

PODSTAWY EKSPLOATACJI MASZYN

Laboratorium · Ćwiczenie 1

Analiza cyklu życia maszyny – tokarka CNC

Cykl życia · MTBF · MTTR · gotowość · LCC



**Akademia
Techniczno-Artystyczna**
Nauk Stosowanych w Warszawie

Opracował: dr inż. Radosław Gościński

Akademia Techniczno-Artystyczna Nauk Stosowanych w Warszawie

Rok akademicki 2026/2027

1. Cel i założenia ćwiczenia

Cel. Zapoznanie się z cyklem życia maszyny – od zakupu, przez użytkowanie, konserwację i remonty, aż po wycofanie z eksploatacji i utylizację. Zespół analizuje wszystkie etapy życia tokarki CNC, ze szczególnym uwzględnieniem momentów, które wpływają na jej wydajność i koszty użytkowania, a także rolę konserwacji profilaktycznej i diagnozowania potencjalnych awarii.

Założenia.

- Analizowana maszyna: tokarka CNC XYZ-TC500 (dane w punkcie 3).
- Okres analizy: **10 lat** użytkowania w zakładzie produkcyjnym.
- Czas pracy: **160 h/miesiąc**, czyli 1 920 h/rok (8 h dziennie, 20 dni w miesiącu).
- Należy uwzględnić wszystkie kluczowe procesy: użytkowanie, konserwację profilaktyczną, naprawy, remonty kapitalne oraz wycofanie z eksploatacji.
- Wszystkie koszty podajemy w złotych netto. Brakujące dane (np. cenę energii) zespół przyjmuje samodzielnie i podaje w raporcie jako założenie.

Organizacja.

- Zespoły 3–4-osobowe; jeden raport na zespół.
- Na zajęciach (ok. 80 min): zapoznanie z danymi, model cyklu życia (zadanie 1) oraz obliczenia wskaźników niezawodności (część zadania 2).
- W domu: dokończenie analizy kosztów, propozycje optymalizacji i raport.
- Raport w formacie PDF, nazwa pliku: PEM_Cw1_<numer zespołu>.pdf.

2. Wstęp teoretyczny

Cykl życia maszyny obejmuje cały okres od projektowania i produkcji, przez użytkowanie i konserwację, aż po wycofanie z użycia i złomowanie. Typowe etapy:

- **Projektowanie** – określenie wymagań funkcjonalnych i technicznych maszyny.
- **Produkcja** – wytworzenie maszyny, montaż i testy.
- **Wprowadzenie do eksploatacji** – uruchomienie, kalibracja, docieranie, szkolenie operatorów.
- **Użytkowanie** – aktywna praca w produkcji; kluczowe są regularne przeglądy, konserwacja i naprawy.
- **Konserwacja i serwis** – przeglądy, wymiany części, remonty i modernizacje.
- **Wycofanie z eksploatacji** – z powodu zużycia fizycznego, awarii lub zużycia ekonomicznego (nowsze technologie).
- **Złomowanie** – demontaż, odzysk i recykling części, utylizacja.

Zrozumienie cyklu życia jest podstawą efektywnego zarządzania kosztami, konserwacją i optymalizacji procesów produkcyjnych.

Konserwacja profilaktyczna to działania planowane i wykonywane regularnie – według harmonogramu lub po określonej liczbie godzin pracy – w celu utrzymania maszyny w dobrym stanie i zapobiegania awariom. Jej cele: wydłużenie żywotności maszyny, zmniejszenie ryzyka awarii, zwiększenie niezawodności i efektywności oraz

obniżenie kosztów napraw. Przykłady: smarowanie, wymiana filtrów, kontrola poziomu płynów, inspekcje wizualne.

Konserwacja naprawcza to działania reaktywne, podejmowane po wystąpieniu awarii, w celu przywrócenia maszyny do sprawności. Jej cele: usunięcie awarii, zminimalizowanie przestoju i zapewnienie bezpieczeństwa. Przykłady: wymiana uszkodzonych części, naprawa układów hydraulicznych, serwis silników.

