

# СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-93-103

## ANALYTICAL REVIEW OF DOMESTIC AND FOREIGN EXPERIENCE IN THE DEVELOPMENT AND DESIGN OF SHIP REVERSE GEARS

**R. V. Kuznetsov**

PJSC, Zvezda, St. Petersburg, Russian Federation

*The object of the study is mechanical ship reverse gears, which are the components of diesel-diesel, diesel-gas turbine and gas turbine main power plants of ships and vessels with a transmitted power of up to 24,000 kW and a torque of up to 590 kN·m for civil, special and dual (multipurpose) use ships. As part of the work, analytical studies of domestic and international experience in the development and design of modern ship reverse gears, their units and components are carried out. Typical design solutions and kinematic diagrams of ship gears are considered. As layout solutions, sorting gearboxes with axles offset, angular gearboxes and coaxial gearboxes are distinguished. A review of the technical characteristics of gearboxes for commercial marine vessels of most international and domestic manufacturers is made. The existing design and technological solutions for gear blocks of gearboxes are considered depending on their power. With regard to the power range under consideration, solutions that provide both a change in the direction of propeller rotation, and the ability to turn off and connect one of the engines of the operating plant on the move of the ship due to the presence of special jaw-friction and hydrodynamic clutches are analyzed. In conclusion, a generalization is given and an assessment of options for promising predictive design and technological solutions for the design and production of ship reverse gears is made. The obtained results of the work are sufficient for the formation of the technical image of ship reverse gears of the future for the main power plants of ships, the synthesis of structural and technological solutions for their typical units, as well as for the synthesis of end-to-end design and production technology. The results of analytical studies allow us to conclude that ship gearboxes based on gearing will be used for at least 30 years as a device for converting the rotational speed and torque of the motion source.*

*Keywords: reverse gear, kinematic scheme, body, friction clutch, summing gearbox, production engineering, gear block.*

**For citation:**

Kuznetsov, Ruslan V. "Analytical review of domestic and foreign experience in the development and design of ship reverse gears." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 93–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-93-103.

**УДК 621.83.061.4**

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА РАЗРАБОТКИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВЫХ РЕВЕРС-РЕДУКТОРНЫХ ПЕРЕДАЧ

**Р. В. Кузнецов**

ПАО «Звезда», Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Объектом исследования являются механические судовые реверс-редукторные передачи, являющиеся комплектующими изделиями дизель-дизельных, дизель-газотурбинных и газотурбинных главных энергетических установок кораблей и судов с передаваемой мощностью до 24000 кВт и крутящим моментом до 590 кН·м для судов гражданского, специального и двойного (многоцелевого) назначения. В рамках работы проведены аналитические исследования отечественного и международного опыта по разработке и проектированию современных судовых РРП, их узлов и компонентов. Рассмотрены типовые конструкторские решения и кинематические схемы судовых редукторных передач. В качестве компоновочных решений выделяются переборные редукторы со смещением осей, угловые редукторы и соосные редукторы. Выполнен обзор технических характеристик редукторов для морских судов коммерческого назначения большинства*

международных и отечественных производителей. Рассмотрены существующие конструкторско-технологические решения по зубчатым блокам редукторов в зависимости от их мощности. Применительно к рассматриваемому диапазону мощностей проанализированы решения, обеспечивающие как изменение направления вращения гребного винта, так и возможность отключения и подключения одного из двигателей работающей установки на ходу корабля за счет наличия специальных кулачково-фрикционных и гидродинамических муфт. В заключение приведено обобщение и выполнена оценка вариантов перспективных прогнозных конструктивных и технологических решений для проектирования и производства судовых реверс-редукторных передач. Полученные результаты работы являются достаточными для формирования технического облика судовых реверс-редукторных передач будущего для главных энергетических установок кораблей, синтеза конструктивно-технологических решений их типовых узлов, а также для синтеза сквозной технологии проектирования и производства. Результаты аналитических исследований позволяют сделать вывод о том, что судовые редукторы на базе зубчатого зацепления еще в течение не менее 30 лет будут использоваться в качестве устройства преобразования частоты вращения и момента источника движения.

*Ключевые слова:* реверс-редукторная передача, кинематическая схема, корпус, фрикционная муфта, суммирующий редуктор, технология производства, зубчатый блок.

**Для цитирования:**

Кузнецов Р. В. Аналитический обзор отечественного и зарубежного опыта разработки и проектирования судовых реверс-редукторных передач / Р. В. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 93–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-93-103.

## Введение (Introduction)

Конкурентная борьба на мировом рынке судостроения, удорожание стоимости материалов, учет требований международных стандартов и морских конвенционных требований в области качества и управления проектами, а также стремление экономии природных ресурсов вывели на первый план при создании новой продукции требования надежности и эффективности главной энергетической установки (ГЭУ) корабля [1], [2], сокращению сроков проектирования [3] и производства. Все это потребовало от разработчиков судовых реверс-редукторных передач (РРП) совершенствования применяемых схемных решений, применения инновационных технических решений [4], [5], создания типовых унифицированных узлов, разработки более совершенных технологий проектирования и производства передач, а также внедрения передовых технологий в процессе производства [4]–[8].

