



POLITECHNIKA POZNAŃSKA
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Instytut Mechaniki Stosowanej



Rozprawa doktorska

Metodyka parametryzacji oddziaływań wibroakustycznych
zmechanizowanych narzędzi ręcznych o niestacjonarnym
trybie pracy na przykładzie pilarki łańcuchowej

mgr inż. Wojciech RUKAT

Promotor:

dr hab. inż. Roman BARCZEWSKI

Promotor pomocniczy:

dr inż. Małgorzata WOJSZNIS

Poznań, 2023

Najserdeczniejsze podziękowania pragnę złożyć:

Promotorowi

dr hab. inż. Romanowi BARCZEWSKIEMU

za okazaną życzliwość i wyrozumiałość

oraz nieocenioną pomoc w realizacji prac badawczych

Promotorowi pomocniczemu

dr. inż. Małgorzacie WOJSZNIS

za cenne wskazówki i uwagi edytorskie

Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych o. w Poznaniu

za wyrażenie zgody na realizację pomiarów terenowych,

a w szczególności Panu Zbigniewowi ŁYSZCZARZOWI

nadleśniczemu w nadleśnictwie Babki

za wsparcie w organizacji pomiarów

Panu Piotrowi KIELOWI

właścicielowi Zakładu Usług Leśnych „Laspark”

za osobiste zaangażowanie

i czynny udział w realizacji pomiarów

Kolegom: Karolowi GROCHALSKIEMU,

Bartoszowi JAKUBKOWI i Matuszowi WRÓBLOWI

za współpracę w zakresie rozeznania tematyki badawczej

związanej z niniejszą rozprawą

Niniejszą pracę dedykuję Joannie,

Spis treści

Streszczenie	- 5 -
Abstract	- 6 -
1. Wstęp	- 7 -
1.1. Wprowadzenie	- 7 -
1.2. Motywacja podjęcia tematu	- 9 -
1.3. Cel i zakres pracy	- 11 -
2. Przegląd aktualnie stosowanych metod parametryzacji oddziaływań WA na stanowiskach pracy	- 13 -
2.1. Pomiary hałasu na stanowisku pracy	- 13 -
2.1.1. Kryteria podziału hałasu	- 13 -
2.1.2. Szkodliwy wpływ hałasu na organizm człowieka	- 14 -
2.1.3. Miary parametryzujące hałas i zagrożenie hałasem	- 15 -
2.1.4. Wartości kryterialne oceny narażenia na hałas	- 23 -
2.1.5. Strategie pomiarów hałasu na stanowiskach pracy	- 25 -
2.1.6. Budżet niepewności pomiarowej w pomiarach hałasu	- 30 -
2.1.7. Określanie ryzyka zawodowego związanego z narażeniem na hałas	- 33 -
2.1.8. Zasady i kryteria doboru ochronników słuchu jako indywidualnych środków ochrony na stanowiskach pracy	- 37 -
2.2. Pomiary drgań na stanowisku pracy	- 41 -
2.2.1. Kryteria podziału drgań	- 41 -
2.2.2. Szkodliwy wpływ drgań na człowieka	- 42 -
2.2.3. Miary parametryzujące drgania miejscowe i narażenie na drgania	- 45 -
2.2.4. Miary charakteryzujące oddziaływanie drgań miejscowych i ich wartości dopuszczalne	- 47 -
2.2.5. Strategie pomiarów drgań na stanowiskach pracy	- 52 -
2.2.6. Budżet niepewności pomiarowej w pomiarach drgań	- 58 -
2.2.7. Określenie poziomu ryzyka zawodowego dla narażenia drganiami	- 61 -
2.2.8. Zasady i kryteria doboru rękawic antywibracyjnych	- 63 -
3. Czynniki wpływające na hałas emitowany przez pilarki łańcuchowe	- 66 -
4. Czynniki wpływające na drgania pilarek łańcuchowych	- 69 -
4.1. Wpływ materiału obrabianego na drgania na rękojeściach pilarek	- 70 -
4.2. Wpływ czynników organizacyjnych na narażenie operatorów pilarek łańcuchowych na drgania	- 72 -
4.3. Wpływ cech osobniczych operatorów na drgania uchwytów pilarek	- 75 -
4.4. Wpływ konfiguracji podzespołów pilarki na drgania	- 79 -
5. Koncepcja i zarys proponowanej metodyki pomiarowej	- 91 -
6. Rejestracja, parametryzacja i analiza drgań i hałasu	- 101 -
6.1. Miejsce wykonywania pomiarów oraz warunki środowiskowe	- 101 -
6.2. Charakterystyka udostępnionego do badań drzewostanu	- 102 -

6.3. Pilarka i osprzęt	- 104 -
6.4. System synchronicznej rejestracji sygnałów WA i AV	- 105 -
6.5. System analizy i parametryzacji sygnałów WA	- 111 -
7. Specyfika oddziaływań WA na stanowisku pracy pialrza	- 115 -
7.1. Hałas	- 115 -
7.2. Drgania	- 121 -
8. Metodyka tworzenia baz danych STVD i STND	- 131 -
8.1. Identyfikacja trybów pracy pilarki i operacji realizowanych na stanowisku pilarz-drwal	- 131 -
8.2. Dawki hałasu dla poszczególnych trybów pracy pilarki	- 135 -
8.3. Dawki drgań dla poszczególnych trybów pracy pilarki	- 137 -
8.4. Funkcje skalujące	- 139 -
8.4.1. Wprowadzenie	- 139 -
8.4.2. Dawki hałasu w zależności od średnicy pnia	- 139 -
8.4.3. Dawki drgań w zależności od średnicy pnia	- 142 -
8.4.4. Średnica strzały pnia w funkcji wysokości	- 144 -
8.5. Przykład oszacowania dawki drgań na podstawie współczynników wagowych	- 147 -
8.6. Zestawienie wyników badań	- 150 -
8.6.1. Wyniki parametryzacji hałasu	- 151 -
8.6.2. Wyniki parametryzacji drgań	- 152 -
8.6.3. Wartości współczynników korekcyjnych α_{Di} i α_{Ei}	- 154 -
8.7. Pilotażowa baza danych STND i STVD	- 154 -
9. Implementacja i walidacja opracowanej metody	- 157 -
9.1. Przykładowe scenariusze prac leśnych	- 157 -
9.2. Walidacja opracowanej metody oszacowania narażenia na hałas i drgania	- 159 -
9.2.1. Hałas	- 160 -
9.2.2. Drgania	- 163 -
10. Wnioski	- 166 -
Spis literatury	- 171 -

Streszczenie

Niniejsza praca stanowi propozycję nowej metody szacunkowej pomiarów drgań i hałasu, oraz wyznaczenia poziomu narażenia na drgania i hałas na stanowiskach pracy, alternatywną do powszechnie stosowanych pomiarów dozymetrycznych.

Metodyka badacza opiera się na jednostkowych dawkach drgań i hałasu odniesionych do odpowiednio zdefiniowanych i zidentyfikowanych trybów pracy, których łączne działanie świadczy o niestacjonarnym charakterze pracy urzędnika jakiego jest pilarka łańcuchowa.

Na podstawie dawek jednostkowych wyznacza się dawki sumaryczne dla stanów obciążenia jednostki napędowej pilarki a następnie skumulowaną wartość globalną – STVD (*Single Tree Vibration Dose*) oraz STND (*Single Tree Noise Dose*) związaną z realizacją czynności elementarnej jaką jest pozyskanie – tzw. wyrzynka sortymentów drzewnych.

Wartości parametrów STVD i STND szacuje się zgodnie z omówionymi w pracy tzw. funkcjami skalującymi – dawki drgań w funkcji średnicy: $D = f(\varphi)$, dawki hałasu w funkcji średnicy: $E = f(\varphi)$, oraz średnicy pnia w zależności od długości sortymentów: $\varphi = f(L_n)$.

Zaproponowane w pracy jednolicebne parametry pozwalają, zgodnie z odpowiednimi formułami wyznaczenie dziennej ekspozycji na drgania – $A(8)$ oraz poziomu dziennej ekspozycji na hałas – $L_{EX,8h}$.

Abstract

This paper is a proposal of a new method of estimating vibration and noise measurements, and determining the level of exposure to vibrations and noise at workplaces, an alternative to the commonly used dosimetric measurements.

The research methodology is based on unit doses of vibrations and noise related to properly defined and identified operating modes, the combined operation of which proves the non-stationary nature of the operation of the chainsaw device.

On the basis of unit doses, total doses are determined for the load states of the saw drive unit, and then the cumulative global value – STVD (*Single Tree Vibration Dose*) and STND (*Single Tree Noise Dose*) related to the implementation of the elementary activity, which is the acquisition of so-called logging of wood assortments.

The values of the STVD and STND parameters are estimated in accordance with the so-called scaling functions – vibration dose as a function of wood diameter: $D = f(\varphi)$, noise dose as a function of wood diameter: $E = f(\varphi)$, and trunk diameter depending on the length of the assortments: $\varphi = f(L_h)$.

The single-number parameters proposed in the work allow, in accordance with the appropriate formulas, to determine the daily exposure to vibrations – $A(8)$ and the level of daily exposure to noise – $L_{EX,8h}$.

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Korzystanie, w trakcie szeroko rozumianej aktywności zawodowej, z różnego rodzaju zmechanizowanych narzędzi ręcznych (ZNR), mających własne źródło napędu (np. silnik elektryczny) jest efektem szeroko rozumianej mechanizacji prac. Głównymi celami mechanizacji prac są zmniejszenie wydatku fizycznego pracownika, oraz poprawa komfortu pracy przy jednoczesnym zwiększeniu wydajności.

Realizacja ww. celów niewątpliwie stanowi zaletę płynącą z użytkowania ZNR, jednakże mechanizacja prac niesie ze sobą również szereg wad. Jedną z istotniejszych jest zwiększenie narażenia użytkownika na szkodliwe działanie czynników fizycznych m.in. takich jak hałas i wibracje. W zależności od rodzaju narzędzia/urządzenia/maszyny emitowane drgania mogą mieć charakter miejscowy (np. narzędzia ręczne) i/lub ogólny (np. maszyny wyposażone w siedzisko). Oprócz wspomnianych już konsekwencji, mechanizacja prac powoduje także zwiększenie obciążenia psychicznego związanego z obsługą narzędzia, wymagając od użytkownika zachowania szczególnej uwagi i zwiększonej koncentracji. Dodatkowo, w trakcie korzystania ze zmechanizowanych narzędzi ręcznych pracownicy bardzo często narażeni są na różnego rodzaju zranienia, często poważne w skutkach, wynikające z nieuważnej bądź też niewłaściwej obsługi urządzenia prowadzące do wypadków [1]. Blisko 12 % wypadków związanych jest z pracą z użyciem narzędzi ręcznych, a 8,7 % obsługiwaniem maszyn i urządzeń.

W zależności od stanowiska pracy, rodzaju wykonywanej czynności czy rodzaju podejmowanej aktywności zawodowej, pracownik może być narażony także na szkodliwe działanie pozostałych szkodliwych czynników fizycznych (np. promieniowania laserowego), chemicznych (substancje toksyczne), biologicznych (np. pleśnie), czy tych będących efektem realizacji procesu technologicznego (pyły, spaliny itd.). Informacje o tego typu zagrożeniach związanych ze stanowiskiem pracy pilarz-drwal i ich wpływie na ludzkie zdrowie przedstawiono w pracach [2–7].

Wartości Najwyższych Dopuszczalnych Natężeń (NDN), Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń (NDS) oraz Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń Chwilowych (NDSCh) czynników

szkodliwych zawarte są w *Rozporządzeniu Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Socjalnej z dn. 12 czerwca 2018r.* (Dz. U. 2018 poz. 1286) [8].

Wartości NDN, NDS i NDSCh stanowią podstawę oceny zagrożenia – ryzyka zawodowego na danym stanowisku pracy i oceny ergonomicznej, jaką pracodawca ma obowiązek realizować regularnie, zgodnie z obowiązującym Kodeksem Pracy [9].

Pracodawca ma obowiązek prowadzenia okresowej kontroli warunków pracy i oceny ryzyka zawodowego niezależnie od rodzaju prowadzonej działalności. Oceny tej dokonuje się m. in. poprzez regularne wykonywanie pomiarów wartości natężeń i stężeń czynników szkodliwych na stanowisku pracy.

Różnorodność czynników szkodliwych, a co za tym idzie metod i strategii pomiarowych związanych z wyznaczaniem wartości NDN, NDS i NDSCh tych czynników powoduje, że kluczową sprawą jest właściwy dobór samej metody, oraz techniki/strategii pomiarowej ze szczególnym uwzględnieniem konkretnego stanowiska pracy. Specyfika samej metody może powodować, że w warunkach konkretnego stanowiska pracy będzie ona nieadekwatna, trudna w realizacji, bądź też całkowicie niemożliwa do zastosowania.

Stanowiska na których używane są ZNR charakteryzują się zwykle:

- wysoką mobilnością pracownika w trakcie realizacji typowych zadań roboczych
- brak ściśle sprecyzowanego miejsca i pola pracy,
- nieregularnym tempem pracy wynikającym z zadaniowego charakteru działań,
- szerokim zakresem zmienności warunków środowiskowych i warunków otoczenia,
- częstymi i trudnymi do przewidzenia w czasie zmiany roboczej naprzemiennie realizowanymi, powtarzalnymi czynnościami i zadaniami,
- użytkowaniem szerokiej gamy zmechanizowanych narzędzi ręcznych w ciągu jednej zmiany roboczej przez pracownika.

Do takiej grupy bezsprzecznie można zaliczyć stanowisko pracy pilarza-drwala, które zostało wybrane i poddane analizie pod kątem oddziaływań wibroakustycznych na operatora. W ramach niniejszej pracy zaproponowano metodykę parametryzacji oddziaływań wibroakustycznych (WA) uwzględniającą ich niestacjonarny charakter.

1.2. Motywacja podjęcia tematu

Podjęta tematyka badawcza wynika z faktu, że zdecydowana większość stosowanych zmechanizowanych narzędzi ręcznych, charakteryzuje się niestacjonarnością trybu pracy. Niestacjonarność przejawia się m.in. poprzez częste i nagłe zmiany prędkości obrotowej i/lub kierunku ruchu w trakcie pracy z narzędziem. Powodem takiego stanu rzeczy może być zmienne w czasie obciążenie, quasi-cykliczność procesu, czy też konstrukcja samego urządzenia – konieczność spełnienia odpowiedniej funkcji celu.

Wiadomym jest, że istnieją zmechanizowane narzędzia ręczne, generujące hałas i drgania, których poziomy lub wartości przekraczają wartości dopuszczalne dla narażenia długotrwałego – trwającego 8 h. Dopuszczalny dzienny poziom ekspozycji na hałas – $L_{EX,8h}$ nie powinien przekraczać 85 dB, natomiast dzienna ekspozycja na drgania – $A(8)$ nie powinna przekraczać $2,8 \text{ m/s}^2$.

Niektóre z narzędzi, np. młoty wyburzeniowe, generują hałas i drgania przekraczające wartości dopuszczalne dla narażeń krótkotrwałych. Wobec czego, użytkowanie takich narzędzi przez pracownika nie powinno mieć w ogóle miejsca.

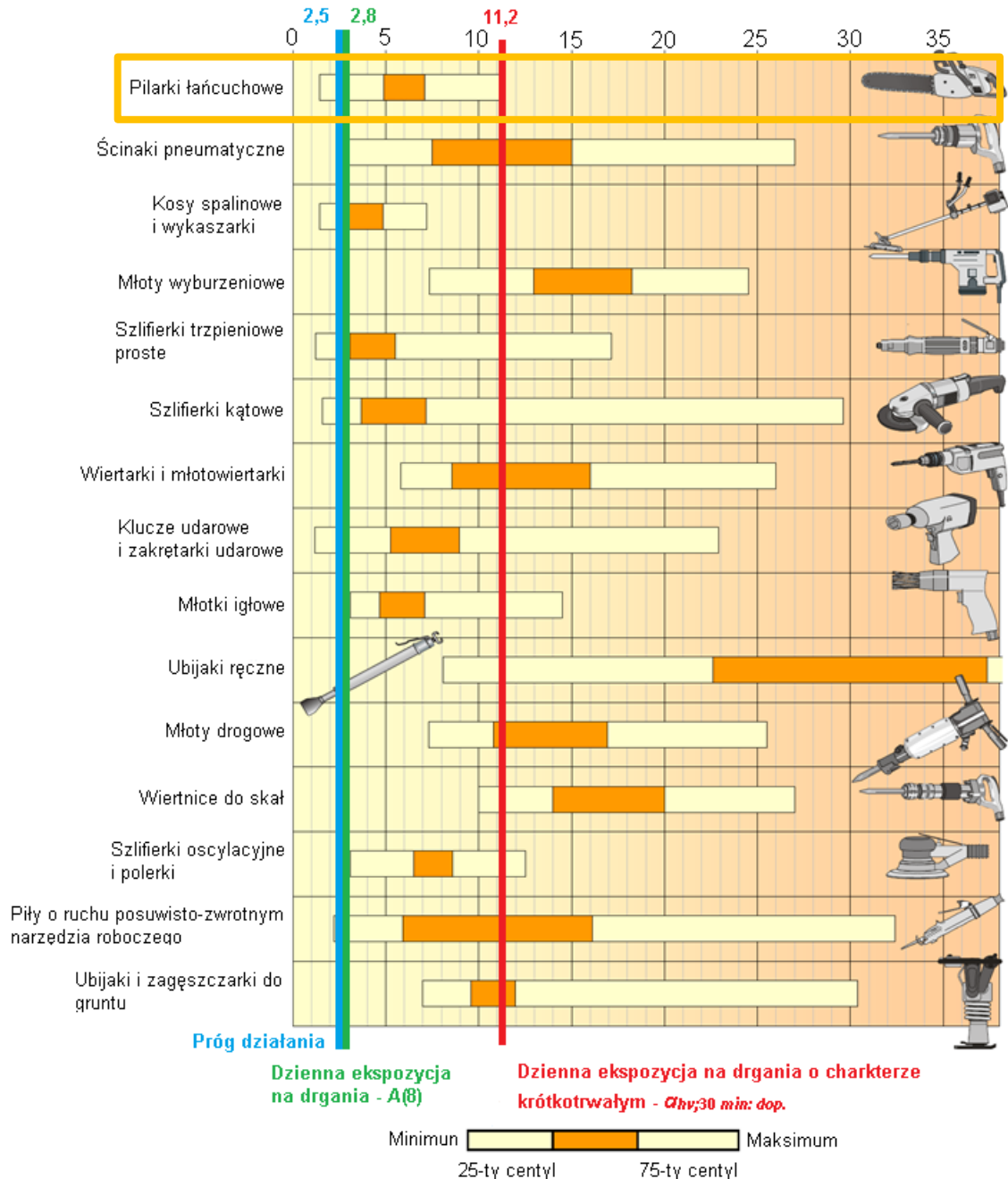
Wyniki prac zespołu badawczego prowadzonego przez M. J. Griffin [10], prezentujące zakresy zmierzonych na rękojeściach urządzeń wartości skutecznych przyspieszeń drgań – a_{hv} , dla najpowszechniej stosowanych typów/rodzajów zmechanizowanych narzędzi ręcznych przedstawiono na rysunku 1.1 – patrz następna strona. Wyróżniono na nim dane związane z zakresem zmienności przyspieszeń drgań dla grupy urządzeń jakimi są pilarki łańcuchowe.

Na rysunku 1.1 zaznaczono także wartość progu działania – *VAL (Vibration Action Level)* wynoszącą $2,5 \text{ m/s}^2$ po przekroczeniu, którego pracodawca powinien stale monitorować narażenie na drgania i w razie potrzeb podjąć odpowiednie działania mające na celu jego ograniczenie. Dodatkowo wyróżniono także wartość dopuszczalne NDN dla drgań miejscowych w odniesieniu do typowego 8-mio godzinowego dnia pracy – $A(8) = 2,5 \text{ m/s}^2$ oraz narażenia krótkotrwałego $a_{hv,30min \text{ dop.}}$ wynoszącą $11,2 \text{ m/s}^2$.

Jak wynika z rysunku w zdecydowanej większości przypadków dla większości danego typu narzędzi w danej grupie (np. młotów wyburzeniowych) występują przekroczenia wartości progu działania i NDN zarówno dla narażenia długotrwałego jak i krótkotrwałego.

W przypadku przekroczenia wartości $a_{hv,30min\ dop.}$ praca takim narzędziem powinna być kategoriycznie zabroniona.

Ważona częstotliwościowo z charakterystyką korekcyjną W_h suma wektorowa wartości skutecznych przyspieszeń drgań - $a_{hv,RMS}$ [m/s²]



Rysunek 1.1 Zakresy zmienności wartości przyspieszeń drgań zmierzonych dla najpowszechniej używanych typów ZNR – na podstawie [10]

Obecnie stosowane i preferowane w przypadku oddziaływań o charakterze niestacjonarnym metody pomiarowe, służące wyznaczeniu wartości istotnych parametrów

opisujących szkodliwy wpływ hałasu i drgań na pracownika, charakteryzujących dane stanowisko pracy, tj.: dawki drgań – D , ekspozycji na drgania – $A(8)$, ekspozycji na hałas (tzw. dawki hałasu) – E_A oraz poziomu ekspozycji na hałas – $L_{EX,8h}$ opierają się na operatorach całkowych.

Stosowanie tych metod wymusza zatem konieczność prowadzenia pomiarów w określonym przedziale czasu, zwykle jest to czas ekspozycji T_e . W zależności od przyjętej strategii pomiarowej czas trwania takiego pomiaru może wynosić od kilku minut do 8 h – w przypadku pomiarów dozymetrycznych realizowanych przez cały czas zmiany roboczej, a nawet obejmować kilka dni (sesji) pomiarowych.

W przypadku stanowiska pilarz-drwał realizacja pomiarów dozymetrycznych nie jest bezpieczna a czasami wręcz nie jest możliwa. Wynika z tego konieczność opracowania metodyki pomiarowej gwarantującej bezpieczeństwo operatora i personelu wykonującego pomiary.

Z drugiej strony konsekwencją stosowania metod dozymetrycznych jest wydłużenie czasu pomiaru i uśredniania która uniemożliwia identyfikację i ocenę zjawisk i oddziaływań incydentalnych (krótkotrwałych) – takich jak np. uderzenia, mogących wystąpić podczas pracy. Dodatkowo pomiary dozymetryczne – niezależnie od czasu trwania nie dają pełnej informacji nt. charakteru samego procesu np. drgania udarowe/impulsowe, zdarzenia losowe itp.

Z powyższych przesłanek jasno wynika potrzeba opracowania nowej metody i/lub uzupełnienia aktualnie stosowanych metod pomiarów i parametryzacji oddziaływań WA, która pozwalałaby również na analizę zjawisk incydentalnych, szczególnie gdy łączny czas trwania tych zdarzeń jest znaczący w odniesieniu do łącznego czasu trwania pomiaru.

1.3. Cel i zakres pracy

Celem głównym niniejszej pracy było opracowanie metodyki parametryzacji oddziaływań wibroakustycznych zmechanizowanych narzędzi ręcznych o niestacjonarnym trybie pracy – pilarek łańcuchowych.

Celem dodatkowym było utworzenie pilotażowej bazy danych jednostkowych dawek hałasu i drgań związanych z wyrzynką pojedynczego drzewa (*Single Tree Noise Dose* – STND

i *Single Tree Vibration Dose* – STVD), będących podstawą nowej metody parametryzacji drgań i hałasu.

Zakres pracy obejmował między innymi niżej wymienione zadania i zagadnienia:

- Wykonanie przeglądu literaturowego ukierunkowanego na zagadnienia związane z metodami parametryzacji oddziaływań wibroakustycznych na stanowiskach pracy, ze szczególnym uwzględnieniem obecnie stosowanych normowych metod i strategii pomiarowych. Efektem przeglądu było wskazanie cech i ograniczeń obecnie stosowanych tych metod w aspekcie możliwości ich stosowania do pomiaru i oceny zagrożenia drganiami na stanowisku pracy pilarza,
- Identyfikacja istotnych czynników wpływających na drgania i hałas emitowany przez pilarki. Przeanalizowanie czynników takich jak m.in. parametry techniczne i konfiguracja pilarki, cechy osobnicze operatora pilarki, czynniki organizacyjne organizacyjnych,
- Opracowanie koncepcji nowej metodyki parametryzacji oddziaływań wibroakustycznych, procedury pomiarowej i zdefiniowanie formuł obliczeniowych,
- Pozyskanie materiału badawczego obejmującego wykonanie rejestracji drgań i hałasu w rzeczywistych warunkach pracy pilarza oraz cyfrowe przetwarzanie sygnałów wibroakustycznych obejmujące wielowariantową parametryzację i analizy. Efektem tego zadania było pozyskanie danych umożliwiających określenie specyfiki drgań i hałasu emitowanego przez pilarkę, ocenę jej wibroaktywności,
- Opracowanie metodyki tworzenia bazy danych STVD i STND obejmujące różne warianty pozyskiwania danych pomiarowych. I utworzenie pilotażowej bazy danych,
- Implementacja opracowanej metodyki dla przykładowych scenariuszy dziennej wycinki drzew oraz przeprowadzenie walidacji metody,
- Sformułowanie wniosków końcowych, poznawczych i użytkowych oraz zarysowanie przesłanek do dalszych prac badawczych w tej tematyce.

2. Przegląd aktualnie stosowanych metod parametryzacji oddziaływań WA na stanowiskach pracy

W niniejszym rozdziale zaprezentowano stosowane obecnie techniki i metody parametryzacji oddziaływań akustycznych i drganiowych na stanowiskach pracy. Opisano: podstawy tych metod, stosowane na potrzeby określenia narażenia miary oraz ich wartości dopuszczalne. Zwrócono uwagę na cechy tych metod: zalety, wady i ograniczenia ze szczególnym uwzględnieniem możliwości ich implementacji na stanowisku pracy pilarz-drwal.

2.1. Pomiary hałasu na stanowisku pracy

Poniżej przedstawiono podstawowe informacje dotyczące m.in. kryteriów podziału hałasu i drgań na stanowiskach pracy. Omówiono ich szkodliwy wpływ na organizm ludzki, przedstawiono podstawowe miary stosowane do ich opisu a także omówiono wartości kryterialne tych parametrów.

Podano informacje dotyczące: obecnie stosowanych strategii pomiarowych, budżetu niepewności pomiarowej oraz zasad doboru środków ochrony osobistej.

2.1.1. Kryteria podziału hałasu

Spośród wielu czynników fizycznych na jakie narażony jest człowiek w trakcie swojej aktywności zawodowej narażenie na hałas występuje najpowszechniej spośród wszystkich możliwych rodzajów narażenia na czynniki szkodliwe w miejscu pracy [11]. Hałas ten może być związany z samym stanowiskiem lub pochodzić z zewnątrz. Ze względu na pochodzenie hałasu możemy określić jego naturę jako:

- hałas mechaniczny – generowany przez pracujące maszyny i urządzenia posiadające napęd: spalinowy, elektryczny, hydrauliczny, pneumatyczny lub inny,
- hałas aerodynamiczny i hydrodynamiczny – związany z przepływem gazów i cieczy,
- hałas technologiczny – będący wynikiem realizacji procesu technologicznego.

Jednym z podstawowych parametrów służącym do opisu zjawisk akustycznych jest częstotliwość emitowanego dźwięku. W ujęciu częstotliwościowym hałas na stanowiskach pracy może być rozpatrywany i mierzony w zakresie/paśmie:

- infradźwiękowym – od 0 do 20 Hz lub niskoczęstotliwościowym (od ok. 10 Hz do ok. 250 Hz dla zakresu dźwięków słyszalnych),
- dźwięków słyszalnych dla ludzkiego ucha (od ok. 20 Hz do 20 kHz),
- ultradźwiękowym i wysokoczęstotliwościowym w paśmie słyszalnym (od 10 kHz do 40 kHz).

