

УДК: 621.436:621.438

DOI: 10.53816/23061456_2021_7-8_136

**ОБОСНОВАНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
В ОБЛАСТИ КОРАБЕЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
МНОГОЦЕЛЕВЫХ КОРАБЛЕЙ**

**JUSTIFICATION OF INNOVATIVE TECHNICAL SOLUTIONS IN THE FIELD OF
SHIPBOARD POWER SUPPLY OF NEW MULTIPURPOSE SHIPS**

Канд. техн. наук П.Г. Печковский

Ph.D. P.G. Pechkovsky

Департамент МО РФ по обеспечению ГОЗ

В статье на основе анализа развития корабельных энергетических установок ведущих морских держав, а также опыта разработки и создания энергетической установки корвета «Меркурий», обосновывается облик унифицированной энергетической установки перспективных кораблей основных классов, в котором применяется схемное исполнение с одним газотурбинным двигателем большой мощности, работающим через межредукторную перекидку на обе линии вала, и двумя гребными электродвигателями, обеспечиваемыми электропитанием от двух или четырех дизель-генераторов.

Глубокая унификация основного оборудования энергетических установок перспективных боевых кораблей определяется соблюдением принципа: «один газотурбинный двигатель и один агрегат для боевых надводных кораблей основных классов — от корвета до легкого авианосца».

Ключевые слова: инновация, Военно-Морской Флот, Военно-морские силы, боевые надводные корабли, многоцелевые корабли, газотурбинные двигатели, корабельные энергетические установки, схемное исполнение энергетических установок, частичное электродвижение, гребные электродвигатели.

The article justifies the configuration of the unified power plant of new main class ships based on the analysis of the marine power plants development in the leading maritime nations, and also the experience of development of the Mercury corvette's power plant where the design with one high-power gas turbine engine operating through a gear-to-gear jumper to both shaft lines and two propulsion motors supplied from two or four diesel generators is used.

Deep unification of the main equipment of new combat ship power plants is determined by compliance with the following principle: «one gas turbine engine and one unit for combat surface ships of the main classes — from a corvette to a light aircraft carrier».

Keywords: innovation, Navy, Naval Forces, surface ships, multipurpose ships, gas turbine engines, marine power plants, design of power plants, partial electric propulsion, propulsion motors.

Анализ опыта ведущих морских держав в области корабельного энергомашиностроения [1–3], свидетельствует о том, что вопреки расхожему мнению о превосходстве корабельных газотурбинных двигателей (ГТД), по сравнению с остальными типами тепловых двигателей, более чем два десятилетия подряд наблюдается устойчивая тенденция минимизации ГТД в схемном исполнении энергетических установок перспективных надводных кораблей. Второй тенденцией в развитии корабельной энергетики зарубежных многоцелевых кораблей, является безальтернативность использования системы электродвижения, в особенности частичного, на поисковых режимах подводных лодок.

В облике корабельной энергетической установки (КЭУ) серийно строящихся зарубежных кораблей класса фрегат, и кораблей других классов, окончательно утвердилось схемное исполнение с одним ГТД большой мощности, работающим через межредукторную перекидку на обе линии вала, и двумя гребными электродвигателями, обеспечиваемыми электропитанием от двух или четырех дизель-генераторов. Подобное схемное исполнение КЭУ многоцелевых кораблей на сегодняшний день является «пиком» инновационного развития корабельной энергетики и используется за рубежом на серийно строящихся фрегатах, таких как: серии FREMM для ВМС Франции и Италии, проекта 26 для британских ВМС, серии F125 для ВМС Германии и серии PRA для ВМС Италии.

При обосновании облика энергетических установок перспективных многоцелевых кораблей, безальтернативность использования частичного электродвижения на поисковых режимах объясняется малощумностью и плавностью изменения хода корабля. Но минимизацию состава ГТД в структуре КЭУ объяснить гораздо сложнее, в связи с различного рода сомнениями среди конструкторов по поводу структурной надежности и живучести КЭУ.