Разработка современных судовых редукторов подразумевает высокий уровень автоматизации и комплексирования параметров, характеризующих текущее состояние основных узлов и механизмов, температуру подшипников и муфт включения, давления масла в системах смазки и управления. В современных конструкциях РРП ведущих фирм (ZF, Renk, Reintjes) с учетом использования сложных кинематических схем, состоящих из нескольких ступеней, КПД РРП достигает 98,8 % [9] (при традиционных способах проектирования и изготовления редукторов в одной ступени утрачивается 0,5–1 % КПД). При этом РРП обеспечивает суммирование нескольких источников энергии, что позволяет существенно повысить экономию топлива, обеспечить большую дальность плавания, повысить показатели живучести и надежности судовой ГЭУ — важнейшие стратегические показатели корабля.

Обеспечение приемлемых сроков и стоимости изготовления при сохранении надлежащего уровня качества и надежности судовой РРП требует от изготовителей использования высокопрочных материалов, повышенной точности механической обработки, отработанной технологии изготовления, а также совершенствования технологии проектирования и производства судовых РРП, включая технологии «цифрового двойника», т. е. компонентов, формирующих особенности судовой передачи нового поколения. При этом на сегодняшний день в Российской Федерации, несмотря на бурный рост производства корпусов судов, не сформулированы единые конструктивные и технологические решения для производства изделий подобного класса.

*Целью данной работы* является проведение аналитического исследования отечественного и международного опыта по разработке и проектированию современных судовых РРП и их узлов

и компонентов, включая обобщение и оценку вариантов перспективных прогнозных решений с целью дальнейшего определения необходимого уровня технологической подготовки производства, синтеза оптимальных конструктивных и технологических решений.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

*Мировые тенденции развития судовых РПП.* Судовой движитель (винт) для работы с наиболее выгодным КПД должен иметь достаточно низкие обороты, оптимальные для своего диаметра, дискового отношения и шага. При применении в составе ГЭУ судна двигателя с номинальными оборотами больше, чем оптимальные обороты винта, появляется необходимость в редуцировании оборотов, передаваемых на винт от двигателя. В этом заключается первостепенная задача, стоящая перед судовой РПП. Кроме того, в судовом редукторе происходит увеличение момента, равное по величине уменьшению числа оборотов. Указанные ранее особенности РПП выражены в виде двух показателей: коэффициента трансформации крутящего момента  $K = \frac{M_{\text{двиг}}}{M_{\text{винт}}}$  и передаточного отношения  $i = \frac{n_{\text{двиг}}}{n_{\text{винт}}}$ .

Выбор той или иной судовой передачи во многом определяется назначением судна, требованиями к его маневренным характеристикам, типом и количеством главных двигателей, местом размещения машинного отделения и тем самым оказывает непосредственное влияние на технические, экономические и эксплуатационные показатели судна. Под воздействием РПП винтовая характеристика двигателя, работающего на винт и определяющая режим его работы, может существенно отличаться от винтовой характеристики судна в положительную сторону (рис. 1).

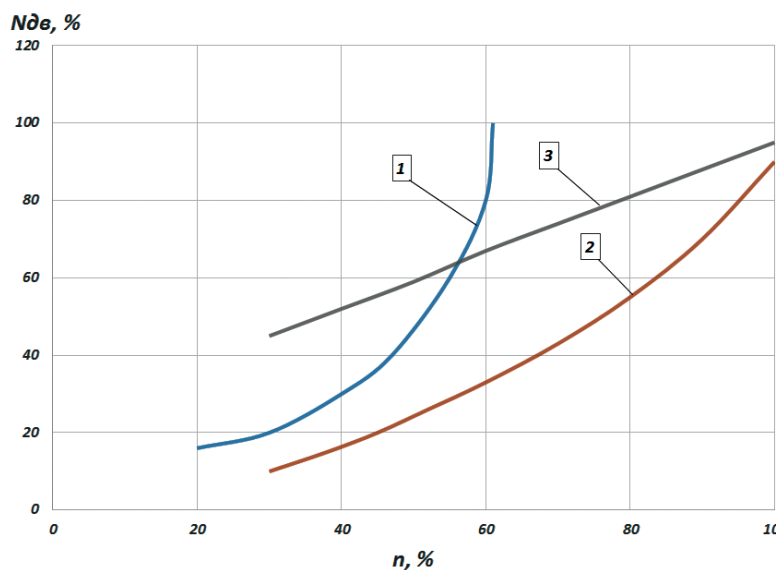


Рис. 1. Винтовые характеристики: 1 — судна без редуктора; 2 — судно с редуктором; 3 — ограничительная характеристика двигателя

Наиболее эффективным с точки зрения топливной экономичности являются судовые многоскоростные РПП, позволяющие оптимизировать работу судовой ГЭУ на всех режимах работы судна, от самого малого хода, до скоростных форсированных режимов движения. Однако, поскольку данная установка достаточно сложна в проектировании и изготовлении, ее разработка оправдана для ограниченного набора типов судов (буксиры, суда специального назначения).