W szczególnych przypadkach na stanowisku pracy może wystąpić oddziaływanie w dwóch lub wszystkich wymienionych zakresach częstotliwości.

Analizując zmienność w czasie charakteru oddziaływania akustycznego, zgodnie z normami PN-EN ISO 11200:2014-10 oraz ISO 25417:2007 [12, 13] możemy wyróżnić:

- hałas ustalony – którego poziom, mierzony z charakterystyką korekcyjną *A* i stałą czasową *SLOW*, w trakcie trwania obserwacji nie zmienia się o więcej niż 5 dB,
- hałas nieustalony – którego poziom, mierzony z charakterystyką korekcyjną *A* i stałą czasową *SLOW*, w trakcie obserwacji zmienia się o więcej niż 5 dB,
- hałas impulsowy – składający się z co najmniej jednego lub kilku zdarzeń akustycznych trwających nie dłużej niż 1 sekunda każdy.

Charakter hałasu, który występuje na konkretnym stanowisku pracy determinuje dobór odpowiedniej strategii pomiarowej – jednej z trzech, określonych w normie PN-EN ISO 9612:2011 [14]. Poszczególne strategie pomiarowe, zasady ich doboru oraz zalety i ograniczenia zostały szczegółowo opisane w rozdziale 2.1.5.

2.1.2. Szkodliwy wpływ hałasu na organizm człowieka

W literaturze można spotkać wiele przykładów szkodliwego oddziaływania hałasu na organizm ludzki. Ze względu na charakter działania możemy mówić o: hałasie uciążliwym – powodującym np. problemy z porozumiewaniem się, koncentracją itp. oraz hałasie szkodliwym – wywołującym negatywne zmiany w organizmie człowieka.

Szkodliwe skutki oddziaływania hałasu na organizm człowieka można podzielić na:

- związane z narządem słuchu, które dzielimy na:
 - przemijające – np. szумы i piski w uszach,
 - trwale – nieodwracalne częściowe pogorszenie słuchu lub jego całkowita utrata.
- pozasłuchowe – takie jak np.: pogorszenie samopoczucia, rozdrażnienie, uczucie niepokoju itp.

Ze względu na tempo i czas wystąpienia negatywnych skutków oddziaływania akustycznego możemy mówić o zmianach występujących nagle oraz zmianach postępujących w czasie.

W swojej pracy Bortkiewicz i Czaja wykazali, że narażenie na hałas zwiększa ryzyko chorób układu krążenia z wystąpieniem zawału serca włącznie [15]. Natomiast M. Basner i inni wykazali, że narażenie akustyczne zwiększa ryzyko wystąpienia chorób takich jak: nadciśnienie tętnicze, udar, zawał mięśnia sercowego [16], co potwierdzają wyniki badań zaprezentowanych przez Bortkiewicza i Czaję w pracy [15]. M. Basner i inni wykazali m. in., że negatywne skutki oddziaływania hałasu są potęgowane przez drgania [17].

Z kolei A. Fonseca i inni wykazali, że osoby pracujące na stanowisku pilarz-drwał są narażone na utratę słuchu – szczególnie w paśmie oktawowym o częstotliwości 4 kHz [18].

2.1.3. Miary parametryzujące hałas i zagrożenie hałasem

Dźwięk jest chwilowym i miejscowym zaburzeniem ośrodka sprężystego jakim jest np. powietrze (w ograniczonym zakresie również ciała stałe i ciecze), związanym ze zmianami chwilowego ciśnienia akustycznego. Zaburzenie to jest związane z lokalną zmianą wartości ciśnienia autystycznego względem wartości średniego ciśnienia atmosferycznego, zdolną do wywołania wrażenia słuchowego. Aby wystąpiło wrażenie słuchowe zmiana wartości ciśnienia musi przekroczyć określoną wartość nazywaną ciśnieniem odniesienia p_0 . Wartość ciśnienia odniesienia wynosi $20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$.

Wartość średnia ciśnienia akustycznego – p_{SR} interpretowana może być na dwa sposoby – jako wartość całookresowa i półokresowa – z wartości bezwzględnej sygnału. Opisana jest odpowiednio zależnościami (2.1) oraz (2.2):

$$p_{\text{ŚR}} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt, \quad (2.1)$$

$$p_{\text{AVG}} = \frac{1}{T} \int_0^T |p(t)| dt, \quad (2.2)$$

gdzie: T – czas trwania pomiaru,
 $p(t)$ – ciśnienie akustyczne.

Wartość skuteczna ciśnienia akustycznego – p_{RMS} (**Root Mean Square**), nazywana jest także wartością średniokwadratową. Wartość skuteczna jest proporcjonalna do energii jaką niesie ze sobą sygnał i opisana jest zależnością (2.3):

$$p_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt}, \quad (2.3)$$

Wartość szczytowa ciśnienia akustycznego – jest to największa – p_{PEAK^+} oraz najmniejsza – p_{PEAK^-} chwilowa wartość sygnału w danym przedziale czasu. Różnica pomiędzy wartością szczytową p_{PEAK^+} a wartością p_{PEAK^-} ciśnienia akustycznego nazywana jest wartością międzyszczytową PEAK–PEAK (P–P). Wartości szczytowe ciśnienia akustycznego dana są wzorami:

$$p_{\text{peak}^+} = \max_t \{p(t)\}, \quad (2.4)$$

$$p_{\text{peak}^-} = \min_t \{p(t)\}. \quad (2.5)$$

Niekiedy dogodniej posługiwać się wartością szczytową uzyskaną z modułu ciśnienia akustycznego, zgodnie z wzorem:

$$p_{\text{peak}} = \max_t \{|p(t)|\}. \quad (2.6)$$

Dla typowego zakresu zmienności ciśnienia akustycznego jakie jest w stanie odebrać ludzkie ucho tj. od 20 μPa dla progu słyszalności do ok. 20 Pa dla progu bólu, lepszym sposobem wyrażania wartości parametrów opisujących zjawiska akustyczne jest skala logarytmiczna.

Ze względu na budowę anatomiczną ludzkiego narządu słuchu, silnie nieliniowy charakter działania tego zmysłu oraz różnicowanie cech osobniczych (np. próg czułości) w praktyce zamiast ciśnienia akustycznego stosowany jest poziom dźwięku – L_p .

Właściwości logarytmu, pozwalają na opis względnych zmian bodźca słuchowego – związane jest to z prawem Webera–Fechnera [19]. Zgodnie z nim subiektywna reakcja

organizmu na bodziec – tzn. intensywność i tempo wystąpienia są proporcjonalne do logarytmu względnej zmiany tego bodźca.

Do parametryzacji zjawisk akustycznych na jakie narażony jest organizm ludzki mogą mieć zastosowanie następujące wielkości pomiarowe:

- L_p (L_{pA} ; L_{pC}) – poziom dźwięku (opcjonalnie skorygowany charakterystyką korekcyjną A lub C),
- $L_{A\ max}$ – maksymalny poziom dźwięku A ,
- $L_{C\ peak}$ – szczytowy chwilowy poziom dźwięku C ,
- L_{A,eq,T_e} ; $L_{A,eq,8h}$ – poziom równoważny dźwięku A odniesiony do rzeczywistego czasu pomiaru T_e lub 8-mio godzinnego dnia pracy (wtedy: $T_e = 8h$),
- E_A ; $E_{A,8h}$ – ekspozycja na hałas oraz dzienna ekspozycja na hałas (dawka hałasu),
- $L_{EX,8h}$; $L_{EX,W}$ – poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-mio godzinnego dnia pracy oraz tygodniowy poziom ekspozycji na hałas,
- SEL (oznaczany także jako L_{AE}) – ekspozycyjny poziom dźwięku A .

Większość miar stosowanych w pomiarach hałasu na stanowiskach pracy została zdefiniowana w normach ISO 1996–1:2006 [20] oraz PN–EN 61672–1:2014–03 [21]. Niemniej powyższy wykaz miar, z uwagi na specyfikę pracy na stanowisku pilarz-drwal i ich potencjalne zastosowanie do parametryzacji hałasu na tym stanowisku pracy, został uzupełniony o dodatkowe miary. Wszystkie miary zostały szczegółowiej opisane w dalszej części niniejszego rozdziału.

Poziomy dźwięku – L_p jest to 10-cio krotna wartość logarytmu dziesiętnego z ilorazu kwadratu stosunku wartości skutecznej ciśnienia akustycznego do ciśnienia odniesienia, uzyskany przy użyciu znormalizowanej charakterystyki korekcyjnej oraz znormalizowanej charakterystyki czasowej. Wartość ciśnienia odniesienia – p_0 wynosi (dla powietrza) $20\ \mu\text{Pa}$ i jest wskazana w normie IEC 801–21–22 [22]. Ciśnienie odniesienia definiowane jest (jako próg czułości) dla dźwięku o częstotliwości wynoszącej $1000\ \text{Hz}$ [23].

Poziom dźwięku – L_p został zdefiniowany w normie PN–EN ISO 1996:1–2006 [20] i wyznacza się go zgodnie ze wzorem:

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} \text{ [dB]} \quad \text{lub} \quad L_p = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} \text{ [dB]}, \quad (2.7)$$

gdzie: p – zmierzona wartość ciśnienia akustycznego wyrażona w Pa,
 p_0 – ciśnienie odniesienia, $p_0 = 20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$.

Poziomy dźwięku A lub C – L_{pA} ; L_{pC} – to poziomy dźwięku wyznaczone z uwzględnieniem krzywej ważenia/korekcyjnej, odpowiednio A lub C oraz odpowiednio dobranej stałej czasowej:

$$L_{pA} = 10 \log_{10} \frac{p_{RMS,A}^2}{p_0^2} \text{ [dB]} \quad L_{pC} = 10 \log_{10} \frac{p_{RMS,C}^2}{p_0^2} \text{ [dB]}, \quad (2.8)$$

gdzie: $p_{RMS,A}$; $p_{RMS,C}$ – wyznaczona z zastosowaniem charakterystyki korekcyjnej A lub C wartość skuteczna ciśnienia akustycznego wyrażona w Pa,
 p_0 – ciśnienie odniesienia, $p_0 = 20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$.

Krzywa korekcyjna A (krzywa ważenia) uwzględnia gorszą percepcję przez człowieka dźwięków niskoczęstotliwościowych oraz największą czułość na dźwięki w zakresie częstotliwości w paśmie od ok. 1000 Hz do ok. 5000 Hz. Należy dodać, że zakres częstotliwości mowy ludzkiej pokrywa się z zakresem zwiększonej czułości ludzkiego narządu słuchu. Krzywa korekcyjna A jest stosowana do wyznaczenia poziomu dźwięku w przypadku, gdy jego wartość nie przekracza 80 dB, natomiast krzywą korekcyjną C wykorzystuje się do pomiarów dźwięków o wyższych poziomach – powyżej 80 dB.

Krzywą korekcyjną A można wyznaczyć na podstawie wzoru:

$$K_{A(f)} = 20 \log_{10} \left[\frac{f_4^2 f^2}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_2^2)^{\frac{1}{2}}(f^2 + f_3^2)^{\frac{1}{2}}(f^2 + f_4^2)} \right] - A_{1000} \text{ [dB]}, \quad (2.9)$$

gdzie: f – częstotliwość,
 f_1, f_2, f_3, f_4 – współczynniki stałe,
 $f_1 = 20,6 \text{ Hz}, f_2 = 107,7 \text{ Hz}, f_3 = 737,9 \text{ Hz}, f_4 = 12\,194 \text{ Hz}$,
 A_{1000} – poprawka kalibracyjna, $A_{1000} = -2 \text{ dB}$.

Natomiast krzywą korekcyjną C można wyznaczyć ze wzoru:

$$K_{C(f)} = 20 \log_{10} \left[\frac{f_4^2 f^2}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_4^2)} \right] - C_{1000} \text{ [dB]}, \quad (2.10)$$

gdzie: f – częstotliwość,

f_1, f_4 – współczynniki stałe,

$f_1 = 20,6 \text{ Hz}, f_4 = 12\,194 \text{ Hz}$,

C_{1000} – poprawka kalibracyjna, $C_{1000} = -0,062 \text{ dB}$.

Wartości współczynników poprawkowych charakterystyk A i C dla pasm 1/3 oktawowych podano w normie PN-EN 61672-1:2014-03 [21].

Funkcje $K_{A(f)}$ i $K_{C(f)}$ opisujące charakterystyki korekcyjne A i C zostały zaimplementowane w oprogramowaniu pomiarowo-analizującym wykorzystywanym do prowadzenia badań w ramach niniejszej pracy.

Oprócz krzywych korekcyjnych A i C stosuje się także inne charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe, takie jak: B , D , LIN oraz G .

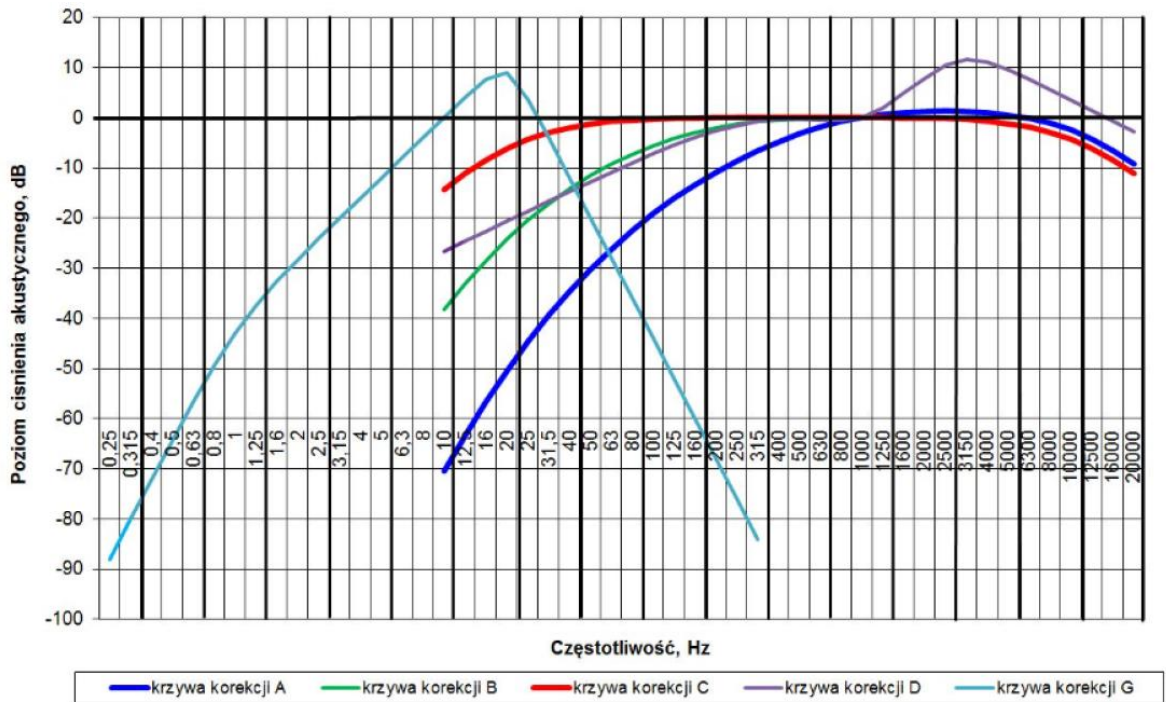
Krzywa B , obecnie rzadko stosowana służyła do pomiaru dźwięków o średnim poziomie, rzędu 70 dB. Krzywa korekcyjna D stosowana jest do wyznaczania poziomu hałasu, którego źródłem jest transport lotniczy i obiekty latające, natomiast krzywa ważenia G stosowana jest do pomiaru infradźwięków i dźwięków niskoczęstotliwościowych w zakresie pasma słyszalnego – od 0,25 Hz do 315 Hz. Indeks LIN umieszczany przy poziomie dźwięku (np. L_{Lin}) oznacza prowadzenie pomiarów bez filtrów korekcyjnych – liniowo w całym zakresie pasma akustycznego. Na rysunku 2.1 przedstawiono porównanie charakterystyk korekcyjnych A , B , C , D oraz G .

Maksymalne poziomy dźwięku A lub C – $L_{A \max}$; $L_{C \max}$ – są to najwyższe wartości poziomów dźwięku L_A lub L_C wyznaczone (z określoną stałą czasową np. $FAST$ lub $SLOW$), w określonym przedziale czasu pomiaru.

Szczytowy poziom dźwięku $C - L_{C\ peak}$ – jest to najwyższa chwilowa wartość ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką korekcyjną C . Wyznaczany jest on zgodnie ze wzorem:

$$L_{C\ peak} = 10 \cdot \log_{10} \frac{p_{C\ peak}^2}{p_0^2} \text{ [dB]}, \quad (2.11)$$

gdzie: $p_{C\ peak}$ – najwyższa chwilowa wartość szczytowa ciśnienia akustycznego wyznaczona na podstawie wzoru (2.6) skorygowana charakterystyką C ;
 p_0 – ciśnienie odniesienia, $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$.



Rysunek 2.1 Krzywe korekcji amplitudowo-częstotliwościowej stosowane w pomiarach hałasu [24]

Poziom równoważny dźwięku A odniesiony do czasu ekspozycji $T_e - L_{A,eq,T_e}$ – jest to wartość dziesięciu logarytmów dziesiętnych z ilorazu kwadratu wartości skutecznej ciśnienia akustycznego, wyznaczanej dla czasu uśredniania T_e i z charakterystyką A i kwadratu ciśnienia odniesienia p_0 . Poziom ten wyznaczany jest zgodnie ze wzorem:

$$L_{A,eq,T_e} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p_{RMS\ A}(t)^2}{p_0^2} dt \right) \text{ [dB]}, \quad (2.12)$$

gdzie: T_e – czas uśredniania (trwania pomiaru), $T_e = T_1 - T_2$,
 T_1 – czas rozpoczęcia pomiaru, T_2 – czas zakończenia pomiaru,
 $p_{RMS\ A}(t)$ – wartość skuteczna ciśnienia akustycznego skorygowana charakterystyką A ,
 p_0 – ciśnienie odniesienia, $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$.

W analogiczny sposób można wyznaczyć równoważny poziom dźwięku $C - L_{C,eq,Te}$, przy czym należy zastosować wtedy odpowiednio korekcję amplitudową C . Opcjonalnie można także wyznaczyć liniowy poziom równoważny dźwięku – $L_{Lin,eq,Te}$. W przypadku przyjęcia, że czas pomiaru $T_e = 8 \text{ h} = 480 \text{ min}$ (8-mio godzinny dzień pracy) wyznaczany będzie $L_{A,eq,8h}$, czyli równoważny poziom dźwięku odniesiony do 8-mio godzinnego dnia pracy.

Ekspozycja na hałas (dawka hałasu) odniesiona do czasu ekspozycji $T_e - E_{A,Te}$ – jest to całka z kwadratu wartości ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką $A - p_A(t)$ i czasu uśredniania T_e przy czym czas uśredniania $T_e = T_2 - T_1$. Dawkę hałasu oblicza się, zgodnie z normą ISO 61672-1:2014-03 [21] ze wzoru:

$$E_{A,Te} = \int_{T_1}^{T_2} p_A^2(t) dt \text{ [Pa}^2\text{s]}, \quad (2.13)$$

gdzie: T_e – czas uśredniania (trwania pomiaru), $T_e = T_2 - T_1$;
 T_1 – czas rozpoczęcia pomiaru, T_2 – czas zakończenia pomiaru,
 $p_A(t)$ – ciśnienie akustyczne skorygowane charakterystyką A .

Na podstawie zależności (2.13) można również wyznaczyć ekspozycję dzienną (dawkę dzienną hałasu) – $E_{A,8h}$, przy czym $T_e = T_2 - T_1 = 8 \text{ h} = 480 \text{ min}$, co odpowiada 8-mio godzinnemu dniowi pracy.

Wartość $E_{A,8h}$ można także obliczyć znając wartość poziomu dziennej ekspozycji – $L_{EX,8h}$ zgodnie z wzorem:

$$E_{A,8h} = 1,15 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{0,1 \cdot L_{EX,8h}} \text{ [Pa}^2\text{s]}. \quad (2.14)$$

Ekspozycja tygodniowa na hałas (tygodniowa dawka hałasu) – $E_{A,W}$ – jest to suma dawek hałasu dla 5-ciu kolejnych dni roboczych. Wyznacza się ją ze wzoru:

$$E_{A,W} = \sum_{i=1}^5 (E_{A,8h,i}) \text{ [Pa}^2\text{s]}. \quad (2.15)$$

gdzie: $E_{A,8h,i}$ – dzienna ekspozycja na hałas odniesiona do 8-mio godzinnego dnia pracy dla i -tego dnia tygodnia roboczego,
 i – indeks wyliczeń oznaczający konkretny dzień tygodnia.

Wartość $E_{A,W}$ można również obliczyć znając wartość poziomu dziennej ekspozycji $L_{EX,W}$ zgodnie z wzorem:

$$E_{A,W} = 1,15 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{0,1 \cdot L_{EX,W}} \text{ [Pa}^2\text{s]}. \quad (2.16)$$

Poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-mio godzinnego dnia pracy – $L_{EX,8h}$ który jest wyznaczany zgodnie ze wzorem (2.17) umożliwia wyznaczenie dziennego poziomu

ekspozycji (odniesionego do 8-mio godzinowego dnia pracy) niezależnie od rzeczywistego czasu trwania narażenia T_e na hałas, który może być: równy, krótszy lub dłuższy od czasu odniesienia:

$$L_{EX,8h} = L_{A,eq,T_e} + 10 \log_{10} \left(\frac{T_e}{T_0} \right) \text{ [dB] ,} \quad (2.17)$$

gdzie: L_{A,eq,T_e} – poziom równoważny dźwięku A wyznaczony dla czasu T_e ,
 T_e – czas uśredniania (trwania pomiaru),
 T_0 – czas odniesienia, $T_0 = 8 \text{ h} = 28\,800 \text{ s}$.

Jeżeli czas narażenia (uśredniania) $T_e = T_0 = 8 \text{ h}$ to drugi człon wzoru (2.17) ma wartość zerową a zależność (2.17) przyjmuje postać:

$$L_{EX,8h} = L_{A,eq,8h} \text{ [dB] .} \quad (2.18)$$

Tygodniowy poziom ekspozycji na hałas – $L_{EX,W}$ – stosowany jest on w przypadku, gdy w kolejnym i -tym dniu tygodnia dzienny poziom ekspozycji $L_{EX,8h}$ jest różny lub liczba dni roboczych przepracowanych w ciągu tygodnia – n różni się od ustawowych 5-ciu (np. praca na część etatu) [25].

Poziom ekspozycji na hałas odniesiony do tygodnia pracy oblicza się zgodnie ze wzorem:

$$L_{EX,W} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{5} \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_{EX,8h,i}} \right) \text{ [dB] ,} \quad (2.19)$$

gdzie: $L_{EX,8h,i}$ – poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-mio godzinowego dnia pracy wyznaczony dla i -tego dnia tygodnia roboczego,
 i – kolejny dzień tygodnia,
 n – liczba faktycznie przepracowanych dni w tygodniu.

Ekspozycyjny poziom dźwięku A – SEL (L_{AE}) – stosowany jest do opisu jednostkowych zdarzeń akustycznych np. przelot samolotu, przejazd pojazdu w pobliżu obserwatora, itp. [26].

Poziom SEL wyznacza zgodnie ze wzorem:

$$SEL = L_{AE} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \text{ [dB] ,} \quad (2.20)$$

gdzie: T_1 – czas rozpoczęcia pomiaru,
 T_2 – czas zakończenia pomiaru;
 T_0 – czas odniesienia, $T_0 = 1 \text{ s}$;
 $p_{A(t)}$ – ciśnienie akustyczne skorygowane charakterystyką A ,
 p_0 – ciśnienie odniesienia, $p_0 = 20 \text{ }\mu\text{Pa}$.

Czasy T_1 i T_2 określone są dla chwil, kiedy poziom dźwięku A jest mniejszy o 10 dB od maksymalnego poziomu dźwięku A przed i po wystąpieniu zdarzenia akustycznego. Taki

sposób określania rozpoczęcia i końca pomiaru powoduje, że tło akustyczne w niewielkim stopniu wpływa na wyniki pomiarów.

2.1.4. Wartości kryterialne oceny narażenia na hałas

Aby skutecznie przeciwdziałać szkodliwemu wpływowi hałasu na pracowników, na podstawie wieloletnich obserwacji i pomiarów ustalono dopuszczalne wartości miar parametryzujących hałas, jakie nie powodują żadnych negatywnych zmian w organizmie. Wartości NDN – (Najwyższych Dopuszczalnych Natężeń) dotyczących m.in. hałasu określono w *Rozporządzeniu Ministra Rodziny Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r.* (Dz. U. 2018, poz. 1286) [8].

Zgodnie z obowiązującymi przepisami, np.: Kodeks Pracy [9], pracodawcy zobowiązani są do regularnej okresowej kontroli warunków pracy i określenia poziomu ryzyka zawodowego związanego z narażeniem na hałas na stanowiskach pracy.

Wprowadzono tzw. progi działania, po przekroczeniu których pracodawca zobligowany jest do podjęcia niezbędnych działań w celu skutecznego ograniczenia hałasu i zapobieżeniu przekroczenia wartości NDN.

Działaniami tymi mogą być np.:

- redukcja hałasu u źródła – polegająca na ograniczeniu emisji hałasu do możliwie najniższych poziomów z uwzględnieniem aktualnie dostępnych środków i rozwiązań technicznych, zmianie technologii, wymianie urządzeń hałasliwych na cichobieżne itp.
- stosowanie osłon i ekranów akustycznych oddzielających źródła hałasu od stanowisk pracy,
- stosowanie indywidualnych ochronników słuchu w postaci np.: wkładek antyhałasowych dousznych i/lub naszników przeciwhałasowych (zarówno pasywnych jak i aktywnych),
- rotacja pracowników na stanowiskach pracy, automatyzacja i robotyzacja procesu produkcyjnego.

Więcej działań natury technicznej i organizacyjnej mających na celu redukcję hałasu w miejscu pracy opisano w pracy [27].

Wartości progów działania dla wielkości charakteryzujących hałas w środowisku pracy podano w załączniku do *Rozporządzenia Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 5 sierpnia 2005 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne* (Dz. U. 2005, nr 157, poz. 1318) z późniejszymi zmianami [28]. Wynoszą one:

- 80 dB dla poziomu ekspozycji na hałas odniesionego do 8-mio godzinnego dnia pracy – $L_{EX,8h}$ lub poziomu ekspozycji na hałas odniesionego do tygodnia pracy – $L_{EX,W}$,
- 135 dB dla szczytowego poziomu dźwięku C – L_{Cpeak} .

Miary i wartości NDN dla zagrożenia hałasem, zawarto są w załączniku do *Rozporządzenia Ministra Rodziny Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy* (Dz. U. 2018, poz. 1286) [8]. Zgodnie z tym rozporządzeniem są to:

- poziom ekspozycji odniesiony do typowego 8-mio godzinnego dnia pracy – $L_{EX,8h}$ i odpowiadającą mu dzienną ekspozycję na hałas – $E_{A,8h}$ lub poziom ekspozycji odniesiony do typowego 40-to godzinnego tygodnia pracy – $L_{EX,W}$ i odpowiadającą mu tygodniową ekspozycję na hałas – $E_{A,W}$,
- maksymalny poziom dźwięku A – L_{Amax} ,
- szczytowy poziom dźwięku C – L_{Cpeak} .

Wartości NDN dla hałasu w odniesieniu do ww. miar, zamieszczono w tabeli 2.1. Pogrubieniem wyróżniono grupę „ogółu pracowników” do której zaliczają się osoby zatrudnione na stanowisku pilarz-drwal.

