УДК: 531.8

МЕТОД ГАРАНТИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ЧАСТЕЙ КОНСТРУКЦИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА РАННИХ ЭТАПАХ РАЗРАБОТКИ

THE METHOD OF GUARANTEED ESTIMATION OF RELIABILITY OF MECHANICAL PARTS OF TECHNICAL SYSTEMS DESIGS AT EARLY STAGES OF DEVELOPMENT

Д-р техн. наук В.С. Малиновский, П.П. Белоцерковский

DPhil V.S. Malinovsky, P.P. Belotserkovskii

Михайловская военная артиллерийская академия

Статья посвящена разработке метода гарантированной оценки надежности механических частей конструкций технических систем на ранних этапах разработки. Основные отличия разработанного алгоритма от результатов предыдущих исследований заключаются в том, что он отражает новый подход к оценке надежности, базирующейся на использовании экстремальных распределений экстремальных случайных величин. Это позволяет на основе сравнительной оценки вероятности безотказной работы с использованием разнообразных информационных ситуаций претендовать на метод гарантированной оценки надежности механических частей конструкций.
Ключевые слова: надёжность механических частей конструкций, вероятность безотказной работы, экстремальное распределение, распределение экстремальных случайных величин, плотность распределения, функция распределения.

The article is devoted to the development of a method for guaranteed estimation of the reliability of mechanical parts of technical systems structures at the early stages of development. The main difference of the developed algorithm from the results of previous studies is that it reflects a new approach to reliability estimation based on the use of extreme distributions of extreme random variables. This allows to claim a method for a guaranteed reliability estimation of mechanical parts of structures on the basis of a comparative estimation of the probability of failure-free operation using a variety of information situations.
Keywords: reliability of mechanical parts of structures, probability of failure-free operation, extreme spreading, distribution of extreme random variables, distribution density, distribution function.

На ранних этапах разработки образцов ракетно-артиллерийского вооружения (РАВ) проводятся работы, соответствующие первой стадии жизненного цикла: исследование и обоснование разработки [5]. Именно на этом этапе обосновываются требования к материалам разрабатываемых механических частей конструкций (МЧК), конструктивным и технологическим параметрам.

Постоянный рост требований, предъявляемых, в первую очередь, к характеристикам производительности технических систем, обусловливает значительное возрастание нагрузок на МЧК перспективных образцов [2]. В этих условиях повышенное внимание должно уделяться вопросам обеспечения заданного уровня надёжности МЧК за счёт совершенствования методов оценки их надёжности, особенно на ранних этапах разработки технических систем. При этом должно быть обеспечено, с одной стороны, соответствие предлагаемых методов оценки надёжности МЧК характеру возрастающих нагрузок, с другой — возможностям совершенствования МЧК за счёт создания новых материалов, методов их упрочнения, рациональных конструктивных схем.

Основной отличительной особенностью ранних этапов разработки образцов РАВ является то, что они характеризуются высшей степенью неопределённости исходных данных о несущей способности и действующей нагрузке МЧК технических систем, что не позволяет достаточно точно оценить уровень безотказности МЧК [4]. Ранее рассматривался новый подход к оценке вероятности безотказной работы (ВБР) — одного из основных показателей надежности МЧК. Он базируется на использовании известных распределений экстремальных случайных величин (СВ) [1, 2]. При этом обосновано [1], что с целью снижения риска заказчика несущую способность МЧК целесообразно оценивать с помощью распределения минимальных СВ, действующую на конструкцию нагрузку — на основе распределения максимальных СВ.

Эффективность подхода обеспечивается тем, что разработчик (заказчик) искусственно ставит себя в наиболее неблагоприятную ситуацию: при расчёте ВБР использует максимально возможную действующую нагрузку *H* и минимально возможную несущую способность *R*. Обеспечение гарантированной оценки ВБР в этом случае достигается применением специфических распределений максимальных (*H*) и минимальных (*R*) СВ [1, 2].

