

Г. Клименко, В. Квашнін,  
Краматорськ, Україна

## **ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ**

**Анотація.** *В роботі вирішена задача підвищення надійності експлуатації технологічної системи важких верстатів шляхом визначення раціональної стратегії її обслуговування. Представлена система показників надійності процесу експлуатації технологічної системи важкого токарного верстату, яка складається з верстату, деталі, інструменту і верстатника. Показником надійності системи запропоновано використовувати коефіцієнт готовності, який включає характеристики як інтенсивності відмов системи, так і інтенсивність відновлення її працездатності. Статичний аналіз роботи системи дозволить виявити структуру часу її технологічної роботи, цільність розподілу часу простоїв системи, пов'язаних з обслуговуванням інструменту. Розроблено математичні моделі коефіцієнта готовності для двох стратегій експлуатації технологічної системи важкого токарного верстата: незалежного обслуговування системи верстатниками і спільного обслуговування кількома верстатниками. Застосування розроблених математичних моделей дозволяє підібрати необхідну стратегію обслуговування системи для забезпечення певного рівня надійності її експлуатації.*

**Ключові слова:** *забезпечення надійності; технологічна система; різальний інструмент; важкі верстати.*

### **Вступ. Постановка проблеми.**

Дослідження особливостей експлуатації інструменту на важких верстатах показало, що наряду з підвищеними середніми навантаженнями на різальний інструмент, пов'язаними зі значними перетинами зрізу, при механічній обробці спостерігається також велика кількість факторів, що обурюють, пов'язаних з розсіюванням параметрів експлуатації і властивостей інструментів. У зв'язку з цим одним з найважливіших критеріїв якості процесу експлуатації є його надійність. Оскільки сам процес експлуатації є складною системою, що включає безліч підсистем, що виконують різні функції щодо забезпечення раціональної експлуатації інструменту, для оцінки його надійності в цій роботі застосовується ряд різних показників (рис. 1). Різальний інструмент є невід'ємною частиною (найбільш вразливим елементом) технологічної системи. При цьому вперше вивчені різні стратегії її обслуговування одним або декількома верстатникам з метою визначення оптимального рівня надійності технологічної системи - коефіцієнта її готовності. Прийнято вважати рівень надійності технологічної системи і процесу її обслуговування

показником надійності процесу експлуатації інструменту. Традиційними показниками [1, 2, 3], є показники безвідмовності  $P(\tau)$ ,  $T$  та інші, які характеризують надійність різального леза в зв'язку з його відмовою. При переході від напайних інструментів до збірних виникла необхідність їх розгляду з точки зору надійності збірних різців як системи елементів [4]. Але не вирішена задача застосування універсального показника надійності технологічної системи.

