

Несмотря на колоссальные успехи в плане реализации объединенной электроэнергетической системы (ОЭЭС), как, например, разработка компанией American Super Conductor для эсминцев «Zumwalt» ГЭД большой мощности – 2×36,5 МВт с обмотками из высокотемпературных сверхпроводников, прошедших в 2009 г. успешные стендовые испытания, широкого распространения такие системы на перспективных кораблях в дальнейшем не получили.

Очевидными причинами, препятствующими широкому распространению систем полного электродвижения на боевых кораблях, послужили их недостатки, свойственные двойному преобразованию энергии при передаче крутящего момента на винт, а также сложность и громоздкость вспомогательного оборудования, обеспечивающего работу ОЭЭС (электрические генераторы, частотные преобразователи, трансформаторы электроэнергии и др.). Немаловажным фактором является также высокая стоимость основного и вспомогательного оборудования ЭУ с ОЭЭС, соизмеримая с затратами на атомную ЭУ.

По указанной причине за рубежом на боевых кораблях наблюдается отход от использования полного электродвижения и возвращение к использованию частичного, что подтверждается следующей серией британских фрегатов пр. 26 (с 2017 г. по н.в.) с частичным электродвижением, хотя на предыдущей серии эсминцев пр. 45 (2003 – 2013 гг. постройки) аналогичного водоизмещения ~ 8000 т использовалось полное электродвижение.

Впоследствии не получили также значительного серийного строительства и перспективные эсминцы УРО ВМС США «Zumwalt», серия которых на этапе проектирования предполагалась в 32 ед., впоследствии была сокращена до 16 ед., и к настоящему времени ВМС ограничили лишь 3 ед.

По указанной причине для восполнения устаревающего состава флота в ВМС США принято решение закупить серию фрегатов FREMM в количестве 24 ед. разработки компании Fincantieri, которые будут построены на итальянских верфях.

В настоящее время при обосновании перспектив использования полного электродвижения с ОЭЭС на боевых надводных кораблях, ориентируясь на зарубежный опыт, а также с использованием несложных технико-экономических расчетов, следует отходить от иллюзорного мышления о том, что такая система позволит сократить массу и габариты по сравнению с традиционно используемыми ЭУ за счет исключения из состава установки главных редукторных передач и протяженных линий валов, а также будет

ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПЕРСПЕКТИВНЫХ БОЕВЫХ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

ЧАСТЬ 2*

В.В. Барановский, д-р техн. наук, проф., зам. ген. директора по энергетическим установкам, судовым системам и устройствам АО «ЦМКБ «Алмаз»,
П.Г. Печковский, канд. техн. наук, зам. ген. директора АО «Корпорация морского приборостроения» по науке и развитию,
контакт. тел. (812) 373 8300, 369 1233

способствовать повышению топливной экономичности за счет современных разработок в области корабельного электромашиностроения и т.п. [8, 9].

На самом деле, о чем свидетельствуют расчеты и опыт проектирования таких кораблей, масса и габариты ЭУ с ОЭЭС возрастут не менее чем в 1,5 раза за счет появления в составе установок массивных электрогенераторов, преобразователей частоты, трансформаторов и в особенности ГЭД. От протяженных линий вала также не удастся избавиться, поскольку массивные ГЭД невозможно разместить в кормовой части корабля, а топливная экономичность ЭУ не только не повысится, но и снизится не менее чем на 5% по сравнению с прямодействующими установками передачи крутящего момента от главных двигателей через редукторный агрегат на винт.

Поэтому, избавившись от иллюзий по поводу существенных преимуществ системы электродвижения на боевых кораблях, необходимо окончательно разбраться в ее целевом предназначении, чтобы при проектировании перспективных надводных кораблей, не преувеличивая ее значимости, отводить ей роль только лишь поисковых режимов ПЛО, т.е. того, ради чего эта система задумывалась изначально.

Дело в том, что как на зарубежных, так и на отечественных надводных кораблях система частичного электродвижения, спроектированная изначально для обеспечения малошумных поисковых режимов, на самом деле выполняет две основные задачи:

- собственно обеспечение поисковых малошумных режимов ПЛО с возможностью управления ГЭУ с ходового мостика (*третье целевое предназначение ЭУ*);
- обеспечение проектной дальности плавания корабля и высокой топливной экономичности на маршевых ходах под ГЭД, учитывая, что последние приводятся в движение от высокоэкономичных дизель-генераторов.