Основные отличия разработанного алгоритма от результатов предыдущих исследований [1] заключаются в том, что он отражает новый подход к оценке, базирующейся на использовании экстремальных распределений экстремальных случайных величин [7], что позволяет на основе сравнительной оценки ВБР с использованием разнообразных информационных ситуаций претендовать на метод гарантированной оценки надежности МЧК.

Как известно, функция работоспособности МЧК оценивается с помощью выражения для ВБР в виде [2]

$$P = \text{Вер}\left(R - H > 0\right). \quad (1)$$

При известных законах распределенияЗР несущей способности и действующей нагрузки зависимость (1) преобразуется к виду [3]

$$P = \int_0^\infty F_H\left(x\right) f_R\left(x\right) dx \quad (2)$$

или

$$P = \int_0^\infty F_H\left(x\right) \frac{\partial F_R\left(x\right)}{\partial x} dx, \quad (3)$$

где $F_H\left(x\right)$ — функция распределения нагрузки;

$F_R\left(x\right)$ — функция распределения прочности;

$f_R\left(x\right)$ — плотность распределения прочности.

С учётом указанных зависимостей (1)–(2) задачу разработки математической модели расчёта безотказности МЧК $P = \text{Вер}\left(R > H\right)$ можно сформулировать следующим образом [8, 9].

1. Известны уравнения, из которых можно определить функции гипернормального (экстремального) распределения действующей нагрузки $F_{n_1}\left(x\right)$ и несущей способности $Q_{n_2}\left(x\right)$

$$n_1\sigma_1^2\left[F_{n_1}\left(x\right)\right]^{\frac{n_1-1}{n_1}} \ddot{F}_{n_1}\left(x\right) + \left(x - m_1\right)\dot{F}_{n_1}\left(x\right) = 0, \quad (4)$$

$$\begin{gathered} n_2\sigma_2^2\left[1 - Q_{n_2}\left(x\right)\right]^{\frac{n_2-1}{n_2}} \ddot{Q}_{n_2}\left(x\right) + \\ +\left(x - m_2\right)\dot{Q}_{n_2}\left(x\right) = 0, \end{gathered} \quad (5)$$

с учётом краевых условий

$$F_{n_1}\left(-\infty\right) = 0\,,\; F_{n_1}\left(+\infty\right) = 1$$

и $\quad (6)$

$$Q_{n_2}\left(-\infty\right) = 0\,,\; Q_{n_2}\left(+\infty\right) = 1,$$

где $m_1\left(\sigma_1\right)$ — оценка математического ожидания (МОЖ) (среднеквадратического отклонения (СКО)) действующей нагрузки;

n_1 — число опытов, по которым определялись m_1 и σ_1;

$m_2\left(\sigma_2\right)$ — оценка МОЖ (СКО) несущей способности;

n_2 — число опытов, по которым определялись m_2 и σ_2.

2. Знание закона распределения нагрузки и несущей способности позволяет определить ВБР (1)

$$P = \text{Вер}\left(y > x\right) = \text{Вер}\left(\Delta = y - x > 0\right) \quad (7)$$

в виде [10]

$$P = \int_0^\infty F_{n_1}\left(y\right) q_{n_2}\left(y\right) dy \quad (8)$$

или

$$P = \int_0^\infty \left[1 - Q_{n_2}\left(x\right)\right] f_{n_1}\left(x\right) dx, \quad (9)$$

где $F_{n_1}\left(y\right), f_{n_1}\left(x\right)$ — функция и плотность распределения нагрузки;

$Q_{n_2}\left(x\right), q_{n_2}\left(y\right)$ — функция и плотность распределения несущей способности.

Укажем последовательность нахождения ВБР (8) на основе уравнений (4)–(5), а также условий (6).

1. Проведение $m_1\left(\sigma_1\right)$ испытаний и нахождение значений $m_1\left(\sigma_1\right)$ и $m_2\left(\sigma_2\right)$.

2. Решение краевых задач (4) – (5) с учётом условий (6) и нахождение зависимостей $F_{n_1}\left(y\right)$ и $Q_{n_2}\left(x\right)$. Так как результаты решения будут представлены графически или в виде набора точек, возникает потребность аналитического представления найденных зависимостей.

