

ЭЛЕМЕНТЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ГЛАВНЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ СУДОВ

А.С. Баёв, академик

Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены модели и примеры алгоритмов адаптивного и адаптивно-оптимального управления главным энергетическим комплексом судов, которые могут стать основой для создания систем дистанционного автоматизированного управления с элементами искусственного интеллекта.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из современных направлений совершенствования судовых энергетических установок (СЭУ) является оборудование их интегрированными системами автоматического управления (ИСАУ) судовыми процессами. ИСАУ представляют собой человеко-машинный комплекс локальных систем управления, среди которых наиболее функционально значимой является система дистанционного автоматизированного управления (ДАУ) главным энергетическим комплексом (ГЭК) судов. В данном случае ГЭК в составе главных двигателей, главных передач, валопровода и движителей рассматривается как единый объект управления с целью обеспечения требуемой скорости хода судна. Соответственно входной параметр ГЭК – это управляющее воздействие (относительное положение органа топливоподачи h/h_n (в формулах h/h_n), где h и h_n – перемещение органа топливоподачи на некотором долевом и на номинальном режимах работы), а выходной – относительная частота вращения гребных винтов n/n_n (в формулах n/n_n), где n и n_n – частота вращения на некотором долевом и на номинальном режимах работы ГЭК.

Математизация и электронизация судовых процессов на базе широкого применения в ИСАУ микропроцессорной техники и персональных компьютеров, с одной стороны, и ужесточение требований к качеству управления и расширение круга решаемых при этом задач, с другой стороны, привели к переходу от пассивных систем автоматического управления к активным системам с элементами искусственного интеллекта. Определяющим для реализации таких систем является наличие адекватного математического обеспечения в данном случае по управлению ГЭК судов.

1. ПРОБЛЕМА И ЕЁ РЕШЕНИЕ

Наиболее распространенной судовой энергетической установкой является дизельная с механической главной передачей (прямой или зубчатой) и гребными винтами фиксированного шага (ВФШ). Обычно для оценки работы элементов ГЭК таких дизельных энергетических установок (ДЭУ) используются скоростные характеристики (внешние, регуляторные и ограничительные) главных двигателей и гребных винтов (винтовые). Аналогичные характеристики и аналитические модели, отражающие работу ГЭК как единого целого, отсутствуют. Это обстоятельство затрудняет выработку оптимальных решений при управлении ГЭК, особенно в условиях эксплуатации судов отличных от штатных (нормальных, расчетных). Аналитические зависимости скоростных характеристик главных дизельных двигателей и гребных винтов при различных условиях эксплуатации судов представляются в виде следующей системы адаптивных уравнений [1]:

$$P/P_n = (h/h_n)\{(1/\eta_m) - [(1/\eta_m) - 1](n/n_n)\}(n/n_n)(1 + \Delta_P);$$

$$P_K/P_n = n/n_n;$$

$$P_\alpha/P_n = (n/n_n - n_{\min}/n_n)(1 - n_{\min}/n_n);$$

$$P_P/P_n = (h/h_n)[1 - (\delta\Delta n/\Delta n)];$$

$$P_D/P_n = K_B(n/n_n)^\beta,$$

где $P/P_n, P_K/P_n, P_\alpha/P_n, P_P/P_n$ и P_D/P_n – относительные координаты скоростных характеристик главных двигателей (внешних, ограничительной по механической напряженности, ограничительной по тепловой напряженности, регуляторной) и винтовых соответственно; η_m – механи-

ческий коэффициент полезного действия (КПД) главных двигателей на их номинальном режиме; n_{\min} – минимальная частота вращения коленчатых валов главных двигателей; Δ_p – адаптивная поправка, определяемая по паспортной характеристике главных двигателей; Δn и $\delta \Delta n$ – степень неравномерности регулятора частоты вращения и её доля; K_B (на рисунках и в тексте K_B) – коэффициент режима судна, характеризующий условия его эксплуатации; β – показатель степени.

