

OCENA NIEZAWODNOŚCI ZŁOŻONEGO OBIEKTU TECHNICZNEGO NA PRZYKŁADZIE ROZDRABNIARKI MJS-2,5 DTG

Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono analizę niezawodności rozdrabniarek MJS-2,5 DTG przeznaczonych do prac leśnych. W maszynach zostały wyróżnione trzy podsystemy (układ napędowy, bęben roboczy i układ hydrauliczny) i przeanalizowano każdy z nich. Analiza niezawodności obejmowała określenie parametrów rozkładu Weibulla dla szeregów czasowych powstawania niezdatności, określenie funkcji niezawodności, MTBF oraz gotowości. Wartość MTBF dla badanych rozdrabniarek wynosiła 65,8 dni, a parametr kształtu rozkładu Weibulla wynosił 1,3. Najmniej zawodny okazał się układ hydrauliczny maszyny, służący do sterowania położeniem bębna ugniatającego, a najbardziej zawodnym spośród wyróżnionych podsystemów był bęben roboczy z nożami (frezami) rozdrabniającymi gałęzie na powierzchni leśnej.

Słowa kluczowe: rozdrabniarka, niezawodność, MTBF, proces eksploatacji

Wprowadzenie

Nowoczesna gospodarka leśna realizuje funkcje ochronne, społeczne oraz produkcyjne. Jedną z cech charakteryzujących gospodarkę leśną jest długi czas życia generacji drzewostanów. Wymiana pokoleń następuje w sposób naturalny lub sztuczny, przy udziale człowieka posługującego się techniką. W zakresie funkcji produkcyjnych występują procesy technologiczne zmierzające do pozyskania drewna. Procesy te, w przypadku np. cięć rębnych drzewostanów sosnowych, często o charakterze cięć zupełnych, prowadzą do powstawania tzw. pozostałości zrębowych. Pozostałości te w postaci gałęzi i wierzchołków drzew zostają na powierzchni leśnej po zabraniu z niej drewna okrągłego. Przed czynnościami zmierzającymi do założenia nowego drzewostanu, istotnym zabiegiem jest utylizacja pozostałości zrębowych po poprzednim pokoleniu. Z reguły utylizacja ta może odbywać się w drodze zabrania pozostałości zrębowych jako biomasy z przeznaczeniem jej na cele energetyczne lub może polegać na jej rozdrobnieniu i pozostawieniu na powierzchni. Każdy z tych sposobów ma mniej lub bardziej wymierne korzyści, a o tym, która z dróg zostaje wybrana decyduje kierownik jednostki administracyjnej prowadzącej gospodarkę leśną. Pozostałości zrębowe mają stosunkowo duży udział w całkowitej biomasy drzew. W dojrzałym drzewostanie sosnowym ich łączna masa może osiągać wartość 30 do 60 ton na powierzchni 1 hektara. Rozdrobnienie takiej masy materiału wymaga zastosowania odpowiednich środków technicznych. Najczęściej rozdrabnianie pozostałości zrębowych odbywa się przy udziale zestawu maszyn złożonego z ciągnika rolniczego w wykonaniu leśnym i agregatowanej z nim rozdrabniarki. Zakres prac polegających na utylizacji pozostałości zrębowych w skali kraju jest znaczny, bowiem w okresie jednego roku odnowienia sztuczne drzewostanów na powierzchniach pozrębnych prowadzi się na łącznej powierzchni około 25-30 tysięcy ha, a w skali kraju pozyskuje się masę blisko miliona metrów sześciennych. Tak duży roczny rozmiar prac wymaga, aby park maszynowy przeznaczony do wykonywania zabiegów związanych z utylizacją pozostałości zrębowych cechował się wysokimi parametrami niezawodnościowymi. W tym celu konieczne jest poznanie podstawowych charakterystyk niezawodnościowych rozdrabniarek stosowanych do rozdrabniania pozostałości zrębowych. Do tej pory zauważa się istotny brak badań w zakresie niezawodności

sprzętu technicznego stosowanego w leśnictwie, a w szczególności dostrzega się zupełny brak opracowań parametrów niezawodnościowych rozdrabniarek. Stosunkowo często stosowanym modelem rozdrabniarki jest maszyna Meri Crusher MJS-2,4 DTG, produkcji fińskiej, o poziomej osi obrotu bębna roboczego (rys. 1).