При минимизации ГТД в составе КЭУ конструкторы исходят из следующих соображений: во-первых, значительная загроможденность пространства корабельных помещений воздухоприемными и газовыхлопными устройствами мешает размещению полезной нагрузки, в особенности на кораблях ограниченного водоизмещения. Загроможденность указанными устройствами

в разы превышает аналогичные объемы, при использовании дизельных двигателей и даже паротурбинных установок.

Во-вторых, значительное ухудшение экономичности ГТД при работе на малых нагрузках. Так, например, на нагрузках менее 50 % от номинальной экономичность газотурбинного двигателя стремительно снижается, а на нагрузке около 10 % — удельный расход топлива ГТД (г/(кВт·ч)) в пять раз превышает значение при работе двигателя на номинальной нагрузке.

В-третьих, нельзя не учитывать ресурсные ограничения ГТД при работе на больших нагрузках, т.е. на нагрузках с приемлемой экономичностью. Дело в том, что нагрузки, на которых газотурбинные двигатели работают с относительно высокой экономичностью значительно ограничены ускоренным истощением ресурса последних (рис. 1).

Так, например, при работе ГТД М90ФР на нагрузках в диапазоне от 80 % до 100 % от номинальной (16,0–20,0 МВт), при заявленном производителем ресурсе двигателя до капитального ремонта в 20000 ч, полное истощение ресурса произойдет всего через 350 ч (рис. 1) [4]. При работе ГТД на нагрузках в диапазоне от 70 % до 80 % от номинальной (14,0–16,0 МВт) полное израсходование ресурса произойдет через 1000 ч, а при работе с нагрузкой в диапазоне от 60 % до 70 % от номинальной (12,0–14,0 МВт) израсходование ресурса произойдет через 10000 ч [4].

Таким образом, заявленный ресурс до капитального ремонта в 20000 ч., обеспечивается на нагрузках менее 60 % от номинальной, т.е. $\leq 12,0$ МВт [4]. С учетом ограничений по ресурсу, зона относительно благоприятной экономичности ГТД получается очень узкой — в диапазоне нагрузок 50–60 % от номинальной (10,0–12,0 МВт) (рис. 1). Указанное обстоятельство делает практически невозможным обеспечить высокую дальность плавания корабля при использовании только лишь ГТД. Это также одна из основных причин принятия конструкторами решения по использованию дизель-электрической схемы передачи крутящего момента на винт на скоростях экономического хода.

Поэтому, в соответствии с основными мировыми тенденциями в области корабельного энергомашиностроения, а также с учетом ограничений при использовании в составе КЭУ га-