Другими словами, на ГЭД вместе с их приводами возлагается еще и вторая задача целевого предназначения ЭУ – обеспечение топливной экономичности на маршевых ходах. Так, в дизель-электрическом режиме работы зарубежные корабли (фрегаты) могут развивать ход до 16 уз при испытании двух ГЭД (немецкий фрегат F125 – до 20 уз), что занимает ок. 65 % потребностей типовых ходовых режимов, включая малошумные противолодочные операции. Именно под ГЭД обеспечивается проектная дальность плавания кораблей в пределах 6000 миль (FREMM) и 7000 миль («Global Combat Ship»).

Учитывая, что серьезные недостатки системы электродвижения (высокая стоимость, габариты и масса, снижение топливной экономичности) нивелируют ее основное преимущество, для перспективных кораблей необходимо ограничивать ее использование лишь для обеспечения малошумных поисковых режимов (как правило, 10 – 12 уз). На более высоких скоростях хода поисковые режимы ПЛО не осуществляются, так как начинается вмешиваться акустический шум винтов.

Расчетами установлено, что двойное преобразование энергии при передаче крутящего момента на винт на маршевых ходах корабля (16 – 18 уз), для которых рассчитывается проектная дальность плавания, способствует существенному снижению топливной экономичности (рис. 16).

При электрическом способе передачи крутящего момента на винт потери неизбежно составят не менее 10%, что в 2 раза превышает аналогичные потери при механическом способе передачи крутящего момента, наибольшую долю которых составляют потери в главном редукторе. Даже в случае использования современных технологий высокотемпературной сверхпроводимости при электрической передаче крутящего момента вышеуказанные потери можно снизить не более чем на 2 – 3%, по эффективности

* Окончание. Начало см. «Морской вестник», 2022, №2 (82)



Рис. 16. Сравнительная характеристика потерь при электрической и механической передачах крутящего момента от теплового двигателя на винт

ти лишь приблизившись к механическому способу передачи.

Во избежание указанного недостатка, а также осознавая безальтернативность использования электрической передачи крутящего момента на винт при поисковых тихоходных режимах, очередным эволюционным шагом в развитии ГЭУ за рубежом стало разделение мощности ГЭУ при обеспечении маршевых ходов.

Дело в том, что на поисковых режимах ПЛО с буксируемой ГАС надводные корабли ходят на скоростях, как правило, 6 – 10 уз, в отдельных случаях – не более 12 уз. Потребная мощность главных двигателей для обеспечения таких скоростей в 3 раза и более меньше по сравнению с мощностью ГЭУ на маршевых ходах для проектной дальности плавания на скоростях 16 – 18 уз. А на скоростях хода до 22 уз, которые конструкторы стремятся обеспечить работой маршевых двигателей – мощность возрастает многократно.

По указанной причине и с учетом обозначенных выше недостатков частичного электродвижения гребной электропривод необходимо использовать только для поисковых режимов ПЛО, а на маршевых ходах, на которых обеспечивается проектная дальность плавания (16 – 18 уз), необходимо вернуться к прямой действующей передаче крутящего момента от дизельного двигателя на винт.

Данный подход позволит, во-первых, существенно (в 2 – 3 раза) снизить массу оборудования системы электродвижения (ГЭД, генераторов электроэнергии, преобразователей, трансформаторов и др.) при сохранении функционального предназначения ЭУ в обеспечении поисковых режимов ПЛО, во-вторых, существенно снизить потери энергии на маршевых ходах, которые свойственны двойному преобразованию энергии при

использовании ГЭД в качестве маршевых двигателей.

За рубежом подобный подход уже реализован компанией RENK путем разработки новой концепции использования электропривода в системе пропульсивного комплекса. В частности, она разработала пропульсивный модуль с высокооборотным гребным электродвигателем, размещенным на единой раме со своей редукторной передачей (рис. 17). Редукторная передача соединяется с линией вала посредством специально разработанной муфты, допускающей смещения в осевом и радиальном направлениях.