Решив эту систему уравнений относительно входа h/h_n и выхода n/n_n ГЭК, получаем аналитические зависимости, отражающие работу комплекса как единого целого:

$$\begin{aligned} n/n_n &= (h/h_n) \{ [1 - (1/\eta_m)] (1 + \Delta_p) / 2K_B \} + \\ &+ [(h/h_n)(1/\eta_m)(1 + \Delta_p) / K_B]^{0,5}; \\ (n/n_n)_K &= (1/K_B)^{0,5}; \\ (n/n_n)_\alpha &= \{ (1 - n_{\min}/n) / [2K_B - 1 - \\ &- (K_B - 1)(n_{\min}/n)] \}^{0,5}; \\ (n/n_n)_P &= 1 + \Delta n(1 - h/h_n), \end{aligned}$$

где n/n_n и $(n/n_n)_K$, $(n/n_n)_\alpha$ и $(n/n_n)_P$ – относительные координаты характеристик ГЭК и ограничительных главных двигателей по механической напряженности, по тепловой напряженности и по частоте вращения, которые за счет механического КПД, минимальной частоты вращения коленчатого вала, степени неравномерности регулятора частоты, адаптивной поправки и коэффициента режима судна предварительно адаптируются (подстраиваются, настраиваются) к конкретным главным двигателям и условиям эксплуатации судов с использованием их паспортных характеристик [2].

Совокупность этих характеристик графически представляются в виде диаграммы (рис.1), которая отражает работу главного энергетического комплекса как единого целого в данном случае судна река-море плавания проекта 1557 при различных условиях его эксплуатации, а именно:

в штатных (которые принято также называть нормальными или расчетными) - нормальная или штатная характеристика (кривая $K_B = 1$);

в облегченных (более легких, чем штатные), например, при ходе судна в балласте - легкие или балластные характеристики (например, кривая $K_B = 0,8$), которые располагаются выше нормальной;

в утяжеленных (более тяжелых, чем штатные), например, при разгоне судна – тяжелые или разгонные характеристики (например, кривая $K_B = 1,25$), которые располагаются ниже нормальной;

при неподвижном судне, например, при трогании его с места или при работе на швартовых -

предельно-тяжелая или стартовая характеристика (в данном случае кривая с $K_B = 3,75$).

На рис. 1 также приведены преобразованные характеристики главных двигателей:

регуляторной номинальной мощности P_p , которая в дальнейшем именуется ограничительной характеристикой по частоте вращения коленчатого вала главных двигателей или статической характеристикой (из диаграммы наглядно видно, что это ничто иное, как статическая характеристика системы автоматического регулирования (САР) частоты вращения коленчатого вала главных двигателей в данном случае с положительным статизмом);

ограничительной по крутящему моменту P_K , которая в дальнейшем именуется ограничительной по механической напряженности главных двигателей (прямая, соединяющая точку номинала H_1 и предельную режимную точку в данном случае с $n/n_n = 0,52$ на стартовой характеристике);

ограничительной по коэффициенту избытка воздуха P_α , которая в дальнейшем именуется ограничительной по тепловой напряженности главных двигателей (прямая, соединяющая точку номинала H_1 и предельную режимную точку в данном случае с $n/n_n = 0,37$ на стартовой характеристике).

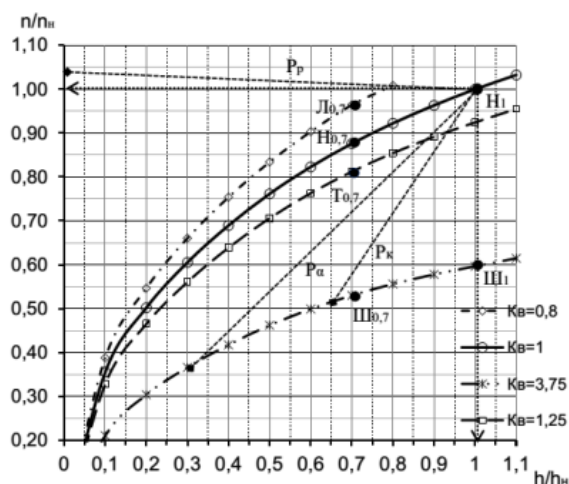


Рис. 1. Характеристики главного энергетического комплекса:

$K_B = 1$ - нормальная или штатная;

$K_B = 0,8$ - легкая или балластная;

$K_B = 1,25$ - тяжелая или разгонная;

$K_B = 3,75$ - предельно-тяжелая или стартовая;

P_α – ограничительная по тепловой напряженности главных двигателей;

P_K - тоже по механической напряженности и P_p - по частоте вращения

С использованием построенных характеристик возможно обосновывать различные решения по управлению ГЭК как в ручном варианте, так и в автоматическом при наличии соответствующего аппаратурно-программного обеспечения. Ниже

представлено несколько примеров их практического применения.

