


Рис. 2. МПБЗ с подмагничиванием. 1 — выводы обмотки статора; 2 — статор; 3 — обмотка статора; 4, 5 — постоянные магниты; 6 — щетки; 7 — контактные кольца; 8 — немагнитный корпус модулятора; 9 — выводы обмотки ротора; 10 — активные сегменты модулятора; 11 — ротор; 12 — обмотка ротора

без скольжения, но с меньшей скоростью. На валу модулятора создается момент, превосходящий момент приводного двигателя, но не выше максимального, определяемого силами магнитного взаимодействия. В случае разрыва магнитной связи между ротором и модулятором ротор необходимо будет остановить для восстановления зацепления. Для повышения максимального момента на ведомом валу без увеличения размеров передачи предусмотрены подмагничивающие обмотки: 12 на полюсах ротора и 3 на полюсах статора. При повышении момента нагрузки на ведомом валу подается напряжение на обмотки статора через выводы (1) и на обмотки ротора через контактные кольца (7), щетки (6) и выводы (9). Ток, протекающий по обмоткам, создает дополнительное магнитное поле, сонаправленное с полем постоянных магнитов и увеличивающее электромагнитный момент на валу модулятора.

Такое решение может использоваться в нагруженных приводах, где требуется компенсация периодически возникающих колебаний нагрузки. Возможности применения подмагничивания в МПБЗ ранее были теоретически обоснованы конечно-элементным расчетом магнитной системы передачи [2].

В отличие от электромагнитной муфты [4] предлагаемая схема МПБЗ позволяет осуществлять преобразование момента и угловой скорости входного вала, то есть выполнять функцию понижающего или повышающего редуктора. Как следует из описания, принцип действия магнитной передачи близок к принципу действия синхронной электрической машины, что определяет основные ее достоинства и недостатки. К первым, помимо возможности разъединения под нагрузкой, могут быть отнесены снижение механического износа и потерь на трение в зацеплении, снижение

потребности в смазке и затрат на техническое обслуживание. Важной особенностью магнитной передачи является наличие естественного ограничения момента на выходном валу, позволяющее обеспечить разгрузку двигателя при заклинивании механизма рабочей машины. Среди недостатков следует отметить наличие электрических и магнитных потерь в стали, особенно в ненормальных режимах.

Целями работы являются экспериментальная проверка возможностей подмагничивания в МПБЗ и сопоставление параметров работы передачи в подмагниченном и неподмагниченном режимах.

Конструктивные особенности макетного образца магнитной передачи

Для проведения экспериментальных исследований был сконструирован и изготовлен образец МПБЗ с подмагничиванием (рис. 3).

Магнитная система и вращающиеся элементы магнитной передачи смонтированы в сварном стальном корпусе (14). Горловины корпуса закрыты подшипниковыми щитами (6), в расточках которых установлены радиальные шариковые подшипники (20) с тихоходным валом (4) и быстроходным валом (5). Модулятор (12) выполнен в виде пластикового стакана, соединенного с тихоходным валом с помощью шпонки (18). В прорези модулятора уложены стальные сегменты (13), закрепленные шпильками (24) с гайками (23). Сердечники ротора (2) и статора (3) изготовлены из шихтованной стали 2411. Статор крепится к корпусу болтами (25), ротор крепится к валу с помощью шпонки (19) и поджимного винта (16) с шайбой (21). Контактные кольца (1) изготовлены из пластика с медными бандажами, на которые устанавливаются угольные

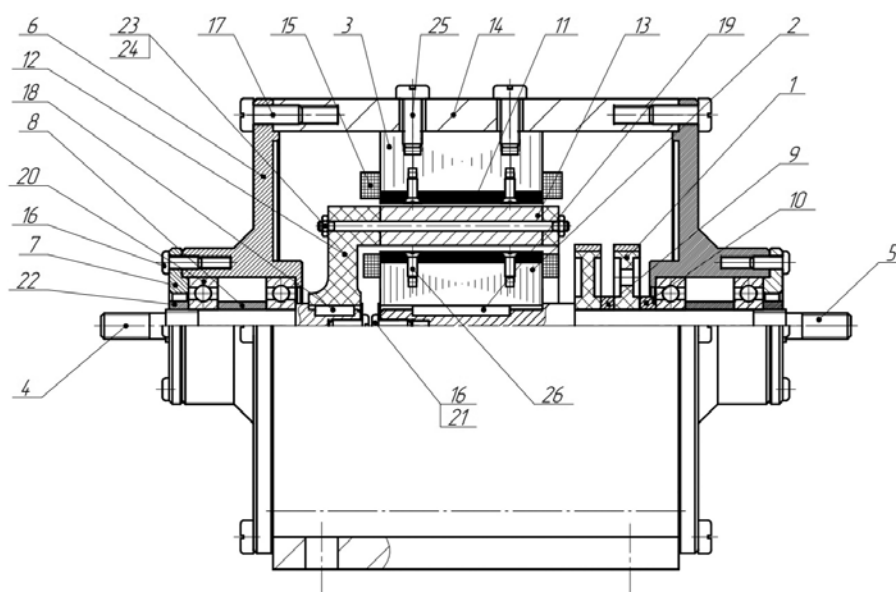


Рис. 3. Образец МПБЗ с подмагничиванием. 1 — контактное кольцо; 2 — сердечник ротора; 3 — сердечник статора; 4 — вал модулятора (тихоходный); 5 — вал ротора (быстроходный); 6 — подшипниковый щит; 7 — крышка подшипника; 8, 9, 10 — распорная втулка; 11 — постоянный магнит; 12 — модулятор; 13 — сегменты модулятора; 14 — корпус; 15 — обмотка; 16, 17, 26 — винт, 18, 19 — шпонка; 20 — подшипник; 21 — шайба; 22, 23 — гайка; 24 — шпилька; 25 — болт

