

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ НАДЁЖНОСТИ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ МТА

И.Б. Вороновский, канд. техн. наук, доцент, Таврический государственный агротехнологический университет (г. Мелитополь, Украина)

ВВЕДЕНИЕ. Надёжность машинно-тракторного агрегата зависит от надёжности каждой из подсистем, а также от способа их соединения в общую систему. При последовательном соединении подсистем, что имеет место в данном случае, повышение надёжности любой элементарной подсистемы пропорционально повышает надёжность всей системы в целом.

Мобильный машинно-тракторный агрегат (МТА) представляет собой систему, состоящую из ряда подсистем. К таким подсистемам, выполняющим самостоятельные функции, относится топливная система дизельного двигателя, которая в свою очередь также может быть представлена, как система, состоящая из более мелких подсистем.

Воспользовавшись известными подходами [2, 3], произведем сравнительную оценку коэффициентов готовности K_r , как комплексного показателя надёжности топливной системы дизельного двигателя МТА при использовании топлива с различной степенью его очистки.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА. Важные методические аспекты обоснования увеличения сроков службы деталей и узлов, работающих в среде ТСМ, предложили А.А. Гуреев, Г.Ф. Большаков, К.В. Рыбаков, Г.П. Лышко, Н.К. Итинская, В.П. Коваленко и др. Эксплуатационная надёжность узлов сельскохозяйственной техники, работающих в среде ТСМ, рассматривалась в работах М.А. Григорьева, Е.Н. Жулдыбина, А.В. Кузнецова, А.И. Селиванова, В.А. Дидура [1]. Поэтому необходимо научное обоснование влияния надёжности топливной системы дизельного двигателя на коэффициент готовности машинно-тракторного агрегата в целом в зависимости от загрязнённости дизельного топлива.

Рассмотрим расчёт коэффициента готовности систем с резервированием в комплексе [2, 3, 5]. Производительность группы систем определяется средним количеством работающих систем, а коэффициент готовности может быть вычислен по формуле:

(1)

$$n$$

где p_0 - среднее число исправно работающих систем; n - число систем в комплексе.

Из (1) следует, что знаменатель содержит количество систем, необходимых для выполнения требуемого объёма работ в установленные сроки. При этом его значение не изменяется при переходе к расчёту систем с резервированием. Числитель выражения содержит среднее количество эффективно работающих систем, которое зависит от уровня их надёжности. Для определения значения p_0 пользуются формулой полной вероятности [3], в соответствии с которой:

$$p_0 = \sum_{i=1}^n C_i (1 - f_i)^{n-i}, \quad (2)$$

где $C_i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ - вероятность работоспособного состояния i систем из общего количества n .

Подставляя (2) в (1) получим:

$$p_0 = \sum_{i=1}^n \dots$$

(3)

$$n$$

Таким образом, из приведенного выше анализа следует, что резервирование систем двигателя, имеющих низкую надёжность, приведёт к увеличению коэффициента готовности

машинно-тракторного агрегата в целом. Это можно проиллюстрировать на отдельно взятой системе сельскохозяйственного комплекса состоящей из отдельных подсистем.

МТА в целом и энергетическое средство в частности, можно представить в виде некоторой системы состоящей из ряда подсистем. В качестве отдельно взятой подсистемы уместно рассмотреть топливную систему, надёжность которой наиболее чувствительна к загрязнению дизельного топлива.

Топливная система двигателя любого энергетического средства, в том числе и сельскохозяйственного трактора, состоит из следующих подсистем: фильтр грубой очистки; блок фильтров тонкой очистки; форсунки; топливный насос высокого давления.

Надёжность работы топливной системы зависит от работоспособности перечисленных подсистем, которые включены в работу последовательно. Следовательно, отказ одной из подсистем, приведет к отказу всей системы.

Таким образом, переход топливной системы из исправного состояния в неисправное можно рассматривать как случайный процесс и с точки зрения математического описания его можно представить как марковский. Схематически такой процесс можно представить графом состояний (рис. 1).