2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

2.1. Адаптивные алгоритмы управления ГЭК

На диаграмме (рис. 1) режимы работы ГЭК на стартовой характеристике и ниже относятся к неподвижному судну, а выше - к судну, движущемуся с некоторой скоростью. При этом, учитывая, что скорость хода судна пропорциональна частоте вращения ВФШ, то номинальной скорости хода судна соответствует ордината $H_{0,7}Ш_{0,7}$ при топливоподаче $h/h_n = 1$, а при парциальной (долевой) топливоподаче, например при $h/h_n = 0,7$, долевая скорость в штатных условиях эксплуатации (кривая $K_b = 1,0$) соответствует ординате $H_{0,7}Ш_{0,7}$, в облегченных (кривая $K_b = 0,8$) - $L_{0,7}Ш_{0,7}$, а в утяжеленных (кривая $K_b = 1,25$) - $L_{0,7}Ш_{0,7}$.

На рис.2 рассмотрено использование этого свойства диаграммы для обоснования параметров работы ГЭК при так называемом ступенчатом разгоне судов смешанного плавания в штатных условиях их эксплуатации. Причем рассмотрен полный цикл от трогания судов с места до выхода на номинальный режим (режим самого полного хода) при предельно возможных топливоподачах по тепловой напряженности главных двигателей (точки топливоподач при разгоне располагаются на ограничительной P_w). Такой разгон судов имеет оперативным.

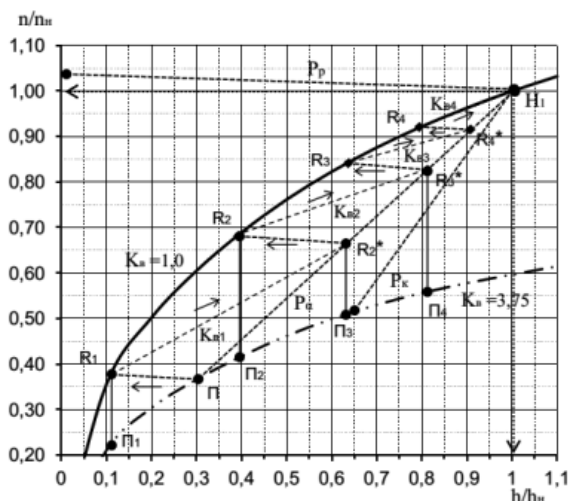


Рис.2. Работа ГЭК при оперативном разгоне судов в штатных условиях их эксплуатации:

K_{61} , K_{62} , K_{63} и K_{64} – коэффициенты характеристик ГЭК при первой, второй, третьей и четвертой ступенях разгона судна (остальные обозначения согласно рис. 1)

Было установлено, что в штатных условиях эксплуатации для реализации оперативного разгона судов достаточно четырех ступеней с постепенным повышением частоты вращения коленчатого вала главных двигателей от 38%-ой после их пус-

ка последовательно до 68, 84, 92 и 100% номинальной. При этом работа ГЭК осуществляется следующим образом. При отходе пуск главных двигателей производится при неподвижном судне. В связи с этим ГЭК работает в швартовном режиме и точка П, определяющая пусковую топливоподачу (подачу топлива при пуске главных двигателей), располагается на предельно-тяжелой характеристике. Пусковая топливоподача в данном случае ограничивается тепловой напряженностью главных двигателей $h_n/h_n = 0,3$, что соответствует относительной частоте вращения $n_n/n_n = 0,37$, где n_n - пусковая частота вращения коленчатых валов главных двигателей.