щетки. Постоянные магниты (11) марки N38 крепятся к сердечникам потайными винтами (26). Обмотки (15) выполнены проводом ПЭТВ-2 с сечением 0,785 мм².

Методика испытаний

Для определения рабочих показателей изготовленного макетного образца магнитной передачи был разработан и изготовлен стенд (рис. 4), включающий:

- две однотипные электрические машины постоянного тока (МСА 45/64-148/ML2) (2) и (7) [5], одна из которых (Д) используется в качестве приводного двигателя, вторая (Г) работает в генераторном режиме и выполняет функцию нагрузки; энергия, вырабатываемая генератором, рассеивается на резисторе (9);

- тахогенераторы ТГд и ТГг, связанные с валами двигателя и генератора;

- регулируемые источники напряжения для питания цепей приводного двигателя и подмагничивающих обмоток ротора и статора;

- 8-канальный измерительный комплекс на базе многофункционального модуля сбора данных Advantech USB-4716 [6], обеспечивающий возможность регистрации измерительной информации.

Целью испытаний является определение зависимостей коэффициента полезного действия (КПД) передачи и максимального передаваемого момента от частоты вращения быстроходного звена и тока подмагничивающих обмоток.

КПД передачи определяется следующим образом:

$$\eta_{\text{пер}} = \frac{\eta_{\text{ст}}}{\eta_{\text{м-г}}}, \quad (1)$$

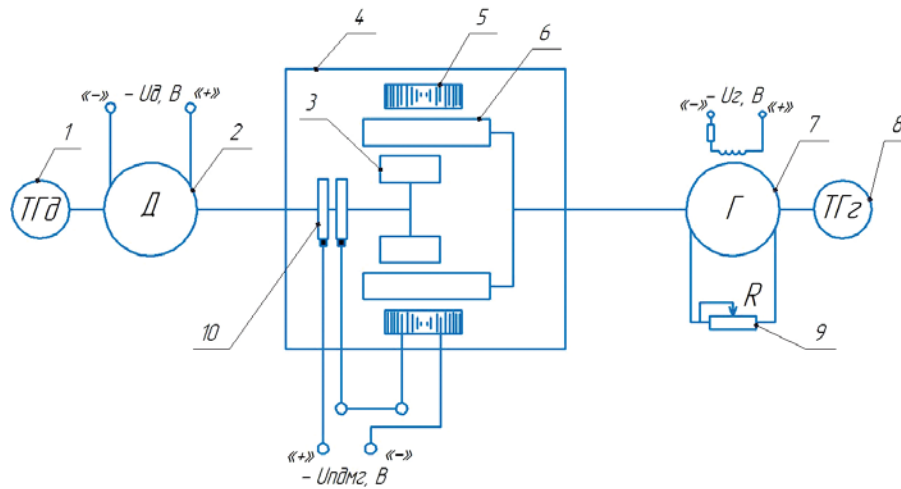


Рис. 4. Схема испытательного стенда. 1 — тахогенератор; 2 — двигатель; 3 — ротор; 4 — корпус; 5 — статор; 6 — модулятор; 7 — генератор; 8 — тахогенератор генератора; 9 — нагрузочный реостат; 10 — контактные кольца

где $\eta_{м-г}$ — КПД мотор-генератора (стенда в отсутствие магнитной передачи);

$$\eta_{ст} = \frac{P_{сред\ г}}{P_{сред\ д}} \text{ — КПД стенда;}$$

$P_{сред\ г}$, $P_{сред\ д}$ — средние электрические мощности на выходе из генератора и входе в двигатель, Вт.

Значения $P_{сред\ г}$, $P_{сред\ д}$ определяются по формуле:

$$P_{сред} = \frac{\sum_{i=1}^N A_{МГН\ эл}^i}{\sum_{i=1}^N dt}, \quad (2)$$

где $A_{МГН\ эл}^i = U^i \cdot I^i \cdot dt$ — энергия, потребленная/выработанная электрической машиной за i -й шаг измерения dt , Дж;
 U^i , I^i — мгновенные значения тока и напряжения;

N — количество шагов измерения.

КПД мотор-генератора без учета затрат энергии на подмагничивание:

$$\eta_{м-г} = \eta_{д} \cdot \eta_{г}. \quad (3)$$

КПД двигателя и генератора определяется методом отдельных потерь [7]:

$$\eta_{д} = \frac{P_{эл\ вх} - \Delta P_{д}}{P_{эл\ вх}}, \quad (4)$$

$$\eta_{г} = \frac{P_{эл\ вых}}{P_{эл\ вых} + \Delta P_{г}}, \quad (5)$$

где $P_{эл\ вх}$ — электрическая мощность, потребляемая электродвигателем, Вт;

$P_{эл\ вых}$ — электрическая мощность на выходе из генератора, Вт;

$\Delta P_{д}$, $\Delta P_{г}$ — суммарные потери соответственно в двигателе и генераторе, Вт.