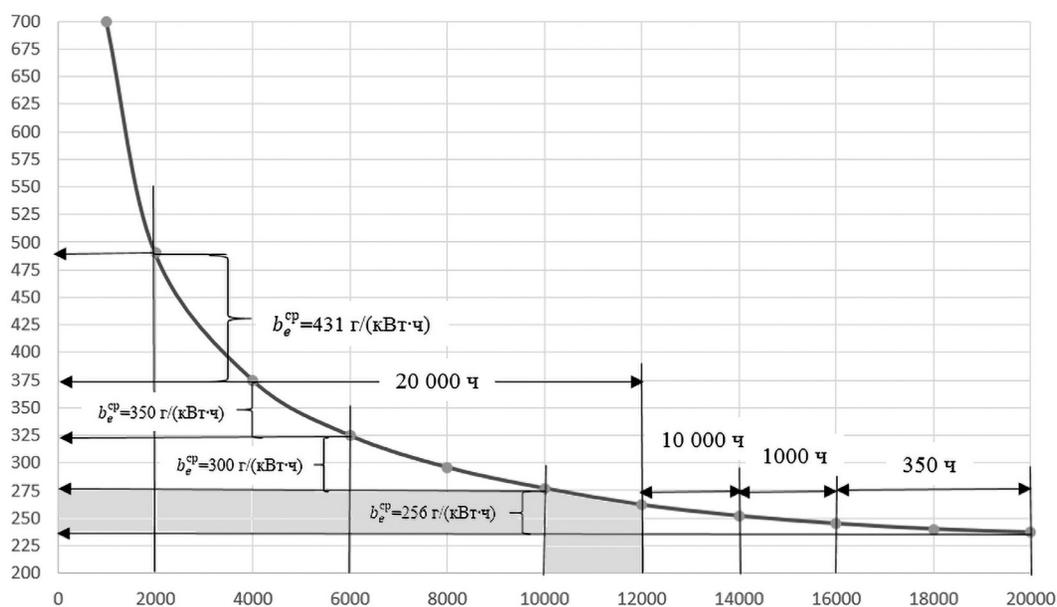


Рис. 1. Изменение удельного расхода топлива ГТД М90ФР в зависимости от нагрузки

зотурбинных двигателей, указанных выше, впервые в отечественном ВМФ при проектировании перспективного корвета морской зоны проекта 20386 «Меркурий», было внедрено схемное решение CODLOG (англ. COmbined Diesel-eLectric Or Gas turbine) с частичным электродвижением (рис. 2).

В своем составе энергетическая установка (ЭУ) включает (рис. 2) газотурбинный агре-

гат МАЗ с двумя газотурбинными двигателями М90ФР в капоте, работающими каждый на свой редуктор и межредукторную перекидку (МРП), обеспечивающую работу любого одного ГТД на обе линии вала. К редукторам левого и правого бортов подключены гребные электродвигатели (ГЭД) АДР-1600, обеспечивающие кораблю движение маршевыми ходами на скоростях хода до 14 уз. Электропитание ГЭД обеспечивается от

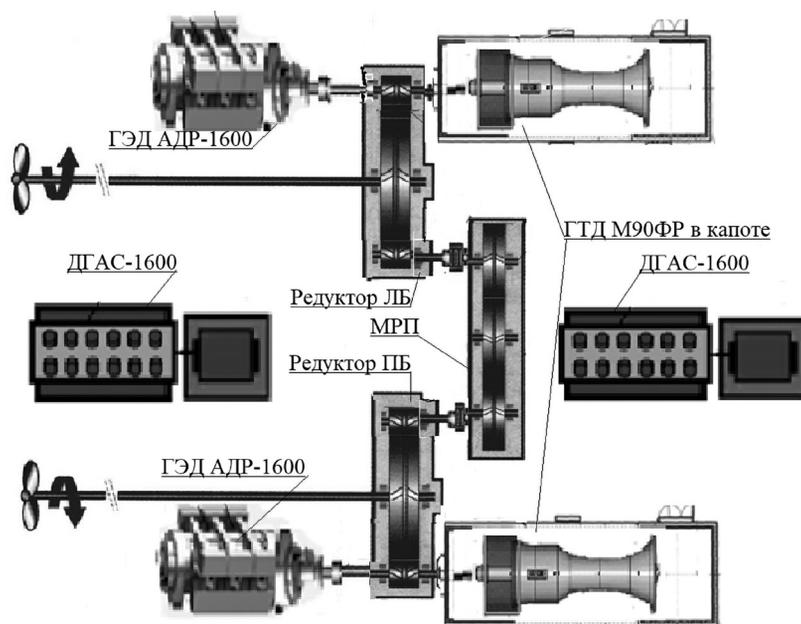


Рис. 2. Структурная схема энергетической установки корвета «Меркурий»

2-х дизель-генераторов ДГАС-1600, разработанных с использованием перспективного дизеля V16 ДМ185 производства Уральского дизель-моторного завода. В схеме ЭУ также предусмотрена возможность работы любого одного ГЭД на обе линии вала. Такое схемное решение КЭУ отличают высокая надежность и живучесть.

Применить схему с одним ГТД, работающим через МРП на обе линии вала, по аналогии с западными аналогами, конструкторам не позволило отсутствие высокоэффективного газотурбинного двигателя большой мощности, аналогичного ГТД RR MT30 (мощностью 36 МВт) или GE LM2500 G4 (мощностью 35 МВт).

Разработка и создание энергетической установки корвета «Меркурий», соответствующей передовым мировым аналогам в области корабельного энергомашиностроения, а также полученные при этом компетенции и опыт, могут служить отправной точкой для проведения исследований по распространению передовых инновационных технологий на энергетические установки перспективных надводных кораблей основных классов.