Через некоторое время после пуска главных двигателей судно стагивается с места стартовая характеристика облегчается в данном случае вплоть до нормальной и частота вращения главных двигателей стабилизируется по участку статической характеристики (PR_1) около значений, соответствующих $t.R_1$, за счет снижения подачи топлива САР до $h/h_n = 0,12$. При этом скорость судна будет соответствовать ординате $R_1П_1$.

После стабилизации частоты вращения орган управления устанавливается в положение большей топливоподачи, которая в данном случае определяется координатой $h/h_n = 0,64$. т. R_2^* , являющейся пересечением ординаты $R_2^*П_3 = R_1П_1$ и ограничительной по тепловой напряженности, поскольку скорость судна в силу инерции резко не изменяется, а повышается постепенно вначале по разгонной характеристике $R_1R_2^*$, которая через некоторое время по мере ускорения судна облегчается до нормальной. В результате частота вращения главных двигателей по участку статической характеристики $R_2^*R_2$ стабилизируются около $n/n_n = 0,68$ за счет снижения подачи топлива САР до $h/h_n = 0,40$. При этом скорость судна будет соответствовать ординате $R_2П_2$.

Аналогично реализуются вторая и третья ступени разгона. В частности, значение топливоподачи второй ступени определяется координатой $h/h_n = 0,82$ т. R_3^* (пересечение ординаты $R_3^*П_4 = R_2П_2$ и ограничительной по тепловой напряженности), а разгон судна происходит вначале по разгонной характеристике $R_2R_3^*$, а затем по участку ограничительной $R_3^*R_3$. В результате частота вращения главных двигателей стабилизируются около $n/n_n = 0,84$ за счет снижения топливоподачи САР до $h/h_n = 0,64$. При этом скорость судна будет соответствовать ординате $R_3П_3$.

При реализации четвертой ступени разгон судна происходит по характеристике близкой к нормальной ввиду относительно незначительного градиента скоростей хода судна в начале ступени и в конце при выходе на номинальный режим.

Таким образом, полный алгоритм оперативного разгона судна осуществляется при следующих параметрах работы ГЭК:

$$h_n/h_n = 0,3; n/n_{nR1} = 0,38;$$

$$\begin{aligned} h/h_{HR2*} &= 0,64; K_{BT1} = 1,86; n/n_{HR2} = 0,68; \\ h/h_{HR3*} &= 0,82; K_{BT2} = 1,49; n/n_{HR3} = 0,84; \\ h/h_{HR4*} &= 0,92; K_{BT3} = 1,22; n/n_{HR4} = 0,92; \\ h/h_{HR5*} &= 1; K_{BT4} \approx 1,0; n/n_{HR5} = 1,0, \end{aligned}$$

где значения коэффициентов разгонных характеристик (K_{BT1} , K_{BT2} , K_{BT3} и K_{BT4}) отражают степень утяжеления работы ГЭК на соответствующих ступенях разгона судна.

В результате его реализации судно постепенно выходит на требуемый режим без перегрузки главных двигателей с учетом их технического состояния и условий эксплуатации.

На основе полного адаптивного алгоритма управления ГЭК могут быть разработаны самые разнообразные частные алгоритмы для случаев разгона судна на долевые режимы или с долевых режимов, при разгоне в условиях эксплуатации различных от штатных и т. д. [3]. При этом частично может быть использован рассмотренный алгоритм так, как это показано ниже на примере адаптивно-оптимальных алгоритмов. Отличие последних от адаптивных алгоритмов состоит в том, что предварительно требуется определить оптимальный режим работы главного энергетического комплекса.

2.2. Адаптивно-оптимальные алгоритмы управления ГЭК

Область диаграммы (рис.1) между предельно-тяжелой и крайней легкой (в данном случае с $K_B = 0,8$) характеристиками и соответствующими ограничениями по напряженности и частоте вращения главных двигателей ограничивают поле стационарных режимов ГЭК. Выбор конкретного режима из них зависит от целевой установки, которая может назначаться директивно, например, как на рис.2 (номинальный режим), или с использованием некоторого дополнительного условия (оптимально).

