

## ДИНАМИКА СУДОВОЙ ПРОПУЛЬСИВНОЙ УСТАНОВКИ С ДВС

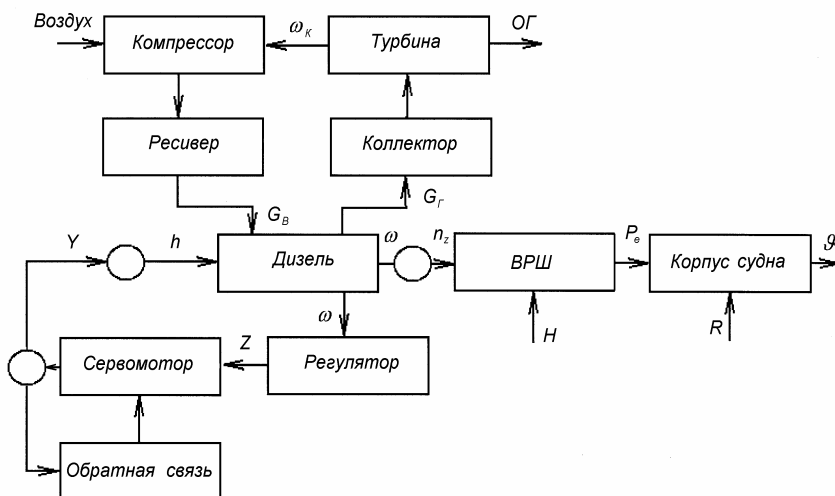
**Румб В.К.** (Санкт-Петербургский государственный морской технический университет)

Напомним, судовая пропульсивная установка представляет собой совокупность взаимодействующих между собой механизмов и устройств, предназначенных для обеспечения движения судна на всех спецификационных ходах. В состав пропульсивной установки входят: главный двигатель, передача, движитель, корпус судна.

При проектировании ДПУ обычно ограничиваются анализом установившихся режимов ее работы. Что касается неустановившихся режимов, то их исследуют крайне редко и только в рамках гипотезы квазистационарности. Гипотеза квазистационарности означает, что процесс перехода ДПУ от одного рабочего режима к другому протекает очень медленно, и, следовательно, в каждой точке этого процесса выполняется условие статического равновесия между энергией, вырабатываемой главным двигателем, и энергией, поглощаемой гребным винтом. Изучение переходных процессов в виде последовательной совокупности установившихся режимов существенно облегчает понимания их сути, однако не дает оснований для строго теоретического описания работы ДПУ на переходных режимах. Между тем, характер и форма изменения эксплуатационных параметров при работе ДПУ на неустановившихся режимах в значительной мере влияют на технико-экономические и маневренные качества судна.

Внешним проявлением неустановившегося режима является увеличение или уменьшение частоты вращения гребного винта из-за того, что дизель развивает избыточный или недостаточный крутящий момент. На колебания частоты вращения реагирует регулятор частоты вращения двигателя, который своим воздействием на топливоподачу стремится восстановить статическое равновесие на новом уровне. Закономерность изменения параметров ДПУ от начала возмущения до нового статического равновесия принято называть переходным процессом. По существу переходный процесс отражает реакцию ДПУ на конкретное внешнее воздействие.

Вид переходных процессов и их численные показатели определяются статическими и динамическими характеристиками элементов ДПУ и зависят от того, как эти элементы взаимодействуют между собой. Отсюда следует, что построение пе-



реходных процессов не относится к тривиальной задаче, поскольку для ее решения необходимо сначала установить динамические зависимости между входными и выходными параметрами каждого элемента в отдельности, далее выявить функциональные связи между взаимодействующими элементами

Рис. 1. Функционально- структурная схема ДПУ.

и только потом подвергнуть анализу полученную систему уравнений.

Данную задачу можно существенно упростить, если воспользоваться классическим аппаратом теории автоматического регулирования и записывать уравнения динамики элементов ДПУ в стандартной форме.

В полном соответствии с требованиями указанной теории рассмотрена ДПУ (рис. 1), состоящей из дизеля с газотурбинным наддувом и регулятором частоты вращения непрямого действия с жесткой обратной связью, гребного винта и корпуса судна. Динамические свойства такой установки определяются совокупностью уравнений ее элементов.

Динамические свойства корпуса проявляются в изменении скорости судна. Применительно к прямолинейному движению судна уравнение этого изменения может быть получено на основании 2-го закона Ньютона. Согласно ему

$$M_c \frac{dJ}{dt} = P_e - R,$$

где  $M_c$  – масса судна с учетом присоединенной массы воды;  $J$  – скорость судна;  $P_e$  – движущая сила (полезный упор) гребного винта;  $R$  – полная сила сопротивления движению судна.

Упор гребного винта, работающего за корпусом судна, можно представить следующим образом

$$P_e = (1-t)K_p \cdot r \cdot n_z^2 \cdot D_z^4,$$

где  $t$  – коэффициент засасывания;  $n_z$  – частота вращения гребного винта;  $D_z$  – диаметр винта;  $K_p$  – коэффициент упора, определяется по кривым действия гребного винта в функции от относительной поступи  $I_p$

$$I_p = (1-y) \frac{J}{n_z \cdot D_z},$$

где  $y$  – коэффициент попутного потока.

