

УДК 658.562

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СОВОКУПНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И ПОДСИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА

© 2025 Е.С. Постникова¹, А.В. Рагуткин¹, М.И. Сидоров², М.Е. Ставровский¹, С.В. Александрова^{2,3}

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

²МИРЭА – Российский технологический университет, г.Москва, Россия

³МАИ – Московский авиационный институт (НИУ), г.Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 10.10.2025

В статье рассмотрена задача обеспечения надежности совокупности элементов, узлов, комплектов изделий, поступающих от поставщиков на финишную сборку, а также контроль и мониторинг состояния элементов и подсистем технологических и производственных систем во всей кооперации. Представлено исследование структур сложных систем. Под структурой системы в статье понимается схематически или математически представленный состав основных элементов системы, необходимый и достаточный для достижения цели исследования; под элементом системы понимается условно неделимая часть системы, признак выделения которой определяется постановкой цели исследования; под связью в системе понимается условие, определяющее одно из взаимодействий элементов системы. Приводятся результаты исследования системы с экспоненциальной функцией надежности и постоянным временем восстановления, готовности и ее дисперсии для заданного числа циклов, конечного интервала времени и установившегося состояния. Определены критерии расчета системы, основанные на модели ее стоимости и включающие функцию готовности. Описаны методы исследования чувствительности оптимальных значений среднего времени до отказа системы и среднего времени восстановления во всей системе в целом. Обоснован вывод о том, что установившаяся готовность не зависит от распределений времени работы до отказа и времени восстановления системы и на конечном интервале времени определяется математическим ожиданием доли времени безотказной работы. Получены приближения для распределения величины установившейся готовности оборудования, которые в совокупности с экономическими факторами можно использовать для ответа на вопрос о запуске системы в течение первого цикла или в начальный период времени. Приведены результаты исследования проблемы оптимального конструирования системы с учетом экономических факторов и функция установившейся готовности. Сделан вывод о возможной практической реализации результатов исследования на основе использования современных средств цифровизации для систематизации информации по контролю качества сложных производственных структур, комплексов машин и других сложных технических и технологических систем.

Ключевые слова: интеграция, технологическая система, установившаяся готовность, работоспособность, оптимальное конструирование

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-6-64-72

EDN: FSSZOG

Данное исследование было проведено в рамках работы по Соглашению о предоставлении из федерального бюджета гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075-15-2024-527 от «23» апреля 2024 г.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все актуальнее стоит вопрос об интеграции технологических систем корпораций в единую систему для выполнения заказов, разделении функций отдельных предприятий при создании высокотехнологичной продукции в соответствии с наилучшими компетенциями [1-5]. Эти же вопросы возникают при кооперации малых предприятий, по аналогии с зарубежным опытом аутсорсинга, например, компаний Boeing и Airbus [6-9].

Постникова Елена Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры экономики и организации производства. E-mail: postnikova.el@yandex.ru

Рагуткин Александр Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры промышленной логистики.

E-mail: ragutkinav@yandex.ru

Сидоров Михаил Игоревич, доктор технических наук, заместитель начальника отдела мобильных решений ИЦМР РТУ МИРЭА. E-mail: m.sidorov60@mail.ru

Ставровский Михаил Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры промышленной логистики. E-mail: stavrov@list.ru

Александрова Светлана Викторовна, кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер отдела разработки ИТ-решений ИЦМР РТУ МИРЭА, доцент каф.609. МАИ. E-mail: vasil-s@yandex.ru

В этих условиях весьма серьезной и актуальной становится задача обеспечения надежности совокупности элементов, узлов, комплектов изделий, поступающих от поставщиков на финишную сборку, а также контроль и мониторинг состояния элементов и подсистем технологических и производственных систем во всей кооперации [10,11].

Поскольку сложные системы, в том числе и системы машин, имеют большое число элементов и связей, рассматривать всю совокупность которых при решении практических задач бывает невозможно и нецелесообразно, то будем исследовать не сами системы, а их структуры. При этом под структурой системы будет пониматься схематически или математически представленный состав основных элементов системы, необходимый и достаточный для достижения цели исследования. Под связью в системе будет пониматься условие, определяющее одно из взаимодействий элементов системы. Понятие «элемент системы» является условным понятием, поэтому в дальнейшем под элементом системы будет пониматься условно неделимая часть системы, признак выделения которой определяется постановкой цели исследования.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Исследуем систему с экспоненциальной функцией надежности и постоянным временем восстановления, готовность и ее дисперсию для заданного числа циклов, конечного интервала времени и установившегося состояния. Приведем некоторые критерии расчета системы, основанные на модели ее стоимости и включающие функцию готовности [12-14]. Получим оптимальные значения среднего времени до отказа системы и среднего времени восстановления. Опишем методы исследования чувствительности этих оптимальных значений во всей системе в целом.

