

УДК 629.122.064
А.С.Баёв, академик
E-mail: bas1949@yandex.ru

ОСНОВЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ГЛАВНЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ СУДОВ

Аннотация

Рассмотрено возможное содержание алгоритмов искусственного интеллекта системы дистанционного автоматизированного управления главным энергетическим комплексом судов.

Ключевые слова: модели, характеристики главного энергетического комплекса, алгоритм оперативного разгона судов.

ABSTRACT

To be considered the potential process algorithm (or artificial intellect) of the remote automated control system of the main power complex of ships.

Key words: model, graphical relation of main power complex, algorithm of operative acceleration of ships.

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 во взаимосвязи и взаимодействии с корпусом судна рассматривается как объект управления с целью обеспечения требуемой скорости движения судна. Соответственно входной параметр ГЭК – это управляющее воздействие (относительное положение органа управления топливоподачей главных двигателей h/h_n , где h и h_n – перемещение органа управления топливоподачей на некотором долевом и на номинальном режимах работы главных двигателей), а выходной – относительная частота вращения винтов фиксированного шага (ВФШ) n/n_n , где n и n_n – частота вращения гребных винтов на некотором долевом и на номинальном режимах работы.

Цифровизация судовых процессов на базе широкого применения в ИСАУ микропроцессорной техники, с одной стороны, и ужесточение требований к качеству управления, с другой стороны, привели к переходу от пассивных систем управления к системам с элементами искусственного интеллекта (адаптивным и оптимальным).

Адаптивные системы управления могут быть самонастраивающимися (с настройкой параметров входящих в них элементов), самоорганизующимися (с настройкой собственной структуры) и самообучающимися (с наличием дополнительных контуров обучения, учитывающих предыдущие результаты работы системы).

Рассматриваемые в данной статье модели и алгоритмы являются математическим обеспечением подобных систем управления ГЭК судов с механической главной передачей и ВФШ.

Исходная информационная база таких систем – это скоростные характеристики главных дизельных двигателей (внешние, регуляторные и ограничительные по механической и тепловой напряженности) и гребных винтов (винтовые характеристики) при различных условиях эксплуатации судов, аналитические зависимости которых представляются в виде следующей системы уравнений [1]:

$$\begin{aligned}
P / P_n &= (h / h_n) \{ (1 / \eta_m) - [(1 / \eta_m) - 1] (n / n_n) \} (n / n_n) (1 + \Delta_p); \\
P_K / P_n &= n / n_n; \\
P_\alpha / P_n &= (n / n_n - n_{\min} / n_n) / (1 - n_{\min} / n_n); \\
P_P / P_n &= (h / h_n) [1 - (\delta \Delta n / \Delta n)]; \\
P_D / P_n &= K_B (n / n_n)^\beta,
\end{aligned}$$

где P/P_n , P_K/P_n , P_α/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 – механический 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 – коэффициент режима судна, характеризующий условия его эксплуатации; β – показатель степени.

Решив эту систему уравнений относительно входа и выхода ГЭК, получаем аналитические зависимости, отражающие работу комплекса как единого целого [2]:

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

где n/n_n , $(n/n_n)_K$, $(n/n_n)_\alpha$ и $(n/n_n)_P$ – относительные координаты характеристик ГЭК, ограничительной по механической напряженности, по тепловой напряженности и по частоте вращения главных двигателей, которые за счет механического КПД, минимальной частоты вращения коленчатого вала, степени неравномерности её регулятора, адаптивной поправки и коэффициента режима судна предварительно адаптируются (подстраиваются) к конкретным главным двигателям и условиям эксплуатации судов с использованием их паспортных характеристик [3].

