

УДК 629.12:621.86

**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ:
ВОДНЫХ ДВИЖУЩИХ УСТРОЙСТВ, ВИНТОРУЛЕВЫХ
КОЛОНК СУДОВ, ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ, РАЗМАЛЫВАЮЩИХ,
ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ МОРСКИХ СУДОВ,
ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ И БЕРЕГОВЫХ МЕХАНИЗМОВ**

Уразов Ф.Ф., Данцевич И.М., Осьмуха С.А., Нещеретный Н.С.

*Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск,
e-mail: uf07211937@mail.ru, dancevich65@mail.ru, rusalsvetik@mail.ru*

Совершенствование и развитие промышленного электропривода разнообразных рабочих механизмов как морских и речных судов, так и стационарных транспортирующих и перерабатывающих устройств с целью энерго- и ресурсосбережения, несмотря на широкое применение компьютеризации и цифровизации, остается весьма актуальной задачей. Одним из путей достижения поставленной цели, наряду с применением новейших материалов и компьютерно-цифровой техники, является внедрение систем прямого электропривода, когда между энергоисточником-электродвигателем и рабочим органом механизма, по сравнению с существующими электроприводами, исключены любые механические элементы: валы, муфты, редукторы, шкивы, ремни, трансмиссии. Такое решение позволяет получить экономию в уровнях: трудозатрат изготовления, материалов изготовления, расхода электроэнергии, расходных материалов, например смазочных, а также повысить производительность механизма ввиду сокращения времени протекания динамических процессов разгона, реверса и торможения. В работе представлена информация о патентах авторов по системам прямого привода разнообразных механизмов, таких как движителей морских и речных судов и их винторулевых колонок, перегрузочных, транспортирующих и размалывающих механизмов как морского, так и берегового применения на флоте и промышленности, а также подробно описан винтовой электромагнитный глубоководного применения.

Ключевые слова: ресурсосбережение, рабочие механизмы, электроприводы

**RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES OF ELECTRIC DRIVES:
WATER-POWERED DEVICES, SHIP'S ROTOR COLUMNS, TRANSSHIPMENT,
GRINDING, TRANSPORTING DEVICES OF SEA-GOING VESSELS,
UNDERWATER VEHICLES AND SHORE MECHANISMS**

Urazov F.F., Dantsevich I.M., Osmukha S.A., Nescheretnyy N.S.

*State Maritime University named after F.F. Ushakov, Novorossiysk,
e-mail: uf07211937@mail.ru, dancevich65@mail.ru, rusalsvetik@mail.ru*

Improvement and development of industrial electric drive of various working mechanisms of both sea and river vessels and stationary transporting and processing devices for the purpose of energy and resource saving, despite the wide use of computerization and digitalization, remains a very urgent task. One of the ways to achieve this goal, along with the use of the latest materials, and computer-digital equipment, is the introduction of direct electric drive systems, when any mechanical elements are excluded from the power source-electric motor and working equipment, as compared to existing electric drives: shafts, couplings, reducers, pulleys, belts, transmissions. Such a solution allows to obtain savings in the levels: labor costs of manufacturing, materials of manufacture, power consumption, consumables, for example, lubricating, and also increase the productivity of the mechanism in view of reducing the time of dynamic processes of acceleration, reverse and braking. The work presents information about the authors' patents on direct drive systems of various mechanisms such as propulsors of sea and river vessels and their rotor columns, transshipment, transporting and grinding mechanisms for both marine and coastal applications in the fleet and industry, and also describes in detail the helical electromagnetic deepwater application.

Keywords: resource saving, working mechanisms, electric drives

Результаты приведенных в данной статье сведений подтверждаются многими источниками от конкретных патентов до уже предлагаемых на мировом рынке технической продукции устройств систем прямых электроприводов как, например, подруливающих устройств фирмы Brawn Verger [1].

Ресурсосбережение является краеугольным камнем развития промышленного производства. Рассмотрение путей и способов достижения отмеченной цели является, несомненно, актуальным. В данной работе пред-

ставлен путь развития силовой части электроприводов различных механизмов, так как вопросы электроснабжения и рационального управления им в основном решены.