Рассмотрим подсистему, для которой время до отказа имеет экспоненциальное распределение:

$$f(t) = m^{-1} \exp(-m^{-1}t),$$

где m – среднее время отказа.

Если система отказывает, то время восстановления R предполагается постоянным. Это предположение имеет смысл, так как в настоящее время поиск неисправностей проводится автоматически с точностью до сменного модуля при исследовании оборудования и ремонте «по состоянию».

Существуют системы, для которых готовность полной системы определяется готовностью всех входящих в нее подсистем и элементов. Кроме того, все подсистемы контролируются таким образом, чтобы функции надежности совпадали. Например, в некоторых системах связи всех подсистем должны иметь вероятность безотказной работы в течение суток 0,98. В этом случае:

$$\int_0^{\infty} m^{-1} \exp(-tm^{-1}) dt = 0,98, \text{ откуда } m=1200 \text{ час.}$$

Это значение можно использовать в качестве субъективного критерия для расчета системы. Таким образом, если для готовности системы необходима готовность одновременно S подсистем (элементов), интенсивность отказов каждой подсистемы равна m^{-1} и отказы подсистем независимы, то время до отказа всей системы распределено по закону:

$$f(t) = Sm^{-1} \exp(-Sm^{-1}t) = \frac{S}{m} e^{\frac{-St}{m}}. \quad (1)$$

Готовность есть часть времени, когда система работоспособна. Следовательно, в течение одного цикла готовность системы равна $t/(t+R)$, где t рассматривается как функция и имеет распределение (1). Таким образом, готовность на одном цикле $A(1)$ равна среднему значению величины $t/(t+R)$.

Следовательно,

$$A(1) = \int_0^{\infty} t(t+R)^{-1} \left(\frac{S}{m}\right) \exp\left(-\frac{tS}{m}\right) dt,$$

то есть является преобразованием Лапласа функции $t/(t+R)$, умноженной на S/m . Легко показать, что:

$$A(1) = K \exp(K) \Gamma(-1, K),$$

или, что эквивалентно:

$$A(1) = 1 - K \exp(K) E_i(K),$$

где $K = RS/m$, $\Gamma(b, y)$ – неполная гамма-функция, определяемая выражением:

$$\Gamma(b, y) = \int_y^{\infty} \exp(-U) U^{b-1} dU,$$

$$E_i(x) = \int_x^{\infty} \omega^{-1} \exp(-\omega) d\omega.$$

Дисперсию функции $t/(t+R)$ назовем дисперсией готовности. Приближенную оценку этой величины можно получить, используя формулу:

$$V(f(t)) = (f(E(t)))^2 V(t), \quad (2)$$

по которой дисперсия функции от t равна квадрату первой производной этой функции, вычисленной для среднего значения переменной t , умноженному на дисперсию переменной t . Таким образом, если $f(t) = t/(t+R)$ и t распределено по (1), то: $E(t) = m/S$; $V(t) = (m/S)^2$; $V(t/(t+R)) = K^2 (1+K)^{-2}$.

Общее время работы системы за i циклов равно $T + iR$, где $T = \sum_{j=1}^{j=i} t_s$, и следовательно, равно i -кратной свертке переменной t .

Так как t распределено экспоненциально, T имеет гамма-распределение с i степенями свободы. Таким образом, готовность системы для i циклов $A(i)$ есть среднее значение функции $T/(T+iR)$ и равно:

$$A(i) = \int_0^{\infty} T(T+iR)^{-1} g(T) dt,$$

где $g(T) = T^{-1} (S/m)^i (\Gamma(i))^{-1} \exp(-TS/m)$.

Имеем:

$$A(i) = i(iK)^i \exp(iK) \Gamma(-i, iK)$$

$$A(i) = (S/m)^i (\Gamma(i))^{-1} \left[(-iK)^i \exp(iK) E_i(iK) + \sum_{j=1}^{j=i} (j-1) (-iK)^{i-j} (m/S)^j \right],$$

где $E_i(x) = \int_x^{\infty} \omega^{-1} \exp(-\omega) d\omega$.

Приближительную оценку для дисперсии готовности, обозначаемую для i циклов через $V(A(i))$, можно получить с помощью выкладок в [15].

Подставляя в него $E(T) = im/S$, $V(T) = i(m/S)^2$ и $f(T) = T/(T+iR)^{-1}$, получаем выражение $V(A(i)) = i^{-1} K^2 (1+K)^{-4}$, справедливость которого вытекает также из независимости циклов.

