

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ СУДОВОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСА

До Дык Лыу, д.т.н.;

Государственная Морская Академия им. адм. С.О. Макарова;

Май Ван Чинь, асп.;

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Разработаны эталонные и текущие математические модели основных характеристик элементов судового пропульсивного комплекса для выбора оптимального режима совместной работы его элементов. Построены модели в усовершенствованной двойной диаграмме с математическими связями между легко контролируемыми параметрами в эксплуатационных условиях судна: эффективная мощность ( $P_e$ , кВт), усредненная частота вращения ( $n$ , об/мин), усредненная скорость судна ( $v$ , уз.). Текущие модели построены на основе диагностирования главного дизеля (ГД) и прогнозирования состояния шероховатости винта и корпуса, влияния осадки судна и волнения моря.

**Постановка задачи.** Режим работы судового дизеля (СДВС) в эксплуатации определяется основной характеристикой — эффективной мощностью, а также совокупностью других показателей, предельные значения которых предохраняют судовые дизели от тепловой и механической перегрузок. В справочнике [1] приведен список основных технико-экономических показателей работы СДВС. К ним относятся

➤ эффективные показатели:

$M_e$ , Н·м — эффективный крутящий момент при соответствующей усредненной частоте  $n$ , об/мин;

$p_{me}$ , МПа — среднее эффективное давление;

$b_e$  — удельный эффективный расход топлива и эффективный КПД;

➤ индикаторные показатели:

индикаторная мощность дизеля (цилиндра);

среднее индикаторное давление;

индикаторный удельный расход топлива;

индикаторный КПД;

максимальные давления сжатия и сгорания в цилиндре;

давление надувного воздуха и др.;

➤ экологические показатели:

выбросы вредных веществ с отработавшими газами;

дымность отработавших газов;

уровни шума и вибрации.

Контроль и регулирование экологических показателей необходимы для выполнения новых требований Приложения VI МАРПОЛ 73/78 о предотвращении загрязнений с судов. К сожалению, сегодня экологические показатели не контролируются в практике эксплуатации СДВС, а проверяются только на стенде изготовителя.

Режимы работ элементов пропульсивного комплекса могут быть представлены их основными характеристиками в виде зависимостей (математических, графических или табличных) между основными показателями. Различаются скоростные  $Y = f(n)$  и нагрузочные  $Y = f(p_e)$ ,  $Y = f(M_e)$  или  $Y = f(h_p)$  (при  $n = \text{const}$ ) характеристики, где  $Y$  — один из основных технико-экономических показателей,  $h_p$  — положение рейки топливного насоса высокого давления.

Большое значение имеют ограничительные характеристики главного дизеля, т. е. такие, при которых значения технико-экономических показателей, характеризующих режимы работы, должны оставаться ниже предельных значений за длительное время эксплуатации. Таким образом, обеспечиваются заданные ресурсы работы главного дизеля. Ограничительные характеристики определены заводом-изготовителем и приведены в эксплуатационной документации.

Режим работы главного дизеля в заданных эксплуатационных условиях определен осадкой судна,  $d$  [м] и условиями окружающей среды (температура, давление, относительная влажность воздуха в машинном отделении, географическое положение моря и др.). Выбранный режим работы главного дизеля должен обеспечивать равенство его эффективной мощности и мощности, потребляемой гребным винтом при нахождении в удовлетворительных интервалах технико-экономических и экологических показателей СДВС. Этот выбранный эксплуатационный режим работы главного двигателя на гребной винт зависит от текущего состояния самого двигателя и состояния шероховатости гребного винта и корпуса, осадки судна и также от состояния моря. Эксплуатационный режим СДВС может быть правильно выбран после предварительного определения реального состояния элементов судового

пропульсивного комплекса (СПК). В эксплуатации СДВС проявляются случаи аномальной работы дизеля, например при отключении цилиндров. В этих случаях недостаточно использовать только технико-экономические показатели дизеля в целом, необходимо контролировать и управлять параметрами каждого рабочего цилиндра. Главный двигатель устойчиво и безопасно работает только тогда, когда все рабочие цилиндры защищены от тепловой и механической перегрузок и валопровод пропульсивного комплекса не попадает в зоны резонансов первой опасной моды его крутильных колебаний.

Показатели режима работы главного двигателя связаны с параметрами обслуживаемых систем (охлаждения, турбонаддува, смазки и топливоподачи). Контроль и управление входными и исходными параметрами обслуживаемых систем позволяют оценивать состояние этих систем методами диагностирования. Кроме того, эти параметры дают информацию для диагностирования качества процесса сгорания топлива в цилиндрах, т. е. позволяют определить состояние ДВС в целом.

Под оптимальным режимом работы СДВС понимается эксплуатационный режим, который удовлетворяет некоторому функциональному критерию оптимизации, например, минимальному эффективному расходу топлива.

