

УДК 629.017:621.03

К.В. ЩУРИН, д-р техн. наук, проф.
 профессор кафедры механики материалов и деталей машин¹
 E-mail: tteng@mail.ru

В.Е. ТАРАСЕНКО, канд. техн. наук, доц.
 заведующий кафедрой технологий и организации технического сервиса¹
 E-mail: trs9@yandex.ru

В.Н. ЕДНАЧ, канд. техн. наук, доц.
 заведующий кафедрой механики материалов и деталей машин¹
 E-mail: val-e@mail.ru

¹Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 15.09.2023.

ФОРМИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА НОРМИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

На основе анализа основных факторов, влияющих на показатели надежности технических систем и обеспечивающих их регламентированную работоспособность, сформированы зависимости для определения экстремума показателей экономической эффективности при нормированном значении вероятности безотказной работы. На основе анализа условий проектирования, производства и эксплуатации определены параметры целевой функции, в том числе для восстанавливаемых объектов. Нормирование показателей надежности представлено как решение задачи многофакторной оптимизации. Задача распределения требований к безотказности сложной технической системы, состоящей из статистически независимых показателей подсистем, сформулирована как задача условной оптимизации. Применительно к нормированию показателей надежности и критериям отказов и предельных состояний выполнено группирование факторов по признакам и внутренним показателям объекта общих классификационных признаков, их стратификации и ранжирования. Сформирована структура и порядок подготовки исходных данных.

Ключевые слова: надежность, система, машина, показатель, отказ, фактор, нормирование, оптимизация, функция, требование

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-15-22>

Введение. Надежность — это качество, распределенное во времени, интегральное свойство любой технической системы (ТС), которое обуславливается ее безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью. Для каждого типа (класса) ТС определенного функционального назначения, степени сложности, режима эксплуатации, характера и последствий отказов выбираются и нормируются свои показатели надежности (ПН) или их определенные комбинации. ПН ТС формируются и закладываются в процессе проектирования и изготовления, расходуются при ее использовании по назначению и поддерживаются путем реализации системы технических обслуживания и ремонтов.

На всех перечисленных этапах необходима организация процесса управления надежностью машины, причем при принятии любого ответственного решения должны быть учтены его технико-экономические и социальные последствия. Правильность

выбора и нормирования количественных значений ПН оказывает преобладающее влияние на схемно-конструктивные решения при создании изделия, определение параметров всех конструктивных составляющих в процессе рабочего проектирования, назначение параметров технологических процессов, разработку методов испытаний, организацию системы технической эксплуатации и утилизации.

К основным факторам, влияющим на ПН ТС, относятся:

- факторы, характеризующие особенности конструкции;
- факторы характера и режимов использования ТС по назначению;
- факторы последствий отказа ТС, характеризующиеся размером обобщенного ущерба;
- факторы функциональной структуры, отражающие наличие в ТС различных видов избыточности — структурной, временной, информативной, энергетической;

- факторы организации использования по назначению, отражающие организационную и материальную структуру технической эксплуатации.

При использовании изделия по назначению в число факторов, влияющих на ПН, добавляются климатические условия, интенсивность и культура эксплуатации [1, 2].

С целью обеспечения регламентированной работоспособности изделий в условиях реальной эксплуатации необходимо нормирование основных ПН, допустимые значения которых должны оговариваться в нормативно-технической документации на изделие. Выбор ПН регламентирован нормативными документами (ГОСТ 27.003-83 «Надежность в технике. Выбор и нормирование показателей надежности. Основные положения») и чаще всего определяется заказчиком в виде регламентированного коэффициента технической готовности. При этом, как правило, нормируют вероятность безотказной работы $P(t)$ (ВБР) при заданном ресурсе T_p , в течение которого она регламентируется. Значение T_p должно быть согласовано со структурой и периодичностью технических обслуживаний и ремонтных работ, а допустимая ВБР является мерой опасности последствий отказа. Чем выше требования к объекту, тем больше допустимое значение $P(t)$. Следует иметь в виду, что с повышением надежности увеличиваются затраты в процессе проектирования, изготовления машин, с одной стороны, и снижаются затраты на эксплуатацию вследствие уменьшения числа отказов, с другой. Эти две противоположные тенденции и создают предпосылки для выявления экстремума показателей экономической эффективности, которому соответствует оптимальное значение вероятности безотказной работы. Таким образом нормирование ПН следует осуществлять по принципу «необходимо и достаточно».

