

Управление надёжностью машин на основе экономических критериев

И. А. Хозяев, В. В. Радин

(Донской государственный технический университет)

Представлена методика выделения из производственных затрат на изготовление машины части, относящейся непосредственно к надёжности. Это даёт возможность управлять надёжностью машин на этапе их производства. Методика формализована и может быть использована применительно к любым машиностроительным изделиям.

Ключевые слова: надёжность, производственные затраты, комплексный показатель качества продукции, регрессионный анализ.

Введение. Надёжность машин оказывает существенное влияние на их технико-экономические показатели. Низкая надёжность приводит к простоям машин, снижению их выработки. Например, в сельском хозяйстве из-за низкой надёжности машин для механизации животноводства на 12—15 % недоиспользуется генетически обусловленный потенциал животных и птицы, что оборачивается потерями продукции на миллионы рублей.

Затраты на поддержание работоспособного состояния машин в 5—6 раз превышают их первоначальную стоимость [1].

Надёжность закладывается при проектировании. Требования к уровню показателей надёжности машин должны опираться на экономические расчёты. Наилучший вариант — когда показатели надёжности являются оптимальными.

Традиционный подход при повышении надёжности машин предлагает выделить из суммы производственных расходов затраты, связанные с надёжностью, и, регулируя эти затраты, управлять надёжностью [2, 3]. Однако главные трудности и заключаются в выделении затрат на надёжность, поскольку она связана со всеми группами показателей, характеризующих машину (назначения, технологичности, экономики, стандартизации, экологичности).

Постановка задачи. Тем не менее эту задачу можно решить и создать методику для выделения затрат на надёжность, если использовать такое понятие, как комплексный показатель качества продукции.

Комплексный показатель качества продукции вычисляется по формуле

$$K_{\text{кп}} = M_{\text{к1}} K_{\text{к1}} + M_{\text{к2}} K_{\text{к2}} + \dots + M_{\text{кп}} K_{\text{кп}} = \sum_{i=1}^n M_{\text{ки}} K_{\text{ки}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{к1}}$ — приведённые оценки простых (единичных) свойств; $M_{\text{к1}}$ — весомость этих свойств.

$$M_{\text{к1}} = M_{\text{к1}} + M_{\text{к2}} + \dots + M_{\text{кп}} = \sum_{i=1}^n M_{\text{ки}}.$$

Выбор количества единичных свойств обуславливается прежде всего функциональным назначением изделия и его влиянием на стоимостные показатели машины. Поскольку это важный исходный момент оценки качества, то для выбора номенклатуры единичных свойств разработано достаточно методов [4, 5].

Для рассматриваемого случая существенным является выбор показателей надёжности, и наиболее подходящий из них — вероятность безотказной работы $P_n(t)$, которая определяет условия безотказного функционирования машины за какой-либо отрезок времени. Абсолютные значения остальных единичных показателей качества устанавливаются на основе значений технической документации, например, карт технического уровня и качества продукции и т. п.

Комплексный показатель качества продукции является относительным, поскольку он рассчитывается относительно качества машины, принятой за базу. Для этих целей и вводится приведённая оценка K_{ki} , которая определяется путём сравнения каждого индивидуального показателя изучаемой машины с соответствующим базовым.

$$K_{ki} = \frac{Z_i}{Z_{баз}} \text{ или } K_{ki} = \frac{Z_{i\text{ баз}}}{Z_i},$$

где Z_i и $Z_{i\text{ баз}}$ — единичные свойства рассматриваемой и базовой машины [6].

Выбор формулы для приведения определяется из соображения, чтобы увеличение K_i -го свойства соответствовало улучшению качества продукции.

Для $P_m(t)$ лучше использовать формулу приведения в виде

$$K_{ki} = \frac{P_{i\text{ max}}(t) - P_{i\text{ баз}}(t)}{P_{i\text{ max}}(t) - P_i(t)}, \quad (2)$$

где $P_{i\text{ max}}(t)$ — максимально возможное значение оцениваемого показателя надёжности.