Так, в соответствии с поручением заместителя Министра промышленности и торговли РФ О.Н. Рязанцева от 24.03.2021 г. № РО-45, очевидно следует разработать предложения с пе-

речнем базовых и критических промышленных технологий для внедрения в корабельной энергетике, с целью внесения их в федеральную целевую программу (ФЦП), корректировка которой в рамках действующей ФЦП 2018–2027 гг. будет производиться на период 2024–2033 гг.

Суть инновационных предложений может состоять в глубокой унификации основного оборудования энергетических установок перспективных боевых кораблей, которые можно выразить следующей фразой: «один газотурбинный двигатель и один агрегат для боевых надводных кораблей основных классов — от корвета до легкого авианосца».

Для реализации указанной концепции, во-первых, необходимо в рамках ФЦП запланировать мероприятия по разработке перспективного корабельного ГТД 5-го поколения большой мощности ($N_e \geq 35$ МВт), о готовности создания которого неоднократно заявляет ПАО «ОДК-Сатурн» (рис. 3) [5–7].

Характеристики перспективного двигателя МГТД-35 представлены в табл.1.

Из анализа характеристик, следует, что МГТД-35 не должен уступать разработанным зарубежным аналогам по агрегатной мощности и по КПД. Масса перспективного двигателя, без рамы и газоотвода, должна составить ~ 6,4 т, что

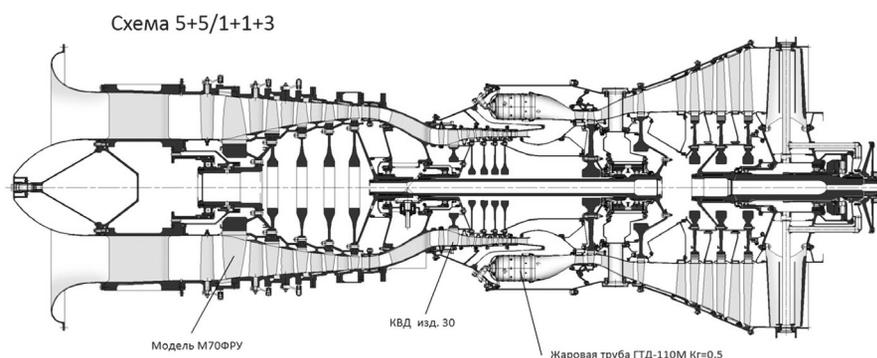


Рис. 3. Разрез перспективного корабельного ГТД 5-го поколения МГТД-35 (проект ПАО «ОДК-Сатурн»)

Таблица 1

Сравнительные характеристики корабельных ГТД

Характеристики	LM2500+	LM2500+G4	MT30	МГТД-35
Мощность, МВт	29,0	35,32	36,0	25...35
КПД на валу СТ (ISO), %	39	39,5	39,7	≥ 40
$\pi_k \Sigma$	25...30	—	—	—
Температура газа перед 1-м сопловым аппаратом турбины, К	1500...1580	—	—	—

практически в два раза меньше массы базового ГТД М90ФР (~ 11,6 т).

Существенное снижение массы перспективного ГТД происходит за счет уменьшения числа ступеней компрессора низкого давления (КНД) и компрессора высокого давления (КВД) практически в два раза, по сравнению с базовым двигателем М90ФР, а также числа ступеней силовой турбины (схема двигателя 5+5/1+1+3), при улучшении его теплофизических характеристик.

Габариты двигателя по сравнению с ГТД М90ФР также снижены ($L=4040$ мм, $D_{\text{вх}}=1054$ мм, $D_{\text{кс}}=1947$ мм, $D_{\text{ст}}=1676$ мм).

В рамках действующей ФЦП 2018–2027 гг. на основе базового двигателя М90ФР уже предусмотрена разработка форсированного по мощности на 25 % ГТД М90ФРМ (мощностью 25 МВт), что также является мероприятием, востребованным ВМФ. Наличие ГТД большой мощности позволит расширить диапазон работы ГТД с относительно высокой экономичностью без ущерба для ускоренного истощения ресурса (рис. 4) [8].

