

УДК 621

**А. В. Костенко**, канд. техн. наук, доцент, **А. Н. Полетайкин**, канд. техн. наук, доцент  
Камчатский государственный технический университет, Россия  
Кубанский государственный университет, Россия  
Тел./Факс: +7(984)1637436; E-mail: andr13kost@list.ru

## ПРИНЦИП ЕДИНОГО РЕСУРСА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

*Судовой дизель влияет на работоспособность и надежность судна. Технический ресурс характеризует качество дизеля. Отсутствие единого подхода при производстве судовых дизелей приводит к разбросу значений ресурса для одних и тех же машин. Ресурс машины зависит от ресурсов элементов, входящих в машину. Технический ресурс машины определяется геометрическими, физическими, химическими и конструктивными свойствами деталей. Ресурс детали должен быть равным ресурсу машины или был кратным ему. Функционально-ориентированные технологии позволяют реализовать принцип единого ресурса машины и увязывать ресурсы деталей и межремонтные периоды судов. Для этого следует выполнить деление деталей на группы по величине требуемого ресурса, определить детали, для которых необходимо применить принцип единого ресурса. В работе приведена математическая модель, выражающая степень достижения единого ресурса агрегата.*

**Ключевые слова:** *судовой дизель, деталь, функционально-ориентированная технология, единый ресурс, математическая модель, стратегия ремонта.*

**A. V. Kostenko, A. N. Poletaykin**

## PRINCIPLE OF SINGLE RESOURCE AT DESIGNING AND MANUFACTURING OF DETAILS OF SHIP DIESELS

*Ship diesel affects the efficiency and reliability of the ship. The technical resource characterizes the quality of the diesel engine. The lack of a unified approach in the manufacture of marine diesel engines leads to a dispersion of resource values for the same machines. The resource of the machine depends on the resources of the elements entering the machine. The technical resource of the machine is determined by the geometric, physical, chemical and structural properties of the parts. The resource of the details must be equal to the resource of the machine or be a multiple of it. Functionally-oriented technologies make it possible to realize the principle of a single resource of a machine and to link the resources of parts and the interrepair time of ships. Details need to be divided into groups according to the value of the required resource and to determine the details for which it is necessary to apply the single resource principle. In this paper, a mathematical model is presented that expresses the degree of achievement of a single aggregate resource.*

**Keywords:** *ship diesel, detail, functionally-oriented technology, single resource, mathematical model, repair strategy.*

### 1. Введение

Судовой дизель является значимым элементом, во многом определяющим работоспособность и надежность судна. Одним из показателей, характеризующих возможности двигателя и его качество является технический ресурс, который определяется как суммарная наработка объекта от начала эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода объекта в предельное состояние. Чем выше полный технический ресурс объекта, тем более длительное время объект сможет находиться в работоспособном или безотказном состоянии, обеспечиваемом его надежностью.

**Цель статьи** – обосновать принцип единого ресурса при проектировании и производстве судовых дизелей, а также привести математическую модель, характеризующую степень достижения единого ресурса судового дизеля.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Судовой дизель представляет собой сложную тепловую машину, состоящую из огромного количества деталей. Причем условия работы и целевые функции для разных деталей существенно отличаются. Кроме того, сами детали изготавливаются из различных материалов различными способами и отличаются своими характеристиками. Кроме таких деталей, как рамы или цилиндрические блоки, имеющие массу до нескольких тонн, в дизеле есть детали мелкие, например плунжеры, отличающиеся высокой точностью изготовления и, естественно, много других деталей, имеющих свои служебные назначения.

Технология производства судовых дизелей позволяет изготавливать каждую деталь, используя классические и современные способы и методы изготовления и обработки достигая высокого качества получаемых изделий. Последнее приводит к тому, что ресурс каждой отдельно взятой детали дизеля, как единой технической системы, является зачастую несвязанным с другими деталями. Это свидетельствует об отсутствии единого подхода при формировании ресурса судового дизеля.