На рисунке 1 представлена графическая иллюстрация этих зависимостей применительно к сухогрузу река-море плавания проекта 1557, которые отражают работу его главного энергетического комплекса в различных условиях эксплуатации, а именно:

в штатных (которые принято также называть нормальными или расчетными) – нормальная или штатная характеристика (кривая $K_B = 1,0$);

в облегченных (более легких, чем штатные), например, при ходе судна в балласте – легкая или балластная характеристика (кривая $K_B = 0,8$), которая располагается выше нормальной;

в утяжеленных (более тяжелых, чем штатные), например, при разгоне судна – тяжелая или разгонная характеристика (кривая $K_B = 1,25$), которая располагается ниже нормальной;

при неподвижном судне, например, при трогании его с места или при работе на швартовых – предельно-тяжелая или стартовая характеристика ($K_B = 3,75$).

На рисунке 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_a , 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).

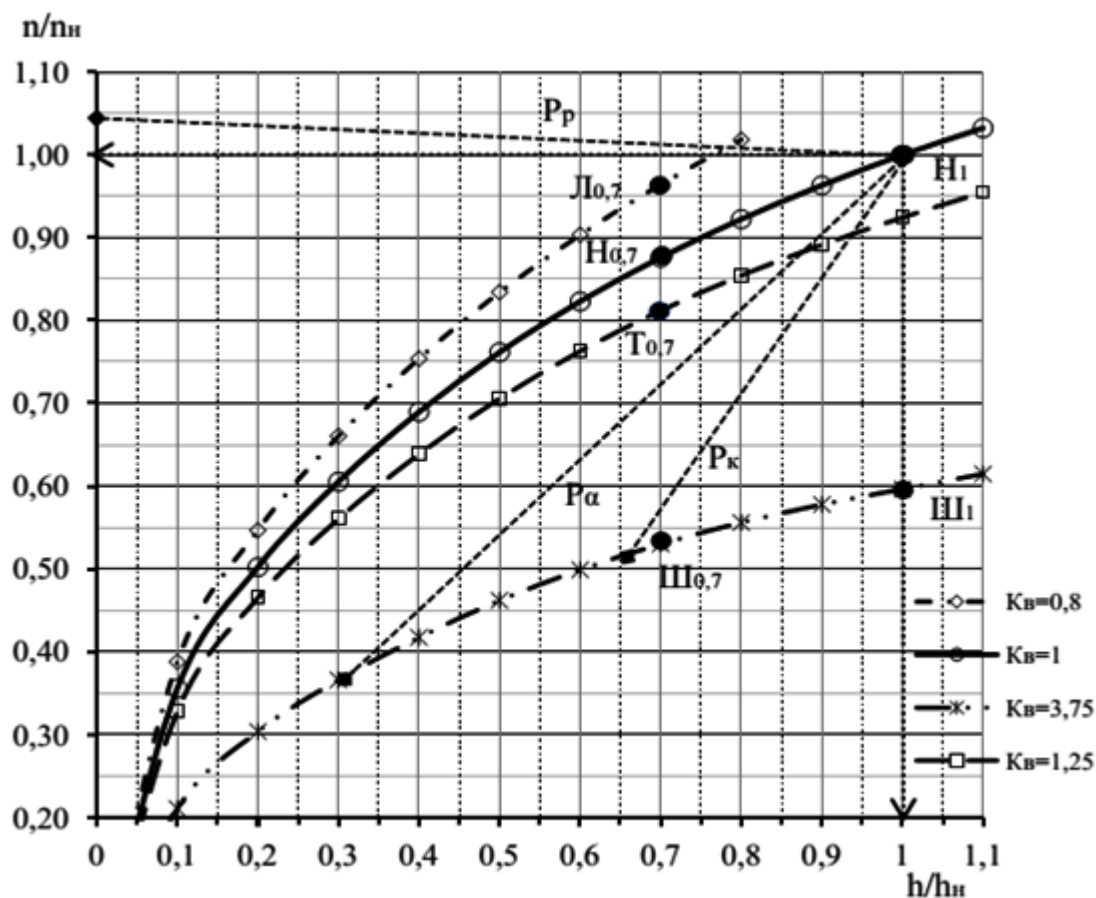


Рисунок 1. Характеристики главного энергетического комплекса:
 $K_b = 1$ - нормальная или штатная; $K_b = 0,8$ - легкая или балластная;
 $K_b = 1,25$ - тяжелая или разгонная; $K_b = 3,75$ - предельно-тяжелая или стартовая;
 P_a - ограничительная по тепловой напряженности главных двигателей;
 P_k - тоже по механической напряженности и P_p - тоже по частоте вращения