На практике для решения задач снижения расхода топлива, предполагающего наличие нескольких режимов движения, используются многодвигательные установки с суммирующими РПП, которым свойственны наиболее оптимальные технико-экономические показатели при

сравнительно низкой стоимости жизненного цикла, а, кроме того, обеспечивается существенное повышение показателей надежности всей ГЭУ.

В настоящее время на отечественном рынке производителей судовых РПП в диапазоне мощностей до 24000 кВт и крутящим моментом до 590 кН·м можно выделить ОАО ХК «Барнаултрансмаш», ОАО РУМО, ОДК «ВДМ» (ЗАО «Волжский дизель им. Маминых») и ПАО «Звезда». Все указанные предприятия предлагают дизель-редукторные и дизель-реверс-редукторные агрегаты в основном на базе дизелей собственного производства.

На мировом рынке РПП для морских судов коммерческого назначения можно выделить ряд производителей, имеющих наибольший пакет заказов, и, соответственно, обладающих наибольшими техническими и технологическими компетенциями: ZF Friedrichshafen AG (ZF), Renk AG (Renk), Reintjes GmbH (Reintjes), Twin Disk, Wärtsilä Corporation (Wärtsilä). Обобщенные данные приведены на рис. 2.

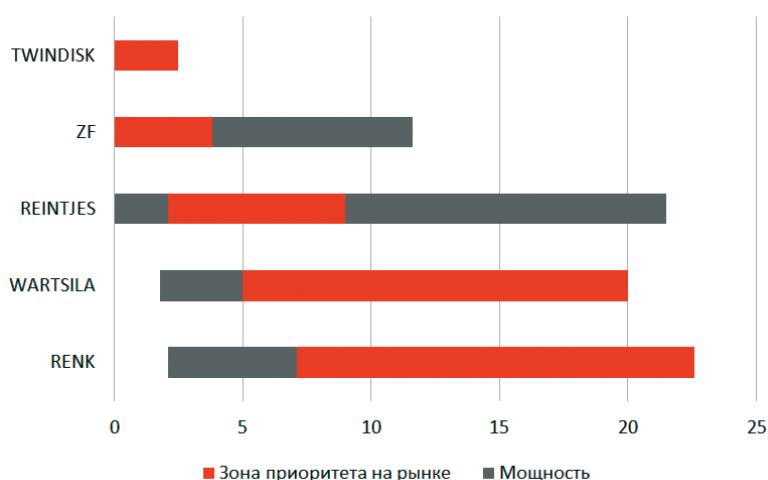


Рис. 2. Диапазон мощностей РПП основных участников рынка и их приоритеты на рынке

На основании анализа зарубежного рынка можно сделать следующие выводы:

а) международный рынок судовых РПП в области малых мощностей достаточно насыщен производителями (кроме фирм ZF и Twin Disk на рынке работает ряд менее известных фирм);

б) для судовых РПП коммерческого назначения большой передаваемой мощности (более 10000 кВт) имеет место жесткая конкуренция, усугубляющаяся небольшим количеством заказов;

в) существует мощностная ниша, которая не столь плотно заполнена производителями: от 2500 до 5000 кВт.

*Типовые конструкторские решения и кинематические схемы судовых редукторных передач.* В последние десятилетия к ГЭУ предъявляются повышенные требования к ряду показателей: экономическим, экологическим, надежности и др., для выполнения которых целесообразна установка на судно современных многоскоростных суммирующих РПП, позволяющих наиболее эффективно использовать ресурсы каждого источника движения в отдельности и совместно. Однако такие технические решения являются достаточно дорогостоящими и требуют серьезного технико-экономического обоснования.

Суммирующие РПП активно используются для нужд военно-морского флота государств, где имеются тактические преимущества, которые находятся в приоритете над экономической выгодой. Между тем все большую популярность набирают системы с использованием электродвижения. Примером таких установок может служить GODELAG от Renk. В настоящее время известны следующие типы ГЭУ судов и соответствующие им типы редукторов: дизельный двигатель, дизельный

двигатель-дизельный двигатель, дизельный двигатель-газовая турбина, дизельный двигатель-газовая турбина, дизельный двигатель-электродвигатель, газовая турбина-электродвигатель. Каждой из указанных комбинаций соответствует свой диапазон параметров, касающихся веса, передаваемого момента, передаточных отношений, эффективности, надежности, а также требований к системе управления.

Компания ZF (Германия) в спектре реализуемых компоновочных решений использует переборные редукторы со смещением осей, угловые редукторы, соосные редукторы [10]. Фактическое количество конструкций, предлагаемых фирмой, составляет примерно 270–280 единиц. Основное различие реализованных кинематических схем заключается во взаимном расположении и направлении смещения входного и выходного вала редуктора, учитывающее будущие особенности компоновки ГЭУ в машинном отделении судна. Такое разнообразие выбора конструктивных схем и технических решений явилось следствием последовательно накопленного опыта разработки и изготовления РПП, применения современных компьютерных систем автоматизированного проектирования, унификации основных узлов и компонентов, отлаженной параллельно-сквозной системы проектирования, использования передовых производственных технологий, а также развитого сборочно-испытательного производства.