Для осуществления поисковых режимов используется высокооборотный гибридный электрический привод (электродвигатель/генератор) меньшей мощности, достаточной для развития скорости хода не более 7 – 10 уз. Указанный электропривод, используемый в составе пропульсивного модуля, вместе со своим редуктором смонтированы на общей

раме. Данная редукторная передача модуля соединяется с линией вала посредством специальной сервоуправляемой соединительной муфты (см. рис. 17).

Такое техническое решение позволяет установить единую раму пропульсивного модуля на корабельном фундаменте через низкочастотные амортизирующие крепления, подсоединив модуль к линии вала после главного редуктора.

Серво-управляемая соединительная муфта обеспечивает как полное расхождение модуля с валолинией при работе главного газотурбинного или дизельного двигателя по схеме CODELOG (англ. COmbined Diesel eLectric Or Gas turbine), так и совместную работу ГТД или ДВС по схеме CODELAG (англ. COmbined Diesel eLectric And Gas turbine). Для уменьшения уровня шума гребной электродвигатель/генератор может быть размещен в звукоизолирующем кожухе.

Впервые подобный подход был использован при создании ЭУ перспективного многоцелевого сторожевого (патрульного) корабля ближней морской зоны класса PPA (Pattugliatori Polivalenti d'Altura) разработки компании Fincantieri для ВМС Италии. Всего запланировано построить 16 единиц, а головной корабль был сдан флоту в 2021 г.

На корабле применяется гибридная ЭУ с многократным дублированием привода (рис. 18). Схема носит не самое простое обозначение – CODAGOL (англ. Combined Diesel And Gas Or (diesel)-eLectric).

Энергетическая установка корабля в своем составе включает: 1×ГТД General Electric/Avio LM2500+G4, мощностью – 32,0 МВт, 2×дизельных двигателя MTU 20V8000M91L, мощностью 2×10,0 МВт, 4×дизель-генератора M.A.N. GenSets 12V175D-MEM,

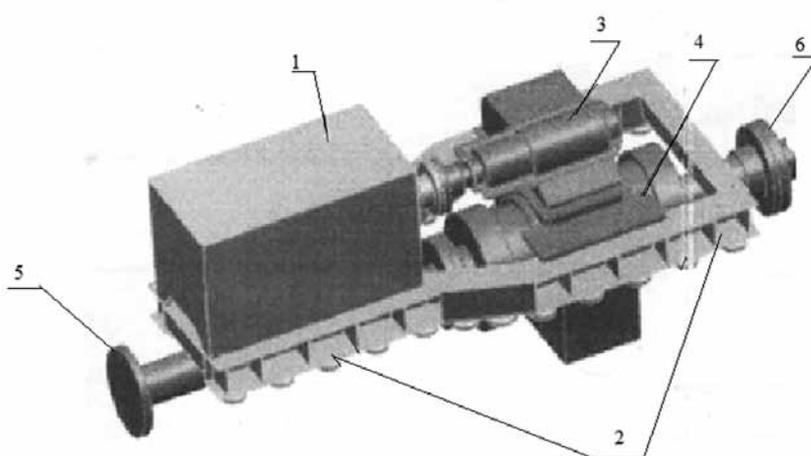


Рис. 17. Общий вид пропульсивного модуля

1 – гибридный электропривод в звукоизолирующем кожухе; 2 – общая рама пропульсивного модуля; 3 – редукторная передача модуля; 4 – серво-управляемая соединительная муфта; 5 – фланцевое соединение модуля с линией вала; 6 – фланцевое соединение модуля с выходным валом редуктора.