На диаграмме (рисунок 1) режимы работы ГЭК на стартовой характеристике относятся к неподвижному судну ($v = 0$), а выше - к судну, движущемуся с некоторой скоростью, в частности в штатных условиях в точке номинала (H_1) с номинальной скоростью. То есть, ордината $H_1Ш_1$ (отрезок на диаграмме при топливоподаче $h/h_n = 1$ между стартовой и нормальной характеристик) отражает номинальную скорость движения судна в штатных условиях эксплуатации, а при парциальной (долевой) топливоподаче, например при $h/h_n = 0,7$, ордината $H_{0,7}Ш_{0,7}$, отражает долевую скорость движения судна в штатных условиях при этой топливоподаче, ордината $L_{0,7}Ш_{0,7}$, - в условиях более легких, чем штатные, а ордината $T_{0,7}Ш_{0,7}$, - в условиях более тяжелых, чем штатные. Соответственно, относительная скорость хода судна в штатных условиях эксплуатации при $h/h_n = 0,7$ равна отношению $H_{0,7}Ш_{0,7} / H_1Ш_1$ ($H_{0,7}Ш_{0,7} / H_1Ш_1$ - по сути это нечто иное как коэффициент пропорциональности), в условиях более легких, чем штатные - ($L_{0,7}Ш_{0,7} / H_1Ш_1$), а в условиях более тяжелых, чем штатные - ($T_{0,7}Ш_{0,7} / H_1Ш_1$). Таким образом, ординаты диаграммы между сходственными (при одной и той же топливоподаче) точками стартовой и других (балластной или нормальной или разгонной) характеристик в определенной пропорции отражают скорости движения судов в соответствующих условиях эксплуатации.

В качестве примера на рисунке 2 рассмотрено применение этого свойства диаграммы для обоснования параметров работы ГЭК при так называемом ступенчатом разгоне судов смешанного плавания в штатных условиях их эксплуатации. При этом рассмотрен полный цикл от трогания судов с места до выхода на номинальный режим (режим самого полного хода) при предельно возможных топли-

вподачах по тепловой напряженности главных двигателей (точки топливоподачи при разгоне располагаются на ограничительной P_a). Такой разгон судов именуется оперативным или нормальным.

В результате было установлено, что в штатных условиях эксплуатации для реализации оперативного разгона, например, судов проекта 1557 с самого малого хода до самого полного необходимо, по крайней мере, семь ступеней с постепенным повышением частоты вращения коленчатого вала главных двигателей от 38%-ой после их пуска последовательно до 67, 83, 91, 94, 97, 99 и 100% номинальной [4].