Методика исследования. Для оптимизации требований к ПН необходимо назначить показатели эффективности на основе анализа условий проектирования, производства и эксплуатации (стоимость изготовления, производительность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность). Основными показателями эффективности машины являются производительность и экономичность, т. е. затраты на выполнение заданных функций. Если в качестве показателя эффективности принять затраты на производство и эксплуатацию, то можно получить взаимосвязь вероятности безотказной работы с затратами.

В общем случае задача нормирования надежности элементов сводится к оптимизации целевой функции [1, 3, 5, 6], которая, в свою очередь, является функцией точечных значений оценок надежности элементов (1):

$$G = G(P_i), i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где P_i — оценка надежности i -го элемента; N — число элементов, входящих в систему.

В качестве целевой функции можно выбрать минимальную стоимость C , массу M или другие значимые показатели по функционалу (2):

$$\begin{aligned} G = C; C = C(P_i), i = \overline{1, N}; \\ G = M; M = M(P_i), i = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (2)$$

В процессе решения отыскивают вектор $P = (P_1, P_2, \dots, P_N)$, минимизирующий C, M .

В общем случае градация изделий по классам надежности представлена в таблице.

Отметим, что приведенные значения $P(t)$ заданы для определенного периода эксплуатации T_p при условии строгой регламентации и выполнения режимов работы и условий эксплуатации.

В нулевой класс входят малоответственные детали и узлы, отказ которых остается практически без последствий. Для них адекватными и приемлемыми показателями надежности могут быть средний срок службы, ресурс или наработка на отказ.

Классы с I по IV характеризуются повышенными требованиями к безотказной работе (номер класса соответствует числу девяток после запятой). В эту группу (I и II классы) входят и транспортно-технологические мобильные машины. В V класс включаются высоконадежные изделия, отказ которых в заданный период не допустим.

В ряде случаев нормирование осуществляют при условии выполнения не только требований по надежности системы, но и требований по ее безопасности. Тогда в качестве функции надежности дополнительно используют функцию безопасности.

Очень важно выявить и количественно оценить отказы, которые влияют на безопасность работы машины. Современные методики риск-ориентированного проектирования [3, 13], в частности, FMESA (ГОСТ Р 51901.12 2007 (МЭК 60812:2006) «Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов»), безопасность системы оценивают вероятностью безотказной работы с безусловным учетом двух параллельных показателей: категории последствий и уровня опасности.

Категория последствий оценивает негативную значимость последствий, к которым может привести отказ:

- I класс — отказ не приводит к травмированию персонала;
- II класс — отказ приводит к травмированию персонала;
- III класс — отказ приводит к серьезной травме или смерти;

Таблица — Классы надежности
Table — Reliability classes

Класс надежности	0	1	2	3	4	5
Допустимое значение $P(t)$	<0,9	>0,9	>0,99	>0,999	>0,9999	1

- IV класс — отказ приводит к серьезным травмам или смерти группы людей.

Уровень опасности $P_{оп}$ учитывает то время, которое имеет в своем распоряжении оператор или АСУ для устранения отказа и предотвращения аварии. Чем меньше время устранения T_y , тем выше степень опасности, возникающей от данного отказа. Численно уровень опасности характеризуется величиной (3):

$$P_{оп} = e^{-T_y}. \quad (3)$$

Вид отказа, который приводит к аварии без всякого предупреждения персонала ($T_y \rightarrow 0$) характеризуется высшим уровнем опасности, равным единице.

Противоположным по характеру является отказ, на устранение которого всегда имеется необходимое время ($T_y \rightarrow \infty$) и опасности аварии не возникает. В этом случае уровень опасности равен нулю.

Допустимую вероятность отказа выбирают с учетом влияния указанных выше факторов и вероятности отказа всей системы. Установлены четыре класса вероятностей q отказа данного элемента как части вероятности Q отказа всей системы [1, 5, 11]:

- $q < 0,01Q$;
- $0,01Q < q < 0,05Q$;
- $0,05Q < q < 0,1Q$;
- $q > 0,1Q$.

При исследовании показателя эффективности изделия на этапе проектирования должна рассматриваться взаимосвязь условий, определяющих эффективность (рисунок 1).

Если показанную на рисунке 1 схему взаимосвязи условий представить в виде аналитических зависимостей, мы получим математическую модель критерия эффективности и, осуществив ее оптимизацию, определим количественные показатели надежности [1, 4, 6].