3. Аппроксимация зависимостей $Q_{n_2}\left(x\right)$ и $Q_{n_2}\left(x\right)$.

4. Нахождение ВБР (8).

Для использования полученных результатов в задаче гарантированной оценки ВБР по выражению (8) осуществлена аппроксимация (с использованием пакета MathCAD) данных $F_n\left(x\right)$ и $Q_n\left(x\right)$ следующими функциями, которые также удовлетворяют начальным условиям (6):

$$F_n\left(x\right) = \frac{1}{1 - e^{Ax^3 + Bx^2 + Cx + D}}, \quad (10)$$

$$Q_n\left(x\right) = \frac{1}{1 - e^{Ax^3 + Bx^2 + Cx + D}}. \quad (11)$$

Коэффициенты уравнений (10) и (11) определялись на основе решения оптимизационной задачи, которая, в частности, для функции максимальных значений имеет вид

$$\sum_{i=1}^{N} \left[F_{\text{пр}}\left(x_i\right) - F_n\left(x_i\right)\right]^2 \to \min, \quad (12)$$

где N — количество точек аппроксимации.

$F_{\text{пр}}\left(x_i\right)$ — значения функции, полученные в результате решения задачи (4) приближенными методами.

Подставляя зависимости для функции распределения величины сопротивляемости материала (11), функции распределения нагрузки (10) в формулу (3), находим ВБР

$$P_n = \int_0^\infty F_n\left(x\right) \frac{\partial Q_n\left(x\right)}{\partial x} dx. \quad (13)$$

Модель оценки ВБР на основе экстремального распределения экстремальных случайных величин назовём моделью № 1.

Результаты решения аналогичной задачи для нормального ЗР несущей способности и действующей нагрузки совпадают, что подтверждает соответствующие теоретические положения. С увеличением коэффициента запаса прочности η наблюдается рост ВБР. Кривые 2, 3, 5, 7 и 10, построенные соответственно для *n* = 2, 3, 5, 7 и 10, свидетельствуют об уменьшении уровня надежности при использовании гипернормального закона распределения несущей способности и действующей нагрузки, рис. 1.

Данное обстоятельство свидетельствует о том, что использование модели оценки надежности МЧК, основанной на экстремальном распределении экстремальных случайных величин, дает более «осторожные» оценки ВБР, что на практике приведет к необходимости дальнейшего совершенствования конструктивных характеристик с целью обеспечения заданного уровня безотказности конструкции.

В табл. 1 представлены результаты исследования зависимости ВБР от коэффициента запаса прочности для нормального ЗР (*PN*) и гипернормального ЗР (при *n* = 2, 3, 5, 7 и 10 соответственно *P2*, *P3*, *P5*, *P7* и *P10*).

На рис. 1 приведены зависимости ВБР от коэффициента запаса прочности η.

В качестве альтернативы гипернормальному ЗР выберем ЗР экстремальных СВ типа 1 [2], обеспечивший наилучшую гарантию в исследованиях, приведенных в [11].

Таблица 1

Результаты исследования зависимости $P = f(\eta)$

η	Значения вероятностей					
	PN	*P2*	*P3*	*P5*	*P7*	*P10*
1,1	0,632	0,58245	0,55946	0,5281	0,508	0,49313
1,2	0,739	0,69982	0,67353	0,63833	0,61236	0,58368
1,4	0,877	0,85165	0,83001	0,79547	0,76469	0,72216
1,6	0,944	0,92322	0,9102	0,89049	0,86411	0,81882
1,8	0,9740	0,95604	0,94664	0,93917	0,92286	0,88374
2	0,9873	0,9729	0,96455	0,96128	0,9526	0,92312
2,3	0,9952	0,98579	0,97836	0,97536	0,97131	0,95241
2,6	0,9979	0,99209	0,98574	0,98186	0,97905	0,96536
2,9	0,9990	0,99538	0,99015	0,98566	0,98317	0,9721
3,2	0,9995	0,99718	0,99296	0,98819	0,98576	0,97617
3,8	0,9998	0,99883	0,99608	0,99138	0,98888	0,98087
4,8	0,99995	0,99964	0,99821	0,99418	0,99163	0,98478