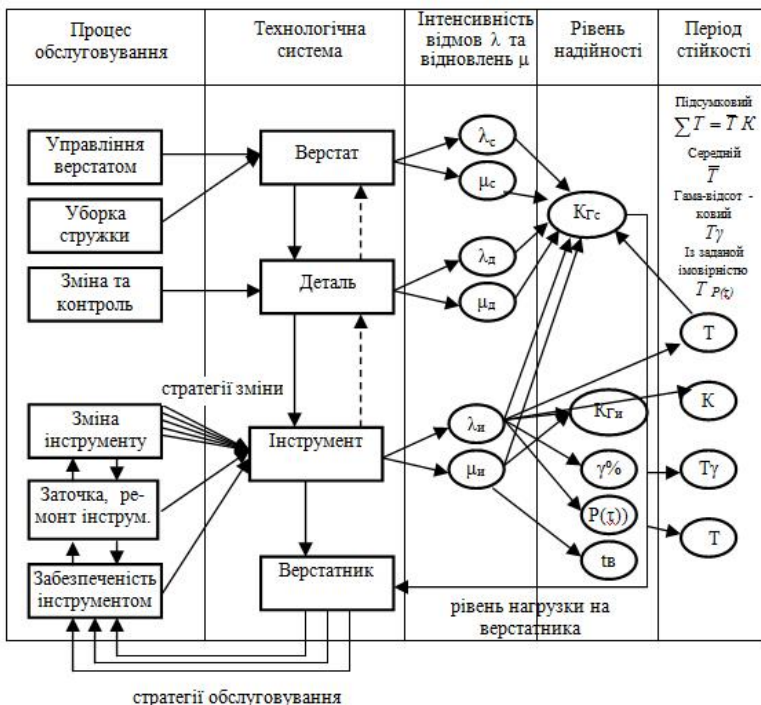


Рисунок 1 – Показники надійності процесу експлуатації технологічної системи

Показником надійності такого різця вперше запропоновано використовувати коефіцієнт готовності збірного інструменту, який включає в себе не тільки інтенсивність відмов елементів різця, а й інтенсивність відновлення їх працездатності, тобто є комплексним показником, застосування якого дозволяє управляти надійністю інструменту за допомогою як технологічних, так і конструкторських факторів.

### **Методика досліджень.**

Статистичні дослідження властивостей обслуговування з точки зору якості процесу експлуатації показали, що простої, пов'язані з обслуговуванням різального інструменту, різко зростають для верстатів, у яких різцетримач знаходиться на майданчику, розташованому на певній висоті. Крім того збільшується маса інструментів для верстатів великих типорозмірів. Збільшення розмірів деталі створює психологічну напруженість для верстатника і знижує інтенсивність процесів відновлення працездатного стану системи. У роботі [5] з цієї точки зору запропоновано використовувати показник напруженості праці верстатника як один із критеріїв оптимізації режимів різання для важких верстатів. Але ці дослідження перейшли в область психології і мотивації праці верстатника і мало стосувалися технічної сторони процесу експлуатації інструменту.

На рис. 2 показаний приклад важкого токарного верстата, обслуговування якого необхідно проводити з майданчика, що знаходиться на певній висоті.

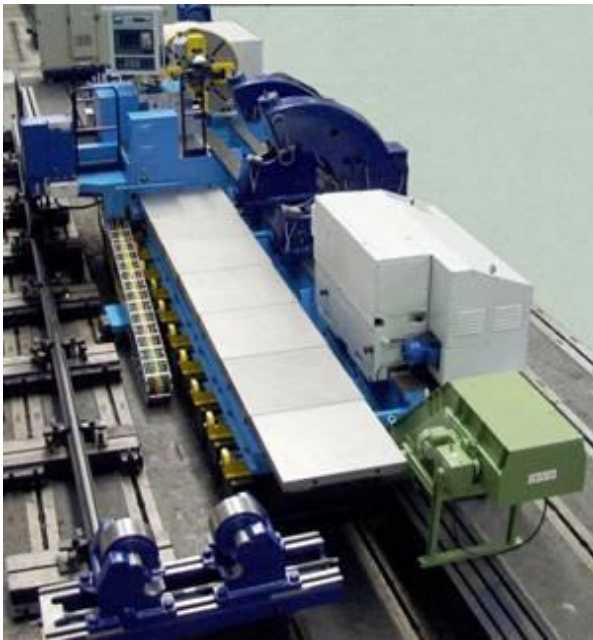


Рисунок 2 – Важкий токарний верстат з ЧПК

У таблиці 1 представлені результати статистичного аналізу структури часу функціонування системи при обробці деталей на важких токарних верстатах різних типорозмірів (характеристикою типорозміру верстата є найбільший діаметр над станиною оброблюваної деталі  $D_c$ ).

Таблиця 1 – Структура часу роботи важких токарних верстатів

Причина стану системи	Типорозмір верстату $D_c$ , мм		
	1250	2500	4000
	Доля часу роботи системи		
Зміна і контроль деталі	0,15	0,10	0,16
Керування верстатом	0,03	0,03	0,03
Інші простой	0,13	0,07	0,04
Простій, пов'язані з обслуговуванням різального інструмента	0,08	0,06	0,19
Різання	0,61	0,74	0,68

На частку простоїв, пов'язаних з обслуговуванням різального інструменту, доводиться 8 - 9% всього часу функціонування системи і 25 - 27% часу, в якому система знаходиться в непрацездатному стані. Час простоїв, пов'язаних з обслуговуванням різального інструменту, включає час заміни, заточування, ремонту, налагодження поза верстату інструменту, час ходіння верстатника (наладчика) в інструментальну комору. Статистичні дослідження показують, що розподіл сумарного часу простоїв системи, пов'язаних з обслуговуванням різального інструменту (часу відновлення працездатності системи), що не суперечить експоненціальному закону  $G(t) = 1 - e^{-\mu t}$ , а час відмов різального інструменту  $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ , де  $\mu$  і  $\lambda$  - інтенсивність відновлення і відмов інструменту. На рис. 3 показаний приклад розподілу часу простою системи, пов'язаних з обслуговуванням інструмента.