Основными показателями эффективности объекта являются производительность и экономичность. Кроме того, должны быть введены и другие граничные условия в зависимости от назначения объекта [1, 8–11, 15], например, ограничения массы, габаритов.

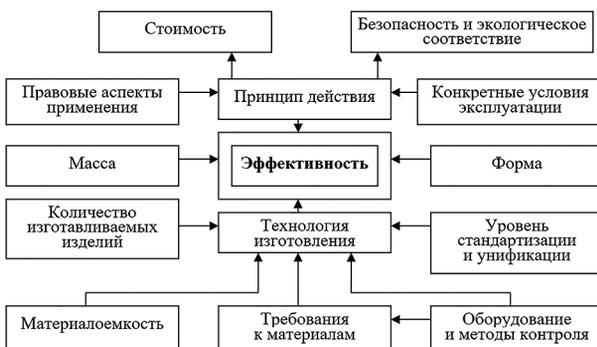


Рисунок 1 — Взаимосвязь условий эффективности
Figure 1 — Interrelationship of efficiency conditions

Определение оптимальных требований к ПН объекта связано с тем, что вместе с их повышением, как правило, происходит возрастание затрат на НИОКР и производство и снижение расходов на ремонт и техническое обслуживание.

При формировании целевой функции для восстанавливаемых объектов необходимо обработать данные по затратам на производство и эксплуатацию элементов и аппроксимировать функцию затрат аналитическим выражением вида $C_i = C_i(P)$.

Тогда целевая функция может быть представлена в виде (4):

$$C = \sum_1^N \overline{C}_i(P_i) = \min. \quad (4)$$

При этом в качестве функции ограничения принимается зависимость вида (5):

$$\prod_1^N P_i \geq P_{тр}, \quad (5)$$

где $P_{тр}$ — требуемый показатель надежности объекта.

Функцию затрат на производство и эксплуатацию можно представить [1, 6] в виде формулы (6):

$$C_i = \frac{C_{ai}}{C_{ui}} \ln \frac{P_{i\infty} - P_{i0}}{P_{i\infty} - P_i}, \quad (6)$$

где C_{ai} — средняя стоимость производства элемента; C_{ui} — стоимость испытаний; P_0 и P_{∞} — начальный и предельный показатели надежности.

Функцию затрат (6) в первом приближении можно аппроксимировать зависимостью (7):

$$C_i = a_i \ln \left[\frac{b_i}{(P_{i\infty} - P_i)} \right], \quad (7)$$

где a_i и b_i — статистические коэффициенты затрат; $P_{i\infty}$ — предельное значение показателя надежности.

Если представить зависимость (7) в виде исходной целевой функции, то последняя будет иметь вид (8):

$$\sum_1^N a_i \ln \left[\frac{b_i}{(P_{i\infty} - P_i)} \right] = \min. \quad (8)$$

Нелинейное ограничение (5) без заметного снижения точности решения задачи может быть заменено линейным; для этого необходимо прологарифмировать неравенство (5). В результате получим неравенство (9):

$$\sum_1^N \ln P_i \geq \ln P_{тр}. \quad (9)$$

Так как P_i и $P_{тр}$ близки к единице, можно принять, что $\ln P_i = -(1 - P_i)$ и $\ln P_{тр} = -(1 - P_{тр})$. В этом случае неравенство (9) запишется в виде неравенства (10):

$$\sum_1^N (1 - P_i) \leq (1 - P_{тр}). \quad (10)$$

Таким образом, задача оптимизации требований к ПН элементов принимает вид (11):

$$\sum_1^N a_i \ln \left[\frac{b_i}{(P_{i\infty} - P_i)} \right] = \min; \quad (11)$$

$$\sum_1^N (1 - P_i) \leq (1 - P_{тр}).$$

Выражение (11) представляет собой задачу нелинейного программирования с целевой функцией и линейным ограничением.

Если неравенство (11) заменить равенством, то задача принимает вид (12):

$$\sum_1^N a_i \ln \left[\frac{b_i}{(P_{i\infty} - P_i)} \right] = \min; \quad (12)$$

$$\sum_1^N (1 - P_i) = (1 - P_{тр}).$$

В такой форме задача по определению оптимального значения $P_{i\text{опп}}$ может решаться методом неопределенных множителей Лагранжа.

