

## РАСЧЕТ И ОЦЕНКА МАШИНЫ КАК РЕСУРСНО- ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

*Институт механики машин Национальной академии наук Беларуси  
Минск, Беларусь*

### Введение

В настоящее время функциональные и ресурсные свойства машин рассматриваются обособленно. Для расчетов функциональных свойств используются детерминированные модели. В [1] предлагается метод синтеза оптимальных параметров транспортной машины, но рассматриваются только функциональные свойства. Для расчета ресурса применяются вероятностные модели. В [2] описаны типовые вероятностные методы расчета надежности с использованием распределений нагрузки и прочности. В [3] учитывается вариация распределений нагрузки посредством введения распределения коэффициента пробега (времени). В [4] вариация нагрузок различных машин описывается посредством распределения средней нагрузки.

Понятия нагрузки различны для различных частей машины. Но все нагрузки определяются условиями эксплуатации. Поэтому в работе [5] вводится расчет по схеме “условия эксплуатации — ресурс” и используется вариация условий эксплуатации. Кроме того, в [5] развивается методология расчет ресурса машин и их сборочных единиц как механических систем с зависимыми элементами.

При оценке технических и экономических свойств машин обычно используют значения функциональных и ресурсных показателей, объявленные производителем (см., например, [6, 7] и т.д.). Реальная вариация условий эксплуатации и машинных свойств не принимаются во внимание.

В данной работе вводится статистика условий эксплуатации и статистика объемов работ, в которых отражены позиции производителя и пользователя машин к применению последних. Ресурсные и функциональные свойства машин отображаются общей вероятностной моделью, основанной на вариации условий их эксплуатации. При этом прочностные свойства машин также описываются вероятностным образом и воспроизводятся в общей модели. Предлагаются технический и технико-экономический критерии для оценки машины. Описывается общая процедура моделирования ресурсно-функциональных свойств, включающая расчет технических и технико-экономических параметров.

### Общая методология

1. Статистика производителя и пользователя. Под “производителем” и “пользователем” будем рассматривать разные стратегии в проектировании и оценке машины. Производитель ориентируется на варьируемые условия эксплуатации всех изготавливаемых машин. Пользователь исходит из статистики, основанной на объемах выполняемых им работ.

Статистика условий производителя. Возможное разнообразие применения (использования) машин можно описать конечным набором детерминированных условий эксплуатации. Каждая машина имеет свой собственный спектр условий эксплуатации, который описывается набором относительных продолжительностей (долей) работы в упомянутых условиях эксплуатации  $\alpha_k$ , ( $k=1,2,\dots,K$ ). Сумма относительных продолжительностей равна единице. Мы можем полагать, что относительная продолжительность — нормальная случайная величина (СВ) или близкая к нормальной СВ. Характеристи-

ки (среднее значение и среднее квадратическое отклонение) этой случайной величины задают или принимают с учетом статистической информации по машинам-аналогам.

Статистика объемов пользователя. Пользователь формирует в абсолютных значениях набор рабочих объемов  $X_A$ , выполняемых им в различных условиях (технологиях) и за типовой период времени  $t_y$  (год, сезон или смену):

$$X_A = \{x_{x1}, x_{x2}, \dots, x_{xK}\}, \quad (1)$$

где  $x_{xk}$  — объем работ в  $k$ -х условиях эксплуатации (технологии), например, число гектаров или число т-км,  $K$  — число типовых эксплуатационных условий (технологий). Статистика объемов может быть сформирована на базе статистики условий эксплуатации ( $\alpha_k$ ,  $k=1,2,\dots,K$ ) (наряду с этим, стандартная производительность  $w_{xk}$  должна быть задана для каждого условия эксплуатации):

$$x_{xk} = \alpha_{xk} t_y w_{xk}. \quad (2)$$

2. Определение нагрузочного режима для проектирования агрегатов машины. Машина (автомобиль, трактор и т.д.) имеет  $N$  передач и эксплуатируется в  $K$  условиях. Для каждого условия эксплуатации внешние нагрузки, скорости и относительная продолжительность работы на передачах задаются или определяются (см., например [3, 5]). Эти параметры — детерминированные. Вместе с тем, относительная продолжительность каждого условия эксплуатации есть случайная величина. Чтобы получить множество вариантов нагрузочного режима можно использовать статистическое моделирование относительной продолжительности условий эксплуатации. Для этого воспроизводится процедура статистического моделирования спектра  $\alpha_k$  из  $K$  условий методом Монте-Карло. Но мы имеем проблему. Сумма случайных величин  $\alpha_k$ , ( $k=1,2,\dots,K$ ), получаемых в каждом испытании, как правило, не равна единице. Если их корректировать на каждом шаге путем нормировки, то статистические характеристики таких (мы назвали их связанными или согласованными СВ) изменяются и становятся отличными от заданных. Для разрешения указанной проблемы разработана специальная процедура предварительного статистического моделирования и соответствующее программное обеспечение [8], позволяющее подобрать характеристики СВ, воспроизводящие с учетом согласования необходимый спектр.