Tabela 2.1 Wartości NDN hałasu na stanowisku pracy – na podstawie [8, 28]

Wielkość charakteryzująca hałas	Wartości dopuszczalne NDN hałasu dla:		
	Ogół pracowników	Pracowników młodocianych	Kobiet pracujących w ciąży
Poziom ekspozycji odniesiony do 8-mio godzinnego dnia pracy – $L_{EX,8h}$	85 [dB]	80 [dB]	65 [dB]
Ekspozycja dzienna (dawka hałasu) – $E_{A,8h}$	$3,64 \cdot 10^3$ [Pa²s]	$1,15 \cdot 10^3$ [Pa ² s]	$0,0363662 \cdot 10^3$ [Pa ² s]
Poziom ekspozycji odniesiony do tygodnia pracy – $L_{EX,W}$	85 [dB]	80 [dB]	65 [dB]
Ekspozycja tygodniowa – $E_{A,W}$	$18,2 \cdot 10^3$ [Pa²s]	$5,75 \cdot 10^3$ [Pa ² s]	$0,181831 \cdot 10^3$ [Pa ² s]
Maksymalny poziom dźwięku A – L_{Amax}	115 [dB]	110 [dB]	110 [dB]

Szczytowy poziom dźwięku C – $L_{C\ peak}$	135 [dB]	130 [dB]	130 [dB]
---	----------	----------	----------

2.1.5. Strategie pomiarów hałasu na stanowiskach pracy

Pomiary hałasu na stanowiskach pracy mogą być realizowane w oparciu o strategie pomiarowe opisane w normie PN-EN ISO 9612:2011 [14]. Norma ta przewiduje zastosowanie jednej z trzech strategii, których dobór uzależniony jest od rodzaju stanowiska i charakteru wykonywanej pracy. W szczególnych przypadkach możliwe jest zastosowanie dwóch strategii pomiarowych jednocześnie.

2.1.5.1. Strategia pomiarowa 1 – Pomiary z podziałem na czynności

Strategia pomiarowa #1 zakłada, dla pracowników o jednorodnej ekspozycji na hałas, dokonanie podziału nominalnego czasu pracy na czynności. Dane dotyczące czasu trwania poszczególnych czynności można pozyskać na podstawie: wywiadu przeprowadzonego z pracownikami lub przełożonymi, mierząc ten czas lub oprzeć się na danych statystycznych dotyczących funkcjonowania typowych źródeł hałasu (maszyn, urządzeń) lub związanych z realizacją procesów produkcyjnych. W metodzie tej potrzebne jest wykonanie pomiarów równoważnego poziomu dźwięku A – $L_{A,eq}$ dla każdej czynności odrębnie. Na tej podstawie wyznaczany jest dzienny poziom ekspozycji na hałas – $L_{EX,8h}$. Do poprawnego wyznaczenia: poziomu równoważnego dźwięku A – $L_{A,eq}$, szczytowego poziomu dźwięku C – $L_{C\ peak}$ i poziomu ekspozycji – $L_{EX,8h}$ istotne jest uwzględnienie czynności, które charakteryzują się najwyższymi poziomami hałasu.

2.1.5.2. Strategia pomiarowa 2 – Pomiary stanowiskowe

Pomiary hałasu zgodnie ze strategią pomiarową #2 wykonywane są dla grup pracowników charakteryzujących się jednorodną ekspozycją na hałas – np. stanowisk pracy o podobnej ekspozycji na hałas. W pierwszym kroku – zależnie od liczebności grupy – n_g określany jest minimalny łączny czas trwania pomiarów – patrz tabela 2.2.

Tabela 2.2 Minimalny łączny czas trwania pomiarów w zależności od liczebności grupy dla drugiej strategii pomiarowej – na podstawie [14]

Liczba pracowników w grupie o jednorodnej ekspozycji na hałas n_g	Minimalny łączny czas trwania pomiarów w [h], które należy rozłożyć w ramach grupy o jednorodnej ekspozycji
$n_g \leq 5$	5
$5 < n_g \leq 15$	$5 + (n_g - 5) \cdot 0,5$
$15 < n_g \leq 40$	$10 + (n_g - 15) \cdot 0,25$
$n_g > 40$	17; lub dokonać podziału na grupy

Następnie określa się liczbę (minimum 5) i czas trwania próbek (pomiarów), tak aby łączny czas trwania pomiarów był równy lub większy od czasu minimalnego. Korzystnie jest przyjmować znacząco większą od 5-ciu liczbę próbek z uwagi na możliwość wystąpienia w trakcie pomiarów dodatkowych zakłóceń (artefaktów). Takie próbki można by pominąć a sam pomiar powtórzyć. Pomiar hałasu (próbki) realizowane są w czasie dnia pracy losowo wśród pracowników grupy.

Próbki powinny uwzględniać możliwie szerokie spektrum zmienności ekspozycji akustycznej tzn. pomiary powinny być rozłożone w czasie dnia pracy i obejmować: realizowane procesy technologiczne, jak również czasy przygotowawczo-zakończeniowe oraz przerwy pracownicze. Niemniej wskazane jest, aby próbki obejmowały okresy (fragmenty dnia pracy), które mają znaczący udział w ekspozycji na hałas.

Dzienną ekspozycję na hałas wyznacza się z wzoru (2.17) przy czym równoważny poziom ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką A dla i -tej próbki, dla tej strategii oblicza się ze wzoru:

$$L_{pA,eq,Te} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{0,1 \cdot L_{pA,eq,Te,n}} \right) \text{ [dB]}, \quad (2.21)$$

gdzie: $L_{pA,eq,Te,n}$ – równoważny poziom ciśnienia akustycznego A dla n -tej próbki,
 n – numer próbki,
 N – łączna liczba próbek.

2.1.5.3. Strategia pomiarowa 3 – Pomiary całodzienne (dozymetryczne)

Pomiary całodzienne stosowane są, gdy rozkład czynności w ciągu dnia pracy i związana z nimi ekspozycja na hałas nie jest znana lub jest nieprzewidywalna. Zaletą tej metody jest to, że nie ma potrzeby szczegółowego analizowania dnia pracy i nie ma konieczności wykonywania dodatkowych obliczeń. Pomiary realizowane są za pomocą dozymetrów lub całkujących mierników poziomu dźwięku. Strategia ta jest najbardziej czasochłonna spośród wszystkich przewidzianych w normie PN-EN ISO 9612:2011 [14].

Wadą tej strategii jest to, że istnieje duże ryzyko uwzględnienia zdarzeń akustycznych o znacznym poziomie nie będących w jakikolwiek sposób związanych z pracą na danym stanowisku (wybuchy, uderzenia, przejazdy pojazdów itp.). Aby ograniczyć wpływ tych zdarzeń na wyniki pomiarów należy uważnie śledzić pracownika w trakcie pracy i odnotowywać fakt wystąpienia oraz czas trwania tych zdarzeń.

Pomiary powinny być realizowane dla *reprezentatywnych dni roboczych*. Dni te należy wybierać tak, aby zminimalizować ryzyko wystąpienia wszelkich nietypowych sytuacji i zdarzeń, znacznie odbiegających od rzeczywistych warunków pracy dla typowego dnia roboczego na danym stanowisku. Pomiary wstępne powinny obejmować minimum 3 dni/zmiany robocze. W przypadku, gdy różnica poziomów dźwięku dla każdego z dni – ΔL_p przekracza 3 dB pomiary powinny być realizowane także co najmniej dla dwóch kolejnych dni pracy (tydzień roboczy).

2.1.5.4. Określenie przydatności i stosowalności poszczególnych strategii na potrzeby pomiarów hałasu na stanowisku pilarz-drwal

Właściwy dobór strategii pomiarowej w zależności od rodzaju stanowiska pracy (wykonywanej czynności roboczej, ich ilości oraz stopnia ich skomplikowania), jest gwarancją otrzymania poprawnych i wiarygodnych wyników.

W normie PN-EN ISO 9612:2011 [14] podano ogólne wytyczne dotyczące stosowalności poszczególnych strategii pomiarowych w zależności od ogólnych kryteriów podziału związanych m.in. z: mobilnością stanowiska/pracownika, liczbą elementarnych czynności roboczych i stopniem ich skomplikowania. Wytyczne te zostały przedstawione w tabeli 2.3.

Tabela 2.3 Kryteria doboru strategii pomiarowej w oparciu o model pracy i rodzaj stanowiska
– na podstawie [14]

Rodzaj lub model pracy	Strategia pomiarowa		
	Strategia 1 Pomiar z podziałem na czynności	Strategia 2 Pomiary stanowiskowe	Strategia 3 Pomiary całodzienne
Stacjonarne stanowisko pracy – prosta lub pojedyncza czynność	✓	×	×
Stacjonarne stanowisko pracy – czynności złożone lub wiele czynności	✓	◦	◦
Pracownik mobilny – przewidywalny rodzaj pracy – niewielka liczba czynności	✓	◦	◦
Pracownik mobilny – przewidywalna praca – duża liczba czynności lub złożony rodzaj pracy	◦	◦	✓
Pracownik mobilny – nieprzewidywalny rodzaj pracy	×	◦	✓
Pracownik na stacjonarnym stanowisku pracy lub pracownik mobilny – wiele czynności o nieokreślonym czasie trwania	×	✓	◦
Pracownik na stacjonarnym stanowisku pracy lub pracownik mobilny – brak przydzielonych czynności	×	✓	◦
✓ strategia zalecana ◦ strategia może być stosowana × strategia niezalecana			

Punktem wyjścia przy doborze strategii pomiarowej na stanowisku pilarz-drwal jest określenie modelu pracy i cech charakteryzujących to stanowisko. Są nimi:

- wysoka mobilność pracownika podczas zmiany roboczej zarówno w trakcie konkretnego dnia pracy jak i poszczególnych dni tygodnia – konieczność poruszania się w terenie o dość znacznej powierzchni (często z użyciem pojazdów terenowych),
- nieprzewidywalny – w sensie czasochłonności, kolejności realizacji poszczególnych zadań i warunków otoczenia itp., niemniej znany, ogólny charakter pracy (praca w lesie, przy drogach i torowiskach, w mieście),
- złożony charakter pracy – konieczność naprzemiennego, wielokrotnego wykonywania operacji technologicznych jakimi są: ścinka, okrzesywanie, przerzynka [29], podczas realizacji procesu pozyskania surowca drzewnego, wraz z czynnościami pomocniczymi (tankowanie, ostrzenie łańcucha, posługiwanie się innymi narzędziami, itp.).

Biorąc pod uwagę powyższe uwarunkowania oraz specyfikę strategii pomiarowych opisaną w tabeli 2.3 – wiązaną z rodzajem lub modelem pracy, można stwierdzić, że możliwymi

do zaimplementowania na stanowisku pilarz-drwal strategiami pomiarowymi są druga oraz trzecia strategia pomiarowa tzn. pomiary stanowiskowe i pomiary całodziennie.

Przed wybraniem strategii i przystąpieniem do realizacji pomiarów należy rozważyć zalety i wady płynące ze stosowania poszczególnych metod. Mogą one wpływać na wartości otrzymanych wyników, a co za tym idzie na ostateczną ocenę ryzyka zawodowego.

Wady i zalety predysponowanych do pomiarów hałasu na stanowisku pilarz-drwal strategii pomiarowych zawarto w tabeli 2.4 – patrz kolejna strona.

Aby rzetelnie określić ekspozycję pilarzy należałoby do oceny narażenia zawodowego na hałas wykorzystać obie strategie pomiarowe. Przy czym, ze względu na nieprzewidywalny charakter pracy na tym stanowisku można założyć, że wyniki pomiarów w postaci równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką $A - L_{pA,eq,Te}$, uzyskane w trakcie pomiarów całodziennych, dla trzech kolejnych dni pracy, będą różniły się o więcej niż 3 dB co powoduje konieczność rozszerzenia pomiarów na cały tydzień roboczy.

Tabela 2.4 Wady i zalety strategii pomiarowych możliwych do zastosowania na stanowisku pilarz-drwal – na podstawie [14]

	Strategia nr 2 – Pomiary stanowiskowe	Strategia nr 3 – Pomiary całodziennie
Zalety	<ul style="list-style-type: none"> stosowana w przypadku stanowisk, dla których występują trudności w opisie chronometrażu typowego dnia pracy mniejsza czasochłonność analizy pracy – chronometraż mniejsza niepewność uzyskanych wyników brak wrażliwości na działania pochodzące od pracownika – pocieranie i uderzenia mikrofonu 	<ul style="list-style-type: none"> najbardziej użyteczna dla stanowisk o nieregularnym charakterze pracy stosowana w sytuacji nieznanego rozkładu ekspozycji i/lub szczegółowej analizy pracy w oparciu o rzeczywiste wyniki uwzględnienie wszystkich składowych hałasu uwzględnienie pełnej zmienności poziomu hałasu i udziału poszczególnych czynności w całej w ekspozycji
Wady	<ul style="list-style-type: none"> nieadekwatna dla stanowisk o niewielkiej liczbie bardzo hałaśliwych czynności i zdarzeń akustycznych konieczność starannego zdefiniowania jednorodnych stanowisk pracy, czasochłonność pomiarów (mniejsza niż dla pomiarów całodziennych) konieczność umiejętnego rozłożenia pomiarów w czasie – pożądana rejestracja głównych składowych/składników hałasu 	<ul style="list-style-type: none"> najdłuższy czas realizacji pomiarów w odniesieniu do pozostałych metod, wrażliwość na zakłócenia akustyczne wrażliwość na celowe działania pracownika – ocieranie i uderzenia mikrofonu konieczność prowadzenia obserwacji zachowania pracownika ograniczona możliwości wyeliminowania artefaktów akustycznych
Minimalny łączny czas trwania pomiarów	5 h	minimum 3 dni

2.1.6. Budżet niepewności pomiarowej w pomiarach hałasu

W przypadku pomiarów hałasu na stanowisku pracy w normie PN-EN ISO 9612:2011 [14] zwrócono dużą uwagę na zagadnienia związane z niepewnością pomiarową. Wyznaczona niepewność pomiarowa jest miarą jakości przeprowadzonych pomiarów. Źródłami błędów przy pomiarach hałasu są:

- niewłaściwie dobrane próbkowanie sygnału dla czynności i stanowisk pracy,
- błędne oszacowanie czasów trwania czynności elementarnych,
- błędy związane z aparaturą pomiarową,
- błędy związane z położeniem mikrofonu(ów) pomiarowych.

Zgodnie z normą PN-EN ISO 9612:2011 [14] niepewność rozszerzona – U określona jest dla 95-cio procentowego jednostronnego przedziału ufności i opisana jest wzorem:

$$U = k \cdot u, \quad (2.22)$$

gdzie: k – współczynnik rozszerzenia wynikający z funkcji przedziału ufności, dla jednostronnego 95-cio % przedziału ufności,

$$k = 1,65,$$

u – złożona standardowa niepewność pomiarowa.

Złożona standardowa niepewność pomiarowa u opisana jest poniższym równaniem:

$$u^2 = \sum_{i=1}^3 c_i^2 u_i^2, \quad (2.23)$$

gdzie: c_i – współczynniki wrażliwości,

u_i – niepewności pomiarowe związane odpowiednio ze źródłami błędów pomiarowych.

Dla pomiarów stanowiskowych i pomiarów całodziennych złożona niepewność pomiarowa dla dziennego poziomu ekspozycji na hałas – $L_{EX,8h}$ wyznaczana jest zgodnie z poniższym równaniem:

$$u^2(L_{EX,8h}) = c_1^2 u_1^2 + c_2^2 (u_2^2 + u_3^2), \quad (2.24)$$

gdzie: c_1, c_2 – współczynniki wrażliwości,

u_1 – niepewność standardowa związana z próbkowaniem,

u_2 – niepewność standardowa związana z wyposażeniem,

u_3 – niepewność standardowa związana z położeniem mikrofonu.

Niepewność standardowa u_1 związana jest z próbkowaniem wyznacza się zgodnie ze wzorem:

$$u_1 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left[\sum_{n=1}^N (L_{pA,eq,T,n} - \bar{L}_{pA,eq,T})^2 \right]} \text{ [dB]}, \quad (2.25)$$

gdzie: $L_{pA,eq,T,n}$ – równoważny poziom ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką A wyznaczony dla n -tej próbki stanowiskowego poziomu hałasu,

$\bar{L}_{pA,eq,T}$ – średnia arytmetyczna z N próbek równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką A wyznaczona dla danego stanowiska pracy.

Natomiast wartość $\bar{L}_{pA,eq,T}$ wyznacza się zgodnie ze wzorem:

$$\bar{L}_{pA,eq,T} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N L_{pA,eq,T,n} \text{ [dB]}, \quad (2.26)$$

gdzie: $L_{pA,eq,T,n}$ – równoważny poziom ciśnienia akustycznego (skorygowany charakterystyką A) wyznaczony dla n -tej próbki stanowiskowego poziomu hałasu,

N – liczba pomiarów.

Niepewność standardowa u_2 związana jest z wyposażeniem pomiarowym. Jej wartość zależy od klasy zastosowanego miernika/przyrządu pomiarowego zawarto w tabeli 2.5.

Tabela 2.5 Wartości niepewności pomiarowej u_2 w zależności od zastosowanej aparatury pomiarowej – na podstawie [14]

Rodzaj wyposażenia pomiarowego	Niepewność standardowa u_2 [dB]
Miernik poziomu dźwięku klasy 1-wszej zgodny z wymaganiami IEC 61672-1:2014-03	0,7
Indywidualny miernik ekspozycji na hałas (dozometr) zgodny z wymaganiami IEC 61252	1,5
Miernik poziomu dźwięku klasy 2-giej zgodny z wymaganiami IEC 61672-1:2014-03	1,5

Niepewność standardowa u_3 związana jest z położeniem mikrofonu i dla wszystkich trzech strategii zawsze wynosi 1 dB.

W przypadku pomiarów stanowiskowych (2-ga strategia pomiarowa) oraz pomiarów całodziennych (3-cia strategia pomiarowa) procedura obliczeniowa budżetu niepewności pomiarowej jest identyczna. Budżet niepewności pomiarowej dla obu strategii został przedstawiony w tabeli 2.6.

Tabela 2.6 Budżet niepewności pomiarowej dotyczący wyznaczania poziomu ekspozycji na hałas dla pomiarów stanowiskowych i całodziennych – na podstawie [14]

Wielkość	Oszacowana wartość	Niepewność standardowa u_i	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_i	Udział niepewności $c_i u_i$
$L_{pA,eq,T}$	$L_{pA,eq,T}$ – wartość energetyczna średnia z $L_{pA,eqT;n}$	u_1 wyznaczona zgodnie z równaniem (2.25)	Normalny	c_1	Zgodnie tabelą 2.7
Q_2	0	Zgodnie z tabelą 5	Normalny	$c_2 = 1$	u_2
Q_3	0	1 dB	Normalny	$c_3 = 1$	u_3

Dzienną ekspozycję na hałas – $L_{EX,8h}$ wyznacza się, zarówno dla strategii pomiarów stanowiskowych jak i pomiarów dozymetrycznych zgodnie z równaniem:

$$L_{EX,8h} = 10 \log_{10} \frac{T_e}{T_0} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{0,1 \cdot \dot{L}_{pA,eq,T,n}} \right] [\text{dB}], \quad (2.27)$$

gdzie: $\dot{L}_{pA,eq,T,n}$ – oszacowana rzeczywista wartość równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego skorygowana charakterystyką A dla n -tej próbki (pomiaru),

T_e – czas uśredniania (trwania pomiaru),

T_0 – czas odniesienia, $T_0 = 8 \text{ h} = 480 \text{ min}$,

n – numer próbki,

N – liczba próbek (pomiarów).

Szacowana rzeczywista wartość równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego skorygowana charakterystyką A dla n -tego pomiaru – $\dot{L}_{pA,eq,T,n}$ wyraża się wzorem:

$$\dot{L}_{pA,eq,T,n} = L_{pA,eq,T,n} + Q_2 + Q_3 [\text{dB}], \quad (2.28)$$

gdzie: $L_{pA,eq,T,n}$ – zmierzona wartość równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego skorygowana charakterystyką A dla n -tej próbki

Q_2 – poprawka związana z wyposażeniem pomiarowym,

Q_3 – poprawka związaną z położeniem mikrofonu pomiarowego.

Wartości poprawek Q_2 i Q_3 ; niepewności standardowej, współczynników wrażliwości oraz udziały niepewności pomiarowych zostały zawarte w tabeli 2.6 – patrz poprzednia strona.

Udział niepewności cząstkowej $c_1 u_1$ w zależności od liczby pomiarów N oraz obliczonej zgodnie z wzorem (2.25) niepewności standardowej u_1 przedstawiono w tabeli 2.7.

Tabela 2.7 Udział niepewności c_{1u_1} w zależności od liczby pomiarów N mierzonej wartości $L_{pA,eq,T,n}$ i niepewności standardowej u_1 – na podstawie [14]

Wartości udziału niepewności c_{1u_1} mierzonych wartości $L_{pA,eq,T,n}$												
Liczba pomiarów N	Niepewność standardowa u_1 – na podstawie równania (2.25)											
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
3	0,6	1,6	3,1	5,2	8,0	11,5	15,7	20,6	26,1	32,2	39,0	46,5
4	0,4	0,9	1,6	2,5	3,6	5,0	6,7	8,6	10,9	13,4	16,1	19,2
5	0,3	0,7	1,2	1,7	2,4	3,3	4,4	5,6	6,9	8,5	10,2	12,1
6	0,3	0,6	0,9	1,4	1,9	2,6	3,3	4,2	5,2	6,3	7,6	8,9
7	0,2	0,5	0,8	1,2	1,6	2,2	2,8	3,5	4,3	5,1	6,1	7,2
8	0,2	0,5	0,7	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,6	4,4	5,2	6,1
9	0,2	0,4	0,7	1,0	1,3	1,7	2,1	2,6	3,2	3,9	4,6	5,4
10	0,2	0,4	0,6	0,9	1,2	1,5	1,9	2,4	2,9	3,5	4,1	4,8
12	0,2	0,3	0,5	0,8	1,0	1,3	1,7	2,0	2,5	2,9	3,5	4,0
14	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,2	1,5	1,8	2,2	2,6	3,0	3,5
16	0,1	0,3	0,5	0,6	0,8	1,1	1,3	1,6	2,0	2,3	2,7	3,2
18	0,1	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,8	2,1	2,5	2,9
20	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,4	1,7	2,0	2,3	2,6
25	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,7	2,0	2,3

Jeżeli na podstawie wyników pomiarów i ich analizy, wartość składnika niepewności c_{1u_1} jest większa niż 3,5 dB (co zostało wyróżnione w tabeli 2.7 kolorem czerwonym), to przy wyborze 2-giej strategii pomiarowej należy bezwzględnie zrewidować plan pomiarów – poprzez zwiększenie liczby pomiarów, lub ujednoclenie grup zawodowych o jednorodnej ekspozycji na hałas. Wartości udziałów niepewności pomiarowej c_{1u_1} odpowiadające liczbie pomiarów $N = 3$ i $N = 4$ mają zastosowanie tylko w przypadku pomiarów całodziennych (3-cia strategia pomiarowa).

2.1.7. Określanie ryzyka zawodowego związanego z narażeniem na hałas

Jeżeli ilekroć mowa jest o ryzyku zawodowym wynikającym z narażenia pracownika na hałas tylekroć należy odnieść się do wartości tzw. krotności przekroczenia $NDN - K^*$ oraz K^{**} . Krotności przekroczeń wyznacza się zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-N-18002:2011 [30].

W przypadku wyznaczania ryzyka zawodowego związanego z narażeniem na hałas w zakresie pasma słyszalnego, określenie krotności przekroczenia dokonuje się dla następujących wielkości pomiarowych:

- poziomu ekspozycji na hałas odniesionego do 8-miu godzin – $L_{EX,8h}$,
- równoważnego poziomu dźwięku A – $L_{A,eq,Te}$,
- maksymalnego poziomu dźwięku A – $L_{A,max}$,
- szczytowego poziomu dźwięku C – $L_{C,peak}$.

W przypadku, gdy krotność przekroczenia określamy dla parametru L_{EX} lub $L_{A,eq,Te}$ stosowany jest wzór (2.29). Natomiast dla parametrów $L_{A\ max}$ i $L_{C\ peak}$ krotności przekroczeń wyznacza się ze wzoru (2.30).

$$K^* = 10^{\frac{L_{zm} - L_{dop}}{10}}, \quad (2.29)$$

$$K^{**} = 10^{\frac{L_{zm} - L_{dop}}{20}}, \quad (2.30)$$

gdzie: L_{zm} – wartość poziomu zmierzonego,
 L_{dop} – wartość poziomu dopuszczalnego.

Najwyższa z obliczonych wartości krotności przekroczeń, służy głównie do określenia czasu po jakim należy wykonać kolejne badanie. Badania te należy wykonywać:

- każdorazowo po wykonaniu jakichkolwiek zmian mogących doprowadzić do zwiększenia zagrożenia hałasem,
- co najmniej raz w roku – jeżeli wyznaczona na podstawie ostatniego z przeprowadzonych badań krotność przekroczeń NDN przekraczała wartość 0,5,
- co najmniej raz na dwa lata – jeżeli wyznaczona na podstawie ostatniego z przeprowadzonych badań krotność przekroczeń NDN była większa niż 0,2 i nie przekraczała wartości 0,5,
- jeżeli podczas dwóch ostatnich badań, wykonanych w odstępie 2 lat, wyznaczone krotności przekroczeń NDN były mniejsze niż 0,2 to pracodawca może odstąpić od wykonywania oceny ryzyka zawodowego z uwagi na hałas.

W przypadku hałasu ocenę ryzyka zawodowego dokonuje się poprzez porównanie zmierzonych wartości dla danego stanowiska pracy i porównanie ich z wartościami kryterialnymi dla określonego ryzyka – tabela 2.8.

Tabela 2.8 Kryteria oceny ryzyka zawodowego w oparciu o wielkości charakteryzujące hałas – na podstawie materiałów szkoleniowych CIOP [31]

Kryteria/parametry oceny	Ryzyko zawodowe
$L_{EX,8h} \leq 80 \text{ dB} \wedge L_{A\ max} \leq 109 \text{ dB} \wedge L_{C\ peak} \leq 129 \text{ dB}$	małe (pomijalne)
$80 \text{ dB} < L_{EX,8h} \leq 85 \text{ dB} \wedge 109 \text{ dB} < L_{A\ max} \leq 115 \text{ dB} \wedge 129 \text{ dB} < L_{C\ peak} \leq 135 \text{ dB}$	średnie (akceptowalne)
$L_{EX,8h} > 85 \text{ dB} \wedge L_{A\ max} > 115 \text{ dB} \wedge L_{C\ peak} > 135 \text{ dB}$	duże (nieakceptowalne)

Na podstawie wzorów (2.29) oraz (2.30) wyznaczono krotności przekroczeń w zależności od różnicy pomiędzy poziomem zmierzonym a poziomem dopuszczalnym.

Dla poziomu ekspozycji na hałas $L_{EX,8h}$ i równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką A – $L_{pA,eq,Te}$ (równoważny poziom dźwięku A) krotności przekroczeń zawarto w tabeli 2.9. Natomiast dla wielkości maksymalnego poziomu dźwięku A – L_{Amax} i szczytowego poziomu dźwięku C L_{Cpeak} w tabeli 2.10.

