

**Вербовський Валерій Степанович** – ст. наук. співробітник, Інститут газу Національної академії наук України, Київ, Україна, e-mail: vverbovskiy@teplosoyuz.com.

**Грицук Ігор Валерійович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Рухомий склад залізниць» Донецький інститут залізничного транспорту УкрДАЗТ, Донецьк, Україна, e-mail: gritsuk\_iv@ukr.net.

**Адров Дмитро Сергійович** – асистент кафедри «Рухомий склад залізниць» Донецький інститут залізничного транспорту УкрДАЗТ, Донецьк, Україна, e-mail: dimitry.85@mail.ru.

**Краснокутська Зоя Ігорівна** – ст. наук. співробітник кафедри «Теплотехніка і теплові двигуни» Національного транспортного університету, Київ, Україна, e-mail: zoya.dvz@gmail.com.

### ОСОБЕННОСТИ ПРЕДПУСКОВОГО ПРОГРЕВА СТАЦИОНАРНОГО ГАЗОВОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛООВОГО АККУМУЛЯТОРА С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ

*В.С. Вербовський, И.В. Грицук, Д.С. Адров, З.И. Краснокутская*

В статье рассматриваются результаты математического моделирования процессов в системе прогрева стационарного газового двигателя при использовании теплового аккумулятора с теплоаккумулирующими материалом, имеющим фазовый переход, по циклу предпускового и послепускового прогрева при одновременном прогреве охлаждающей жидкости и моторного масла. Результаты оценки эффективности применения системы прогрева подтвердили улучшение топливной экономичности при работе, а также эффективность применения ее, как одного из направлений улучшения экологических показателей газового двигателя.

### FEATURES OF PREHEATING PROCESS IN STATIONARY GAS ENGINES WITH A THERMAL BATTERY WITH PHASE TRANSITIONS

*V.S. Verbovsky, I.V. Gritsuk, D.S. Adrov, Z.I. Krasnokutskaya*

The article discusses the results of mathematical modeling of processes in the system of warming stationary gas engine using a thermal battery storage materials, that has phase transition on the cycle after the plugs and start warming up while warming up the coolant and engine oil. Efficiency estimation results confirmed that application of warming will improve fuel efficiency and environmental performance of the gas engine.

УДК 006:536.7

**В.Д. Зонов**

### МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

*На основе теории вероятности разработан математический аппарат определения критического состояния прецизионных поверхностей деталей и узлов топливной аппаратуры тепловозных дизелей. Дана оценка качественной стороны работы топливной аппаратуры и её влияния на характеристику топливоподачи во всём диапазоне частот вращения и мощности. Отмечено, что моделирование работы топливной аппаратуры проводится с учётом влияния прецизионных износов в реальном времени эксплуатации. Методика комплексной оценки влияния износа прецизионных поверхностей на характеристику топливоподачи максимально приближена к использованию в инженерных расчётах и непосредственному использованию на участках топливной аппаратуры локомотивных депо и тепловозоремонтных заводов.*

#### **Введение**

Известно, что работоспособность и техническое состояние тепловозных дизелей, эксплуатирующихся в различных регионах и климатических условиях, в значительной мере зависит от стабильной работы топливной аппаратуры (ТА), обеспечивающей устойчивый закон топливоподачи во всём диапазоне частот вращения и мощности. Ряд отечественных и зарубежных учёных приводят неоспоримые доводы о влиянии на закон топливоподачи (наряду с конструктивными особенностями ТА) истечения топлива через зазоры в прецизионных поверхностях плунжерных пар топливных насосов и распылителей форсунок [1,2], увеличивающихся при естественном износе в эксплуатации. Также

авторы приводят тезис по проблеме отслеживания износа прецизионных поверхностей ТА в реальном времени с методологической точки зрения эксплуатационников (проверка на стенде - анализ износа - принятие решения).

#### **Анализ ранее проведенных исследований и постановка задачи**

Существующая практика оценки технического состояния и работоспособности прецизионных узлов ТА в локомотивных депо и тепловозоремонтных заводах очерчена рамками требований Правил деповского и заводского ремонтов, предусматривающих проверку герметичности, гидравлической плотности топливных насосов, форсунок, качества распыливания топлива форсунками на специализированных стендах участка топливной

аппаратуры. Зачастую проверка и анализ результатов проводится без глубокого системного подхода к показателям работы топливной аппаратуры и их техническому состоянию и сводится к формуле, исправен – неисправен топливный насос, форсунка.