Ниже представлена методика обоснования оптимального режима работы ГЭК исходя из минимизации удельных затрат энергии на перемещение судна в различных условиях его эксплуатации.

Целевая функция такой методики представляется в следующем виде [4]:

$$e = \{ [xK_B P_e (n/n_H)^3 - x_2 P_2] b Q_H + x_6 B_6 Q_{H6} + x_K B_K Q_H - Q_y \} / G k_v (n/n_H) v_H \rightarrow \min,$$

где e – удельные затраты энергии на движение судна (энергоёмкость транспортировки), кДж/т*км; x , x_2 , x_6 и x_K – число работающих в ходовом режиме главных двигателей, валогенераторов, вспомогательных двигателей и автономных котлов; P_e – номинальная мощность главного двигателя, кВт; K_B – коэффициент режима судна; n/n_H – относительная частота вращения гребных винтов; P_2 – мощность валогенератора, кВт;

b – долевой (при n/n_H) удельный расход топлива главного двигателя в ходовом режиме, кг/кВт*ч; Q_H и Q_{H6} – низшая удельная теплота сгорания топлива, используемого главными и вспомогательными двигателями, кДж/кг; B_6 и B_K – часовой расход топлива вспомогательного двигателя и автономного котла, кг/ч; Q_y – суммарное количество утилизируемой теплоты в ходовом режиме, кДж/ч; G – водоизмещение судна, т; k_v – коэффициент пропорциональности; v_H – паспортная (номинальная) скорость движения судна в полном грузу, км/ч.

Определение оптимального режима (режима, наилучшим образом удовлетворяющего целевой функции в рамках имеющихся ограничений и граничных условий) в данном случае осуществляется в области эксплуатационных режимов ГЭК, расположенной между кривыми $K_B = 0,8$, $K_B = 1,25$ и ограничительными по тепловой напряженности и частоте вращения главных двигателей, с учетом потребностей судна в тепловой и электрической энергиях и в пресной воде (на рис.3 режимы, при которых удовлетворяются эти потребности, обозначены висячими стрелочками), а также с учетом режима главных двигателей с минимальным удельным расходом топлива. Обоснованные таким образом режимы именуются режимами оптимального использования энергии СЭУ или оптимального энергоиспользования.

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что применительно к судну река-море плавания проекта 1557 режимом оптимального энергоиспользования в штатных условиях эксплуатации является режим с $n/n_H = 0,81$, при 25%-ном утяжелении штатных – с $n/n_H = 0,795$, а при 25%-ном облегчении штатных – с $n/n_H = 0,86$ (рис.3).

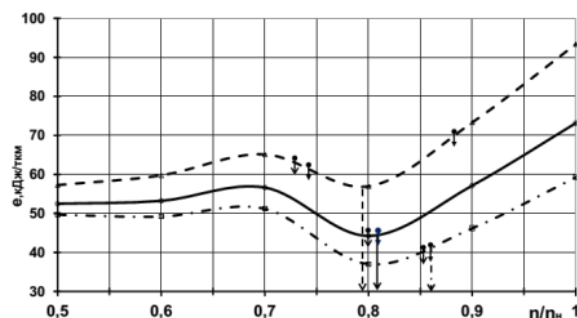


Рис.3. Зависимость удельных затрат энергии на движение судна при различных условиях его эксплуатации: сплошная кривая – в штатных условиях; штриховая – при 25%-ном утяжелении штатных; штрихпунктирная – при 25%-ном облегчении штатных

Обоснование параметров алгоритмов работы ГЭК при выводе на эти режимы выполняется в соответствии с методикой, рассмотренной в разделе 2.1, соответственно для штатных условий экс-

плутации на рис. 4, а для облегченных условий – на рис.5.