Установившаяся готовность есть предел готовности для многих циклов, когда число циклов стремится к бесконечности. Установившуюся готовность можно вычислить как взвешенное среднее значение функции $t/(t+R)$ для одного цикла, то есть:

$$A = \frac{\int_0^{\infty} t(t+R)^{-1} \omega(t) (S/m) \exp(-tS/m) dt}{\int_0^{\infty} \omega(t) (S/m) \exp(-tS/m) dt}, \quad (3)$$

где весовой коэффициент $\omega(t) = t+R$. Известно, что:

$$A = (1+K)^{-1} \quad (4)$$

при $m/S \gg R$ для некоторых систем ($m=1200$ час., $R=0,25$ час. и $S \leq 60$) $A=1-K$.

Можно легко показать, что результат в выражении (4) не зависит от распределения t (и R). Числитель выражения (3) равен m/S , а знаменатель равен $R + m/S$. Откуда и получается (4). Если R

рассматривать как случайную переменную, то (3) имеет два (двойных) интеграла. Однако результат остается прежним. Когда t и R распределены экспоненциально, можно использовать метод Маркова, как это показано в [15].

Дисперсию установившейся готовности $V(A)$ можно получить из среднего взвешенного значения второго момента функции $t/(t+R)$

Таким образом,

$$V(A) = \frac{\int_0^{\infty} t^2 (t+R)^{-2} \omega(t) (S/m) \exp(-tS/m) dt}{\int_0^{\infty} \omega(t) (S/m) \exp(-tS/m) dt - (1+K)^{-2}},$$

где весовой коэффициент $\omega(t) = t+R$. Остается оценить:

$$I = \int_0^{\infty} t^2 (t+R)^{-1} (S/m) \exp(-tS/m) dt.$$

Имеем $I = 2(S/m)R^2 \exp(K) \Gamma(-2, K)$ или:

$$I = (S/m) \left[iR(mS^{-1} - 1) + R^2 \exp(\exp(K) E_i(K)) \right].$$

Известно, что для всех значений K и i $A > A(i+1) > A(i)$. Будем говорить, что произошло событие n , если в интервале времени $(0, T)$ наступило n отказов. Обозначим через V событие, заключающееся в том, что в момент T система работоспособна, и через V^* – обратное событие. Обозначим через $Q(n, T)$ вероятность одновременного наступления n событий V , и через $Q^*(n, T)$ – вероятность одновременного наступления n событий V^* . Обозначим $P(n, T)$ вероятность наступления n событий.

По теореме полной вероятности:

$$P(n, T) = Q(n, T) + Q^*(n, T).$$

Найдем $Q(n, T)$. Событие n, V могут одновременно наступить только в том случае, если последний отказ системы произошел не позже момента $T-R$. Вероятность того, что в интервале времени $(0, T)$ система вообще проработала безотказно, равна $\exp(-TS/m)$. Вероятность того, что в интервале времени $(0, T)$ произошел отказ, равна:

$$Q(1, T) = \int_0^{T-R} Sm^{-1} \exp(-tS/m) \exp(-Sm^{-1}(T-t-R)) dt.$$

Откуда:

$$Q(1, T) = Sm^{-1}(T-R) \exp(Sm^{-1}(T-R)).$$

Вероятность $Q(n, T)$ для $n=2$ равна:

$$Q(2, T) = \int_{t_1=0}^{T-2R} \int_{t_2=t_1+R}^{T-R} A \cdot B \cdot C dt_2 dt_1,$$

где $A = Sm^{-1} \exp(-Sm^{-1}t_1)$ – вероятность того, что первый отказ произошел в момент t_1 , $B = Sm^{-1} \exp(-Sm^{-1}(t_2 - t_1 - R))$ – вероятность того, что второй отказ произошел через время $t_2 - (t_1 + R)$ после устранения первого отказа и $C = \exp(-Sm^{-1}(T - t_2 - R))$ вероятность того, что на интервале $(t_2 + R, T)$ отказов больше не наступало. Тогда:

$$Q(2, T) = (1/2) S^2 m^{-2} (T-2R)^2 \exp(-Sm^{-1}(T-2R)).$$

Используя метод, с помощью которого получено выражение для $Q(2, T)$, имеем:

$$Q(n, T) = \int_{t_i=t_{i-1}+R}^{T-(n+1-i)R} \iint \dots \prod_{i=1}^n Sm^{-1} \exp(-Sm^{-1}(t_i - t_{i-1} - R) \cdot \exp(-T - t_n - R)) \prod_{i=1}^n dt_i,$$

где $i=1, 2, \dots, n$ и $t_0 = -R$.