Отсутствие единого подхода к проектированию и изготовлению деталей судовых дизелей на базе функционально-ориентированных технологий (ФОТ) приводит к тому, что ресурс, являясь основным нормативным показателем для прогнозирования эксплуатации, в то же время является одним из неочевидных показателей. Это иллюстрируется тем, что расхождения в значениях ресурсов одних и тех же машин может составлять 100% и более [1]. Поэтому производители, определяя ресурс узлов или агрегатов, оговаривают некоторые границы использования машин, например, климатические условия и режимы эксплуатации.

Ресурс всего двигателя зависит от ресурсов составляющих его элементов, которые в соответствии с иерархической структурой (рис. 1) дизеля [2] могут быть как узлами и отдельными деталями, так и функциональными элементами деталей в зависимости от глубины технологии (уровни всей детали, участков, составляющих, зон, макрозон, микрозон, нанозон).

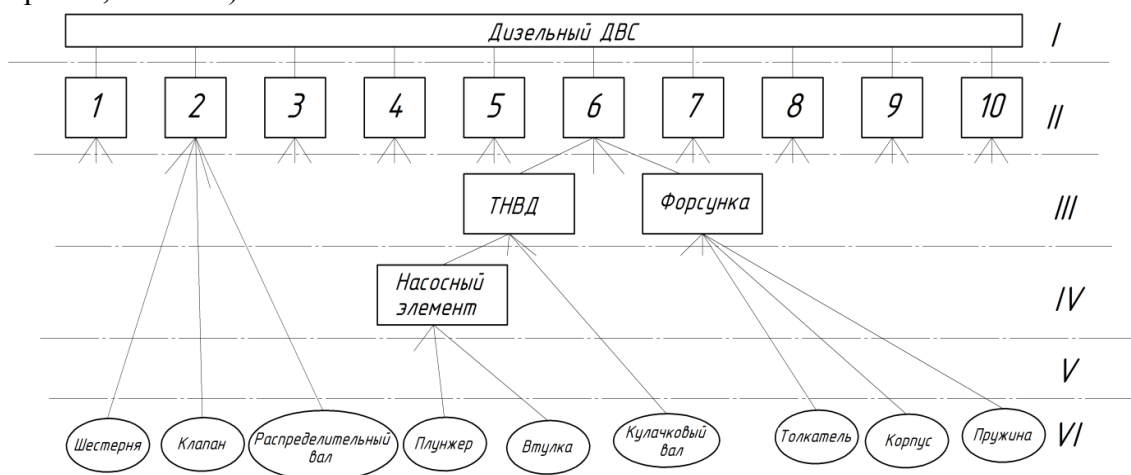


Рисунок 1. Иерархическая структура дизельного ДВС:

1 – олов; 2 – механизм газораспределения; 3 – кривошипно-шатунный механизм; 4 – система охлаждения; 5 – система смазки; 6 – топливная система; 7 – система воздушоснабжения; 8 – система управления; 9 – система газоотвода; 10 – система регулирования и контроля, уровни иерархии: I – техническая система; II – подсистемы и механизмы; III – узлы; IV, V – сборочные единицы; VI – детали.

Однако в конечном итоге мы будем иметь дело с ресурсом конечного элемента, который в традиционной технологии машиностроения представлен деталью. И даже в этом случае возникают сложности, поскольку, как было сказано выше, детали очень сильно отличаются, и тогда неизбежно возникает вопрос о соответствии ресурсов деталей, не взаимодействующих при работе дизеля друг с другом, к примеру, ресурс выпускного клапана и плунжера топливного насоса. В тоже время ФОРТ дают возможность не останавливаться на уровне отдельной детали, рассматривая последнюю как набор функциональных элементов на различных уровнях вплоть до нанозон[3].

Таким образом, ресурс машины зависит от ресурсов элементов, входящих в эту машину. Представим это следующим образом

$$R = f(R_1, R_2, \dots, R_n),$$

где  $R_i$  – это ресурс элемента. Как правило, это могут быть базовые детали, влияющие в значительной мере на ресурс всего агрегата или определяющие его.

Однако, если речь идет о сборочной единице (см. рис. 1), то  $R_i$  необходимо представить так

$$R_i = f(R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{ik}),$$

где  $R_{ij}$  – это ресурс детали сборочной единицы.