Переверить полученные результаты, когда возникают сомнения, главный технолог локомотивного депо или завода не в состоянии из-за отсутствия приборной базы на участках топливной аппаратуры (тензостанции, осциллографы, усилители и т.д.) и, как следствие, фиксируются субъективные разрозненные показатели различных параметров ТА. Зачастую проводимый анализ не позволяет отследить изменение в реальном времени множества взаимовлияющих отдельных параметров, в результате чего отсутствует возможность прогнозирования и получения комплексной оценки работы ТА в целом.

При оценке качественной стороны работы ТА в течении жизненного цикла двигателя внутреннего сгорания авторы работ [3,4] используют сводный эффективный показатель качества работы (ЭПКР), который разбивается на несколько групп с соответствующим рейтингом. После того, как вводится конкретный показателя, авторы получили возможность с любой периодичностью отслеживать ухудшение надёжности и работоспособности этого показателя в ходе эксплуатации, а также переход его из одной группы надёжности и работоспособности в другую, как правило, с понижением рейтинга. Критерием надёжности в этом случае служат зафиксированные и обработанные среднестатистические характеристики разрозненных параметров для каждой детали либо узла двигателя внутреннего сгорания, измеренные в одни и те же моменты времени эксплуатации, и сведенные в эффективный показатель надёжности работы (ЭПНР) ДВС. Полученные значения измеренных и статистически обработанных параметров подчиняются нормальному закону распределения с высоким ожидаемым результатом. Критерием ЭПНР, в этом случае, служит математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение.

В статье [5] предложено все параметры работы различных узлов и деталей ДВС условно разбить на три группы (на самом деле таких групп может быть больше), возможно также дополнительное разбиение на подгруппы по основным второстепенным и третьестепенным параметрам. В этом случае к первой группе относятся удельные величины расхода топлива, масла, воздуха и некоторые другие параметры, связанные с эффективными показателями работы двигателя. Вторая группа учитывала параметры, связанные с макси-

мальными величинами давления сгорания и сжатия, температуры отработавших газов. Третья группа учитывала износные показатели, как прецизионных узлов, так зазоры в различных деталях ДВС. Авторы подчёркивают, что на ухудшение технического состояния ДВС оказывают влияние как отдельные параметры всех введенных в рассмотрение групп, так и их всевозможные совместные сочетания. В этой связи был введен обобщенный показатель ухудшения технического состояния ДВС  $\eta(t)$ :

$$\eta(t) = k\{\alpha(t)p_1(t) + \beta(t)p_2(t) + \gamma(t)p_3(t) + \alpha(t)\beta(t)p_1(t)p_2(t) + \alpha(t)\gamma(t)p_1(t)p_3(t) + \beta(t)\gamma(t)p_2(t)p_3(t) + \alpha(t)\beta(t)\gamma(t)p_1(t)p_2(t)p_3(t)\}, \quad (1)$$

где –  $\alpha(t)$ ,  $\beta(t)$ ,  $\gamma(t)$  неубывающие положительные функции параметров работы ДВС первой, второй и третьей групп, которые приводятся к единому масштабу с помощью нормирования соответствующих размерных величин;  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$ ,  $p_3(t)$  – весовые характеристики, соответственно, первой, второй, третьей групп параметров;  $k$ - масштабный множитель. Параметры  $\alpha(t)$ ,  $\beta(t)$ ,  $\gamma(t)$  представляют собой масштабные дискретные величины и зависимости

#### Результаты проведенных исследований

В статье рассматривается методика отслеживания прецизионных износов ТА с помощью прогнозной оценки надёжности и работоспособности деталей и узлов топливной аппаратуры тепловозных дизелей. При разработке методики комплексной оценки критического состояния ТА использовалась теория вероятности применения параметрических и непараметрических методов, позволившая предложить математический аппарат определения критического состояния (износа) прецизионной поверхности пары игла-корпус распылителя либо плунжерной пары топливного насоса высокого давления, влияющего на закон топливоподачи.

При статистическом анализе работоспособности и надёжности прецизионных поверхностей распылителей и плунжерных пар информация, поступающая в распоряжение исследователя, представляет собой разрозненные цензурируемые (как правило, главным технологом) выборки. При этом анализ и оценка выборок, по износам прецизионных поверхностей, практически всегда подвергается субъективному подходу технолога. Для исключения субъективизма в оценках работоспособности и надёжности ограниченного количества прецизионных деталей ТА тепловозных дизелей необходим эффективный метод точности оценивания при разных комбинациях полных и неполных наработок и при выборках различного количества этих деталей.