Системы автоматизированного электропривода являются ведущими звеньями в преобразовании электроэнергии в необходимые другие формы для совершения механизмами необходимой формы работы. Исторически электропривод развивался так, что между рабочим органом механизма и его приводным электродвигателем (ЭД)

существовал промежуточный, как правило, механический элемент: вал, муфта, редуктор, шкив, ремень и прочее. Это в основном объяснялось тем, что для движения рабочего органа требовались низкие скорости перемещений, а электродвигатели применялись относительно высокоскоростные, ввиду их большего КПД по сравнению с низкоскоростными. Это противоречие было частично устранено развитием использования полупроходных преобразователей для питания электродвигателей.

Следующим шагом стало исключение вышеназванных механических элементов между рабочим органом механизма и электродвигателем, то есть применение конструкций систем прямого привода [2–4].

Конструктивно их можно разделить на два класса. Первый, при котором рабочий орган находится внутри электродвигателя, [2–4] второй, когда он находится снаружи него [5]. Примерами первого варианта служат: подруливающие устройства морских судов, выпускаемые зарубежными фирмами [1, 2], патент винтолопастной электромагнитный движитель глубоководного применения [3], патент электродвигатель горнорудной мельницы системы прямого привода [4]. Примером второго класса служит патент электродвигатель рабочего органа перегрузочной машины системы прямого привода [5].

Существуют механизмы, в которых одновременно реализуются два класса. Примером служит патент винторулевая колонка системы прямого привода [6].

Следует подчеркнуть, что, несомненно, будущее развитие ресурсосберегающих технологий электроприводов за системами прямого бестрансмиссионного электропривода. Это объясняется следующими причинами:

1. Экономией материальных затрат на изготовление элементов привода (нет промежуточных элементов).

2. Экономией расходных материалов, например, таких как смазочные материалы для редукторов.

3. Экономией расходуемой электроэнергии в динамических режимах пуска, реверса, торможения из-за уменьшения моментов инерции.

4. Увеличения быстродействия из-за уменьшения времени протекания динамической части переходных процессов, а следовательно, повышения производительности механизма.

В феврале 2018 г. авторами получен патент [3]. Описанный в нем движитель содержит в неподвижной части цилиндрический корпус из карбида кремния с раз-

мещенным внутри него шихтованным ферромагнитным сердечником статора с трехфазной капсулированной обмоткой, пропитанной специальной смолой из диэлектрика, устойчивого к повреждению морской водой. Внутри сердечника статора, с зазорами по радиальному направлению, расположен шихтованный ферромагнитный сердечник ротора, имеющий полюса из постоянных неодимовых магнитов и стержневую короткозамкнутую обмотку. Во внутренней цилиндрической полой части ротора без центральной ступицы размещены винтолопастные элементы движителя.

Внутри полых частей ротора и корпуса размещены сетчатые фильтры грубой и тонкой очистки морской воды.

Модель винтолопастного электромагнитного движителя глубоководного применения устроена согласно чертежу на рис. 1 и рис. 2 следующим образом.

В цилиндрическом корпусе 1, из карбида кремния, размещен шихтованный из листов электротехнической стали сердечник статора 8, в пазах которого располагается трехфазная капсулированная электропроводящая обмотка 7, пропитанная водостойкой изоляцией. Внутри сердечника статора 8 на расстоянии рабочего зазора радиального направления расположен шихтованный из листов электротехнической стали сердечник ротора 5 с пазами для полюсов 9 постоянных неодимовых магнитов Nd-Fe-B и пазами для размещения электропроводящих стержней пусковой обмотки с короткозамыкающими кольцами 6, 12. Сердечник ротора напрессован на трубчатую конструкцию 4 из карбида кремния, внутри которого размещены сегментообразные винтовые лопасти 14 без центральной ступицы из композиционного материала. Внутри статора подвес ротора обеспечен работой двух керамических подшипников скольжения 3, 16, смазываемых и охлаждаемых забортной водой и размещенных в двух щитах 2, 19, фиксируемых по окружности болтами 11 с резьбой. Винтовые лопасти с двух противоположных сторон осевого направления защищены сетчатыми фильтрами грубой очистки морской воды, и они фиксируются по внутренней поверхности цилиндра подвесок.

Рабочий зазор между сердечниками статора и ротора, с двух противоположных сторон осевого направления, защищены сетчатыми фильтрами 15 тонкой очистки морской воды, и они фиксируются к внутренней цилиндрической части корпуса модели, а сам корпус 1 опирается и фиксируется на опорной раме 18.