В свою очередь, представляя деталь, состоящую из участков, что соответствует второму уровню глубины технологии[4], можем записать

$$R_{ij} = f(R_{ij1}, R_{ij2}, \dots, R_{ijz}).$$

И так далее, вплоть до нанозон. Однако, отметим, что такое глубокое рассмотрение не является обязательными определяется технологом в зависимости от целесообразности и наличия соответствующих мощностей производства.

Технический ресурс детали определяется эксплуатационными свойствами, заложенными в деталь при проектировании и изготовлении, и может быть выражен через показатели качества детали, в первую очередь показателями качества поверхностного слоя (ПКПС), поскольку большинство отказов и неисправностей возникают по причине различных негативных процессов, зарождающихся и развивающихся именно в поверхностном слое детали. Различают геометрические и физико-химические ПКПС. Первые определяются шероховатостью ( $R_z, R_a, t_p$  и др.), волнистостью ( $W_z, W_p, S_{mw}$ ), погрешностью формы ( $H_{max}, H_p$ ). Вторые – параметрами твердости поверхностного слоя ( $H_{\mu 0}, U_H, h_H$ ), остаточными напряжениями ( $\sigma'_{ocm}, \sigma''_{ocm}, \sigma'''_{ocm}$ ), структурой и фазовым составом ( $I_3, pD, C_v, I_6$ ), химическим составом ( $c(x), c(\phi)$ ). Кроме того, выделяют характеристики взаимодействия со средой ( $\sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{13}$ ) и пористость поверхностного слоя ( $\Pi, \eta$ ).

Определяя технический ресурс, как запасвозможной наработки машины[5], можно записать, что технический ресурс машины определяется геометрическими ( $G$ ), физическими ( $F$ ), химическими ( $X$ ) и конструктивными ( $K$ ) свойствами составных частей машины. Это, если речь идет только об изготовлении деталей. Кроме этого, на ресурс будет влиять качество сборки ( $S$ ), а также эксплуатационные ( $E$ ) факторы при работе машины. В общем виде представим ресурс судового дизеля выражением

$$R = f(G, F, X, K, S, E).$$

Реализация требуемых параметров качества деталей, определяющих заданный ресурс, происходит посредством технологических воздействий (ТВ), выполняемых при преобразовании заготовки в деталь, что в общем виде [6]:

$$O_0(t_i) = \{(s_{iv}, e_{iv}, i_{iv}) | s_{iv} \in S_w(t_i) \wedge e_{iv} \in E_w(t_i) \wedge i_{iv} \in I_w(t_i)\},$$

где  $O_0(t_i)$  – множество технологических воздействий;  $S_w(t_i)$  – множество элементов ТВ материального характера в момент времени  $t_i$ ;  $E_w(t_i)$  – множество элементов ТВ энергетического характера в момент времени  $t_i$ ;  $I_w(t_i)$  – множество элементов ТВ информационного характера в момент времени  $t_i$ ;  $(s_i, e_i \text{ и } i_i)$  – кортеж, определяющий вид ТВ, его элементы соответствуют режиму ТВ.

С точки зрения эффективности работы судовых дизелей и технического обслуживания и ремонта необходимо стремиться к тому, чтобы ресурс детали был определенным образом привязан к ресурсу машины (рис. 2)– или был равным ресурсу машины или был кратным [7].

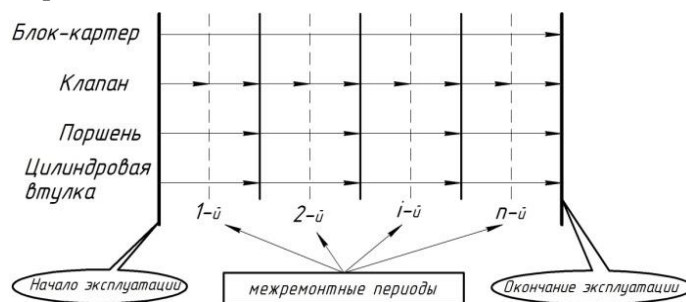


Рисунок 2. Ресурсы некоторых деталей судовых дизелей

Реализация заданного ресурса напрямую связана с предельным состоянием деталей, поскольку это самое состояние необходимо объективно обосновать, определить критерии и величины критериев, характеризующих достижение деталями предельного состояния.

