

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И МАГНИТНЫЕ ПЕРЕДАЧИ (РЕДУКТОРЫ И МУЛЬТИПЛИКАТОРЫ) С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПЕРЕДАЧИ МОМЕНТА В ГЕРМЕТИЧНЫЕ ОБЪЕМЫ

А.Ю. АФАНАСЬЕВ, Н.В. ДАВЫДОВ

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева

В данной статье представлен обзор решений по электромагнитным и магнитным передаточным механизмам, в том числе для передачи момента в герметичные объемы. Рассматриваются различные подходы в проектировании данных механизмов – аналогия с механическими передачами, магнитные системы на основе явления магнитной редукции и др. Проводится сравнение полученных устройств с механическими редукторами по массогабаритным и другим характеристикам. Приводятся варианты их возможного применения.

Ключевые слова: электромагнитный передаточный механизм; магнитный редуктор; постоянный магнит; момент.

Синхронные магнитные и электромагнитные механизмы находят все более широкое применение в специальных приборах и электроприводах. Для всех них характерна передача энергии не через механические контакты деталей механизмов, а посредством сил взаимодействия, возникающих при прохождении через элементы механизма магнитного потока. Отсутствие механических контактов создает возможность работы механизмов в вакууме, при высоких и низких температурах, радиации, а также обеспечивает высокий КПД, отсутствие износов, уменьшенные шумы, возможность передачи движения в герметичные объемы, содержащие химически агрессивные и взрывоопасные вещества.

Однако наибольшее применение получили механические передачи, а именно передачи зацепления: зубчатые (прямозубая, коническая, планетарная и т.д.), червячная, цепная, винт-гайка.

Особенности механических передач:

- передача момента контактная;
- в передаче момента участвуют один или несколько зубьев;
- номинальный крутящий момент ниже максимального;
- необходимость в обслуживании и смазке;
- повышенные требования к точности;
- шум.

Особенности магнитных передач:

- бесконтактная передача – нет трения между элементами передачи;
- эффективное использование рабочего объема – в передаче момента могут участвовать все или несколько магнитных полюсов;
- использование максимального крутящего момента;
- входные и выходные валы могут быть изолированы (герметично отделены) друг от друга;
- увеличение диапазона рабочих температур – отсутствие подшипниковых уплотнений

полюсами, намагниченные радиально. Ротор медленного вращения состоит из постоянных магнитов, размеры которых сравнимы с расстоянием между ферромагнитными элементами статора. Постоянные магниты ротора медленного вращения снаружи объединены магнитопроводом.

Данная конструкция имеет хорошие массогабаритные показатели – рациональная магнитная система редуктора, а также использование редкоземельных постоянных магнитов позволяет передавать большой вращающий момент.

На рис. 4 показан циклоидальный магнитный редуктор [4].

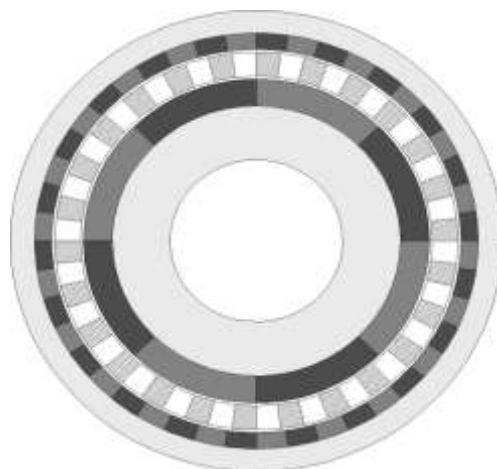


Рис. 3. Магнитный редуктор
Патент США № 687,292 (2001 г.)



Рис. 4. Магнитный циклоидальный редуктор

Данный редуктор работает аналогично механическому циклоидальному редуктору – роль циклоидального диска и коронного кольца выполняет зацепление постоянных магнитов (см. рис. 4 слева). Ведущий вал приводит в движение эксцентриковый шарикоподшипник, который, в свою очередь, сообщает циклоидальному ротору эксцентрическое, циклоидальное движение. По окружности на некотором расстоянии от центра циклоидального ротора расположены круглые отверстия. В эти отверстия вставлены стержни или ролики, закреплённые на диске. Посредством стержней и диска вращение передаётся выходному валу. При этом радиальное движение циклоидального ротора не передаётся выходному валу. Данная конструкция обладает наилучшим массогабаритным показателем среди рассмотренных конструкций.