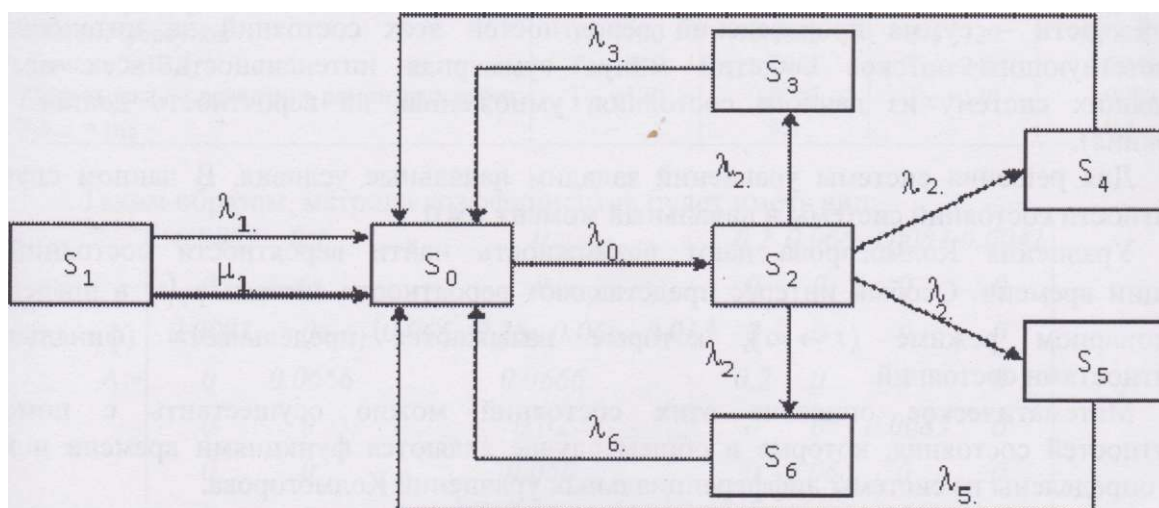


Рис. 1. Граф состояний топливной системы дизельного двигателя

При таком подходе в оценке надёжности предполагается, что потоки событий связанные с переходами элементов топливной системы в различные состояния являются простыми пуассоновскими, обладающие интенсивностями λ_{ij} и μ_i [5, 6] и описываются следующим образом:

S_0, S_i - топливная система (ТС) исправная и работает; и исправная, но не работает (простой);

S_2 - ТС неисправная, идет диагностирование отказа;

S_3 - ТС неисправная из-за отказа фильтра грубой очистки и устранения отказа;

S_4 - ТС неисправная из-за отказа блока фильтров тонкой очистки и устранения отказа;

S_5 - ТС неисправная из-за отказа форсунок и устранения отказа;

S_6 - ТС неисправная из-за отказа ТНВД и устранения отказа.

Рассмотрим математическое описание марковского случайного процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем. По представленному графу состояний процесса будем полагать, что все переходы системы из состояния S_i в S_j происходит под воздействием простейших потоков событий с интенсивностями λ_{ij} ($i, j = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$); так, переход системы из состояния S_x будет происходить под воздействием потока отказов первого узла, а обратный переход S_x в S_0 - под воздействием потока устранения отказа первого узла [6, 7].

Рассматриваемая система имеет шесть возможных состояний: $S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$.

$p_j(t)$ - вероятность того, что в момент система будет находиться в состоянии S_j .

Очевидно, что для любого момента t сумма вероятностей всех состояний равна 1,0:

$$\sum_{i=0}^n a_i = 1 \quad (4)$$

Получим систему дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей состояний:

$$\begin{cases} \dot{P}_0 = \lambda P_1 + \mu_{50} P_5 + \mu_{60} P_6 + \lambda_{30} P_3 + \lambda \\ \dot{P}_1 = -\lambda P_1 + \lambda_{10} P_0 \\ \dot{P}_2 = \lambda_{01} P_1 - (\lambda_{24} + \lambda_{25} + \lambda_{23} + \lambda_{26}) P_2 \\ \dot{P}_3 = \lambda_{23} P_2 - \lambda_{30} P_3 \\ \dot{P}_4 = \lambda_{24} P_2 - \lambda_{40} P_4 \\ \dot{P}_5 = \lambda_{50} P_0 - \lambda_{52} P_5 \\ \dot{P}_6 = \lambda_{60} P_0 - \lambda_{62} P_6 \end{cases} \quad (5)$$

В левой части каждого из уравнений стоит производная вероятности i -го состояния. В правой части - сумма произведений вероятностей всех состояний на интенсивности соответствующих потоков событий минус суммарная интенсивность всех потоков, выводящих систему из данного состояния, умноженная на вероятность данного (i -го состояния).

Для решения системы уравнений зададим начальные условия. В данном случае - вероятности состояний системы в начальный момент $t = 0$.

Уравнения Колмогорова дают возможность найти вероятности состояний как функции времени. Особый интерес представляют вероятности системы $p_i(t)$ в предельном стационарном режиме ($t \rightarrow \infty$), которые называются предельными (финальными) вероятностями состояний.