**Эталонные характеристики СПК.** В традиционной паспортной диаграмме характеристик СПК [2] имеется два вида характеристик комплекса. Обычно эти характеристики группируются в зависимости от связей:

- сопротивление корпуса, тяга главного двигателя и упора гребного винта в зависимости от скорости судна  $v_s$ , (уз.);

- вырабатываемая мощность двигателя и потребляемые мощности корпуса и гребного винта в зависимости от скорости судна  $v_s$ .

Для измерения сил тяги, упора или сопротивления корпуса необходимо использовать специальную аппаратуру, которая в практике эксплуатации на борту судов отсутствует.

Эталонные характеристики представляют собой усовершенствованную двойную диаграмму, которая была предложена проф. Станчевым [2]. Диаграмма представлена на графике в зависимости от частоты вращения  $n$ , об/мин:

- винтовые характеристики  $P_e(n)$ ,  $P_{e0}(n)$ , где  $n = n_d = n_b$ ;

- скоростные характеристики:  $v_s(n)$ ;  $v_{s0}(n)$ , где индекс 0 относится к ограничительной характеристике по мощности главного двигателя.

Усовершенствованная двойная диаграмма для идентификации СПК содержит ту же информацию, что и паспортная диаграмма, но

ее использование более удобно, чем использование паспортной диаграммы, поскольку может быть построена по показаниям штатных приборов на судне.

Режим работы СПК ( $P_e$ ,  $n$ ,  $v_s$ ) выбирается так, чтобы дизель не испытывал тепловой и механической перегрузки. Для обеспечения дизеля от перегрузки заводом-производителем заданы зоны продолжительного интервала времени работы (зона А), краткого интервала времени работы (зона В) и работы с превышенной частоты вращения в процессе испытаний (зона С).

Эта диаграмма содержится в документации главного дизеля судна, которая является эталонным источником данных диагностики.

На рисунке показаны характеристики СПК т/х «VINASHINSKY» (постройка 2005 г., Вьетнам) с использующегося главного двигателя типа 7S35MC фирмы MAN B&W. На рисунке кроме характеристик усовершенствованной двойной диаграммы нанесены зоны А, В и С эталонных характеристик главного дизеля.

Ограничительная характеристика двигателя, обозначенная индексом 0, показана в координатах  $P_e-n$  и содержит следующие составляющие: EF — ограничительная характеристика по моменту (швартовная характеристика); FR —

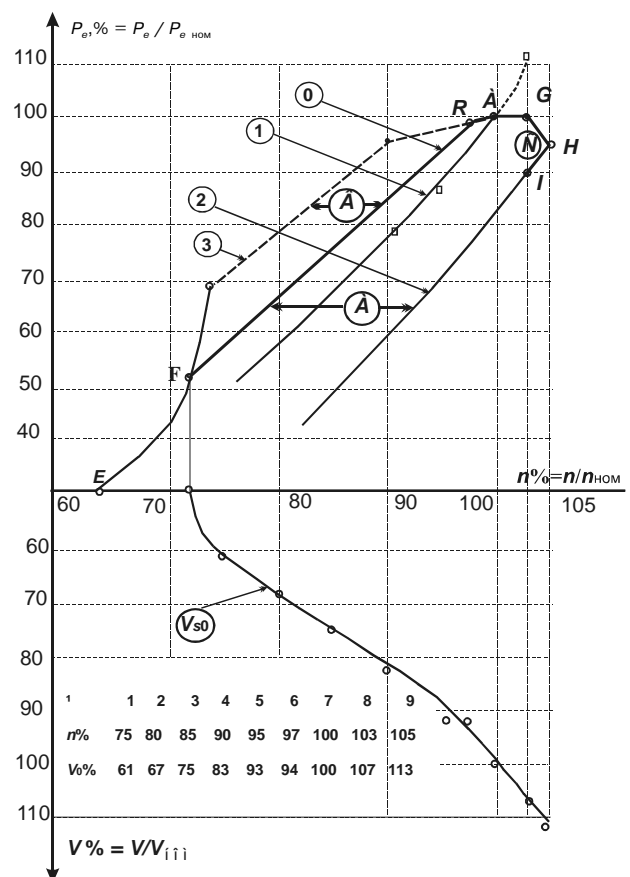


Рис. Эталонные характеристики пропульсивного комплекса т/х «VINASHINSKY»

ограничительная характеристика по паспорту двигателя;  $RA$  — ограничительная характеристика по среднему эффективному давлению  $p_{me} = 100\% p_{me \text{ ном}}$ ;  $AG$  — границы продолжительной непрерывной работы по мощности  $P_e = 100\% P_{e \text{ ном}}$ ;  $GH$  — граница работы с превышенной частотой вращения.