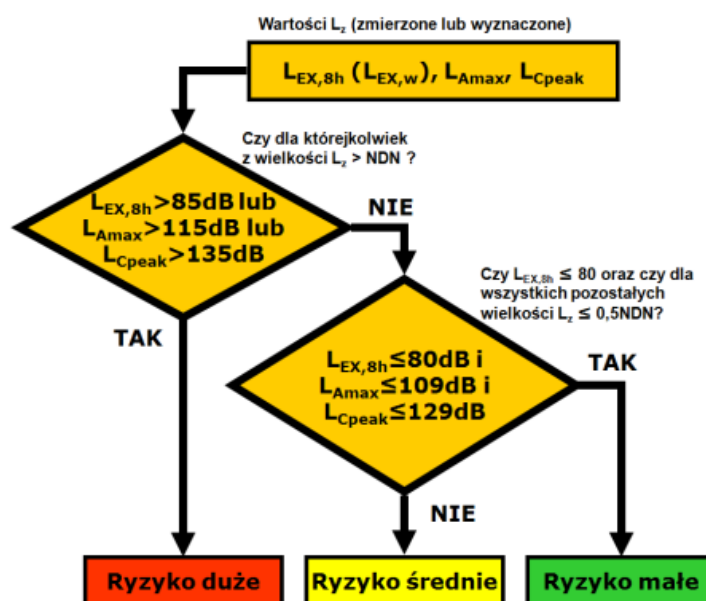
Tabela 2.9 Wartości krotności przekroczeń NDN hałasu w zależności od różnicy poziomu ekspozycji - $L_{EX,8h}$ lub poziomu równoważnego dźwięku A – $L_{pA,eq,Te}$ względem ich poziomów dopuszczalnych – na podstawie materiałów szkoleniowych CIOP [31]

Różnica poziomów $L_{zm} - L_{dop}$ [dB]	Krotność przekroczeń NDN	Różnica poziomów $L_{zm} - L_{dop}$ [dB]	Krotność przekroczeń NDN	Różnica poziomów $L_{zm} - L_{dop}$ [dB]	Krotność przekroczeń NDN	Różnica poziomów $L_{zm} - L_{dop}$ [dB]	Krotność przekroczeń NDN
-30	0,001	-15	0,032	0	1,00	15	31,61
-29	0,013	-14	0,040	1	1,24	16	39,80
-28	0,002	-13	0,050	2	1,59	17	50,13
-27	0,0025	-12	0,063	3	2,00	18	63,10
-26	0,003	-11	0,080	4	2,51	19	79,41
-25	0,0035	-10	0,100	5	3,16	20	99,98
-24	0,004	-9	0,126	6	3,98	21	123,70
-23	0,005	-8	0,158	7	5,01	22	158,5
-22	0,006	-7	0,200	8	6,31	23	199,70
-21	0,008	-6	0,251	9	7,94	24	251,20
-20	0,010	-5	0,316	10	10,00	25	316,10
-19	0,013	-4	0,389	11	12,37	26	398,00
-18	0,016	-3	0,501	12	15,85	27	501,30
-17	0,020	-2	0,630	13	19,97	28	631,00
-16	0,025	-1	0,794	14	25,12	29	794,10
						30	999,80

Tabela 2.10 Wartości krotności przekroczeń NDN hałasu w zależności od różnicy poziomu maksymalnego poziomu dźwięku A $L_{A\ max}$ lub szczytowego poziomu dźwięku C $L_{C\ peak}$ względem ich poziomów dopuszczalnych – na podstawie materiałów szkoleniowych CIOP [31]

Różnica poziomów $L_{zm} - L_{dop}$ [dB]	Krotność przekroczeń NDN	Różnica poziomów $L_{zm} - L_{dop}$ [dB]	Krotność przekroczeń NDN	Różnica poziomów $L_{zm} - L_{dop}$ [dB]	Krotność przekroczeń NDN	Różnica poziomów $L_{zm} - L_{dop}$ [dB]	Krotność przekroczeń NDN
-40	0,010	-20	0,100	0	1,00	20	10,00
-39	0,011	-19	0,112	1	1,11	21	11,12
-38	0,012	-18	0,126	2	1,26	22	12,59
-37	0,014	-17	0,141	3	1,41	23	14,13
-36	0,016	-16	0,159	4	1,59	24	15,85
-35	0,018	-15	0,178	5	1,78	25	17,78
-34	0,020	-14	0,200	6	2,00	26	19,95
-33	0,022	-13	0,224	7	2,24	27	22,39
-32	0,025	-12	0,251	8	2,51	28	25,12
-31	0,028	-11	0,282	9	2,82	29	28,18
-30	0,032	-10	0,316	10	3,16	30	31,62
-29	0,036	-9	0,355	11	2,55	31	35,48
-28	0,040	-8	0,398	12	3,98	32	39,81
-27	0,045	-7	0,447	13	4,47	33	44,67
-26	0,050	-6	0,501	14	5,01	34	50,12
-25	0,056	-5	0,562	15	5,62	35	56,23
-24	0,063	-4	0,631	16	6,31	36	63,10
-23	0,071	-3	0,708	17	7,08	37	70,79
-22	0,079	-2	0,794	18	7,94	38	79,43
-21	0,089	-1	0,891	19	8,91	39	89,13
						40	100

Algorytm wyznaczania ryzyka zawodowego związanego z narażeniem na hałas w miejscu pracy przedstawiono na rysunku 2.2.



Rysunek 2.2 Schemat określenia ryzyka zawodowego dla narażenia akustycznego [32]

2.1.8. Zasady i kryteria doboru ochronników słuchu jako indywidualnych środków ochrony na stanowiskach pracy

Na stanowisku pracy pilnie odnotowuje się zwykle wysokie ryzyko zawodowe w aspekcie zagrożenia hałasem. Wiąże się to z koniecznością stosowania indywidualnych ochronników słuchu. Z tego powodu w niniejszym rozdziale opisano zasady i kryteria ich doboru.

Z Rozporządzenia Ministra Pracy i Gospodarki z dnia 5 sierpnia 2005 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne (Dz. U. 2005, nr 157, poz. 1318) z późniejszymi zmianami [28] wynika, że pracodawca ma obowiązek zapewnić niezbędne środki indywidualnej ochrony osobistej, jednak dopiero w przypadku, gdy uniknięcie lub wyeliminowanie zagrożenia innymi metodami technicznymi nie jest możliwe do osiągnięcia. W takim przypadku pracodawca powinien:

- udostępnić indywidualne środki ochrony słuchu, jeżeli wielkości charakteryzujące narażenie akustyczne przekraczają wartości progów działania, przy czym kwestię ich stosowania pozostawia się wówczas w gestii pracownika,
- bezwzględnie udostępnić indywidualne środki ochrony słuchu, kontrolować ich stosowanie przez pracowników oraz nadzorować prawidłowość ich stosowania, jeżeli wielkości charakteryzujące narażenie akustyczne przekraczają wartości NDN, przy czym pracownik jest wówczas bezwzględnie zobowiązany do stosowania tych środków.

Ochronniki słuchu mogą mieć jedną z dwóch form konstrukcyjnych: nauszników oraz wkładek dousznych. Zazwyczaj stosuje się je niezależnie. Zdarzają się jednak stanowiska pracy, gdzie poziom hałasu jest na tyle wysoki, że wymusza on jednoczesne stosowanie wkładek dousznych i nauszników.

Dobór tych środków powinien zostać przeprowadzony w taki sposób, aby wyeliminować ryzyko uszkodzenia słuchu, lub jeżeli jest to niemożliwe, ograniczyć zagrożenie do najniższego możliwego do uzyskania w danych warunkach poziomu. Prawidłowy dobór ochronników słuchu powinien być poprzedzony pomiarami hałasu na danym stanowisku pracy. Znajomość wartości kryterialnych poziomu hałasu oraz jego charakteru pozwalają na optymalny dobór ochronników.

Dobór może być przeprowadzony z wykorzystaniem jednej z metod:

- metoda pasm oktaowych,
- metoda HML,
- metoda SNR,
- kontrola HML.

W zależności od przyjętej metody uzyskuje się różne wyniki wartości poziomu dźwięku A pod nasznikami – L_{pA}' . Wpływ na to mają m.in. przyjęte do oszacowania skuteczności ochronników różne parametry, których znajomość jest niezbędna i zależy od przyjętej metody doboru ochronników.

Metoda pasm oktaowych wymaga znajomości:

- wartości poziomów ciśnienia akustycznego (skorygowanego charakterystyką A) w pasmach oktaowych o częstotliwościach środkowych pasm od 125 Hz do 8 kHz,
- wartości tłumienia dźwięku wraz z jego odchyleniem standardowym, jakie zapewnia ochronnik w danym paśmie oktaowym o częstotliwościach środkowych pasm z wyżej podanego zakresu.

Metoda ta cechuje się dużą dokładnością, lecz wymaga wykonania analizy oktaowej hałasu na stanowisku pracy. Zredukowany poziom dźwięku A pod ochronnikiem L_{pA}' wyznacza się ze wzoru (2.31), przy czym wynik należy zaokrąglić do najbliższej liczby całkowitej:

$$L_{pA}' = 10 \log_{10} \sum_{f=125 \text{ Hz}}^{f=8000 \text{ Hz}} 10^{0,1(L_f + K_{Af} - (m_f - s_f))} \text{ [dB]}, \quad (2.31)$$

gdzie: L_f – zmierzone liniowe poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach oktaowych o częstotliwościach środkowych f z podanego zakresu; K_{Af} – poprawka korekcyjna według charakterystyki A dla pasm o częstotliwości środkowej f z podanego poniżej zakresu, m_f – tłumienie dźwięku przez ochronnika w danym paśmie oktaowym, s_f – odchylenie standardowe tłumienia, f – częstotliwości środkowe pasm oktaowych, $f = 125 \text{ Hz}, 250 \text{ Hz}, 500 \text{ Hz}, 1000 \text{ Hz}, 2000 \text{ Hz}, 4000 \text{ Hz}, 8000 \text{ Hz}$.

Metoda HML opiera się na znajomości wartości poziomów ciśnienia akustycznego (dźwięku) C – L_{pC} oraz dźwięku A – L_{pA} , i wyznaczeniu różnicy tych poziomów. Dla znanej różnicy poziomów dźwięków, w zależności od określonego kryterium oblicza się przewidywaną redukcję hałasu PNR (ang. **Predicted Noise Level Reduction**).

Dodatkowo konieczna jest znajomość wartości tłumień: H, M, L związanych odpowiednio z: wysokim (H), średnim (M) oraz niskim (L) zakresem częstotliwości, które deklarowane są przez producentów ochronników. Wartość parametru PNR oblicza się zgodnie z wzorami:

$$\text{dla: } L_{pC} - L_{pA} \leq 2[\text{dB}]; \text{ PNR} = M - \frac{H - M}{4} (L_{pC} - L_{pA} - 2) [\text{dB}], \quad (2.32)$$

$$\text{dla: } L_{pC} - L_{pA} > 2[\text{dB}]; \text{ PNR} = M - \frac{M - L}{8} (L_{pC} - L_{pA} - 2) [\text{dB}]. \quad (2.33)$$

Poziom dźwięku pod ochronnikiem słuchu L_{pA}' oszacowuje się na podstawie wzoru:

$$L_{pA}' = L_{pA} - \text{PNR} [\text{dB}]. \quad (2.34)$$

Podobnie jak w metodzie pasm oktaowych wynik należy zaokrąglić do najbliższej liczby całkowitej.

Metoda SNR opiera się na znajomości jednoliczbowego parametru SNR określonego przez producenta dla konkretnych ochronników oraz znajomości wartości poziomów dźwięku C – L_{pC} i dźwięka A – L_{pA} , (lub wartości wskaźnika rozkładu widma $\Delta CA = L_{pC} - L_{pA}$) dla danego profilu hałasu zmierzonego na stanowisku pracy. Poziom dźwięku pod ochronnikiem wyznacza się z zależności:

$$L_{pA}' = L_{pC} - \text{SNR} = L_{pA} + \Delta CA - \text{SNR} [\text{dB}]. \quad (2.35)$$

Metoda kontroli HML jest to uproszczona wersja metody HML. Opiera się na tych samych parametrach ochronnika słuchu – H, M oraz L. W odróżnieniu od metody HML nie wymaga ona wyznaczania wartości parametru PNR.

Metoda ta bazuje na subiektywnym określeniu, do której z dwóch grup tzw. hałasów wzorcowych należy ten na jaki narażony jest pracownik i przypisaniu go do klasy HM (hałas wysoko- i średniczęstotliwościowy), która definiowana jest przez kryterium postaci: $L_{pC} - L_{pA} \leq 5 \text{ dB}$; lub klasy L (hałas niskoczęstotliwościowy), której kryterium ma postać: $L_{pC} - L_{pA} > 5 \text{ dB}$.

Decyzja ta podejmowana jest na podstawie listy hałasów powiązanych z odpowiednimi czynnościami technologicznymi realizowanymi przez pracownika – tabela 2.11.

Tabela 2.11 Lista przykładów hałasów wzorcowych klasy HM i L – na podstawie materiałów szkoleniowych CIOP [31]

Źródła hałasu klasy HM: hałas średnio- i wysokoczęstotliwościowy; $L_{pC} - L_{pA} \leq 5$ dB	Źródła hałasu klasy L: niskoczęstotliwościowy; $L_{pC} - L_{pA} > 5$ dB
<ul style="list-style-type: none"> • cięcie palnikiem gazowym • silniki wysokoprężne • maszyny cukrownicze • wydmuch sprężonego powietrza • zespoły przeniesienia napędu w maszynach • krawędziarki i zawijarki • maszyny rozlewnicze • obróbka odlewów • obrabiarki do drewna, ceramiki, metali i tworzyw • pompy hydrauliczne • wyłazarki, szlifierki i polerki • wysokoobrotowe maszyny rotacyjne • wstrząsarki, kraty do wybijania odlewów, podajniki wibracyjne • narzędzia o udarowym charakterze działania • elektronarzędzia sieciowe i bateryjne • narzędzia pneumatyczne • kruszarki i młyny • młoty kuźnicze 	<ul style="list-style-type: none"> • koparki, sycharki, ładowarki, kruszarki i inny ciężki sprzęt górniczy, budowlany i drogowy • agregaty prądotwórcze, turbozespoły, turbiny wiatrowe i wodne • elektryczne piece hutnicze i wanny do elektrolizy • piece i kotły energetyczne • gniotowniki i prasy do obróbki plastycznej • tłokowe agregaty sprężarkowe • transformatory, przetwornice i urządzenia elektroenergetyczne • procesy spawania łukowego • piece hutnicze i technologiczne opalane paliwem stałym

Metoda kontroli HML powinna być traktowana jako orientacyjna i stosowana do wstępnego doboru ochronników słuchu. Jej wyniki powinny zostać zweryfikowane jedną z metod: pasm oktawowych, HML lub SNR.

2.1.8.1. Kryteria oceny poprawności doboru ochronników słuchu

Podstawowym kryterium doboru ochronników słuchu jest to, aby poziom dźwięku A pod nausznikami L_{pA} nie przekraczał wartości NDN i progu działania dla 8-mio godzinnego dnia pracy. Gwarantuje to brak ryzyka związanego z pogorszeniem słuchu będącego efektem aktywności zawodowej pracownika.

Niepoprawnie dobrane ochronniki mogą nie chronić użytkownika w odpowiednim stopniu i być przyczyną powstania ubytków słuchu. Równie niebezpieczna jest zbyt mocna redukcja hałasu co powoduje powstanie u pracownika uczucia dyskomfortu i izolacji akustycznej. Może to doprowadzić do wypadku np. w sytuacji, gdy pracownik nie usłyszy sygnału ostrzegawczego.

Oprócz właściwości tłumieniowych ochronniki słuchu powinny także posiadać określone właściwości użytkowe decydujące m.in. o komforcie ich użytkowania, możliwości i łatwości ich stosowania, odporności mechanicznej itp.

Ogólne wytyczne jak i wskazówki w tym zakresie zawarto, w normie PN–EN 458:2016 *Ochronniki słuchu. Zalecenia dotyczące doboru, użytkowania, konserwacji codziennej i okresowej. Dokument przewodni* [33].

Wartości poziomu dźwięku A pod nasznikami L_{pA}' oszacowanego z zastosowaniem metody pasm oktaowych, metody HML oraz metody SNR porównuje się z wartościami podanymi w tabeli 2.12 i na tej podstawie określa się poziom uzyskanej ochrony słuchu.

Tabela 2.12 Poziomy oszacowanej skuteczności ochrony słuchu pod ochronnikiem – na podstawie materiałów szkoleniowych CIOP [31]

Oszacowana wartość poziomu dźwięku A pod nasznikami - L_{pA}'	Poziom ochrony	Uwagi
$L_{pA}' > 80$ [dB]	Niewystarczająca	Dobrać ochronniki o lepszych parametrach
75 [dB] < $L_{pA}' \leq 80$ [dB]	Akceptowalna	Prawidłowy dobór ochronników
70 [dB] < $L_{pA}' \leq 75$ [dB]	Optymalna	
65 [dB] < $L_{pA}' \leq 70$ [dB]	Akceptowalna	
$L_{pA}' \leq 65$ [dB]	Zbyt wysoka	Zastosować ochronniki o mniejszym tłumieniu

2.2. Pomiary drgań na stanowisku pracy

W niniejszym rozdziale zostały opisane zagadnienia związane z pomiarami drgań mechanicznych na stanowiskach pracy, m.in.: podstawowe kryteria podziału drgań mechanicznych, ich wpływ na pracowników/operatorów, miary charakteryzujące drgania mechaniczne, wartości kryterialne oceny narażenia wibracyjnego i związanego z nim ryzyka zawodowego.

Ponadto, zaprezentowano obecnie stosowane strategie pomiarowe i zasygnalizowano kwestie związane z budżetem niepewności pomiarowej.

2.2.1. Kryteria podziału drgań

W przypadku, gdy drgania mechaniczne mają charakter niskoczęstotliwościowy – do ok. 1500 Hz i związane są z wnikaniem ich do organizmu ludzkiego poprzez bezpośredni kontakt człowieka z obiektem (źródłem drgań) nazywane są wibracjami.

Ze względu na swój charakter – związany z miejscem oddziaływania na ciało człowieka wibracje dzielimy na:

- drgania o charakterze ogólnym przenoszone głównie przez stopy, nogi, boki, plecy, miednicę i pośladki,

- drgania o charakterze miejscowym – przenoszone przez kończyny górne (głównie przez dłonie).

Ze względu na profil oddziaływania (charakter zmian w czasie) drgania dzielimy na: drgania ustalone, drgania nieustalone oraz udary (drgania impulsowe).

Ponadto ze względu na czas trwania narażenia, w odniesieniu do normatywnego 8-mio godzinnego dnia pracy, w przypadku drgań mówimy o: narażeniu ciągłym, narażeniu krótkotrwałym (przerywanym) i okazjonalny (sporadycznym).

2.2.2. Szkodliwy wpływ drgań na człowieka

W zdecydowanej większości przypadków oddziaływanie drgań na człowieka związane jest z jego aktywnością zawodową. Drgania są zaliczane do grupy czynników szkodliwych występujących na stanowiskach pracy.

Szkodliwe działanie drgań na organizm ze względu na skutki można podzielić na biologiczne i funkcjonalne. Do biologicznych zaliczamy wszelkiego rodzaju zmiany i zwyrodnienia w ciele człowieka, natomiast skutki funkcjonalne związane są z: zakłóceniami koordynacji ruchów, zwiększeniem czasu reakcji wzrokowej i ruchowej (refleksu) oraz odczuciem stanu zmęczenia i/lub znużenia. Negatywne skutki oddziaływania drgań na człowieka można podzielić na przemijające i trwałe.

Do przemijających skutków zaliczamy: zmianę progu odczuwania wibracji, zaburzenia przepływu krwi w miejscu oddziaływania drgań, zaburzenia równowagi i widzenia itp. Zmiany te ustępują samoistnie po ustaniu narażenia drganiowego. Czas powrotu do ogólnie pojętego „dobrostanu organizmu” zależy od wielu czynników m.in.: wartości przyspieszeń drgań, składu widmowego sygnału drganiowego, czasu trwania narażenia, cech osobniczych itd.

Do trwałych skutków oddziaływania drgań na człowieka – o negatywnym charakterze, można zaliczyć deformacje układu kostno–szkieletowego, czy też zespół jednostek chorobowych określanych jako ogólnie jako „zespół wibracyjny układu ręka-ramię” (ang. HAVS – *Hand Arm Vibration Syndrome*) [34 – 36].

Drgania miejscowe, szczególnie o długotrwałym i intensywnym oddziaływaniu mogą być również przyczyną zmian w funkcjonowaniu układów: naczyniowego [37, 38], nerwowego [39, 40], kostno–stawowo–mięśniowego [41], wewnątrzwydzielniczego (układ dokrewny) i wydalniczego [42].

W odniesieniu do stanowiska pracy, jakim jest pilarz-drwal negatywne skutki oddziaływania drgań na organizm operatorów pilarek na układ naczyniowy zostały już wielokrotnie opisane m.in. w wymienionych poniżej pracach.

Zagadnienie występowania „zespołu wibracyjnego układu ręka-ramię” wśród pracowników leśnych zatrudnionych na stanowisku pilarz-drwal zostało poruszone w pracy kierowanej przez A. T. Su. Wykazali oni istnienie korelacji pomiędzy narażeniem na drgania emitowane przez pilarki a obniżeniem temperatury dłoni wskutek zaburzenia krążenia i wywołanego tym obniżenia progu czucia i wydłużenia czasu powrotu zdolności percepcji w obrębie dłoni do stanu normalnego [43].

M. Futatsuka i inni w swojej pracy wykazali, że działanie wyłącznie drgań miejscowych, o ważonych częstotliwościowo wartościach skutecznych przyspieszeń drgań a_{hv} wynoszących odpowiednio: $17,8 \text{ m/s}^2$ w osi x , $20,0 \text{ m/s}^2$ w osi y i 50 m/s^2 w osi z , powoduje wzrost ciśnienia tętniczego krwi w obrębie dłoni – średnio o ok. $9,5 \text{ mmHg}$. Natomiast łączne działanie drgań o podanych wyżej wartościach przyspieszeń i dodatkowo hałasu o natężeniu 105 dB powoduje wzrost ciśnienia tętniczego krwi w obrębie dłoni średnio o ok. $29,7 \text{ mmHg}$ [44].

S. Sakaguchi i inni, wykazali, za pomocą badania mikrokapilar naczyń krwionośnych znajdujących się w tzw. wale paznokciowym, że długotrwała ekspozycja na drgania (związana ze stażem pracy) na stanowisku pilarz-drwal powoduje zmiany w budowie samych mikrokalilar oraz zwiększenie ciśnienia tętniczego krwi, przy jednoczesnym spadku prędkości przepływu krwi [45].

Stan i różnice w funkcjonowaniu obu dłoni u osób pracujących na stanowisku pilarz-drwal został zbadane w pracy M. Tanaka i inni. Autorzy wykazali istotne różnice pomiędzy wartością tzw. *współczynnika spadku siły zacisku* lewej i prawej dłoni dla dwóch grup statystycznych. Wartość współczynnika była mniejsza dla lewej dłoni zarówno w pierwszej jak i drugiej grupie badawczej. Przy czym, dla pierwszej grupy (brak lub lekkie zaburzenia w budowie naczyniowej) wartości współczynnika były większe niż dla drugiej grupy (zaburzenia w budowie naczyniowej lub widoczne schorzenia). Oprócz tego, autorzy nie stwierdzili różnic w temperaturze dłoni. Czasy reakcji były w obu grupach krótsze dla dłoni prawej, która wykazywała większą czułość (niższą wartość progową) na drgania [46].

Wieloaspektowa analiza czynników mających wpływ na sprawność krążenia obwodowego dłoni i kończyn górnych u osób posługujących się w swojej pracy pilarką

łańcuchową została opisana w pracy T. Miyakita i inni. Autorzy wykazali, że wraz ze wzrostem czasu trwania narażenia wibracyjnego spada sprawność krążenia. Ponadto, średnia temperatura dłoni podczas posługiwania się pilarką była wyższa dla grupy operatorów stosujących podwójną ochronę słuchu – tzn. jednocześnie stosowanie nauszników przeciwhałasowych z jednocześnie umieszczonymi w kanałach usznych wkładkami antyhałasowymi, w porównaniu do sytuacji, w której operatorzy nie stosowali żadnych ochronników. Zwiększenie masy narzędzia również wpływa negatywnie na wydajność krążenia krwi w dłoniach i kończynach górnych. W szczególnych przypadkach – u pacjentów ze schorzeniami układu krwionośnego kończyn górnych – zaobserwowano nietypowy wzorzec przepływu krwi w bezpośrednim okresie po ustąpieniu ekspozycji drganiowej [47].

Wpływ drgań na jakie narażeni są operatorzy pilarek został zbadany przez T. Kumlin i inni [48]. W swojej pracy autorzy wykazali, że długotrwała praca pilarką wywołała w 90 % zbadanych przypadków wystąpienie objawów choroby znanej jako zespół Raynauda¹, a dla 20 % przypadków zaobserwowano także znaczne deformacje kości znajdujących się w dłoni. Wszystkie zmiany wystąpiły pomiędzy wyrostkiem rylcowatym kości łokciowej a paliczkami.

Natomiast E. Lagerstrom i inni wykazali, że mechanizacja prac związanych z maszynowym pozyskiwaniem drewna i zastąpienie ścinki prowadzonej z użyciem pilarek na rzecz kombajnów leśnych – tzw. harwesterów znacząco przyczynia się do spadku liczby zgłaszanych dolegliwości układu kostno-stawowego i narządów ruchu (niemal dwukrotnie) [49].

Kwestia dolegliwości i schorzeń układu kostnego występujących u zawodowych pilarzy pracujących na terenie Polski została poruszona w pracy kierowanej przez W. Grzywińskiego [50]. Autorzy na podstawie danych ankietowych wykazali, że dolegliwości ze strony układu kostno-stawowego odczuwa aż 66,3 % respondentów (ból pleców), a 50 % z nich zgłasza także dolegliwości bólowe dłoni lub nadgarstków.

Oprócz widocznych i odczuwalnych przez pilarzy efektów negatywnego oddziaływania drgań miejscowych na ich organizmy należy także wspomnieć o zmianach w funkcjonowaniu układu wewnętrzwydzielniczego i wydalniczego. Zagadnienie to zostało poruszone przez

¹ Zespół Raynauda – napadowy skurcz tętnic naczyń krwionośnych, najczęściej w obrębie kończyn górnych

H. Une, i H. Esaki. Autorzy w swojej pracy wykazali, że drgania wpływają na zwiększone wydzielanie się w organizmie pilarza adrenaliny i noradrenaliny [51]. Hormony te pełnią ważną funkcję w organizmie, a ich nadmiar powoduje m.in. przyspieszenie akcji serca i zwiększenie ciśnienia tętniczego co zwiększa ryzyko udaru i zawału mięśnia sercowego. Stężenie hormonów i zmiany w układzie endokrynologicznym podczas pracy pilarką łańcuchową zbadali także T. Matoba, M. Chiba i T. Sakurai. Wykazali, że w trakcie pracy u pilarza wzrastają poziomy hormonów: ACTH, kortyzolu, adrenaliny i noradrenaliny [52].

2.2.3. Miary parametryzujące drgania miejscowe i narażenie na drgania

Ze względu na naturalną percepcję zmian prędkości w czasie – odczuwanie przyspieszenia przez ludzki organizm, parametrem stosowanym do opisu drgań występujących na stanowiskach pracy jest wartość skuteczna przyspieszeń drgań – a_{RMS} .

Percepcja oraz reakcja organizmu ludzkiego na drgania jest różna i zależna od wielu czynników m.in.: charakteru drgań, częstotliwości oraz miejsca ich wnikania do organizmu – czyli przypadku, gdy rozważamy drgania miejscowe lub drgania o charakterze ogólnym.

W związku z tym, przy wyznaczaniu narażenia drganiowego, uwzględnia się krzywe ważenia. Dla drgań miejscowych będziemy mówić o charakterystyce korekcyjnej W_h (ang. *Weighted-Hand*) lub $H-A$ (ang. *Hand-Arm*) niezależnie od rozpatrywanego kierunku pomiaru drgań. Natomiast w przypadku drgań o charakterze ogólnym o charakterystyce korekcyjnej $W-B$ (ang. *Whole-Body*). W tym przypadku należy zwrócić uwagę na dobór odpowiedniej krzywej ważenia w zależności od kierunku drgań (są inne dla kierunku pionowego i kierunków poziomych).

