УДК 629.144.2.004.5

КОНСТРУКТИВНІ МЕТОДИ ЗАБЕСПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Д. П. Домущі, канд. техн. наук
Одеський державний аграрний університет

Представлена характеристика параметричної моделі "міцність-навантаження" при виборі статистичних запасів міцності різних конструкцій складних технічних систем, які можливо розповсюджувати на різні енергетичні засоби технологічних комплексів для підтримання їх в надійному стані.

Ключові слова: надійність, складна технічна система, міцність, навантаження,безвідмовність, імовірність.

Вступ. Складність технічних засобів і підвищення швидкодії технологічних машин, які використовуються в сільськогосподарському виробництві, ставлять перед інженерами нові науково-технічні завдання. Серед них істотне місце займають питання, пов'язані з вивченням статистичних запасів міцності різних конструкцій складних технічних систем (СТС) - наприклад, енергетичних засобів технологічних збиральних комплексів для зернових та інших культур. Надійність – один з найбільш важливих, визначальних функціональних показників будь яких технічних засобів і систем. Від надійності залежить безпека, економічність, ресурс роботи, конкурентоспроможність. Ведучою концепцією, на основі якої вирішується задача підвищення надійності техніки на сучасному етапі її розвитку, є системність. Системи забезпечення надійності, складають важливу частину системи забезпечення якості, захоплюють весь цикл виробу від розробки до експлуатації. При цьому методи забезпечення необхідного рівня надійності специфічні для кожного етапу життєвого циклу.

Проблема. Вибір статистичних запасів міцності різних конструкцій вузлів та агрегатів енергетичних засобів засноване на використанні параметричної моделі "міцність-навантаження". Методи даної групи є найстарішими методами теорії надійності. В основу розрахунку надійності з використанням даної моделі лежить те, що кожний елемент конструкції має відповідну міцність по відношенню к діючим на нього навантаженням. При цьому під навантаженням розуміють любі фактори, які впливають на ефективність функціонування виробу, такі як: механічні дії, температура, вібрація, коливання напруги та ін., а міцність характеризує можливість виробу зберігати свої властивості під дією цих навантажень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основою для рішення задач по забезпеченню надійності з'явилася теорія ймовірностей та математичної статистики. На їх базі вже в 30-е роки XX століття встановлена статистична природа коефіцієнтів запасу міцності та сформульовано поняття відмови, як перевищення навантаження над міцністю [1]. Перший етап в рішенні проблем надійності був пов'язаний з виявленням причин відмов обладнання машин: деталей, вузлів, агрегатів [2]. Особливе бурний розвиток теорії надійності навчалося з інтенсифікації електроніки і автоматики, авіації і ракетно-технічної техніки [3]. Перед розробниками виникли питання: які основні причини ненадійності елементів і які шляхи їх усунення? Існують лі способи створення надійних систем із ненадійних елементів і можливо лі прогнозувати надійність проектованої системи? Відповідь на поставлені питання - вивчення впливу на відмови експлуатаційних факторів: середи та умов експлуатації – вібрацій, навантаження, температури та ін. [4]. В таблиці 1 приведені розрахункові формули ймовірності безвідмовної роботи для різних законів розподілення міцності і навантаження [5].

Мета досліджень. Вихідними даними при розрахунках безвідмовності є: $f_s(\bar{S})$, $f_s(\bar{s})$ - щільності ймовірності розподілу відповідно міцності та навантаження; $\bar{S}, \bar{s}$ - вектори параметрів, які характеризують міцність та відповідно навантаження.

Безвідмовна робота виробу визначається умовою $\bar{S} \succ \bar{s}$ – або $\bar{S} - \bar{s} \succ 0$, а загальне поняття ймовірності безвідмовної роботи має вигляд:

$$R = F\{\bar{S} \succ \bar{s}\} = F\{\bar{S} - \bar{s} \succ 0\} = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\bar{s}}(\bar{S}) \left[\int_{\bar{s}}^{\infty} f_{\bar{s}}(\bar{S}) dS \right] d\bar{s} \qquad (1)$$

В одномірному вигляді маємо вираз:

$$R = F\{S \succ s\} = F\{S - s \succ 0\} = \int_{-\infty}^{\infty} f_s(S) \left[\int_{s}^{\infty} f_s(S) dS \right] ds \qquad (2)$$

Результати досліджень. На рисунку 1 приведена блок-схема розрахунку безвідмовності даним методом. Як слідує з приведених розрахункових відношень та рисунку 1 метод розрахунку безвідмовності з використанням моделі "міцність-навантаження" базується на великому об'єму статистичних даних.