Фирма Renk (Германия) специализируется на разработке тяжелых судовых РПП большой мощности (до 22000 кВт) в основном военного или специального назначения. Фирма выпускает планетарные РПП с передаваемым моментом до 667 кН·м и передаточным отношением в одной ступени до 16, а также цилиндрические одно- и двухмоторные РПП передаваемым моментом до 86 кН·м и передаточным отношением до 8,5.

Разработка и выпуск сложных (рассчитанных на высокие показатели) редукторов специального назначения предполагает использование хорошо отработанной с организационной точки зрения технологии проектирования и производства с использованием 3D-моделирования, автоматического планирования производства, автоматизированных производственных линий, архивацию данных и иные мероприятия, способствующие инновационному развитию процессов проектирования и изготовления продукции.

Фирма Reintjes (Германия) выпускает судовые РПП в мощностном диапазоне 250–21000 кВт. Компоновочные решения предполагают наличие, как соосного исполнения, так и вариантов смещения осей в горизонтальной и вертикальной плоскости. Кроме того, большинство реализованных схем предусматривает возможность дополнительного отбора мощности для привода генератора, имеет валоповоротное устройство, измеритель упора гребного винта, тормоз гребного вала, контрольные датчики и приборы, что говорит о высоком уровне конструкторско-технологической подготовки производства.

Компания Twin Disk в области судового редукторостроения специализируется в диапазоне мощностей от 25 до 2500 кВт. Данная мощность характерна для скоростных частных судов, а также для речных транспортных судов. Фирма выпускает РПП с параллельными валами и валами, расположенными под углом (применяются конические передачи). Для обеспечения плавности включения фирмы применяют гидравлические фрикционные муфты включения. Также в составе продукции фирмы присутствуют гидравлические преобразователи крутящего момента (гидротрансформаторы). В открытых источниках информация о конструкторских и технологических решениях фирмы Twin Disk практически отсутствует.

Компания Wärtsilä поставляет на рынок судового оборудования комплексные решения в области пропульсивных установок собственной разработки и изготовления. Данные решения включают в себя РПП двух типов: *односкоростные* в вертикальном и горизонтальном исполнении с межосевыми расстояниями стандартного ряда от 380 до 1420 мм; *суммирующие* с межосевым расстоянием стандартного ряда от 1900 до 3800 мм. Межосевые расстояния оказывают влияние на габариты РПП, а также на потенциально возможные к реализации передаточные отношения.

Судовые РПП фирмы Wärtsilä оснащены устройством дополнительного отбора мощности и упорным подшипником. Зубчатые блоки РПП выполняются косозубыми с эвольвентным

профилем. Для снятия осевых нагрузок в редукторах, передающих большую мощность, применяются шевронные зубчатые блоки из легированных сталей и подвергнутых химико-термической обработке. Корпус РРП отливают из чугуна или сваривают из стали. Все РРП, за исключением линии SV, оснащены многодисковыми фрикционными муфтами включения, обеспечивающими плавное включение и снижающими ударную нагрузку на двигатель.

Государственное предприятие «Научно-производственный комплекс газотурбостроения “Зоря-МашПроект”» (Украина) специализируется на разработке и изготовлении ГТД промышленного и судового назначения, а также проектировании и изготовлении специализированных РРП для ГТД с мощностью установки до 80000 кВт [11]. С начала 2000-х гг. предприятие также занимается разработкой, ремонтом и изготовлением судовых «тяжелых» (передающих большие моменты) РРП. Все газотурбинные агрегаты кораблей ВМФ РФ проектировались и изготавливались на этом предприятии. Существующее на предприятии редукторное производство обеспечивает проектирование, изготовление, испытания и ремонт (восстановление) практически любых зубчатых передач: цилиндрических, конических с наружным и внутренним зацеплением, с использованием прямых, косых, шевронных, эвольвентно-конических и круговых зубьев. Применяемые модули от 0,6 мм до 12 мм. Диаметр изготавливаемых зубчатых колес 10–3400 мм.

Применительно к рассматриваемому диапазону мощностей рассматриваемые конструктивные решения подразумевают наличие специальных кулачково-фрикционных и гидродинамических муфт, обеспечивающих как изменение направления вращения гребного винта, так и возможность отключения и подключения одного из двигателей работающей установки на ходу корабля.

ПАО «Звезда» имеет богатую историю создания РРП судового назначения. На предприятии существует два типа РРП:

- а) «легкие» (с литым алюминиевым корпусом), суммирующие РРП, передаваемой мощностью до 6500 кВт и оборотами входного вала до 2400 об/мин;
- б) «тяжелые» (со сварным корпусом), суммирующие РРП, передаваемой мощностью 13000 кВт и оборотами входного вала до 1500 об/мин.

Применительно для рассматриваемого мощностного диапазона типовыми можно считать решения по основным узлам, примененные для редуктора модели РРП 6000 с передаваемой мощностью до 3700 кВт [12]. Данная трансмиссия обеспечивает работу дизеля на винт фиксированного шага. Передача мощности на судовой валопровод может осуществляться по следующим схемам:

- работа на передний ход: дизель-фрикционная муфта переднего хода — первая ступень переднего хода; вторая ступень — эластичная виброизолирующая муфта — судовой валопровод;
- работа на задний ход: дизель-шестерни связи — фрикционная муфта заднего хода — первая ступень заднего хода; вторая ступень — эластичная виброизолирующая муфта — судовой валопровод.