Wartości poprawek korekcyjnych charakterystyki filtrów można znaleźć w normie PN-EN ISO 5349-1:2004 *Drgania mechaniczne – Pomiar i wyznaczanie ekspozycji człowieka na drgania przenoszone przez kończyny górne – Część 1: Wymagania ogólne* [53]. Informacje nt. obliczania wartości współczynników korekcyjnych dla drgań miejscowych, jak również ogólnych można także znaleźć w normie PN-EN ISO 8041-1:2017-07 *Drgania mechaniczne działające na człowieka – Mierniki – Część 1: Mierniki drgań do zastosowań ogólnych* [54].

Formuła, na podstawie której wyznacza się krzywą ważenia W_h zgodnie normą PN-EN ISO 5349-1:2004 [53] opisana jest zależnością:

$$H_{(s)} = H_{b(s)} \cdot H_{w(s)}, \quad (2.33)$$

gdzie: $H_{(s)}$ – wynikowa funkcja ważenia amplitudowo-częstotliwościowego,
 $H_{b(s)}$ – filtr ograniczający pasmowy,
 $H_{w(s)}$ – filtr ważenia częstotliwościowego.

Funkcję ważenia amplitudowo-częstotliwościowego – filtr W_h wyznacza się ze wzoru:

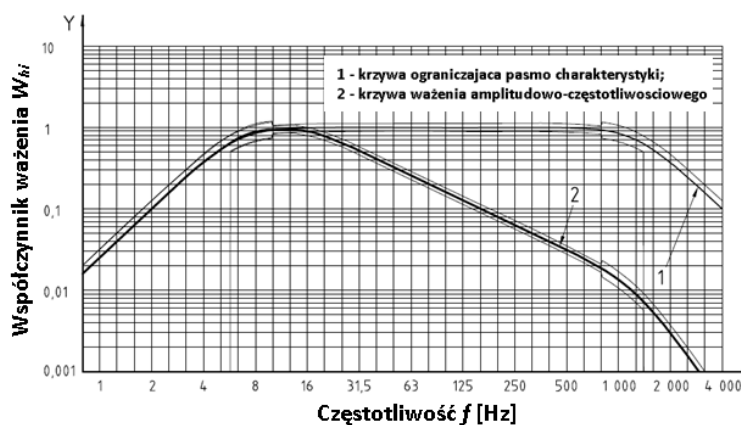
$$H_{w(s)} = \frac{(s + 2\pi f_3)2\pi K f_4^2}{\left(\frac{s^2 + 2\pi f_4 s}{Q_2} + 4\pi^2 f_4^2\right) f_3}, \quad (2.34)$$

gdzie: s – zmienna transformaty Laplace'a, $s = i2\pi f$,
 i – jednostka urojona, $i = \sqrt{-1}$,
 π – tzw. stała Archimedesesa (lub jako tzw. Ludolfina), $\pi \approx 3,1416$,
 f – częstotliwość,
 f_3, f_4 – stałe, $f_3 = f_4 = 15,915$ Hz,
 K – stała, $K = 1$;
 Q_2 – stała, $Q_2 = 0,64$.

Krzywą ważenia W_h dla drgań miejscowych można wyznaczyć korzystając ze wzorów zawartych w normie PN-EN ISO 8041-1:2017-07 [54].

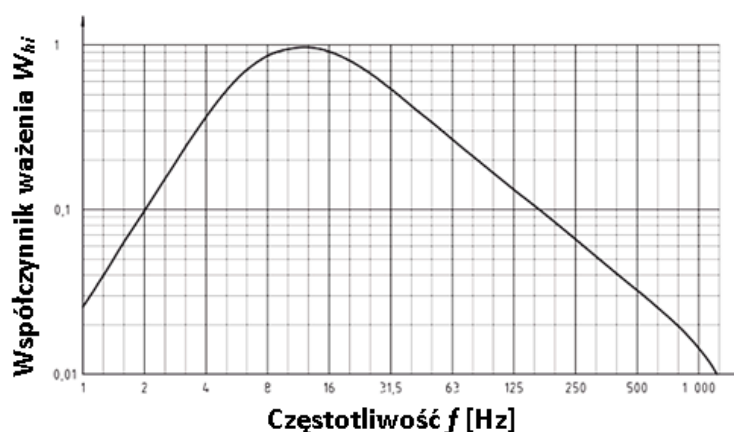
Krzywa ważenia $H_{w(s)}$ (opisana równaniem 2.34) oraz $H_{b(s)}$ zostały przedstawione na rysunku 2.3 – patrz kolejna strona.

Informacje nt. poprawek korekcyjnych dla drgań ogólnych można znaleźć w normie ISO 8041-1:2017-07 [54] oraz normie PN-EN 14253+A1:2011 *Drgania mechaniczne – Pomiar i obliczanie zawodowej ekspozycji na drgania o ogólnym działaniu na organizm człowieka dla potrzeb ochrony zdrowia – Wytyczne praktyczne* [55]. Zagadnienie drgań ogólnych nie jest jednak tematem niniejszej rozprawy doktorskiej.



Rysunek 2.3 Charakterystyka ograniczająca pasmo (1) oraz filtra wagowego W_h (2) stosowane w pomiarach drgań miejscowych – na podstawie PN-EN ISO 5349-1:2004 [53]

Wynikową krzywą ważenia dla drgań miejscowych – $H-A$ (*Hand-Arm*) zaprezentowano na rysunku 2.4.



Rysunek 2.4 Krzywa korekcyjna $H-A$ dla drgań miejscowych – na podstawie PN-EN ISO 5349-1:2004 [53]

W uzupełnieniu warto dodać, że w przypadku drgań ogólnych – oddziałujących na organizm ludzki np. przez plecy, pośladki czy uda stosowane jest ważenie częstotliwościowe W_{Bk} dla pomiarów w kierunku pionowego oraz W_{Ba} dla kierunków poziomych.

2.2.4. Miary charakteryzujące oddziaływanie drgań miejscowych i ich wartości dopuszczalne

Wartości NDN dla narażenia drganiowego należy rozpatrywać w ujęciu, czy dany profil narażenia wibracjami spełnia kryteria narażenia długotrwałego – trwającego przez całą zmianę roboczą (tj. 8 h), czy krótkotrwałego – gdy czas trwania narażenia nie przekracza 30 minut.

Jako miarę stosowaną w pomiarach drgań miejscowych, zgodnie z [53] przyjęto: „całkowitą wartość skutecznego ważonego częstotliwościowo przyspieszenia drgań” zwaną także w normie: „sumą wektorową ważonego częstotliwościowo przyspieszenia drgań” – a_{hv} .

Aby zachować poprawność merytoryczną i zgodność z nomenklaturą techniczną wspomnianą wielkość należałoby określać jako: *sumę wektorową, z trzech wzajemnie prostopadłych kierunków, wartości skutecznych ważonych częstotliwościowo charakterystyką korekcyjną W_h przyspieszeń drgań.*

Wartość przyspieszeń drgań dla jednostkowej czynności – $a_{hv,i}$ wyznacza się na podstawie zależności:

$$a_{hv,i} = \sqrt{a_{hv\ x,i}^2 + a_{hv\ y,i}^2 + a_{hv\ z,i}^2} \left[\frac{m}{s^2} \right], \quad (2.35)$$

gdzie: $a_{hv,i}$ – wartość skuteczna przyspieszeń drgań dla i -tej czynności roboczej,
 $a_{hv\ x}$ – ważona częstotliwościowo wartość skuteczna przyspieszeń drgań zmierzona w kierunku x ,
 $a_{hv\ y}$ – ważona częstotliwościowo wartość skuteczna przyspieszeń drgań zmierzona w kierunku y ,
 $a_{hv\ z}$ – ważona częstotliwościowo wartość skuteczna przyspieszeń drgań zmierzona w kierunku z ,
 i – numer elementarnej czynności roboczej, $i = 1, 2, 3, \dots, N$,
 N – kolejne liczby naturalne.

Łączny czas trwania narażenia drganiowego, niezależnie od liczby i rodzaju wykonywanych czynności oblicza się zgodnie ze wzorem:

$$t = \sum_{i=1}^n t_i \text{ [s]}, \quad (2.36)$$

gdzie: t_i – czas trwania elementarnej czynności związanej z narażeniem drganiowym, np. szlifowanie, cięcie itp.

Ocena narażenia drganiowego realizowana jest poprzez wyznaczenie wartości dziennej ekspozycji na drgania – $A(8)$ i porównanie jej z wartościami dopuszczalnymi NDN – zamieszczonymi w tabeli 2.13 – patrz kolejna strona.

Dzienna ekspozycja na drgania opisana jest wzorem:

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^n a_{hv,i}^2 t_i} \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad (2.37)$$

gdzie: $a_{hv,i}$ – suma wektorowa wartości skutecznych ważonych częstotliwościowo przyspieszeń drgań wyznaczona dla i -tej czynności elementarnej,
 t_i – czas trwania i -tej czynności elementarnej,
 i – numer elementarnej czynności roboczej, $i = 1, 2, 3, \dots, N$,
 N – kolejne liczby naturalne,
 T_0 – czas odniesienia, $T_0 = 8h = 480 \text{ min}$.

Iloczyn kwadratu wartości skutecznych przyspieszeń drgań dla jednostkowej czynności związanej z narażeniem wibracyjnym i czasu trwania tej czynności nazywany jest jednostkową dawką drgań – D_i . Jednostkowa dawka drgań opisana jest równaniem:

$$D_i = a_{hv,i}^2 t_i \left[\frac{m^2}{s^3} \right], \quad (2.38)$$

gdzie: $a_{hv,i}$ – suma wektorowa wartości skutecznych ważonych częstotliwościowo przyspieszeń drgań wyznaczona dla i -tej czynności elementarnej,
 t_i – czas trwania i -tej czynności elementarnej.

Dawka całkowita drgań jest sumą dawek jednostkowych. Wartości NDN przyspieszeń drgań wyrażone za pomocą dawki drgań zostały zawarte w tabeli 2.13. Dawka całkowita drgań jest opisana równaniem:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i \left[\frac{m^2}{s^3} \right], \quad (2.39)$$

gdzie: D_i – dawka jednostkowa drgań związana z wykonaniem i -tej czynności elementarnej,
 n – liczba czynności elementarnych związanych z narażeniem na drgania.

W praktyce wprowadzono tzw. *progi działania* – VAL (ang. *Vibration Action Level*) czyli określono wartości parametrów, po przekroczeniu których pracodawca jest zobligowany do przedsięwzięcia niezbędnych środków w celu skutecznego ograniczenia drgań i uniemożliwienia przekroczenia wartości NDN. Wartości progów działania dla wielkości charakteryzujących drgania w środowisku pracy zostały podane m.in. w [23] oraz *Rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. W sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy* (Dziennik Ustaw 2002, nr. 217, poz. 1833) [56]. Dla drgań miejscowych i ogółu pracowników, do których należy zaliczyć osoby pracujące na stanowisku pilarz-drwał, wartość progu działania VAL (ang. *Vibration Action Level*) została określona na $2,5 \text{ m/s}^2$.

Wartości progu działania VAL, NDN dla drgań o charakterze miejscowym oraz odpowiadające im dawki drgań, dla trzech różnych kategorii pracowników zawarto w tabeli 2.13. Pogrubieniem wyróżniono wartości VAL i NDN przypisane do stanowiska pilarz-drwal (ogół pracowników).

Tabela 2.13 Wartości NDN dla drgań miejscowych – na podstawie [8, 28]

		Ogół pracowników	Pracownicy młodociani	Kobiety w ciąży
Wartość progu działania [m/s ²]	VAL	2,5	-	-
Dzienna ekspozycja na drgania [m/s ²]	A(8)	2,8	1	1
Wartość dopuszczalna dla ekspozycji krótkotrwałej [m/s ²]	<i>a_{hv,30min dop.}</i>	11,2	4	4
Dawka drgań dla narażenia długotrwałego [m ² /s ³]	<i>D_{8h dop.}</i>	225 792	28 800	28 800
Dawka drgań dla narażenia krótkotrwałego [m ² /s ³]	<i>D_{30 min dop.}</i>	225 792	28 800	28 800

Podczas wyznaczania narażenia na drgania miejscowe i związanego z nim ryzyka zawodowego, zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. W sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy* (Dziennik Ustaw 2002, nr. 217, poz. 1833) [56], możliwe są dwa scenariusze:

- a) Jeżeli, całkowity czas trwania narażenia na drgania – t jest dłuższy niż 30 min, i sumaryczny czas trwania każdej z czynności – t_i również jest dłuższy niż 30 minut wyznacza się jedynie dzienną ekspozycję na drgania A(8),
- b) W przypadku, gdy całkowity czas trwania narażenia na drgania – t jest dłuższy niż 30 minut, i jednocześnie sumaryczny czas trwania przynajmniej jednej z czynności – t_i jest krótszy niż 30 minut, to oprócz wyznaczenia dziennej ekspozycji na drgania – A(8) dodatkowo, spośród obliczonych sum wektorowych dla poszczególnych czynności elementarnych – $a_{hv,i}$ trwających krócej niż 30 minut wybiera się tą o największej wartości – $a_{hv,i \max}$ i porównuje się ją z wartością dopuszczalną dla ekspozycji krótkotrwałej – $a_{hv,30min \text{ dop.}}$

Zgodnie z obowiązującymi przepisami [9, 28] pracodawcy zobowiązani są do regularniej okresowej kontroli warunków pracy m.in. określenia ryzyka zawodowego związanego z narażeniem na drgania na stanowiskach pracy.

Działaniami jakie może podjąć pracodawca w przypadku przekroczenia progu działania mogą być:

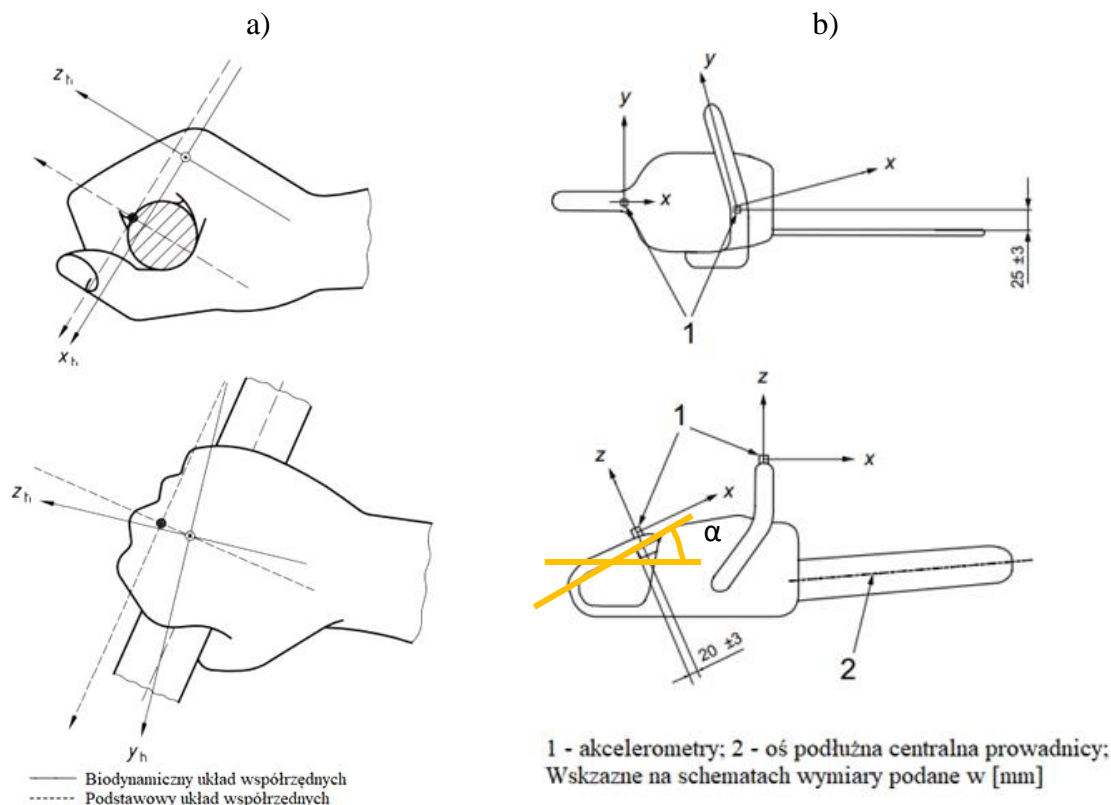
- redukcja drgań u źródła,
- stosowanie elementów i układów tłumiących drgania – wibroizolacja pasywna, aktywna i semi-aktywna,
- stosowanie indywidualnych środków ochrony osobistej w postaci rękawic antywibracyjnych (poprzedzonych ich doborem na podstawie pomiarów),
- rotacja pracowników na stanowisku o znacznym narażeniu drganiowym,
- automatyzacja lub robotyzacja prac.

Norma PN–EN ISO 5349–1:2004 [53] określa orientację kierunków odniesienia osi układu współrzędnych dla różnych sposobów wykonania uchwytu. W przypadku, gdy uchwyt ma kształt cylindryczny lub zbliżony do cylindrycznego (tak ja ma to miejsce w przypadku pilarek) – tzn. jest dopasowany ergonomicznie do kształtu zaciśniętej dłoni to wówczas orientacja osi pomiarowych jest zgodna z przedstawioną na rysunku 2.5a).

Natomiast dla grupy urządzeń jaki i są pilarki położenie przetworników drgań i orientacja osi układu współrzędnych została podana w normie PN–EN ISO 22867:2022–05 *Maszyny leśne i ogrodnicze – Metodyka badania drgań przenośnych maszyn ręcznych z silnikiem spalinowym – Drgania na uchwytach* [57] co zostało przedstawione na rysunku 2.5b).

Na rysunku 2.5b) naniesiono także kąt α – leżący w płaszczyźnie prostopadłej do osi wału silnika, związany z obrotem układu osi odniesienia na uchwycie tylnym względem osi układu odniesienia na uchwycie przednim.

Jak wynika z rysunku 2.5 orientacja podstawowego układu osi odniesienia, związanego ściśle z geometrią i konstrukcją uchwytów nie pokrywa się z orientacją tzw. biodynamicznego układu osi odniesienia. Zauważalna jest różnica w położeniach kątowych osi układu podstawowego – powiązanego z uchwycem, a układem biodynamicznym – związanym z operatorem oraz położeniem współrzędnościowym układów – dla punktów początkowych (tzw. biegunów).



Rysunek 2.5 Orientacja osi odniesienia: uchwytu cylindrycznego zgodna z PN-EN ISO 5349-1:2004 – a); położenie przetworników drgań na rękojeściach pilarki i orientacja osi odniesienia akcelerometrów zgodna z PN-EN ISO 22867:2002 – b); na podstawie [53, 57]

Porównując ze sobą rysunki 2.5a oraz 2.5b można stwierdzić, że istnieją rozbieżności co do oznaczeń symbolicznych osi odniesienia w przypadku uchwytu tylnego – sterującego. Opis osi x oraz y określony w normie ISO 22867:2022-05 [57] nie pokrywa się z opisem osi w normie PN-EN ISO 5349-1:2004 [53].

O ile kwestia ta nie ma znaczenia w przypadku wyznaczania wartości $a_{hv,i}$, jest o tyle istotna w sytuacji kiedy rozpatruje się drgania w poszczególnych kierunkach i określa dominujący kierunek drgań. Niezgodność ta może prowadzić do błędnej interpretacji wyników pomiarów.

Na potrzeby pomiarów związanych z realizacją badań w ramach niniejszej rozprawy zastosowano orientację kierunków pomiaru drgań zgodną z PN-EN ISO 5349-1:2004 [53].

2.2.5. Strategie pomiarów drgań na stanowiskach pracy

Pomiary drgań na stanowiskach pracy wykonuje się zgodnie z ogólnymi wytycznymi zawartymi w *Rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 2 lutego 2011 r. w sprawie badań*

*i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dziennik Ustaw nr. 33; poz. 166) [58]. Natomiast szczegółowe wytyczne związane z pomiarami drgań o charakterze miejscowym zawarte są w normie PN-EN ISO 5349-1:2004 *Drgania mechaniczne. Pomiar i wyznaczanie ekspozycji człowieka na drgania przenoszone przez kończyny górne. Część 1: Wymagania ogólne* [53] oraz PN-EN ISO 5349-2:2004 *Drgania mechaniczne. Pomiar i wyznaczanie ekspozycji człowieka na drgania przenoszone przez kończyny górne. Część 2: Praktyczne wytyczne do wykonywania pomiarów na stanowisku pracy* [59].*

W normie PN-EN ISO 5349-2:2004 [59] opisano możliwe do zastosowania 4 strategie pomiarowe wykorzystywane w przypadku pomiarów drgań miejscowych na stanowiskach pracy.

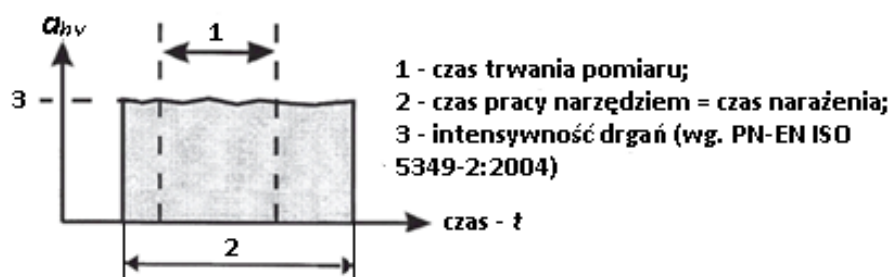
2.2.5.1. Strategia 1

Pierwsza strategia pomiarowa – pomiary długotrwałe podczas ciągłej pracy narzędziem. Strategia ta zakłada, że czas pracy narzędziem jest długi, a w jej trakcie operator utrzymuje stały i nieprzerwany kontakt z powierzchnią wibrującą. Podczas pracy narzędziem może występować zróżnicowanie wartości *intensywności drgań*² – a_{hv} w czasie trwania pomiaru, wynikające z normalnego (typowego) sposobu użytkowania narzędzia.

W takiej sytuacji pomiar drgań może być realizowany, bez żadnych dodatkowych warunków. Jeżeli celem pomiaru jest wyznaczenie dziennej ekspozycji na drgania – $A(8)$, to oprócz informacji nt. uśrednionej wartości – a_{hv} konieczne jest także oszacowanie rzeczywistego czasu trwania narażenia.

Idea realizacji pomiarów drgań zgodnie z pierwszą strategią pomiarową została przedstawiona na rysunku 2.6.

² W przywołanej normie PN-EN ISO 5349-2:2004 stosowany jest termin *intensywność drgań* i oznaczany jest symbolem a_{hv} . W rzeczywistości jest to: *suma wektorowa, z trzech wzajemnie prostopadłych kierunków, wartości skutecznych, ważonych częstotliwościowo charakterystyką korekcyjną W_h przyspieszeń drgań.*



Rysunek 2.6 Idea realizacji pomiarów długotrwałych dla ciągłej pracy narzędziem – pierwsza strategia pomiarowa – na podstawie PN-EN ISO 5349-2:2004 [59]

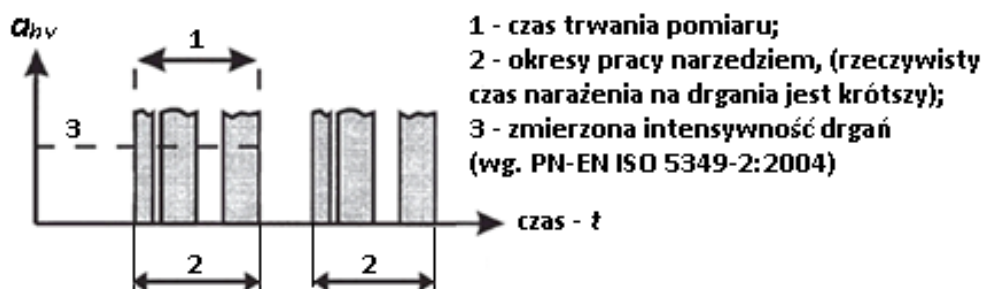
2.2.5.2. Strategia 2

Druga strategia pomiarowa – pomiary długotrwałe podczas przerywanej pracy narzędziem – zakłada, że czas pracy narzędziem jest długi, a w jej trakcie występują przerwy, w trakcie których operator nie jest narażony na drgania.

W takim przypadku pomiar drgań może być realizowany przez długi czas pod warunkiem, że wszelkie przerwy w pracy wynikają z normalnego sposobu posługiwania się narzędziem, a sam operator nie traci z nim kontaktu lub nieznacznie zmienia ułożenie rąk.

Do oceny dziennego narażenia na drgania strategia ta wymaga, oprócz informacji o wartości *intensywności drgań* – a_{hv} , znajomości łącznego czasu trwania narażenia na działanie wibracji w ciągu dnia. W takim przypadku czas narażenia obejmuje krótkie przerwy, a więc będzie dłuższy niż rzeczywisty czas oddziaływania drgań na operatora.

Sposób realizacji pomiarów drgań zgodnie z drugą strategią pomiarową został przedstawiony na rysunku 2.7.



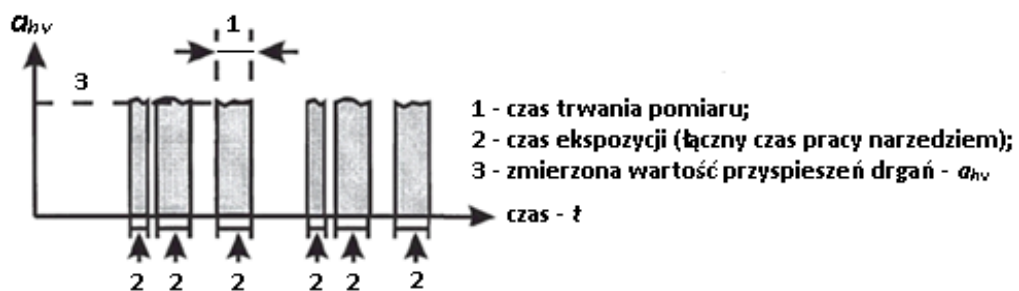
Rysunek 2.7 Idea realizacji pomiarów długotrwałych dla przerywanego charakteru pracy narzędziem – druga strategia pomiarowa – na podstawie PN-EN ISO 5349-2:2004 [59]

2.2.5.3. Strategia 3

Trzecia strategia pomiarowa – pomiary krótkotrwałe podczas przerywanej pracy narzędziem, uwzględnia sytuacje, w których często dochodzi do zdjęcia ręki z uchwytu narzędzia – z odłożeniem narzędzia włącznie. Związane jest to np. z: wymianą taśmy ścierniej, wiertła lub koniecznością skorzystania z innego narzędzia (ręcznego lub zmechanizowanego). W takiej sytuacji uzasadnione są pomiary krótkotrwałe, w trakcie których uwzględnia się poszczególne fazy pracy urządzenia.

Dopuszcza się również realizację pomiarów w trakcie symulowanych czynności roboczych, które modyfikuje się tak, aby ich czas trwania był odpowiednio długi do celów pomiarowych, przy czym warunki takiej czynności symulowanej powinny możliwie jak najwierniej odwzorowywać warunki rzeczywiste.

Oprócz informacji o *intensywności drgań* – a_{hv} , ocena dziennego narażenia wymaga także znajomości czasu trwania narażenia związanego z każdą fazą pracy. Ideę pomiarów drgań zgodnie z trzecią strategią pomiarową przedstawiono na rysunku 2.8.