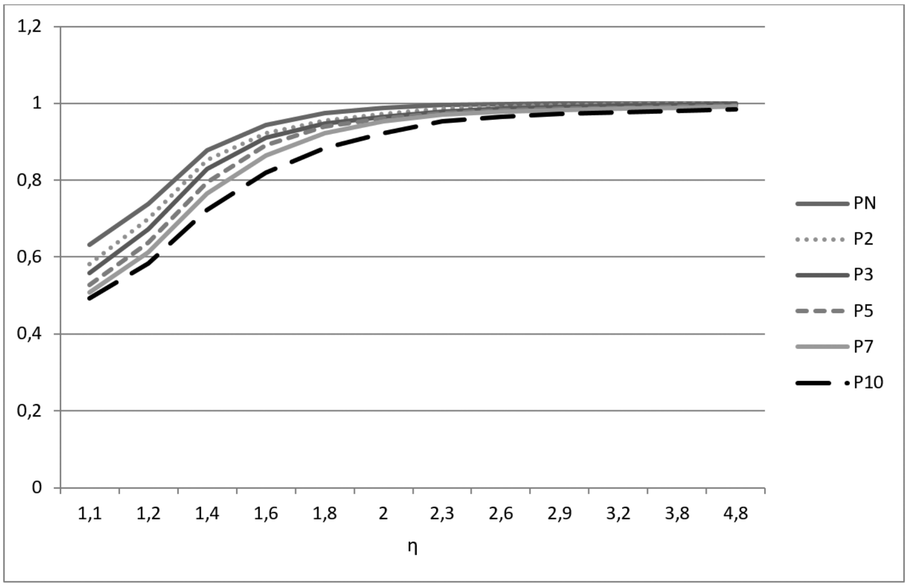

Рис. 1. Зависимость $P = f(\eta)$

При этом, в частности, для СВ нагрузки *H* целесообразно использование распределения наибольших значений типа 1, для СВ несущей способности *R* — распределения наименьших значений типа 1 [2].

Для получения искомой математической модели воспользуемся выражениями для плотности распределения указанных экстремальных СВ.

В частности, плотность распределения несущей способности имеет вид [2]

$$f_R(x) = \exp\left[-\exp\left(\frac{x - m_R}{S_R}\right)\right], \qquad (14)$$

где m_R, S_R — параметры ЗР наименьших значений типа 1.

Аналогична по структуре зависимость для распределения нагрузки [2]

$$f_H(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x - m_H}{S_H}\right)\right]\right\}, \qquad (15)$$

где m_H, S_H — параметры ЗР наибольших значений типа 1.

Выражение для ВБР применительно к модели № 2 имеет вид

$$P_1 = \\ = \int_0^{\infty} e^{-y} \exp\left\{ -\exp\left[\frac{S_H}{S_R} \ln y + \left(\frac{m_H - m_R}{S_R} \right) \right] \right\} dy. \quad (16)$$

Таким образом, получены необходимые выражения для каждой расчётной модели, результаты применения которых необходимо сравнить с результатами расчётов по моделям, использующим нормальный закон распределения.

Нормальный ЗР случайных величин R и H чаще всего используется в расчётах безотказности. Для этой информационной ситуации выражение (2) имеет вид [3]

$$P_4 = F\left(\frac{m_R - m_H}{\sqrt{S_R^2 + S_H^2}} \right), \quad (17)$$

где F — функция нормированного нормального распределения;

$m_R\left(S_R\right)$ — математическое ожидание (среднеквадратическое отклонение) величины R;

$m_H\left(S_H\right)$ — математическое ожидание (среднеквадратическое отклонение) величины H.

Для проверки эффективности предложенной процедуры расчёта ВБР составлена программа в среде MathCAD и проведено сравнение результатов расчётов показателя надежности P_4 по зависимости (17) и показателей $P_1 - P_n$, соответственно, по зависимостям (13) и (16).