Функция Лагранжа на основании (12) запишется в виде формулы (13):

$$L = \sum_1^N a_i \ln \frac{b_i}{P_{i\infty} - P_i} + \lambda \left[(1 - P_{тр}) - \sum_1^N (1 - P_i) \right], \quad (13)$$

где λ — неопределенный множитель Лагранжа.

Условие оптимума функции Лагранжа $\frac{\partial L}{\partial P_i} = 0$; $i = \overline{1, N}$; $\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0$ и в соответствии с (12) имеем выражения (14):

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{a_i}{(P_{i\infty} - P_i)} + \lambda = 0; \quad (14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 1 - P_{тр} - \sum_1^N (1 - P_i) = 0.$$

Откуда получаем выражение (15) для $P_{i\text{опп}}$:

$$\sum_1^N P_{i\text{опп}} = P_{тр} - 1 + N; \quad (15)$$

$$P_{i\text{опп}} = P_{i\infty} + \frac{a_i}{\lambda}.$$

Суммируя левую и правую части уравнения при значениях i , изменяющихся в интервале $1 \dots N$, получим выражения (16) и (17):

$$\sum_1^N P_{i\text{опп}} = \sum_1^N P_{i\infty} + \frac{1}{\lambda} \sum_1^N a_i; \quad (16)$$

$$\lambda = \frac{\sum_1^N a_i}{\left[1 - P_{тр} - \sum_1^N (1 - P_{i\infty}) \right]}. \quad (17)$$

С учетом (17) и (15) после элементарных преобразований получим выражение для оптимального значения ПН элемента:

$$P_{i\text{опп}} = P_{i\infty} - \bar{f}_i \left[(1 - P_{тр}) - \sum_1^N (1 - P_{i\infty}) \right], \quad (18)$$

где $\bar{f}_i = \frac{a_i}{\sum a_i}$.

Уравнение (18) можно логически улучшить и одновременно упростить, если вместо вероятности безотказной работы ввести вероятности возникновения отказов. Тогда получаем зависимость:

$$Q_{д} = 1 - P_{тр}; \quad \sum_1^N (1 - P_{i\infty}) = Q_{\infty}, \quad (19)$$

где $Q_{д}$ — допустимая вероятность возникновения отказа объекта; Q_{∞} — предельно допустимая вероятность отказа.

В результате введения принятых обозначений уравнение (18) принимает вид:

$$P_{i\text{опп}} = P_{i\infty} - \bar{f}_i (Q_{д} - Q_{\infty}). \quad (20)$$

Для выбора номенклатуры ПН объектов необходима их классификация и назначение критериев отказов и предельных состояний (КОПС). Применяемые понятия (система и подсистема) рассматриваются только совместно и являются иерархическими уровнями объекта. Например, деталь может рассматриваться как подсистема сборочной единицы и как многофункциональная система с собственными интегральными, комплексными и частными нормируемыми квалиметрическими показателями. Общие классификационные признаки и их частичная детализация применительно к нормированию ПН и КОПС группируются по признакам и внутренним показателям объекта, поименованным и детализированным в [1]:

- вид объекта (4 показателя);
- степень ответственности объекта (2 показателя);
- степень ответственности подсистемы (2 показателя);
- применяемость (2 показателя);
- количество выполняемых функций (2 показателя);
- количество значимых квалиметрических показателей (2 показателя);
- временной режим функционирования (4 показателя);
- принцип ограничения длительности использования (2 показателя);
- связь с ресурсом системы (2 показателя);
- зависимость и обособленность подсистемы (6 показателей);
- факторы, влияющие на снижение ПН (3 показателя);
- резервирование (3 показателя);
- ремонтпригодность (5 показателей);
- сохраняемость (4 показателя);
- назначение, вид производства и принадлежность по изготовлению объекта (5 показателей).

Таким образом, нормирование ПН должно рассматриваться как решение задачи комплексной многофакторной оптимизации как минимум по 43 параметрам, объединенным в 15 групп. При

этом процесс нормирования ПН включает следующие основные этапы:

- выбор наиболее подходящих ПН для рассматриваемой конструкции машины;
- обоснование численных значений ПН машины в целом;
- оптимальное распределение избыточности конструкции машины (запаса надежности) между ее подсистемами.