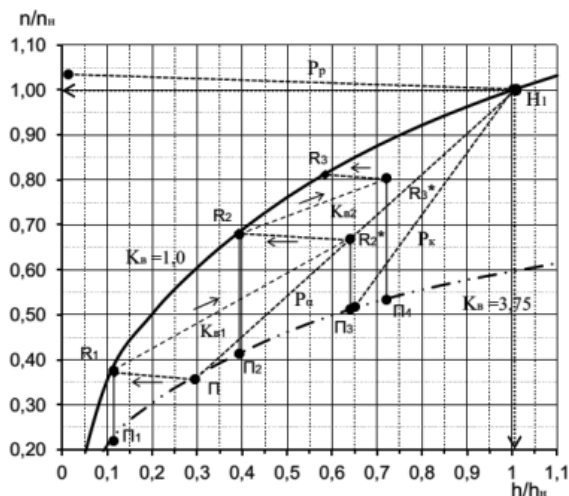


Рис.4. Работа ГЭК при выходе на оптимальный режим в штатных условиях эксплуатации (обозначения согласно рис.1 и 2)

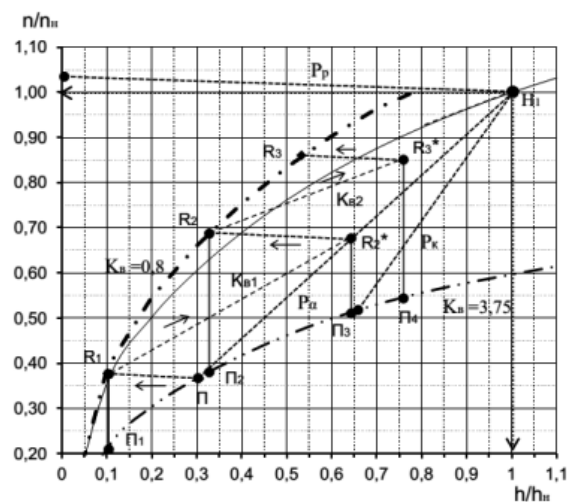


Рис.5. Работа ГЭК при выходе на оптимальный режим в облегченных условиях эксплуатации (обозначения согласно рис.1 и 2)

Отличие методики обоснований для случая эксплуатации в облегченных условиях (рис.5) состоит в том, что после установки органа управления в положение большей топливодачи облегчение разгонных характеристик происходит до балластной характеристики, отражающей условия эксплуатации судна в данном случае на 25% более легкие, чем штатные. В результате частота вращения главных двигателей по соответствующим отрезкам ($R_2^*R_2$ или $R_3^*R_3$) статической характеристики стабилизируется около значений на легкой характеристике ($t.R_2$ или $t.R_3$).

Соответственно алгоритмы работы ГЭК при выходе на режимы оптимального энергоиспользования характеризуются следующими параметрами:

в штатных условиях эксплуатации (рис.4)

$$\begin{aligned}
 &h_{\Pi}/h_{\Pi} = 0,3; n/n_{\Pi R1} = 0,38; \\
 &h/h_{\Pi R2^*} = 0,64; K_{B1} = 1,86; n/n_{\Pi R2} = 0,68; \\
 &h/h_{\Pi R3^*} = 0,72; K_{B2} = 1,32; n/n_{\Pi R3} = 0,81; \\
 &\text{при 25\%-ном облегчении штатных (рис.5)} \\
 &h_{\Pi}/h_{\Pi} = 0,3; n/n_{\Pi R1} = 0,38; \\
 &h/h_{\Pi R2^*} = 0,64; K_{B1} = 1,86; n/n_{\Pi R2} = 0,69; \\
 &h/h_{\Pi R3^*} = 0,76; K_{B2} = 1,19; n/n_{\Pi R3} = 0,86.
 \end{aligned}$$

При этом скорости судна будут соответствовать ординатам между сходственными точками (при сходной топливодаче) в первом случае стартовой и нормальной характеристиками при $h/h_{\Pi R3} = 0,58$, а во втором - стартовой и балластной характеристиками при $h/h_{\Pi R3} = 0,53$. Относительные значения этих скоростей легко определяются с помощью диаграммы эксплуатационных режимов судна (рис.6).

