

УДК 621.437

В.Н. Литошенко, канд. техн. наук, доцент*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: emss@stel.sebastopol.ua***ВЛИЯНИЕ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ СУДНА ЗА СЧЕТ
ГЛАВНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЭУ**

Предлагается комплексный анализ эффективности СЭУ в зависимости от степени централизации энергоснабжения и утилизации теплоты вторичных энергоресурсов главного двигателя эффективной мощности до 5 МВт.

Снижение эксплуатационных расходов судна за счёт полного перевода СЭУ на средневязкие (СВТ) или высоковязкие топлива (ВВТ) даже при постоянно работающем агрегате топливopодготовки не всегда возможно реализовать для высокооборотных маломощных дизель-генераторов (ДГ). Целью статьи является исследование условий выработки электрической и тепловой энергии за счёт главного двигателя (ГД) – централизации СЭУ.

На судах с главной электропередачей энергоснабжение полностью централизовано за счёт отбора части мощности главных дизель-генераторов (ГДГ) или турбо-генераторов (ТТГ) на вспомогательные нужды (РСэс), и коэффициент централизации энергоснабжения составляет $K_c = 1$.

Во второй половине XX столетия наибольшее распространение получили главные электропередачи постоянного тока. Было налажено серийное производство отечественных ГДГ и гребных электродвигателей (ГЭД) постоянного тока для ледоколов и ледокольно-транспортных судов, которые обеспечивают увеличение крутящего момента на ступице винта при снижении его оборотов из-за большого сопротивления вращению при ходе в шуге.

Независимо от режима нагружения и частоты вращения электропередача позволяла реализовать большие пропульсивные мощности $N_{пр}$ гребных электродвигателей, обеспечить энергоснабжение вспомогательных нужд. Парциальное использование ГДГ на эксплуатационных режимах позволяло оптимизировать снижение расхода топлива, масла, экономии моторесурса.

Эти же ГДГ использовались для транспортных рефрижераторов, имеющих большие потребности в электроэнергии для охлаждения рефрижераторных трюмов (например, транспортный рефрижератор (ТР) «Таврия» мощностью 4 ГДГ по 736 кВт типа 6ЧН 31,6/33-1, ТР «Севастополь» мощностью 4 ГДГ по 1320 кВт типа 10Д 20,7/2-25,4 и др.), аварийно-спасательных судов с необходимостью перераспределения электроэнергии между пропульсивным комплексом и мощными противопожарными насосами, буксиров и других судов, требующих повышенных маневровых качеств.

Для судов, требующих больших мощностей как постоянного, так и переменного тока, выполняются две главные судовые электростанции (СЭС) на переменном и постоянном токе, что с учетом резервирования значительно увеличивало установленную мощность ЭУ (самоподъёмная буровая установка «Хазар»).

Однако использование для ГДГ средне- и высокооборотных двигателей внутреннего сгорания ограничивало агрегатную мощность и эффективный КПД (η_e), требовало использование, в основном, дизельного топлива, приводило к потерям 15...20 % мощности в электропередачах постоянного тока. Наличие в охлаждающем воздухе, сбрасываемого в машинно-котельное отделение, генераторов и электродвигателей коллекторной угольной пыли, снижало надёжность работы автоматики ЭУ.

В конце XX столетия на судах стали использовать электропередачу смешанного тока – синхронные генераторы с постоянными оборотами, тиристорные выпрямители и ГЭД постоянного (выпрямленного тока), в которых снижались потери передачи на 5...8 %. Эти передачи используются сейчас, начиная с атомных ледоколов («Арктика»), кончая промысловыми судами, буксирами, плавкранами, морскими буровыми установками и т.д.

Дальнейшим развитием электропередач явилось применение синхронных ГЭД с $\eta_{эл} = 0,94...0,95$, меньшей стоимости, в которых мощность и тяговые характеристики на переменных режимах обеспечиваются системой регулирования частоты тока или установкой винтов регулируемого шага (ВРШ) (плавучий консервный завод-траулер «Наталья Ковшова»).

Современные морские буровые установки характеризуется большим разнообразием продолжительных основных эксплуатационных режимов, отличающихся не только величиной потребляемой нагрузки, но и ее характером (импульсно-циклические нагрузки на режимах «спуско-подъемных операций» и «бурения с приподъемом инструмента»), поэтому ЭУ выполняются многоагрегатными с электропередачей смешанного тока [5].