Так, например, диапазон нагрузок относительно экономичной работы ГТД без ущерба для ускоренного истощения ресурса у двигателя М90ФРМ составит 10–15 МВт, а у перспективного двигателя 5-го поколения МГТД-35 составит 10–20 МВт. Это связано с тем, что при ис-

пользовании в составе пропульсивной установки ГТД большей мощности, чем это требуется по проекту для развития скорости полного хода, мы закладываем резерв, который впоследствии позволяет эксплуатировать двигатель на скоростях полного хода без ущерба для ускоренного истощения ресурса.

Принимая такие решения, следует иметь в виду, что удельный расход топлива у двигателей М90ФР, М90ФРМ и МГТД-35 на нагрузках менее 10 МВт, практически совпадает [4–6, 8]. Это значит, что опасения конструкторов при комплектовании ГЭУ газотурбинными двигателями с заложенным резервом по мощности, по поводу снижения их экономичности на малых нагрузках по сравнению с базовым ГТД М90ФР, являются совершенно напрасными (рис. 4).

Минимальный удельный расход топлива у каждого двигателя наблюдается на номинальной нагрузке, ограниченной ускоренным истощением ресурса, соответственно у ГТД М90ФР — 0,236 г/(кВт·ч), у ГТД М90ФРМ ~ 0,227 г/(кВт·ч), а у ГТД МГТД-35 ~ 0,211 г/(кВт·ч) [5, 6, 8].

Подобный способ расширения диапазона экономичной работы ГТД без ускоренного истощения ресурса реализуется на эсминцах ВМС США типа «Arleigh Burke» 3-й серии, где устанавливаются форсированные ГТД GE LM2500+ мощностью 29 МВт, с ограничением номиналь-

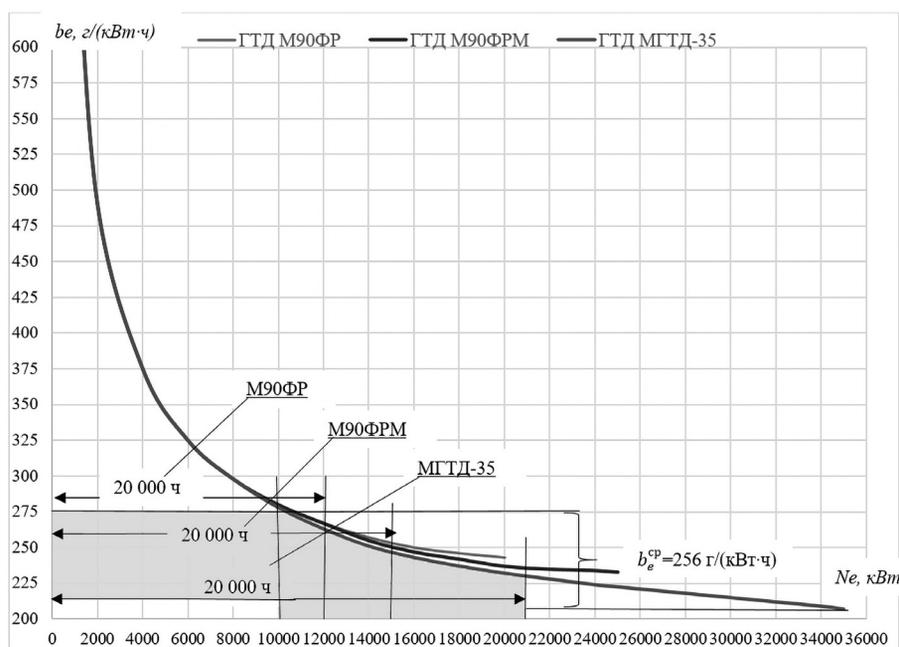


Рис. 4. Изменение удельного расхода топлива ГТД М90ФР, М90ФРМ и МГТД-35 в зависимости от нагрузки

ной мощности до 22 МВт, которой достаточно для развития скорости полного хода кораблем.

Вторым инновационным решением в корабельной энергетике перспективных надводных кораблей, которое также должно решаться в рамках ФЦП 2024–2033 гг., является необходимость разработки унифицированного редукторного агрегата с дизель-электрической приставкой, который без существенных изменений может использоваться в пропульсивных комплексах кораблей основных классов, таких как например, корветы водоизмещением более 3000 т, фрегаты водоизмещением до 8000 т, эскадренные миноносцы водоизмещением 10000–12000 т и легкие авианосцы водоизмещением до 70000 т.