Rys. 1. Rozdrabniarka MJS-2,5 DTG podczas pracy na powierzchni zrębowej

Fig. 1. MJS-2,5 DTG crusher working on a clear-cut area

Obiekt badań

Rozdrabniarki Meri Crusher MJS-2,4 DTG stanowią złożone urządzenia techniczne o charakterze obiektów naprawialnych. Głównym elementem rozdrabniarek jest walec roboczy, na którym umieszczone są osady z zamocowanymi w nich nożami. Walec roboczy napędzany jest z WOM ciągnika, który przekazuje moment obrotowy poprzez wał przegubowo-teleskopowy, przekładnię zębatą kątową, wały przegubowo-teleskopowe boczne oraz dwie przekładnie boczne zębate i dalej na bęben roboczy. Pomiedzy przekładnią kątową i przekładniami bocznymi znajdują się sprzęgła hydrauliczne przeciążeniowe. Noże na bębnie roboczym obracają się także w swoich osadach wokół własnych osi, tak aby zapewnić równomierne zużycie końcówkom wykonanym z węglików spiekanych. Zarówno noże robocze, jak i ich osady,

podlegają intensywnemu zużyciu ciernemu. Za bębniem roboczym umieszczony jest swobodnie obracający się bęben ugniatający, zawieszony na hydraulicznie sterowanej ramie. Maszyna podczas typowej pracy, polegającej na przemieszczaniu się po powierzchni zrębowej i rozdrabnianiu znajdujących się na niej pozostałości zrębowych może pracować w ruchu wspólnym i przeciwnym. Podstawowe parametry techniczne rozdrabniarki MJS-2,5 DTG przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Parametry techniczne rozdrabniarki MJS-2,5 DTG
Table 1. Technical parameters of the MJS-2,5 DTG crusher

Parametr	Jedn.	Wartość
Średnica bębna roboczego	mm	500
Szerokość bębna roboczego	mm	2450
Maks. głębokość pracy	mm	250
Masa maszyny	kg	2285
Zakres mocy	kW	100-140
Liczba noży	szt.	92
Prędkość WOM	obr/min	1000

Rozpatrywany model rozdrabniarki jest obiektem złożonym, w którym wyróżnić można trzy podsystemy o równorzędnym znaczeniu dla wykonywanej pracy, ale o zróżnicowanych funkcjach. Obiekt techniczny tworzą następujące podsystemy:

- bęben roboczy (podsystem 1),
- układ przeniesienia napędu (podsystem 2),
- układ hydrauliczny wraz z bębniem ugniatającym (podsystem 3).

Cel i zakres pracy

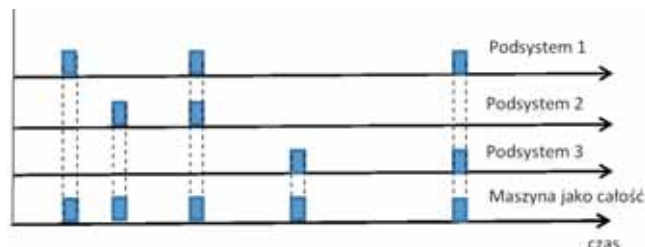
Celem pracy była analiza niezawodnościowa rozdrabniarek stosowanych do rozdrabniania pozostałości zrębowych obejmująca:

- analizę elementów podlegających zużyciu normalnemu i przedwczesnemu,
- określenie zgodności rozkładów empirycznych z rozkładem Weibulla,
- określenie wskaźnika MTBF, ogólnie dla całej maszyny, jak i dla wyróżnionych podsystemów.

Zakres pracy obejmował analizę awarii monitorowanych na 7 maszynach MJS-2,5 DTG pracujących w warunkach leśnych w latach 2012 i 2013.