Силу сопротивления движению для водоизмещающих судов в теории корабля принято представлять в виде уравнения

$$R = V \frac{r \cdot J^2}{2} \Omega,$$

где  $V$  – коэффициент полного сопротивления;  $\Omega$  – смоченная поверхность судна,  $m^2$ .

После процедуры линеаризации с разложением в ряд Тейлора выражений для  $P_e$  и  $R$  уравнение движения судна принимает вид

$$M_c \frac{d(\Delta J)}{dt} + F_c \cdot \Delta J = K_{pn} \Delta n_z + K_{pH} \Delta H - K_{R\Phi} \Delta \Phi,$$

где  $F_c$  – фактор устойчивости судна;  $K_{pn}$ ,  $K_{pH}$  и  $K_{R\Phi}$  – тангенсы углов наклона соответствующих статических характеристик.

Что касается уравнений динамики других элементов ДПУ, то они подробно рассмотрены в [1, 2], поэтому приведем их без комментариев.

Уравнение двигателя

$$q \frac{d(\Delta w)}{dt} + F_d \cdot \Delta w = K_{dh} \Delta h - K_{dN} \Delta N.$$

Уравнение турбокомпрессора

$$q_k \frac{d(\Delta w_k)}{dt} + F_k (\Delta w_k) = K_{Tp} \Delta p_T + K_{Th} \Delta h - K_{kp} \Delta p_k.$$

Уравнение впускного ресивера

$$F_B \cdot \Delta p_k = K_{Bw_k} \cdot \Delta w_k - K_{Bw} \cdot \Delta w.$$

Уравнение выпускного коллектора

$$F_G \cdot \Delta p_G = K_{Gw} \cdot \Delta w + K_{Gp} \cdot \Delta p_k - K_{Gh} \cdot \Delta h.$$

Уравнение регулятора частоты вращения

$$n \frac{d(\Delta z)}{dt} + F_p \cdot \Delta z = K_{pw} \cdot \Delta w_p - K_{py} \cdot \Delta y.$$

Уравнение сервомотора регулятора частоты вращения

$$T_c \frac{d(\Delta Y)}{dt} + \Delta Y = \Delta z.$$

Чтобы система, составленная из приведенных уравнений, была замкнутой и соответственно взаимосвязанной, необходимо ввести в нее уравнениями связи, а именно:  $\Delta h = -\Delta Y$ ,  $\Delta n_z = 9,55 \Delta w$ . Полученную таким образом систему можно упростить в результате исключения из нее алгебраических уравнений. Достигается это простой подстановкой уравнений ресивера и коллектора соответственно в уравнения двигателя и турбокомпрессора. После подстановки и учета уравнений связи динамические свойства рассматриваемой ДПУ будут описываться системой из пяти дифференциальных уравнений.

В теории автоматического регулирования подобные системы уравнений приводят к операторной форме с помощью преобразований Лапласа. Такая мера вынужденная и связана с облегчением решения практических задач. Однако в современных условиях любые по сложности системы дифференциальных уравнений можно решать численными методами. В связи с этим упомянутую систему, описывающую динамические свойства рассматриваемой ДПУ, решали методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Результаты этих решений позволили построить переходные процессы, по которым можно судить о динамике установки в целом. Для примера на рис. 2 приведены графики изменения частоты вращения вала дизеля во времени при управляемом воздействии на регулятор частоты вращения.

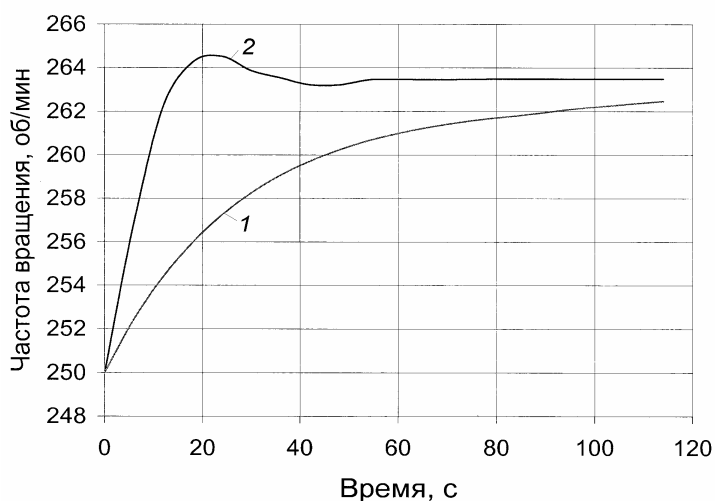


Рис. 2. Скоростные переходные процессы ДПУ (1) и дизеля (2).