Для реализации указанной цели за основу может быть взят редуктор агрегата МА3 корвета «Меркурий» (рис. 2), размеры колеса 2-й ступени которого позволяют размещать его в корпусе кораблей относительно небольшого водоизмещения (от 3000 т) и передавать крутящий момент от ГТД М90ФР мощностью 20 МВт на винт, частота вращения которого удовлетворяет условиям высокого КПД, и условиям акустической скрытности корабля. Это означает, что такой редуктор без существенных доработок можно унифицировать для использования в пропульсивных комплексах надводных кораблей широкого спектра классов с перспективными газотурбинными двигателями М90ФРМ и МГТД-35.

Так, например, наличие ГТД высокой агрегатной мощности и унифицированного редуктора с межредукторной перекидкой, позволит их использовать в составе агрегата схемного исполнения CODLOG с одним ГТД МГТД-35, работающим на обе линии вала и двумя ГЭД (рис. 5).

Подобную схему можно применять на корветах водоизмещением более 3000 т и фрегатах, водоизмещением до 7000 т. При этом скорость полного хода корвета составит порядка 30 уз, а фрегата порядка 28–29 уз. Для обеспечения маршевых тихоходных режимов со скоростью до 16 уз включительно, для корвета понадобится использовать два ГЭД мощностью $\sim 2 \times 2,0$ МВт, а для фрегата два ГЭД мощностью $\sim 2 \times 4,0$ МВт.

Аналогичное схемное решение пропульсивных установок используется на серийно строящихся европейских фрегатах типов: FREMM (Frigates Europeenne Multi-Mission) ВМС Франции и Италии, проекта 26 британских ВМС, F125 ВМС Германии и многоцелевого сторожевого корабля ближней морской зоны PPA (Pattugliatori Polivalenti d'Altura) ВМС Италии, символизирующие собой пик эволюционного развития корабельной энергетики.

Для кораблей более крупного водоизмещения, таких как, например, фрегатов водоизмещением 8000–10000 т, или эскадренных миноносцев водоизмещением 10000–12000 т, может быть предложена схема с использованием унифици-

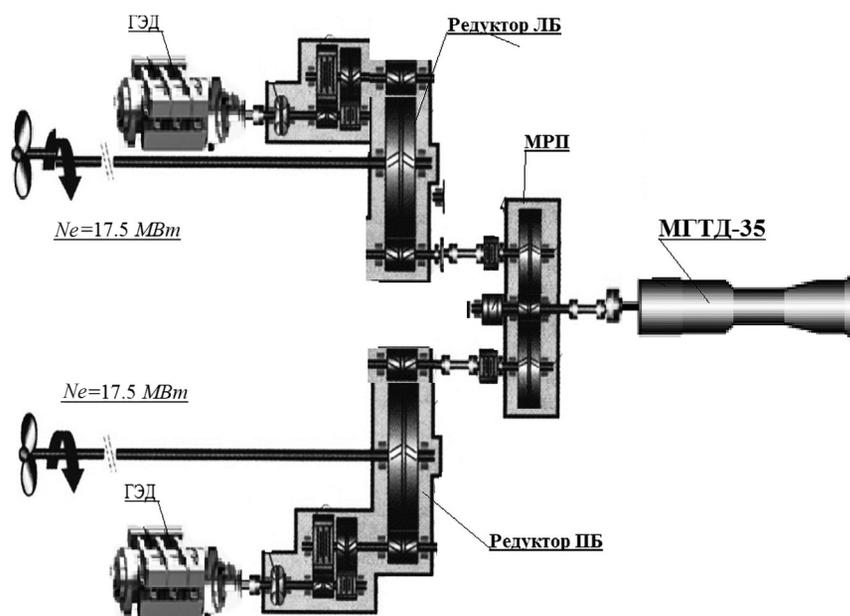


Рис. 5. Принципиальная схема агрегата с одним ГТД МГТД-35, работающим на обе линии вала и двумя ГЭД

рованного редуктора и МГТД-35 с одним ГЭД, работающих на одну линию вала (рис. 6).