Metodyka

Dane dotyczące awarii powstających w trakcie użytkowania rozdrabniarek zebrano monitorując eksploatację tych maszyn, będących własnością jednostek (zakłady usług leśnych, nadleśnictwa), wykonujących zabiegi utylizacji pozostałości zrębowych. Na podstawie dokumentacji ustalono, jakie elementy maszyn ulegały uszkodzeniu oraz zużyciu normalnemu i przedwczesnemu, kiedy występował stan niezdatności oraz jak długo trwało przywracanie zdadności rozdrabniarkom. Proces przywracania zdadności obejmował czynności diagnostyczne, logistyczne, związane ze sprowadzaniem części zamiennych rozdrabniarek od producenta lub ich zakup w kraju oraz właściwe czynności naprawcze. Elementy budowy rozdrabniarek powodujące stan ich niezdatności podzielono na trzy grupy, odpowiadające wyróżnionym wyżej trzem podsystemom badanych maszyn. Z zebranych w ten sposób danych utworzono trzy szeregi czasowe stanów zdadności/niezdatności (rys. 2).



Rys. 2. Ilustracja graficzna modelu stanów zdadności i niezdatności rozdrabniarki z wyróżnionymi trzema podsystemami. Prostokąty oznaczają okresy niezdatności a odcinki pomiędzy nimi to okresy zdadności

Fig. 2. A graphical model showing up and down states of the crusher with three specified sub-systems. Rectangles denote down states and the gaps between them present up states

Uzyskane szeregi czasowe traktowane jako rozkłady empiryczne poddano badaniom statystycznym, określając ich zgodność z rozkładem Weibulla. W celu sprawdzenia zgodności rozkładów empirycznych z rozkładem teoretycznym wykorzystano test zgodności Kołmogorowa-Smirnowa, przy użyciu aplikacji Statistica 10.0. Za pomocą tej samej aplikacji określono parametry rozkładów Weibulla dla rozdrabniarki oraz wyróżnionych w niej podsystemów.

Wskaźnik MTBF (*Mean Time Between Failures*), oznaczający średni czas pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami, określono według formuły [6]:

$$MTBF = \frac{TZ}{N} \quad (1)$$

gdzie:

TZ - łączny czas poprawnej pracy w dniach (czas zdadności),

N - liczba uszkodzeń.

Wskaźnik MTBF obliczono dla każdego z wyróżnionych podsystemów rozdrabniarek, jak i dla całej maszyny. Strumień niezdatności określono jako odwrotność wskaźnika MTBF. Prawdopodobieństwo $R(t)$, że maszyna będzie sprawna przez czas t obliczono w oparciu o następującą formułę [2]:

$$R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta} \quad (2)$$

gdzie:

e - podstawa logarytmu naturalnego,

η, β - parametry rozkładu Weibulla.

Gotowość rozdrabniarki określono jako iloraz czasu przebywania maszyny w stanie zdadności do sumy czasów zdadności oraz niezdatności, według formuły:

$$A = \frac{TZ}{TZ + TN} \quad (3)$$

gdzie: TN - czas niezdatności w dniach.

Definicje i formuły obliczeniowe powyższych wskaźników są dostępne w literaturze przedmiotu [1, 3, 4].

Wyniki badań

W trakcie badanego okresu pracy rozdrabniarki, czas zdadności wynosił 2631 dni. Po zebraniu danych empirycznych dotyczących stanów niezdatności maszyn stwierdzono, że spośród trzech wyróżnionych podsystemów rozdrabniarki bęben roboczy maszyny był głównym źródłem niezdatności

maszyny, gdyż jego udział w powodowaniu stanów niezdatności sięgał blisko 40%. Podsystem złożony z elementów przekazujących napęd z ciągnika na bęben roboczy był powodem postawiania tych stanów w 33%. Stosunkowo najmniej zawodnym układem maszyny był układ hydrauliczny, odpowiedzialny za pracę walca ugniatającego położonego za bębniem roboczym.