В целом можно рассматривать три критерия предельного состояния: технический, определяющий работу машины без поломки (для дизеля – поломка коленчатого вала, поршневых колец и др.); технологический, характеризующий возможность выполнения машиной целевой функции с заданными параметрами (для дизельного двигателя, например, величина мощности и крутящего момента); экономический, характеризующий экономическую целесообразность использования объекта по назначению.

Первые два критерия требуют от машиностроителей создание более надежных, более прочных, более долговечных агрегатов. Третий в данном случае выступает в роли ограничителя, поскольку неоправданное завышение критериев надежности однозначно приводит к повышению расхода энергетических, материальных, трудовых ресурсов при изготовлении машины. Кроме этого, получившийся в результате завышенный ресурс деталей не используется полностью.

В то же время современные достижения технологии машиностроения позволяют более тонко подходить к изготовлению машин именно с точки зрения достижения необходимого запаса свойств, обеспечивающих заданный ресурс. Функционально-ориентированные технологии являются ярким примером таких наукоемких прогрессивных технологий. В соответствии с положениями ФОР как раз и требуется тщательное изучение условий и режимов эксплуатации, функциональных назначений, целевых и технических функций не только деталей, но и функциональных элементов этих деталей. Использование общего подхода при проектировании и изготовлении деталей и узлов машины позволит реализовать принцип единого ресурса машины. Это позволит уже на стадии проектирования увязывать ресурсы деталей и межремонтные периоды судов, зависящих от стратегии ремонта, которые бывают:

1. Стратегия ремонта по потребности (после того, как произойдет поломка) обеспечивает наименьшие затраты на ремонт, отрицательным является не прогнозируемость отказов или поломок.

2. Планово-предупредительная стратегия ремонта – ремонт производится в установленные сроки для упреждения поломок. В рамках стратегии возможны три варианта: послеосмотровая стратегия – регламентируются сроки проведения ремонтных работ и их объемы; стратегия «ремонт по состоянию» – характеризуется переходом к определению состояния элементов, узлов, и деталей судна без их разборки на базе диагностирования объекта; стандартная планово-предупредительная стратегия – ремонт производится в установленные сроки и в указанных объемах, узлы или детали обязательно заменяют независимо от того, в каком техническом состоянии они находятся.

3. Смешанная стратегия ремонта – для различных элементов одной и той же технической системы применяют различные стратегии: для наиболее ответственных – по отработанному ресурсу, для большинства остальных элементов – по состоянию на базе технического диагностирования, для отдельных неответственных элементов – по потребности. Такие стратегии обеспечивают наибольшую надежность и минимальные затраты на ремонт.

Анализируя приведенные стратегии можно видеть, что ФОР изготовления деталей встраиваются в систему эксплуатации техники в том случае, когда необходимо планировать как время проведения, так и объемы ремонта. Обладая рекуррентными особенностями, технология изготовления деталей на базе функционально-ориентированного подхода (ФОР) как раз и подразумевают сбор и анализ информации об особенностях эксплуатации деталей или агрегатов. На основе этого анализа у технологов появляется возможность корректировать формирование требуемых эксплуатационных свойств деталей и агрегатов при их изготовлении. Отметим, что помимо особенностей эксплуатации в жизненном цикле изделия в последнее время большое внимание стали уделять и вопросам утилизации, поэтому требования к деталям с этой точки зрения также должны и могут быть учтены на основе ФОР.

Таким образом, отдавая себе отчет в том, что достижение единого ресурса для всех узлов и деталей судового дизеля является довольно трудной задачей, тем не менее, ставим целью создать и обосновать определенный математический аппарат, позволяющий в том или ином виде показать степень достижения единого ресурса агрегата.

Для этого, очевидно, следует выполнить деление деталей на группы по величине требуемого ресурса, определить детали, для которых необходимо применить принцип единого ресурса. Это детали, определяющие работоспособность дизеля и работающие в сложных эксплуатационных условиях. Причем следует помнить о том, что для каждой детали, в случае целесообразности, следует применять такой подход и на уровнях функциональных элементов в зависимости от глубины технологии.