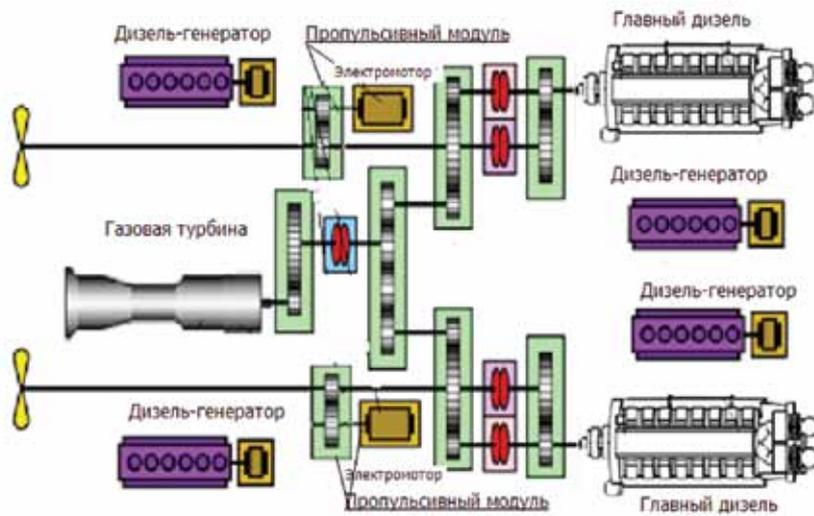


Рис. 18. Структурная схема гибридной ЭУ многоцелевого патрульного корабля РРА ВМС Италии

мощностью 4×640 кВт, 2×реверсивных ГЭД/генератора, мощностью 2×1350 кВт, 2×резервных дизель-генератора Isotta Fraschini 16V170C2ME.

Примечательно, что программа вступления в строй предшественников, многоцелевых фрегатов FREMM, еще только близилась к завершению (в 2020–2021 гг. в состав ВМС успели вступить 8 из 10 кораблей), а компания Fincantieri уже начала работать на перспективу. Она не ограничилась лишь «техническим проектированием», но и были заложены четыре корабля, которые по состоянию на 2022 г. могут рассматриваться как представители самого современного из существующих проектов подобного назначения.

Согласно расчетам, один работающий дизель позволит кораблю маневрировать на скорости 10 – 18 уз. При подключении второго дизеля скорость хода превысит 20 уз. Следующая опция – отключить оба дизеля и запустить газовую турбину, что даст возможность развивать скорость 28 – 29 уз. Четвертая опция – одновременное подключение обоих главных дизелей и газовой турбины, что обеспечивает полный ход 32 уз (проектное значение). Пятый вариант – в случае повреждения дизелей и турбины (или главного редуктора) фрегат способен продолжать движение на одном или двух гребных электромоторах, приводимых в действие основными или аварийными дизель-генераторами. Данный режим также считается основным при патрулировании на малых скоростях (до 7 уз).

С увеличением скорости гребные электромоторы смогут вместе или по отдельности переключаться в генераторный режим, повышая энергетические возможности корабля, что позволяет отключить один или два работающих дизель-генератора.

Для существенного снижения уровня вибрации и шума на поисковых ре-

жимах подводной лодки с помощью серво-управляемой муфты главная редукторная передача может полностью отключаться от валопровода, позволяя вывести из действия главные двигатели (ГТД и ДВС), обеспечив малозумный режим движения корабля только под ГЭД, питаемых электроэнергией от работающих дизель-генераторов.

Подобное схемное решение на сегодняшний день воплощает собой вершину эволюционного развития корабельных ЭУ.

Для реализации подобного технического решения для перспективных боевых кораблей ВМФ РФ потребуются создание пропульсивного модуля, аналогичного разработки компании RENK (см. рис. 17), встраиваемого в линию вала. Техническое решение по разработке стендового образца пропульсивного модуля по предложению АО «ЦМКБ «Алмаз» было внесено в корректируемую ФЦП (2024 – 2033 гг.). Ожидается, что по ее завершении после создания такого образца будет доказана возможность и целесообразность использования такого модуля на перспективных надводных кораблях ВМФ.

Таким образом, согласно *третьему целевому предназначению ЭУ* – обеспечение малозумных поисковых режимов при решении задач ПЛО – в проектно-конструкторских бюро необходимо кардинально пересмотреть устоявшиеся подходы к использованию системы электродвижения на перспективных боевых надводных кораблях.

Основными посылами при обсуждении указанного вопроса должны быть: минимизация мощности гребных электродвигателей в составе ЭУ, достаточной для решения задач ПЛО, и целесообразность использования компактных пропульсивных модулей с высокооборотными ГЭД небольшой мощностью с собственной редукторной передачей

и серво-управляемой соединительной муфтой, обеспечивающей соединение-рассоединение модуля с линией вала и главной редукторной передачей.

Это позволяет на поисковых режимах ПЛО полностью отключать главную редукторную передачу от валопровода с возможностью вывода из действия главных двигателей (ГТД и ДВС), обеспечив малозумный режим движения корабля только под ГЭД, питаемых электроэнергией от работающих дизель-генераторов.