Суммарные потери как в двигателе, так и в генераторе представляют собой сумму трех составляющих:

$$\Delta P = \Delta P_{эл} + \Delta P_{мг} + \Delta P_{мех}, \quad (6)$$

где $\Delta P_{мех}$ — механические потери, Вт;

$\Delta P_{мг}$ — магнитные потери, Вт;

$\Delta P_{эл}$ — электрические потери, Вт.

Электрические потери в двигателе при последовательном или параллельном возбуждении:

$$\Delta P_{эл\ дв} = I_{я}^2 \cdot (R_{я} + R_{ов}), \quad (7)$$

в генераторе при независимом возбуждении:

$$\Delta P_{эл\ г} = I_{я}^2 \cdot R_{я}, \quad (8)$$

где $I_{я}$ — ток якоря соответствующей машины, А.

Потери на обмотке возбуждения генератора не учитываются, поскольку эта энергия не преобразуется магнитной передачей.

Механические потери зависят главным образом от частоты вращения вала машины, магнитные потери — от величины тока возбуждения и частоты перемагничивания железа, поэтому они могут быть представлены функциями вида:

$$\begin{cases} \Delta P_{мг} = f(I_{в}, n) \\ \Delta P_{мех} = f(n) \end{cases} \quad (9)$$

Для определения механических и магнитных потерь в мотор-генераторе был дополнительно проведен ряд экспериментов.

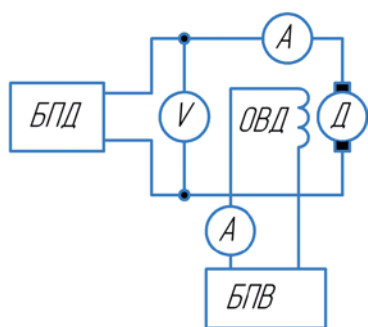


Рис. 5. Определение потерь холостого хода двигателя.

БПД — блок питания якорной обмотки двигателя; БПВ — блок питания обмотки возбуждения; ОВД — обмотка возбуждения двигателя; Д — двигатель

В первом из них определялась мощность, потребляемая электродвигателем в режиме холостого хода при различных значениях тока возбуждения и тока якоря (питающего напряжения) (рис. 5).

В этом случае величина суммарных потерь (без учета потерь на возбуждение двигателя) определяется следующим образом:

$$P_{эл\ вх1} = \Delta P_{эл\ дв1} + \Delta P_{мг\ дв} + \Delta P_{мех\ дв} \quad (10)$$

В следующем эксперименте двигатель нагружен на обесточенный генератор (рис. 6).

Испытания проводились в тех же режимах (при тех же значениях тока возбуждения и частоты вращения якоря электродвигателя). Полагая механические потери в обеих машинах равными, можно определить суммарные потери следующим образом:

$$P_{эл\ вх2} = \Delta P_{эл\ дв.2} + \Delta P_{мг\ дв} + 2\Delta P_{мех\ дв} \quad (11)$$

Выражения (10) и (11) образуют систему из двух уравнений относительно двух неизвестных $\Delta P_{мг\ дв}$ и $\Delta P_{мех\ дв}$. В результате ее решения:

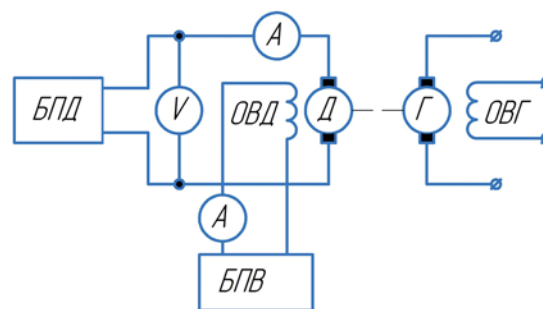


Рис. 6. Определение потерь холостого хода двигателя и генератора.

ОВГ — обмотка возбуждения генератора; Г — генератор

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{мех дв}} = (P_{\text{эл.вх.2}} - P_{\text{эл.вх.1}}) + (\Delta P_{\text{эл.дв.1}} - \Delta P_{\text{эл.дв.2}}) \\ \Delta P_{\text{мг дв}} = 2 \cdot P_{\text{эл.вх.1}} - P_{\text{эл.вх.2}} - 2 \cdot \Delta P_{\text{эл.дв.1}} + \Delta P_{\text{эл.дв.2}} \end{cases} \quad (12)$$

Зависимость суммы $(\Delta P_{\text{мех дв}} + \Delta P_{\text{мг дв}})$ от частоты вращения и тока возбуждения для одной электрической машины представлена на рис. 7.

Для выполнения расчетов данные зависимости аппроксимируются полиномом третьей степени от двух переменных с использованием метода наименьших квадратов.