Использование двух таких агрегатов в составе пропульсивных комплексов кораблей позволит получить суммарную мощность на обеих линиях вала около 70,0 МВт, что обеспечит развитие скорости полного хода фрегатам не менее 30 уз, а эсминцам — 28–29 уз.

Для обеспечения тихоходных режимов экономической скоростью до 16 уз включительно, для фрегата понадобится использовать два ГЭД мощностью $\sim 2 \times 4,0\text{--}5,0$ МВт, а для эсминца два ГЭД мощностью $\sim 2 \times 5,0\text{--}6,0$ МВт.

Для тяжелых надводных кораблей, таких как, например, эскадренный миноносец водоизмещением более 14000 т, или легкий авианосец водоизмещением до 70000 т, может быть предложена схема с использованием унифицированного редуктора и двух МГТД-35 с одним ГЭД, работающих на одну линию вала (рис. 7).

Использование двух таких агрегатов в составе пропульсивных комплексов кораблей по-

зволит иметь суммарную мощность на обеих линиях вала порядка 140 МВт, что для авианосца обеспечит скорость полного хода не менее 28 уз, а для тяжелого эсминца такая мощность будет явно избыточной. Поэтому для такого корабля, по аналогии с эсминцами ВМС США «Arleigh Burke», верхняя планка мощности МГТД-35 может быть ограничена до 25–30 МВт, что позволит кораблю развивать скорость полного хода более 30 уз, либо возможно использовать в составе ЭУ форсированные ГТД М90ФРМ, создание которых заложено в действующей ФЦП 2018–2027 гг.

Для обеспечения тихоходных режимов экономической скоростью до 16 уз включительно, для тяжелого эсминца понадобится использовать два ГЭД мощностью $\sim 2 \times 6,0\text{--}7,0$ МВт, а для легкого авианосца два ГЭД мощностью $\sim 2 \times 8,0$ МВт.

Реализация указанных технологий позволит переосмыслить взгляды конструкторов, которые, до недавнего времени, можно было охарактери-

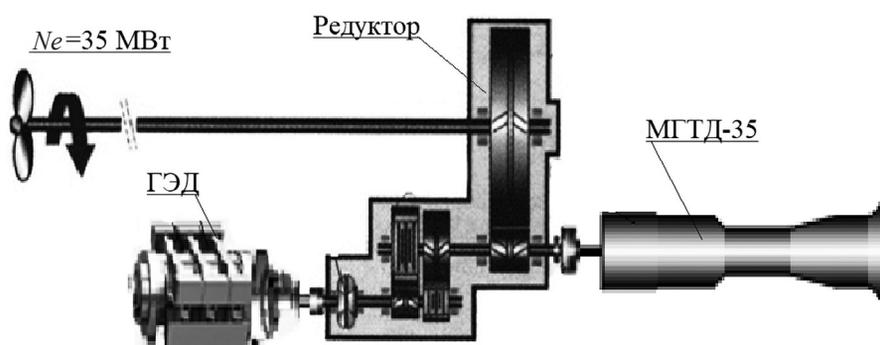


Рис. 6. Принципиальная схема агрегата с одним ГТД МГТД-35 и одним ГЭД, работающих на одну линию вала

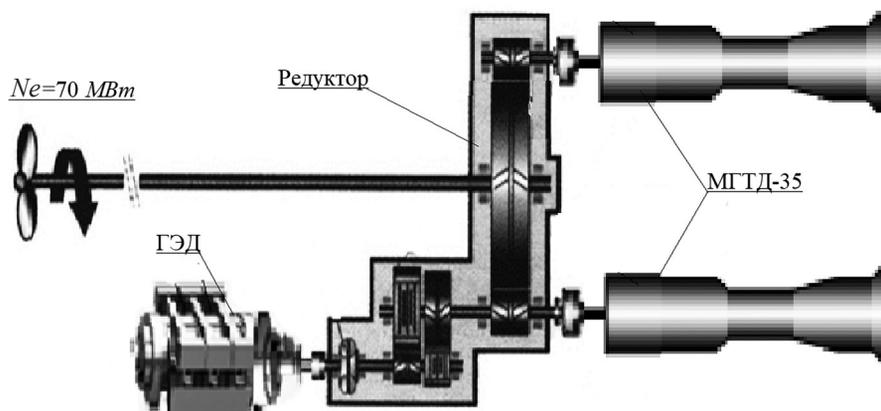


Рис. 7. Принципиальная схема агрегата с двумя ГТД МГТД-35 и одним ГЭД, работающими на одну линию вала