На маршевых ходах корабля, обеспечивающих проектную дальность плавания, появляется возможность вернуться к прямодействующей передаче крутящего момента от главных дизелей через редуктор на винт, исключив двойное преобразование энергии с отключением ГЭД от линии вала.

Разработку компактных пропульсивных модулей перспективных надводных кораблей также целесообразно включить в ГП ОПК.

С учетом того, что низкая технико-экономическая эффективность системы полного электродвижения с ОЭЭС, которая способна обеспечивать энергоемкие боевые потребители электроэнергией, в силу ее недостатков, обозначенных выше, практически не имеет шансов на использование на перспективных боевых надводных кораблях.

В связи с этим возникает вполне логичный вопрос о способах реализации *четвертого целевого предназначения ЭУ* – обеспечения перспективных энергоемких боевых потребителей электроэнергией в объемах, соизмеримых с мощностью главной ЭУ. Достичь указанной цели можно на основании перспективных ГТД 5-го поколения и перспективных ЭУ, создаваемых на их основе.

Суть инновационных подходов состоит в решении компромиссной задачи при формировании облика ЭУ перспективных кораблей – обеспечить энергоемкие потребители оружия и вооружения электроэнергией в больших объемах, не допуская значительного возрастания массы, габаритов и стоимости ЭУ, исключив из ее состава элементы системы полного электродвижения: массивные ГЭД, преобразователи частоты и трансформаторы.

Такое решение возможно путем существенного наращивания мощности генераторов электроэнергии за счет симбиоза использования главных газотурбинных двигателей, обеспечив возможность их работы на полных ходах в режиме приводов главной ЭУ, а при необходимости использования боевых потребителей большой мощности – возможность перевода их в режим привода генераторов, отключив ГТД от главных редукторов. При этом корабль на таких режимах сможет развивать скорости маршевых

ходов (16 – 18 уз, по-возможности до 22 уз) под главными дизельными двигателями. Для отключения-подключения) ГТД от главных редукторов и подключения-отключения) их к электрическим генераторам необходимо использовать автоматизированные синхронизируемые быстроразъемные муфты.

Структурные схемы инновационных ЭУ исполнения CODOGOL (англ. Combined Diesel Or Gas Or (diesel)-eLectric) перспективных кораблей основных классов представлены на рис. 19–21, а перспективных авианосцев – на рис. 22.

Преимущество инновационного схемного исполнения состоит в возможности реализации всех основных четырех целевых предназначений ЭУ с наибольшей эффективностью, без использования громоздких и дорогостоящих ГЭД, преобразователей частоты и трансформаторов электроэнергии, свойственных ОЭЭС. При этом могут обеспечиваться:

- режимы полных ходов кораблей при использовании главных ГТД;
- режимы маршевых ходов с высокой топливной экономичностью при использовании главных дизелей;
- поисковые тихоходные режимы ПЛО при использовании пропульсивных модулей, работающих от дизель-генераторов, с отключением от редукторов линий вала и вывода из действия главных механизмов (ГТД и дизелей);
- боевые режимы работы энергоемких потребителей от ГТД, работающих в режиме приводов генераторов, при этом корабли могут развивать маршевые скорости хода (16 – 18 уз и более) от главных дизельных двигателей.

При сравнении с боевыми режимами использования эсминца УРО ВМС США «Zumwalt» (см. табл. 3), у перспективных кораблей с инновационной ЭУ будет наблюдаться существенное превосходство в скоростных и маневренных характеристиках при ведении боевых действий. Кроме того, такая установка существенно менее громоздка, а ее стоимость будет незначительно отличаться от традиционно используемых ЭУ с прямым действующей передачей крутящего момента на винт.

Отличительной особенностью схемного исполнения ЭУ перспективных авианосцев (см. рис. 21) является отсутствие необходимости использования пропульсивных модулей или электродвижения, так как корабли такого класса не осуществляют поисковых режимов ПЛО с буксируемой гидроакустической станцией, отдавая эту функцию кораблям охранения.