Таблиця 1. **Розрахункові формули ймовірності безвідмовної роботи для різних законів розподілення міцності і навантаження.**

Закон розподілення міцності	Закон розподілення наванта-ження	Вираз ймовірності безвідмовної роботи
1	2	3
Нормальне розподілення $f_S(S)=\frac{1}{\sigma_S\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{S-\mu_S}{\sigma_S}\right)^2\right\}$	Нормальне розподілення $f_s(s)=\frac{1}{\sigma_s\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{s-\mu_s}{\sigma_s}\right)^2\right\}$	$R=1-\phi\left(-\frac{\mu_S+\mu_s}{\sqrt{\sigma_S^2+\sigma_s^2}}\right)$, де ф – інтегральна функція стандарт-ного нормального розподілення
Експоненціальне розподілення $f_S(S)=\lambda_S e^{-\lambda_S S}$	Експоненціальне розподілення $f_s(s)=\lambda_s e^{-\lambda_s s}$	$R=\frac{\lambda_s}{\lambda_S+\lambda_s}$
Нормальне розподілення $f_S(S)=\frac{1}{\sigma_S\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{s-\mu_S}{\sigma_S}\right)^2\right\}$	Експоненціальне розподілення $f_s(s)=\lambda_s e^{-\lambda_s s}$	$R=1-\phi\left(-\frac{\mu_S}{\sigma_S}\right)-\exp\left[-\frac{1}{2}\left(2\mu_S\lambda_s-\lambda_S^2\sigma_S^2\right)\right]\times$ $\times\left[1-\phi\left(\frac{\mu_S-\lambda_s^2\sigma_S^2}{\sigma_S}\right)\right]$
Експоненціальне розподілення $f_S(S)=\lambda_S e^{-\lambda_S S}$	Нормальне розподілення $f_s(s)=\frac{1}{\sigma_s\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{s-\mu_s}{\sigma_s}\right)^2\right\}$	$R=1-\phi\left(-\frac{\mu_s}{\sigma_s}\right)-\exp\left[-\frac{1}{2}\left(2\mu_s\lambda_S-\lambda_S^2\sigma_s^2\right)\right]\times$ $\times\left[1-\phi\left(\frac{\mu_s-\lambda_S^2\sigma_s^2}{\sigma_s}\right)\right]$