В табл. 2 и 3 представлены результаты исследования зависимости ВБР от коэффициента запаса прочности для модели № 1 (при n = 2, 3, 5, 7 и 10) и модели № 2 (Pext1 — ВБР закона распределения экстремальных СВ типа 1), при двух значениях коэффициентов вариации

Таблица 2

Результаты исследования зависимости $P = f(\eta)$ при $v = 0{,}2$

η	*PN*	*P2*	*P3*	*P5*	*P7*	*P10*	*Pext1*
1,1	0,632	0,58245	0,55946	0,5281	0,508	0,49313	0,610
1,2	0,739	0,69982	0,67353	0,63833	0,61236	0,58368	0,6985
1,4	0,877	0,85165	0,83001	0,79547	0,76469	0,72216	0,8133
1,6	0,944	0,92322	0,9102	0,89049	0,86411	0,81882	0,8748
1,8	0,9740	0,95604	0,94664	0,93917	0,92286	0,88374	0,9095
2	0,9873	0,9729	0,96455	0,96128	0,9526	0,92312	0,9305
2,3	0,9952	0,98579	0,97836	0,97536	0,97131	0,95241	0,9491
2,6	0,9979	0,99209	0,98574	0,98186	0,97905	0,96536	0,960
2,9	0,9990	0,99538	0,99015	0,98566	0,98317	0,9721	0,96695
3,2	0,9995	0,99718	0,99296	0,98819	0,98576	0,97617	0,9717
3,8	0,9998	0,99883	0,99608	0,99138	0,98888	0,98087	0,9776
4,8	0,99995	0,99964	0,99821	0,99418	0,99163	0,98478	0,9827

Таблица 3

Результаты исследования зависимости $P = f(\eta)$ при $v = 0{,}3$

η	*PN*	*P2*	*P3*	*P5*	*P7*	*P10*	*Pext1*
1,1	0,5887086	0,53853	0,51822	0,48957	0,47277	0,46378	0,57205813
1,2	0,66523371	0,62586	0,6034	0,57317	0,55196	0,53197	0,63347077
1,4	0,78082552	0,75776	0,73607	0,70454	0,67823	0,64405	0,7245111
1,6	0,85542722	0,84045	0,82476	0,79876	0,7713	0,72996	0,78345216
1,8	0,90234813	0,88906	0,87913	0,86383	0,83957	0,79605	0,82235402
2	0,93198144	0,91788	0,91106	0,90534	0,88702	0,84565	0,84905637
2,3	0,95798914	0,94266	0,93711	0,93864	0,92856	0,89472	0,87570484
2,6	0,97222537	0,95689	0,95118	0,95452	0,94908	0,9226	0,89306995
2,9	0,98051993	0,96598	0,9599	0,96308	0,95985	0,93853	0,90510913
3,2	0,98564151	0,97222	0,96583	0,96832	0,96615	0,94817	0,91386938
3,8	0,99123196	0,98006	0,97342	0,97441	0,97304	0,9588	0,92565381
4,8	0,9951087	0,98676	0,98023	0,97946	0,97834	0,96685	0,93676709

$$\nu = \nu_H = \nu_R = \frac{S_R}{m_R} = \frac{S_H}{m_H} = 0,2;\, 0,3.$$

На рис. 2, 3 и 4 представлена сравнительная оценка зависимости ВБР от коэффициента запаса прочности модели № 1 (при n = 2, 5, и 10) и модели № 2 для $\nu = 0,2$.

Решение задачи оценки надежности, при расчёте ВБР, используя максимально возможную действующую нагрузку H и минимально возможную несущую способность R, при наличие большого запаса прочности η теряет смысл. Поэтому целесообразно рассматривать выходные данные для η не более 2–2,2.

