

УДК 629.122.064

А.С.Баёв

СПбГМТУ, д.т.н., академик,
профессор

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОГО 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 рассматривается как 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 долевым и на номинальном режимах работы главных двигателей), а выходной – относительная частота вращения винтов фиксированного шага (ВФШ) n/n_n (в формулах n/n_n), где n и n_n – частота вращения гребных винтов на некотором долевым и на номинальном режимах работы.

Электронизация и математизация 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 активным: адаптивным и оптимальным.

Адаптивные системы управления могут быть самоорганизующимися (с настройкой собственной структуры) и самонастраивающимися (с настройкой параметров входящих в них элементов).

Рассматриваемые в данной статье модели и алгоритмы управления ГЭК судов река-море плавания с механической главной передачей являются математическим обеспечением адаптивной системы управления второго типа. Исходная база такой

системы - 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:

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

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

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

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

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

где P / P_n , P_K / P_n , P_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 (на рисунках и в тексте 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:

$$n / n_n = (h / h_n) \{ [1 - (1 / \eta_m)] (1 + \Delta_p) / 2K_B \} + [(h / h_n) (1 / \eta_m) (1 + \Delta_p) / K_B]^{0.5};$$

$$(n / n_n)_K = (1 / K_B)^{0.5};$$

$$(n / n_n)_\alpha = \{ (1 - n_{\min} / n) / [2K_B - 1 - (K_B - 1)(n_{\min} / n)] \}^{0.5};$$

$$(n / n_n)_p = 1 + \Delta n (1 - h / h_n),$$

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.

На рис.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 $K_B = 1$);

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 ($K_b = 3,75$).