1	2	3
Гама-розподілення $f_S(S)=\dfrac{\lambda_S^m}{\Gamma(m)}S^{m-1}e^{-\lambda_S S}$	Гама-розподілення $f_s(s)=\dfrac{\lambda_s^m}{\Gamma(n)}s^{m-1}e^{-\lambda_s s}$	$R=\dfrac{\Gamma(m+n)}{\Gamma(m)\Gamma(n)}B_{r/1+r}(m,n),$ $r=\dfrac{\lambda_s}{\lambda_S};$ $де B_{r/1+r} - неповна B - функція$
Експоненціальне розподілення $f_S(S)=\lambda_S e^{-\lambda_S S}$	Гама-розподілення $f_s(s)=\dfrac{\lambda_s^m}{\Gamma(n)}s^{m-1}e^{-\lambda_s s}$	$R=(\dfrac{\lambda_s}{\lambda_S+\lambda_s})^n$
Гама-розподілення $f_S(S)=\dfrac{\lambda_S^m}{\Gamma(m)}S^{m-1}e^{-\lambda_S S}$	Експоненціальне розподілення $f_s(s)=\lambda_s e^{-\lambda_s s}$	$R=1-(\dfrac{\lambda_s}{\lambda_S+\lambda_s})^m$
Розподілення Вейбула $f_S(S)=\dfrac{\beta}{(\theta-S_0)^\beta}(S-S_0)^{\beta-1}\times$ $\times\exp\left\{-\left(\dfrac{S-S_0}{\theta-S_0}\right)^\beta\right\}$	Нормальне розподілення $f_s(s)=\dfrac{1}{\sigma_s\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{s-\mu_s}{\sigma_s}\right)^2\right\}$	$R=\phi\left(\dfrac{S_0-\mu_s}{\sigma_s}\right)+\dfrac{1}{\sqrt{2\pi}}\left(\dfrac{\theta-S_0}{\sigma_s}\right)\times$ $\times\int_0^\infty exp\left\{-y^\beta-\dfrac{1}{2}\times\right.$ $\left.\times\left[\left(\dfrac{\theta-S_0}{\sigma_s}\right)y+\dfrac{S_0-\mu_s}{\sigma_s}\right]^2\right\}dy$
Розподілення Вейбула $f_S(S)=\dfrac{\beta_S}{\theta_S}\left(\dfrac{S-S_0}{\theta_S}\right)^{\beta_S-1}\times$ $\times\exp\left\{-\left(\dfrac{S-S_0}{\theta_S}\right)^{\beta_S}\right\}$	Розподілення Вейбула $f_S(s)=\dfrac{\beta_s}{\theta_s}\left(\dfrac{s-s_0}{\theta_s}\right)^{\beta_s-1}\times$ $\times\exp\left\{-\left(\dfrac{s-s_0}{\theta_s}\right)^{\beta_s}\right\}$	$R=1-\int_0^\infty e^{-y}exp\times$ $\times\left\{-\left[\dfrac{\theta_S}{\theta_s}y^{1/\beta_S}+\left(\dfrac{S_0-s_0}{\theta_s}\right)\right]^{\beta_s}\right\}dy$

1	2	3
Розподілення Вейбула $f_S(S)=\frac{\beta_S}{\theta_S}\left(\frac{S-S_0}{\theta_S}\right)^{\beta_S-1}\times$ $\times\exp\left\{-\left(\frac{S-S_0}{\theta_S}\right)^{\beta_S}\right\}$	Розподілення найвеликих значень типу II $F_S(s)=1-\exp\left\{-\left(\frac{s-s_0}{\theta_s}\right)^{\beta_s}\right\}$	$R=\int_0^\infty e^{-y}exp\times$ $\times\left\{-\left[\frac{\theta_S}{\theta_s}y^{1/\beta_S}+\left(\frac{S_0-s_0}{\theta_s}\right)\right]^{\beta_s}\right\}dy$
Розподілення найвеликих значень типу I $F(S)=1-\exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{S-S_0}{\theta_S}\right)\right]\right\}$	Розподілення Вейбула $f_S(s)=\frac{\beta_s}{\theta_s}\left(\frac{s-s_0}{\theta_s}\right)^{\beta_s-1}\times$ $\times\exp\left\{-\left(\frac{s-s_0}{\theta_s}\right)^{\beta_s}\right\}$	$R=1-\int_0^\infty exp\times$ $\times\left\{-y+\left[\frac{\theta_S}{\theta_s}\ln y+\left(\frac{S_0-s_0}{\theta_s}\right)\right]^{\beta_s}\right\}dy$
Розподілення Вейбула $f_S(S)=\frac{\beta_S}{\theta_S}\left(\frac{S-S_0}{\theta_S}\right)^{\beta_S-1}\times$ $\times\exp\left\{-\left(\frac{S-S_0}{\theta_S}\right)^{\beta_S}\right\}$	Розподілення найвеликих значень типу I $F(S)=1-\exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{S-S_0}{\theta_S}\right)\right]\right\}$	$R=\int_0^\infty exp\left\{-y-\exp\left[-\frac{\theta_S}{\theta_s}y^{1/\beta_S}+\left(\frac{S_0-s_0}{\theta_s}\right)\right]\right\}dy$
Розподілення найменших значень типу I $F(S)=\exp\left\{-\exp\left(\frac{S-S_0}{\theta_S}\right)\right\}$	Розподілення най великих значень типу I $F(S)=1-\exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{S-S_0}{\theta_S}\right)\right]\right\}$	$R=\int_0^\infty e^{-y}exp\left\{-exp\left[\frac{\theta_s}{\theta_S}\ln y+\left(\frac{s_0-S_0}{\theta_S}\right)\right]\right\}dy$

Рис.1. Блок-схема процедури розрахунку безвідмовності.