Остальные производители выпускают редукторные агрегаты малой мощности, предназначенные в основном для речных судов и судов класса *река — море* небольшого водоизмещения. Используемые при их создании технические решения, являясь «классическими» для малонагруженных трансмиссий, не представляют значительного интереса в рамках рассматриваемых средних и высокооборотных двигателей.

*Анализ конструкторско-технологических решений по зубчатым блокам.* Зубчатые блоки судовых РРП рассмотренных ранее фирм, как правило, имеют цилиндрические косозубые или шевронные передачи с эвольвентным профилем зуба, крайне редко (например, с целью дополнительного отбора мощности) встречаются прямозубые передачи. В приводах валоповоротных устройств РРП применяют червячные передачи, в судовых РРП ГТД агрегатов — конические передачи.

Применение шевронных зубчатых блоков в судовых РРП, как правило, начинается с передаваемой мощности выше 9000 кВт или при окружной скорости выше 50 м/с при существенном повышении осевых нагрузок. Зубчатые блоки в конструкциях РРП рассматриваемых ранее производителей бывают *составные* и *цельные*. Составные зубчатые блоки получают при помощи штифтового, шпоночного, шлицевого или прессового соединения, а также при помощи комбинированных соединений.

Шпоночные и прессовые соединения отдельно применяются в основном в малонагруженных по моменту редукторах [13] для мощностей до 1000 кВт в связи со сложностью обеспечения высокой надежности. Для судовых редукторных передач большей мощности характерно использование шлицевого или комбинированного типов соединений. Так, в конструкциях судовых редукторных передач фирм Wärtsilä, Reintjes, ПАО «Звезда» используется комбинированный тип соединения, в котором прессовое соединение дополняется штифтовым.

Составная конструкция зубчатого блока позволяет уменьшить материалоемкость и снизить требования к металлообрабатывающему оборудованию, тем самым уменьшить себестоимость изготовления, но оказывает отрицательное влияние на точность соединения зубчатых блоков. При больших передаваемых нагрузках составная конструкция зубчатого блока может являться источником отказов в работе судовых РРП. В связи с этим для высоконагруженных РРП используют цельные зубчатые блоки (полученные из одной заготовки).

Многолетний опыт серийного производства и эксплуатации зубчатых блоков показал большое влияние применяемых при обработке зубьев колес и шестерен технологий на динамику, виброактивность, ресурс и надежность работы зубчатых передач [14]. Сложность выполнения задач, вызванная технологией производства зубчатых блоков задач, требует комплексного подхода [8] к их решению, основой которого является разработка базовых технологических процессов механической и химико-термической обработки, оснащение производства высокоточным и производительным оборудованием, а также современным комплексом вычислительной техники и программных продуктов.

Разработка технологического процесса изготовления зубчатых блоков начинается и ведется параллельно с разработкой конструкции самой РРП, при этом определяется возможность их изготовления в условиях конкретного серийного производства. Для совершенствования производства зубчатых блоков требуется *разработка единой системы управления процессом изготовления деталей*, затрудняющей проявление отрицательных факторов технологической системы обработки. Основу этой системы должно составлять управление качеством обработки на последовательно выполняемых технологических операциях механической, химико-термической и финишной обработки.

*Анализ типовых решений по муфтам включения.* В настоящее время выделяют три вида муфт включения, применяемых в редукторах: электрическую, гидравлическую и пневматическую [15]. В судовых РРП наибольшее распространение получили гидравлические многодисковые фрикционные муфты. Данный тип муфт в наибольшей степени отвечает предъявляемым к судовым РРП требованиям по плавности включения, имеет наибольший КПД и наиболее выгодные удельные показатели по сравнению с другими типами муфт. Кроме того, такие муфты способны передавать практически любой крутящий момент.

В некоторых редукторных передачах встречаются кулачковые муфты включения. Данный тип муфт встречается в случае отсутствия ударных нагрузок (при отсутствии требования включения муфты «на ходу»). Различаются муфты сухие и муфты, работающие со смазкой. Несмотря на то, что размещение фрикционных дисков в масляной среде снижает коэффициент трения (передаваемый момент), подобное конструктивное решение дает ряд преимуществ перед сухими. В частности, проще решается задача компенсации снижения крутящего момента увеличением осевой нагрузки без опасности появления схватывания, катастрофического износа и вибрации. Более того, правильная смазка муфты способствует отводу генерируемого в процессе трения тепла и удалению продуктов износа, увеличивая, тем самым не только плавность работы, но и срок службы узла.