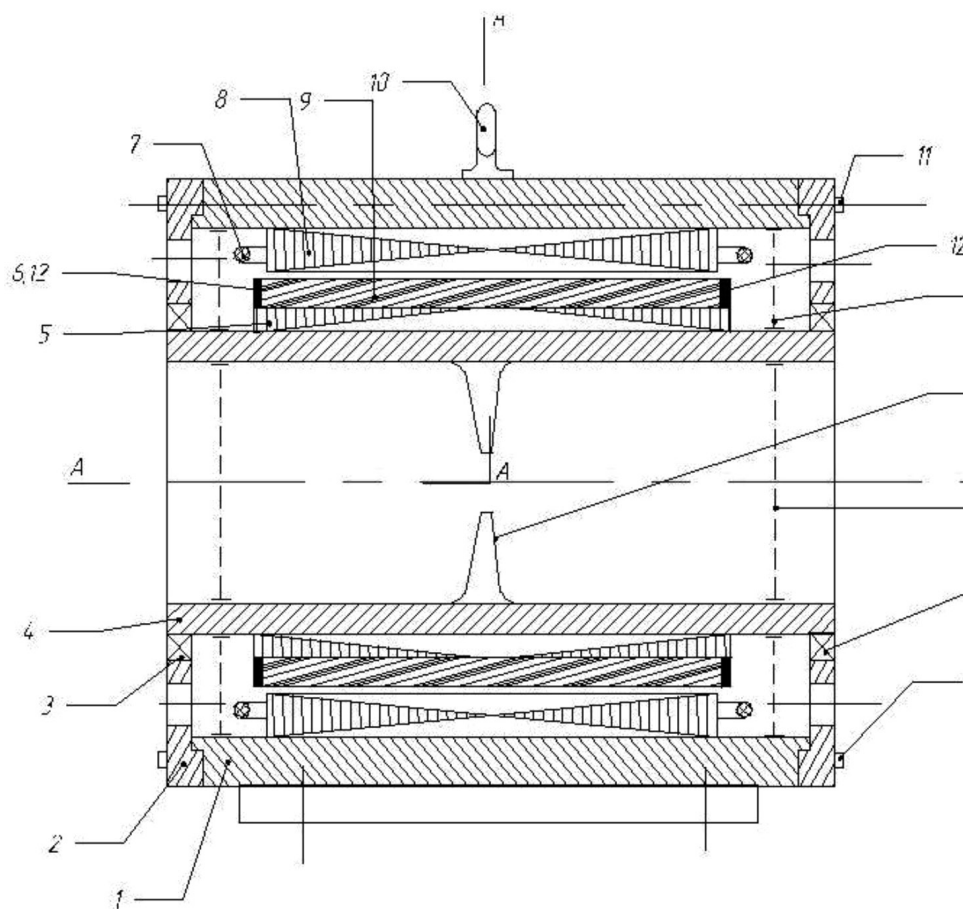


Рис. 1. Продольный разрез: 1 – корпус цилиндрический, 2, 19 – шит подшипниковый, 3, 16 – подшипник, 4 – трубчатый цилиндр, 5 – сердечник ротора шихтованный, 6 – кольцо короткозамкнутое, 7 – обмотка статора, 8 – сердечник статора шихтованный, 9 – постоянные магниты, 10 – рым-болт, 11, 17 – болты крепления, 12 – обмотка короткозамкнутая, 13 – фильтр сетчатый, 14 – лопасти винтовые, 15 – фильтр сетчатый, 18 – рама опорная

В сердечнике ротора имеются цилиндрические сквозные отверстия, параллельные стержням короткозамкнутой обмотки ротора, и они служат для циркуляции морской воды при работе модели, улучшая теплоотвод и поддерживая допустимую рабочую температуру элементов модели.

Для возможности транспортировки всей конструкции имеется рым-болт 10, фиксируемый к корпусу.

Описываемый винтолопастной электромагнитный движитель глубоководного применения работает следующим образом. При подаче трехфазного напряжения промышленной частоты или частоты обусловленной на обмотку 7 статора от возникающего тока появляется бегущее вдоль окружности магнитное поле. Магнитный поток от этого поля замыкается через сердечники статора 8 и ротора 5, проходя дважды через рабочий зазор.

Во встречном направлении по аналогичному контуру замыкается магнитный поток, создаваемый двумя соседними постоянными магнитами радиальной намагниченности, а также поток создаваемый током короткозамкнутой обмотки 12, 6, который проходит по ней от индуцированной электродвижущей силы. Взаимодействие перечисленных потоков приводит к появлению тангенциальных электромагнитных сил, совокупные действия которых создает результирующий электромагнитный момент, вращающий ротор и лопасти винта.