ризовать как «эксклюзивная (индивидуальная) КЭУ для кораблей каждого класса» и перейти к концепции «использование унифицированной ЭУ с одним типом ГТД и унифицированным редуктором для всех кораблей основных классов». Практическая реализация указанной концепции позволит существенно, на длительную перспективу, сократить проблемные вопросы, материальные ресурсы и финансовые издержки, связанные с разработкой и созданием энергетических установок перспективных кораблей основных классов.

Внедрение концепции «один тип унифицированного ГТД и один унифицированный редуктор для кораблей основных классов» позволит реализовать принцип глубокой унификации основного оборудования корабельных энергетических установок боевых кораблей, давно реализованный в ВМС США, но на более глубоком и современном уровне — оснатив газотурбинный унифицированный агрегат дизель-электрической приставкой для передачи крутящего момента на винт на маршевых ходах.

Литература

1. Захаров И.Г., Арефьев Я.Д., Воронович Н.А. Научные проблемы корабельной энергетики. РАН // Российская наука Военно-Морскому Флоту. — М. 1997. С. 210–254.
2. Шинкоренко Д. Перспективы развития энергетических установок надводных кораблей ВМС зарубежных стран. Зарубежное военное обозрение. 2007. № 1. С. 54–61 и № 3. С. 58–61.
3. Шинкоренко Д. Разработка новых энергетических установок за рубежом — шаг к кораблям нового поколения. Зарубежное военное обозрение. 2010. № 11. С. 62–70.
4. Газотурбинный двигатель М90ФР. Технические условия. А91108201 ТУ.
5. Чупин П.В. Российский газотурбинный двигатель М90ФР. Доклад на секции НТО им. А.Н. Крылова 21.03.2018 г. — СПб. 2018 г.
6. Чупин П.В. Результаты работы по импортозамещению украинских морских ГТД. Доклад

на межотраслевой научно-практической конференции «ВОКОР-2018». — СПб: ВУНЦ ВМФ «НИИ КиВ». 2018.

7. ОДК формирует научно-технический заказ для создания морских двигателей 5-го поколения. Интернет ресурс: <https://www.aviaport.ru/digest/2018/03/01/529125.html>

8. Печковский П.Г. Обоснование наиболее предпочтительных вариантов главных энергетических установок многоцелевых надводных кораблей // Журнал «Морской вестник». № 2 (78). 2021. С. 66–71.

References

1. Zakharov I.G., Arefyev Ya.D., Voronovich N.A. Scientific challenges of shipboard power supply. RAS // Russian Science for the Navy. — M. 1997. P. 210–254.
2. Shinkorenko D. Prospects for development of power plants in naval surface ships of foreign countries. Foreign military review. 2007. № 1. P. 54–61 and № 3. P. 58–61.
3. Shinkorenko D. Development of new power plants abroad — step towards new generation ships. Foreign military review. 2010. № 11. P. 62–70.
4. M90FR gas turbine engine. Specifications. А91108201 ТУ.
5. Chupin P.V. Russian M90FR gas turbine engine. Speech at section of NTO named after A.N. Krylov. March 21, 2018. — SPb. 2018.
6. Chupin P.V. Results of work on import substitution of Ukrainian marine GTEs. Speech at inter-industry scientific and practical conference VOKOR-2018. Military Scientific and Technical Center of the Navy «Scientific Research Institute of Shipbuilding and Arms». — SPb. 2018.
7. The UEC generates a scientific and technical reserve to design the 5th generation marine engines. Web resource: <https://www.aviaport.ru/digest/2018/03/01/529125.html>
8. Pechkovsky P.G. Justification of the most preferable options of main power plants in multipurpose surface ships // Morskoy Vestnik journal. № 2 (78). 2021. P. 66–71.