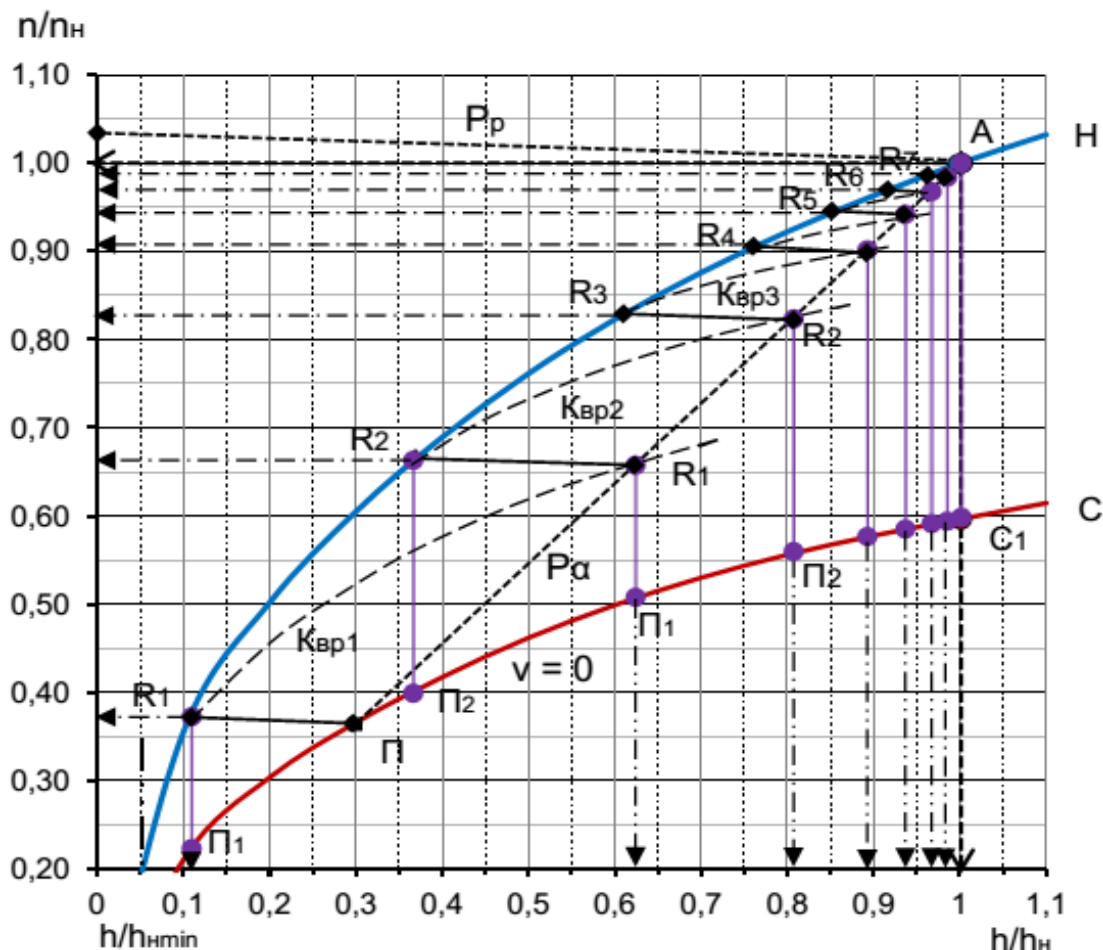


Рисунок 2. Работа ГЭК при оперативном разгоне судов в штатных условиях их эксплуатации:
 Н и С — соответственно нормальная и стартовая характеристики ГЭК; А — здесь точка номинального режима;
 $K_{вр1}$, $K_{вр2}$, $K_{вр3}$ — здесь коэффициенты разгонных характеристик ГЭК при первой (до режима R_2), второй (до режима R_3) и третьей (до режима R_4) ступенях разгона судна соответственно
 (в целях упрощения рисунка остальные разгонные характеристики не обозначены)

При этом работа ГЭК осуществляется следующим образом. При отходе (при трогании судна с места) 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 ($v = 0$). 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 страгивается, стартовая характеристика облегчается (по сути, облегчаются условия работы ГЭК) 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 регулятором до $h/h_n = 0,11$. При этом скорость судна будет отражать ордината $R_1П_1$.

После стабилизации частоты вращения орган управления устанавливается в положение большей топливоподачи, которая в данном случае определяется координатой $h/h_n = 0,63$ на ограничи-

тельной по теплonaпряженности главных двигателей (вторая т. R_1 является пересечением ординаты $R_1\Pi_1$ и ограничительной по тепловой напряженности), поскольку скорость судна в силу инерции вначале не изменяется. Частота вращения при этом повышается по разгонной характеристике R_1R_1 , которая через некоторое время по мере ускорения судна облегчается до нормальной. В результате частота вращения главных двигателей, а соответственно и движителей, по участку статической характеристики R_1R_2 стабилизируются около $n/n_n = 0,67$ за счет снижения подачи топлива регулятором до $h/h_n = 0,37$, а соответственно и скорость судна, значение которой будет отражать ордината $R_2\Pi_2$. Аналогично реализуются и другие ступени разгона. В частности значение топливоподачи второй ступени определяется координатой $h/h_n = 0,81$ т. R_2 (пересечение ординаты $R_2\Pi_2$ и ограничительной по тепловой напряженности), а изменение частоты вращения при разгоне судна происходит вначале по разгонной характеристике R_2R_2 , а затем по участку ограничительной R_2R_3 . В результате частота вращения главных двигателей стабилизируются около $n/n_n = 0,83$ за счет снижения топливоподачи САР до $h/h_n = 0,61$. При этом скорость судна будет отражать ордината $R_3\Pi_3$.