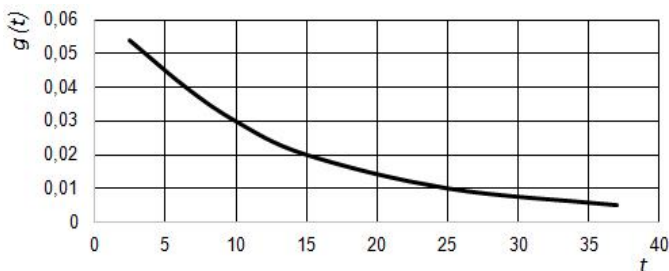


Рисунок 3 – Щільність розподілу часу простоїв технологічної системи, пов'язаних з різальним інструментом

**Мета роботи** – підвищення надійності експлуатації технологічної системи важких верстатів шляхом визначення раціональної стратегії її обслуговування.

### **Розробка математичних моделей**

Розглянемо різні стратегії обслуговування системи, яка складається із зразків інструменту верстатника з  $g$  працівників. На важкому токарному верстаті часто працюють два супорти в режимах як послідовного, так і паралельного з'єднання з точки зору надійності. Верстат обслуговує два верстатника, робота яких може бути як в режимі незалежного обслуговування, коли кожен з них закріплений за роботою окремого виду інструмента, так і в режимі спільного обслуговування. Передбачається, що система може перебувати в одному з трьох можливих станів в певний момент часу  $t$ . Позначимо: 0 – стан системи, в якій всі інструменти працездатні; 1 – стан системи, коли один інструмент виправлений, а другий відновлюється; 2 – стан відновлення всіх інструментів. Таким чином функція готовності системи є ймовірність знаходження в стані 0,  $P_0(t)$ . Далі вважатимемо, що  $P_0(t)$  залежить від числа верстатників. В цьому випадку система буде перебувати в стані 0 тим більше, чим більше  $g$ . Застосовуючи марковський підхід оцінки надійності і системи запишемо матрицю переходу з одного стану системи в іншу для випадків  $r = n = 2$  при незалежному обслуговування системи:

$$P_C = \begin{pmatrix} 1-2\lambda & 2\lambda & 0 \\ \mu & 1-(\lambda+\mu) & \lambda \\ 0 & 2\mu & 1-2\mu \end{pmatrix} .$$

Система, перебуваючи в стані 2 в момент часу  $t$ , може повернутися у стан 1 за  $t, t + dt$ , якщо будь-який з інструментів відновлений (замінений) за цей час. Імовірність такої події дорівнює:

$$2\mu dt (1 - \mu dt) = 2\mu dt + 0(dt) .$$

Можна отримати рівняння для сталого режиму (для великого проміжку часу робочої зміни). При тривалій експлуатації доля часу, коли система буде перебувати в кожному стані, не залежить від її початкового стану.

Звідси, в межі значення кожної ймовірності  $P_i(t)$  буде постійним,  $\lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t) = P_i$ , що дає можливість віднайти рішення для сталого режиму прирівнювання довільних нулю  $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$ , і використовувати умови, що перебування системи в кожному з можливих станів – події взаємно виключні,  $P_0 + P_1 + P_2 = 1$ .