В общем виде, математическая модель, выражающая степень достижения единого ресурса агрегата имеет вид

$$\begin{cases} F_1 = \frac{1}{3R} \left[ \frac{1}{N^I} \sum_{i=1}^{N^I} r_i^I + \frac{n_r}{N^{II}} \sum_{j=1}^{N^{II}} r_j^{II} + \frac{n_r n_{mr}}{N^{III}} \sum_{l=1}^{N^{III}} r_l^{III} \right]; \\ F_2 = \frac{1}{N^I} \sum_{i=1}^{N^I} \left[ \frac{1}{r_i^I N_i^I} \sum_{l=1}^{N_i^I} r_{ij} \right], \end{cases}$$

где  $R$  – заданный ресурс агрегата;  $n_r$  – заданное число плановых ремонтов;  $n_{mr}$  – заданное максимально допустимое число межремонтных остановок;  $N^I$  – число деталей  $I$

группы (ресурс не ниже  $R$ );  $N^{II}$  – число деталей II группы (ресурс не ниже  $R/n_r$ );  $N^{III}$  – число деталей III группы (ресурс не ниже  $R/n_r n_{mr}$ );  $N_i^I$  – число функциональных элементов в  $i$ -й детали I группы;  $r_i^I$ ,  $r_j^{II}$ ,  $r_l^{III}$ ,  $r_{ij}$  – ресурсы  $i$ -й детали I группы,  $j$ -й детали II группы,  $l$ -й детали III группы и  $j$ -го функционального элемента  $i$ -й детали I группы.

Величина  $F_1$  представляет собой степень достижения единого ресурса агрегата, состоящего из деталей и сборочных единиц, а  $F_2$  – степень достижения деталию, в которой рассматриваются функциональные элементы, единого ресурса. Для этих величин верным будет следующее выражение

$$F_1 \geq 1 \text{ и } F_2 \geq 1.$$

Очевидно, что, чем выше величина  $F_i$ , тем больший ресурс реализован, что, безусловно, увеличивает надежность агрегата или детали. Однако, как уже было сказано выше, это достигается за счет увеличения затрат, т.е. может привести к неоправданному завышению стоимости.

### 3. Заключение

Принцип единого ресурса позволит осуществлять проектирование и производство деталей судовых дизелей на основе единого подхода, увязывая сроки службы с условиями и особенностями эксплуатации. Это возможно при создании единой информационной системы, позволяющей собирать и анализировать информацию об особенностях эксплуатации и, на основе анализа, корректировать процессы изготовления деталей и сборки узлов. Приведенная в работе математическая модель позволяет на основе ряда параметров оценивать степень достижения единого ресурса агрегата.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дорохов, А. Ф. Качество и надежность судовых дизелей / А. Ф. Дорохов // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технологии. – 2015. – №2. – С. 48-53.
2. Михайлов, А. Н. К вопросу о применении функционально-ориентированного подхода в судовом машиностроении / А. Н. Михайлов, А. В. Костенко // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей технологии и виброволновых технологий: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., посвященной 90-летию засл. деятеля науки и техники РФ, д.т.н., почетного профессора ДГТУ А.П. Бабичева (Ростов-на-Дону, 27-28 февраля 2018г.). – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. – С. 180-182.
3. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
4. Михайлов, А. Н. К вопросу об особенностях проектирования функционально-ориентированных технологий производства деталей судовых дизелей / А. Н. Михайлов, А. В. Костенко, А. В. Лукичев, Е. А. Степанова // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2017. – №2 (57). – С. 29-37.
5. Надежность машин. Т. IV-3 / В. В. Ключев, В. В. Болотин, Ф. Р. Соснин и др.; под общ. ред. В. В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2003. – 592 с.
6. Михайлов, А. Н. Структура функционально-ориентированного процесса / А. Н. Михайлов, А. В. Костенко // Механики XXI века. – 2018. – №17. – С. 206-210.
7. Михайлов, А. Н. Особенности обеспечения функционально-ориентированных технологий изготовления деталей судовых дизелей / А. Н. Михайлов, А. В. Костенко // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – №4. – С. 31-36.

Поступила в редколлегию 17.05.2018 г.