В квадранте скоростных характеристик по мощности,  $P_e - n$ , наносятся дополнительно характеристики:  $1$  — расчетная оптимальная винтовая характеристика;  $2$  — самая легкая винтовая характеристика;  $3$  — внешняя характеристика — граница перегрузки (по черному дыму); зона  $A - E-F-R-A-G-I-2$  — продолжительная работа без перегрузки дизеля по тепловой и механической напряженности; зона  $B$  — между ограничительной и правой внешней ( $3$ ) характеристиками; зона  $C - G-H-I$  — превышенной частоты вращения при испытаниях.

В другом квадранте в координатах  $v - n$  изображена передаточная характеристика,  $v_s = f(n)$ .  $v_{s0} = f(n)$  — ограничительная передаточная характеристика скорости судна по частоте вращения.

Модели СПК разделяются на эталонные и текущие модели. Особенно важны эталонные характеристики — это ограничительные характеристики  $P_0 = P_0(n)$  и  $v_0 = v_0(n)$ , которые построены аналитически [2, 3]  $v_0 = (A_2/B_2)n - M_0(n)/B_2n$ , где  $M_0$  — момент ГД,  $M_0 = P_0/(2\pi n)$ ;  $A_2, B_2$  — коэффициенты, определяемые по методу наименьших квадратов.

В уравнении  $v_0 = v_0(n)$ , крутящий момент ( $M$ ), скорость судна ( $v$ ) и частота вращения ( $n$ ) измерены или вычислены по ограничительной характеристике  $P_0(n)$ . Момент может быть измерен датчиком момента.

Коэффициенты  $A_2$  и  $B_2$  характеризуют гидродинамические свойства винта, и не зависят от ограничительной характеристики дизеля  $M_0(n)$  и осадки судна. Для т/х «VINASHINSKY» экспериментальные данные получены при сдаточных испытаниях этого судна в 2005 г., а вычисленные значения  $A_2, B_2$  и ограничительная характеристика скорости получены авторами по алгоритму, показанному в [2, 3]. На рисунке показаны данные измерения и аппроксимирующая линия  $V_{s0} = V_{s0}(n)$ .

**Построение текущих моделей СПК.** Текущие модели СПК — это текущая винтовая характеристика  $P_e = P_e(n)$ , и передаточная характеристика  $v_s = v_s(n)$ , которые построены в процессе эксплуатации судна обработкой измеренных данных  $P_e, n$  и  $v_s$ .

Характеристики  $P_e(n)$  и  $v_s(n)$  определяются в зависимости от состояния моря (ветра, волна),

шероховатостей винта и корпуса и осадки судна. Предположим, что состояние мореходства — стандартное, т. е. волна 2–3 балла. На практике эти характеристики построены по отношению к осадке  $d$ , м и состоянию шероховатостей винта и корпуса.

Если получим данные наблюдения, записанные в виде  $P_{ei}, n_i$  и  $v_{si}, i = 1, 2, \dots$ , то текущая винтовая характеристика  $P_e(n)$  и передаточная линия  $v_s(n)$  также определяются методом наименьших квадратов. Этапы диагностирования реализуются при помощи метода построения текущей передаточной характеристики ( $\sigma = v/n$ ) и винтовой характеристики ( $P_e = Cn^\alpha$ ) пропульсивного комплекса, где  $\sigma, C$  и  $\alpha$  — диагностические коэффициенты, характеризующиеся состоянием элементов комплекса.

При ходовых испытаниях строят характеристики пропульсивного комплекса на режиме «балласт». С помощью разработанного алгоритма получаем основные характеристики пропульсивного комплекса для любой осадки  $d$ , м [4]:

$P_{e,d} = \mu_d n^3; \sigma_d = \sigma_d(d, \Omega_d, d_b, \Omega_b); \mu_d = \mu_d(\sigma_d)$ , где  $\Omega$  — площадь смоченной поверхности корпуса судна,  $m^2$ , а индекс  $b$  — указатель режима «балласт».

На основании построенных моделей выполняются прогнозирование изменения характеристик СПК из-за повышения шероховатости гребного винта и корпуса [3]:

— снижение скорости судна:  $\delta\sigma_\tau = (\sigma_\tau - \sigma_0)/\sigma_0 = [(1 - K_R\tau_b)/(1 + K_R\tau_b)]^{1/2}$ ;

— повышение потребной мощности:  $\delta P_{e,\tau} = (P_{e,\tau} - P_{e,0})/P_{e,0} = K_M\tau_b$ ;

— повышение часового расхода топлива из-за шероховатости винта:  $b_e = \text{const}; \delta G_{h,\tau} = K_M\tau_b$ , где индекс 0 — начальный момент, когда поверхности винта и корпуса чисты;  $\tau$  — спрогнозированный момент для истечения  $\tau$  месяцев после момента 0.  $K_R, K_P, K_M$  — коэффициенты относительных изменений силы сопротивления корпуса, упора и момента гребного винта, определенные экспериментальным исследованием и зависящие от районов плавания.