Таким образом, полный алгоритм оперативного разгона судна будет соответствовать ломанной линии $R_1 K_{вр1} R_1 R_2 K_{вр2} R_2 R_3 K_{вр3} \dots R_4 \dots R_5 \dots R_6 \dots R_7 \dots A$, где участки на подъём - это части соответствующих разгонных характеристик, которые отражают работу ГЭК при увеличении подачи топлива под действием органов управления, горизонтальные участки - это части статической характеристики, которые отражают работу ГЭК при уменьшении подачи топлива под действием регулятора, а значения коэффициентов разгонных характеристик ($K_{вр1}, K_{вр2}, K_{вр3} \dots$) отражают степень утяжеления работы ГЭК на соответствующих ступенях разгона судна. В результате его реализации судно постепенно выходит на требуемый режим (в данном случае на самый полный ход) без перегрузки главных двигателей с учетом их технического состояния и условий эксплуатации.

В частных случаях (при разгоне судна на долевые режимы или с долевых режимов, при разгоне в условиях эксплуатации отличных от штатных и т.д.) задача сводится к выходу в пределах имеющихся ограничений на режимные точки рассмотренного алгоритма. Ниже представлены два варианта таких случаев: разгон судна на долевой режим в штатных условиях (рисунок 3) и в облегченных условиях эксплуатации (рисунок 4).