Если принять, что $P_{i\text{ max}}(t) = 1$, то (2) запишется в виде

$$K_{ki} = \frac{1 - P_{i\text{ баз}}(t)}{1 - P_i(t)}.$$

Это уравнение хорошо отражает то положение, что, чем ближе показатель надёжности рассматриваемой машины к единице, тем, соответственно, быстрее растёт значение его оценки. С другой стороны, чем больше приближена $P_i(t)$ к единице, тем быстрее должна расти стоимость изделия.

Следовательно, рассматриваемая оценка правильно отражает существо показателя надёжности и его связь с затратами на производство.

Единичных показателей качества достаточно много, тем не менее, по степени влияния на производственные расходы их можно разделить на две группы. Первая характеризуется тем, что улучшение единичных показателей увеличивает себестоимость машины (показатели назначения, надёжности, эргономики и т. д.), вторая — тем, что улучшение её показателей снижает себестоимость машины (технологичность, стандартизация, унификация).

В этой связи можно разделить комплексный показатель качества на два — $K_{кп1}$ и $K_{кп2}$.

$$K_{кп1} = \sum_{i=1}^n M_{ki} K_{ki} \text{ и } K_{кп2} = \sum_{j=1}^m M_{kj} K_{kj}. \quad (3)$$

Показатель безотказности включён в $K_{кп1}$. Выделим его из общей суммы, тогда $K_{кп1}$ будет иметь вид:

$$K_{кп1} = \sum_{i=1}^{q-1} M_{ki} K_{ki} + M_6 \cdot K_6, \quad (4)$$

где M_6 — весомость показателя безотказности; K_6 — относительная оценка показателя безотказности.

Если в уравнение (4) подставить значение K_{ki} из уравнения (2), то формула для $K_{кп1}$ примет вид

$$K_{кп1} = \sum_{i=1}^{q-1} M_{ki} K_{ki} + M_6 \left[\frac{1 - P_{i\text{ баз}}(t)}{1 - P_i(t)} \right]. \quad (5)$$

На величину производственных затрат $C_{пр}$ влияет множество факторов. Очевидно, связь между ними и качеством продукции будет носить стохастический характер. Из-за множества

факторов определить закон распределения $C_{пр}$ для машины с ресурсом t_p не представляется возможным.

Для того чтобы сохранить стохастический характер затрат на производство и эксплуатацию машин, но избежать необходимости устанавливать какой-либо закон их распределения, нахождение взаимосвязи между затратами и надёжностью можно произвести при помощи теории корреляционно-регрессионного анализа [7].

Комплексный показатель качества был разделён на два — $K_{кп1}$ и $K_{кп2}$. Следовательно, для производственных затрат необходимо использовать уравнение регрессии нескольких переменных. В таком случае зависимость $C_{пр}$ от $K_{кп1}$ и $K_{кп2}$ будет иметь вид:

$$C_{пр} = b_0 (K_{кп1})^{b_1} (K_{кп2})^{b_2}, \quad (6)$$

где b_0, b_1, b_2 — коэффициенты регрессии.

Подставив в (6) значения $K_{кп1}$ и $K_{кп2}$ из (3) и (5), получим:

$$C_{пр} = b_0 \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} M_{ки} K_{ки} + M_6 \frac{[1 - P_m(t)]}{[1 - P_m(t)]} \right\}^{b_1} \left(\sum_{j=1}^m M_{кж} K_{кж} \right)^{b_2}. \quad (7)$$

Для установления взаимосвязи между $C_{пр}$ и надёжностью выражениям $\sum_{i=1}^n M_{ки} K_{ки}$ и $\left(\sum_{j=1}^m M_{кж} K_{кж} \right)^{b_2}$ необходимо придать постоянные значения, соответствующие рассматриваемой машине. Тогда уравнение (7) приобретёт вид:

$$C_{пр} = d_1 \left[d_2 + \frac{d_3}{1 - P_m(t)} \right]^{b_1}, \quad (8)$$

где d_1, d_2, d_3 — постоянные коэффициенты.

Эксплуатационные затраты зависят от одного фактора — надёжности. Для них используем уравнение регрессии одного переменного.

Тогда

$$C_э = a_э [P_m(t)]^{b_э}, \quad (9)$$

где $a_э$ и $b_э$ — коэффициенты регрессии.

Так как производственные затраты являются единовременными, а эксплуатационные растянуты на весь срок службы, то они должны быть приведены к одному моменту времени (году выпуска машины).