Тоді можна записати наступну систему алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned}2\lambda P_0 + \mu P_i &= 0, \\2\lambda P_0 - (\lambda + \mu) P_i + 2\mu P_2 &= 0, \\ \lambda P_i - 2\mu P_2 &= 0, \\ P_0 + P_1 + P_2 &= 1.\end{aligned}$$

Вирішую ці рівняння підстановкою, отримуємо вираз для визначення коефіцієнта готовності системи при її незалежному обслуговуванні двома верстатниками:

$$K_{r_c} = \mu^2 / (\lambda + \mu)^2.$$

Однак верстатники працюють незалежно один від одного тільки за одночасної відмови інструментів, закріплених в двох супортах. Припустимо, що обслуговування одного верстата двома станочником проводиться з інтенсивністю  $1,5 \mu$  і що, якщо два верстатника обслуговує один супорт, а інструмент, закріплений у другому супорті, виходить з ладу, то другий верстатник негайно перемикається на обслуговування другого інструменту. Тоді при спільному обслуговування системи матриця переходів  $P$  набуває вигляду:

$$P_c = \begin{pmatrix} 1-2\lambda & 2\lambda & 0 \\ 1.5\mu & 1-(\lambda+1.5\mu) & \lambda \\ 0 & 2\mu & 1-2\mu \end{pmatrix}.$$

При цьому коефіцієнт готовності дорівнює ймовірності працездатного стану:

$$K_{r_c} = P_0 = \frac{\mu^2}{3\mu^2 + 4\mu\lambda + 2\lambda^2}.$$

У таблиці 2 для порівняння наведені коефіцієнти готовності системи в трьох випадках обслуговування інструменту одним і двома верстатникам.

Можна помітити, що при спільному обслуговування системи двома верстатниками коефіцієнт готовності системи значно підвищується в

порівнянні з незалежним обслуговуванням, яка мала відрізняється від випадку роботи одного верстатника.

Таблиця 2 – Порівняння показників надійності при різних стратегіях зміни інструменту ( $\lambda = 0,05 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\mu = 1,01 \text{ мин}^{-1}$ )

Спосіб обслуговування		Коефіцієнт готовності системи	Сумарний простій за 10000 хв. роботи системи, хв.
Один верстатник		0,9050	946
Два верстатника	А. Незалежне обслуговування	0,9070	928
	Б. Спільне обслуговування	0,9360	639

У загальному випадку, коли є  $n$  різальних інструментів і  $r$  верстатників, ймовірність переходів залежить від числа відмовлених інструментів, котрі позначимо через  $k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, n$ ). Ймовірність знаходження системи в деякому стані буде залежати від умов  $k < r$ ,  $k = r$  або  $k > r$ , для яких отримано вирази визначення ймовірності працездатного стану системи:

$$P_k = \frac{n!}{(n-k)!k!} \rho^k P_0 \quad (k < r), \quad P_k = \frac{n!}{(n-k)!r!} \rho^r \left(\frac{\rho}{r}\right)^{k-r} P_0 \quad (k \geq r).$$

$$K_{G_c} = P_0 = \left[ \sum_{k=0}^{r-1} \frac{n!}{(n-k)!k!} \rho^k + \sum_{k=r}^n \frac{n!}{(n-k)!r!} \rho^r \left(\frac{\rho}{r}\right)^{k-r} \right], \quad (1)$$

де  $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ .

### **Висновки.**

Математична модель (1) може бути використана для статистичного моделювання обслуговування технологічної системи. Знаючи інтенсивності відмов і відновлення працездатності системи, можна підібрати необхідну стратегію обслуговування для отримання заданого рівня надійності. Можливе вирішення і зворотньої задачі при заданому коефіцієнті готовності системи в різних поєднаннях  $\lambda$  і  $\mu$ , які характеризують інтенсивності відмов і відновлення працездатності

інструменту, які реалізуються на стадії вибору інструменту. Оскільки найчастіше в виробничих умовах важкі токарні верстати обслуговуються двома верстатниками (основним і підручним), в цьому випадку найбільш ефективним з точки зору надійності є спільне обслуговування технічної системи. Заміна різального інструменту на важких верстатах – трудомісткий і відповідальний процес, пов'язаний з великою масою інструменту (іноді понад 25 кілограм) і висотою супорт на майданчику, на яку для верстатів с  $D_c \geq 2500$  мм необхідно підніматися по сходах. В зв'язку з цим набуває більшого значення правильний вибір стратегії заміни інструменту, який забезпечує при найменших витратах максимальний рівень надійності.