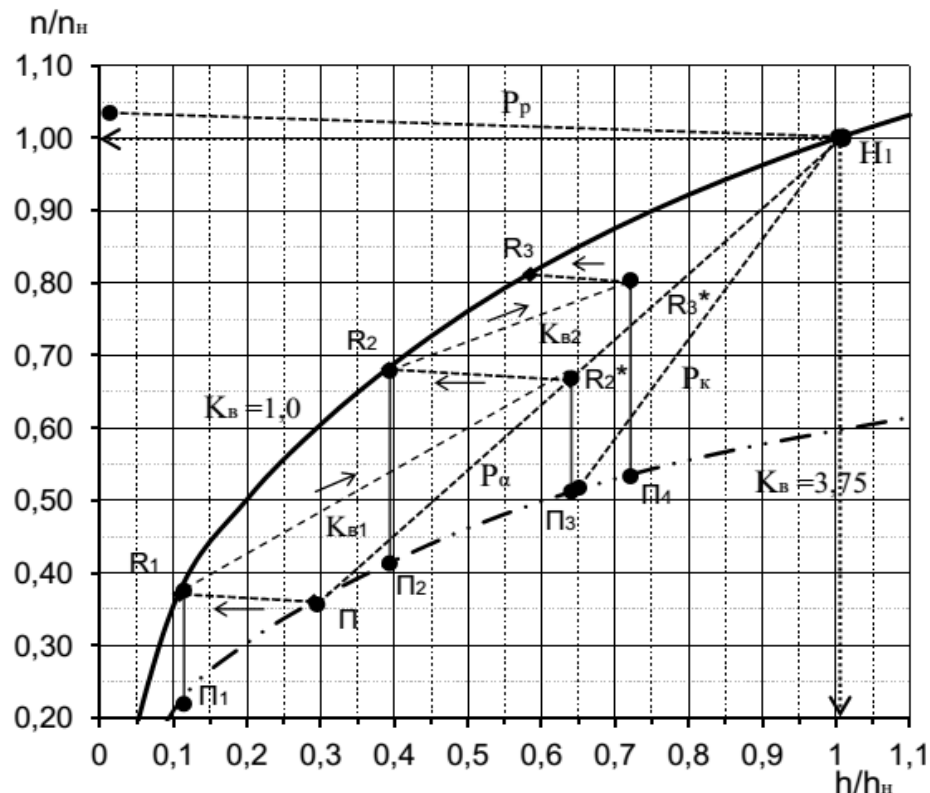


Рисунок 3. Работа ГЭК при разгоне судна в штатных условиях эксплуатации:
 $K_{вр1}$ и $K_{вр2}$ – коэффициенты разгонных характеристик ГЭК при первой и второй ступенях разгона
(остальные обозначения согласно рисунку 1)

Обоснование параметров алгоритмов работы ГЭК при выводе судна на эти режимы выполнено в соответствии с рассмотренной выше методикой реализации полного цикла разгона судна, частично используя вышеприведенный алгоритм. При этом отличие методики обоснований для случая эксплуатации в облегченных условиях (рисунок 4) состоит в том, что после установки органа управления в положение большей топливоподачи облегчение разгонных характеристик происходит до балластной характеристики, отражающей эти условия эксплуатации судна. В результате частота вращения главных двигателей по соответствующим участкам ($R_2^*R_2$ или $R_3^*R_3$) статической характеристики стабилизируется около значений на легкой характеристике ($t.R_2$ и $t.R_3$).

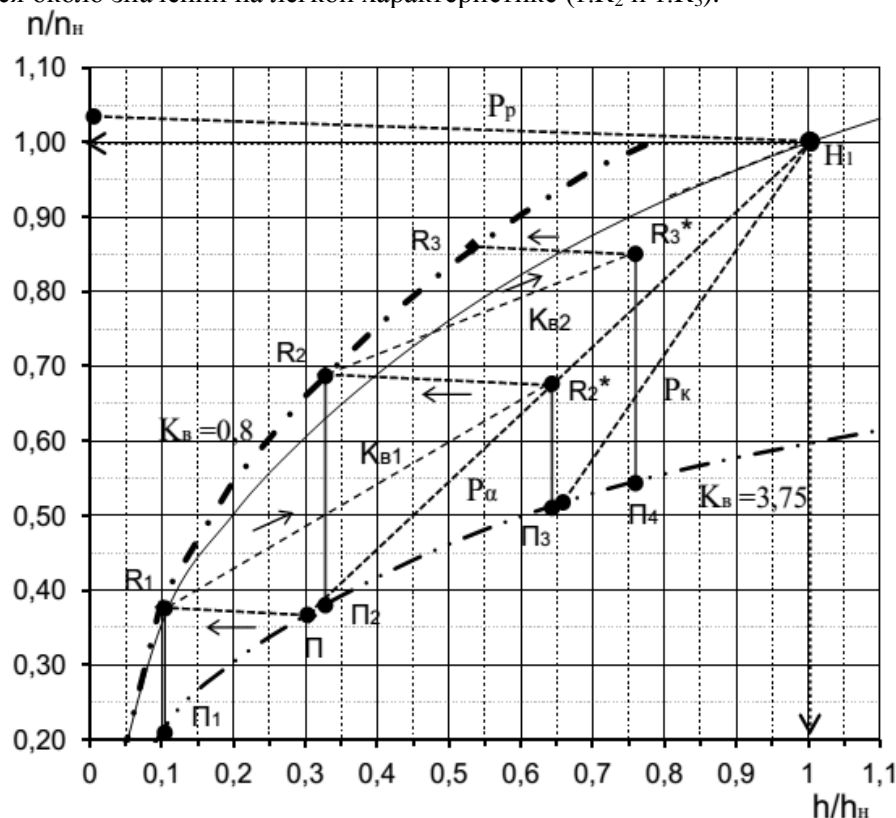


Рисунок 4. Работа ГЭК при разгоне судна в облегченных условиях эксплуатации:
 $K_{в1}$ и $K_{в2}$ – коэффициенты разгонных характеристик ГЭК при первой и второй ступенях разгона
 (остальные обозначения согласно рисунку 1)