Основным препятствием на сегодняшний день для реализации указанного технического решения является

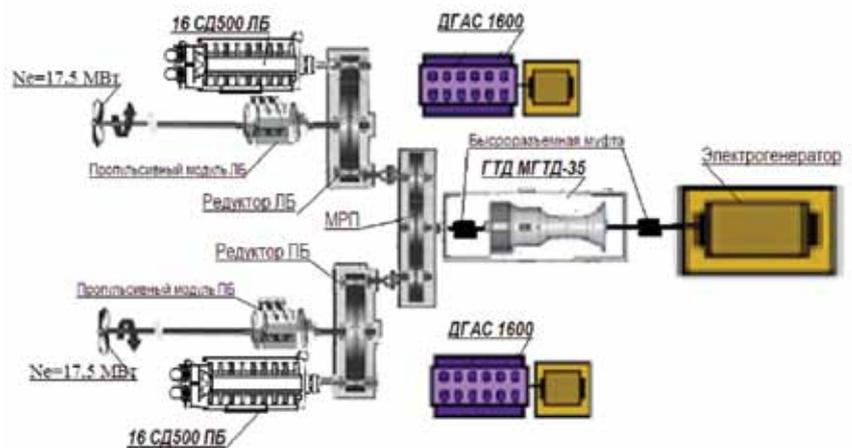


Рис. 19. Структурная схема ЭУ перспективного корвета ($D \approx 3400$ т) и фрегата ($D \leq 6500$ т)

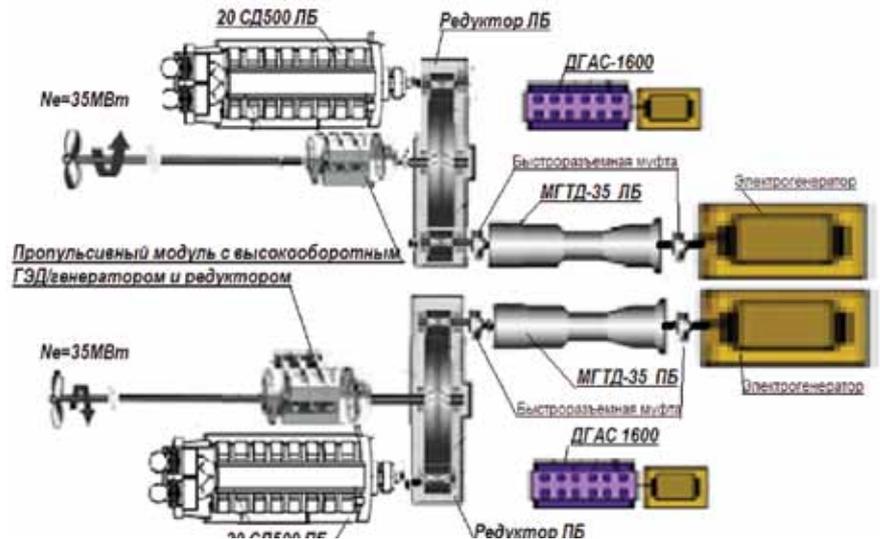


Рис. 20. Структурная схема ЭУ перспективного фрегата ($D \approx 8000$ т) и эскадренного миноносца ($D \approx 10000$ т)

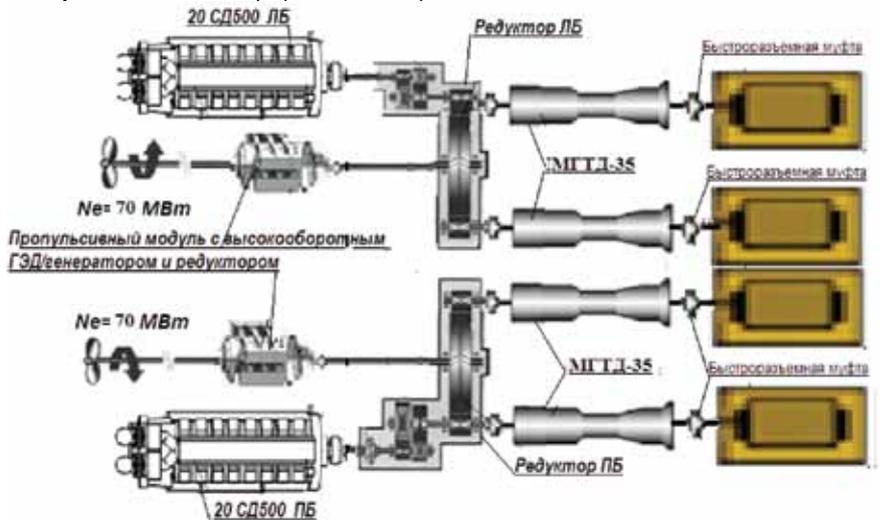


Рис. 21. Структурная схема ЭУ перспективного тяжелого эсминца ($D \approx 14000-19000$ т)