Należy zauważyć, iż często zdarzało się, że równocześnie w dwóch lub sporadycznie nawet we wszystkich trzech wyróżnionych podsystemach maszyny dochodziło do powstawania stanów niezdatności. Stany powodowane były awariami bądź koniecznością przeprowadzenia czynności zapobiegawczych przed powstawaniem niesprawności. Wielokrotnie okazywało się bowiem, że po przybyciu do maszyny stwierdzano, że pewne jej elementy, wprawdzie nie wykazujące jeszcze cech niesprawności, wymagały wymiany bądź regulacji. W szczególności dotyczyło to bębna roboczego, na którym w osadach osadzone były noże skrawające podłoże. Maszyna może pracować przy braku niektórych noży a ich brak czasem pozostaje niezauważony przez operatora. Podobnie w układzie przeniesienia napędu maszyna będzie pracowała np. przy niedostatecznej ilości oleju w przekładniach bocznych. Należy zaznaczyć, że wszystkie maszyny pracowały w warunkach polowych, w różnych częściach kraju, a wpływ czynnika osobowego - zarówno na utrzymanie maszyn w stanie zdatości jak i na poprawne prowadzenie czynności diagnostycznych i obsługowych - oceniono jako wysoki.

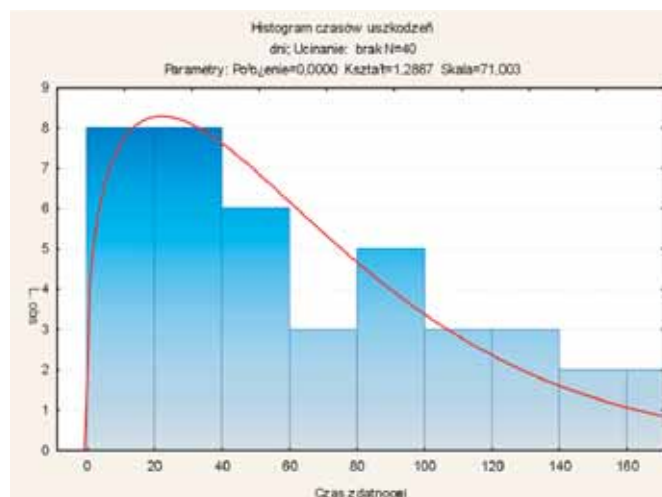
W tab. 2 przedstawiono podstawowe dane liczbowe uzyskane w trakcie prowadzenia analizy okresów zdatości i niezdatności badanych maszyn. Najdłuższy czas zdatości zaobserwowano dla podsystemu obejmującego układ hydrauliczny podnoszenia i opuszczania walca ugniatającego i wynosił on 457 dni, a średnia wartość czasu pomiędzy okresami niezdatności (MTBF) osiągnęła wartość 131,5 dnia. Spośród wyróżnionych trzech podsystemów rozdrabniarki, w stanie niezdatności najczęściej występował bęben roboczy, a średni czas pomiędzy stanami niezdatności wynosił blisko 94 dni. Cała maszyna, rozpatrywana jako szeregowy układ niezawodnościowy, znalazła się w stanie niezdatności 40 razy. Liczba ta nie stanowi sumy niezdatności poszczególnych podsystemów rozdrabniarki z powodu nakładania się lub równoczesnego, niezależnego od siebie występowania stanów niezdatności podsystemów maszyny (podobnie rzecz się przedstawia ze strumieniem niezdatności). Cała maszyna, jak i wyróżnione w niej podsystemy, cechowały się znaczną gotowością. Wskaźnik ten wahał się od 0,9755 dla całej maszyny do 0,9891 dla podsystemu hydrauliki. Tak znaczna jego wartość wynikała z tego, że czasy niezdatności były z reguły bardzo krótkie i w większości przypadków oscylowały wokół jednego dnia roboczego. Sprawne usuwanie niesprawności było możliwe dzięki temu, że zespół dokonujący usuwania niesprawności posiadał większość części zamiennych.