Назовем централизацией энергоснабжения СЭУ долю выработки электрической и тепловой энергии за счёт работы ГД, т.е.

$$K_n + K_y = (\Delta N_e^{вз\ у}) / (N_e^{гд}) = (N_e^{дг} + N_e^{вг} + N_{ук}) / (N_e^{гд}),$$

где $N_e^{дг}$, $N_{ук}$, $N_e^{вг}$, $N_e^{гд}$ – соответственно, мощности: дизель-генераторов (ДГ), валогенераторов (ВГ), утилизационных котлов (УК) и ГД; ВЭУ – вспомогательная энергетическая установка; $K_n + K_y$ – коэффициент централизации ЭУ за счёт отбора электроэнергии и утилизации ВЭР ГД.

Как отмечено выше, при использовании главных электрических передач обеспечение всех потребителей судна и ЭУ электрической энергией осуществляется за счёт отбора мощности от ГДГ ($K_n = 1$).

На катерах и небольших судах на ГД, работающих по винтовой характеристике, «навешаны» генераторы постоянного тока, обеспечивающие судно на ходовых режимах, причем затраты мощности ВГ, как и остальных навешанных вспомогательных механизмов относят к механическим потерям η_m , а СЭС катера работает на постоянном токе.

С.В. Камкин [3] предложил выразить относительные доли топлива, затрачиваемого на ГД, ВД и ВК, через, соответственно, X , Y , Z из условия: $X + Y + Z = 1$, т.е. мерой полной централизации было $X = 1$, $Y = 0$, $Z = 0$.

На судах с дизель-редукторными агрегатами (ДРА) и ВРШ, электроснабжение судна может на ходовых режимах полностью обеспечиваться ВГ, подключенными через муфты сцепления к редуктору простой одноступенчатой передачей. Аналогично от редуктора могут приводить грузовые, пожарные и другие мощные насосы. Основные трудности при использовании ВГ в ЭУ с ВРШ возникают из-за недостаточной стабильности частоты вращения $n_{гд}$ и срабатывании защиты ВГ при забросах частоты выше допустимых пределов 47,5...52,5 Гц при сильном волнении, когда защита отключает ВГ и судно полностью обесточивается. Аналогично при проходе узкостей и каналов, когда ГД могут остановиться при маневрировании.

Более сложная передача мощности к ВГ (с гидростатическим поддержанием $n_{вг} = \text{const}$) устанавливается, когда по программе комбинированного изменения частоты вращения и шага ВРШ обеспечивается более экономичная работа ГД.

Опытные данные [3] показывают, что время работы ВГ ($\tau_{вг}$) составляет 50...80 % от времени работы ГД, а при установке двухскоростной коробки передач диапазон расширяется от $(1,1...0,6)n_{гд}^H$ до $(1,1...0,3)n_{гд}^H$, где $n_{гд}^H$ – номинальные обороты ГД [6].

На транспортных судах мощность СЭС на ходовом режиме не превышает 6,5 % $N_e^{гд}$ [1,3]. В связи с тем, что эти суда большую часть времени эксплуатируются с *заданной технической или экономической* скоростями, мощность ГД снижается на 30...50 % (коэффициент загрузки ГД $K_N^{гд} = 0,5...0,7$). В эксплуатационных условиях сопротивление корпуса, винта и других элементов пропульсивного комплекса увеличивается и запаса мощности ГД может не хватить для привода ВГ, поэтому при ВРШ уменьшается шаг винта, а при ВФШ снижаются обороты винта приблизительно на 2,5 % [3]. Коэффициент централизации энергоснабжения в этом случае составит $K_n = 0,065$.

У прямо-транспортных рефрижераторов (ПТР) затраты электроэнергии на охлаждение рефрижераторных трюмов увеличивают коэффициент централизации:

ПТР «Охотское море» $D = 22100$ т, $N_e^H = 2$ ГД по 5470 кВт, $N_{вг} = 2$ по 1700 кВт, $K_n = 0,31$;

ПТР «Амурский залив» $D = 18896$ т, $N_e^H = 2$ ГД по 4100 кВт, $N_{вг} = 2$ по 1450 кВт, $K_n = 0,354$;

ПТР «Остров Русский» $D = 15715$ т, $N_e^H = 2$ ГД по 4100 кВт, $N_{вг} = 2$ по 680 кВт, $K_n = 0,166$.