Недостатком рассмотренных выше конструкций (рис. 3, 4) является наличие постоянных магнитов в зоне рабочего зазора. Подобное размещение постоянных магнитов вызывает большие сложности при их креплении на поверхностях вращения. Наличие вибрации и ударных нагрузок может привести к поломке постоянных магнитов.

Рассмотренные конструкции допускают герметичное разделение ведущего и ведомого валов с помощью цельнометаллических тонкостенных экранов. Однако их использование ухудшает эффективность магнитной системы (увеличенный рабочий зазор) и вызывает дополнительные потери за счет возникающих в экране вихревых

токов.

Для решения данных проблем была предложена конструкция магнитного редуктора, показанная на рис. 5 (авторы: Афанасьев А.Ю., Давыдов Н.В.) [5].

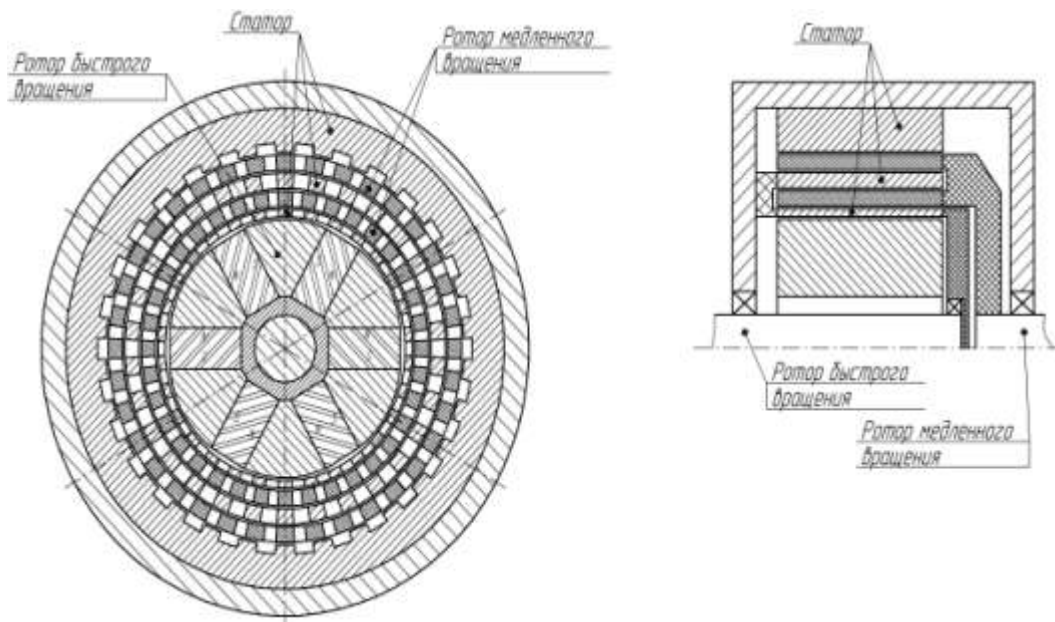


Рис. 5. Многослойный магнитный редуктор
Патент РФ №2369955 (2008 г.)

В данной конструкции ротор быстрого вращения представляет собой индуктор с постоянными магнитами, намагниченными тангенциально и расположенными между ферромагнитными полюсами. Ротор медленного вращения содержит коаксиально соединенные полые цилиндры из чередующихся ферромагнитных (заштрихованы) и немагнитных элементов. Статор содержит магнитопровод с зубцами, а также коаксиально расположенные полые цилиндры из чередующихся ферромагнитных и немагнитных элементов. Роторы быстрого и медленного вращения имеют разные скорости из-за различного количества ферромагнитных элементов ротора медленного вращения и статора. При повороте ротора быстрого вращения на одно полюсное деление ротор медленного вращения повернется на одно зубцовое деление.