После определения магнитных и механических потерь в мотор-генераторе на стенд устанавливается магнитная передача, якорь генератора соединяется с нагрузочным сопротивлением (рис. 4), на двигатель подается напряжение. При выходе двигателя на заданную частоту вращения подается напряжение на обмотку возбуждения генератора и выполняется несколько сотен циклов измерений с периодом dt , в процессе которых регистрируются

значения частоты вращения валов, электрическая мощность двигателя (с учетом мощности, потребляемой обмоткой возбуждения) и мощность генератора, рассеиваемая на нагрузке, а также ток возбуждения генератора, необходимый для определения магнитных потерь.

Средний момент нагрузки на ведомом валу передачи:

$$M_{\Gamma} = \frac{9,55 \cdot P_{\text{сред г}}}{\eta_{\Gamma} \cdot n_{\Gamma}}. \quad (13)$$

Средний момент двигателя на ведущем валу передачи:

$$M_{\text{д}} = \frac{9,55 \cdot P_{\text{сред д}} \cdot \eta_{\text{д}}}{n_{\text{д}}}. \quad (14)$$

Максимальный (срывной) момент нагрузки определяется в результате увеличения тока возбуждения генератора до момента нарушения магнитного взаимодействия звеньев передачи.

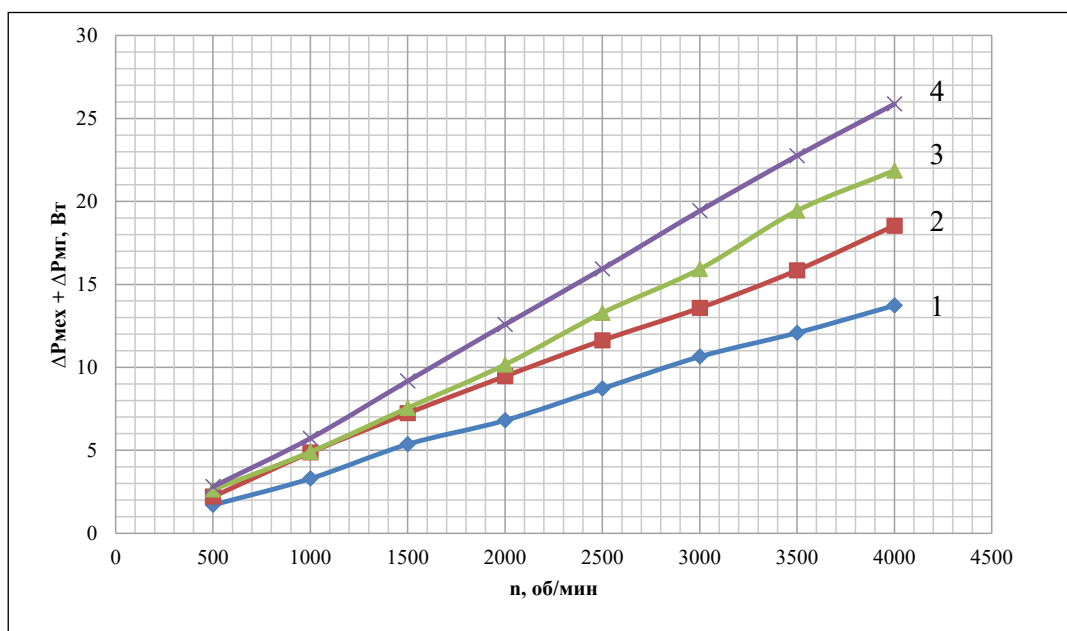


Рис. 7. Зависимость магнитных и механических потерь от режима работы электрической машины. 1 — при токе возбуждения 1А; 2 — при токе возбуждения 2А; 3 — при токе возбуждения 3А; 4 — при токе возбуждения 4А

Обсуждение результатов

В процессе испытаний передача последовательно выводилась на ряд установившихся режимов, в каждом из которых снимался ряд осциллограмм (рис. 8).

В результате обработки измерительной информации определялись зависимости КПД передачи и максимального момента от частоты вращения при различных значениях тока подмагничивания в режиме редуктора (с валом генератора соединен вал модулятора) и в режиме мультипликатора (с валом генератора соединен вал ротора), при этом при расчете КПД передачи с подмагничиванием электрические потери на подмагничивание не учитывались.

Результаты испытаний в режиме редуктора приведены на рис. 9–10, в режиме мультипликатора — на рис. 11–12.

Из зависимостей, приведенных на рис. 9 и 11, следует, что подключение подмагничи-

вающей обмотки обеспечивает повышение величины максимального момента на выходном валу передачи как в режиме редуктора, так и в режиме мультипликатора. С ростом тока подмагничивания максимальный момент растет линейно. Однако при этом наблюдается снижение значения КПД передачи (рис. 10, 12), что можно объяснить увеличением потерь в стали на гистерезис и вихревые токи, которые зависят в том числе от величины магнитной индукции в стали, которая возрастает с увеличением тока обмоток подмагничивания.

Как следует из полученных результатов, КПД передачи мало зависит от частоты вращения и передаваемой мощности в режиме мультипликатора, при этом в режиме редуктора он несколько снижается при увеличении частоты вращения ведомого звена.