отсутствие инновационных газотурбинных двигателей 5-го поколения большой мощности, которые могут работать как на пропульсивную установку (с выходом вала отбора мощности со стороны компрессора) (рис. 23), предназначенного для десантных кораблей «Зубр» и «Мурена».

Особенностью конструктивного исполнения двигателя является наличие

особенностью конструктивного исполнения двигателя является наличие

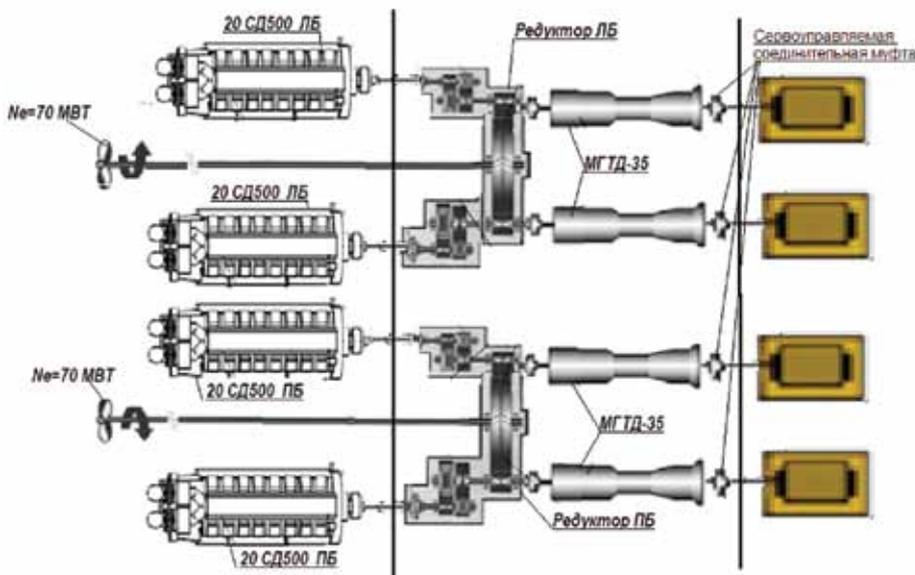


Рис. 22. Структурная схема ЭУ перспективного легкого ($D \approx 45000$ т) и среднего авианосцев ($D \approx 65000$ т)

центрального вала, жестко соединенного с валом силовой турбины, на котором крепится фланец отбора мощности (схемное исполнение «с выходом вала вперед»). Учитывая, что данный ГТД создавался на основе двигателя М70ФРУ, где фланец отбора мощности расположен со стороны силовой турбины, то на двигателе М70ФРУ-2 указанная особенность, т.е. отбор мощности со стороны силовой турбины также сохранилась.

Наличие ГТД М70ФРУ-2 позволяет утверждать, что подобное техническое решение может быть реализовано и при создании перспективного ГТД 5-го поколения МГТД-35.

С учетом появления в ближайшей перспективе энергоемких видов оружия и вооружения, а также электромагнитных катаapult, потребляющих большие объемы электроэнергии, в техническом задании на НИОКР при разработке корабельных ГТД 5-го поколения должны быть прописаны два неотъемлемых условия:

- обеспечение возможности работы ГТД как на пропульсивную установку, так и в генераторном режиме, для чего необходимо предусмотреть два фланца отбора мощности (со стороны силовой турбины и со стороны компрессора);
- частота вращения перспективного ГТД на номинальной нагрузке, учитывая его возможность работы в генераторном режиме, должна составлять ~3000 об/мин, для обеспечения частоты переменного тока 50 Гц.

Разработку перспективных газотурбинных двигателей 5-го поколения МГТД-35 с учетом оказанных конструктивных особенностей также целесообразно включить в ГП ОПК.