На современных рыбопромысловых судах для обеспечения необходимой скорости движения трала при «выборке ваеров», когда скорость движения судна не превышает 2...3 узлов, значительно возрастает мощность траловой лебедки, работающей от ВГ, поэтому коэффициент централизации ЭУ значительно выше:

«Горизонт» $D = 7972$ т, $N_e^H = 2$ ГД по 2570 кВт, $N_{вг} = 2$ по 1600 кВт, $K_n = 0,622$;

«Антарктида» $D = 8066$ т, $N_e^H = 2$ ГД по 2580 кВт, $N_{вг} = 2$ по 1600 кВт, $K_n = 0,62$;

«Пулковский меридан» $D = 5720$ т, $N_e^H = 2$ ГД по 2580 кВт, $N_{вг} = 2$ по 1600 кВт, $K_n = 0,62$;

«Моозунд» $D = 9260$ т, $N_e^H = 2$ ГД по 2650 кВт, $N_{вг} = 2$ по 1500 кВт, $K_n = 0,566$;

«Прометей» $D = 5367,6$ т, $N_e^H = 2854$ кВт, $N_{вг} = 960$ кВт, $K_n = 0,337$.

Нагрузка ВГ составляет

$$P_{вг}^x = N_{вг} \cdot \eta_p^{вг} \cdot \eta_r^{вг} \cdot K_N^{вг} = N_{дг} \cdot n_{дг}^x \cdot K_N^{дг} \cdot \eta_n^{дг},$$

где $N_{вг}$ и $N_{дг}$ – соответственно мощности ВГ и ДГ, кВт; $K_N^{вг}$ и $K_N^{дг}$ – коэффициенты загрузки ВГ и ДГ; $n_{дг}^x$ – число ДГ, работающих на ходовом режиме; $\eta_p^{вг}$ – КПД привода ВГ; $\eta_r^{вг}$, $\eta_r^{дг}$ – КПД генератора, соответственно, ВГ и ДГ; $\eta_n^{дг}$ – КПД передачи ДГ.

Отсюда мощность ВГ равна

$$N_{вг} = (N_{дг} \cdot n_{дг}^x \cdot K_N^{дг} \cdot \eta_n^{дг} \cdot \eta_r^{дг}) / (\eta_p^{вг} \cdot \eta_r^{вг} \cdot K_N^{вг}).$$

Если для упрощения принять $\eta_r^{дг} = \eta_r^{вг}$; $K_N^{вг} = K_N^{дг}$; $\eta_n^{дг} = 1$, то формула будет иметь вид

$$N_{вг} = (N_{дг} \cdot n_{дг}^x) / \eta_p^{вг}.$$

По данным [3]: $\eta_p^{BG}=0,98$ – редуктор от ДРА с ВРШ, $\eta_p^{BG}=0,9...0,92$ – для редуктора с гидростатическим регулятором оборотов.

Если принять $N_{дг} \cdot n_{дг}^x = 0,065 N_e^{ГД}$, то получим:

$$N_{BG} = (0,065 N_e^{ГД}) / (\eta_p^{BG} \cdot \eta_g \cdot \kappa_N^{BG}).$$

Экономия дизельного топлива от замещения ДГ составит

$$G_{ДГ}^{ДГ} = ((0,065 N_e^{ГД}) \cdot (be_{дг} \cdot \tau_{дг}^x)) / (\eta_p^{BG} \cdot \eta_g^{BG} \cdot \kappa_N^{BG}).$$

Увеличение расхода СВТ или ВВТ на ГД для работы ВГ составит

$$G_{ГДВГ}^{ГД} = ((0,065 N_e^{ГД}) \cdot (be_{ГД} \cdot \tau_{ГД}^x)) / (\eta_p^{BG} \cdot \eta_g^{BG} \cdot \kappa_N^{BG}),$$

где время работы ВГ – $\tau_{BG} = (0,5...0,8) \tau_{ГД}$, $\tau_{ГД} = \tau_x$.

Если обозначить стоимость дизельного топлива через $\Pi_{ДГ}$, а стоимость тяжелого топлива – $\Pi_{ГД}$, то экономия на стоимости топлива будет равна

$$\Delta C_T = G_{ДГ}^{ДГ} \cdot \Pi_{ДГ} \cdot \tau_{BG} - G_{ГДВГ}^{ГД} \cdot \Pi_{ГД} \cdot \tau_{BG} = \\ = \tau_{BG} \cdot 0,065 N_e^{ГД} \cdot ((be_{дг} \cdot \Pi_{ДГ}) / (\eta_p^{ДГ} \cdot \eta_g^{ДГ} \cdot \kappa_N^{ДГ}) - (be_{ГД} \cdot \Pi_{ГД}) / (\eta_p^{BG} \cdot \eta_g^{BG} \cdot \kappa_N^{BG})).$$

Коэффициент уменьшения затрат на топливо равен

$$K_{ДГ} = (be_{ГД} \cdot \Pi_{ГД}) / (be_{дг} \cdot \Pi_{ДГ}).$$

Если ориентировочно принять $\Pi_{ГД} = 0,5 \Pi_{ДГ}$, $be_{ГД} = be_{дг}$, то $K_{ДГ} = 0,5$.