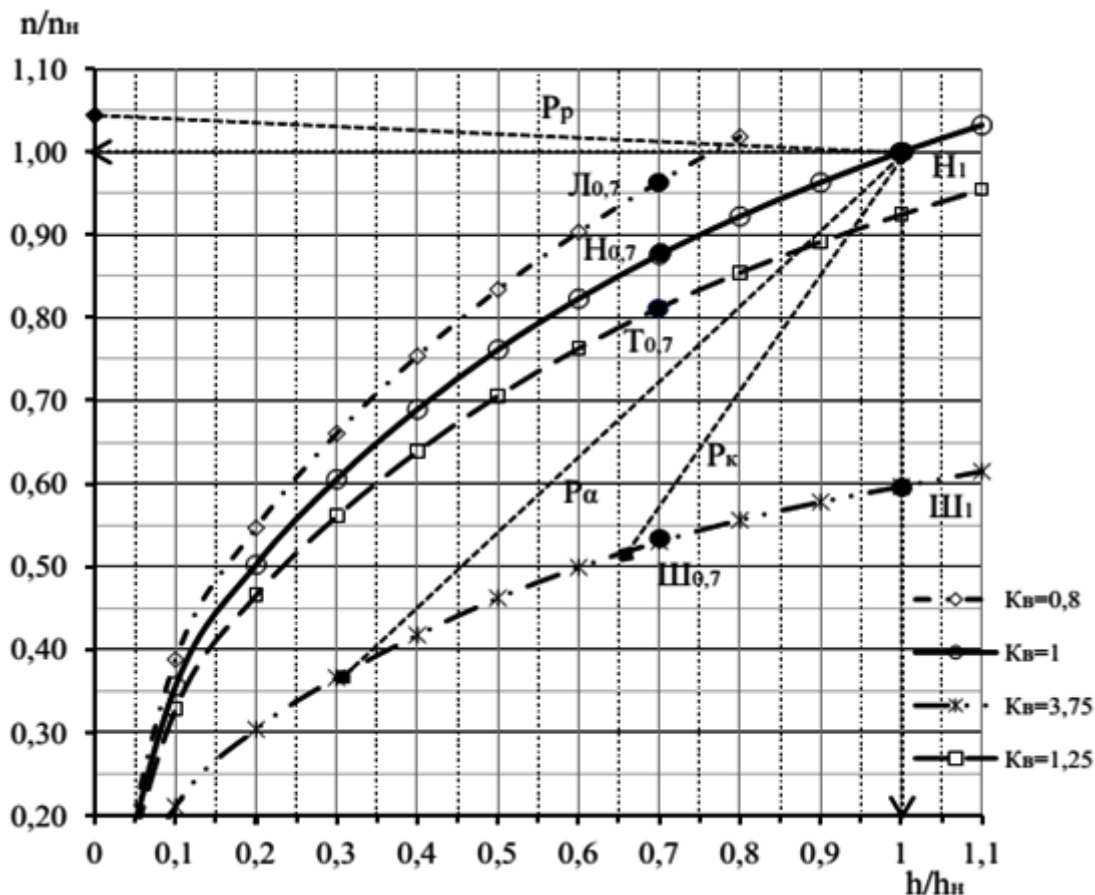


Рисунок 1. Характеристики главного энергетического комплекса:
 $K_b = 1$ - нормальная или штатная; $K_b = 0,8$ - легкая или балластная;
 $K_b = 1,25$ - тяжелая или разгонная; $K_b = 3,75$ - предельно-тяжелая или стартовая;
 P_α – ограничительная по тепловой напряженности главных двигателей;
 P_k - тоже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

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 N_1 и предельную режимную точку в данном случае с $n/n_n = 0,37$ на стартовой характеристике).

Таким образом, 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 $N_1Ш_1$ при топливоподаче $h/h_n = 1$, а при парциальной (долевой) топливоподаче, например при $h/h_n = 0,7$, в штатных условиях эксплуатации (кривая $K_b = 1,0$) соответствует ординате $N_{0,7}Ш_{0,7}$, в условиях более легких, чем штатные (кривая $K_b = 0,8$) - $L_{0,7}Ш_{0,7}$, а в условиях более тяжелых, чем штатные (кривая $K_b = 1,25$) - $L_{0,7}Ш_{0,7}$.

В качестве примера 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 топливоподачи при разгоне располагаются на ограничительной P_{α}). Такой разгон судов именуется оперативным.

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 пуска 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 ($K_b = 3,75$). 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 стабилизируется с места стартовая характеристика облегчается в данном случае вплоть до нормальной и частота вращения главных двигателей стабилизируется по участку статической характеристики (PIR_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 $h/h_n = 0,67$ 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 $h/h_n = 0,39$. 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 $h/h_n = 0,825$ 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 стабили-

зируются около $n/n_n = 0,84$ за счет снижения топливоподачи САР до $h/h_n = 0,64$. При этом скорость судна будет соответствовать ординате $R_3\Pi_3$.