В качестве примера рассмотрим обобщенный алгоритм назначения вероятности безотказной работы (ВБР) машины за определенный промежуток времени. Обозначим этот показатель надежности через R . Выходной показатель эффективности эксплуатации машины обозначим через E , а через R_{\min} — минимальный уровень ВБР, при котором технически допустимо использование машины. Через $C(R)$ обозначим расходы на повышение ВБР до уровня R , которые ограничены величиной $C_{\text{огр}}$.

Общая схема нормирования значения ВБР представлена на рисунке 2.

Если эффект E от эксплуатации машины соизмерим с затратами C на повышение ее ВБР, то рекомендуется последовательность решения задачи, условно обозначенная номерами элементов блок-схемы: 1–2–2'–4–5–6.

В этом случае оптимальное значение ВБР $= R_{\text{огт}}$ получают из решения следующей задачи на условный экстремум:

$$\frac{E(R)}{C(R)} \rightarrow \max,$$

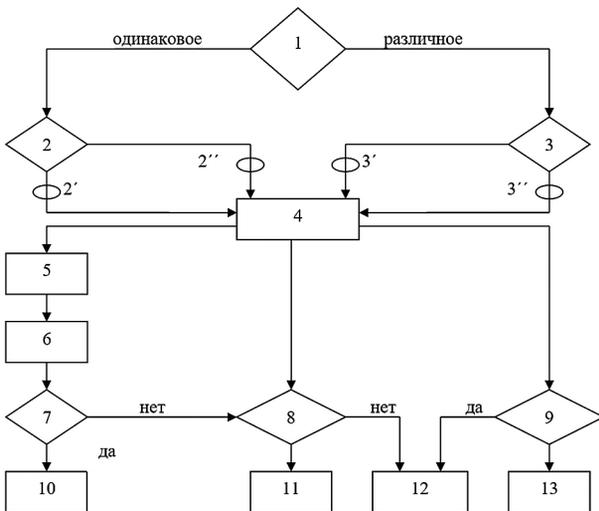


Рисунок 2 — Блок-схема нормирования показателей надежности: 1 — смысловое содержание E и C ; 2 — ущерб от отказов; 3 — затраты на повышение надежности; 4 — построение зависимости $C(E)$; 5 — построение функции $E(R)$; 6 — определение $R_{\text{огт}}$; 7 — $C(R_{\text{огт}}) \leq C_{\text{огр}}$; 8 — $R(C_{\text{огр}}) \geq R_{\text{мин}}$; 9 — $R(C_{\text{огр}}) < R_{\text{мин}}$; 10 — принимается $R_{\text{огт}}$; 11 — принимается $R(C_{\text{огр}})$; 12 — нет решения; 13 — принимается $R_{\text{экс}}$

Figure 2 — Block diagram of reliability indicators regulation: 1 — semantic content of E and C ; 2 — damage from failures; 3 — costs for reliability improvement; 4 — construction of dependence $C(E)$; 5 — construction of function $E(R)$; 6 — determination of $R_{\text{огт}}$; 7 — $C(R_{\text{огт}}) \leq C_{\text{огр}}$; 8 — $R(C_{\text{огр}}) \geq R_{\text{мин}}$; 9 — $R(C_{\text{огр}}) < R_{\text{мин}}$; 10 — $R_{\text{огт}}$ is accepted; 11 — $R(C_{\text{огр}})$ is accepted; 12 — no decision; 13 — $R_{\text{экс}}$ is accepted

где $E(R)$ — непрерывная и неубывающая функция, ограниченная номинальным значением E_0 ; $C(R)$ — неограниченно возрастающая функция.

Если ущерб от возникновения отказов велик по сравнению с затратами на повышение ВБР, то нет необходимости в поиске $R_{\text{огт}}$ и решение начинается с определения $R(C_{\text{огр}})$. Последовательность решения задачи в этом случае: 1–2–2'–4–8.

Если эффект E от эксплуатации и затраты на повышение безотказности C — величины различного смыслового содержания, то, как и для предыдущего варианта, следует стремиться к повышению ВБР до тех пор, пока не будут исчерпаны возможности изготовителя. В этом случае шифр варианта: 1–3–3'–4–8.

В конструкции любой машины имеются подсистемы, лимитирующие ее безотказность. Если отказы этих подсистем не приводят к катастрофическим последствиям, то оптимальный уровень ВБР существует и он находится в области реальных значений. Однако нередки случаи, когда вычислить этот уровень, исходя из сопоставления эффекта и затрат, не представляется возможным. Тогда проектный уровень безотказности рекомендуется определять экспертным методом. В этом случае шифр варианта: 1–3–3'–4–9.