Соответственно алгоритмы работы ГЭК при выводе судна на некоторые долевые режимы характеризуются следующими параметрами:

в штатных условиях эксплуатации (рисунок 3) $h_{п}/h_{н} = 0,3$; $n/n_{нR1} = 0,38$; $h/h_{нR2*} = 0,64$; $K_{в1} = 1,86$; $n/n_{нR2} = 0,68$; $h/h_{нR3*} = 0,72$; $K_{в2} = 1,32$; $n/n_{нR3} = 0,81$;

при 25%-ном облегчении штатных (рисунок 4) $h_{п}/h_{н} = 0,3$; $n/n_{нR1} = 0,385$; $h/h_{нR2*} = 0,64$; $K_{в1} = 1,86$; $n/n_{нR2} = 0,69$; $h/h_{нR3*} = 0,76$; $K_{в2} = 1,19$; $n/n_{нR3} = 0,86$.

При этом скорости движения судна будут соответствовать ординатам между сходственными точками (при определенной топливоподаче) в первом случае стартовой и нормальной характеристик при $h/h_{нR3} = 0,58$, а во втором - стартовой и балластной характеристик при $h/h_{нR3} = 0,53$. Относительные значения этих скоростей легко определяются с помощью диаграммы эксплуатационных режимов судна (рисунок 5).

На диаграмме (рисунок 5) приведены графические зависимости относительной скорости хода судна от относительной топливоподачи при различных условиях эксплуатации судна, а именно: утолщенная сплошная кривая – в штатных условиях, утолщенная штрихпунктирная – при 25%-ном облегчении штатных условий, а утолщенная штриховая – при 25%-ном утяжелении штатных. В основу построения этих кривых положено сформулированное выше свойство характеристик ГЭК. Распространив его на область между кривыми $K_{в} = 0,8$, $K_{в} = 1,25$ и стартовой характеристикой рисунка 1,

$K_B = 1$ – кривая относительной скорости движения судна в штатных условиях эксплуатации;

$K_B = 0,8$ – тоже при 25%-ном облегчении штатных; $K_B = 1,25$ – тоже при 25%-ном утяжелении штатных;

$K_{\text{вн}} = 1$, $K_{\text{вн}} = 0,8$ и $K_{\text{вн}} = 1,25$ – кривые относительной частоты вращения гребных винтов соответственно в

(остальные обозначения согласно рисунку 1)

$$v/v_0 = (n/n_0)[(1-\epsilon)/(1-\epsilon_0)] = (n/n_0)k$$

Анализ диаграммы показывает, что скольжение винтов зависит как от режима их работы (при

Представленные в статье модели и алгоритмы позволяет при наличии соответствующего программно-аппаратурного обеспечения свести управление ГЭК к выделению опции на дисплее компьютера, устанавливающей необходимую скорость движения судна. Далее интеллектуальная технология дистанционного автоматизированного управления (симбиоз компьютерной программы с элементами искусственного интеллекта) просчитает и реализует оптимальный для тех или иных условий эксплуатации алгоритм вывода судна на требуемый режим [5] или на возможный с учетом ограничений (если отключение их при этом не предусмотрено), например, так, как это показано на рисунке 5 для 80% скорости хода при 25%-ном утяжелении условий эксплуатации. При этом переход с режима на режим будет осуществляться плавно без перегрузки главных двигателей и характерного резкого наброса нагрузки при ручной перестановке органов управления.

Список литературы

1. Методические указания по курсовому проектированию по дисциплине «Судовые энергетические установки» / А.С.Баёв - СПб.: СПбГУВК, 1997. 61 с.
2. 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.
3. Руководство по теплотехническому контролю серийных теплоходов. Министерство речного флота РСФСР. М.: Транспорт, 1980, 424 с.
4. 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.
5. Баёв, А.С. Оптимизация работы судовой энергетической установки: материалы второй Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции «Актуальные проблемы морской энергетики» / А.С.Баёв - СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2013. С.124-126.