На рис. 2 преимущество уровня гарантии для $\eta > 1,3$ можно отдать ЗР экстремальных СВ нежели экстремальному закону распределения экстремальных случайных величин. Это обусловлено тем, что используется очень мало информации, т.е. ВБР построено по результатам

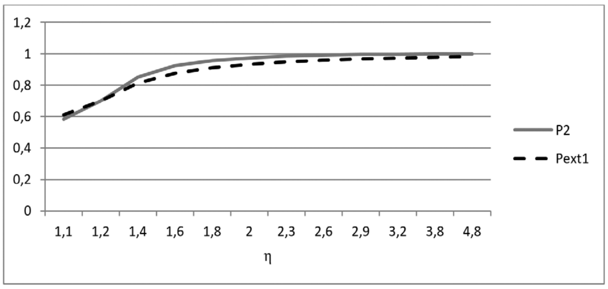

Рис. 2. Зависимость $P = f(\eta)$

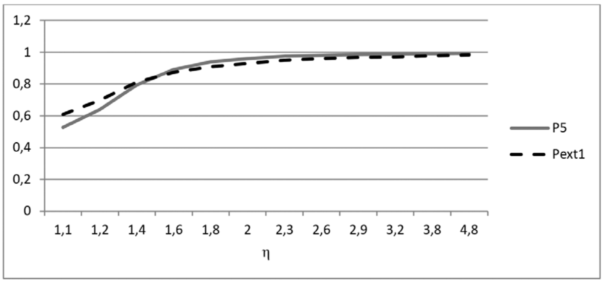

Рис. 3. Зависимость $P = f(\eta)$

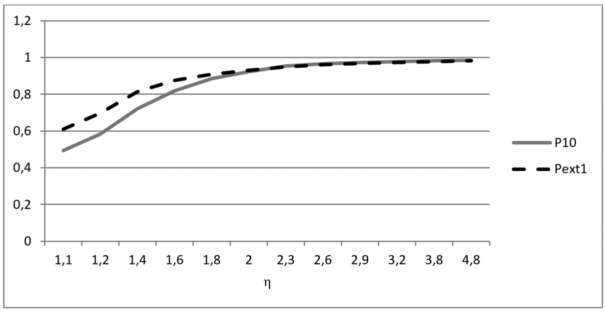

Рис. 4. Зависимость $P = f(\eta)$

двух испытаний. На рис. 3 и 4 можно уже отдать предпочтение экстремальному закону распределения экстремальных случайных величин.

На рис. 5, 6 приведены зависимости относительных величин $\Delta P_i = \frac{P_4 - P_i}{P_4}$, $i = 1; n$ от коэффициента запаса прочности $\eta = \frac{m_R}{m_H}$ при двух значениях коэффициентов вариации $\nu = \nu_H = \nu_R = \frac{S_R}{m_R} = \frac{S_H}{m_H} = 0,2;\, 0,3.$

Как следует из рис. 5, 6 величина $\Delta P \geq 0$ для всех трёх анализируемых моделей. Это означает, что исследованные ЗР дают более «осторожные» результаты по сравнению с нормальным ЗР, что обеспечивает гарантированную оценку надежности, так как она произведена в наихудших для исследователя (разработчика) условиях.

Выводы

Применение гипернормального ЗР, основанного на использовании коэффициентов аппроксимации позволяет «уточнить» результат оценки ВБР до 18 % (при $n = 10$). Неиспользование гипернормального распределения завышает оценку ВБР, что приведёт к прекращению работ по дальнейшему совершенствованию конструктивных параметров МЧК. Таким образом, применение разработанной в статье математической модели оценки безотказности МЧК образцов РАВ, основанной на использовании экстремального метода определения ЗР экстремальных случайных величин, приведёт в практике работы организаций — разработчиков к увеличению запаса прочности при обеспечении безотказности конструкций.

Необходимо отметить, что наиболее существенные отличия в оценках ВБР по сравнению с нормальным ЗР несущей способности и действующей нагрузки наблюдаются при коэффициенте запаса прочности $\eta \leq 2$. При этом экстремальный закон распределения экстремальных случайных величин (модель 1) даёт наиболее оптимистические результаты с точки зрения итогового результата расчета ВБР. Характер зависимостей для модели 1 свидетельствует о том, что с увеличением коэффициента запаса прочности η «выигрыш» от применения аппарата оценки надежности, основанного на экстремальном ЗР экстремальных случайных величин увеличи-