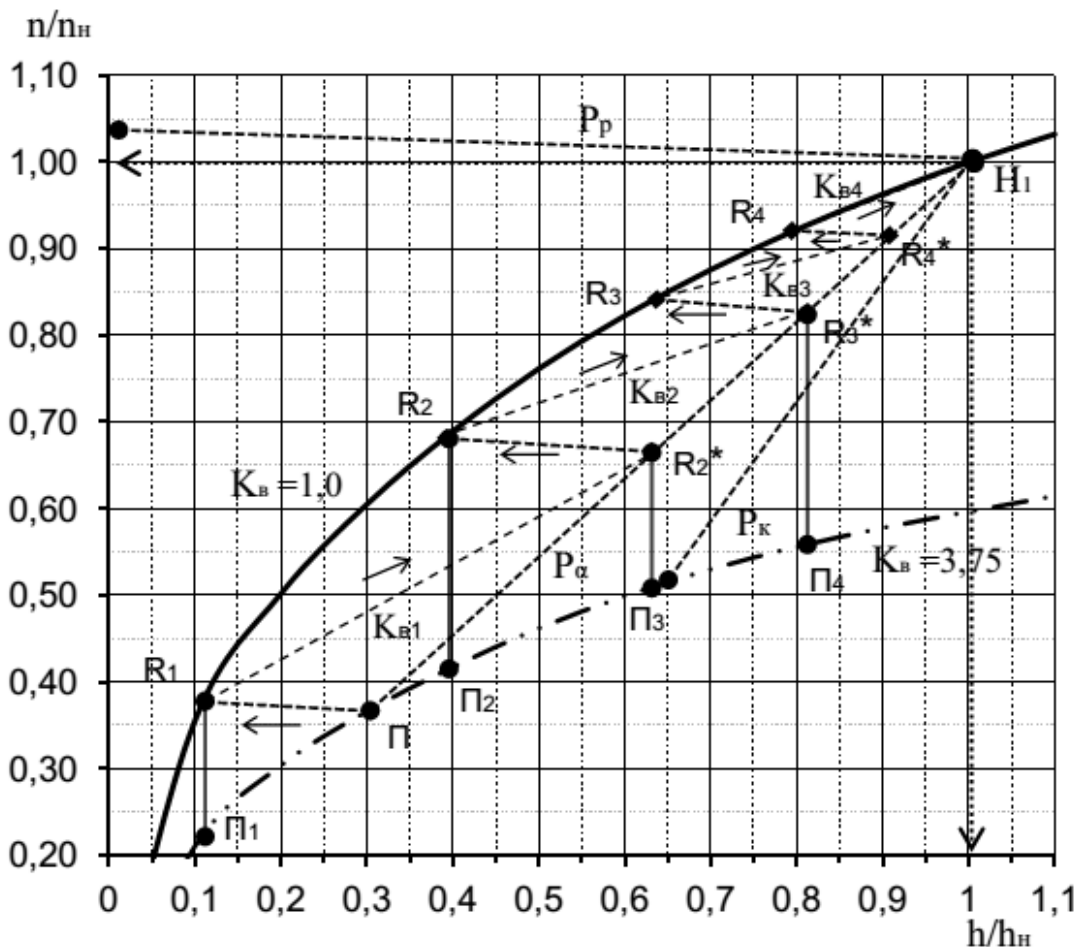


Рисунок 2. Работа ГЭК при оперативном разгоне судов в штатных условиях их эксплуатации:
 $K_{в1}$, $K_{в2}$, $K_{в3}$ и $K_{в4}$ – коэффициенты характеристик ГЭК при первой, второй, третьей и четвертой ступенях разгона судна соответственно (остальные обозначения согласно рис. 1)

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

Таким образом, полный алгоритм оперативного разгона судна осуществляется при следующих параметрах работы ГЭК: $h/h_n = 0,3$ ($n/n_n = 0,37$); $n/n_{нR1} = 0,38$; $h/h_{нR2*} = 0,64$; $K_{вт1} = 1,86$; $n/n_{нR2} = 0,68$; $h/h_{нR3*} = 0,83$; $K_{вт2} = 1,49$; $n/n_{нR3} = 0,84$; $h/h_{нR4*} = 0,92$; $K_{вт3} = 1,22$; $n/n_{нR4} = 0,92$; $h/h_{нR5*} = 1$; $K_{вт4} \approx 1,0$; $n/n_{нR5} = 1,0$, где значения коэффициентов разгонных характеристик ($K_{вт1}$, $K_{вт2}$, $K_{вт3}$ и $K_{вт4}$) отражают степень утяжеления работы ГЭК на соответствующих ступенях разгона судна.

В результате их реализации судно постепенно выходит на требуемый режим 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) задача сводится к выходу в пределах имеющихся ограничений на режимные точки рассмотренного алго-

ритма. Ниже представлены два варианта таких случаев: разгон судна на долевой режим в штатных условиях (рис.3) и в облегченных условиях эксплуатации (рис.4). 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.