После упрощения получаем:

$$Q(n, T) = (Sm^{-1})^n \left(\exp(-(T - nR)) \right) \int_{t_i=t_{i-1}+R}^{T-(n+1-i)R} \dots \int \prod_{i=1}^n dt_i, \quad (5)$$

После $(n-i)$ -кратного интегрирования, при $(n-i) < n$, подинтегральная функция $I(n-i)$ определяется выражением

$$I(n-i) = ((n-i)I)^{-1} (T - t_i - (n-i+1)R)^{n-i}.$$

Тогда после n -кратного интегрирования интегральная часть выражения (5) равна:

$$I(n) = (nI)^{-1} (T - nR)^n.$$

Откуда для $n=0, 1, 2, \dots, [T/R]$ получаем осеченное модифицированное распределение Пуассона:

$$Q(n, T) = (nI)^{-1} (Sm^{-1})^n (T - nR)^n \exp(-Sm^{-1}(T - nR)).$$

Найдем $Q^*(n, T)$. Очевидно, что $Q^*(0, T) = 0$, так как если на интервале $(0, T)$ отказы отсутствуют, то в момент T система должна быть работоспособна. Одновременное наступление двух событий, первое из которых состоит в появлении n отказов на интервале $(0, T)$, $1 \leq n \leq [T/R]$, а второе – в том, что система не работоспособна в момент T , может произойти тогда и только тогда, когда на интервале $(0, t)$, $T-R < t < T$, появилось $(n-1)$ отказов, система работоспособна в момент t и на интервале (t, T) произошел еще один отказ системы. Тогда перемножая соответствующие вероятности и интегрируя по t на интервале $(T-R, T)$, получаем [3]:

$$Q^*(n, T) = \int_{T-R}^T Q(n-1, t) P(1, T-t) dt. \quad (6)$$

где $P(1, x) = 1 - \exp(-Sx/m)$. Если T/R – не целое число, надо рассматривать вероятность $Q^*(1 + [T/R], T)$. В этом случае нижний предел интеграла в (6) надо заменить на $[T/R]$. Следовательно, общее выражение для $Q^*(n, T)$ имеет вид:

$$Q^*(n, T) = \int_{\max(T-R, (n-1)R)}^T Q(n-1, t) P(1, T-t) dt. \quad (7)$$

Когда T/R есть целое число, $Q^*(T + [T/R], T)$, определяемое (7) исчезает.

Если происходит событие, описываемое вероятностью $Q(n, T)$, то время безотказной работы системы равно $T - nR$. Если происходит событие, описываемое вероятностью $Q^*(n, T)$, то математическое ожидание времени безотказной работы равно $T - (n-1)R - R/2$ для $1 \leq n \leq [T/R]$ и $(T - (n-1)R - (T - (n-1)R))/2$ для $n = 1 + [T/R]$. Доля времени безотказной работы на интервале $(0, T)$ определяется отношением соответствующего математического ожидания к T . Тогда готовность $A(T)$ на конечном интервале времени определяется математическим ожиданием доли времени безотказной работы, то есть имеет вид:

$$A(T) = \sum_{n=0}^{[T/R]} (T - nR) T^{-1} Q(n, T) + \sum_{n=0}^{[T/R]} (T - (n-1/2)R) T^{-1} Q^*(n, T) + (T - (n-1)R) (2T)^{-1} Q^*(1 + [T/R], T). \quad (8)$$

Когда $R \ll T$ или когда T стремится к бесконечности, можно получить приближительную оценку выражения (8), если положить $R=0$ в определении вероятности $P(n, T)$. В этом случае $Q^*(n, T) = 0$, так как $P(1, R)=0$ и $P(n, T)$ имеет пуассоновское распределение со средним значением TS/m . Однако слагаемое $Q(n, T)$ в вероятности $P(n, T)$ будет зависеть от величины R , так как время простоя nR . Итак,

$$A(T) = 1 - K, \quad (9)$$

что совпадает с выражением для установившейся готовности. Дисперсия готовности на конечном интервале времени $V(A(T))$, равна дисперсии относительного значения времени простоя, то есть

$$V((T - nR)T^{-1}) = V(nRT^{-1}).$$

Приближительную оценку этого выражения можно получить следующим образом. Рассмотрим дисперсию величины n , когда она имеет пуассоновское распределение со средним значением TSm^{-1} . Дисперсия $V(n) = TSm^{-1}$, откуда $V(nRT^{-1}) = TSm^{-1} (RT^{-1})^2$, и, следовательно

$$V(A(T)) = R^2 S(mT)^{-1}. \quad (10)$$

Рассмотрим, может или нет операция пуска системы быть выполнена в течение первого цикла, то есть нарушит ли первый отказ проведение этой операции? Предположим, что $K=0,01$. Тогда $A(1)=0,96$ и $\sigma \cong 0,01$. В этом случае из неравенства Camp-Meidel в предположении симметричности распределения $A(1)$ получаются следующие вероятности:

$$P(A(1) \leq 0,96 - K(0,01)) \leq 2/9K^2, (K = 1, 2, 3, \dots)$$

$$P(A(1) \leq 0,96) = 1/2$$

$$P(A(1) \leq 0,96 + K(0,01)) \leq 1 - 2/9K^2, (K = 1, 2, 3, \dots).$$

Таким образом, получены приближения для распределения величины $A(1)$, которые в совокупности с экономическими факторами можно использовать для ответа на поставленный вопрос.

