

А. Н. МАРКОВ¹, канд. техн. наук, доц.

В. А. МАРКОВ¹, канд. техн. наук, доц.

С. А. ВОЙНАШ²

В. В. ЕРЫГИН³

Г. К. ПАРФЕНОПУЛО⁴

¹ Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна (Санкт-Петербург, Россия)

² Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы (Москва, Россия)

³ Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (Санкт-Петербург, Россия)

⁴ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет (Санкт-Петербург, Россия)

ОЦЕНКА РАВНОПРОЧНОСТИ УЗЛОВ, АГРЕГАТОВ, МАШИН И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ

Аннотация. В статье представлена методика количественной оценки равнопрочности узлов, агрегатов и машин на основе теории надёжности и статистических данных. Рассмотрены варианты резервирования (без резервирования, частичное и полное) и их влияние на вероятность безотказной работы на примере двигателя ЗИЛ-130. Предложены технологические рекомендации по повышению равнопрочности: снижение металлоёмкости, замена материалов, применение электромеханического упрочнения, поверхностного пластического деформирования и композиционных материалов. Обоснована целесообразность плановой замены быстроизнашиваемых деталей для снижения простоев и затрат на ремонт.

Ключевые слова: равнопрочность, резервирование, безотказность, износ, ресурс, упрочнение, композиционные материалы, технологические рекомендации.

Проектирование сложных машин из равнопрочных деталей является трудной задачей. Что касается простейших механизмов, у которых первый отказ является и последним, они создаются из равнопрочных деталей, имеющих одинаковый срок службы.

Любая машина представляет собой техническую систему, состоящую из элементов – сборочных единиц (агрегатов, узлов) и деталей. При нарушении (отказе) работы одного из элементов произойдет нарушение (отказ) работы всей системы. Если представить отказ каждого элемента случайным событием, то тогда, по правилу умножения вероятностей безотказной работы системы:

$$P(l) = p_1(l)p_2(l) \dots p_n(l) = \prod_{i=1}^n p_i(l), \quad (1)$$

где $p_i(l)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента системы;

l (или t) – наработка l (км пробега) или t (мото-ч).

Вероятность безотказной работы элементов $p_i(l)$ и вероятность его отказа $q_i(l)$ в заданном промежутке времени (интервале пробега) связаны соотношением:

$$p_i(l) + q_i(l) = 1 \quad \text{или} \quad q_i(l) = 1 - p_i(l). \quad (2)$$

Предположим, что некоторый элемент, достигнув предельного состояния, допустим, по износу, может быть заменен резервным. Тогда вероятность отказа i -го элемента, с учетом ввода резервного,

$$Q_i(l) = q_i(l) \cdot q_i(l) = [1 - p_i(l)]^2, \quad (3)$$

а вероятность безотказной работы этого элемента:

$$P_i(l) = 1 - Q_i(l) = 1 - [1 - p_i(l)]^2. \quad (4)$$

Если имеется $m-1$ резервных элементов одного наименования, то безотказность работы резервируемого элемента:

$$P_i(l) = 1 - Q_i(l) = 1 - [1 - p_i(l)]^m. \quad (5)$$

Безотказность работы технической системы, состоящей из n элементов, каждый из которых зарезервирован в количестве $m_i - 1$, можно определить следующим образом:

$$P_i(l) = \prod_{i=1}^n \{1 - [1 - p_i(l)]^{m_i}\}. \quad (6)$$

Проанализируем, как изменится вероятность безотказной работы двигателя ЗИЛ-130 в зависимости от способа резервирования на основе данных о вероятности безотказной работы основных деталей двигателя ЗИЛ-130 в интервале 80–100 тыс. км пробега: цилиндропоршневая группа – 0,7 (гильза – 0,94; поршень – 0,88; поршневые кольца – 0,85); вкладыши коренных подшипников коленчатого вала – 0,70; вкладыши шатунных подшипников коленчатого вала – 0,42; головка блока цилиндров – 0,94; прокладка головки блока цилиндров – 0,70; клапаны – 0,91.

Вероятность безотказной работы нерезервируемого двигателя в интервале 80–100 тыс. км вычисляется по формуле

$$P_d^o = \prod_{i=1}^6 p_i(l) = 0,70^3 \cdot 0,42 \cdot 0,94 \cdot 0,91 = 0,123. \quad (7)$$

Это означает, что при указанной надежности узлов и деталей только 12,3 % двигателей отработает этот пробег (80 – 100 тыс. км) безотказно.