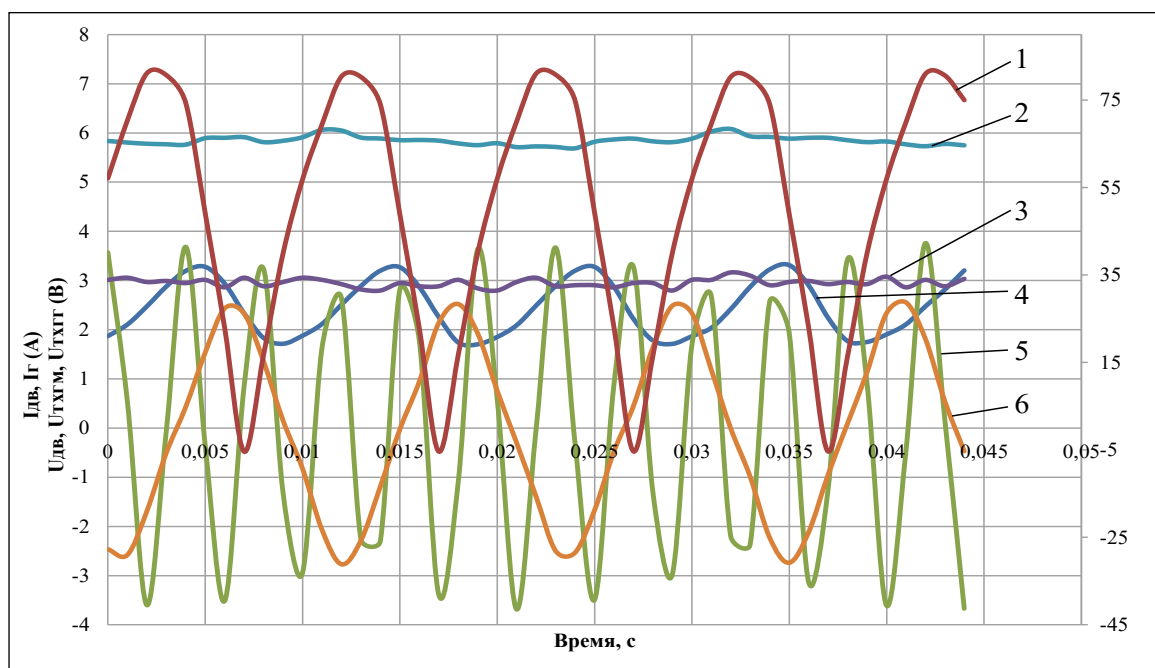


Рис. 8. Осциллограммы входов и выходов стенда. 1 — напряжение на двигателе; 2 — напряжение на генераторе; 3 — ток генератора; 4 — ток двигателя; 5 — напряжение тахогенератора двигателя; 6 — напряжение тахогенератора генератора

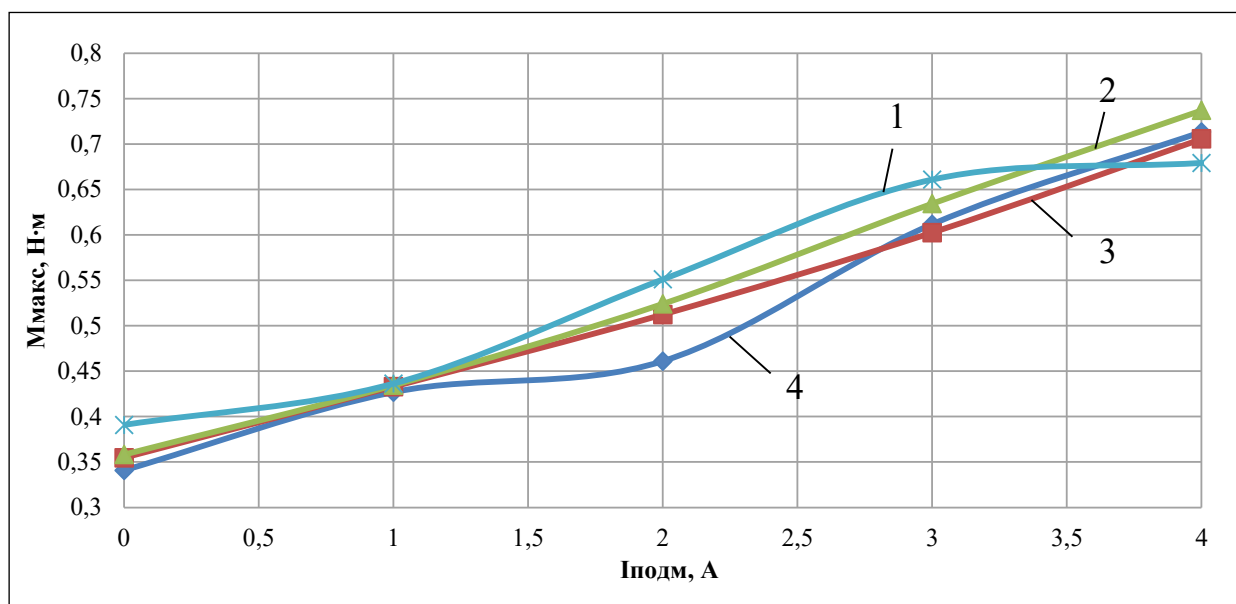


Рис. 9. Зависимость максимального момента на ведомом валу от тока подмагничивания и частоты вращения в режиме редуктора. 1 — частота вращения быстроходного вала 2000 об/мин; 2 — частота вращения быстроходного вала 3000 об/мин; 3 — частота вращения быстроходного вала 3500 об/мин; 4 — частота вращения быстроходного вала 4000 об/мин