Если для вывода уравнения регрессии используются значения $C_{пр}$ машин разных лет выпуска, то и производственные затраты должны быть приведены к одному моменту времени.

Суммарные затраты сложатся из производственных и эксплуатационных

$$C_c = d_1 \left[d_2 + \frac{d_3}{1 - P_m(t)} \right]^{b_1} + a_э [P_m(t)]^{b_э}. \quad (10)$$

Оптимальному уровню надёжности соответствует минимум суммарных затрат на разработку, производство и эксплуатацию машины.

$$\frac{d\{C_c [P_{оп}(t)]\}}{[P_m(t)]} = 0.$$

Зная $P_{\text{моп}}(t)$, можно пересчитать и другие показатели надёжности по известным зависимостям.

Подстановкой значения $P_{\text{моп}}(t)$ в уравнение (10) определяются оптимальные производственные затраты $C_{\text{про}}$. Разница между $C_{\text{про}}$ и $C_{\text{пр}}$ даёт размер необходимых вложений для повышения надёжности до оптимального уровня.

$$\Delta C_{\text{пн}} = C_{\text{про}} - C_{\text{пр}}. \quad (11)$$

После того как определено значение $P_{\text{моп}}(t)$ и $\Delta C_{\text{пн}}$, необходимо произвести распределение $\Delta C_{\text{пн}}$ по системам или сборочным единицам машины.

Для этого устанавливается взаимосвязь между стоимостью системы и её надёжностью в виде уравнений

$$\left. \begin{aligned} C_{c1} &= f_1 P_{c1}(t) \\ C_{c2} &= f_2 P_{c2}(t) \\ &\dots\dots\dots \\ C_{ci} &= f_i P_{ci}(t) \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Далее определяется стоимость повышения доли надёжности, например $0,001 P_{ci}(t)$, на основе уравнений (12) в виде

$$\Delta C_{ci} = 0,001 f_i P_{ci}(t). \quad (13)$$

На основе структурной схемы надёжности машины, состоящей из n_c систем, устанавливается оптимальный уровень надёжности каждой системы, входящей в машину:

$$P_{\text{моп}}(t) = \prod_{i=1}^{n_c} P_{co}(t).$$

Затем определяется необходимая степень повышения надёжности каждой системы до оптимального уровня из условия

$$\Delta P_{ci}(t) = P_{co}(t) - P_{ci}(t). \quad (14)$$

По уравнению (13) определяется доля $\Delta C_{\text{пн}}$, вкладываемая в каждую систему.

Затем должна быть произведена окончательная проверка по условию:

$$\sum_{i=1}^{n_c} \Delta C_{ci} = \Delta C_{\text{пн}}. \quad (15)$$

Таким образом, на основе имеющейся информации о производстве и эксплуатации, по разработанным моделям можно устанавливать оптимальный уровень надёжности машины и определять пути её дальнейшего повышения.

Анализ решения. По разработанной методике была проанализирована конструкция силосоуборочного комбайна КСК-100А-А.

Обобщённый показатель качества определялся на основе единичных показателей для машин различных лет выпуска. За базовую была принята машина 2005 года выпуска. Приведение показателей в соразмерный вид и их относительная оценка производились по общепринятым методикам [6]. Простые показатели качества и их динамика изменения по годам выпуска приведены в табл. 1.

Как и в предыдущем случае — обобщённый показатель качества затем разбивался на два: $K_{\text{кп1}}$ — показатель, объединяющий группу свойств, улучшение которых увеличивает производственные затраты; $K_{\text{кп2}}$ — показатель, объединяющий группу свойств, при улучшении которых производственные затраты уменьшаются.