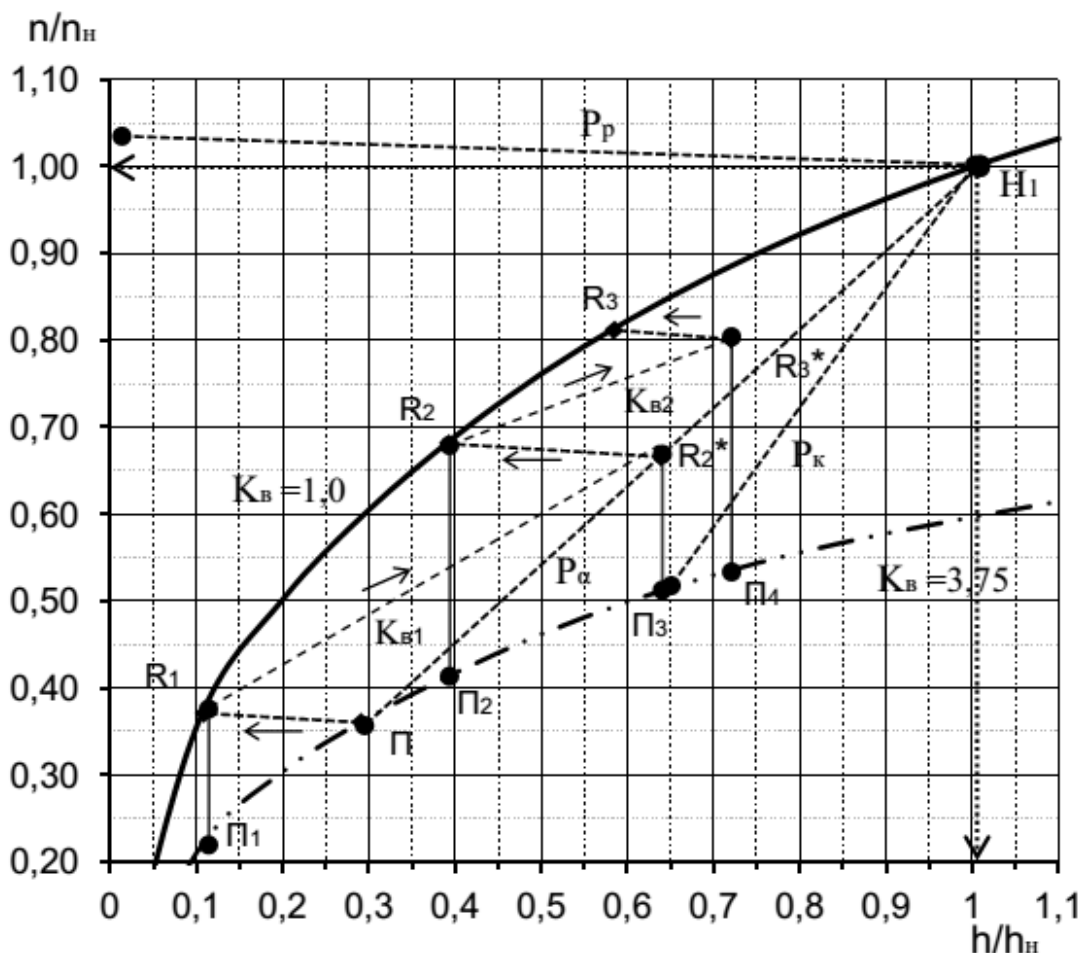


Рисунок 3. Работа ГЭК при разгоне судна в штатных условиях эксплуатации:
 $K_{в1}$, и $K_{в2}$ – коэффициенты характеристик ГЭК при первой и второй ступенях
 (остальные обозначения согласно рис. 1)

Отличие методики обоснований для случая эксплуатации в облегченных условиях (рис.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 отрезкам ($R_2^*R_2$ или $R_3^*R_3$) статической характеристики стабилизируется около значений на легкой характеристике ($t.R_2$ и $t.R_3$).

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

в штатных условиях эксплуатации (рис.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 (рис.4) $h_p/h_n = 0,3$; $n/n_{HR1} = 0,38$; $h/h_{HR2^*} = 0,64$; $K_{B1} = 1,86$; $n/n_{HR2} = 0,69$; $h/h_{HR3^*} = 0,76$; $K_{B2} = 1,19$; $n/n_{HR3} = 0,86$.

При этом скорости судна будут соответствовать ординатам между сходственными точками (при определенной топливоподаче) в первом случае стартовой и нормальной характеристик при $h/h_{HR3} = 0,58$, а во втором - стартовой и балластной характеристик при $h/h_{HR3} = 0,53$. Относительные значения этих скоростей легко определяются с помощью диаграммы эксплуатационных режимов судна (рис.5).