Математическое описание этих состояний можно осуществить с помощью вероятностей состояния, которые в общем случае являются функциями времени и могут быть определены из системы дифференциальных уравнений Колмогорова.

Так как предельные вероятности постоянны, то заменяя в уравнении Колмогорова их производные нулевыми значениями, получим систему линейных алгебраических уравнений, описывающих стационарный режим, т.е. матрица коэффициентов, будет иметь вид:

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_0 & 0 & \lambda_{01} & \lambda_{02} & \lambda_{03} & \lambda_{04} & \lambda_{05} & \lambda_{06} \\ 0 & -\lambda_1 & \lambda_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{21} & 0 & -(\lambda_{24} + \lambda_{25} + \lambda_{23} + \lambda_{26}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{23} & \lambda_{23} & -\lambda_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{42} & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{50} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_5 & 0 & 0 \\ \lambda_{60} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_6 \end{pmatrix} \quad (6)$$

где коэффициенты λ_y - интенсивность события.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для определения численного значения коэффициента готовности K_r , использовалась формула (10), при этом приближенный расчет интенсивности событий λ_j и μ_{ij} характеризующих состояние системы базировался на экспертных оценках специалистов по обслуживанию и ремонту топливной аппаратуры, значения времени технологических операций. Значения времени на техническое обслуживание и ремонт топливной аппаратуры при существующем способе использования дизельного топлива (в состоянии поставки) и при его очистке в процессе заправки через топливо-раздаточную ко-

донку (ТРК) и в системе питания двигателя (ДВС) с использованием разработанного фильтров-водоотделителей приведены в табл. 1 [8, 9].

Таблица 1. Усредненные значения времени на выполнение технологических операций по техническому обслуживанию и ремонту топливной аппаратуры

Наименование операции	Характер использования дизельного топлива			
	В состоянии поставки		Очистка фильтром-водоотделителем	
	Среднее время, T_i , мин	Интенсивность события, X_{ij}	Среднее время, T_i , мин	Интенсивность события, t_{aj}
1. Диагностирование неисправности и подготовка к ремонту фильтра ГО	$T_{23} = 40$	0,025	$T_{23} = 15$	0,066
2. Диагностирование неисправности и подготовка к ремонту фильтра ГО	$T_{24} = 50$	0,02	$T_{24} = 15$	0,066
3. Диагностирование неисправности и подготовка к ремонту форсунок	$T_{25} = 120$	0,0083	$T_{25} = 48$	0,02
4. Диагностирование неисправности и подготовка к ремонту ТНВД	$T_{26} = 180$	0,005	$T_{26} = 72$	0,013
5. Замена фильтра грубой очистки	$T_{30} = 5$	0,2	$T_{30} = 5$	0,2
6. Замена фильтра тонкой очистки	$T_{40} = 15$	0,066	$T_{40} = 15$	0,066
7. Ремонт форсунок	$T_{50} = 120$	0,0083	$T_{50} = 120$	0,0083
8. Ремонт ТНВД	$T_{60} = 240$	0,0041	$T_{60} = 240$	0,0041
9. Подготовка и проведение ремонтных работ	$T_{0r} = 120$	0,0083	$T_{0r} = 120$	0,0083
10. АОI = ЦО	-	0,1	-	0,1

Таким образом, матрица коэффициентов будет иметь вид:

$$A = \begin{pmatrix} -0.0083 & 0.1 & 0 & 0.2 & 0.066 & 0.0083 & 0.0041 \\ 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0083 & 0 & -\{0.066 + 0.25 + 0.066 + 0.014\} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0666 & 0.0666 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0.0083 & 0 \\ 0 & 0 & 0.066 & 0 & 0.066 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.013 & 0 & 0 & 0 & 0.0041 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Решая аналитическим способом (функция lsolve) в пакете MathCad, получим матрицу решений вероятностей:

$$P = \begin{pmatrix} C & 0.304 & L \\ & 5 \times 10^{-3} & \\ & 3.866 \times 10^{-3} & \\ & 2.048 \times 10^{-3} & \\ & 1.129 \times 10^{-2} & \\ & 0.111 & \\ V & 0.232 & y \end{pmatrix} \quad (8)$$

Определив вероятности состояний, $po(t), \dots, pe(t)$ топливной системы и ее элементов можно вычислить комплексный показатель ее надежности, который при прочих равных ; условиях характеризует коэффициент готовности в целом машинно-тракторного агрегата.