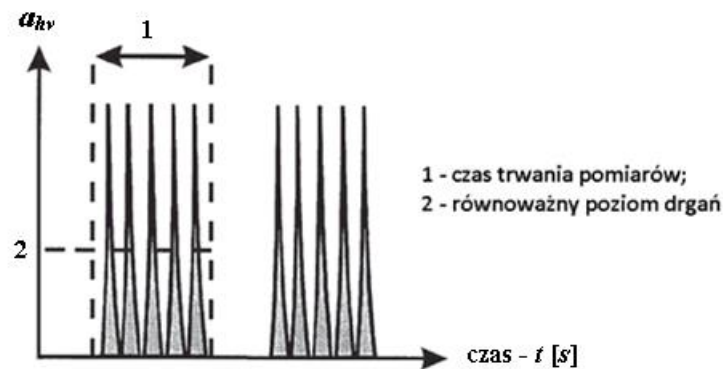
Rysunek 2.8 Idea realizacji pomiarów krótkotrwałych dla przerywanej pracy narzędziem – trzecia strategia pomiarowa – na podstawie PN-EN ISO 5349-2:2004 [59]

2.2.5.4. Strategia 4

Czwarta strategia pomiarowa – pomiary wstrząsów lub serii drgań podczas pracy urządzeniem w ustalonym czasie – ma zastosowanie w przypadku, gdy pracownik narażony jest na drgania o charakterze impulsowym (udary). Typowymi urządzeniami generującymi tego typu drgania są: młotki nitownicze, gwoździarki pneumatyczne, młoty wyburzeniowe, klucze udarowe itp. W przypadku, gdy operator posługuje się tego typu narzędziami oszacowanie rzeczywistego czasu narażenia może być bardzo trudne lub nawet niemożliwe. Natomiast możliwe jest oszacowanie liczby impulsów w ciągu zmiany roboczej.

Pomiary należy prowadzić w ustalonym czasie, którego długość obejmuje co najmniej jeden pełen cykl roboczy (np. zakucie nitu). Czas pomiaru powinien być tak dobrany, aby czas przerwy przed wystąpieniem impulsu (serii impulsów), pomiędzy nimi i po jego wystąpieniu był możliwie jak najkrótszy.

Oprócz informacji o wartości przyspieszeń drgań – a_{hv} i oszacowania dziennej liczby impulsów, ocena narażenia wymaga podania czasu trwania pomiaru i liczby uderów w trakcie trwania pomiaru. Graficzna interpretacja sposobu realizacji pomiarów drgań zgodnie z czwartą strategią pomiarową została przedstawiona na rysunku numer 2.9.



Rysunek 2.9 Idea realizacji pomiarów krótkotrwałych dla udarowego charakteru pracy narzędzi o udarowym charakterze pracy – czwarta strategia pomiarowa – na podstawie PN-EN ISO 5349-2:2004 [59]

2.2.5.5. Określenie stosowalności poszczególnych strategii pomiaru drgań na stanowisku pilarz-drwal

Mając na uwadze wyżej opisane cztery strategie pomiarowe oraz specyfikę pracy na stanowisku pilarz-drwal, który w trakcie ścinki drzew oprócz pilarki posługuje się także taśmą mierniczą, oraz innymi narzędziami ręcznymi – głównie kliny oraz siekiera/młot; najbardziej adekwatną do realizacji pomiarów drgań byłaby trzecia strategia pomiarowa.

Za wyborem tej strategii przemawia to, że w trakcie pracy pilarz często zmienia sposób chwytu urządzenia z oburącz – w trakcie trwania ścinki, okrzesywania i przerzynki, na uchwyt jedną ręką (zazwyczaj lewą) w trakcie zaczepiania taśmy mierniczej i pomiaru długości sortymentu drzewnego poddawanego wyrzynce. Niekiedy zdarzają się sytuacje w których pilarz zmuszony jest odłożyć urządzenie, bez unieruchamiania jednostki napędowej,

by posługiwać się innymi narzędziami – np. podczas wbijania klinów wspomagających obale-
nie pnia.

Ponadto, należy mieć na uwadze, że w trakcie pracy pilarz przemieszcza się, często na
znaczne odległości, co powoduje konieczność unieruchomienia jednostki napędowej pilarki
(względy bezpieczeństwa i ekonomiczne).

Wynikające z tego faktu przerwy w pracy pilarki wiernie odzwierciedlają przedstawiony
na rysunku 2.8 profil narażenia.

Dodatkowo czas pomiaru można odnieść do konkretnie wykonywanych operacji – ścinki,
okrzesywania oraz przerzynki [29] rozpatrywanych oddzielnie, (bądź też łącznie) dla całego
procesu pozyskania sortymentów drzewnych związanych w wycinką jednego drzewa.

Możliwe jest również stosowanie pierwszej oraz drugiej strategii pomiarowej, lecz może
to być przyczyną błędów wynikających z nieprzewidzianych zdarzeń losowych takich jak
uderzenia pilarką w trakcie poruszania się w sytuacji, gdy silnik został unieruchomiony.

Strategia numer 4 ze względu na charakter pracy pilarki nie jest brana pod uwagę.

Mając powyższe na uwadze wskazana jest rejestracja audio–wizualna pracy pilarza
w celu identyfikacji oraz sposobem realizacji chwytu urządzenia przez operatora
(oburącz/jedną ręką). W trakcie prowadzenia pomiarów drgań, niezależnie od wybranej strate-
gii pomiarowej, należy uwzględnić oddziaływanie drgań wszystkich wykorzystywanych
w trakcie pracy zmechanizowanych narzędzi ręcznych które mogą mieć znaczący wpływ na
wartość dziennej ekspozycji na drgania. W tym celu konieczna jest identyfikacja:

- źródeł narażenia na wibracje – rodzaj urządzenia, ich ilość itp.
- trybu pracy urządzeń – zmiany prędkości obrotowej i/lub funkcji np. praca na
obrotach jałowych i pod obciążeniem itd.,
- zmienności warunków środowiskowych pracy – rodzaj obrabianego materiału,
zmiana sposobu chwytu itp.,
- rodzaju zastosowanego osprzętu/narzędzia współpracującego z urządzeniem:
w przypadku urządzenia jakim jest pilarka będą to m.in.: długość prowadnicy,
typ łańcucha lub zmiana parametrów operacyjnych np. prędkości obrotowej.

Pomocne w tej materii mogą okazać się informacje uzyskane na podstawie wywiadu z pracownikami lub ich przełożonymi, identyfikacja czynności lub urządzeń, które generują najwyższe wibracje itp.

Podsumowując ten podrozdział należy jednak stwierdzić, że stosując ww. strategię zachodzi konieczność wykonywania pomiarów bezpośrednio na stanowisku pilarza co stwarza realne dodatkowe zagrożenie wypadkiem nie tylko dla pilarza, ale i dla personelu wykonującego pomiary.

Jest to zatem kolejny argument potwierdzający potrzebę opracowania metodyki umożliwiającej oszacowanie zagrożenia drganiami i hałasem metodami pośrednimi bez konieczności realizacji pomiarów w strefie zagrożenia.

2.2.6. Budżet niepewności pomiarowej w pomiarach drgań

Istnieje spora grupa czynników wpływających na wynik pomiaru drgań. W przypadku stanowiska jakim jest pilarz-drwal czynnikami tymi mogą być:

- prawidłowa identyfikacja źródeł i dróg propagacji drgań,
- zakłócenia w postaci m.in. artefaktów w postaci zdarzeń losowych i incydentalnych które nie są ściśle związane z realizowanym na stanowisku pracy zadaniami,
- dobór metody pomiarowej i czasu trwania pomiaru,
- stosowana aparatura pomiarowa i poprawność nastaw kalibracyjnych i pomiarowych,
- wzorcowanie toru/układu pomiarowego,
- właściwa lokalizacja i liczba punktów pomiarowych,
- sposób zamocowania przetworników w punktach pomiarowych,
- doświadczenie personelu realizującego pomiary,
- sposób pracy operatorów narzędzi/charakter pracy urządzeń.

Ze względu na dużą liczbę czynników, złożony charakter i ich wzajemne oddziaływanie na siebie, obliczenie niepewności pomiarowej, realizowane częściowo na drodze oszacowania, i jest złożonym zagadnieniem.

Szczegółowe wytyczne odnośnie wyznaczania niepewności przyspieszeń drgań ujęte są w normie ISO/TS 22704:2022 *Mechanical vibration – Uncertainty of the measurement and evaluation of human exposure to vibration (Drgania Mechaniczne – Niepewność pomiaru i oceny narażenia człowieka na drgania)* [60].

Wyznaczając niepewność pomiarową należy uwzględnić jej składowe związane z:

- przyrządami pomiarowymi,
- warunkami realizacji pomiarów, w szczególności:
 - o doбором odpowiedniego przetwornika drgań,
 - o sposobem montażu przetwornika,
 - o lokalizacją i orientacją przetworników,
 - o zakłóceniami,
 - o czasem trwania pomiaru,
 - o warunkami środowiska (głównie: odstępstwami od normalnego trybu pracy/obsługi narzędzia/urządzenia, zmianami w sposobie pracy operatora – doświadczenie),
- powtarzalnością i odtwarzalnością warunków realizacji pomiarów, w szczególności:
 - o symulacją procedur, czynności itp.,
 - o miejscem pomiaru,
 - o zmianami stanu technicznego urządzeń/narzędzi i ich oprzyrządowania (elementów roboczych),
 - o zmianami pozycji ciała operatora, siły zacisku na rękojeściach i siły nacisku narzędzia,
 - o zmianami właściwości mechanicznych materiałów poddawanych procesowi technologicznemu,
 - o różnicami w cechach osobniczych operatorów urządzeń,
- niepewnością wyznaczania czasów trwania:
 - o poszczególnych czynności elementarnych,
 - o łącznego czasu ekspozycji na drgania,
 - o oszacowaniem liczby cykli pracy w ciągu dnia,
 - o rozbieżnością w określaniu czasu pracy (czasem narażenia) podawanego przez pracownika a rzeczywistym czasem pracy narzędziem,

Mając na uwadze wszystkie powyższe, niepewność pomiarów drgań mechanicznych wyznacza się, podobnie jak w przypadku pomiarów hałasu na stanowiskach pracy jako niepewność rozszerzoną – $U_{(x)}$.

Niepewność ta opisana jest równaniem:

$$U_{(x)} = k \cdot u = k \cdot \sqrt{\sum U_A^2 + \sum U_B^2}, \quad (2.40)$$

gdzie: k – współczynnik rozszerzenia (pokrycia),
 U_A – niepewność typu A (obliczana na podstawie zależności (2.41),
 U_B – niepewność typu B (szacowana).

Dla większości zastosowań technicznych, związanych z pomiarami drgań miejscowych oraz ogólnych zaleca się przyjęcie wartości współczynnika rozszerzenia (pokrycia) $k = 2$, co odpowiada 95% przedziałowi ufności dla testu obustronnego – tzn. „±” oraz 97,5% dla testu jednostronnego – „+”.

Niepewność typu A wyznacza się z równania (2.41) jako odchylenie standardowe średniej wartości przyspieszeń drgań dla n pomiarów.

$$U_{A(x)} = u(x) = \sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.41)$$

gdzie: x_i – zmierzona wartość przyspieszeń drgań dla i -tej próbki (pomiaru),
 \bar{x} – wartość średnia przyspieszeń drgań dla całej populacji,
 n – liczba pomiarów (próbek).

Zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie ISO/TS 22704:2022 [60] wartość niepewności pomiarowej typu B szacuje się na podstawie zależności:

$$U_{B(x)} = \sqrt{\sum_{i=1}^6 u_{(xi)}^2}, \quad (2.42)$$

gdzie: $u_{(xi)}$ – poszczególne składniki niepewności pomiarowej typu B.

Kolejne składniki sumy w wyrażeniu (2.42) odpowiadają kolejno niepewnościom związanym z:

- przyrządem pomiarowym – $u_{(x1)}$,
- wyborem punktów pomiarowych – $u_{(x2)}$,
- sposobem mocowania przetwornika – $u_{(x3)}$,
- powtarzalnością warunków środowiskowych dla których otrzymano wyniki – $u_{(x4)}$,
- niepewnością związaną z osobą samego operatora (rozrzut cech osobniczych) – $u_{(x5)}$,
- niepewnością produkcyjną obiektu badań (rozrzut jakościowy produktu) – $u_{(x6)}$.

Wartości liczbowe poszczególnych (częstkowych) składników niepewności typu B przyjmuje się na podstawie ww. normy [60]. Częstkowe współczynniki niepewności pomiarowej typu B – $u_{(xi)}$, dla grupy urządzeń jakimi są pilarki łańcuchowe, mieszczą się w szerokim zakresie zmienności – od 0,098 do 0,191. Przy ich obliczaniu (szacowaniu) pomocne mogą być m.in. dane/informacje związane m.in. z:

- metrykami,
- certyfikatami,
- danymi literaturowymi,
- doświadczeniami własnymi i wiedzą personelu realizującego pomiary,
- znajomością badanego zjawiska.

Należy dodać, że w przypadku pilarki będącej obiektem badań, (użytej w trakcie pomiarów) realizowanych na potrzeby opracowania metodyki pomiarowej w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej, producent urządzenia deklaruje stałą wartość rozszerzonej niepewności pomiaru sumy wektorowej ważonych częstotliwościowo wartości skutecznych przyspieszeń drgań uchwytów pilarki – U wynoszącą 2 m/s^2 .

2.2.7. Określenie poziomu ryzyka zawodowego dla narażenia drganiami

W przypadku drgań o miejscowym charakterze działania rozróżnia się krotność przekroczeń dla narażenia długotrwałego – $kr_{A(8)}$, oraz krotność przekroczeń dla narażenia krótkotrwałego – $kr_{max,h}$.

Krotności te wyznacza się zgodnie z normą PN-N-18002:2011 [30], korzystając z zależności:

$$kr_{A(8)} = \frac{A(8)}{A(8)_{dop.}} , \quad (2.43)$$

$$kr_{max,h} = \frac{a_{hv,max}}{a_{hv,30min dop.}} . \quad (2.44)$$

Jako podstawę określenia ryzyka zawodowego przyjmujemy większą z otrzymanych wartości. Otrzymaną krotność przekroczenia porównujemy z wartościami podanymi w tabeli numer 2.14.

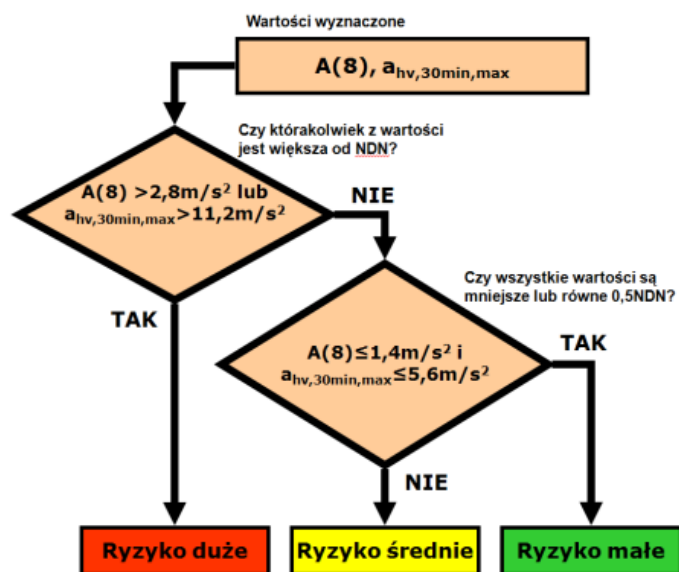
Tabela 2.14 Wartości kryterialne oceny ryzyka zawodowego w oparciu o krotność przekroczenia w przypadku ekspozycji na drgania – na podstawie materiałów szkoleniowych CIOP [31]

Ryzyko zawodowe	Krotność przekroczenia	Poziom ryzyka	Zalecenia
Małe	$0,2 \leq kr \leq 0,5$	Akceptowalny	Brak zaleceń
Średnie	$0,5 \leq kr \leq 1$	Dopuszczalny	Prowadzenie okresowej kontroli warunków pracy
Duże	$1 < kr$	Niedopuszczalny	Należy bezwzględnie wstrzymać prace

Wynik oceny decyduje o dalszych działaniach jakie zobowiązany jest podjąć pracodawca w ramach planu poprawy warunków pracy w ramach pracy oraz szeroko rozumianej polityki bezpieczeństwa. Plan ten powinien uwzględniać m.in. częstotliwość wykonywania pomiarów potencjalnie szkodliwych/uciążliwych czynników na stanowisku pracy w zależności od określonego na podstawie wcześniejszych badań ryzyka. Zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra Zdrowia z dnia 2 lutego 2011 r. W sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy* (Dziennik ustaw 2011, nr. 33, poz. 166) [58] pomiary drgań powinny być zrealizowane (licząc od poprzedniej oceny):

- po upływie 2 lat – dla małego ryzyka,
- po upływie roku – dla średniego ryzyka,
- pomiarów nie przeprowadza się w przypadku, gdy krotność kr wyznaczona na podstawie dwóch wcześniejszych badań przeprowadzonych w odstępie 2 lat nie przekracza 0,2.

Algorytm oceny ryzyka zawodowego dla drgań oddziałujących przez kończyny górne przedstawiono na rysunku 2.10.



Rysunek 2.10 Algorytm oceny ryzyka zawodowego dla drgań miejscowych (dla grupy ogółu pracowników) [61]

2.2.8. Zasady i kryteria doboru rękawic antywibracyjnych

Zagadnienie prawidłowego doboru rękawic antywibracyjnych jest ściśle związane z normą PN-EN ISO 10819:2013-12/A1:2019-03 *Drgania i wstrząsy mechaniczne – Drgania działające na organizm człowieka przez kończyny górne – Metoda pomiaru i oceny współczynnika przenoszenia drgań przez rękawice na dłoń operatora* [62]. W normie tej podano procedurę wyznaczania wartości dwóch parametrów charakteryzujących skuteczność ochrony pracownika przed drganiami jaką zapewniają rękawice. Parametrami tymi są:

- skorygowany współczynnik przenoszenia drgań dla zakresu średnich częstotliwości – $\bar{T}_{(M)}$,
- skorygowany współczynnik przenoszenia drgań dla zakresu wysokich częstotliwości – $\bar{T}_{(H)}$.

Współczynnik $\bar{T}_{(M)}$ wyznaczany jest dla zakresu częstotliwości od 25 Hz do 200 Hz, natomiast współczynnik $\bar{T}_{(H)}$ wyznacza się dla zakresu częstotliwości od 200 Hz do 1250 Hz.

Aby rękawice zostały uznane za antywibracyjne muszą one spełniać poniższe kryteria:

- wartość współczynnika $\bar{T}_{(M)}$ nie powinna przekraczać 0,9,
- wartość współczynnika $\bar{T}_{(H)}$ nie powinna przekraczać 0,6.

Jest to równoznaczne ze stwierdzeniem, że rękawice antywibracyjne powinny redukować drgania w paśmie częstotliwości od 25 do 200 Hz o co najmniej 10% i jednocześnie redukować drgania w paśmie częstotliwości od 200 do 1250 Hz o co najmniej 40%.

Oprócz wymagań stawianych w normie PN-EN ISO 10819:2013-12/A1:2019-03 [62] rękawice antywibracyjne powinny być tak skonstruowane i wykonane, aby spełniały również wymagania opisane w normach PN-EN ISO 21420:2020-9 *Rękawice ochronne – Wymagania ogólne i metody badań* [63] oraz PN-EN ISO 388+A1:2019-01 *Rękawice chroniące przed zagrożeniami mechanicznymi* [64].

Ze względów technicznych oraz konstrukcyjnych – np. umożliwienie użytkownikowi wygodnego i pewnego chwytu, rękawice antywibracyjne wykonywane są z materiałów, których właściwości i parametry mechaniczne – podatność, oraz niewielka grubość nie zapewniają odpowiednio skutecznej ochrony przed drganiami o częstotliwości z zakresu 4÷50 Hz – czyli najbardziej niebezpiecznego dla organizmu ludzkiego.

Badania wskazują jednak, że rękawice mogą skutecznie chronić przed drganiami o wyższych częstotliwościach [65, 66]. Odpowiednio dobrane rękawice wydłużają dopuszczalny czas pracy narzędziem w przypadku wystąpienia przekroczeń [67].

Rękawice chronią także przed: niską temperaturą, wiatrem i wilgocią (czynniki te potęgują negatywne skutki oddziaływania drgań) [68]. Z tego powodu stosowanie rękawic antywibracyjnych jest zalecane i uzasadnione, nawet gdy zapewniają one minimalną ochronę przed drganiami tzn., gdy $\bar{T}_{(M)} \approx 0,9$ oraz $\bar{T}_{(H)} \approx 0,6$.

Skuteczność stosowania rękawic antywibracyjnych określona jest na podstawie wartości *skorygowanego wskaźnika skuteczności ochrony* – WSO_W i wyznaczana zgodnie z zależnością:

$$WSO_W = \frac{a_{ws,d}}{a_{ws,r}}, \quad (2.45)$$

gdzie: $a_{ws,d}$ – suma wektorowa skorygowanych charakterystyką *Hand-Arm* wartości skutecznych przyspieszeń drgań – a_{hv} zmierzonych na rękocyści urządzenia,

$a_{ws,r}$ – suma wektorowa skorygowanych charakterystyką *Hand-Arm* wartości skutecznych przyspieszeń drgań – a_{hv} zmierzonych na dłoni operatora.

W przypadku, gdy wartość skorygowanego wskaźnika skuteczności jest mniejsza od jedności mówimy o ograniczeniu transmisji drgań z rękocyści urządzenia do organizmu operatora, gdy jego wartość jest większa od 1 występuje bardzo niekorzystne zjawisko

wzmocnienia transmisji drgań. Jeżeli współczynnik ten jest równy 1 wówczas rękawice nie posiadają w tym aspekcie właściwości ochronnych.

Dobór rękawic antywibracyjnych powinien być ściśle uzależniony od warunków pracy w jakich będą one używane, a w szczególności składu widmowego drgań na jakie narażony jest operator. Istotny jest również rodzaj wykonywanej czynności i używanego narzędzia będącego źródłem drgań.

Może zdarzyć się sytuacja, w której dany model rękawic będzie powodował wzmocnienie transmisji drgań dla konkretnej czynności elementarnej wykonywanej na stanowisku pracy, lub używanego w trakcie zmiany roboczej narzędzia, przy jednoczesnej redukcji drgań dla pozostałych czynności lub innych narzędzi – w przypadku pracy z kilkoma różnymi narzędziami.

W takim przypadku zaleca się wykonanie pomiarów drgań miejscowych na danym stanowisku, wraz z określeniem charakterystyk sygnału drganiowego generowanego przez poszczególne narzędzia i określenie udziałów poszczególnych składników dawki drgań w sumarycznym narażeniu pracownika. W efekcie da to możliwość doboru, optymalnego pod względem ochrony, konkretnego modelu rękawic antywibracyjnych.

3. Czynniki wpływające na hałas emitowany przez pilarki łańcuchowe

Podstawowym narzędziem jakiego używa piliarz jest pilarka. Źródłami hałasu w pilarkach są: części wirujące, zapłon i spalanie mieszanki paliwowo–powietrznej, tarcie współpracujących ze sobą elementów, przepływ czynnika (powietrza) chłodzącego pomiędzy uźebrowaniem cylindra silnika, jak również sam proces technologiczny – skrawanie materiału obrabianego.

Oprócz pilarki piliarz może wykorzystywać także inne zmechanizowane narzędzia ręczne takie jak: kliny udarowe, szlifierki do ostrzenia łańcuchów tnących, kosy spalinowe, wiertnice glebowe itp. Potencjalne użycie wymienionych urządzeń może powodować wystąpienie zagrożenia hałasem.

Oprócz ww. źródeł hałasu pracownik leśny może być narażony także na hałas, który jest generowany przez współpracowników (pozostali piliarze) oraz inne maszyny i urządzenia pracujące w lesie np. harwestery, forwardery, wyciągarki spalinowe, ciągniki do zrywki i prac kultywacyjnych itp.

Pilarka, jest głównym i dominującym źródłem hałasu na jaki narażony jest piliarz. Można założyć, że poziom zagrożenia związanego z hałasem na stanowisku pracy piliarza będzie zleżało głównie od:

- rodzaju jednostki napędowej stosowanej pilarki – silnik spalinowy lub elektryczny (zasilany sieciowo lub bateryjnie),
- stanu technicznego urządzenia – stopień zużycia podzespołów,
- konstrukcji urządzenia – ukształtowanie układu chłodzenia silnika (hałas aerodynamiczny),
- modyfikacji układu wydechowego – wszelkie zmiany konstrukcyjne podzespołu inne niż wprowadzone przez producenta,
- rodzaju wykonywanej operacji – ścinka, okrzesywanie, przerzynka,
- techniki pracy – wahadłowa, dźwigniowa, mieszana (trój- 6-cio lub 12-to punktowa),
- średniej prędkości obrotowej w trakcie pracy urządzenia, itp.

Rukat i inni w swojej pracy [69] zbadali wpływ rodzaju napędu pilarki – silnik spalinowy i silnik elektryczny zasilany sieciowo na zjawiska wibroakustyczne generowane przez pilarkę łańcuchową. Autorzy wykazali istotne różnice pomiędzy wartościami emitowanego przez pilarki hałasu i przyspieszeń drgań w zależności od rodzaju napędu. Wyższe poziomy ciśnienia akustycznego – średnio o ok. 5 dB, zarówno w pasmach oktawowych jak i w przypadku dźwięku A generowała pilarka o napędzie spalinowym. Szczególną uwagę zwraca na siebie oktawa o częstotliwości środkowej pasma 125 Hz w której poziom dźwięku był wyższy aż o 19,8 dB.

Zagadnienie emitowanego w trakcie pracy hałasu, generowanego przez pilarki o różnym rodzaju napędu (spalinowy i elektryczny zasilany bateryjnie), zostało poruszone w pracy kierowanej przez A. Colantoni [70]. Autorzy wykazali, że urządzenia zasilane bateryjnie emitują niższy hałas (poziom dźwięku A) niż pilarki o napędzie spalinowym – od 10 do nawet 25 dB.

Natomiast M. Huber i inni określili poziom narażenia akustycznego i drganiowego pilarza, podczas prowadzenia prac leśnych związanych z trzebieżą przedkomercyjną, w przypadku, gdy pracownik posługiwał się zamiennie dwoma pilarkami – o napędzie spalinowym i elektrycznym [71]. Wykazali oni, że profesjonalne pilarki akumulatorowe, przy zachowaniu wydajności procesu, powodują, mniejsze narażenie na hałas i drgania niż pilarki o napędzie spalinowym. Zmierzony poziom równoważny dźwięku A – $L_{A,eq}$ był o ok. 7,5 dB niższy dla pilarki elektrycznej i wynosił ok. 90 dB, natomiast szczytowy poziom dźwięku C – $L_{C peak}$ wynosił ok. 111 dB dla pilarki elektrycznej i ok. 118,5 dB dla pilarki spalinowej.

Wpływ modyfikacji układu wydechowego pilarki spalinowej na poziom emitowanego hałasu został zbadany w pracy kierowanej przez R. Wojtkowiaka [72]. Autorzy wykazali, że modyfikacja fabrycznego układu wydechowego pilarki i zastąpienie go układem rezonansowym powoduje wzrost emitowanego poziomu hałasu przy jednoczesnym polepszeniu dynamiki pracy jednostki napędowej – zwiększenie mocy i elastyczności silnika.

Wpływ rozmiaru (wysokości) przecinanej belki na poziom hałasu emitowanego przez pilarki został zbadany przez J. Skarżyńskiego i innych [73]. Autorzy wykazali, że dla przerynki drewna zarówno dolną jak i górną stroną prowadnicy, hałas emitowany przez pilarkę z napędem spalinowym rósł wraz ze wzrostem wysokości przecinanego elementu, natomiast dla pilarki o napędzie elektrycznym emitowany przez urządzenie hałas malał.