Принципиально в конструкции муфт включения выделяют два вида: конструкции с передачей момента через фрикционные диски с внешней детали (шлицевого венца) и с передачей момента через фрикционные диски с внутренней детали (вала) [15]. Вторая конструкция отличается меньшим осевым габаритом, простой системой распределения управляющего и смазочного масла. В данном варианте отсутствует консольная посадка поводка, более равномерным является тепло-выделение (за счет перераспределения контактных давлений), но имеется склонность к увеличению диаметрального габарита, и, как следствие, габарита всей редукторной передачи и на практике встречается чаще.

Для рассматриваемых фирм можно выделить три основных вида расположения многодисковых фрикционных гидравлических муфт включения: в отдельном корпусе, перед приводной шестерней и в корпусе приводной шестерни. Первый тип муфт используется для мощных судовых редукторных установок и в настоящее время применяется все реже в связи с тенденцией уменьшения габаритных размеров редукторов. Второй тип применяется в случае постоянной работы генератора или любого другого дополнительного отбора мощности и с точки зрения габаритных характеристик так же является не самым оптимальным решением. Третий тип муфт в конструкциях рассмотренных фирм встречается наиболее часто и позволяет максимально сократить продольный габарит редукторной передачи, при этом допускается постоянная работа привода дополнительного отбора мощности.

Ввиду стремления к сокращению диаметра фрикционных дисков (металл — металлокерамика), для поддержания необходимого усилия для их сцепления необходимо иметь высокое давление управляющего масла.

*Типовые решения по корпусам.* Корпуса судовых редукторных передач делятся на литые и сварные [16], при этом сварные корпуса имеют составную структуру. Литые корпуса классифицируются на алюминиевые и чугунные. Литые корпуса для судовых редукторных передач используются в основном при небольших передаваемых мощностях до 2500 кВт, а также в случае отсутствия сложных компоновочных решений (не симметричная форма, наличие наклонной поверхностей и т. п.).

Исключением является редуктор SCV фирмы Wärtsilä. Это можно объяснить наличием у данного производителя современного чугуно-литейного производства. При этом данное конструкторское решение закономерно негативно сказывается на технико-экономических показателях РРП в целом. Для мощностей свыше 2500 кВт актуальным является использование сварных составных конструкций корпуса с разъемом по осям передач. При этом необходимо учитывать, что на корпусах размещают датчики, систему трубопроводов, масляный охладитель, фильтры, насосы систем, электрооборудование, систему (пост) управления и другие устройства.

Сварные корпуса для рассматриваемого диапазона мощностей у всех выше указанных производителей имеют максимальные габариты не более 5000 × 4500 × 5000 мм. При этом данные корпуса подвергаются термическому улучшению (отжиг) для снятия остаточных напряжений после сварки. Конструкция корпуса, в том числе определяется принятой системой смазки. В конструкциях рассматриваемых РРП применяется система смазки с «мокрым» картером (автономная), которая предусматривает наличие поддона.

## Результаты и их обсуждение (Results and their Discussion)

Исследования отечественного и международного опыта проектирования и производства современных судовых РРП, а также прогноз развития их показателей дали следующие результаты:

1. Общепринятыми в настоящее время конструктивными концепциями при проектировании и производстве судовых РРП и прогнозным решением на будущее является применение следующих типовых узлов: косозубых или шевронных зубчатых блоков с эвольвентным профилем зуба, стальных сварных корпусов, многодисковых фрикционных муфт включения для обеспечения реверсирования и переключения скоростей хода.

2. При разработке судовых РРП характерным является широкое применение ряда общих кинематических схем: соосных и не соосных, переборных и планетарных, суммирующих.

3. Разработка современных судовых РРП подразумевает высокий уровень автоматизации и комплексирования параметров, характеризующих текущее состояние основных узлов и механизмов (температуру подшипников и муфт включения, давления масла в системах смазки и управления).

4. В рассматриваемом диапазоне передаваемых мощностей характерны две основные группы РРП:

*1-я группа* — судовые РРП коммерческого назначения с передаваемой мощностью до 5000 кВт, используемые литые или сварные корпуса, составные зубчатые блоки, многодисковые гидравличе-



ские фрикционные муфты включения. Целевым направлением проектирования данного вида РРП является оптимизация жизненного цикла судна;

*2-я группа* — судовые суммирующие РРП специального назначения с передаваемой мощностью до 30000 кВт с использованием сварных корпусов, составных или цельных зубчатых блоков, много-дисковых гидравлических фрикционных муфт включения. Целевым направлением проектирования данного вида РРП является достижение высоких мореходных и тактических качеств кораблей флота.

5. В качестве перспективных параметров судовых РРП для обеих групп на основе проведенного анализа выбираем следующие: передаточные числа, реализованные в одной ступени от трех до восьми; модуль нормальный 10–25 мм; число ступеней от двух до пяти.

6. При проектировании и постановке судовых РРП на производство мировыми производителями используются технологии, предусматривающие высокую степень автоматизации процессов управления проектом и его стадиями.

Таким образом, сформирован следующий прогнозный уровень основных показателей современных судовых РРП:

- давление масла управления муфтой — 15–30 бар;
- передаваемый крутящий момент — до 590 кН·м;
- передаваемая суммарная мощность — до 30000 кВт;
- количество фрикционных муфт — до шести;
- количество энергетических отсеков — до трех;
- полный ресурс (зависит от назначения) — до 100000 ч.