Следующий вопрос: может или нет операция пуска системы быть выполнена в начальный период времени? Положим $S=1$, $m=168$ час., $T=168$ час. и $R=1$ час. Тогда из выражения (9) $A(T) \cong 167/168$, и выражения (10) $\sigma \cong 1/168$. Это распределение системы сильно сдвинуто влево. Используя неравенство Чебышева, получим следующие вероятности:

$$P(A(T) \leq 1 - (K+1)\sigma) \leq K^{1/2}, (K = 1, 2, 3, \dots).$$

Эти границы в совокупности с экономическими факторами можно использовать для ответа на поставленный вопрос.

Исследуем проблему оптимального конструирования системы. Показано, что установившаяся готовность A приблизительно определяется выражением $A=1-PM^{-1}$, где M – среднее время до отказа независимое от распределения надежности системы. Дополнением готовности является время простоя D , следовательно, $D=RM^{-1}$. Рассмотрим систему экономических факторов, включающую стоимость оборудования, затраты в связи с восстановлением отказавшего оборудования, потери за время простоя, с учетом которых определим оптимальные значения конструктивных параметров. Одним из стоимостных составляющих является функция установившейся готовности, то есть времени простоя. Таким образом, стоимость оборудования есть функция от M , стоимость оборудования, необходимого для обеспечения частоты отказов M^{-1} , равна $K_1 M^a$, где K_1 и a положительные постоянные. Стоимость, затраченная на обеспечение времени восстановления R , равна $K_2 R^b$, где $K_2 > 0$, $b_2 < 0$ – постоянные величины. Стоимость времени простоя пропорциональна времени простоя и равна $K_3 RM^{-1}$, где K_3 – постоянная величина. Тогда общая стоимость C системы равна:

$$C = K_1 M^a + K_2 R^b + K_3 RM^{-1}. \quad (11)$$

Предположим, что при конструировании системы можно варьировать значения двух параметров M и R . Тогда оптимальными будут также значения, при которых C – минимальна. Определяя частные производные и приравняв их к нулю, получаем:

$$\partial C / \partial R = b \cdot K_2 \cdot R^{b-1} + K_3 \cdot M^{-1} = 0,$$

$$\partial C / \partial M = a \cdot K_1 \cdot M^{a-1} - K_3 \cdot R \cdot M^{-2} = 0. \quad (12)$$

Откуда оптимальные значения R^* и M^* равны:

$$R^* = [(a \cdot K_1)^{-1} (-b \cdot K_2)^{a+1} (K_2)^{-a}]^{(a-b-ab)^{-1}}, \quad (13)$$

$$M^* = [(a \cdot K_1)^{1-b} (-b \cdot K_2)^{-1} (K_2)^b]^{(ab+b-a)^{-1}}. \quad (14)$$

Рассмотрим случай, когда R и M нельзя варьировать одновременно. Пусть уравнение (11) полной стоимости системы есть функция только одного параметра. Таким образом, если M фиксировано, то общая стоимость является функцией переменной R , и для определения его оптимального значения $R(M)$ имеем уравнение (12), из которого:

$$R(M) = (K_3 (-b \cdot K_2 \cdot M)^{-1})^{(b-1)^{-1}}.$$

Аналогично, при фиксированном R получаем оптимальное значение $M(R)$:

$$M(R) = (K_3 \cdot R (a \cdot K_1)^{-1})^{(a+1)^{-1}}.$$

Чувствительность величин R^* , M^* , $R(M)$ и $M(R)$ по постоянным K_1 , K_2 и K_3 можно оценить, находя

соответствующие частные производные. Кроме того, чувствительность стоимости C по постоянным K_1 , K_2 и K_3 в случае варьирования M и R равна:

$$\begin{aligned}\partial C / \partial K_1 &= M^a + aK_1M^{a-1}(\partial M / \partial K_1) + bK_2R^{b-1}(\partial R / \partial K_1) + K_3M^{-1}(\partial R / \partial K_1) - K_3RM^{-2}(\partial M / \partial K_1), \\ \partial C / \partial K_2 &= aK_1M^{a-1}(\partial M / \partial K_2) + R^b + bK_2R^{b-1}(\partial R / \partial K_2) + K_3M^{-1}(\partial R / \partial K_2) - K_3RM^{-2}(\partial M / \partial K_2), \\ \partial C / \partial K_3 &= aK_1M^{a-1}(\partial M / \partial K_3) + bK_2R^{b-1}(\partial R / \partial K_3) + RM^{-1} + K_3M^{-1}(\partial R / \partial K_3) - K_3RM^{-2}(\partial M / \partial K_3).\end{aligned}$$

В эти выражения надо подставить оптимальные значения величин M и R из (13) и (14).