Таблица 1

Значения простых показателей качества комбайна КСК-100А-А

Показатели	Значения показателей, %			
	2005	2006	2007	2008
Назначения	23,1	23,63	24,32	25,76
Надёжности	20,4	19,89	20,57	20,58
Технологичности	16,8	16,84	16,87	16,88
Эргономические	10,2	10,99	12,49	12,19
Технико-эстетические	4,6	4,60	4,60	4,60
Стандартизации и унификации	7,7	8,58	9,22	9,24
Патентно-правовые	5,4	5,73	5,97	5,97
Экономические	11,8	11,80	11,80	12,64

Расчётные значения обобщённого показателя K_K а также значения $K_{кп1}$, $K_{кп2}$ за четыре года выпуска машины представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения обобщённого показателя K_K и составляющих $K_{кп1}$, $K_{кп2}$ комбайна КСК-100А-А, %

Показатель, %	Год выпуска			
	2005	2006	2007	2008
K_K	100,0	102,070	105,843	108,068
$K_{кп1}$	63,7	64,846	67,954	69,809
$K_{кп2}$	36,3	37,224	37,889	38,259

Найденные значения $K_{кп1}$ и $K_{кп2}$, включающие в себя в открытой форме показатели надёжности, являются случайными величинами. В конечном итоге на основе регрессионного анализа была получена следующая функция производственных затрат

$$C_n = 4,519 \cdot 10^9 \cdot K_{кп1}^{3,653} \cdot K_{кп2}^{-9,585}. \quad (16)$$

Подставив в уравнение (16) значения $K_{кп1}$ и $K_{кп2}$ из табл. 2 и придав единичным показателям, входящим в обобщённый (за исключением надёжностного), постоянные значения, соответствующие годам выпуска, получим уравнение, связывающее производственные затраты на изготовление комбайна КСК-100А-А с уровнем его надёжности:

$$C_n = 6,4131 \cdot 10^{-3} \cdot \left(56,7 + \frac{2,408}{1 - P_M(t)} \right)^{3,653}, \quad (17)$$

где $P_M(t)$ — вероятность безотказной работы комбайна.

Эксплуатационные затраты $C_э$ практически зависят от одного фактора — надёжности.

В результате анализа данных испытаний комбайна зависимость $C_э$ от $P_M(t)$ принимает вид:

$$C_э = 356,84 \cdot [P_M(t)]^{-7,659} + 20000. \quad (18)$$

Суммарные затраты складываются из производственных и эксплуатационных. Функция суммарных затрат выглядят таким образом:

$$C_p = 6,4131 \cdot 10^{-3} \cdot \left(56,7 + \frac{2,408}{1 - P_M(t)} \right)^{3,653} + 356,84 \cdot [P_M(t)]^{-7,659} + 20000. \quad (19)$$

Для определения оптимального значения вероятности безотказной работы комбайна первая производная от выражения (19) приравнялась к нулю. Таким образом, было получено, что

$$C'_p = 2,3427 \cdot 10^{-2} \cdot \left(56,7 + \frac{2,408}{1 - P_m(t)} \right)^{3,653} \cdot \frac{2,408}{(1 - P_m(t))^2} - 2733,04 \cdot [P_m(t)]^{-8,659}. \quad (20)$$

Решение уравнения (20) производилось численным методом. В результате было получено оптимальное значение вероятности безотказной работы комбайна $P_{m0}(t) = 0,724$, которое на 9,9 % выше максимального, достигнутого в 2008 г.

По уравнениям (17) и (18) для оптимального значения $P_{m0}(t)$ были рассчитаны соответствующие ему значения производственных и эксплуатационных затрат. В связи с инфляцией и колебаниями цен, затраты в формулах представлены в у. е.

$C_{по} = 164\,377,4$ у. е. (по ценам 2008 г. $\approx 4\,109\,425$ руб.). В настоящее время продажная цена комплекса «Полесье» по каталогам составляет $\approx 6\,832\,000$ руб.

$C_{эо} = 731\,100$ у. е. (на 7 лет службы).

Таким образом, для достижения оптимального уровня надёжности комбайна КСК-100А-А необходимо увеличить производственные затраты на $\Delta C_{п} = 2526,1$ у. е. При этом эксплуатационные затраты сократятся на 4641,08 у. е.

Для нахождения $P_{сб}(t)$ сборочных единиц, соответствующих полученному значению $P_{m0}(t) = 0,724$, была построена структурная схема надёжности машины. Анализ показал, что она представляет собой систему последовательно соединённых элементов. Тогда из условия равнонадёжности всех систем получается, что $P_{сбi}(t) = 0,9599$. Для разнесения величины $\Delta C_{п} = 2526,1$ у. е. по сборочным единицам в соответствии с их надёжностью были построены функции затрат на их производство. По этим функциям была оценена стоимость повышения $P_{сбi}(t)$ каждой сборочной единицы на 0,001. Затем на основе разницы между фактическим и оптимальным уровнем надёжности сборочных единиц и функций цеховых затрат на их производство был произведён расчёт необходимых вложений в сборочные единицы.