### **Заключение (Conclusion)**

Полученные результаты работы являются достаточными для формирования технического облика судовой РРП будущего для главных дизель-дизельных, дизель-газотурбинных и газотурбинных ГЭУ кораблей, синтеза конструктивно-технологических решений типовых узлов РРП, а также для синтеза сквозной технологии проектирования, производства судовых РРП и их типовых узлов (корпусов, зубчатых блоков, муфт включения). Результаты аналитических исследований позволяют сделать вывод о том, что судовые РРП на базе зубчатого зацепления еще в течение не менее 30 лет будут входить в состав ГЭУ в качестве устройства преобразования частоты вращения и момента источника движения.

По технико-экономической эффективности судовые РРП указанного типа превосходят другие передачи, обладая при этом высокой степенью надежности, минимальным значением виброакустических характеристик, а также позволяя реализовывать различные решения по преобразованию и суммированию энергии от различных источников движения (дизельный двигатель, газовая или паровая турбина, электродвигатель) в составе ГЭУ судна.

Благодаря использованию новых современных материалов и способов их обработки, а также современных инструментов и технологий проектирования, производства и математического моделирования, их постоянному совершенствованию и развитию, судовые РРП с зубчатыми передачами еще не достигли предела своих возможностей и являются перспективным направлением мирового тяжелого машиностроения. В данной связи особенно актуальной является проблема отсутствия единой конструкторско-технологической базы для проектирования и производства современных судовых реверс-редукторных передач для главных энергетических установок кораблей.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Москаленко В. А. Системный подход оценки качества главной энергетической установки корабля / В. А. Москаленко, А. Б. Дегтярюк // Актуальные проблемы морской энергетики. Материалы девятой Международной научно-технической конференции. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 2020. — С. 281–285.

2. Печковский П. Г. Обоснование инновационных технических решений в области корабельной энергетики перспективных многоцелевых кораблей / П. Г. Печковский // Вопросы оборонной техники.

Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. — 2021. — № 7–8 (157–158). — С. 136–143. DOI: 10.53816/23061456\_2021\_7-8\_136.

3. Мосейко Е. С. Исследование надежности судовых насосов по данным технического наблюдения / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 4. — С. 7–16. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-4-7-16.

4. Kuznetsov R. Technology for producing wear-resistant bimetal bearing based on cast aluminum / R. Kuznetsov, E. Ol'khovik, M. Radkevich, P. Kuznetsov // E3S Web of Conferences. — EDP Sciences, 2020. — Vol. 164. — Pp. 03045. DOI: 10.1051/e3sconf/202016403045.

5. Кузнецов Р. В. Экспериментальное исследование теплофизических свойств материалов биметаллического подшипника для судового машиностроения / Р. В. Кузнецов, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1107–1114. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1107-1114.

6. Мясников Ю. Н. Междисциплинарные инновационные технологии в судостроении / Ю. Н. Мясников // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № 1 (387). — С. 184–196. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-184-196.

7. Михеева Т. А. Влияние качества подготовки производства на судостроительном предприятии на качество выпускаемой продукции / Т. А. Михеева, И. Н. Лучков, Е. Г. Бурмистров // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 56. — С. 55–64.

8. Жукова С. И. Разработка метода технологического обеспечения противозадирной стойкости в кромочной зоне контактирования эвольвентных цилиндрических зубчатых колес редукторов газотурбинных двигателей: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.02.08) / Жукова Светлана Ивановна; Рыбинский государственный авиационный технический университет имени ПА Соловьева. — Рыбинск, 2018. — 245 с.

9. Половинкин В. Н. Оценка целесообразности и способов разработки и создания корабельного газотурбинного двигателя 5-го поколения / В. Н. Половинкин, В. В. Барановский, Д. Ю. Колодяжный // Судостроение. — 2019. — № 1 (842). — С. 11–31.

10. ZF Friedrichshafen AG [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.zf.com/products/en/buses/products\\_40065.html](https://www.zf.com/products/en/buses/products_40065.html) (дата обращения: 22.06.2020).

11. Мироненко А. И. Усовершенствование редукторов производства ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» / А. И. Мироненко, В. Е. Спицын, Е. А. Гамза, Д. В. Матвеевский, С. А. Дзятко // Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Проблеми механічного приводу. — 2015. — № 35. — С. 95–100.

12. Плавник П. Г. Реверс-редукторное производство ОАО «Звезда» / П. Г. Плавник, Е. Ю. Лерман // Судостроение. — 2014. — № 2 (813). — С. 34–36.

13. Анфимов М. И. Редукторы: Конструкции и расчет / М. И. Анфимов. — М.: Машиностроение, 1972. — 463 с.

14. Безъязычный В. Ф. Технология изготовления закрытого венца блока зубчатых колес ГТД / В. Ф. Безъязычный, Е. В. Шеховцева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2013. — № 8. — С. 19–27.

15. Ряховский О. А. Справочник по муфтам / О. А. Ряховский, С. С. Иванов. — СПб.: Политехника, 1991. — 384 с.