Когда C есть функция только одного параметра, то есть $C(M)$ или $C(R)$, имеем следующие соотношения:

$$\begin{aligned}\partial C(M) / \partial K_1 &= M^a + aK_1M^{a-1}(\partial M(R) / \partial K_1) - K_3RM^{-2}(\partial M(R) / \partial K_1), \\ \partial C(M) / \partial K_3 &= aK_1M^{a-1}(\partial M(R) / \partial K_3) - K_3RM^{-2}(\partial M(R) / \partial K_3), \\ \partial C(R) / \partial K_2 &= R^b + bK_2R^{b-1}(\partial R(M) / \partial K_2) + K_3M^{-1}(\partial R(M) / \partial K_2), \\ \partial C(R) / \partial K_3 &= RM^{-1} + bK_2R^{b-1}(\partial R(M) / \partial K_3) + K_3M^{-1}(\partial R / \partial K_3).\end{aligned}$$

Для полноты изложения приведем выражения для частных производных, используемых для вычисления численных значений по выведенным выше формулам:

$$\begin{aligned}\partial R^* / \partial K_1 &= (-aK_1^2)^{-1}G(R); \partial R^* / \partial K_2 = (a+1)(-bK_2)^a(-b)G(R); \\ \partial R^* / \partial K_3 &= -a(K_3)^{-a-1}G(R),\end{aligned}$$

где $G(R) = (a-b-ab)^{-1}[(aK_1)^{-1}(-bK_2)^{a+1}(K_3)^a]^{-1+(a-b-ab)}$;

$$\begin{aligned}\partial M^* / \partial K_1 &= a(1-b)(aK_1)^{-b}H(M); \\ \partial M^* / \partial K_2 &= (bK_2)^{-1}H(M); \partial M^* / \partial K_3 = b(K_3)^{b-1}H(M); \\ H(M) &= (ab+b-a)^{-1}[(aK_1)^{1-b}(-bK_2)^{-1}(K_3)^b]^{-1+(ab+b-a)^{-1}}; \\ \partial R(M) / \partial K_2 &= K_3(bK_2^2M)^{-1}L(R); \partial R(M) / \partial K_3 = (-bK_2M)^{-1}L(R); \\ L(R) &= (b-1)^{-1}[K_3(-bK_2M)^{-1}]^{-1+(b-1)^{-1}}; \\ \partial M(R) / \partial K_1 &= K_3R(-aK_1^2)^{-1}S(M); \partial M(R) / \partial K_3 = R(aK_1)^{-1}S(M); \\ S(M) &= (a+1)^{-1}(K_3R(aK_1)^{-1})^{-1+(a+1)^{-1}}.\end{aligned}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При создании интегрированных производственных систем на условиях кооперации необходимо учитывать множество факторов, влияющих на качество продукции, производительность, экономические показатели, а также сроки выполнения работ. Оптимальное конструирование производственной системы при этом в качестве основного критерия предусматривает готовность системы к выполнению задания в соответствии с установленными требованиями. Основу готовности составляет надежность системы, обеспечиваемая безотказной работой оборудования, и, в случае отказа, его восстановление с минимальными потерями времени и средств. При этом готовность интегрированной производственной системы определяется готовностью всех входящих в нее подсистем и элементов. Кроме того, все подсистемы контролируются таким образом, чтобы функции надежности совпадали.

Безусловно, задача обеспечения надежности подсистем и элементов в описываемой конфигурации не ограничивается рамками вышеприведенных результатов. Однако, по нашему мнению, данный подход дает возможность, используя современные средства цифровизации, целенаправленно подходить к вопросам систематизации информации по контролю качества сложных производственных структур, комплексов машин и других сложных технических и технологических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рахмилевич, Е. Г. Разработка инструментов организации интегрированных производственных структур с учетом конструкторско-технологических ограничений: дис. канд. техн. наук / Е. Г. Рахмилевич. – М., 2023. – 135 с.