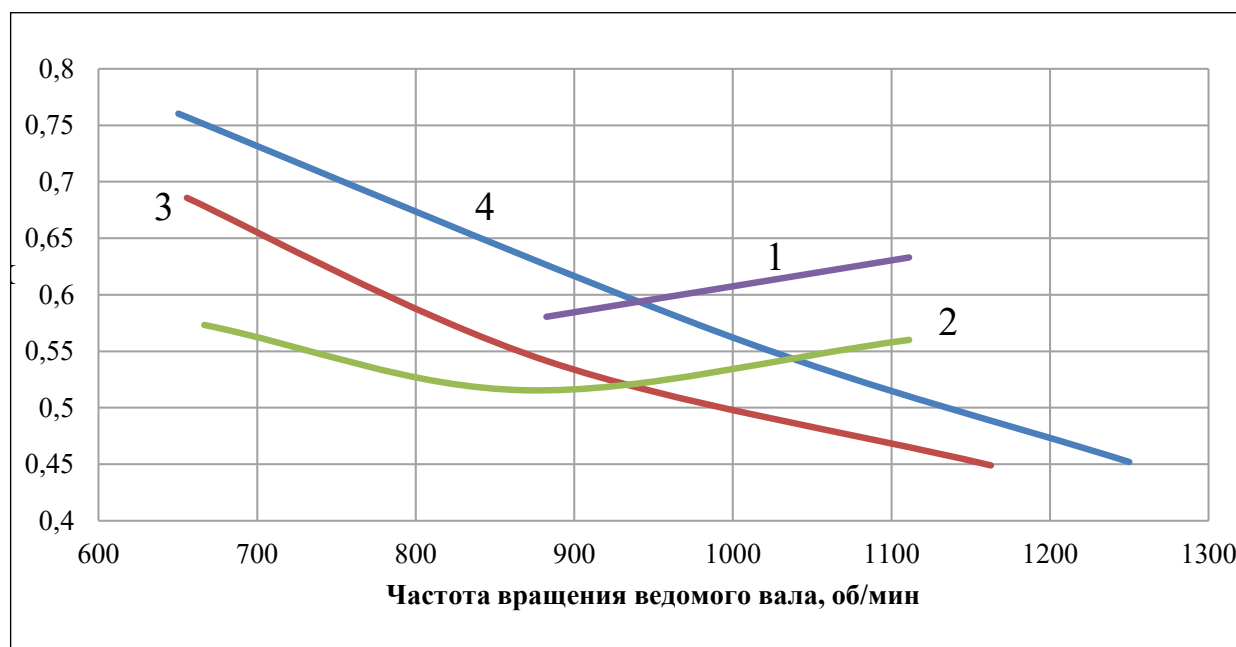


Рис. 10. Зависимость КПД от частоты вращения ведомого вала в режиме редуктора. 1 — передача подмагничена, мощность генератора 24 Вт; 2 — передача подмагничена, мощность генератора 18 Вт; 3 — передача подмагничена, мощность генератора 12 Вт; 4 — передача не подмагничена, мощность генератора 12 Вт