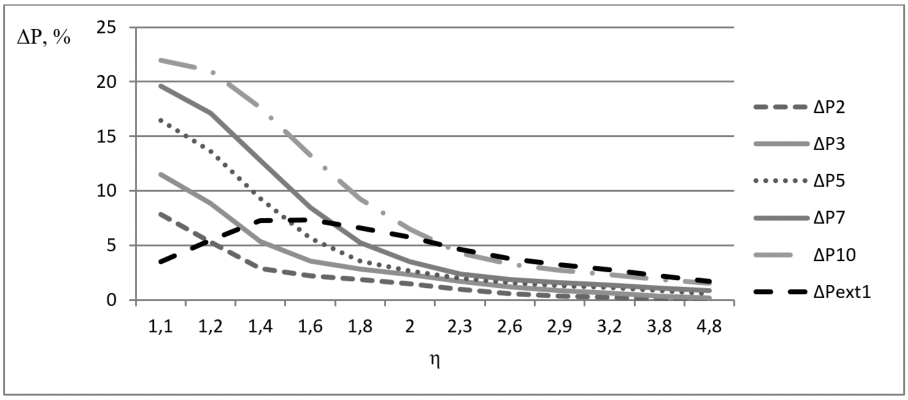

Рис. 5. Зависимость $\Delta P = f(\eta)$ *при* $v_H = v_R = 0{,}2$

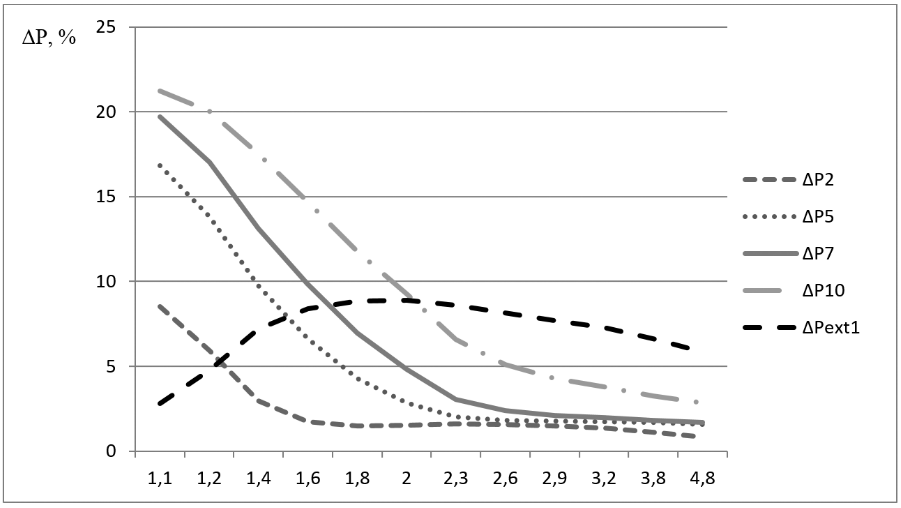

Рис. 6. Зависимость $\Delta P = f(\eta)$ *при* $v_H = v_R = 0{,}3$

вается. При наличии большого запаса прочности «выигрыш» от применения предлагаемого подхода в случае небольшого разброса параметров несущей способности и действующей нагрузки становится незначительным.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности и целесообразности использования нетрадиционного подхода к решению задачи оценки надежности МЧК технических систем, основанного на применении экстремального закона распределения экстремальных СВ. Его использование, как показали результаты исследований, позволяет получать гарантированные оценки в условиях неопределённости исходных данных, что характерно для ранних этапов проектирования. Данное обстоятельство повышает уровень объективности принимаемых конструкторских и технологических решений по доработке МЧК образцов РАВ.

Литература

1. Малиновский В.С., Калинин В.Ю., Жаркова Т.В., Белоцерковский П.П. Гарантированная оценка безотказности механических частей конструкций на ранних этапах проектирования // Известия РАРАН № 1 (96). — М.: 2017. С. 66–63.

2. Вященко Ю.Л., Казаков С.Н., Любимов И.В. Оценка надёжности артиллерийских комплексов на этапах эскизного и технического проектирования. БГТУ. — СПб: 2011. 112 с.

3. Переверзев Е.С. Надёжность и испытания технических систем. — Киев. Наукова думка. 1990. 328 с.