MTBF (średni czas między awariami) mierzy niezawodność – im wyższy, tym rzadziej maszyna się psuje. **MTTR** (średni czas naprawy) mierzy efektywność napraw – obejmuje diagnostykę, naprawę i ponowne uruchomienie; im niższy, tym krótsze przestoje. Z obu wielkości wynika **gotowość techniczna A** – udział czasu, w którym maszyna jest zdolna do pracy.

$$MTBF = \frac{\text{całkowity czas pracy}}{\text{liczba awarii}} \quad MTTR = \frac{\text{całkowity czas napraw}}{\text{liczba awarii}} \quad A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Koszt cyklu życia (LCC) to suma wszystkich kosztów w całym okresie użytkowania: zakupu i instalacji, eksploatacji (operator, energia, narzędzia), konserwacji, napraw i remontów, pomniejszona o wartość odzysku na końcu. Ponieważ pieniądź dziś jest wart więcej niż w przyszłości, koszty z kolejnych lat sprowadza się do wartości bieżącej (dyskontowanie, stopa i). Metodę LCC opisuje norma IEC 60300-3-3.

$$LCC = C_{\text{zakup}} + \sum_{t=1}^{10} \frac{C_{\text{eksploatacja}, t} + C_{\text{konserwacja}, t} + C_{\text{naprawy}, t}}{(1+i)^t} - \frac{W_{\text{odzysk}}}{(1+i)^{10}}$$

3. Materiały do ćwiczenia

3.1 Specyfikacja techniczna tokarki CNC

Parametr	Wartość
Model	XYZ-TC500
Rok produkcji	2020
Wrzeciono	moc 15 kW, prędkość obrotowa 4 000 obr./min
Dokładność pozycjonowania	$\pm 0,005$ mm
Maksymalna średnica toczenia	500 mm
Sterowanie	Fanuc lub Siemens CNC
Napędy osi	serwonapędy, osie X i Z
Pobór mocy przy pełnym obciążeniu	20 kW (czyli 20 kWh na każdą godzinę pracy)
Średnia trwałość narzędzi	200 h pracy
Masa maszyny	3 500 kg
Cena zakupu	200 000 zł
Instalacja i szkolenie operatorów	10 000 zł

3.2 Dane eksploatacyjne i awarie

Zdarzenie	Częstotliwość	Koszt naprawy	Czas przestoju
Przegrzanie wrzeciona	2 razy w roku	5 000 zł każda	3 dni (24 h pracy) każda
Problemy z układem chłodzenia narzędzi –	co 2 lata	1 500 zł	8 h

Zdarzenie	Częstotliwość	Koszt naprawy	Czas przestoju
wymiana pompy			
Wymiana łożysk wrzeciona (w ramach remontu kapitalnego)	co 3 lata	7 000 zł	16 h

3.3 Harmonogram konserwacji profilaktycznej

- **Co 500 h pracy (ok. 3 miesiące):** wymiana oleju smarowego we wrzecionie, smarowanie prowadnic i łożysk, kontrola układu chłodzenia i pompy, kontrola i regulacja geometrii tokarki.
- **Co 1 000 h pracy (ok. 6 miesięcy):** pełna diagnostyka serwonapędów i układów sterowania, wymiana zużytych elementów (np. filtrów).
- **Remont kapitalny co 3 lata:** wymiana łożysk wrzeciona, regeneracja śrub kulowych napędów osi, sprawdzenie i kalibracja sterowania CNC.

3.4 Przykładowe koszty roczne

Element	Koszt jednostkowy	Częstotliwość	Koszt roczny
Olej smarowy	200 zł	co 6 miesięcy	400 zł
Narzędzia tokarskie	300 zł	co 200 h pracy	2 880 zł (1 920 h : 200 h = 9,6 wymiany)
Wymiana pompy chłodzenia	1 500 zł	co 2 lata	750 zł
Wymiana łożysk wrzeciona	7 000 zł	co 3 lata	2 333 zł
Operator maszyny	40 zł/h	160 h/miesiąc	76 800 zł
Przegląd układu chłodzenia	500 zł	raz w roku	500 zł
Kalibracja układu CNC	1 200 zł	raz w roku	1 200 zł
Diagnostyka serwonapędów	600 zł	co 6 miesięcy	1 200 zł
Filtry oleju	100 zł	co 6 miesięcy	200 zł
Wymiana pasków napędowych	300 zł	raz w roku	300 zł
Energia elektryczna	cena za kWh – do przyjęcia przez zespół	20 kW × 1 920 h/rok	do obliczenia

Cenę energii przyjmijcie na podstawie aktualnych taryf dla odbiorców przemysłowych (orientacyjnie ok. 0,90 zł/kWh netto) i podajcie ją w raporcie.