Данная конструкция позволяет передать момент в герметичный объем через полый цилиндр статора без дополнительного увеличения рабочего зазора и без дополнительных потерь на вихревые токи. Помимо отсутствия постоянных магнитов в активной зоне данная конструкция обладает улучшенными массогабаритными показателями – возможность передачи большего момента в заданном объеме. Это связано с наличием нескольких рабочих зазоров.

Однако использование данного решения в случае мультипликатора затруднено из-за большого момента инерции ротора быстрого вращения. Для уменьшения момента инерции была предложена конструкция, показанная на рис. 6 и 7 (автор: Давыдов Н.В.) [6].

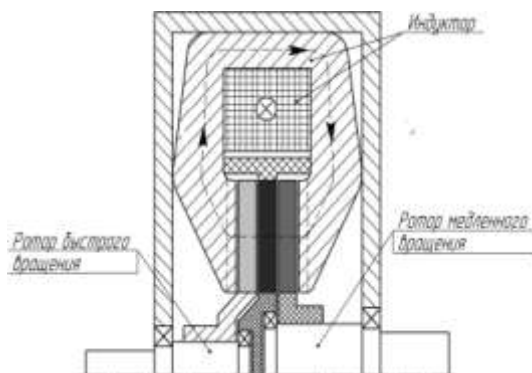


Рис. 6. Продольное сечение торцевого электромагнитного редуктора.
Патент РФ № 118136 U1 (2012 г.)

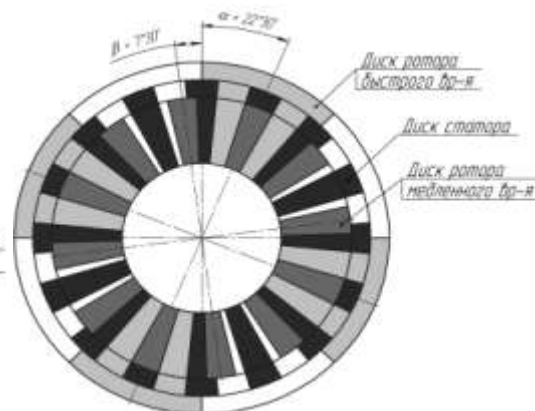


Рис. 7. Взаимное расположение дисков

Данная конструкция представляет собой торцевой вариант магнитного редуктора (см. рис. 5) с неподвижной обмоткой возбуждения и двумя рабочими зазорами. Диски статора, роторов быстрого и медленного вращения состоят из ферромагнитных и немагнитных секторов. Экраном, обеспечивающим герметичное разделение полостей роторов быстрого и медленного вращения, является диск статора (ферромагнитные сектора показаны черным цветом). Отсутствие индуктора на роторе быстрого вращения обеспечивает малый момент инерции. Принцип работы предложенной конструкции соответствует конструкции на рис. 5. Передаточное отношение данной конструкции равно трем. Использование торцевого варианта редуктора позволяет исключить консольное расположение роторов быстрого и медленного вращения и избавиться от дополнительных подшипниковых узлов, что значительно упрощает конструкцию.

Сравнение характеристик магнитных передаточных механизмов

В последнее время наибольший интерес проявляется к конструкциям с использованием редкоземельных постоянных магнитов типа $NdFeB$ (см. рис. 2–5). Данные магниты обладают большим значением коэрцитивной силы, поэтому в конструкциях магниты имеют геометрию с малой высотой магнита по сравнению с шириной. Однако использование постоянных магнитов невозможно в случае передачи больших мощностей. Постоянные магниты больших размеров сложны в изготовлении и эксплуатации. В этом случае используется электромагнитное возбуждение.

В таблице показана объемная плотность передаваемого момента различных вариантов магнитных и механических передаточных механизмов. Видно, что наибольший интерес представляют магнитный соосно-цилиндрический, циклоидальный редуктор и электродвигатель со встроенным магнитным редуктором. Данные редукторы имеют наибольшее значение объемной плотности момента, сравнимое с характеристиками механических передаточных устройств.