Таким образом, интенсивное развитие корабельного оружия и вооружения, изменение характера и способов ведения вооруженной борьбы на море, накладывают определенные специфические особенности на развитие и совершенствование корабельной энергетики, которые не свойственны энергетике гражданского

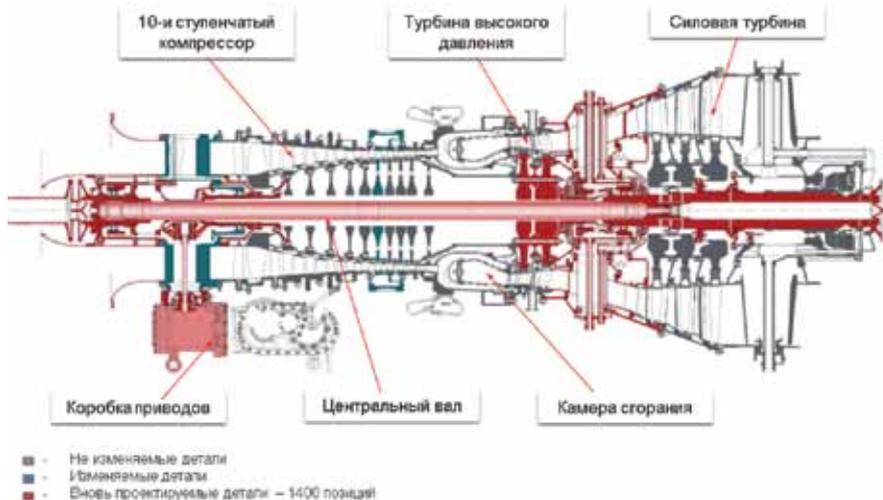


Рис. 23. Разрез газотурбинного двигателя М70ФРУ-2

сектора или даже судовой. Это означает, что направленность развития ЭУ перспективных кораблей не может определяться стихийно, на основе разрозненных устоявшихся подходов конструкторских бюро, энергомашиностроителей, научно-исследовательских организаций, работающих в интересах ВМФ и др. При определении приоритетных направлений развития ЭУ многоцелевых надводных кораблей должны быть консолидированы усилия указанных организаций.

Обозначенные направления развития корабельных ЭУ, по мнению авторов, являются инновационными и способны удовлетворять всему спектру целевого предназначения с высокой степенью технико-экономической и военной эффективности. В то же время многие предлагаемые подходы могут носить дискуссионный характер, поэтому авторы призывают специалистов в данной области и неравнодушных к проблемам развития отечественного ВМФ принять активное участие в обсуждении материалов статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шляхтенко А.В., Захаров И.Г., Барановский В.В. Тенденции эволюционного развития схемного исполнения энергетических установок многоцелевых надводных кораблей//Морской вестник. – 2021. – №3(79).
2. Шляхтенко А.В., Захаров И.Г., Барановский В.В. Анализ обоснованности технических решений при формировании облика энергетических установок перспективных кораблей//Морской вестник. – 2021. – №4(80).
3. А91108201ТУ. Газотурбинный двигатель М90ФР. Технические условия.
4. Чутин П.В. Российский газотурбинный двигатель М90ФР. – Докл. на секции НТО им. А.Н. Крылова 21.03.2018 г., СПб.
5. Чутин П.В. Результаты работы по импортозамещению украинских морских ГТД. – Докл. на межотрасл. науч.-практ. конфер. «ВОКОР-2018». ВУНЦ ВМФ «НИИ КиВ», СПб., 2018.
6. Хализов А. Перспективный фрегат проекта F-125 ВМС Германии//Зарубежное военное обозрение. – 2009. – №5. – С.67-74.
7. Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 336 «О внесении изменений в подпрограмму «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011–2015 годах дизельных двигателей и их компонентов нового поколения» федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» на 2007 – 2011 годы».
8. Шинкоренко Д. Перспективы развития энергетических установок надводных кораблей ВМС зарубежных стран// Зарубежное военное обозрение, 2007. – № 1. – С.54–61 и № 3. – С.58–61.
9. Шинкоренко Д. Разработка новых энергетических установок за рубежом – шаг к кораблям нового поколения// Зарубежное военное обозрение. – 2010. – №11. – С. 62–70. ■