2. Мазуркевич, М.А. Обоснование оптимальных стратегий ремонта и технического обслуживания лесных машин на основе вероятностных моделей: дис. ... д-ра техн. наук / М.А. Мазуркевич. – СПб, 1998. – 332 с.
3. Гумеров, М.Ф. Феноменологическая модель проблемной области принятия решения в организационном управлении / М.Ф. Гумеров // Инновации и инвестиции. – 2017. – №1. – С. 119–124.
4. Рагуткин, А. В. Методология исследования связей моделей цифровых машиностроительных производств: дис. д-ра техн. наук / А. В. Рагуткин. – М., МГТУ им. Н.Э.Баумана, – 2023. – 317 с.
5. Хитрых, Д.П. Цифровой двойник: концепция, уровни, связь с Интернетом вещей и роль численного и системного моделирования / Д.П. Хитрых // САПР и графика. – 2020. – № 7(285). – С. 8-12.
6. Clre A.T. et al. Additive Manufacturing for the Aerospace Industry / Ed. By F. Fores and R. Boyer. – Cambridge: Elsevier, 2019. 465 p.
7. Шведенко, В.Н. Применение концепции цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем / В.Н. Шведенко, А.Е. Мозохин. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2020. – Т. 20. – № 6. – С. 815-827.
8. Никищечкин, П.А. Разработка типовых архитектур цифровых двойников производственно-логистических систем машиностроительных предприятий на разных стадиях их жизненного цикла / П.А. Никищечкин, В.А. Долгов, С.Н. Григорьев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 5(758). – С. 37–48.
9. Rojek I., Mikołajewski D., Dostatni E. Digital twins in product lifecycle for sustainability in manufacturing and maintenance // Appl. Sci, 2021. Pp.11–31.
10. Олейник, А. В. Статистические распределения отказов, генерируемые кинетикой накопления повреждений в материале деталей / А. В. Олейник, Е. А. Лукашев, С. П. Посеренин // Технология машиностроения. – 2009. – № 10. – С. 29-33.
11. Чигиринский, Ю.Л. Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживание / Ю.Л. Чигиринский, Д.В. Крайнев, Е.М. Фролов // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – № 8. – С. 39.
12. Русецкий, А.М. Теоретические основы проектирования технологических комплексов [под общ. ред. А.М. Русецкого] / А.М. Русецкий и др. – Минск: Беларус. Навука, 2012. – 239 с.
13. Русецкий, А.М. Конструирование и оснащение технологических комплексов [под общ. ред. А.М. Русецкого] / А.М. Русецкий и др. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 316 с.
14. Колесов, И.М. Основы технологии машиностроения / И.М. Колесов. – М.: Высшая школа, 1999. 591 с.
15. Посеренин, С. П. Теоретические основы стратегий технического обслуживания машин и технологического оборудования: дис. д-ра техн. наук / С. П. Посеренин. – М., 2005. – 381 с.

STUDYING THE RELIABILITY OF A SET OF PRODUCTION ELEMENTS AND SUBSYSTEMS

© 2025 E.S. Postnikova¹, A.V. Ragutkin¹, M.I. Sidorov², M.E. Stavrovsky¹, S.V. Aleksandrova²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

³Moscow Aviation Institute – MAI, Moscow, Russia

The article addresses the task of ensuring the reliability of a set of elements, components, and product kits supplied by vendors for final assembly, as well as the control and monitoring of the condition of elements and subsystems within technological and production systems across the entire supply chain. A study of complex system structures is presented. The system structure is understood as a schematic or mathematical representation of the main system elements, necessary and sufficient to achieve the research objective; a system element is defined as a conditionally indivisible part of the system, with its distinguishing characteristic determined by the research goal; a system connection is understood as a condition defining one of the interactions between system elements. The results of a study of a system with an exponential reliability function and constant recovery time, availability, and its variance for a given number of cycles, a finite time interval, and a steady state are presented. System calculation criteria based on its cost model and including the availability function are defined. Methods for studying the sensitivity of the optimal values of the system's mean time to failure and mean time to recovery across the entire system are described. It is substantiated that the steady-state availability does not depend on the distributions of system time to failure and recovery time and, over a finite time interval, is determined by the mathematical expectation of the failure-free operation time fraction. Approximations for the distribution of the steady-state equipment availability are obtained, which, together with economic factors, can be used to decide whether to launch the system during the first cycle or in the initial period. The results of a study on the problem of optimal system design considering economic factors and the steady-state availability function are presented. It is concluded that the research results can be practically implemented using modern digitalization tools to systematize quality control information for complex production structures, machine complexes, and other complex technical and technological systems.

Keywords: integration, technological system, steady-state availability, operational capability, optimal design.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-6-64-72

EDN: FSSZOG

This study was conducted as part of the work under the Agreement on the provision of a grant from the federal budget for the implementation of major scientific projects in priority areas of scientific and technological development No. 075-15-2024-527 dated April 23, 2024.