Для достижения оптимальных значений показателей надёжности рекомендуется следующее распределение денежных средств по системам и агрегатам комбайна КСК-100А-А:

- подборщик — 579 у. е.;
- основная машина — 1314 у. е.;
- жатка — 203 у. е.

Таким образом, на основе разработанной методики был определён оптимальный уровень надёжности комбайна, рассчитан объём дополнительных вложений в производство и намечены системы, вложение средств в которые обеспечит ожидаемый эффект.

Выводы. 1. Разработанная методика позволяет выделить из структуры производственных затрат долю, приходящуюся на надёжность, что даёт возможность управлять надёжностью силосоуборочного комбайна.

2. Анализ надёжности силосоуборочного комбайна КСК-100А-А показал, что её уровень ниже оптимального, для достижения которого в производственные расходы на изготовление комбайна необходимо вложить 2526,1 у. е., при этом эксплуатационные затраты сократятся на 4641 у. е.

3. Разработанная методика полностью формализована и может быть использована для любых изделий машиностроения.

Библиографический список

1. Пронилов, А. С. Надёжность машин / А. С. Пронилов. — Москва: Машиностроение, 1988. — 590 с.
2. Жак, С. В. Оптимизация проектных решений в машиностроении / С. В. Жак. — Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 1988. — 168 с.

3. Кузьмин, Ф. И. Задачи и методы оптимизации / Ф. И. Кузьмин. — Москва: Советское радио, 1982. — 225 с.
4. РТМ 105-0-063-88. Оценка уровня качества машин и оборудования для животноводства и кормопроизводства. — Москва: Минживмаш, 1988. — 30 с.
5. Методика выбора показателей для оценки надёжности сложных технических систем. — Москва: Гос. комитет стандартов СССР, Всесоюзный НИИ стандартизации, 1987. — 43 с.
6. Методика сравнения надёжности продукции с аналогами. — Москва: Изд-во стандартов, 1989. — 17 с.
7. Драйкер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Драйкер, Г. Смит. — Москва: Статистика, 1983. — 392 с.

Материал поступил в редакцию 19.12.2011.

References

1. Pronikov, A. S. Nadyozhnost` mashin / A. S. Pronikov. — Moskva: Mashinostroenie, 1988. — 590 s. — In Russian.
2. Zhak, S. V. Optimizaciya proektny`x reshenij v mashinostroenii / S. V. Zhak. — Rostov-na-Donu: Izd-vo RGU, 1988. — 168 s. — In Russian.
3. Kuz`min, F. I. Zadachi i metody` optimizacii / F. I. Kuz`min. — Moskva: Sovetskoe radio, 1982. — 225 s. — In Russian.
4. RTM 105-0-063-88. Ocenka urovnya kachestva mashin i oborudovaniya dlya zhivotnovodstva i kormoproizvodstva. — Moskva: Minzhivmash, 1988. — 30 s. — In Russian.
5. Metodika vy`bora pokazatelej dlya ocenki nadyozhnosti slozhny`x texnicheskix sistem. — Moskva: Gos. komitet standartov SSSR, Vsesoyuzny`j NII standartizacii, 1987. — 43 s. — In Russian.
6. Metodika sravneniya nadyozhnosti produkcii s analogami. — Moskva: Izd-vo standartov, 1989. — 17 s. — In Russian.
7. Drajker, N. Prikladnoj regressionny`j analiz / N. Drajker, G. Smit. — Moskva: Statistika, 1983. — 392 s. — In Russian.

MACHINE RELIABILITY CONTROL BASED ON ECONOMIC CRITERIA

I. A. Khozyayev, V. V. Radin

(Don State Technical University)

The technique of separating the part directly relating to reliability from the machine production cost is presented. It enables to operate machine reliability at the production stage. The technique is formalized, and it can be applied to any engineering products.

Keywords: *reliability, production cost, criterion of performance, regression analysis.*