**Оптимизация режима работы СПК.** Формальная функция оптимизации режима работы СПК может быть записана в виде:  $J = J(Y_j, X, S_{me}, d, S_p, S_h) \Rightarrow \min$ , где  $Y_j$  —  $j$ -й отклик (наблюдаемого параметра);  $X$  — входной вектор управляемых параметров;  $S_{me}, S_p, S_h$  — показатели состояний главного СДВС, винта, корпуса соответственно и  $d$  — осадка судна, м.

Алгоритм выбора оптимального эксплуатационного режима определяется следующими модулями:

— INPUT. Модуль входных текущих наблюдаемых информаций для контроля, диагностирования и управления состоянием СДВС и гребного винта. Кроме этого, вводят условия для выбора режима работы главного двигателя, данные вышеуказанные эксплуатационные условия и характеристики используемого топлива;

— DIAGNOS\_DIESEL. Модуль мониторинга и диагностирования состояния ГД. Основной его целью является оценка уровня ресурса мощности объекта без перегрузки по тепловой и механической напряженности.

— PROGNOS\_PROP. Модуль прогнозирования шероховатости ГВ и корпуса. В этом модуле выполнено вычисление основных характеристик СПК при осадке  $d$ , м, отличной от эталонного значения в документации.

— REGIME\_OPT. Модуль выбора (оптимизация) эксплуатационного режима.

— INDICATION\_REGIME. Модуль индикации результатов выбора.

Основные параметры для выбора оптимального эксплуатационного (индекс «ор») режима СПК  $P_e^{opt}(\bar{n}_{op}); \bar{n}_{op}; v(\bar{n}_{op})$ . Дополнительно необходимо следить за значениями иных определяющих из вышеуказанных технико-экономических и экологических параметров, чтобы они находились в соответствующих удовлетворительных интервалах или с учетом некоторого оптимального критерия.

На практике (в рейсе) нельзя получать информацию об экологических параметрах, если на суд-

не нет приборов для их анализа. В этом случае экологические показатели оцениваются косвенными технико-экономическими признаками или визуальным наблюдением (дымность, шумность).

Размер вектора управляемых параметров достаточно велик и практически невозможно получить оптимизацию критериев по всем параметрам, изменение значений которых во многих случаях могут быть противоположны. Следует отметить, что может быть разработан эффективный алгоритм для получения альтернативного компромиссного управления режимами работы дизеля векторной оптимизации параметров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Овсянников М.К., Петухов В.А. Дизели в пропульсивном комплексе морских судов: справочник. — Л.: Судостроение, 1987. — 256 с.

2. Станчев Е. и др. Динамичные исследования судовых пропульсивных установок в эксплуатационных условиях. — София: Военное издательство, 1982. — 284 с. (Болгария).

3. До Дык Лыу. Прогнозирование характеристик судовых пропульсивных комплексов при изменении шероховатостей гребного винта и корпуса // Транспорт. — 2005. — № 8. — С. 44–46, 71 (Вьетнам).

4. До Дык Лыу. Прогнозирование характеристик судовых пропульсивных комплексов при изменении осадки судна // Транспорт. — 2005. — № 9. С. 59–63 (Вьетнам).

**14 февраля 2007 на 87-м году жизни скончался  
доктор технических наук, профессор  
Санкт-Петербургского государственного  
политехнического университета  
Костин Алексей Константинович**

Вся профессиональная, научная и педагогическая деятельность А.К. Костина была связана с Ленинградским политехническим институтом, куда он поступил в 1938 г. и где после демобилизации из действующей армии продолжил учебу в 1946 г.

Защитив диплом по специальности «инженер-механик», он продолжил образование в аспирантуре и в 1955 г. защитил кандидатскую диссертацию. Совмещая научную и преподавательскую работу на кафедре ДВС, А.К. Костин подготовил и защитил в 1970 г. докторскую диссертацию и получил ученое звание профессора.

За десятилетия работы на кафедре под руководством А.К. Костина сформировалась научная школа, занявшая ведущее положение в стране в области процессов теплообмена в двигателе.

Под руководством А.К. Костина сложился и успешно работал научный коллектив, в котором было подготовлено 38 кандидатских диссертаций, в том числе соискателями из Болгарии, Польши, Египта, Индии.

А.К. Костин вел большую научно-организационную работу в качестве члена Ученых, проблемных и координационных Советов по двигателестроению, редакционных Советов отраслевых журналов. За боевые заслуги и многолетнюю успешную работу награжден 3 орденами и 8 медалями.



*Память об Алексее Константиновиче надолго останется в наших сердцах.  
Коллектив кафедры «Двигатели внутреннего сгорания»  
Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*