Histogram czasów zdatości badanej rozdrabniarki zilustrowano na rys. 3, na którym również przedstawiono uzyskany w wyniku obliczeń rozkład Weibulla. Obliczony parametr kształtu β wynosił 1,29, a więc blisko jedności. Parametr ten dobrze odzwierciedla położenie badanego obiektu na znanej krzywej „wannowej”, na której wyróżnia się trzy obszary: obszar charakterystyczny dla nowego urządzenia (o malejącym prawdopodobieństwie awarii), obszar możliwie niezawodnej pracy oraz obszar starzenia się urządzenia, w którym rośnie prawdopodobieństwo wystąpienia awarii [5]. Parametr kształtu bliski wartości 1 oznacza, że badana maszyna znajduje się w obszarze środkowym wykresu, a prawdopodobieństwo występowania stanów niezdatności jest stałe [7].

Tab. 2. Podstawowe wyniki analizy niezawodności badanej maszyny z wyróżnieniem jej podsystemów

Table 2. Basic results of the reliability analysis of the tested machine, with its sub-systems

Parametr	Cała maszyna	Układ napędu	Bęben roboczy	Układ hydrauliczny
Liczba niezdatności	40	24	28	19
Maksymalny obserwowany czas zdatości [dni]	169	320	190	457
MTBF [dni]	65,775	109,625	93,964	131,550
Strumień niezdatności [1/dzień]	0,015203	0,009122	0,010642	0,007602
Parametr kształtu rozkładu Weibulla β	1,2867	1,2015	1,4325	0,84621
Parametr skali rozkładu Weibulla η	71,003	116,01	102,60	111,37
Gotowość	0,9755	0,9858	0,9887	0,9891



Rys. 3. Histogram czasów zdatości w dniach dla rozdrabniarki MJS-2,5 DTG na tle rozkładu Weibulla

Fig. 3. A histogram presenting the up states for the MJS-2,5 DTG crusher in days against the Weibull distribution

W wyniku przeprowadzonej analizy uzyskano równania funkcji niezawodności dla poszczególnych podsystemów wyróżnionych w badanej maszynie. Równania funkcji niezawodności oraz zakresów argumentów, od wartości $t_0 = 0$ do wartości maksymalnego zaobserwowanego czasu zdatości przedstawiono poniżej:

- podsystem układ przeniesienia napędu:

$$R(t) = e^{-(t/116,01)^{1,2015}} \quad t \in (0,320), \quad (4)$$

- podsystem bęben roboczy:

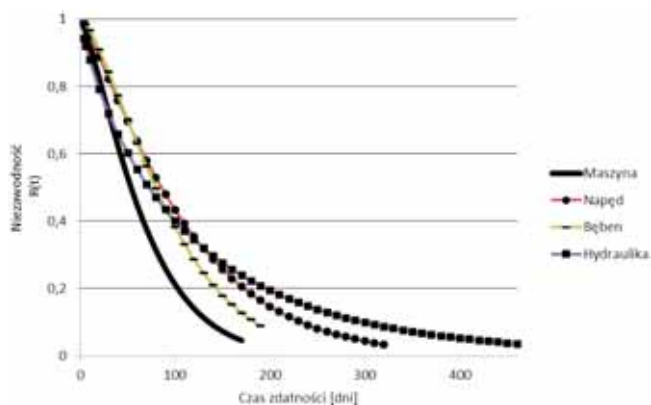
$$R(t) = e^{-(t/102,60)^{1,4325}} \quad t \in (0,190), \quad (5)$$

- podsystem układ hydrauliczny:

$$R(t) = e^{-(t/111,37)^{0,8462}} \quad t \in (0,457), \quad (6)$$

zaś dla rozdrabniarki rozpatrywanej jako całość równanie funkcji niezawodności ma postać:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{71,003}\right)^{1,2867}} \quad t \in (0, 169). \quad (7)$$



Rys. 4. Przebieg funkcji niezawodności $R(t)$ dla badanej rozdrabniarki MJS 2,5 DTG i wyróżnionych jej podsystemów
Fig. 4. The reliability function $R(t)$ for the MJS-2,5 DTG crusher and its sub-systems

Przebieg funkcji niezawodności dla badanej maszyny i jej podsystemów przedstawiono na rys. 4, uwzględniając obserwowane czasy zdatności jako wartości argumentów funkcji. Odczytując prawdopodobny czas zdatności rozdrabniarki można zauważyć, że prawdopodobieństwo poprawnej pracy przez przynajmniej 100 dni wynosi zaledwie 0,2, a przy podobnej wartości prawdopodobieństwa podsystemy hydrauliki jak i układu przeniesienia napędu pracować mogą poprawnie przez przynajmniej 200 dni.