В том случае, если в запасе будет комплект всех основных деталей и узлов, вероятность безотказной работы двигателя

$$P'_d(l) = \prod_{i=1}^6 \{1 - [1 - p_i(l)]^2\} = [1 - (1 - 0,7)^2]^3 \cdot [1 - (1 - 0,42)^2] \times \\ \times [1 - (1 - 0,94)^2] \cdot [1 - (1 - 0,91)^2] = 0,56, \quad (8)$$

т.е. она повысится в 4,6 раза по сравнению с двигателями, не имеющими запасного резерва узлов и деталей.

Если же вместо отдельных узлов и деталей будет двигатель в сборе, то вероятность безотказной работы двигателя, с учетом резервного,

$$P_d(l) = 1 - [1 - p_d^o(l)]^2 = 1 - (1 - 0,123)^2 = 0,23. \quad (9)$$

Следовательно, при резервировании отдельных узлов и деталей надежность работы двигателя возрастает примерно в 2,4 раза ($0,56 : 0,23 = 2,4$), по сравнению с общим резервированием. Надежность $P'_d(l) = 0,56$ может быть достигнута и при общем резервировании, но в этом случае потребуется значительное число запасных двигателей, а это резко увеличит стоимость резерва (запаса).

Каждый механизм состоит как из подвижных, так и неподвижных деталей, не принимающих непосредственного участия в передаче энергии (картеры, корпусы, кронштейны и пр.).

Очевидно, что износ неподвижных деталей всегда будет меньше, чем износ деталей подвижных, и поэтому значительно отличаться по сроку службы. Кроме того, детали сопряжений машин изготавливаются из разных материалов, и трудно ожидать одного и того же срока службы этих деталей. Поэтому детали с малым сроком службы, изнашивание которых непосредственно влияет на качество обрабатываемой продукции или работу механизмов, делают быстросменными, чтобы заменить их в межремонтные периоды и полностью использовать по сроку службы.

Одной из важных количественных оценок совершенства любой машины считается коэффициент равнопрочности ее деталей. Коэффициент равнопрочности K_p можно определить из выражения:

$$K_p = \frac{\sum T_i}{\sum T_i + \sum T_i n_i}, \quad (10)$$

где $\sum T_i$ – суммарный срок службы отдельных агрегатов, узлов машин;

n_i – число соответствующих деталей, износившихся и замененных за срок службы агрегата, узла машины.

При расчете коэффициента равнопрочности любой машины необходимо иметь данные по износу и срокам службы всех ее деталей, для того чтобы найти соответствующие значения n_i . Однако возможности для такого определения коэффициентов равнопрочности весьма ограничены из-за отсутствия данных по сроку службы отдельных деталей, вследствие чего нельзя определить сроки их замены, а также из-за больших колебаний, показателей износа большинства деталей машин в условиях эксплуатации.

Для определения коэффициентов равнопрочности деталей машин, по мнению авторов настоящей работы, рекомендуется пользоваться средними нормами расхода запасных частей, которые обычно разрабатывают на основе статистических данных предприятий. При помощи этих норм вначале определяют частные коэффициенты равнопрочности всех деталей, а затем коэффициенты равнопрочности машины в целом.

Частный коэффициент равнопрочности K_{pi} определяют по формуле

$$K_{pi} = \frac{a_i b_i}{a_i b_i + T_n \cdot N_{cp}}, \quad (11)$$

где a_i – число одноименных деталей в машине; b_i – число машин, на которые рассчитана норма (обычно на 100 машин); T_n – средняя норма смены деталей в течение одного года при определенной среднегодовой наработке машины.

Эти нормы учитывают условия эксплуатации машины и несовершенство ее конструкции, средний уровень квалификации обслуживающего персонала и реализацию ремонтпригодности деталей.

Общий коэффициент равнопрочности машины K_p , при условии, что есть частные коэффициенты по указанным нормам всех деталей, можно определить по формуле

$$K_p = \frac{\sum Q_i}{\sum \frac{Q_i}{K_{pi}}}, \quad (12)$$

где $\sum Q_i$ – суммарная стоимость деталей исходной машины; Q_i – стоимость соответствующей заменяемой детали; K_{pi} – частный коэффициент равнопрочности соответствующей детали.

Расчеты показывают, что данные значения равнопрочности довольно низкие для технологических машин и оборудования, применяемых в различных отраслях промышленности (0,33...0,45), при действующих сроках службы и среднегодовой наработке.

Машина, ее агрегаты или узлы конструктивно несовершенны по равнопрочности, если часть их деталей не выдерживает срока службы. Доказательства этого положения демонстрирует табл.1.