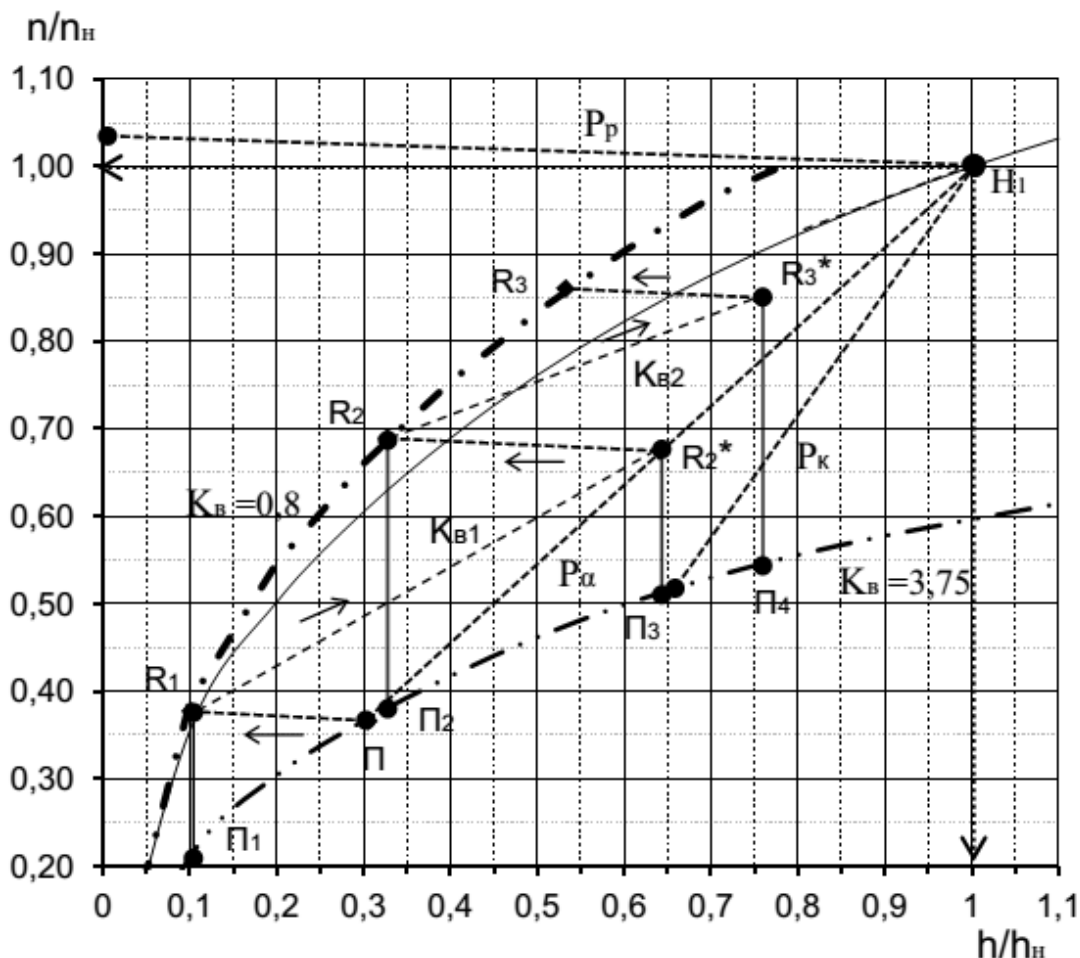


Рисунок 4. Работа ГЭК при разгоне судна в облегченных условиях эксплуатации:

K_{B1} , и K_{B2} – коэффициенты характеристик ГЭК при первой и второй ступенях (остальные обозначения согласно рис. 1)

На диаграмме (рис. 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, в соответствии с которым, если в штатных условиях эксплуатации судна ординате $H_1Ш_1$ рисунка 1 соответствует номинальная скорость движения судна, а ординате $H_{0,7}Ш_{0,7}$ – скорость при топливоподаче $h/h_n = 0,7$, то относительная скорость хода судна в штатных условиях при этой топливоподаче равна отношению $H_{0,7}Ш_{0,7}/H_1Ш_1$. Распространив эту законо-

мерность на область между кривыми $K_b = 0,8$ и $K_b = 1,25$ рисунка 1, получаем диаграмму эксплуатационных режимов судна, в соответствии с которой при выходе судна на долевой режим в штатных условиях эксплуатации (рис.3) обеспечивается относительная скорость хода $v/v_n = 0,79$, а при 25%-ном облегчении штатных (рис.4) $v/v_n = 0,84$.