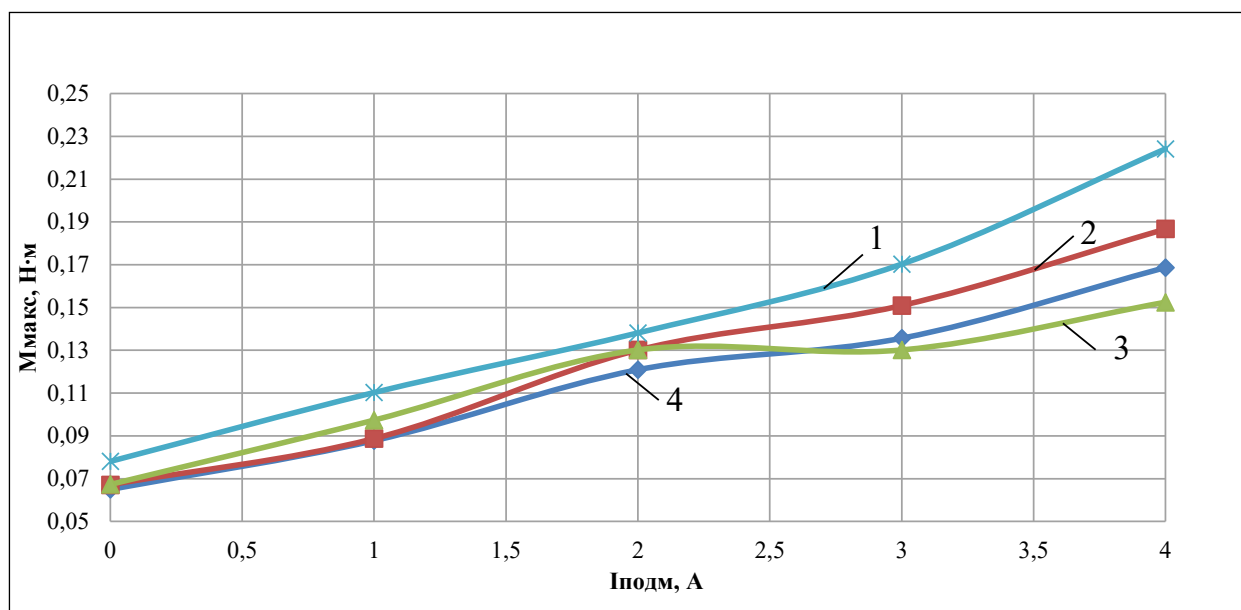


Рис. 11. Зависимость максимального момента на ведомом валу от тока подмагничивания и частоты вращения в режиме мультипликатора. 1 — частота вращения быстроходного вала 2000 об/мин; 2 — частота вращения быстроходного вала 3000 об/мин; 3 — частота вращения быстроходного вала 3500 об/мин; 4 — частота вращения быстроходного вала 4000 об/мин

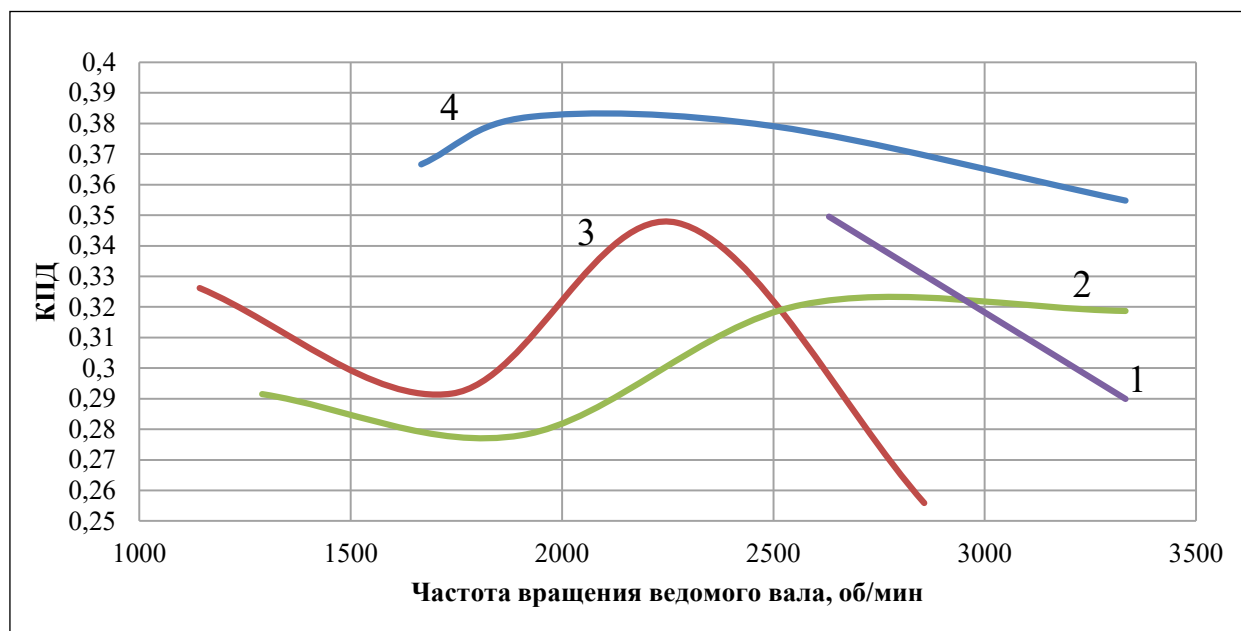


Рис. 12. Зависимость КПД от частоты вращения (мультипликатор). 1 — передача подмагничена, мощность генератора 15 Вт; 2 — передача подмагничена, мощность генератора 7 Вт; 3 — передача подмагничена, мощность генератора 2 Вт; 4 — передача не подмагничена, мощность генератора 2 Вт

Выводы

В результате анализа результатов испытаний могут быть сделаны следующие выводы:

1. Использование подмагничивания полюсов статора и ротора коаксиальной магнитной передачи позволяет существенно повысить ее нагрузочную способность и устойчивость работы при работе на механизмы с нестабильным моментом на входном валу.

2. Наряду с увеличением максимального (срывного) момента использование подмагничивания приводит к снижению КПД передачи за счет увеличения магнитных потерь в стали, поэтому применение подмагничивания целесообразно только при работе на нагрузки с периодическими резкими изменениями момента.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Фонда содействия инновациям по программе «Студенческий стартап».

Библиографический список

1. Молоканов О. Н. Разработка методов расчета и анализ перспективных конструкций бесконтактных магнитных передач: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2017. 153 с.

2. Применение электромагнитов в коаксиальной магнитной передаче для компенсации наброса нагрузки / Д. С. Тарицын [и др.] // Eltrans 2023: сборник трудов XI Международного симпозиума (Санкт-Петербург, 31 мая – 2 июня 2023 года). ПГУПС, 2023.