Следовательно, для графа состояний коэффициент готовности топливной системы можно определить по формуле:

$$\frac{K_7 + J_4 + J_5}{\sqrt{\quad}} \quad 6 \quad (9)$$

$$\frac{\lambda_{02}}{1 + \lambda_{01}} \cdot \left(1 + \frac{\lambda_{23} \cdot K_8 \cdot J_5}{\lambda_{10} \cdot \lambda_{10} \cdot \lambda_{10} \cdot \lambda_{10}} \right)$$

где λ_{ij} и μ_{10} - интенсивность событий перехода топливной системы и ее элементов в различные состояния.

Для расчета интенсивностей переходов можно воспользоваться соотношениями:

$$\lambda_{ij} = (\bar{T}_{ij})^{-1}, \quad \mu_{10} = (\bar{T}_{10})^{-1}, \quad (10)$$

где \bar{T}_{ij} - среднее время проведения i -й операции для j -й подсистемы.

За счет повышения чистоты дизельного топлива, используемого для мобильной сельскохозяйственной техники путем его очистки в ТРК и в системе питания двигателя разработанными фильтрами-водоотделителями ТРК и ДВС, коэффициент готовности топливной системы дизельного двигателя повышается с $K_r = 0,79$ до $K_r = 0,85$, что составляет 7,6 %. Это подтверждает выдвинутую ранее гипотезу о влиянии чистоты дизельного топлива на надежность мобильной сельскохозяйственной техники.

Очевидным является то, что одним из путей повышения коэффициента готовности МТА может быть увеличение сроков замены фильтров грубой и тонкой очистки и повышения ресурса прецизионных соединений ТНВД и форсунок, за счет обеспечения требуемой чистоты дизельного топлива используя фильтры-водоотделители дизельного топлива в ТРК, при заправке его в баки мобильной сельскохозяйственной техники, так и в системе питания дизельного ДВС [8, 9].

ВЫВОДЫ. Применение при заправке топлива через ТРК, а также в системе питания ДВС (вместо фильтра грубой очистки) фильтров-водоотделителей позволяет увеличить ресурс работы фильтров тонкой очистки более чем в 3 раза - до 1500 мото-часов. Ресурс ТНВД увеличился более чем в 2 раза, коэффициент готовности МТА повышается на 7,6 %. Можно допустить, что такое увеличение ресурса будет наблюдаться и для распылителей форсунок. Таким образом, используя полученную зависимость (5) можно достоверно оценить степень влияния загрязнённости дизельного топлива на надёжность топливной системы дизельного двигателя и коэффициент готовности МТА в целом.

Литература

1. Дідур В.А. Вплив забрудненості дизельного палива на ефективність використання машинно-тракторних агрегатів (МТА)/*В.А. Дідур, В.В. Дідур, І.Б. Вороновський*// Праці ТДАТА. - 2005. - Вип. 33. - с. 3-13.
2. Бездольная Е.Н. Расчет срока службы фильтрующих элементов/ *Е.Н. Бездольная*/7 Тр. ЦНИИТА. - JL: 1997.-Вып. 63. -с. 41-45.
3. Анилович В.Я., Гринченко А.С. Оценка характеристик надёжности при случайной продолжительности испытаний/ *В.Я. Анилович, А.С. Гринченко*/7 Надёжность и контроль качества. - 1978. -№ 8. - с. 33-43.
4. Венцель Е.С., Овчаров Л.Я. Теория вероятности и ее инженерные приложения/ *Е.С. Венцель, Л.Я. Овчаров* - М: 1988.-477 с.
5. Зарицкий В.С. Определение вероятности надежной работы системы в течении заданного промежутка времени/ *В.С. Зарицкий* - Изд. АН СССР. Техническая кибернетика, 1966, № 1.
6. Доспехов В.А., Веденятин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных/ *В.А. Доспехов, Г.В. Веденятин* - М: Колос, 1973. - 199 с.
7. Хемди А. Введение в исследование операций/ *А. Хемди* - М.-К.: 2005. - 901 с.
8. Патент України на винахід № 66522 А "Фільтр-водовіддільник"/*В.М. Вороновський І.Б.* - Заявник та патентовласник ТДАТА; Опубл 17.05.04 р. Бюл № 5.
9. Патент України № на винахід 5544 "Фільтр-водовіддільник"/*В.М. Вороновський І.Б., Вороновський Б.І.* - Заявник та патентовласник ТДАТА; Опубл 15.03.05 р. Бюл. № 3.