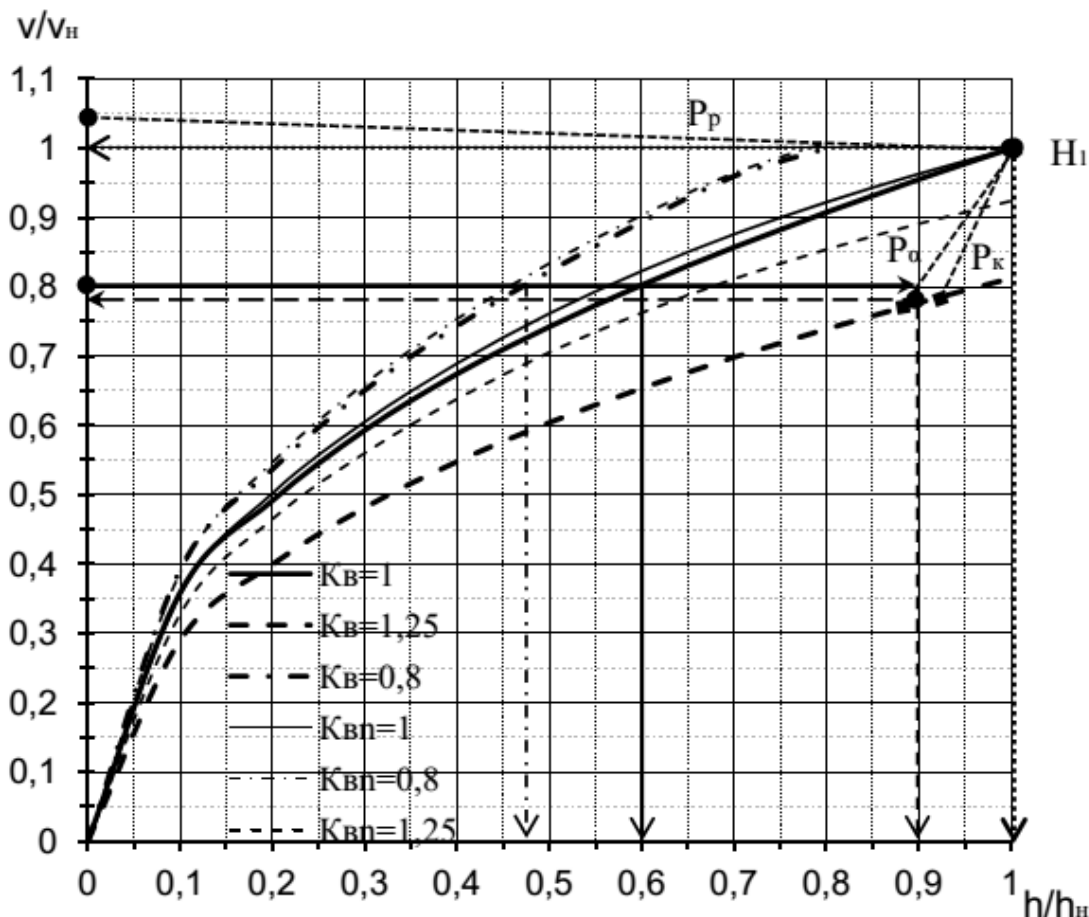


Рисунок 3. Диаграмма эксплуатационных режимов судна:

$K_b = 1$ – в штатных условиях эксплуатации; $K_b = 0,8$ – при 25%-ном облегчении штатных; $K_b = 1,25$ – при 25%-ном утяжелении штатных; $K_{вп} = 1$, $K_{вп} = 0,8$ и $K_{вп} = 1,25$ – кривые относительной частоты вращения гребных винтов соответственно в штатных условиях эксплуатации, при 25%-ном облегчении штатных и при 25%-ном утяжелении штатных (остальные обозначения согласно рис. 1)

На рис.5 также изображены кривые относительной частоты вращения винтов в этих условиях и ограничительные по тепловой и механической напряженности и частоте вращения. Из сопоставления графиков диаграммы следует, что между относительной скоростью судна v/v_n (в формуле v/v_n) и относительной частотой вращения ВФШ n/n_n существует достаточно сложная зависимость, которая может быть представлена в следующем виде

$$v/v_n = (n/n_n) \left[(1-s)/(1-s_n) \right] = (n/n_n) k_v,$$

где $k_v = (1-s)/(1-s_n)$ – коэффициент пропорциональности; s и s_n – скольжение винтов на некотором долевом и номинальном (расчетном) режимах судна.

Анализ диаграммы показывает, что скольжение винтов зависит как от режима их работы (при $K_v = \text{const}$ разность $n/n_n - v/v_n$ изменяется), так и от условий эксплуатации судна (с утяжелением условий разность $n/n_n - v/v_n$ увеличивается). То есть, вопреки существующему мнению даже в штатных условиях эксплуатации относительная скорость судна не равна относительной частоте вращения винтов. С утяжелением же условий эксплуатации судов скольжение винтов резко повышается.

Представленные в статье модели и алгоритмы позволяют при наличии соответствующего программно-аппаратурного обеспечения свести управление ГЭК к установке органа управления в положение необходимой скорости хода судна. Далее интеллектуальная система ДАУ (система с элементами искусственного интеллекта) просчитает и реализует оптимальный для тех или иных условий эксплуатации алгоритм вывода судна на требуемый режим или на возможный с учетом ограничений (если отключение их при этом не предусмотрено) так, как это показано на рис.3 для 80% скорости хода.

28.02.2016 г.