Табл. 1. Характеристика распределения ресурса основных деталей двигателя ЗИЛ-130

Деталь	Среднее значение ресурса, тыс. км	Среднее квадратичное отклонение, тыс. км	Коэффициент вариации
Блок цилиндров	304	58,3	0,19
Гильза	285	162,0	0,57
Головка блока цилиндров	380	380	1,00
Прокладка головки блока цилиндров	136	130	0,95
Поршень	166	86	0,52
Поршневое кольцо	150	66	0,44
Поршень	166	86	0,52
Поршневое кольцо	150	66	0,44
Шатун	285	214	0,75
Коленчатый вал	235	140	0,59
Вкладыш коренных подшипников	117	68	0,58
Вкладыш шатунных подшипников	98	81	0,83
Клапан	205	133	0,65

Из табл.1 видно, что при нормативном ресурсе до КР 300000 км пробега, детали (вкладыши, прокладки, поршневые кольца) можно отнести к быстро изнашивающимся.

Самым известным методом повышения равнопрочности деталей машин, узлов, а также полнокомплектных машин является снижение их металлоемкости, удельного веса. Так, при проектировании машин долгое время закладывался очень большой запас прочности, особенно на несущие конструкции рам, корпусное оборудование и так далее. В многочисленных научных трудах и технической литературе [4,8] доказано, что снижение массы несущих конструкций машин, а также узлов и механизмов значительно уменьшает удельные нагрузки на сопрягаемые детали, а как следствие снижается их износ и повышается соответственно ресурс.

Другим не менее известным способом увеличения равнопрочности машин, агрегатов, деталей является замена материалов наиболее подверженных износу деталей на другие материалы. Так, например, изделия, изготовленные из стали 30 (35) могут быть заменены на изделия, изготовленные из стали 45 и так далее. Однако такая замена материалов резко повышает себестоимость изделий, а также в целом и себестоимость технологической машины. По нашему мнению, для повышения ресурса быстроизнашиваемых сопрягаемых деталей необходимо совершенствовать технологию их изготовления. Так согласно исследованиям, представленным в работах [1, 3, 5, 6] повышение износостойкости сопряжений в 1,5...2 раза, а соответственно и их ресурс

достигается применением современных методов электромеханического упрочнения, поверхностного пластического упрочнения, вибрационного обкатывания на стадии финишной обработки деталей. Еще одним методом совершенствования технологии изготовления деталей является применение композиционных материалов. На основании [2, 7] применение композиционных материалов на основе железоникелевых порошков при изготовлении деталей может увеличить ресурс изделий до 2,5 раз.

Выводы. Основная задача при анализе равнопрочности – поднять ее значение до экономически целесообразного уровня. Равнопрочность деталей, узлов и агрегатов не должна снижаться. По возможности, необходимо восстанавливать детали и даже повышать их износостойкость, применяя перспективные технологические процессы. Повышение равнопрочности быстроизнашиваемых деталей, узлов и знание срока службы делают возможным плановую замену при техническом обслуживании и ремонте технологических машин; это уменьшает количество отказов и простоев оборудования, а также материальных и трудовых затрат на выполнение ремонтных операций.

Список литературы

1. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. – М. Машиностроение. 1989. – 200 с.
2. Дорожкин Н.Н. Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками; Под ред. чл.-кор. АН УССР Г. В. Самсонова; АН БССР. Ин-т проблем надежности и долговечности машин. – Минск: Наука и техника, 1975. – 151 с.
3. Ельцов В.В. Восстановление и упрочнение деталей машин: учебное пособие. – Тольятти: Изд-во ТГУ. 2015. – 335 с.
4. Иванов С.А. Проектирование и оптимизация конструкций машин и оборудования: учебник для вузов / С.А. Иванов, А. В. Нефедов, Н. А. Чиченев. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2014. – 200 с.
5. Кряжков В.М. Баранов Ю.Н., Буйлов К.Н. и др. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники механизированной наплавкой с применением упрочняющей технологии. – М: ГОСНПТИ. 2012. – 208 с.
6. Кряжков В.М. Научные основы восстановления работоспособности сопряжений деталей сельскохозяйственных тракторов применением металлопокрытий и упрочняющей технологии: Автореферат дис. на соискание ученой степени доктора технических наук. (05.20.03) / Ленингр. с.-х. ин-т. – Ленинград: [б. и.], 1973. – 50 с.
7. Марков А.Н. Повышение долговечности подшипниковых узлов лесных машин применением композиционных материалов: диссертация ... кандидата технических наук: 05.21.01. – Санкт-Петербург, 1996. – 207 с.
8. Соколов С.А., Яшонков А.А. Детали машин: учебник. – Керчь: Изд-во ФГБОУ ВО «КГМУ», 2022. – 190 с.

Контакты:

markovan-63@mail.ru (Марков Александр Николаевич);
mactor85@mail.ru (Марков Виктор Александрович);
sergeyvoinash@yandex.ru (Войнаш Сергей Александрович);
vadim.erygin@yandex.ru (Ерыгин Вадим Викторович);
parfenon73@mail.ru (Парфенопуло Георгий Константинович).