3.5 Przykładowe dodatkowe awarie tokarek CNC

Awaria	Objaw	Koszt naprawy	Uwagi
Uszkodzenie głowicy wrzeciona	nieosiąganie wymaganej prędkości obrotowej	3 000 zł	może wymagać wymiany łożysk
Problemy z układem chłodzenia	niewystarczające chłodzenie narzędzi	1 500 zł	może być konieczna wymiana pompy
Zerwanie paska napędowego	zatrzymanie maszyny	500 zł	wymiana paska
Uszkodzenie serwonapędu	utrata precyzji ruchów	4 000 zł	może wymagać serwisu

Awaria	Objaw	Koszt naprawy	Uwagi
Awaria czujników	błędne dane pomiarowe	1 000 zł	wymiana czujnika
Niesprawność systemu sterowania	brak reakcji oprogramowania	2 000 zł	może wymagać aktualizacji
Zatarcie prowadnic	zwiększony opór ruchu	600 zł	czyszczenie i smarowanie
Uszkodzenie narzędzi roboczych	łamanie się narzędzi	800 zł	wymiana narzędzi
Problemy z zasilaniem	niestabilne napięcie	1 500 zł	sprawdzenie instalacji elektrycznej
Wyciek oleju smarowego	przyspieszone zużycie części	700 zł	wymiana uszczelnień

3.6 Wzory dokumentów technicznych

A. Karta przeglądu maszyny

Data przeglądu	Liczba godzin pracy	Czynności konserwacyjne	Uwagi	Operator
01.02.2024	500 h	wymiana oleju, smarowanie prowadnic	drobne zużycie na wrzecionie	Jan Kowalski

B. Raport awarii

Data awarii	Typ awarii	Opis problemu	Koszt naprawy	Czas naprawy	Uwagi
15.03.2024	przegrzanie wrzeciona	wrzeciono przegrzało się po 5 h pracy	5 000 zł	3 dni	zalecana częstsza kontrola chłodzenia

C. Harmonogram przeglądów (przykład pierwszego roku)

Miesiąc	Narastająco godzin pracy	Zaplanowane czynności konserwacyjne
Styczeń	160 h	smarowanie prowadnic, kontrola układu chłodzenia
Luty	320 h	wymiana oleju smarowego, smarowanie prowadnic
Marzec	480 h	przegląd układu CNC, kalibracja osi X, Z
Kwiecień	640 h	kontrola wrzeciona i prowadnic, smarowanie
Maj	800 h	wymiana filtrów, sprawdzenie układu chłodzenia
Czerwiec	960 h	diagnostyka serwonapędów i układu sterowania
Lipiec	1 120 h	smarowanie prowadnic, kontrola łożysk
Sierpień	1 280 h	wymiana oleju smarowego, kontrola geometrii
Wrzesień	1 440 h	przegląd układu CNC, kalibracja osi X, Z

Miesiąc	Narastająco godzin pracy	Zaplanowane czynności konserwacyjne
Październik	1 600 h	kontrola wrzeciona, wymiana zużytych elementów
Listopad	1 760 h	smarowanie prowadnic, diagnostyka wrzeciona
Grudzień	1 920 h	przegląd końcowy roku, wymiana filtrów i oleju

3.7 Narzędzia diagnostyczne i oprogramowanie

- **Wibrometr** – pomiar drgań wrzeciona i prowadnic.
- **Kamera termowizyjna** – kontrola nagrzewania się elementów maszyny.
- **Multimetr** – pomiary elektryczne układu CNC.
- **Suwmiarka i mikrometr** – pomiary geometrii toczonych części.
- **System CMMS** (np. Infor EAM, Fiix) – planowanie konserwacji, rejestr awarii i dokumentacji.

Materiały pomocnicze: podręczniki diagnostyki maszyn CNC producentów sterowań (Siemens, Fanuc) – techniki wibroakustyczne, termowizja, analiza drgań.