3. Регулируемая коаксиальная передача на основе постоянных магнитов: патент № RU 216916 U1 Рос. Федерация, № 2023103523 / Д. С. Тарицын [и др.]; заявл. 16.02.2023, опубл. 09.03.2023. Заявитель: ООО «Магнитные передачи».

4. Синхронная муфта с постоянными магнитами: патент № SU 416810 A1 СССР, № 1746707/24-7 / Г. А. Иванов [и др.]; заявл. 09.02.1972, опубл. 25.02.1974.

5. Двигатель МСА 45/64–148/ML2 // Самоделкин [Электронный ресурс]. URL: <https://kirov.samodelkin-mag.ru/stiralnyie-mashinyi/dvigateli/dvigatel-k-stiralnoj-mashine-ardo> (дата обращения: 03.03.2024).

6. 16-битный многофункциональный USB-модуль USB-4716 // Advantech [Электронный ресурс]. URL: https://www.advantech.com/ru-ru/products/1-2mlkno/usb-4716/mod_a3ab933c-c6d3-49eb-9d25-58cacecdef7a (дата обращения: 03.03.2024).

7. Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 408 с.

Дата поступления: 07.07.2024

Решение о публикации: 01.08.2024

Контактная информация:

ТАРИЦЫН Данил Сергеевич — студент;
parovozik_tar@mail.ru

ОРЛОВ Данил Александрович — студент;
mr.danisimo@yandex.ru

ПЕТУХОВ Александр Игоревич — студент;
trevlmoimalenki@gmail.com

Test results of a prototype transmission with non-contact gearing based on permanent magnets

D. S. Taritsyn, D. A. Orlov, A. I. Petukhov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Taritsyn D. S., Orlov D. A., Petukhov A. I. Test results of a prototype transmission with non-contact gearing based on permanent magnets // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 706–717. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-706-717

Abstract

Purpose: the paper studies the properties of a coaxial magnetic transmission with permanent magnets and magnetizing windings. The dependences of the efficiency on the rotation frequency and load power are revealed, as well as the dependence of the maximum torque preceding the engagement failure on the magnetizing current and the rotation frequency. **Methods:** experimental study on a stand by loading the drive motor through the test transmission on a generator loading on a resistor. The process of studying the stand is also described, including determining the losses in test electric machines by the method of individual losses, as well as establishing the correspondence between the frequency of the tachogenerator voltage and the rotation frequency of the drive motor. **Results:** it was found that the magnetic transmission is capable of operating both in the reducer mode and in the multiplier mode, while the efficiency in the reducer mode is generally higher and depends on the rotation frequency of the transmission to a greater extent than in the multiplier mode. It can also be said that the use of magnetization allows increasing the maximum torque given to the load, but reduces the efficiency due to the increase in losses in the steel. **Practical significance:** the results of the work can be applied in mechanical engineering when designing loaded magnetic transmissions operating in the mode of uneven loads in machine drives.

Keywords: coaxial magnetic transmission, gearbox, multiplier, permanent magnet, efficiency, maximum torque

References

1. Molokanov O. N. Razrabotka metodov rascheta i analiz perspektivnykh konstrukcij beskontaknykh magnitnykh peredach: diss. ... kand. tekhn. nauk. M., 2017. 153 s. (In Russian)
2. Primenenie elektromagnitov v koaksial'noj magnitnoj peredache dlya kompensacii nabrosa nagruzki / D. S. Taricyn [i dr.] // Eltrans 2023: sbornik trudov XI Mezhdunarodnogo simpoziuma (Sankt-Peterburg, 31 maya – 2 iyunya 2023 goda). PGUPS, 2023. (In Russian)
3. Reguliruemaya koaksial'naya peredacha na osnove postoyannykh magnitov: patent № RU 216916 U1 Ros. Federaciya, № 2023103523 / D. S. Taricyn [i dr.]; zayavl. 16.02.2023, opubl. 09.03.2023. Zayavitel': OOO "Magnitnye peredachi". (In Russian)
4. Sinhronnaya mufta s postoyannymi magnitami: patent № SU 416810 A1 SSSR, № 1746707/24–7 / G. A. Ivanov [i dr.]; zayavl. 09.02.1972, opubl. 25.02.1974. (In Russian)
5. Dvigatel' MSA 45/64–148/ML2 // Samodelkin [Elektronnyj resurs]. URL: <https://kirov.samodelkin-mag.ru/stiralnyie-mashinyi/dvigateli/dvigatel-k-stiralnoj-mashine-ardo> (data obrashcheniya: 03.03.2024). (In Russian)
6. 16-bitnyj mnogofunkcional'nyj USB-modul' USB-4716 // Advantech [Elektronnyj resurs]. URL: https://www.advantech.com/ru-ru/products/1-2mlkno/usb-4716/mod_a3ab933c-c6d3-49eb-9d25-58cacecdef7a (data obrashcheniya: 03.03.2024).
7. Zherve G. K. Promyshlennye ispytaniya elektricheskikh mashin. L.: Energoatomizdat, 1984. 408 s. (In Russian)

Received: 07.07.2024

Accepted: 01.08.2024

Author's information:

Danil S. TARITSYN — student; parovozik_tar@mail.ru

Danil A. ORLOV — student; mr.danisimo@yandex.ru

Alexander I. PETUKHOV — student; trevlmoi-malenki@gmail.com