Итак, мы можем моделировать относительные продолжительности работы множества машин и их агрегатов. Используя эту модель и заданные относительные продолжительности работы на передачах, мы можем получить распределение времени работы на каждой передаче для множества машин. Расчет продолжительности работы на передачах на  $i$ -м шаге статистического моделирования показан в таблице (здесь  $K=4$ ,  $N=5$ ).

Таблица Расчет относительной продолжительности работы на передачах в  $i$ -м статистическом испытании

k	$\alpha_{ki}$	$\alpha_{nk}, n = 1, \dots, 5$				
		1	2	3	4	5
1	0,5100	0,15	0,20	0,25	0,25	0,15
2	0,3400	0,10	0,15	0,25	0,30	0,20
3	0,1260	0,05	0,15	0,20	0,30	0,30
4	0,0240	0,04	0,10	0,26	0,30	0,30
$\alpha_{ni} = \sum_{k=1}^K \alpha_{nk} \alpha_{ki}$		0,11776	0,1743	0,24394	0,2745	0,1895

Так от исходного вероятностного спектра эксплуатационных условий мы переходим к вероятностному спектру продолжительности работы машины на передачах, что в сочетании с нагрузочными и скоростными параметрами дает нагрузочный режим для проектных расчетов машины.

Следующая проблема состоит в том, какой вариант выбрать для проектирования. Это может быть типовой вариант либо обобщенный. Однако важной особенностью агрегатов машины (например, трансмиссии) является альтернативное использование нескольких нагруженных компонентов. Относительная продолжительность их работы зависит от условий, в которых будет эксплуатироваться машина. Эти условия при проектировании не известны. Поэтому для каждого из альтернативно используемых компонентов следует задать достаточно высокую вероятность их использования. Мы рекомендуем 0,84. При этом сумма относительных продолжительностей для альтернативно используемых компонентов будет больше, чем единица ( $\geq 1,0$ ).

3. Решение оптимизационных задач для предварительного выбора параметров агрегатов. Если агрегаты машины содержат взаимодействующие узлы, и выбор их параметров неоднозначен, то возможно решение оптимизационных задач. Характерный случай — минимизация полной массы редуктора [8] и распределение передаточных чисел по агрегатам трансмиссии.

4. Компоновка узлов и определение основных размеров. Компоновка узлов и решение задачи ресурсного проектирования [5] окончательно устанавливают размеры механических элементов, необходимые для динамических расчетов и моделирования ресурсно-функциональных свойств машины.

5. Общие критерии для оценки машины.

Технический критерий (вероятностный критерий качества машины) как “вероятность ресурсно-функционального состояния” определяется следующим образом:

$$P(w_x, Q_x, L_x) = P(w > w_x, Q < Q_x, L > L_x), \quad (3)$$

где  $w$ ,  $Q$ ,  $L$  — случайные величины;  $w$  — средняя производительность машины на наработке  $L$ ;  $Q$  — средний расход топлива машины на наработке  $L$ ;  $L$  — ресурс машины;  $L_x$  — нормативная наработка;  $w_x$ ,  $Q_x$  — значения средней скорости и расхода топлива, принятые в качестве нормативных показателей.

Технико-экономический критерий (главный компонент конкурентоспособности) определяется как “затраты  $E_y$  для выполнения типового набора работ ( $X_A$ ) в типовом периоде ( $t_y$ ) с учетом ресурса машины  $T$ ”:

$$E_y = E_{L1} x_1 + E_{L2} x_2 + \dots + E_{LK} x_K, \quad (4)$$

$$E_{Li} = Q_{li} + Z_{li} + S_h / W_i, \quad (5)$$

где  $Q_{li}$  и  $Z_{li}$  — затраты на топливо и оператора для выполнения единицы работы в заданных ( $i$ -х) условиях эксплуатации (технологии);  $W_i$  — производительность, объем работы в час. Стоимость одного часа работы машины:

$$S_h = C_0 (1 + K_1 + K_2) / T, \quad (6)$$

где  $C_0$  — цена;  $K_1$  — коэффициент, учитывающий повышение цены машины при различных путях ее приобретения;  $K_2$  — коэффициент, учитывающий ремонт машины и регламентное обслуживание, обычно, он находится в пределах 1,0 ... 1,8;  $T$  — прогнозируемый ресурс машины, час.