Разработка такого метода проводилась на базе использования параметрических методов Нельсона и Джонсона, позволяющих производить сравнение прецизионных износов с минимальным приборным и инструментальным сопровождением. При проведении исследований представляло интерес сравнение износов прецизионных поверхностей деталей ТА и непараметрическим методом, позволяющим осуществить последовательный переход к новой системе координат - от параметрического к непараметрическому методу оценивания прецизионных поверхностей деталей ТА.

Сравнительные исследования проводились поэтапно с точностью вычисления по среднему износу прецизионной поверхности и дальнейшей наработки до предельного состояния, влияющего на процесс топливopодачи. Расчётные исследования проводились на базе разработанного программного обеспечения статистических методов статистических испытаний при числе опытов 3000 для каждой комбинации полных и неполных наработок (износов прецизионных поверхностей ТА дизеля).

В качестве моделируемых распределений наработок к отказу были избраны нормальное распределение прецизионных деталей с коэффициентами вариации  $v = 0,1; 0,2; 0,3$  и распределения Вейбулла-Гнеденко с параметрами износа прецизионной поверхности  $b = 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0$  (соответствующие коэффициенту вариации  $v = 1,0; 0,679; 0,523; 0,363; 0,280$ ). При выборе величины параметра формы износа прецизионной поверхности было решено не рассматривать случаи, когда распылители и плунжерные пары прошли приработку на заводе-изготовителе (предполагается эталонный вариант), потому вариант  $b < 1$  не исследовался.

Для моделирования цензурируемого износа выборки выбран инженерный подход, имеющий место на практике, в условиях промышленного предприятия. Проводилось непрерывное наблюдение за  $N$  прецизионными парами ТА с момента начала их эксплуатации. За период наблюдения  $t$   $n$  из них отказали, причем моменты их отказов фиксировались в журналах текущего обслуживания и ремонта тепловозов. Тогда полученный статистический материал являет собой  $n$  полных и  $k = N - n$  неполных износов прецизионных деталей ТА. При частичном износе прецизионных поверхностей эта деталь не замещается, а при  $n$  полных либо  $k$  превышающих средние износы и приближающиеся к максимальным износам прецизионных поверхностей, замещаются на новые.

В соответствии с избранной моделью испытаний (максимально приближённой к эксплуатационным условиям) моделировались цензурируемые (как правило главным технологом) износы, включающие  $n$  и  $k$  полные и неполные износы. Генерировалось  $n+k$  наработок, распределенных по выбранному закону. Из них случайным образом выбирались  $k$  наработок. Далее для каждой из них генерировалось случайное число, равномерно распределенное в интервале  $(0, \tau_j)$ ,  $j=1, k$ , где  $\tau_j$  соответствующая полная наработка. Для повышения точности расчётов использовались вероятностные сетки, предложенные в методах Нельсона и Джонсона. Поэтому для проведения вычислений необходимо было применить соответствующие превращения интегральных функций распределения.

Моделирование прецизионных износов по методу Нельсона функция распределения наработки (износа) до отказа (предельного состояния) представлена в виде:

$$F(t) = 1 - e^{-\Lambda(t)}, \quad (2)$$

для координатной сетки и, соответственно, строится в координатах.

При моделировании прецизионных износов и их распределение по методу Вейбулла-Гнеденко в двухпараметричной форме представлено в виде:

$$\Lambda(t) = \left(\frac{t}{a}\right)^b, \quad (3)$$

$$\ln \Lambda(t) = b \ln t - b \ln a = \ln\{-\ln[1 - F(t)]\}, \quad (4)$$

где  $a$  - параметр масштаба;  $b$  - параметр формы, а для нормального распределения

$$\Lambda(t) = -\ln[1 - F(t)] = -\ln\left[1 - \Phi\left(\frac{t - m}{\sigma}\right)\right], \quad (5)$$

где  $\Phi(z)$  - стандартная функция нормального распределения.

В случае применения метода Джонсона сетка строится в координатах  $\{\ln t, \ln[1 - F(t)]\}$ .