**Список використаних джерел:** 1. *Клименко Г.П.* Надежность технологической системы при механообработке труднообрабатываемых материалов / Г. П. Клименко, Н. С. Равская, А. Ю. Андронов // Вісник двигунобудування. – Запоріжжя : ОАО «Мотор Сич», 2009. – № 2. – С. 110–119. 2. *Клименко Г.П.* Определение показателей надежности работы и инструментообеспечения сборных резцов / Г. П. Клименко, Е. В. Ткачева // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ, 2012. – Вип. 30. – С. 66–70. 3. *Клименко Г.П.* Технологічне управління якістю експлуатації інструменту для важких верстатів / Г.П. Клименко //Modern question of production and repair in industry and in transport, Vrnо Czech Republic, 2018.- с. 97-100 4. *Клименко Г.П.* Надійність інструментів збірної конструкції як систем / Г.П. Клименко // Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод: Матеріали Всеукраїнської конференції 19-21 квітня, 2018.- С. 179-182. 5. *Клименко Г.П.* Качество и надежность эксплуатации сборных твердосплавных инструментов / Г.П. Клименко, Я.В. Васильченко, М.В. Шаповалов // Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», Вип.34 (1310), 2018.- с.34-39.

G. Klymenko, V. Kvashnin,  
Kramatorsk, Ukraine

## **RELIABILITY ASSURANCE TECHNOLOGICAL SYSTEMS EXPLOITATION OF HEAVY LATHE**

**Abstract.** *The paper solves the problem of increasing the reliability of operation of the technological system of heavy machines by determining a rational strategy for its maintenance. The analysis of the literature showed that there are various indices of reliability, durability, maintainability, which partially characterize reliability, to assess the reliability of the technological system. To determine them, you must have a large number of statistical studies. But there is a need to develop universal mathematical dependencies to predict a specific maintenance strategy for the technical system of heavy machines. Research methods include static data collection of heavy machine tools, the reliability of which is determined mainly by machine downtime associated with the failure of cutting tools, which are the weakest element of the technological system. Mathematical processing of statistics results allows to determine the density distribution of system failures, as well as the intensity of failures and system recovery. A feature of*



*the recovery of heavy machines is the location of their caliper on a high platform, which makes it difficult to replace the tool, whose weight reaches 25 kg. The paper presents a system of indicators of the reliability of the process of operation of the technological system of a heavy lathe, which consists of machine parts, tools and machine operator. Statistical analysis of the system allowed to identify the structure of the time of its technological work, the density of distribution of the system downtime associated with the maintenance of the tool. The maintenance of the technological system of a heavy machine is carried out by 2 machine operators (the main and the assistant). The paper considers two strategies of machine maintenance - independent and common. The criterion for choosing a rational strategy is the level of reliability of the system. A universal indicator of the reliability of the technological system is proposed to use the system availability ratio. It is assumed that the system can be in one of three possible states at a certain point in time: the system health state, the state when only one tool is operational, the state in which all tools are restored. The system availability function is the probability of being in a working system state. Using the Markov approach to assessing the reliability of the system, a matrix of transitions from one state of the system to another is written, which allows us to obtain algebraic equations, solving which we obtain mathematical models for determining the availability factor for various maintenance strategies of the technological system. Mathematical models of availability factor have been developed for two strategies for operating a heavy lathe technological system: independent maintenance of the system by machine operators and general maintenance by several machine operators. With the joint maintenance of a technological system by two machine operators, the level of reliability of the system is significantly increased compared with independent maintenance. For the general case with a certain number of cutting tools and a certain amount of machine operators, a mathematical expression was obtained for calculating the availability factor, which determines the probability of a healthy state of the system. The use of the developed mathematical models makes it possible to select the necessary system maintenance strategy to ensure a certain level of reliability of its operation. The developed mathematical models are used for statistical modeling of the maintenance of the technological system of a heavy lathe, whose downtime has a greater cost. Knowing the failure rate and system recovery, you can choose the necessary service strategy to obtain a desired level of reliability. Possible solution of the inverse problem for a given system availability in various combinations of  $\lambda$  and  $\mu$ , which characterize the intensity of failures and recovery of the tool, which are implemented at the stage of tool selection. Since most often in production conditions heavy lathes are serviced by two machine operators, in this case the most effective from the point of view of reliability is the joint maintenance of the technical system.*

**Keywords:** *reliability assurance, technological system, exploitation of heavy lathe, machine tool, heavy lathe.*