Oprócz wyżej wymienionych czynników wpływających na hałas emitowany przez pilarki, mających związek z konstrukcją samego urządzenia, doborem jego podzespołów i materiałem obrabianym, istotny jest także rodzaj wykonywanych prac.

Rodzaj realizowanej operacji – ścinka, okrzesywanie i przerzynka, charakteryzujące się różnymi czasami trwania i charakterem zmian poziomów hałasu w trakcie ich trwania, istotnie wpływa na całkowitą dawkę hałasu jaką przyjmie operator.

Zagadnienie wpływu rodzaju operacji związanych ze ścinką drzewa na poziom hałasu na stanowisku pilarz-drwal zostało poruszone w pracy Ā. Taş i A. E. Akay [74]. Autorzy wykazali, że w trakcie wykonywania cięć tzw. klina obalającego pilarz narażony jest na hałas o większym poziomie dźwięku niż w przypadku wykonywania tzw. podcięcia obalającego realizowanego w końcowym etapie ścinki pnia.

Takie same wnioski sformułowali D. Billo i inni [75]. W swojej pracy zbadali wpływ rodzaju realizowanej operacji na poziom hałasu emitowanego przez pilarkę uzyskując następujące wyniki: 102 dB podczas ścinki, 99,2 dB dla przerzynki i 95, 1 dB dla okrzesywania. Praca pilarki na obrotach jałowych generowała hałas o poziomie poniżej 85 dB.

Hałas emitowany przez pilarki zależy także od użytych materiałów eksploatacyjnych. R. Wojtkowiak i inni zbadali wpływ rodzaju stosowanego środka smarnego redukującego tarcie pomiędzy współpracującymi elementami zestawu tnącego na poziom emitowanego przez pilarkę hałasu [76]. Wykazali oni, że stosowanie różnych typów olejów: od dedykowanego dla prowadnic pilarek, przez silnikowe mineralne i syntetyczne, aż po zużyty olej silnikowy w różnym stopniu wpływa na emitowany hałas. Najwyższe poziomy zarejestrowali w przypadku, gdy prowadnica była smarowana zużytym olejem silnikowym – 105,2 dB. Hałas był o 5,6 dB wyższy niż w przypadku smarowania prowadnicy olejem roślinnym (o najkorzystniejszych pod tym względem właściwościach).

Jak wynika z powyższych spostrzeżeń hałas emitowany przez pilarki zależy głównie od rodzaju napędu, natomiast poziom ekspozycji na hałas uzależniony jest od: trybu pracy, realizowanego zadania roboczego i czasu trwania narażenia.

4. Czynniki wpływające na drgania pilarek łańcuchowych

W niniejszym rozdziale zaprezentowano wyniki prac innych badaczy oraz efekty badań własnych autora.

W wielu publikacjach wskazano czynniki mające istotny wpływ na poziom drgań emitowanych przez pilarki. Można je podzielić na:

– czynniki związane z obrabianym materiałem:

- rozmiar,
- gatunek drzewa/drewna – budowa komórkowa (pierścieniowo- oraz rozpierzchno-nacyniowe),
- stan fizyczny (mokre, suche, zamrożone, chore, złom, wywrot),
- kierunek prowadzenia rzazu tnącego (cięcie poprzeczne, cięcie wzdłużne),
- zanieczyszczenia i ciała obce (piach, beton, gwoździe, kule, pociski, śrut),

– czynniki związane z osobą operatora pilarki:

- cechy osobnicze,
- doświadczenie,
- pozycja w trakcie pracy,

– czynniki techniczno-organizacyjne:

- rodzaj wykonywanej pracy (ścinka, okrzesywanie, przerzynka) [29],
- technika pracy – wahadłowa, dźwigniowa, mieszana (3, 6-cio oraz 13-to punktowa),
- sposób pracy (dolną stroną prowadnicy, dolną stroną prowadnicy z wykorzystaniem ostrogi, górną stroną prowadnicy),

– czynniki związane z urządzeniem:

- konstrukcja jednostki napędowej – jedno-/wielocylindrowe; tłokowe/Wankla; jednostki o napędzie spalinowym lub elektrycznym zasilanym bateryjnie,
- moc jednostki napędowej,
- długość prowadnicy,
- podziałka łańcucha tnącego,
- konstrukcja układu zawieszenia silnika (amortyzatory gumowe, sprężyny, elementy kombinowane),
- konstrukcja łańcucha tnącego (sekcja: standard, półprzerywana, przerywana),
- geometria łańcucha tnącego – strugające (ang. Scratcher), żłobikowe (ang. Chipper), o pomniejszonym profile wysokości – MICRO, o normalnym profilu wysokości – SUPER, z ostrzami wykonanymi ze spieków twardych (ang. Duro),
- rozmiar szczeliny wrębowej,

- wysokość profilu zęba tnącego (normalny – RAPID, obniżony – PICCO),
- wyposażenie łańcucha tnącego w elementy antyodbiciowe (NORMAL / COMFORT)
- napięcie wstępne i robocze łańcucha.

Jak widać ilość czynników mających wpływ na drgania pilarek jest znaczna. W kolejnych podrozdziałach syntetycznie opisano wpływ ww. czynników na drgania pilarek.

4.1. Wpływ materiału obrabianego na drgania na rękojeściach pilarek

W swojej pracy J. Skarżyński zbadał wpływ wielkości (średnicy) obrabianego materiału na drgania emitowane na rękojeściach pilarki [77]. Wykazał, że wraz ze wzrostem średnicy pnia/grubości materiału drgania rosną zarówno na uchwycie tylnym jak i przednim, niezależnie czy proces cięcia wykonywano dolną czy górną stroną prowadnicy.

Oprócz średnicy pnia ważnym czynnikiem wpływającym na drgania jest rodzaj obrabianego materiału – gatunek drzewa/drewna. Zagadnienie wpływu gatunku drewna na poziom drgań rejestrowanych na uchwytach pilarki było przedmiotem badań realizowanych przez J. Skarżyńskiego i K. Wójcika [78]. Badacze określili wpływ gatunku drewna (parametrem charakterystycznym dla danego gatunku była jego twardość³) na drgania rękojeści pilarki podczas przerzynki. Wykazali, że twardość drewna (gatunek) nie ma istotnego wpływu na poziom drgań.

Zagadnienie to zostało również poruszone przez C. Rottensteinera i innych [79]. W pracy wykazali, podobnie jak Skarżyński i Wójcik, że gatunek drewna nie ma znaczącego wpływu na poziom drgań rejestrowanych na rękojeściach pilarki. W widmie amplitudowym przyspieszeń drgań nie odnotowano żadnych istotnych zmian jego postaci zależnych od gatunku drzewa. Wyniki analizy widmowej przyspieszeń drgań poddanych korekcji *Hand–Arm* wykazały różnice jedynie w przypadku ciecia buku. Należy dodać, że różnice te były obserwowane w zakresie częstotliwości poniżej 100 Hz.

Wpływ wilgotności drewna na jego właściwości fizyko-chemiczne został opisany w pracy F. Krzysika [80]. Wykazał on, że wytrzymałość drewna maleje wraz ze wzrostem

³ Twardość drewna wyznaczono Metodą Brinella

wilgotności. Dlatego też podczas cięcia drewna świeżego drgania uchwytów pilarki są niższe niż podczas cięcia drewna suchego. Zjawisko to zostało zbadane i opisane w pracy kierowanej przez A. Otto [81]. Autorzy wykazali, że wraz ze wzrostem wilgotności drewna maleją siły skrawania, a co za tym idzie drgania emitowane przez pilarkę.

Natomiast T. Kuvik wraz z innymi wykazał (w przeciwieństwie do wyników opisanych przez A. Otto [81]), że wzrost wilgotności drewna powoduje wzrost wartości siły oporów skrawania (a tym samym drgań) oraz zwiększa zapotrzebowanie na moc konieczną do realizacji procesu cięcia [82].

Zagadnienie wpływu wilgotności drewna na drgania pilarek jest niejednoznaczne i wymaga szczegółowej analizy, lub dalszych badań w tym aspekcie.

Kolejnym ważnym czynnikiem jaki ma wpływ na wartości przyspieszeń drgań rejestrowanych na uchwytach pilarki jest kierunek prowadzenia rzazu tnącego względem osi pnia (kierunek skrawania). Zagadnienie to zostało zbadane przez W. Rukata i innych [83]. Wykazali oni, że cięcie wzdłużne drewna generuje wyższe drgania w porównaniu do ciecicia poprzecznego niezależnie od rodzaju napędu (spalinowy lub elektryczny).

Kolejnym czynnikiem wpływającym na drgania pilarek są defekty drewna, występowanie zanieczyszczeń powierzchniowych oraz ciał obcych w materiale drzewnym, takich jak: pociski, kule, kamienie a nawet celowo wbite elementy stalowe (np. gwoździe). Mogą one mieć istotny wpływ – szczególnie na wartość przyspieszeń drgań i dawkę drgań na jakie narażony jest pilarz. Kontakt zestawu tnącego z ww. wadami i imperfekcjami budowy wewnętrznej prowadzi do szybszego zużywania się (tępienie) ostrzy tnących lub w skrajnych przypadkach może być przyczyną nagłego i krytycznego uszkodzenia łańcucha tnącego, które całkowicie dyskwalifikuje go do dalszych prac.

Niestety, autorowi nie są znane żadne opracowania i publikacje, w których podjęto próbę określenia wpływu zanieczyszczeń i ciał obcych na charakter zmian wartości przyspieszeń drgań podczas przerzynki drewna w skutek kontaktu łańcucha tnącego z tymi ciałami. Jednocześnie autor upatruje w tym szansę i możliwości prowadzenia badań w tym zakresie.

4.2. Wpływ czynników organizacyjnych na narażenie operatorów pilarek łańcuchowych na drgania

Istotny wpływ na dawkę drgań (a także dawkę hałasu) jaką w trakcie typowego dnia pracy przyjmie pilarz mają również czynniki organizacyjne. Nie wpływają one bezpośrednio na poziom drgań emitowanych przez samo urządzenie, lecz na wartość przyjętej przez operatora dawki drgań – *D*.

Dawka ta zależy przede wszystkim od struktury czasu pracy pilarza – udziałów czasowych poszczególnych czynności roboczych (i związanych z nimi wartościami przyspieszeń drgań) w odniesieniu do sumarycznego czasu pracy urządzeniem – rzeczywistego czasu trwania narażenia w trakcie zmiany roboczej.

Zakres wykonywanego zadania i realizowanych w ramach niego operacji – tj. ścinka, okrzesywanie oraz przerzynka [29], jak również ilość wystąpień poszczególnych operacji mają silny wpływ na łączny czas pracy – narażenia a tym samym na dzienne dawki drgań i hałasu.

Wpływ rodzaju realizowanych operacji – ich procentowy udział w sumarycznym czasie pracy (struktura czasu pracy), został zbadany przez J. Suchomela i innych [84]. W pracy tej autorzy wykazali, że ścinka (wykonanie klina obalającego) zajęła ok. 21 % sumarycznego czasu pracy, okrzesywanie ok. 43 % natomiast przerzynka tylko 12 %. Pozostały czas związany był z poruszaniem się pilarza w obrębie ściętego pnia, operacjami towarzyszącymi oraz przerwami technologicznymi.

Zagadnienie struktury i czasochłonności pracy na stanowisku pilarz-drwal zostało również podjęte przez R.V. Câmpu i A. Ciubotaru [85]. Badacze dokonali szczegółowej analizy czynności związanych z pracochłonnością podczas ścinki ręczno-maszynowej i ręcznego okrzesywania pnia. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wykazali, że, w odniesieniu do łącznego czasu pracy: czas związany z poruszaniem się w obrębie ścinanego drzewa wyniósł ok. 11 %, czas przygotowania miejsca ścinki nie przekraczał 4 %, czas związany z decyzją i wyborem kierunku obalania pnia nieznacznie przekraczał 4 %, wycięcie klina kierunkowego zajmuje ok. 19 %, podcięcie obalające zajmuje ok. 11 %, czas upadku pnia to niecałe 2,5 %, odcięcie od pnia części pozostawionej zawiasy zajmuje niecałe 3 %, okrzesywanie zgrubne maszynowe zajmuje 8 % natomiast pozostałe 36% zarezerwowano na okrzesywanie siekierą.

Zagadnienie efektywnego czasu pracy pilarki podczas operacji okrzesywania i przerzynki zostało opisane przez K. Glazar [86]. Autorka wykazała, że dla tego samego rodzaju materiału (sosna) o podobnych cechach fizycznych (wilgotność, rozmiar, wiek drzewostanu, itp.) niezależnie od stopnia dokładności okrzesywania (zgrubne/dokładne) proporcje średniego efektywnego czasu pracy do sumarycznego efektywnego czasu pracy różnią się nieznacznie.

Struktura pracy pilarza, czasochłonność i wydajności procesu okrzesywania i przerzynki została omówiona w pracy A. Ciubotaru i R. V. Câmpu [87]. Badacze wykazali, że produktywny czas pracy (ang. *Productive Work Time* – PW) wynosił ok. 58 % sumarycznego czasu pracy, czas przygotowawczy (ang. *Supportive Work Time* – SW) wynosił ok. 31 %, czas wolny od pracy (ang. *Non-Work Time* – NT) wynosił ok. 5 %, natomiast pozostałe 6 % obejmowało czas jaki pilarz spędza poza stanowiskiem pracy (ang. *Non-Workplace Time* – NW). Ponadto efektywny produktywny czas pracy podzielono na: pracę właściwą (ang. *Main WorkTime* – MW) która zajmowała ok. 19 % całkowitego czasu pracy oraz czas produktywny uzupełniający (ang. *Complementary Work Time* – CW) stanowiący ok. 19 % czasu całkowitego. Efektywny czas przygotowawczy dzieli się ponadto na: czas przygotowawczy właściwy (ang. *Preparatory Time* – PT) wynoszący ok. 27 % sumarycznego czasu pracy, pomocniczy przygotowawczy czas pracy (ang. *Ancillary Work Time* – AW) który obejmował nieco ponad 1 % czasu oraz obsługa techniczna (ang. *Service Time* – ST), której czas wynosił niecałe 3 % czasu całkowitego. Autorzy wykazali również, że wraz ze wzrostem średnicy drzewa mierzonej na wysokości tzw. *pierśnicy* (1,3 m nad poziomem gruntu) rośnie czasochłonność okrzesywania wyrażona w [s/drzewo], natomiast maleje czasochłonność wyrzynki wyrażona w [s/m³].

Niemniej ważnym czynnikiem techniczno-organizacyjnym jest technika pracy. Zarówno ona jak i doświadczenie pracownika wpływają na tempo realizacji procesu technologicznego oraz częstość występowania niebezpiecznych zdarzeń w postaci np. odbicia wstecznego.

Stosowanie przez pracownika odpowiednio dobranej techniki pracy, w zależności od kontekstu, może mieć dwojaki efekt. Może ona zmniejszać dawkę drgań (i hałasu) jaką przyjmuje pracownik, gdy wykonuje daną operację (ścinka, okrzesywanie, przerzynka) poprzez skrócenie efektywnego czasu jej trwania. Przyjęta technika pracy ukierunkowana na maksymalną wydajność pracownika może prowadzić do zwiększenia sumarycznej dawki drgań (i hałasu) w przypadku, gdy praca jest wykonywana w systemie „na akord” – dąży się wtedy

do skrócenia czasu realizacji operacji (mniejsze dawki jednostkowe), ale zwiększa się jednocześnie liczba wystąpień tych operacji.

Wpływ przyjętej techniki pracy dla różnych konfiguracji urządzenia (moc oraz długość prowadnicy) na drgania rejestrowane na rękojeściach pilarki zostały opisane przez K. Wójcika w pracy [88]. Wykazał on, że dla *12-to punktowej techniki okrzesywania*⁴ przyspieszenia drgań obu uchwytów pilarki rosną wraz ze wzrostem długości prowadnicy – przy czym zależność ta jest liniowa o dobrym dopasowaniu (współczynnik determinacji $R^2 > 0,7$).

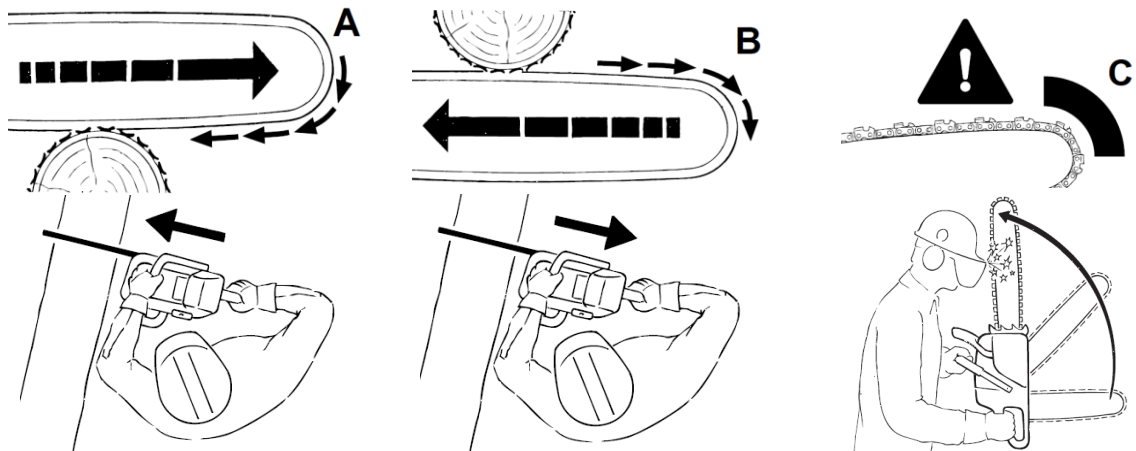
Natomiast wielkość pilarki (moc urządzenia) nie ma jednoznacznego wpływ na wartości przyspieszeń drgań. Dla większości poddanych testom modeli pilarek i symulowanej w trakcie testów operacji okrzesywania, dla większości urządzeń większe wartości przyspieszeń drgań odnotowano na uchwycie przednim, nie jest to jednak regułą. Nie jest również znany wpływ pozostałych technik okrzesywania i ich odmian, na wartości przyspieszeń drgań.

Ostatnim czynnikiem jaki można zaliczyć do grupy organizacyjnych jest pozycja pilarza podczas pracy. Typową postawą ciała jaką najczęściej przyjmuje pilarz jest postawa stojąca delikatnie pochylona do przodu lub postawa klęcząca na jednej nodze. Wówczas pilarz zazwyczaj obrabia materiał przykładając do niego dolną część zestawu tnącego – prowadnicy, zapierając jednocześnie jednostkę napędową o materiał obrabiany z wykorzystaniem tzw. ostrogi.

Sposób pracy związany jest przede wszystkim z uwarunkowaniami terenowymi oraz charakterystyką samego drzewostanu. Zdarzają się przypadki – np. drzewa mocno pochylone, wiatrołomy, drzewa o znacznej krzywiźnie pnia/gałęzi, w których pilarz zmuszony jest realizować cięcie używając górnej części prowadnicy, lub jej wierzchołkiem – tzw. zwrotnicą. Zwrotnica służy najczęściej do wykonywania tzw. cięcia sztyletowego. Ciecie sztyletowe jest szczególnie niebezpieczne dla operatora, gdyż w trakcie jego realizacji, powstałe siły reakcyjne mogą doprowadzić do wystąpienia tzw. zjawiska odbicia wstecznego. Odbicie wsteczne ze względu na możliwość wywołania poważnego urazu, zwłaszcza górnych części ciała jest szczególnie niebezpieczne i może prowadzić nawet do śmierci. Sposób posługiwania się

⁴ Jedną z modyfikacji mieszanej techniki okrzesywania. Zasadniczo wyróżnia się dwie podstawowe techniki: wahadłową i dźwigniową technikę okrzesywania

pilarką: dolną i górną stroną prowadnicy i związane z nimi kierunki głównych sił reakcyjnych oraz zjawisko odbicia wstecznego zostały przedstawione na rysunku 4.1.



Rysunek 4.1 Technika realizowania przecięcia za pomocą pilarki i związane z nimi kierunki głównych sił reakcyjnych; a) – dolną stroną prowadnicy, b) – górną stroną prowadnicy, c) – górną częścią wierzchołka (zwrotnicy) prowadnicy [90]

Wpływ techniki przecięcia za pomocą pilarki łańcuchowej na poziom drgań, rejestrowanych na uchwytach urządzenia, podczas operacji okrzyszowania został opisany także w pracy K. Wójcika i J. Skarżyńskiego [89]. Wykazali oni, że praca dolną stroną prowadnicy generuje niższe drgania niż praca górną stroną prowadnicy. Największe wartości przyspieszeń drgań zmierzono – na uchwycie przednim, w przypadku cięcia wierzchołkiem górnej strony prowadnic tzw. zwrotnicą, niezależnie od długości prowadnicy.

Podejrzewa się, że technika praca pilarką: dolną, górną stroną prowadnicy bądź też jej zwrotnicą ma istotny wpływ na drgania rejestrowane na uchwytach pilarki, także podczas operacji przerzynki pnia, której efektem jest otrzymanie tzw. sortymentów drzewnych.

4.3. Wpływ cech osobniczych operatorów na drgania uchwytów pilarek

Kolejną grupą czynników mających wpływ na drgania mierzone na uchwytach pilarki podczas pracy urządzenia są cechy osobnicze operatora. Wpływ cech osobniczych – płci, na percepcję drgań został opisany w pracy kierowanej przez G. Nelly [91]. Wykazali oni różnice w percepcji drgań – w przypadku kobiet próg czułości na drgania był niższy (większa czułość organizmu), przy jednoczesnym wyższym poziomie odczuwania intensywności (większa

wrażliwość) co przekładało się na szybsze odczuwanie takiego samego poziomu dyskomfortu dla niższych wartości przyspieszeń drgań w porównaniu do mężczyzn.

Podobne wnioski z prac zostały opisane przez G. Neely i L. Burström, którzy zbadali wpływ płci na subiektywną odpowiedź organizmu na drgania miejscowe [92].

Zagadnienie wpływu płci na aspekty związane z narażeniem na drgania i ich skutki w aspekcie zdrowotnym zostały opisane przez S. H. Bylund w pracy [93]. Wykazano w niej, że kobiety są bardziej wyczułone na drgania niż mężczyźni.

Niemniej, wpływ cech osobniczych na wartości przyspieszeń rejestrowanych na uchwytach zmechanizowanych narzędzi ręcznych został zbadany przez B. Jakubka i W. Rukata [94]. Urządzeniem poddanym testom była młotowiertarka. Wykazano, że w trakcie pracy urządzeniem wyższe wartości drgań uchwytów zostały zmierzone w przypadku, gdy operatorem narzędzia jest kobieta. Podejrzewa się jednak, że tak jak w przypadku obiektu badań jakim jest młotowiertarka prawidłowość ta mogła by zachodzić dla innych zmechanizowanych narzędzi ręcznych – w tym dla pilarki.

Niestety autorowi nie są znane publikacje traktujące wprost o wpływie płci operatora pilarki na drgania rejestrowane na uchwytach urządzenia. Prawdopodobnie wynika to z faktu zatrudnienia na stanowisku pilarz-drwal zasadniczo wyłącznie mężczyzn, choć obowiązujące w Polsce przepisy prawne nie zabraniają pracy kobiet na tym stanowisku [9, 95].

Na uwagę zasługuje praca L. J. Minetti [96], który wraz z innymi określił zmienność (rozrzut) cech antropometrycznych operatorów pilarek – charakterystycznych wymiarów ich ciał, lecz badania te prowadzone były jedynie w ujęciu ergonomicznym. W pracy podano szczegółowe dane dotyczące antropometrii dłoni operatorów i odniesiono je do wymiarów konstrukcyjnych uchwytów pilarki oraz ich odległości od korpusu – tak aby zachować możliwość swobodnego i pewnego chwytu urządzenia. Wymiary rękojeści pilarki powinny być zgodne z normą PN-EN ISO 11681-1:2022-10 *Maszyny dla leśnictwa – Wymagania bezpieczeństwa i badanie pilarek łańcuchowych przenośnych – Część 1: Pilarki łańcuchowe do prac leśnych* [97].

Istotny wpływ na dawkę drgań jaką przyjmie w ciągu zmiany roboczej pilarz ma doświadczenie pracownika. Przekłada się ono na umiejętność przewidywania efektów pracy pilarką i nietypowych lub niebezpiecznych interakcji jakie mogą wystąpić – np. odbicie wsteczne. Określenie wpływu doświadczenia zawodowego na ryzyko wystąpienia wypadku

opisane zostało przez J. Brzózko i innych [98]. Autorzy na podstawie pomiarów geometrycznych fragmentów pnia, w miejscu wykonywania cięcia obalającego – szerokości tzw. zawiasy, progu bezpieczeństwa, oraz wysokości pozostawionego pnia stwierdzili, że prawidłowa i zgodna ze sztuką praca z użyciem pilarki znacząco zmniejsza ryzyko wywołania wypadku, skraca czas narażenia na drgania i hałas oraz podnosi bezpieczeństwo pracowników.

Indywidualnie wypracowana kultura i technika pracy, samoświadomość oraz poziom wykształcenia pracowników, nie tylko pozwalają uniknąć poważnych wypadków prowadzących niekiedy do ciężkich obrażeń a nawet śmierci [99], ale pozwalają również minimalizować negatywne skutki oddziaływania czynników szkodliwych na organizm poprzez częstsze, regularne przerwy regeneracyjne, czy czynności obsługowe pozwalające zachować nienaganny stan techniczny urządzenia.

Stan wykształcenia pilarzy oraz wyposażenie pracowników leśnych opisano w pracy kierowanej przez A. Gendka i innych [100]. Wykazano, że 57 % pilarzy użytkuje urządzenie aż do momentu osiągnięcia krytycznego stanu zużycia łańcucha tnącego.

Wpływ zużycia łańcucha wpływa nie tylko na drgania emitowane przez urządzenie [101], lecz także na siły technologiczne [102], wydajność procesu [103] i jego energochłonność (zużycie paliwa) [104]. Zagadnienie stanu technicznego łańcucha tnącego jako jednego z parametrów związanych z urządzeniem, a mającego istotny wpływ na drgania pilarki, zostało opisane w rozdziale 4.4 niniejszej rozprawy,

Rozważając czynniki związane z operatorem pilarki należy wspomnieć również o postawie ciała jaką najczęściej przyjmuje on w trakcie wykonywania typowych operacji – tj. ścinka, okrzesywanie oraz przerynka [29]. O ile dwie ostatnie wykonywane są najczęściej w pozycji stojącej wyprostowanej lub pochylonej, to operacja ścinki realizowana jest najczęściej w pozycji pochylonej z mocno zgiętym odcinkiem krzyżowo-lędźwiowym lub (w zależności od warunków terenowych) w pozycji klęczącej z podparciem na jednym z kolan. W trakcie ścinki konieczne jest wykonanie tzw. klina kierunkowego oraz podcięcia obalającego. Wymusza to konieczność zorientowania pilarki w taki sposób, aby płaszczyzna podłużna prowadnicy znajdowała się w pozycji horyzontalnej (lub zbliżonej do horyzontalnej). Wówczas, pilarz utrzymuje w lewej ręce kabłąk (uchwyt przedni) za jego boczną część – w okolicy pokrywy koła magnesowego układu zapłonowego, które pełni również rolę wentylatora łopatkowego układu chłodzenia i oczyszczania powietrza na potrzeby

przygotowania mieszanki paliwowo-powietrznej. W takim przypadku, mierzone wartości przyspieszeń drgań mogą różnić się od tych jakie zmierzono w referencyjnym punkcie uchwytu przedniego, którego położenie określono w normie PN-EN ISO 22867:2022-05 [57].