При установке ВГ по условиям резервирования количество ДГ СЭС может быть сокращено до $n_{дг} = 2$. В этом случае принимается номинальные мощности $N_{BG} = N_{дг}$.

По сведениям [3] капитальные затраты на ВГ окупаются за 3...5 лет: $T_{ок} = K / \Delta C = 3...5$ лет, где $T_{ок}$ – срок окупаемости, годы; K – капитальные затраты, долл.; ΔC – изменение эксплуатационных затрат, долл. (сведения опубликованы в 1996г, поэтому цены указаны в старом масштабе). Капитальные затраты по приведенной формуле составляют: $K = (3...5) \cdot \Delta C$ – от разницы в стоимости СВТ или ВВТ, используемых в ГД на привод ВГ и дизельного топлива для ДГ, которые на ходу замещаются ВГ. Годовой экономический эффект можно подсчитать исходя из экономии вышеуказанных топлив:

$$\Theta = \Delta C - 0,15 K = \Delta C - 0,15 \cdot (3...5) \cdot \Delta C = (0,25...0,55) \cdot \Delta C.$$

По сведению [6] экономический эффект от установки ВГ в старом масштабе цен составляет 5000...43000 долл./год. Он учитывает также экономию трудозатрат на ТОР ДГ и уменьшение затрат моторесурса ДГ.

Так, например, для танкеров-бункеровщиков водоизмещением 6000...9000 т с ГД типа 5ДКРН50/110 с эффективными мощностями 2500...2600 кВт и годовой наработкой 5000...6000 часов при $\Pi_{ДГ} = 1200$ долл./т и $\Pi_{ГД} = 800$ долл./т экономия на топливе ДГ при использовании ВГ $\Delta C_T = 300$ тыс.долл./год, годовой экономический эффект при сроках окупаемости $T_{ок} = K / \Delta C = 3...5$ лет, $\Theta = (0,25...0,55) \cdot \Delta C = 75...165$ тыс. долл., капитальные затраты $K = 900...1500$ тыс. долл.

В диапазоне мощностей ГД $N_e^{ГД}$ менее 5,0 МВт вторичных энергоресурсов (ВЭР) ГД вполне хватает для замещения вспомогательного котла (ВК) утилизационным. Даже при использовании теплоты только выхлопных газов ГД, удельная паропроизводительность УК составляет по данным [7] для сухогрузных судов 0,15...0,5 кг пара/кВт·ч, а для танкеров – 0,17...0,64 кг пара/кВт·ч, а при использовании теплоты охлаждения надувочного воздуха, охлаждающей пресной воды и ВЭР ДГ полное замещение ВК не вызывает сомнений, но на утилизационный турбогенератор пара не остаётся.

Приведенные в [2] коэффициенты замещения ВК с помощью УК $\kappa_{ВК}$ ПТР составляют:

«Таврия», $N_e^{ГД} = 4$ ГДГ по 736 кВт, $\kappa_{ВК} = 0,5$;

«Севастополь», $N_e^{ГД} = 4$ ГДГ по 1325 кВт, $\kappa_{ВК} = 1,0$;

«Сибирь» $N_e^{ГД} = 4$ ГДГ по 1325 кВт, $\kappa_{ВК} = 0,64$;

«Ветер» $N_e^{ГД} = 7060$ кВт, $\kappa_{ВК} = 0,88$;

«Залив» $N_e^{ГД} = 2$ ГД по 4415 кВт, $\kappa_{ВК} = 0,38$;

«Охотское море» $N_e^{ГД} = 2$ ГД по 5470 кВт, $\kappa_{ВК} = 0,38$.

Приведенные значения $\kappa_{ВК}$ являются заниженными, так как для их вычисления берутся номинальные паропроизводительности ВК, которые завышены на 25 % для компенсации отложений нагара и копоти и отглушения трубок при ремонте, а не паропроизводительности ВК на ходовом режиме.

На промысловых судах $\kappa_{ВК} = 0,2...0,48$ по этим же причинам, а также из-за продолжительных долевых нагрузок ГД и большим технологическим потребностям в паре.