Очевидно, решение поставленной задачи требует от заказчика и поставщика машин постоянного обмена информацией. При этом необходимо отметить, что в задачах нормирования показателей надежности ни производственная, ни эксплуатационная информация не могут быть использованы в исходном виде — в форме массивов данных. Такую информацию необходимо подвергнуть статистической обработке с обязательным применением факторного анализа в силу того, что на эксплуатационные показатели надежности влияет большое количество факторов организационного, конструкционного, экономического, социального характера, без учета которых, например, не представляется возможным обосновать даже при наличии необработанных данных по эксплуатации машины численное значение величины $R_{\text{мин}}$.

В практике нормирования показателей безотказности и других показателей надежности машин рекомендуется следующий порядок подготовки исходных данных:

- в зависимости от модели (модификации) машины и (или) предприятия-изготовителя парк машин рассматриваемого типа разбивается на n групп;
- машина из i -й группы $i = \overline{1, n}$ отождествляется с себестоимостью c_i ее изготовления. В первом приближении допустимо вместо себестоимости изготовления машины использовать ее рыночную цену. Обозначим через C_1, C_2, \dots, C_n затраты на приобретение машин, входящих в каждую из n групп;
- сгруппировав данные об отказах (виды отказов, моменты возникновения, причины, затраты на

устранение последствий отказов) по рассматриваемым группам машин и обработав их с применением методов математической статистики [4], получим значения ВБР машин указанных модификаций R_1, R_2, \dots, R_n ;

- далее определяем оптимальную себестоимость $f(l_{ij})$ единицы наработки машины. Под себестоимостью единицы наработки машины i -й группы f_i , допустимо понимать величину E_i . В результате формируем последовательность E_1, E_2, \dots, E_n для рассматриваемых конструкций машин;

- с помощью методов интерполяции [4] получаем функциональные зависимости для $C(R)$, $E(R)$ и $f(c)$;

- минимально допустимый уровень безотказности машины R_{\min} определяется в результате анализа следующих независимых случайных величин: ξ_1 — наработка до возникновения отказа, характеризуемого как функциональный, тяжелый, полный; ξ_2 — наработка машины до возникновения параметрического отказа, при котором хотя бы один из параметров функционирования изменяется в недопустимых пределах. Обозначим через $\overline{F}_1(t)$ и $\overline{F}_2(t)$ их функции распределения соответственно. Тогда случайная величина $\xi = \min(\xi_1, \xi_2)$ соответствует величине $R_{\min} = \overline{F}_1(t) \overline{F}_2(t)$, где $\overline{F}_1(t)$ определяется тем его значением, которое соответствует параметру, характеризующему безопасность эксплуатации машины. Оценку для $\overline{F}_2(t)$ получают в результате анализа эксплуатационной информации;

- величину $C_{\text{опр}}$ определяем из решения уравнения

$$f'(c) = 0. \quad (21)$$

Таким образом, сформированный алгоритм получения исходных данных обосновывает нормируемый уровень надежности ТС в целом и ее подсистем.

Третья задача нормирования — формирование уровней требований, предъявляемых к подсистемам машины с тем, чтобы их безотказность была бы не менее R_0 при минимальной себестоимости изготовления.

Если в качестве R_0 взять определенный по изложенной методике нормируемый уровень безотказности, то следующей задачей будет оптимальное распределение заложенного в машину запаса надежности между ее подсистемами.

Задача распределения требований к безотказности подсистем применительно к машине, состоящей из s взаимодействующих статистически независимых составных частей, формулируется как задача условной оптимизации, где в качестве критерия оптимизации используется выражение

$$\sum_{i=1}^s c_{ij} \rightarrow \min, \quad (22)$$

а в качестве ограничения:

$$\prod_{i=1}^s R_{ij} \geq R_0, \quad (23)$$

где c_{ij} — стоимость j -й модификации i -го элемента конструкции; R_{ij} — показатель безотказности j -й модификации i -го элемента конструкции машины.

Итак, по каждому элементу машины имеется определенная совокупность его модификаций. Требуется остановиться на тех модификациях элементов конструкции, при которых выполнялись бы условия (22) и (23). Для решения этой задачи используют дискретный вариант метода динамического программирования, который предлагается реализовать как последовательность следующих этапов:

- формирование возможных вариантов исполнения каждой из составных частей машины;
- упорядоченный перебор этих вариантов;
- последовательная сборка машины из ее составных частей.