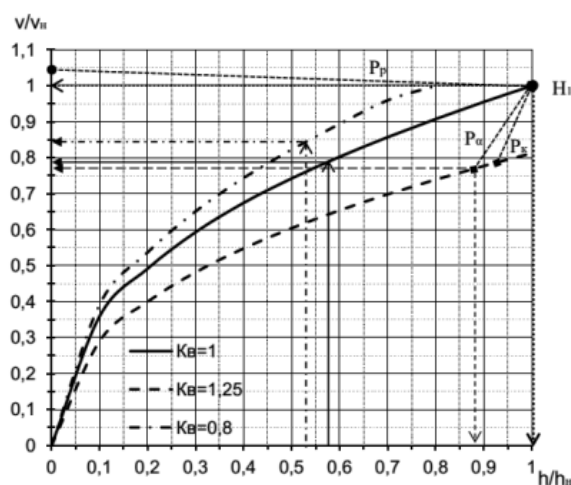


Рис. 6. Диаграмма эксплуатационных режимов судна:

$K_B = 1$ – в штатных условиях эксплуатации;
 $K_B = 0,8$ – при 25%-ном облегчении штатных;
 $K_B = 1,25$ – при 25%-ном утяжелении штатных
(остальные обозначения согласно рис.1)

2.3. Диаграмма эксплуатационных режимов судов

На диаграмме (рис. 6) приведены графические зависимости относительной скорости хода судна v/v_n от относительной топливодачи при различных условиях эксплуатации судна, а именно: сплошная кривая – в штатных условиях, штрихпунктирная – при 25%-ном облегчении штатных условий, а штриховая – при 25%-ном утяжелении штатных.

В основу построения этих кривых положено сформулированное выше свойство характеристик ГЭК, в соответствии с которым, если в штатных условиях эксплуатации судна ординате $H_1\Pi_1$ рисунка 1 соответствует номинальная скорость движения судна, а ординате $H_{0,7}\Pi_{0,7}$ – скорость при топливодаче $h/h_n = 0,7$, то относительная скорость хода судна в штатных условиях при этой топливодаче равна отношению $H_{0,7}\Pi_{0,7}/H_1\Pi_1$. Распространив эту закономерность на область между кривыми $K_B = 0,8$ и $K_B = 1,25$ рисунка 1,

получается диаграмма эксплуатационных режимов судна, в соответствии с которой при выходе судна на режим оптимального энергоиспользования в штатных условиях эксплуатации обеспечивается относительная скорость хода $v/v_n = 0,79$, а при 25%-ном облегчении штатных - $v/v_n = 0,84$. Эксплуатация судна на оптимальных режимах обеспечивает значительную (до 30%) экономию топлива и более рациональное использование технических ресурсов вспомогательных двигателей и котлов.

мы морской энергетики» / А.С.Баёв - СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2013. С.124-126.

10.03.2016 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При наличии соответствующего программно-аппаратурного обеспечения рассмотренные модели и алгоритмы позволяют свести управление главным энергетическим комплексом к установке органа управления в положение необходимой скорости хода судна. Далее интеллектуальная система ДАУ (система с элементами искусственного интеллекта) просчитывает и реализует оптимальный для тех или иных условий эксплуатации алгоритм вывода судна на требуемый режим или на возможный с учетом ограничений (если отклонение их при этом не предусмотрено) так, как это показано на рис.6. В частности, из диаграммы следует, что топливоподача при 25%-ном облегчении штатных условий эксплуатации судна ограничена 80% номинальной (исходя из ограничения частоты вращения), а при 25%-ном утяжелении штатных - 88% номинальной. Кроме того в последнем случае, исходя из тепловой напряженности главных двигателей, скорость судна ограничена 77% паспортной.

ЛИТЕРАТУРА

1.Баёв, А.С. *Моделирование процессов судовой энергетики*: материалы третьей Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции «Актуальные проблемы морской энергетики» / А.С.Баёв - СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2014. С.119-120.

2.*Руководство по теплотехническому контролю серийных теплоходов*. Министерство речного флота РСФСР. М.: Транспорт, 1980, 424 с.

3.Баёв, А.С. *Адаптивное управление главным энергетическим комплексом судов*: материалы пятой Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции «Актуальные проблемы морской энергетики» / А.С.Баёв - СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2016. С.23-25.

4.Баёв, А.С. *Оптимизация работы судовой энергетической установки*: материалы второй Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции «Актуальные пробле-