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza podstawowych wskaźników niezawodnościowych rozdrabniarki pozwoliła na określenie prawdopodobieństw poprawnej pracy maszyny, jak i jej poszczególnych podsystemów (wyróżnionych głównych układów). Badania wykazały, że z uwagi na specyfikę działania maszyny największa liczba niezdatności dotyczyła bębna roboczego. Wartość średniego czasu między uszkodzeniami jest dla tego układu najkrótsza. Dogłębna analiza niezdatności tego podsystemu pozwala na zaplanowanie kroków zapo-

biegawczych w przyszłości (zabezpieczenie materiałowe), obejmujących profilaktyczne wymiany np. noży roboczych, w przypadku zaobserwowania początkowych efektów zużycia.

Przebieg powstawania niezdatności w czasie stosunkowo dobrze odzwierciedla rozkład Weibulla. Parametr kształtu tego rozkładu, zarówno dla wyróżnionych poszczególnych układów, jak i dla całej maszyny, jest zbliżony do jedności, co oznacza, że maszyna znajduje się w normalnej fazie użytkowania a prawdopodobieństwo powstawania zdarzeń powodujących niezdatność jest stałe w czasie.

Z uwagi na duży rozmiar prac związanych z użyciem pozostałości zrębowych oraz zróżnicowaną strukturą własnościową rozdrabniarek, informacje uzyskane w toku przeprowadzonych analiz mogą zostać wykorzystane przez stosunkowo dużą liczbę użytkowników. Szacuje się, że aby wykonać roczne zadania gospodarce na powierzchni około 30 tys. ha istnieje potrzeba użytkowania około 150 maszyn (rozdrabniarek z poziomą osią obrotu bębna roboczego). Stąd dostrzega się duże znaczenie przeprowadzonych analiz tych maszyn na tle szerokiego spektrum procesów technologicznych stosowanych w gospodarce leśnej.

Bibliografia

- [1] Adamkiewicz W., Hempel L., Podsiadło A., Śliwiński R.: Badania i ocena niezawodności maszyny w systemie transportowym. WKiŁ, Warszawa, 1983.
- [2] Antony G.G.: How to determine the MTBF of gearboxes. Power Transmission Engineering, 2008, No. 4.
- [3] Gnienenko B.W., Bielajew J.K., Sołowiew A.D.: Metody matematyczne w teorii niezawodności. WNT, Warszawa, 1968.
- [4] Hebda M., Janicki D.: Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji. WKiŁ, Warszawa, 1977.
- [5] Pradhan, S.A.: Applied risk and reliability for turbomachinery. Part II - Reliability calculations. Proceedings of the thirty-fourth turbomachinery symposium. 2005. <http://turbolab.tamu.edu/proc/turboproc/T34/t34-18.pdf> (korzystano 22.11.2013).
- [6] Szkoda M.: Wskaźniki niezawodności środków transportu szynowego. Logistyka, 2012, Nr 3.
- [7] Walanus A.: Statystyka w badaniu niezawodności. 2000. www.statsoft.pl/czytelnia.html (korzystano 20.10.2013).

RELIABILITY ASSESSMENT OF A MJS-2,5 DTG CRUSHER AS A COMPLEX TECHNICAL OBJECT

Summary

The paper contains a reliability analysis of MJS-2,5 DTG crusher for forestry operations. The machines were broken down to three sub-systems (drive system, working drum and the hydraulic system) and each of them was analysed. The reliability analysis contained determination of the parameters of Weibull distribution for down-time states, the reliability function, MTBF and availability. The MTBF value for the tested crushers was 65,8 days and the shape parameter of Weibull distribution was 1,3. The hydraulic sub-system was the most reliable, and its function was to control the position of the rear drum of the machine. The working drum with cutters crushing branches on a forest area was the least reliable sub-system.

Key words: crusher, reliability, MTBF, maintenance process