В случае определения и распределения и износов прецизионных поверхностей по методу Вейбулла-Гнеденко используется выражение

$$\ln\{-\ln[1 - F(t)]\} = b \ln t - b \ln a, \quad (6)$$

Для каждой смоделированной выборки методом наименьших квадратов вычислялись, на основании закона распределения средние износы, и износы до отказа (граничного состояния) прецизионных поверхностей. В результате анализа распределения средних износов и износов до отказа (граничного состояния) был получен метод последовательного перехода к новой системе оценочных координат, от параметрического к непараметрическому. Метод последовательного перехода позво-

лил вычислять среднеарифметическое математическое ожидание, лево - и правостороннее отклонение от среднего моделируемой величины, а также, лево - и правосторонних интервалов относительно моделируемой величины прецизионного износа поверхности детали ТА. Метод последовательного перехода позволил в условиях промышленных предприятий моделировать выборку по износам прецизионных поверхностей деталей ТА тепловозных дизелей.

#### **Заключение**

Методика комплексной оценки критического состояния прецизионных поверхностей топливной аппаратуры тепловозных дизелей, разработанная на базе метода последовательного перехода от параметрического состояния к непараметрическому, позволяет вычислить и оценить среднеарифметическое математическое ожидание износа прецизионных поверхностей инженерно-техническому персоналу локомотивных депо и тепловозоремонтных заводов в реальном времени эксплуатации.

#### **Список литературы:**

1. Антипов В.В. Износ прецизионных деталей и нарушение характеристики топливной аппаратуры дизелей /

В.В. Антипов – М.: Машиностроение, 1972. – 177с. 2. Бобров В.Ф. Исследование влияния износа плунжерных пар на впрыск топлива / В.Ф. Бобров // Труды ХИИТ. – 1960. – вып. 35. –143с. 3. Куделин О.Г., Николаев А.Г. Оценка качества технического состояния ДВС / О.Г. Куделин, А.Г. Николаев // Труды Международного научно-технического семинара “Исследование, проектирование и эксплуатация судовых дизелей”. – СПб.: ПаркКом.2006. - С.117-123. 4. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и её инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров.- М.: Наука, 1991.-384с. 5. Куделина О.Г. Математическая модель оценки качества технического состояния ДВС / О.Г. Куделина, А.Г. Николаева // Двигателестроение. – 2009. – №4 – С.3-5.

#### **Bibliography (transliterated):**

1. Antipov V.V. Iznos precizionnyh detalej i narushenie harakteristiki toplivnoj apparatury dizelej / V.V. Antipov – M.: Mashinostroenie, 1972. – 177s. 2. Bobrov V.F. Issledovanie vlijanija iznosa plunzhernyh par na vprysk topliva / V.F. Bobrov // Trudy HIIT. – 1960. – vyp. 35. –143s. 3. Kudelin O.G., Nikolaev A.G. Ocenka kachestva tehničeskogo sostojanija DVS / O.G. Kudelin, A.G. Nikolaev // Trudy Mezhdunarodnogo nauchno-tehničeskogo seminar “Issledovanie, proektirovanie i jekspluatacija sudovyh dizelej”. – SPb.: ParkKom.2006. - S.117-123. 4. Ventcel E.S. Teorija sluchajnyh processov i ejo inzhenernye prilozhenija / E.S. Ventcel', L.A. Ovcharov.- M.: Nauka, 1991.-384s. 5. Kudelina O.G. Matematicheskaja model' ocenki kachestva tehničeskogo sostojanija DVS / O.G. Kudelina, A.G. Nikolaeva // Dvigatellestroenie. – 2009. – №4 – S.3-5.

Поступила в редакцию 18.06.2014

**Зонов Виктор Дмитриевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры управления эксплуатационной работы Украинской государственной академии железнодорожного транспорта «УкрГАЖТ», e-mail: D\_Zonov@mail.ru.

### **МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ КРИТИЧНОГО СТАНУ ПРЕЦИЗІЙНИХ ПОВЕРХОНЬ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ ДИЗЕЛІВ ТЕПЛОВОЗІВ**

**В.Д.Зонов**

Приведена модель комплексної оцінки критичного стану прецизійних поверхонь паливної апаратури дизелів тепловозів, яка розроблена на основі теорії вірогідності закону нормального розподілу і дозволяє оцінити вплив зносу прецизійних поверхонь паливної апаратури на характеристику процесу паливоподачі.

### **METHOD OF COMPLEX ESTIMATION OF CRITICAL CONDITION IN HIGH-PRECISION SURFACES OF FUEL SYSTEM OF LOCOMOTIVE DIESEL ENGINE**

**V.D.Zonov**

The model of complex estimation of critical condition of high-precision surfaces of fuel delivery system of diesel engine is resulted. The model was developed on the basis of probability of law of normal distribution theory, allowing to estimate influence of wear of high-precision surfaces of fuel delivery system on description of process of fuel delivery.