Ввиду кривизны поверхностей лопастей винта образуются силы реакции морской воды осевого направления, совокупное действие которых приводит к поступательному перемещению объекта, на котором посредством опорной рамы 18 зафиксирован (закрепен) движитель.

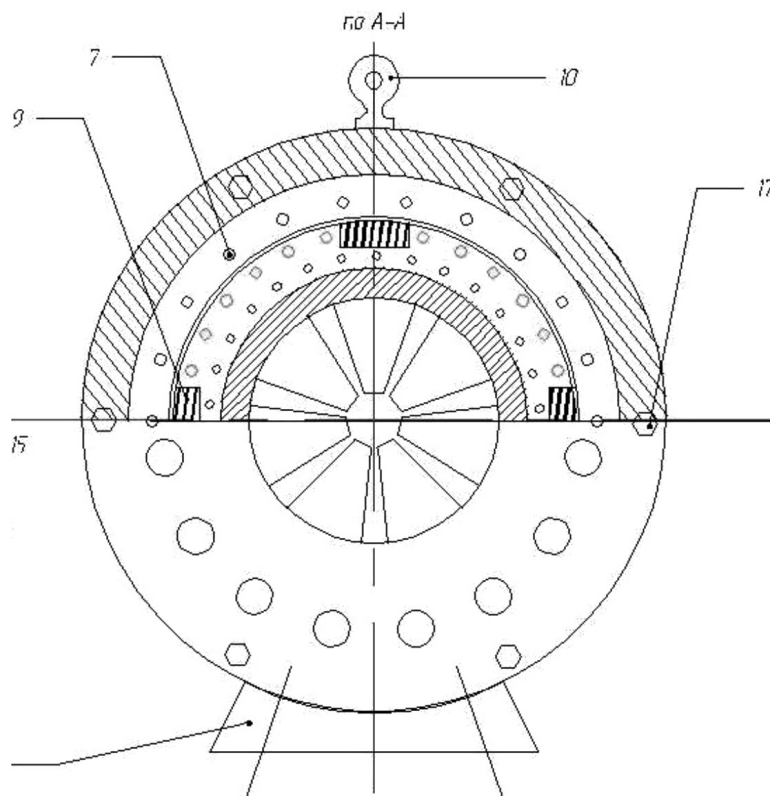


Рис. 2. Поперечный разрез: 7 – обмотка статора, 9 – постоянные магниты, 10 – рым-болт, 17 – болты крепления подшипниковых щитов, 18 – рама опорная

Ко всему вышеизложенному следует обратить внимание на нижеследующее относительно разработки, проектирования, расчетов и конструирования конкретного варианта системы без трансмиссионного электропривода рабочего механизма, предназначенного для исполнения необходимого технологического действия.

В начале разрабатываются все конструированные элементы, являющиеся ведущими звеньями в преобразовании энергии электродвигателя в совершении необходимых действий технологического процесса [12, 13].

1. Например, для подруливающего устройства и электромагнитного движителя морского объекта это гребной винтопастный винт, [8, 10, 12] лопасти которого без центральных ступиц и вала закреплены внутри цилиндра. Снаружи последнего размещены сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой и постоянными магнитами электродвигателя переменного тока [9, 10].

Здесь возможны два варианта: один при проектировании нового судна, когда необходимо определить размеры гребного винта, второй, когда размеры винта известны при

реконструкции винторулевой группы судна, так же как и мощность электропривода.

В первом случае по формуле Э.Э. Папмеля [8] рассчитывается необходимая буксировочная мощность NR судна при известной длине L , ширине B , осадке T судна, объеме водоизмещения V , скорости судна US . Рассчитывается буксировочное сопротивление R , полная сила упора P , создаваемая гребным винтом, и определяется диаметр гребного винта D_B с учетом коэффициента полезного действия, буксировочная мощность определит и мощность синхронного электродвигателя P_2 .

Диаметр винта D_B определит и внутренний диаметр шихтованного сердечника ротора, наружный диаметр которого D_2 рассчитывается известной зависимостью [7] с учетом числа пар постоянных магнитов возбуждения, то есть соответственно частоты питания обмотки статора и синхронной скорости вращения ротора с гребным винтом.

Диаметр $(D_2 + 2\delta)$ определит первый главный размер синхронного электродвигателя $D_1 = D_2 = 2\delta$, где δ – рабочий воздушный зазор, а второй главный размер синхронного электродвигателя – активная

длина сердечников $l\delta$ определится через допустимые электромагнитные нагрузки машины и мощность P .