Упорядоченный перебор вариантов исполнения составных частей основывается именно на принципе оптимальности метода динамического программирования, когда используется последовательная процедура минимизации на каждом шаге. При этом по каждой i -й модификации любой составной части машины необходимо иметь пару C_i — R_i , т. е. «стоимость — безотказность».

Неизбежным фактором процесса эксплуатации ТС является снижение потенциала ее работоспособности, и при выработке активной (восстанавливаемой) части потенциала работоспособности необходимо назначить соответствующую операцию ТО или ремонта согласно рекомендациям [1, 2, 7, 14].

Заключение. Нормирование показателей надежности является важнейшей задачей риск-ориентированного проектирования. Полагаем целесообразным реализацию изложенной методики с разработкой соответствующего программного комплекса применительно к наземным транспортно-технологическим мобильным машинам, относящимся к I–III классам надежности и характеризующимся повышенным уровнем опасности, прежде всего, в сферах перевозок опасных грузов и людей, грузоподъемным машинам и горнодобывающей технике.

Список литературы

1. Шурин, К.В. Надежность мобильных машин / К.В. Шурин. — Оренбург: ГОУ ОГУ, 2010. — 585 с.
2. Шурин, К.В. Корректирование периодичности операций технического сервиса мобильных машин с учетом жесткости климата / К.В. Шурин, В.Е. Тарасенко // Механика машин, механизмов и материалов. — 2023. — № 2(63). — С. 14–24. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-2-63-14-24>.
3. Панов, А.Н. Методология риск-ориентированного проектирования для обеспечения конкурентоспособности в мировом машиностроении / А.Н. Панов // Механика машин, механизмов и материалов. — 2023. — № 2(63). — С. 5–13. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-2-63-5-13>.
4. Шурин, К.В. Планирование и организация эксперимента: учеб. пособие для вузов / К.В. Шурин, Е.К. Волкова. — СПб.: Лань, 2022. — 336 с.
5. Рассоха, В.И. Повышение эффективности эксплуатации автомобильного транспорта на основе разработанных науч-

- но-технических, технологических и управленческих решений: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.10 / В.И. Рассоха: Оренбургский гос. ун-т. — Оренбург, 2010. — 34 с.
6. Половко, А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 704 с.
 7. Моделирование процессов восстановления машин / В.П. Алсин [и др.]. — М.: Транспорт, 1996. — 312 с.
 8. Животкевич, И.Н. Надежность технических изделий / И.Н. Животкевич, А.П. Смирнов. — М.: Олита, 2003. — 473 с.
 9. Устич, П.А. Надежность рельсового нетягового подвижного состава: учеб. / П.А. Устич, В.А. Карпычев, М.Н. Овечников. — М.: Вариант, 1999. — 411 с.
 10. Четвергов, В.А. Надежность локомотивов: учеб. / В.А. Четвергов, А.Д. Пузанков. — М.: Маршрут, 2003. — 413 с.
 11. Проников, А.С. Параметрическая надежность машин / А.С. Проников. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 559 с.
 12. Тарасенко, В.Е. Надежность технических систем: практикум для студентов / В.Е. Тарасенко, В.П. Миклуш, А.А. Жешко. — Минск: БГАТУ, 2015. — 200 с.
 13. Надежность технических систем и техногенный риск. Практикум: учеб.-методич. пособие / сост.: В.Е. Тарасенко [и др.]. — Минск: БГАТУ, 2023. — 72 с.
 14. Щурин, К.В. Основы теории надежности мобильных машин: учеб. пособие / К.В. Щурин. — М.: Изд-во МГУЛ, 2004. — 215 с.
 15. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. — М.: Машиностроение, 1984. — 312 с.

SHCHURIN Konstantin V., D. Sc. in Eng., Prof.

Professor of the Department of Mechanics of Materials and Machine Parts¹

E-mail: tteng@mail.ru

TARASENKO Viktor E., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Department of Technologies and Organization of Technical Service¹

E-mail: trs9@yandex.ru

EDNACH Valery N., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Department of Mechanics of Materials and Machine Parts¹

E-mail: val-e@mail.ru

¹Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Received 15 September 2023.