4. Калинин В.Ю., Белоцерковский П.П., и др. Актуальные вопросы оценки надёжности механических частей конструкций на ранних этапах проектирования образцов РАВ // Вопро-

сы оборонной техники. Серия 16. № 1–2. — М.: 2017. С. 94–99.

5. Война и мир в терминах и определениях. Военно-технический словарь. Под общей ред. д.т.н. Д.О. Рогозина. — М.: «Вече». 2016. 272 с.

6. Касьянов В.Е., Роговенко Т.Н., Топилин И.В. Определение минимальных значений прочности деталей машин // Надёжность и контроль качества. № 12. 2001. С. 38–41.

7. Мартыщенко Л.А. Принцип максимума неопределенности и его приложения. МО СССР. 1984. 216 с.

8. Малиновский В.С., Жаркова Т.В. Надёжность механических частей конструкции образцов вооружения. Монография. — СПб: МВАА. 2011. 96 с.

9. Жаркова Т.В., Мялькин В.А. и др. Отчёт о НИР № 0–11–15/1 «Совершенствование методов оценки и обеспечения надёжности механических частей конструкции РАВ». — СПб: МВАА. 2011. 158 с.

10. Надёжность и эффективность в технике: Справочник. — М.: Машиностроение. 1989. Т. 6: Экспериментальная отработка и испытания / Под общ. Ред. Р.С. Судакова, О.И. Тёскина. 376 с.

11. Бебешев В.Т., Калинин В.Ю., Белоцерковский П.П., и др. Обоснование метода гарантированной оценки безотказности механических частей конструкций технических систем на ранних этапах разработки. МСНТ. Итоги диссертационных исследований. Том 2. — М.: РАН. 2018. С. 54–60.

References

1. Malinovsky V.S., Kalinin V.Yu., Zharkova T.V., Belotserkovsky P.P. Garanted assessment of the reliability of mechanical parts of structures on the early eta-eps of design. // Izvestiya of RARAN. № 1 (96). — M.: 2017. P. 66–63.

2. Vyashchenko Yu.L., Kazakov S.N., Lyubimov I.V. Assessment of the reliability of artillery complexes at the stages of preliminary and technical design. BSTU. — St. Petersburg. 2011. 112 p.

3. Perverzev E.S. Reliability and testing of technical systems. — Kiev. Naukova dumka. 1990. 328 p.

4. Kalinin V.Yu., Belotserkovsky P.P., et al. Virtual issues of assessing the reliability of mechanical parts of structures at the early stages of designing RAV samples // Military Enginery. Counter-terrorism technical devices. Issue 16. № 1–2. — M.: 2017. P. 94–99.

5. War and peace in terms and definitions. Military-technical dictionary. Under the general editorial board D.O. Rogozin. — M.: «Veche». 2016. 272 p.

6. Kasyanov V.E., Rogovenko T.N., Topilin I.V. Determination of minimum values of strength of machine parts // Reliability and quality control. № 12. 2001. P. 38–41.

7. Martyshchenko L.A. Principle of maximum uncertainty and its annex. USSR ministry of defense. 1984. 216 p.

8. Malinovsky V.S., Zharkova T.V. Reliability of mechanical parts of the design of weapons models. Monograph. — St. Petersburg: MVAA. 2011. 96 p.

9. Zharkova T.V., Myalkin V.A., et al. Report on research work № 0–11–15/1 «Improvement of methods for evaluating and ensuring the reliability of mechanical parts of the RAV design». — St. Petersburg: MVAA. 2011. 158 p.

10. Reliability and efficiency in technology: Handbook. — M.: Mechanical Engineering. 1989. T. 6: Experimental development and testing / Under Society. Ed. R.S. Sudakova, O.I. Teskina. 376 p.

11. Bebeshev V.T., Kalinin V.Yu., Belotserkovsky P.P., et al. Substantiation of the method of guaranteed reliability assessment of mechanical parts of technical systems structures at early stages of development. MCHT. Results of dissertation research. Volume 2. — M.: RAS. 2018. P. 54–60.