С целью сопоставления были смоделированы переходные процессы дизеля, работающего отдельно и в составе ДПУ. Как видно из рисунка эти переходные процессы отличаются как количественно, так и формой. Для варианта, когда двигатель отсоединен от гребного винта, переходный процесс колебательный с явным забросом частоты вращения. Переходный процесс того же дизеля, но работающего на гребной винт, апериодический с большой длительностью. В этом варианте сказывается гидромеханическая инерционность пропульсивной установки. Подобное решение получено и при непосредственном воздействии на шаг ВРШ. По сравнению с воздействием на регулятор частоты вращения данное возмущение ухудшает

динамику установки, поскольку приводит к увеличению длительности переходного процесса, хотя его форма остается прежней.

### Литература

1. Грехов Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей / Л.В. Грехов, Н.А.Иващенко, В.А.Марков. – М.: Легион-Автодата, 2005.- 344 с.
2. Крутов В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателями внутреннего сгорания / В.И.Крутов. – М.: Машиностроение, 1989.- 416 с.

## К ВОПРОСУ О ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ВНУТРЕННЕГО КОНТУРА ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА НИЗКОЙ ФОРСИРОВКИ

**Столяров С.П., Столяров А.С., Савченко В.А.** (Санкт-Петербургский государственный морской технический университет)

Двигатель (рис. 1) создается в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» по договору с головным исполнителем - некоммерческим партнерством «Национальное Углеродное Соглашение».

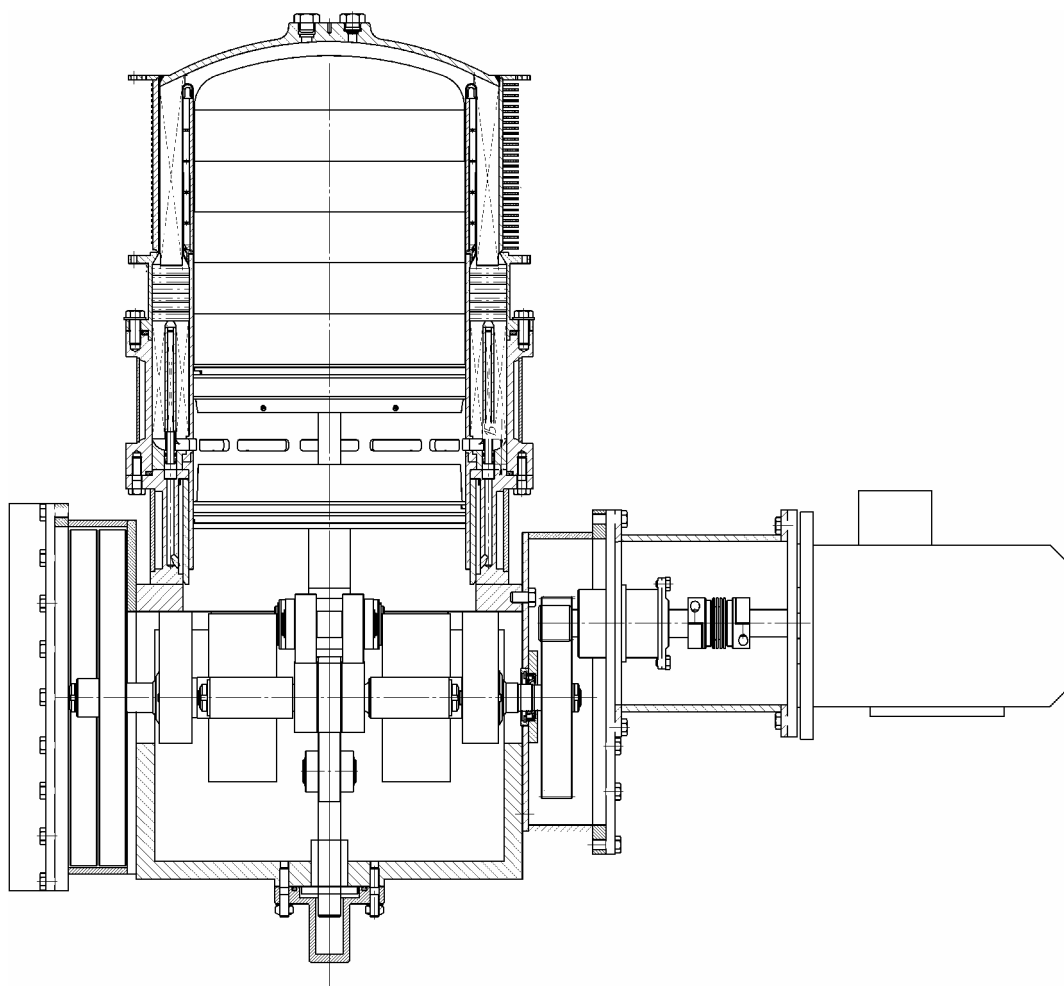


Рис. 1. Основной модуль двигателя Стирлинга без внешнего нагревательного контура и системы охлаждения.

Двигатель предназначен для работы в составе автономной многотопливной когенерационной установки суммарной мощностью до 10 кВт, преимущественно ра-