16. Колода С. Ф. Основные этапы технологии изготовления корпусов редукторов / С. Ф. Колода // Наукові праці науково-педагогічного складу Державного вищого навчального закладу «Приазовський державний технічний університет»: електронний покажчик публікацій / уклад.: Т. В. Ткаченко, В. Ф. Ганжеєва, О. Г. Білик. — Маріуполь, 2016. — С. 66–68.

## REFERENCES

1. Moskalenko, V. A., and A. B. Degtyaruk. “System approach of assessment of quality of the main power plant of the ship.” *Aktual'nye problemy morskoi energetiki. Materialy devyatoi Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi morskoi tekhnicheskii universitet, 2020. 281–285.

2. Pechkovsky, Pavel Grigorevich. “Justification of innovative technical solutions in the field of shipboard power supply of new multipurpose ships.” *Defense Engineering Problems. Series 16. Technical means of combating terrorism 7–8(157–158) (2021): 136–143*. DOI: 10.53816/23061456\_2021\_7-8\_136.

3. Moseyko, Evgeniy Sergeevich, and Evgeniy Olegovich Olkhovik. "Studying reliability of marine pump systems by using technical supervision data." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 4 (2021): 7–16. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-4-7-16.

4. Kuznetsov, Ruslan, Evgeniy Ol'khovik, Mikhail Radkevich, and Pavel Kuznetsov. "Technology for producing wear-resistant bimetal bearing based on cast aluminum." *E3S Web of Conferences*. Vol. 164. EDP Sciences, 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/202016403045.

5. Kuznetsov, Ruslan V., and Evgeniy O. Olhovik. "Experimental study of the thermophysical properties of bimetallic bearing materials for marine engineering." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1107–1114. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1107-1114.

6. Myasnikov, Yury N. "Interdisciplinary innovative technologies in shipbuilding." *Transactions of the Krylov State Research Centre* 1(387) (2019): 184–196. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-184-196.

7. Mikheeva, T. A., I. N. Luchkov, and E. G. Burmistrov. "Impact of quality of preparation of production at shipbuilding enterprise on quality of production." *Bulletin of VSAWT* 56 (2018): 55–64.

8. Zhukova, S. I. *Razrabotka metoda tekhnologicheskogo obespecheniya protivozadirnoi stoikosti v kromochnoi zone kontaktirovaniya evol'ventnykh tsilindricheskikh zubchatykh koles reduktorov gazoturbinnnykh dvigatelei*. PhD diss. Rybinsk, 2018.

9. Polovinkin, V. N., V. V. Baranovsky, and D. Yu. Kolodyazhny. "Estimating feasibility and development methods of shipboard gas-turbine motor of 5th generation." *Shipbuilding* 1(842) (2019): 11–31.

10. ZF Friedrichshafen AG. Web. 22 June 2020 <[https://www.zf.com/products/en/buses/products\\_40065.html](https://www.zf.com/products/en/buses/products_40065.html)>.

11. Mironenko, A. I., V. E. Spitsyn, E. A. Gamza, D. V. Matveevskii, and S. A. Dzyatko. "Usovershenstvovanie reduktorov proizvodstva GP NPKG "Zorya"- "Mashproekt"." *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu KhPI. Seriya: Problemi mekhanichnogo privodu* 35 (2015): 95–100.

12. Plavnik, P. G., and E. Y. Lerman. "Reverse and reduction gear production at JSC Zvezda." *Shipbuilding* 2(813) (2014): 34–36.

13. Anfimov, M. I. *Reduktory: Konstruktsii i raschet*. Mashinostroenie, 1972.

14. Bezjazychny, Vyacheslav Feoktistovich, and Evgenia Vladimirovna Shekhovtsev. "Technological prosee of manufacturing of closed wreath of block of gear teeth in a gas turbine engine." *Izvestiya Tula State University* 8 (2013): 19–27.

15. Ryakhovskii, O. A., and S. S. Ivanov. *Spravochnik po muftam*. SPb.: Politehnika, 1991.

16. Koloda, S. F. "Osnovnye etapy tekhnologii izgotovleniya korpusov reduktorov." *Naukovi pratsi naukovopedagogichnogo skladu Derzhavnogo vishchogo navchal'nogo zakladu «Priazovs'kii derzhavnii tekhnichnii universitet»: elektronni pokazhchik publikatsii*. Edited by T. V. Tkachenko, V. F. Ganzheeva, O. G. Bilik. Mariupol', 2016. 66–68.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Кузнецов Руслан Валерьевич** —  
 канд. техн. наук, главный металлург  
 ПАО «Звезда»  
 192012, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 ул. Бабушкина, 123  
 e-mail: [kuznetsovrv@zvezda.spb.ru](mailto:kuznetsovrv@zvezda.spb.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Kuznetsov, Ruslan V.** —  
 PhD, Chief Metallurgist  
 PJSC, Zvezda  
 123 Babushkina Str., St. Petersburg, 192012,  
 Russian Federation  
 e-mail: [kuznetsovrv@zvezda.spb.ru](mailto:kuznetsovrv@zvezda.spb.ru)

Статья поступила в редакцию 31 января 2022 г.  
 Received: January 31, 2022.