При проектировании и оценке машины с использованием приведенных критериев зависимости от ее назначения на отдельные технические параметры (производительность, ресурс, средняя скорость и т.д.) могут быть наложены ограничения.

6. Моделирование ресурсно-функциональных свойств машин. Ресурсно-функциональные свойства машин моделируются при варьировании относительных продолжительностей  $K$  условий эксплуатации и  $N$  несущих способностей (прочностных характеристик материалов) компонентов машины. По каждому  $k$ -му условию эксплуатации определяются отдельные (частные) ресурсы ( $T_{nk}$ ,  $n=1,2,\dots,N$ ) и функциональные параметры ( $W_k$ ,  $Q_{1k}$  и т.д.). Для определения ресурс, предварительно строятся ресурсно-прочностные кривые (РПК), каждая из которых представляет собой зависимость “несущая способность — ресурс”  $n$ -й детали в  $k$ -х условиях эксплуатации [5]. При по-

строении РПК для конкретных значений несущей способности детали (для многоциклового усталости и трибофатических элементов [10] — это предел выносливости материалов) в полном объеме выполняется расчет ресурс, начиная с задания технологических сопротивлений машины, установления действующих нагрузок. Эти кривые могут быть также сформированы по данным испытаний и на основе экспертных оценок. Возможно их представление в графическом или аналитическом виде.

Затем рассчитывается ресурс машины  $T_k$ . Учитывается логическая схема предельных состояний деталей, узлов, агрегатов и машины в целом [11].

С учетом смоделированного случайного набора  $K$  условий эксплуатации в конце каждого шага моделирования определяются общие ресурсные и функциональные параметры ( $T$ ,  $W$ ,  $Q$  и т.д.) отдельной машины. Также можно вычислять значения критериев, чтобы формировать их распределения и оценивать машинные свойства в вероятностном аспекте.

#### Заключение

Описанная методология представляет собой новый вероятностный подход к расчету и оценке машин. Он основан на связанном рассмотрении ресурсных и функциональных машинных свойств. Методы и программное обеспечение, развитые на основе данной методологии используются для расчетов и оценки машин, которые производятся предприятиями Беларуси и другими.

Работа поддержана INTAS (проект INTAS 00-217).

**Литература.** 1. Ванцевич В.В., Высоцкий М.С., Гилелес Л.Х. Мобильные транспортные машины: Взаимодействие со средой функционирования.— Минск: Белорусская наука, 1998, 303 с. 2. Kapur K.C. and Lamberson L.R. Reliability in Engineering Design, New York, John Willey & Sons, 1977, 586 p.; Пер. с англ.: — М.: Мир, 1980, 604 с. 3. Цитович И.С., Каноник И.В., Вавуло В.А. Трансмиссии автомобилей. Минск, Наука и техника, 1979. — 256 с. 4. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. — М.: Машиностроение, 1990. — 448с. 5. Альгин В. Б. Динамика, надежность и ресурсное проектирование трансмиссий мобильных машин. — Минск: Навука і тэхніка, 1995. — 256 с. 6. Фасхиев Х.А. Оценка конкурентоспособности автомобиля // Автомобильная промышленность. 1999. № 3. С. 3–8. 7. Прокопенко В. Рекомендации по оценке показателей экономической эффективности сельскохозяйственных машин и технологий // Агринформ. 1999. Апрель. С.17-18. 8. Альгин В.Б., Богдановский И.Г. Вероятностная модель спектра условий эксплуатации мобильной техники // Вестник Могилевского государственного технического университета. 2001. №1. — С. 14—17. 9. Burdo E., Guschinsky N., Levin G. 2001. How to minimize the total mass of a reducer and provide its lifetime with a given probability // Proceedings of the IEEE Conference ETFA'2001, V. 2, pp. 771-773. 10. Algin V.B. Calculation of Lifetime of a Mechanical System Containing Tribo-Fatigue Elements // Proceedings of III International Symposium on Tribo-Fatigue. October 22-26, 2000. — Beijing, China. 2000. — P.196-199. 11. Альгин В.Б. Методология ресурсно-функционального вероятностного расчета, проектирования и оценки мобильной техники // Механика машин на пороге III тысячелетия. Материалы междунар. науч. конф., Минск, 23—24 нояб. 2000 г.— Мн.: НИРУП «Белавтотракторостроение», 2001. — С. 292—306.