При полном замещении ВК получаем:

$$D_{УК}^x \cdot (i_0 - i_{пв}) \cdot \zeta_{п} = D_{ВК}^x \cdot (i_0 - i_{пв}) = B_{ВК} \cdot Q_H^p \cdot \eta_{ВК}.$$

При неполном замещении ВК находим, что

$$D_{УК}^x \cdot (i_0 - i_{пв}) \cdot \zeta_{п} = \kappa_{ВК} \cdot D_{ВК}^x \cdot (i_0 - i_{пв}) = \kappa_{ВК} \cdot B_{ВК} \cdot Q_H^p \cdot \eta_{ВК},$$

где $D_{ук}^x$ и $D_{вк}^x$ – паропроизводительность, соответственно УК и ВК на ходовом режиме, кг/ч; i_0 , $i_{пв}$ – энтальпии, соответственно, свежего пара УК, ВК и питательной воды, кДж/кг; $B_{вк}$ – расход топлива на ВК, кг/ч; $Q_{п}^p$ – низшая теплотворная способность топлива ВК, кДж/кг; $\eta_{вк}$ – КПД ВК.

Коэффициент замещения ВК определяется следующим образом:

$$\kappa_{вк} = (D_{ук}^x \cdot (i_0 - i_{пв}) \cdot \zeta_{п}) / (D_{вк}^x \cdot (i_0 - i_{пв})) = (D_{ук}^x \cdot (i_0 - i_{пв}) \cdot \zeta_{п}) / (B_{вк} \cdot Q_{п}^p \cdot \eta_{вк}).$$

Расход сэкономленного топлива ВК составит

$$B_{вк} = (D_{ук}^x \cdot (i_0 - i_{пв}) \cdot \zeta_{п}) / (\kappa_{вк} \cdot Q_{п}^p \cdot \eta_{вк}).$$

Стоимость сэкономленного топлива ВК составит

$$C_{т вк} = B_{вк} \cdot \Pi_{т вк} \cdot \tau_{ук},$$

где $\tau_{ук} = \tau_{х} - \tau_{вк}$; $\Pi_{т вк}$ – цена топлива ВК.

Для рассмотренных выше танкеров-бункеровщиков экономия на тяжёлом топливе при замещении ВК утилизационным котлом составляет $C_{т вк} = 360$ тыс.долл./год, $\Xi = 90 \dots 200$ тыс.долл./год и капитальные затраты на установку системы малой утилизации теплоты $K = 1100 \dots 1800$ тыс. долл.

Таким образом, коэффициент централизации энергоснабжения ГД составит:

$$K_{ц} + K_{у} = N_{вг} / N_{е}^{гд} + N_{ук} / N_{е}^{гд},$$

где $N_{ук} = (D_{ук}^x \cdot (i_0 - i_{пв}) \cdot \zeta_{п}) / 3600$.

Для рассмотренных выше танкеров-бункеровщиков $K_{ц} + K_{у} = 0,098 + 0,424$.

Поэтому большинство современных судов оснащены ВГ и УК

Выводы. Приведенные материалы достаточны для проведения технико-экономических обоснований рациональности использования валогенераторов и утилизационных парогенераторов на современных судах. Исследования будут продолжены для судов с номинальными мощностями главных двигателей 6...13 и более 13 МВт,

Библиографический список

1. Судовые энергетические установки: учеб. пособие для студентов вузов / Г.А. Артёмов, В.П. Волошин, Ю.В. Захаров, А.Я. Шквар. — Л.: Судостроение, 1987. — 480 с.
2. Коршунов Л.П. Утилизация теплоты на судах рыбной промышленности / Л.П. Коршунов. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. — 232 с.
3. Эксплуатация судовых дизельных энергетических установок: учебник для студентов вузов / С.В. Камкин [и др.]. — М.: Транспорт, 1996. — 432 с.
4. Проектирование пропульсивных установок судов с прямой передачей мощности на винт: учеб. пособие для студентов вузов / В.П. Шостака, В.И. Гершаник, В.П. Кот, Н.С. Бондаренко; под редакцией В.П. Шостака. — Николаев: УГМТУ, 2003. — 500 с.
5. Методические указания к курсовому проектированию и выполнению дипломных проектов для студентов спец. 7.100 302 «Эксплуатация судовых энергетических установок» всех форм обучения «Режимы работы специализированных энергетических установок» / В.Н. Литошенко. — Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2000. — 96 с.
6. Энергосбережение в судовых энергетических установках: учеб. пособие для студентов вузов / Г.А. Артемов, В.П. Волошин, В.П. Жуков, И.Г. Лебедь. — Николаев: Изд-во НКИ, 1985. — 84 с.
7. Судовые установки с двигателями внутреннего сгорания: учебник для студентов вузов / В.А. Ваншейдт [и др.]. — Л.: Судостроение, 1987. — 368 с.

Поступила в редакцию 20.10.2008 г.