FORMATION OF AN ALGORITHM FOR REGULATION OF RELIABILITY INDICATORS OF TECHNICAL SYSTEMS

Based on the analysis of the main factors influencing the reliability indicators of technical systems and ensuring their regulated performance, dependencies were formed to determine the extremum of economic efficiency indicators at a normalized value of the probability of failure-free operation. Based on an analysis of design, production and operation conditions, the parameters of the objective function were determined, including for restored objects. Regulation of reliability indicators was presented as a solution to a multifactor optimization problem. The problem of distributing requirements for the reliability of a complex technical system, consisting of statistically independent indicators of subsystems, was formulated as a conditional optimization problem. In relation to the regulation of reliability indicators and criteria for failures and limit states, factors were grouped according to the characteristics and internal indicators of the object of general classification characteristics, their stratification and ranking. The structure and procedure for preparing initial data was formed.

Keywords: reliability, system, machine, indicator, failure, factor, regulation, optimization, function, requirement

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-15-22>

References

1. Shchurin K.V. *Nadezhnost mobilnykh mashin* [Reliability of mobile machines]. Orenburg, GOU OGU Publ., 2010. 585 p. (in Russ.).
2. Shchurin K.V., Tarasenko V.E. *Korrektirovanie periodichnosti operatsiy tekhnicheskogo servisa mobilnykh mashin s uchetom zhestkosti klimata* [Correcting the frequency of operations of technical service for mobile machines taking into account the climate rigidity]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2023, no. 2(63), pp. 14–24. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-2-63-14-24> (in Russ.).
3. Panov A.N. *Metodologiya risk-orientirovannogo proektirovaniya dlya obespecheniya konkurentosposobnosti v mirovom mashinostroenii* [Risk-based design methodology for ensuring competitiveness in the global mechanical engineering]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2023, no. 2(63), pp. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-2-63-5-13> (in Russ.).

4. Shchurin K.V., Volkova E.K. *Planirovanie i organizatsiya eksperimenta* [Planning and organization of an experiment]. Saint Petersburg, Lan Publ., 2022. 336 p. (in Russ.).
5. Rassokha V.I. *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii avtomobilnogo transporta na osnove razrabotannykh nauchno-tekhnicheskikh, tekhnologicheskikh i upravlencheskikh resheniy*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Increasing the efficiency of operation of road transport based on developed scientific, technical, technological and management solutions. Extended abstract of D. Sc. thesis]. Orenburg, 2010. 34 p. (in Russ.).
6. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of reliability theory]. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2006. 704 p. (in Russ.).
7. Apsin V.P., Dekhterinskiy L.V., Norkin S.B., Prikhodko V.M. *Modelirovanie protsessov vosstanovleniya mashin* [Modeling of machine restoration processes]. Moscow, Transport Publ., 1996. 312 p. (in Russ.).
8. Zhivotkevich I.N., Smirnov A.P. *Nadezhnost tekhnicheskikh izdeliy* [Reliability of technical products]. Moscow, Olita Publ., 2003. 473 p. (in Russ.).
9. Ustich P.A., Karpychev V.A., Ovechnikov M.N. *Nadezhnost relsovogo netyagovogo podvizhnogo sostava* [Reliability of rail non-traction rolling stock]. Moscow, Variant Publ., 1999. 411 p. (in Russ.).
10. Chetvergov V.A., Puzankov A.D. *Nadezhnost lokomotivov* [Reliability of locomotives]. Moscow, Marshrut Publ., 2003. 413 p. (in Russ.).
11. Pronikov A.S. *Parametricheskaya nadezhnost mashin* [Parametric reliability of machines]. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. N.E. Baumana Publ., 2002. 559 p. (in Russ.).
12. Tarasenko V.E., Miklush V.P., Zhesko A.A. *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem* [Reliability of technical systems]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy agrarnyy tekhnicheskiy universitet Publ., 2015. 200 p. (in Russ.).
13. Tarasenko V.E., et al. *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem i tekhnogenyy risk* [Reliability of technical systems and man-made risk]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy agrarnyy tekhnicheskiy universitet Publ., 2023. 72 p. (in Russ.).
14. Shchurin K.V. *Osnovy teorii nadezhnosti mobilnykh mashin* [Fundamentals of the theory of reliability of mobile machines]. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy universitet lesa Publ., 2004. 215 p. (in Russ.).
15. Bolotin V.V. *Prognozirovanie resursa mashin i konstruktsiy* [Forecasting the service life of machines and structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 312 p. (in Russ.).