Таблица

Объемная плотность момента различных передаточных устройств [7], [8], [9]

Магнитное передаточное устройство или электрическая машина	Объемная плотность момента, Н·м/л	КПД, %
Червячный редуктор	2	80-92
Прямозубый цилиндрический редуктор	10-20	85-95

Синхронный электродвигатель с постоянными магнитами (воздушное охлаждение)	20	92-98
Синхронный электродвигатель с постоянными магнитами (жидкостное охлаждение)	30-80	87-95
Двухступенчатый циклоидальный редуктор (большое передаточное число)	75	н/д
Магнитный планетарный редуктор	45-90	н/д
Магнитный соосно-цилиндрический редуктор	70-100	80-95
Электродвигатель со встроенным магнитным редуктором	60-130	н/д
Циклоидальный редуктор (одна ступень)	140-180	н/д
Механическое передаточное устройство	–	
Червячный редуктор	20-60	40-97
Прямозубый цилиндрический редуктор	7-50	92-99
Планетарный редуктор	50-150	90-97

Заключение

Использование современных источников магнитного поля (редкоземельных постоянных магнитов), рациональное проектирование магнитной системы с помощью современных средств компьютерного моделирования (методы конечных элементов, методы граничных элементов) позволяют получить конструкции магнитных передаточных механизмов с высокими массогабаритными показателями, сравнимыми с показателями механических передач. При этом магнитные передачи обладают такими достоинствами, как бесконтактность, малые шумы, увеличенный ресурс работы, возможность передачи момента в герметичные объемы. Однако зубчатость зоны рабочего зазора вызывает пульсации передаваемого момента и способствует появлению явления «залипания» зубцов ротора относительно зубцов статора. Данные явления ухудшают энергетические, пусковые и эксплуатационные характеристики магнитных передаточных устройств. Возможными путями улучшения данных характеристик является профилирование и скос зубцов, а также рациональный выбор длины рабочего зазора.

Представляют интерес конструкции электрических двигателей со встроенными магнитными редукторами, исключающие необходимость использования механического редуктора и обеспечивающие компактную конструкцию привода. Подобные механизмы и устройства представляют интерес для таких областей, как ветроэнергетика, экологически чистый и гибридный автотранспорт, компрессорная техника (передача момента в герметичные объемы с возможностью увеличения оборотов) и т.д.

Summary

In this article the review of decisions on electromagnetic and magnetic gear mechanisms, including for transfer of the torque to tight volumes is presented. Various approaches in design of these mechanisms - analogy to mechanical gears, magnetic systems on the basis of the phenomenon of a magnetic reduction are considered, etc. Comparison of the received devices with mechanical reducers according to mass-volume and other characteristics is carried out. Options of their possible application are given.

Keywords: *Electromagnetic transmission; magnetic reducer; permanent magnet; torque.*

Литература

1. Патент США № 3,645,650 / Лаинг (Laing), 1972.
2. Comparison of magnetic-geared permanent-magnet machines, X. Li, K.T. Chau, M. Cheng and W.

Hua, Progress In Electromagnetics Research, Vol. 133, 177-198, 2013.

3. Патент США №687,292 / Аталла (Atallah), 2001.

4. Патент Великобритании № WO2007/144556 A1 H02K 49/10 / Аталла (Atallah), 2007.

5. Патент 2369955 РФ, МПК⁷ H02K 51/00, F16H 1/06 / Афанасьев А.Ю., Давыдов Н.В.; БИ 2009, № 28.

6. Патент на полезную модель 118136 РФ, МПК H02K 51/00 / Давыдов Н.В.; БИ 2012, № 19.

7. <http://www.dextermag.com>, Recent Developments In Permanent Magnet Gear Systems & Machines, Magnetics Conference 2010, Dexter Magnetic Technologies Inc. Elk Grove Village, Illinois – USA.

8. http://www.prst.ru/docs/innovari/general_INNOVARI_cat-small.pdf. Общий каталог. Innovari.

9. <http://fam-drive.ru>. Каталог планетарных редукторов Bonfiglioli.

Поступила в редакцию

24 марта 2015 г.

Афанасьев Анатолий Юрьевич – д-р техн. наук, профессор Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева - КАИ (КНИТУ-КАИ). Тел: 8(843) 236-56-53, 8-927-423-54-80. E-mail: afanasiev@electro.kstu-kai.ru.

Давыдов Николай Владимирович – аспирант Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева - КАИ (КНИТУ-КАИ). Тел: 8(919)6442129. E-mail: nikola-dav@ya.ru.