4. Zadania

Zadanie 1: Model cyklu życia maszyny

Opracujcie diagram cyklu życia tokarki CNC dla 10 lat: zakup i instalacja, eksploatacja początkowa (testy, kalibracja, docieranie), użytkowanie z konserwacją profilaktyczną, naprawy i remonty kapitalne, wycofanie z eksploatacji i złomowanie (recykling). Na osi czasu zaznaczcie przeglądy co 500 h i 1 000 h, wymiany pompy (co 2 lata) i remonty kapitalne (lata 3, 6 i 9).

Wynik: diagram etapów oraz oś czasu 10 lat.

Zadanie 2: Wskaźniki niezawodności i analiza kosztów cyklu życia

1. Dla jednego roku obliczcie MTBF, MTTR i gotowość A dla awarii nieplanowanych (przegrzanie wrzeciona).
2. Obliczcie gotowość z uwzględnieniem planowanych postojów na konserwację i remonty. Porównajcie oba wyniki.
3. Zestawcie koszty roczne w kategoriach: zakup i instalacja, eksploatacja (operator, energia, narzędzia), konserwacja profilaktyczna, naprawy i remonty.
4. Obliczcie LCC za 10 lat – najpierw bez dyskontowania, potem z dyskontowaniem przy stopie $i = 6\%$ rocznie. Przyjmijcie wartość odzysku 10% ceny zakupu na końcu okresu.
5. Przedstawcie strukturę kosztów na wykresie (np. kołowym lub słupkowym) i wskaźcie dominującą kategorię.

Wynik: tabela kosztów rocznych, LCC (bez i z dyskontowaniem), wykres struktury kosztów, wskaźniki MTBF, MTTR i A.

Zadanie 3: Propozycje optymalizacji

Wskażcie co najmniej cztery działania, np.: monitorowanie stanu wrzeciona (drgania, temperatura), poprawę układu chłodzenia, wdrożenie systemu CMMS, szkolenie operatorów, tryb oszczędzania energii, zmianę interwałów konserwacji na podstawie stanu technicznego. Do każdego działania oszacujcie wpływ na koszty lub gotowość (np. o ile spadną koszty napraw wrzeciona lub przestoje) oraz koszt wdrożenia.

Wynik: tabela działań: opis, szacowany efekt, koszt wdrożenia, uzasadnienie.

Zadanie 4: Raport końcowy

Raport (maks. 8 stron) powinien mieć następującą strukturę:

1. **Opis maszyny** – parametry techniczne, warunki pracy, czas pracy.
2. **Model cyklu życia** – diagram etapów i oś czasu z opisem każdego etapu (zakup i instalacja, eksploatacja początkowa, użytkowanie i konserwacja, naprawy i awarie, wycofanie i złomowanie).
3. **Wskaźniki niezawodności** – MTBF, MTTR, gotowość, z obliczeniami.
4. **Analiza kosztów cyklu życia** – koszty zakupu, eksploatacji, konserwacji i napraw; podsumowanie roczne; LCC za 10 lat bez i z dyskontowaniem; wykres.
5. **Propozycje optymalizacji** – z oszacowaniem efektów.
6. **Wnioski końcowe.**
7. **Założenia i źródła** – m.in. przyjęta cena energii, stopa dyskontowa, źródła danych.

Każde obliczenie zapiszcie w postaci: wzór → podstawione liczby → wynik z jednostką → jedno zdanie interpretacji.

Na co zwrócić uwagę:

- Liczba wymian narzędzi wynika z czasu pracy: $1\,920\text{ h} : 200\text{ h} = 9,6$ kompletu rocznie.
- Pobór mocy 20 kW oznacza zużycie 20 kWh na każdą godzinę pracy przy pełnym obciążeniu.
- Koszt konserwacji profilaktycznej obejmuje wszystkie pozycje z tabeli 3.4, a nie tylko olej, diagnostykę i kalibrację.
- Rozdzielcie koszty planowane (konserwacja, remonty) od nieplanowanych (awarie).
- Propozycje optymalizacji muszą wynikać z Waszej analizy (np. dominującej kategorii kosztów lub najczęstszej awarii), a nie być ogólnikami.

5. Ocena

Kryterium	Waga
Poprawność i kompletność modelu cyklu życia	25%
Wskaźniki niezawodności	15%
Rzetelność analizy kosztów (LCC)	30%
Trafność propozycji optymalizacji	20%
Jakość raportu końcowego	10%