Описанное соответствует варианту, когда оконечные наружные кромки лопастей винта закреплены внутри специального магнито-проводящего цилиндра, на наружную, радиальный размер поверхности которой сердечник определит внутренний диаметр ротора, на поверхность которого насажен сердечник ротора, то наружный диаметр сердечника ротора D_2 определяется согласно вышеназванной зависимости из [7].

2. Например, для привода грузовой лебедки или механизма подъема груза крана и механизма перемещения крана это несущий нагрузку цилиндр, внутри которого размещены все элементы электродвигателя обращенной конструкции [9–11].

Для второго вышестоящего варианта выполняются действия согласно первому варианту, начиная с шага об известности диаметра лопастей винта.

Для приводов, в которых полезную рабочую нагрузку несут цилиндры, насаженные на сердечники роторов обращенных электродвигателей, с известным числом оборотов и наружными и внутренними диаметрами этих цилиндров расчет ведется с определения диаметра D_2 сердечника ротора по вышеназванной зависимости [7], который и определит первый главный размер электродвигателя. Далее, используя допустимые электромагнитные нагрузки и значения $(D_2 + 2\delta)$, рассчитывают активную длину сердечников ротора, статора.

Таким образом, для примера 1 лопастей винта и его осевое тяговое усилие при известном числе мощность электродвигателя, а для примера 2 тангенциальное усилие силового цилиндра при известном числе оборотов определяет также потребную мощность электродвигателя. По значению мощностей электродвигателей и диаметра рабочих зазоров электродвигателя через машинную постоянную определяются осевые длины сердечников электродвигателя.

В заключение подчеркнем, что эта информация относится к системам прямого привода самых различных механизмов, которые являются прерогативой самых различных отраслей промышленного ма-

шиностроения подводомственных самым различным организационным структурам.

Поэтому считаем необходимым создание в России таких структур, которые бы своевременно анализировали тенденции развития прорывных технологий и принимали бы организационные меры по их своевременной реализации в практическом производстве.

Системы бестрансмиссионного или прямого электропривода для широкого класса производственных механизмов морского и речного транспорта, береговых промышленных производств обеспечивают широкое ресурсосбережение: в трудозатратах и материалах изготовления, в энергозатратах и повышают производительность механизмов.

Список литературы

1. Григорьев А. Судовые подруливающие устройства // Журнал российского судоходства Морской флот. 2012. № 5. С. 32–34.
2. Бочаров Л.Ю. Характеристики зарубежных технологий создания кольцевых электродвигателей движителей для необитаемых подводных аппаратов и кораблей // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. № 7–2. С. 87–90.
3. Данцевич И.М., Уразов Ф.Ф., Поначевная С.А., Нещеретный Н.С. Винтолопастной электромагнитный движитель глубоководного применения // Патент России № 179428. 2018. Бюл. № 4.
4. Уразов Ф.Ф., Захаренко А.Н., Нещеретный Н.С., Электродвигатель горнорудной мельницы системы прямого привода // Патент России № 2417505. ГМУ Ф.Ф. Ушакова. 2011. Бюл. № 12.
5. Уразов Ф.Ф., Нещеретный Н.С. Электродвигатель рабочего органа перегрузочной машины системы прямого привода // Патент России № 2481690. 2013. Бюл. № 13.
6. Уразов Ф.Ф., Аболенцев О.А., Дряхлов И.В., Герасименко О.Н. Винторулевая колонка системы прямого привода // Патент России № 2349493. 2009. Бюл. № 8.
7. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. М.: Юрайт, 2011. С. 135–136.
8. Справочник по теории корабля / Под ред. Я.И. Войтунского. Судостроение, 1985. С. 95–97.
9. Ковригин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. СПб.: Энергоатомиздат, 2000. С. 63–64.
10. Китаенко Г.И. Справочник судового электромеханика. Т. 1, Т. 2. Л.: Судостроение, 1980. С. 160–162.
11. Москаленко В.В. Электрический привод. 2-е изд. М.: Академия, 2007. С. 92–93.
12. Чекунов К.А. Судовые электроприводы и электроприводы судов. Л.: Судостроение, 1986. С. 72–73.
13. Quest electric ring thrusters. Electric Ring Thrusters. ALSTOM Schilling Robotics 201 Cousteon Place, Davis, California 95616-5412 USA. P. 3–4.