Для приближених розрахунків достатньо буває визначити нижню границю ймовірності безвідмовної роботи. На основі використання нерівності Чебишева було отримано вираз такої гарантованої границі [5]:

$$R \geq 1 - \bar{n}^{-2} V_n^2 / \left[\bar{n}^{-2} V_n^2 + (\bar{n} - 1)^2 \right] \qquad (3)$$

де $\bar{n} = M[S/s]$ - математичне очікування коефіцієнту безвідмовності;

$V_n = \sigma_n / \bar{n}$ - коефіцієнт варіації.

В практичних умовах частіше задають середні значення міцності, навантаження та їх дисперсії. В цьому випадку в якості ніжної гарантованої границі можливо рекомендувати вираз:

$$R \geq 1 - \bar{S} / 2\bar{s} \qquad (4)$$

Наприклад, міцність і навантаження описуються експоненціальними розподілами з параметрами λ_S=1 і λ_s=1. Тоді, відповідно формулі з таблиці 2 маємо точний вираз ймовірності безвідмовної роботи R= λ_S/ λ_S+ λ_s=0,5. По формулі (4) отримаємо приблизну оцінку R=1- 0,5 = 0,5. Таким чином, в даному випадку точна та приблизна оцінка співпадають.

В таблиці 2 приведені вирази математичних очікувань і дисперсій деяких типових розподілів.

Таблиця 2. **Математичне очікування і дисперсія типових розподілів.**

Вид розподілу	Математичний опис	Дисперсія
Нормальне	μ	σ^2
Логарифмічне нормальне	$\exp\{\mu + \sigma^2/2\}$	$\exp\{2\mu + \sigma^2/\}(\exp \sigma^2 - 1)$
Експоненціальне	$1/\lambda$	$1/\lambda^2$
Гама-розподіл	m/λ	m/λ^2
Розподіл Вейбула	$S_0 + (\theta - S_0)\Gamma(1/\beta+1)$	$(\theta - S_0)^2\{\Gamma(2/\beta+1) - [\Gamma(1/\beta+1]^2\}$
Розподіл найбільших значень	$S_0 + 0{,}5776$	$1{,}645\ \theta^2$
Розподіл найменших значень	$S_0 - 0{,}5776$	$1{,}645\ \theta^2$

Висновки. Формули, які приведені в таблиці 1 дозволяють розрахувати ймовірність безвідмовної роботи при однократному приложені навантаження. Використання наближених формул (3) і (4) та накопичення статистичного матеріалу о законах розподілів і значеннях їх параметрів для матеріалів і типових елементів конструкцій вузлів та агрегатів СТС, технологічних комплексів дозволяє перейти від статистичних до детермінованих запасів міцності і широко їх табулювати.

ЛІТЕРАТУРА

1.Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический поход: Пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
2.Домущі Д.П. Оцінка показників надійності складних технічних систем. //Аграрний вісник Причорномор'я:Зб. наук. пр. Одеського ДАУ/ Технічні науки.- Одеса: 2012.- №63.- С.23-29.
3.Проников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
4.Эффективность и надежность сложных систем. - М. Машиностроение, 1977.
5.Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование.- М.:Мир, 1980.

КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Домущи Д.А.

Ключевые слова: надежность, сложная техническая система, прочность, нагрузка, безотказность, вероятность.

Резюме

Представлена характеристика параметрической модели "прочность-нагрузка" при выборе статистических запасов прочности различных конструкций сложных технических систем, которые можно распространять на различные энергетические средства технологических комплексов для поддержания их в надежном состоянии.

STRUCTURAL METHODS OF PROVIDING OF RELIABILITY DIFFICULT TECHNICAL SYSTEMS

Domuschy D.A.

Key words: dežnost′, difficult technical system, durability, loading, faultlessness, probability.

Summary

Description of self-reactance model is presented "durability-loading" at the choice of statistical supplies of durability of different constructions of the difficult technical systems that can be distributed on different power facilities of technological complexes for maintenance of them in the safe state.