REFERENCES

1. *Rahmilevich, E. G.* Razrabotka instrumentov organizacii integrirovannyh proizvodstvennyh struktur s uchetom konstruktorsko-tekhnologicheskikh ogranichenij: dis. kand. tekhn. nauk / E. G. Rahmilevich. – M., 2023. – 135 s.
2. *Mazurkevich, M.A.* Obosnovanie optimal'nyh strategij remonta i tekhnicheskogo obsluzhivaniya lesnyh mashin na osnove veroyatnostnyh modelej: dis. ... d-ra tekhn. nauk / M.A. Mazurkevich. – SPb, 1998. – 332 s.
3. *Gumerov, M.F.* Fenomenologicheskaya model' problemnoj oblasti prinyatiya resheniya v organizacionnom upravlenii / M.F. Gumerov // Innovacii i investicii. – 2017. – №1. – S. 119–124.
4. *Ragutkin, A. V.* Metodologiya issledovaniya svyazej modelej cifrovyyh mashinostroitel'nyh proizvodstv: dis. d-ra tekhn. nauk / A. V. Ragutkin. – M., MGTU im. N.E.Baumana, – 2023. – 317 s.
5. *Hitryh, D.P.* Cifrovoy dvojn timer: koncepciya, urovni, svyaz' s Internetom veshchej i rol' chislennogo i sistemnogo modelirovaniya / D.P. Hitryh // SAPR i grafika. – 2020. – № 7(285). – S. 8-12.
6. *Clre A.T. et al.* Additive Manufacturing for the Aerospace Industry / Ed. By F. Fores and R. Boyer. – Cambridge: Elsevier, 2019. 465 p.
7. *Shvedenko, V.N.* Primenenie koncepcii cifrovyyh dvojn timerov na etapah zhiznennogo cikla proizvodstvennyh sistem / V.N. Shvedenko, A.E. Mozohin. // Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki. – 2020. – T. 20. – № 6. – S. 815-827.
8. *Nikishechkin, P.A.* Razrabotka tipovyh arhitektur cifrovyyh dvojn timerov proizvodstvenno-logisticheskikh sistem mashinostroitel'nyh predpriyatij na raznyh stadiyah ih zhiznennogo cikla / P.A. Nikishechkin, V.A. Dolgov, S.N. Grigor'ev // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroyeniye. – 2023. – № 5(758). – S. 37–48.
9. *Rojek I., Mikołajewski D., Dostatni E.* Digital twins in product lifecycle for sustainability in manufacturing and maintenance // Appl. Sci, 2021. Pp.11–31.
10. *Olejn timer, A. V.* Statisticheskie raspredeleniya otkazov, generiruemye kinetikoj nakopleniya povrezhdenij v materiale detalej / A. V. Olejn timer, E. A. Lukashev, S. P. Posepenin // Tekhnologiya mashinostroyeniya. – 2009. – № 10. – S. 29-33.
11. *Chigirinskij, Yu.L.* Cifrovizaciya mashinostroitel'nogo proizvodstva: tekhnologicheskaya podgotovka, proizvodstvo, proslezhivaniye / Yu.L. Chigirinskij, D.V. Krajnev, E.M. Frolov // Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyenii. – 2022. – № 8. – S. 39.
12. *Ruseckij, A.M.* Teoreticheskie osnovy proektirovaniya tekhnologicheskikh kompleksov [pod obshch. red. A.M. Ruseckogo] / A.M. Ruseckij i dr. – Minsk: Belarus. Navuka, 2012. – 239 s.
13. *Ruseckij, A.M.* Konstruirovaniye i osnashcheniye tekhnologicheskikh kompleksov [pod obshch. red. A.M. Ruseckogo] / A.M. Ruseckij i dr. – Minsk: Belarus. navuka, 2014. – 316 s.
14. *Kolesov, I.M.* Osnovy tekhnologii mashinostroyeniya / I.M. Kolesov. – M.: Vysshaya shkola, 1999. 591 s.
15. *Poserenin, S. P.* Teoreticheskie osnovy strategij tekhnicheskogo obsluzhivaniya mashin i tekhnologicheskogo oborudovaniya: dis. d-ra tekhn. nauk / S. P. Poserenin. – M., 2005. – 381 s.

Elena Postnikova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economics and Production Organization. E-mail: postnikova.el@yandex.ru

Alexander Ragutkin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Industrial Logistics.

E-mail: ragutkinav@yandex.ru

Mikhail Sidorov, Doctor of Technical Sciences, Deputy Head of the Mobile Solutions Department of the Institute of Mobile Communications, Russian Technical University MIREA. E-mail: m.sidorov60@mail.ru

Mikhail Stavrovsky, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Industrial Logistics.

E-mail: stavrov@list.ru

Svetlana Alexandrova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Engineer of the IT Solutions Development Department of the RTU MIREA, dozent MAI. E-mail: vasil-s@yandex.ru