Pozycja pracy pilarza, wynika z nabytych w trakcie aktywności zawodowej doświadczeń i jest ona ukierunkowana na uzyskanie maksymalnego komfortu pracy. Ma to wpływ na sposób chwytu urządzenia przez operatora i związanego z tym obciążenia fizycznego.

Korzystając z metody *OWAS* (ang. *Ovako Working Posture Analysis System*) K. Sawastian i inni [105] wykazali, że najczęściej przyjmowaną postawą u pilarza jest pozycja wyprostowana pochyłona do przodu z jednoczesnym obciążeniem wynikającym z trzymania w rękach pilarki o masie do 10 kg. Dla takiej postawy ciała obciążenie fizyczne określono jako średnie. Oprócz pozycji wyprostowanej pochyłonej do przodu występują także, przez ok. 1/3 czasu pracy, tzw. pozycje przymusowe (klęcząca na jednej nodze, klęcząca). Dla tych pozycji obciążenie fizyczne określone zostało jako bardzo duże.

Postawa ciała istotnie wpływa na transmisję drgań miejscowych od źródła do organizmu. Zagadnienie to zostało opisane w pracy kierowanej przez W. Zhang [106]. Autorzy wykazali, że zgięcie stawu łokciowego powoduje zmniejszenie impedancji mechanicznej w układzie ręka-ramię, szczególnie w zakresie poniżej 100 Hz. W sytuacji, gdy ręka pozostaje wyprostowana zwiększenie siły zacisku dłoni powoduje dodatkowo zwiększenie impedancji, w zakresie częstotliwości od 10 Hz do 100 Hz. W przypadku, gdy ręka pozostaje zgięta w stawie łokciowym (kąt pomiędzy przedramieniem a ramieniem wynosi ok. 90°) zwiększenie siły zacisku dłoni na rękojeści również powoduje zwiększenie impedancji, lecz ma to miejsce w zakresie od 30 Hz do 100 Hz. Zarówno dla zgiętego, jak i wyprostowanego ramienia i stałej siły zacisku zwiększenie amplitudy przyspieszeń drgań nie ma znaczącego wpływu na impedancję układu i transmisję drgań. Niewielkie różnice występują dla zakresu częstotliwości od 10 Hz do 30 Hz – dla zgiętego ramienia i od 10 Hz do 100 Hz dla ręki wyprostowanej.

Podobne aspekty w odniesieniu do postawy ciała operatora w trakcie pracy, siły docisku narzędzia i siły zacisku dłoni wywołanych na uchwytach urządzenia na drgania młotów wyburzeniowych i młotowiertarki opisano w pracach [107, 108].

4.4. Wpływ konfiguracji podzespołów pilarki na drgania

Ostatnią grupą czynników mających wpływ na drgania rękojeści pilarek są cechy samego urządzenia. Najistotniejszą cechą jest rodzaj jednostki napędowej. Do pozyskania surowca drzewnego metodą ręczną najczęściej stosowane są pilarki napędzane silnikiem spalinowym dwusuwowym o zapłonie iskrowym. Na rynku dostępne są także profesjonalne urządzenia z silnikiem elektrycznym zasilane akumulatorowo.

Obecnie stosowane pilarki spalinowe są wyposażane w silniki jednocyldrowe, choć można spotkać starsze modele z silnikami dwucylindrowymi w układzie Boxer np. Echo CST-610, John Deere 66SV, McCulloch BP-1, a także napędzanych silnikiem Wankla np. Dolmar KMS-4. Pilarki tego typu były produkowane od lat 50 do końca lat 80 XX w. Wraz z rozwojem techniki zostały jednak wyparte przez prostsze i tańsze w produkcji konstrukcje jednocyldrowe. Rozwiązanie konstrukcyjne silnika ma istotny wpływ na drgania rejestrowane na rękojeściach pilarek. Wpływ rodzaju jednostki napędowej – silnik spalinowy jednocyldrowy/dwucylindrowy w układzie przeciwsobnym (tzw. Boxer) – na drgania pilarki został zbadany przez B. J. Stokes [109]. Wykazał on, że pilarki wyposażone w silnik w układzie Boxer generują niższe drgania niż pilarki jednocyldrowe.

Podobne wyniki otrzymali T. Fushimi i H. Isemoto, którzy zbadali wpływ rodzaju jednostki napędowej, oraz napięcia łańcucha tnącego na drgania [110]. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzili, że niższe drgania emituje pilarka napędzana silnikiem dwucylindrowym. Natomiast wzrost napięcia łańcucha powoduje wzrost wartości przyspieszeń drgań.

H. Inaga wrz z innymi badał wpływ konstrukcji silnika na drgania samej jednostki napędowej i uchwytów pilarki [111]. Wykazali, że w porównaniu do urządzenia napędzanego silnikiem jednocyldrowym drgania mierzone na jego korpusie pilarki z silnikiem przeciwsobnym były mniejsze o ok. 10 % na korpusie silnika, natomiast drgania rękojeści zmalały o ok. 20 %.

Mniejsze wartości przyspieszeń drgań pilarek napędzanych silnikiem dwucylindrowym (boxer) w porównaniu do konstrukcji napędzanych silnikiem jednocyldrowym potwierdził Y. Takimoto [112]. Różnice te są widoczne szczególnie w pasmach tercjowych o częstotliwości środkowej pasma powyżej 63 Hz. Największe drgania pilarki z silnikiem jednocyldrowym odnotowano w paśmie tercjowym o częstotliwości środkowej wynoszącej 125 Hz, natomiast

dla pilarki z silnikiem dwucylindrowym w paśmie tercjowym o częstotliwości środkowej 40 Hz. Było to związane z działaniem sił bezwładności (niewyważeniem), szczególnie dla jednostki jednocylindrowej.

Zgodnie z najnowszymi trendami prowadzone są działania mające na celu częściowe zastąpienie pilarek spalinowych pilarkami zasilanymi elektrycznie, szczególnie o zasilaniu bateryjnym (akumulatorowym). Ma to również miejsce w urządzeniach profesjonalnych, stosowanych do prac w warunkach terenowych. Na rynku dostępne są już pilarki akumulatorowe o mocy nawet 3000 W, które z powodzeniem konkurują z urządzeniami o napędzie spalinowym – np. Stihl MSA 300 C–Q.

Na podstawie porównania drgań uchwytów pilarki spalinowej i elektrycznej o identycznej mocy wynoszącej 1,5 kW W. Rukat i inni [69] stwierdzili, że dla pilarki o napędzie spalinowym były one niższe niż dla pilarki o napędzie elektrycznym (sieciowym). Zmierzone na uchwycie przednim i tylnym wartości skuteczne sumy wektorowej przyspieszeń drgań, rejestrowane podczas testów, wynosiły odpowiednio dla uchwytu przedniego i tylnego 2,97 m/s i 3,55 m/s² dla pilarki spalinowej oraz 4,78 m/s i 5,06 m/s² dla pilarki elektrycznej.

Porównanie ekspozycji na drgania generowane przez pilarkę spalinową i akumulatorową podczas trzebieży wczesnej w warunkach terenowych zostało opisane przez M. Hubera [71]. Wykazano, że dzienna ekspozycja na drgania na jakie narażony jest pilarz jest zdecydowanie niższa, gdy posługuje się on pilarką zasilaną akumulatorowo. Wartość dziennej ekspozycji na drgania – $A(8)$ dla pilarki akumulatorowej wynosiła odpowiednio 2,42 m/s² dla uchwytu przedniego i 1,99 m/s² dla uchwytu tylnego. W przypadku pilarki spalinowej wyznaczona dzienna ekspozycja na drgania – $A(8)$ przekraczała wartość progu działania ($VAL = 2,5 \text{ m/s}^2$), a także wartość dopuszczalną $NDN - A(8)_{dop.}$ równą 2,8 m/s² i wynosiły odpowiednio 4,54 m/s² dla uchwytu przedniego i 5,2 m/s² dla uchwytu tylnego.

Zagadnienie wpływu rodzaju napędu pilarki na drgania było również jednym z czynników analizowanych w pracy pod kierownictwem W. Rukata [83]. Autorzy wykazali, że pilarka o napędzie spalinowym generuje niższe drgania w porównaniu do pilarki elektrycznej zasilanej sieciowo, zarówno dla operacji cięcia poprzecznego jak i wzdłużnego.

Porównanie dziennej ekspozycji na drgania – $A(8)$ na rękojęściach pilarek o napędzie elektrycznym bateryjnym i elektrycznym sieciowym zostało przedstawione przez F. Neriego i innych [113]. Wykazali oni, że dla pilarek akumulatorowych zmierzone na obu

uchwytach urządzenia drgania były niższe niż deklarowane przez producenta. Natomiast w przypadku pilarek zasilanych prądem przemiennym o napięciu 230 V zmierzone wartości przyspieszeń drgań uchwyty tylnego były wyższe niż te jakie deklarował wytwórca – o ponad 40 % dla obu urządzeń.

Kolejny aspekt to wpływ wielkości pilarki (wyrażany jej mocą) na poziom emitowanych drgań. K. Wójcik [88] wykazał, że drgania rosły wraz z mocą urządzenia, lecz nie jest to zależność liniowa. Badane urządzenia podzielono na dwie grupy: średniej i dużej mocy. Dodatkowo w ramach każdej grupy wyróżniono trzy kategorie urządzeń: profesjonalne, półprofesjonalne i do zastosowań nieprofesjonalnych. Autor wykazał, że dla tej samej (bądź zbliżonej) mocy, niższe drgania emitują pilarki profesjonalne, a najwyższe pilarki do zastosowań domowych (nieprofesjonalne). Natomiast wzrost mocy pilarki w tej samej kategorii przekłada się na większe wartości drgań na uchwytych urządzenia.

Wpływ mocy jednostki napędowej na drgania był również badany przez M. Landekiča i innych [114]. Wyniki ich prac potwierdzają, że wraz ze wzrostem mocy pilarki rosną wartości przyspieszeń drgań na jej uchwytych.

Modyfikacje jednostki napędowej lub jej podzespołów, w szczególności te dokonane przez nieautoryzowany serwis lub osoby do tego niepowołane, przeprowadzone z wykorzystaniem nieoryginalnych lub też niebędących zamiennikami o odpowiedniej jakości części, mogą mieć istotny wpływ na parametry użytkowe (moc, moment obrotowy) urządzenia.

R. Wojtkowiak i inni [115] pokazali negatywny wpływ zastosowania dodatkowego rezonansowego układu wydechowego na drgania rejestrowane na rękojeściach pilarki. Wykazali, że jakakolwiek modyfikacja fabrycznego układu wydechowego powoduje zwiększenie poziomu drgań zarówno na uchwycie przednim jak i na uchwycie tylnym. Maksymalny wzrost wartości przyspieszeń drgań wyniósł 34 %.

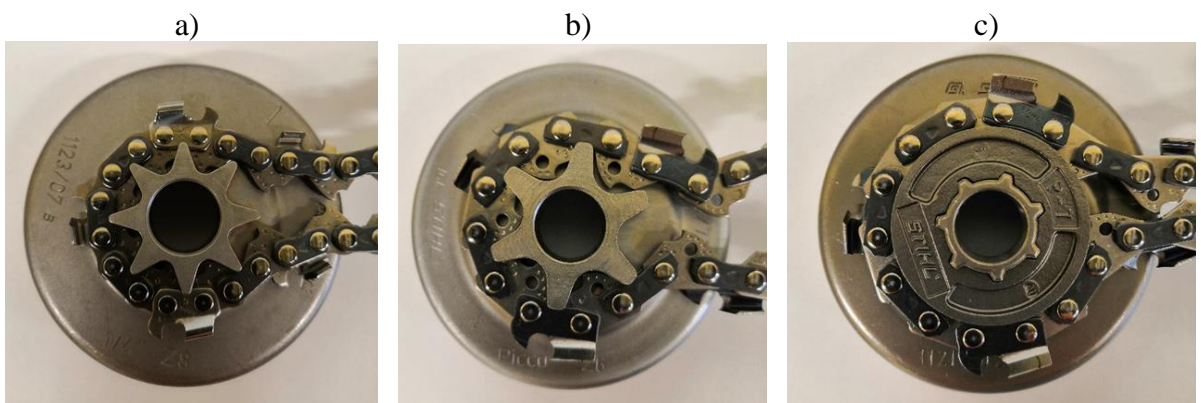
Budowa pilarek spalinowych pozwala na pewną dowolność w indywidualnym dostosowaniu układu napędowo-tnącego do realizowanego zadania. W tym celu dobiera się poszczególne komponenty układu którymi są: koło napędowe, prowadnica oraz łańcuch tnący.

W większości przypadków, do konkretnego modelu pilarki (niezależnie od jej marki) istnieje możliwość zastosowania – zamiast fabrycznie montowanego koła napędowego łańcucha tnącego – tzw. koła gwiazdzistego, koła napędowego o innych parametrach. Pilarki fabrycznie wyposażane są w koło monolityczne – o określonej podziałce i liczbie zębów

(ramion). Użytkownik ma możliwość zastosowania, oprócz koła fabrycznego także innych jego odmian konstrukcyjnych: o tej samej podziałce (lecz innej liczbie zębów/ramion), jak również koła o innej, zazwyczaj mniejszej, podziałce.

Zmiana rodzaju koła napędowego pociąga za sobą konieczność zastosowania łańcucha tnącego o takiej samej podziałce co gwarantuje zachowanie kompatybilności wymiarowej i zapewnia prawidłową współpracę ogniów prowadzących łańcucha z ramionami koła napędowego – zjawisko tzw. osiadania łańcucha na wieloboku.

Możliwe do zastosowania odmiany konstrukcyjne koła napędowego łańcucha skrawającego przedstawiono na rysunku 4.2.

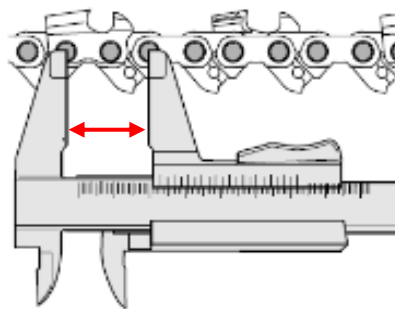


Rysunek 4.2 Przykładowe rozwiązania konstrukcyjne koła napędowego pilarek, a) – koło monolityczne $P = 1/4''$ 8-mio ramienne; b) – koło monolityczne $P = 3/8''$ 6-cio ramienne; c) – koło pierścieniowe $P = 3/8''$ 7-mio ramienne [fot. Autor]

Wpływ na drgania uchwytów pilarek może mieć również budowa łańcucha tnącego, a mianowicie: podziałka łańcucha tnącego, długość łańcucha (prowadnicy), rodzaj sekcji tnącej, geometria ostrza tnącego, rozmiar szczeliny wrębowej, wysokość ostrza skrawającego oraz wyposażenie łańcucha w elementy antyodbiciowe.

Podziałką łańcucha – t , nazywa się połowę odległości (wyrażoną w calach), pomiędzy osiami otworów trzech kolejnych nitów łączących ogniwa łańcucha skrawającego. Sposób pomiaru podziałki przedstawiono na rysunku 4.3.

Najczęściej stosowanymi podziałkami w pilarkach łańcuchowych są: $3/8''$ oraz $0,325''$. Spotykane są także podziałki $1/4''$ oraz $0,404''$. Istnieją także łańcuchy tnące o podziałce $3/4''$, lecz stosowane są one wyłącznie w tzw. leśnych kombajnach tnących (ang. *harvester*).



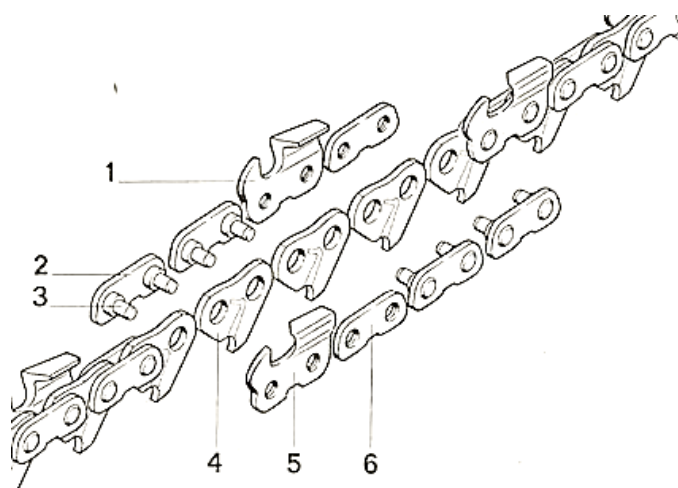
Rysunek 4.3 Sposób pomiaru podziałki łańcucha tnącego stosowanego w pilarkach [116]

Wpływ podziałki łańcucha tnącego pilarki spalinowej na drgania rękojeści urządzenia został opisany przez J. Skarżyńskiego i P. Pietrkiewicza [117]. Wykazali oni, że generalnie wraz ze wzrostem podziałki łańcucha rosną drgania uchwytów pilarki. Nie zaobserwowali natomiast istotnych i znacznych różnic w wartościach przyspieszeń drgań pomiędzy fabrycznie stosowanym łańcuchem o podziałce 0,325" a możliwym do zastosowania łańcuchem o podziałce 3/8". Co może wynikać z niewielkiej różnicy wymiarowej pomiędzy ogniwami tnącymi (różnica wymiaru podziałki wynosi 1,27 mm). Wyniki prac J. Kováča [118] potwierdziły spostrzeżenia J. Skarżyńskiego i P. Pietrkiewicza [117], że zastosowanie łańcucha tnącego o nieznacznie różniącej się podziałce nie powoduje znaczących zmian drgań rękojeści pilarki.

Oprócz podziałki, istotnymi parametrami łańcucha tnącego są szerokość rowka prowadnicy/ogniwa prowadzącego oraz długość łańcucha. Długość łańcucha jest determinowana przez długość prowadnicy. Ta z kolei ma wpływ na maksymalny wymiar (średnica/grubość) przedmiotu obrabianego i na maksymalne obciążenie jednostki napędowej.

Wpływ długości prowadnicy na drgania uchwytów pilarki został omówiony przez K. Wójcika w pracy [119]. Wykazał on, że dla przyjętej i konsekwentnie stosowanej 12-to punktowej techniki okrzesywania, przyspieszenia drgań obu uchwytów pilarki rosną wraz ze wzrostem długości prowadnicy. Zależność ta jest liniowa o dobrym dopasowaniu (współczynnik determinacji $R^2 > 0,7$). Zauważył także, że praca prowadnicą o długości większej niż średnica pnia jest łatwiejsza i mniej czasochłonna, w porównaniu do tego samego zadania realizowanego pilarką z krótszą prowadnicą.

Każdy łańcuch zbudowany jest z elementarnych, regularnie powtarzających się odcinków nazywanych sekcjami, w których zęby tnące rozstawione są naprzemiennie parami (P-L). Typ sekcji uzależniony jest od liczby poszczególnych elementów. Wyróżnia się sekcje typu standard, półprzerywana oraz przerywaną [120]. Budowa pojedynczej sekcji łańcucha tnącego została przedstawiona na rysunku 4.4.

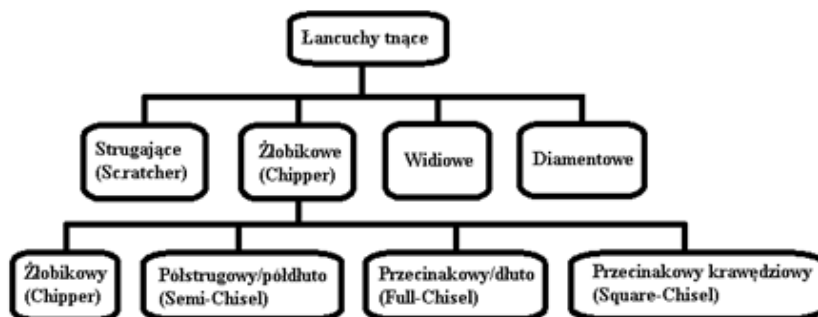


Rysunek 4.4 Budowa łańcucha tnącego o sekcji typu standard [121]

Przedstawiona na rysunku 4.4 sekcja składa się z: ogniwa tnącego prawego (1), ogniwa łączącego (2) wraz z nitem (3), ogniwa napędowego – prowadzącego (4), ogniwa skrawającego lewego (5) oraz ogniwa łączącego zamykającego (6).

Wpływ rodzaju sekcji tnącej łańcucha na wydajność procesu i wartości sił na rękojęściach pilarki został opisany przez A. Maciaka i A. Gendka [122]. Autorzy wykazali, że zastosowanie łańcucha o niestandardowej budowie sekcji tnącej (dwa jednoimienne ogniwa skrawające na sekcję) powoduje spadek wydajności skrawania przy jednoczesnym zwiększeniu wartości siły posuwu co przekłada się na mniejszy komfort pracy i wydłużenie czasu narażenia na drgania dla tego samego zadania roboczego w porównaniu do zastosowania łańcucha tnącego z sekcją tnącą typu standard.





Wpływ na drgania emitowane przez pilarki ma także geometria ostrza skrawającego. Podział łańcuchów tnących ze względu na formę geometryczną ostrza został przedstawiony na rysunku 4.5.



Rysunek 4.5 Podział łańcuchów tnących ze względu na geometrię – na podstawie [116]

Wygląd i krótka charakterystyka cech użytkowych poszczególnych konstrukcji obecnie stosowanych w pilarkach łańcuchów żłobikowych została przedstawiona w tabeli 4.1.

Tabela 4.1 Geometria i charakterystyka łańcuchów żłobikowych – na podstawie [116]

Żłobikowy	Pół-dłuto	Pełne dłuto	Przecinakowy krawędziowy
			
tnie mało wydajnie, nadaje się do cięcia drewna twardego, stosunkowo wolno się tępi, dobrze znosi zanieczyszczenia	tnie wydajnie, nadaje się cięcia drewna miękkiego i twardego, niższa w porównaniu do ostrza żłobikowego odporność na tępienie, w miarę dobrze znosi zanieczyszczenia	tnie bardzo wydajnie, nadaje się cięcia drewna miękkiego i twardego, szybko się tępi, źle znosi zanieczyszczenia	ekstremalnie duża wydajność cięcia, nadaje się cięcia drewna miękkiego i twardego, nie tępi się zbyt szybko, w miarę dobrze znosi zanieczyszczenia

Wpływ rodzaju geometrii ostrza tnącego łańcucha pilarki spalinowej na drganie rękojeści urządzenia został opisany przez W. Rukata i B. Jakubka [101]. Autorzy wykazali, że podczas skrawania materiału pilarka wyposażona w łańcuch typu pół-dłuto generowała niższe drgania niż pilarka wyposażona w łańcuch typu pełne dłuto, i to na obu uchwytach pilarki. Podczas pracy z pełnym obciążeniem wartości skuteczne przyspieszeń drgań – $a_{hv,eq,FL}$ zmierzone na obu uchwytach pilarki wyposażonej w łańcuch typu pół-dłuto nie przekraczały 3 m/s^2 . Natomiast w sytuacji gdy pilarka została wyposażona w łańcuch typu pełne dłuto, przyspieszenia drgań wynosiły 4 m/s^2 na uchwycie przednim oraz 5 m/s^2 na uchwycie tylnym. Geometria ostrza ma zatem istotny wpływ na wartości drgań uchwytów pilarki.

Zagadnienie wpływu geometrii ostrza tnącego omówione zostało również w pracy kierowanej przez J. Dos Santos Depoi [123]. Nie potwierdzili oni wyników przedstawionych w pracy [101]. Nie wykazali oni istotnej statystycznie zależności pomiędzy geometrią ostrza a drganiami, a zmierzone wartości przyspieszeń drgań różniły się nieznacznie. Podobne wnioski, do tych jakie sformułowano w pracy [123] otrzymał J. Kováč wraz z innymi [118]. Wykazali oni, że geometria ostrza nie ma istotnego wpływu na drgania uchwytów urządzenia. Zmierzone wartości przyspieszeń drgań przemawiają na korzyść ostrzy typu pół-dłuto.

Porównanie wpływu łańcucha tnącego strugającego (schratcher) i ostrza żłobikowego (chipper) na drgania pilarki zostały zaprezentowane przez G. Pahlitzsch i H. Peters [124]. Autorzy wykazali, że korzystniejsze właściwości pod tym względem posiada ostrze żłobikowe. Wartości przyspieszeń drgań dla ostrza strugającego silnie zależą od jego geometrii,

a ta powinna być ściśle dostosowana do gatunku obrabianego materiału. Ostrza typu żłobikowego cechują się pod tym względem znaczną uniwersalnością.

Jak wynika z powyższych zagadnienie wpływu geometrii ostrza na drgania pilarek nie jest jednoznaczne i wymaga dalszych badań i analiz w tym zakresie.

Wpływ wartości kąta ostrzenia oraz natarcia ostrza skrawającego na emitowane przez pilarki drgania zostało zbadane przez W. Stempskiego, K. Jabłońskiego i J. Wegnera w pracach [125, 126]. Na podstawie pomiarów autorzy wykazali, że istnieje istotna statystycznie zależność pomiędzy wielkością kąta nachylenia krawędzi skrawającej a drganiami pilarek. Zależność ta jest również istotna statystycznie w odniesieniu do rękojeści urządzenia. Najniższe wartości przyspieszeń drgań odnotowano dla wartości kątów nachylenia krawędzi tnącej wynoszących odpowiednio 20° i 40° .

R. Osypiuk i A. Gendek w pracy [127] wykazali, że regeneracja stępionego ostrza poprzez jego ręczne ostrzenie prowadzi do zwiększenia rozrzutu wartości kątów ostrzenia do 20° oraz rozmiaru szczeliny wrębowej – nawet do 2 mm (co odpowiada około 3-krotnemu przekroczeniu wartości jaką dopuszcza producent). Wpływa to negatywnie na zachowanie się urządzenia w trakcie pracy – powodując występowanie tzw. zjawiska „błądzenia” zestawu tnącego w rzazie tnącym. Zwiększa także obciążenie jednostki napędowej, wartości sił na rękojeściach urządzenia i przyspieszenia drgań generowane przez pilarkę.

Rozmiar szczeliny wrębowej ogniwa tnącego łańcucha skrawającego pilarki przedstawiono na rysunku 4.6. Jest on związany z wysokością organicznika zagłębiania i przy jego pomocy rozmiar szczeliny wrębowej może być regulowany.



Rysunek 4.6 Sposób pomiaru rozmiaru szczeliny wrębowej [116]

Fabrycznie nowy łańcuch tnący ma teoretycznie – zgodnie z danymi deklarowanymi przez producenta, stały i określony wymiar szerokości szczeliny wrębowej. Rozmiar szczeliny wrębowej jest zależny od podziałki łańcucha tnącego – tabela 4.2.

Tabela 4.2 Szerokości szczeliny wrębowej w zależności od podziałki łańcucha – na podstawie [116]

Podziałka łańcucha [cale]	1/4 PICCO	1/4	3/8 PICCO	0,325	3/8	0,404
Rozmiar szczeliny wrębowej [mm]	0,45	0,65	0,65	0,65	0,65	0,8

W uzasadnionych przypadkach (cięcie drewna miękkiego oraz cięcie drewna świeżego) rozmiar szczeliny wrębowej może zostać zwiększony o 0,2 mm. Zdarzają się przypadki, że w skutek nieprawidłowo przeprowadzonej procedury regeneracji łańcucha tnącego (ostrzenie ręczne) rozmiar szczeliny wrębowej może osiągać wartość nawet 2 mm [127].

Wpływ rozmiaru szczeliny wrębowej na parametry technologiczne procesu ciecienia drewna z wykorzystaniem pilarki został opisany przez A. Otto i J. P. Parmigiani [81]. Autorzy wykazali, że wraz ze wzrostem rozmiaru szczeliny wrębowej rosną wartości sił technologicznych a zależność ta jest istotna statystycznie. Określili oni również wpływ wartości rozmiaru szczeliny na sprawność (wydajności) procesu ciecienia. Dodatkowo wyznaczony został optymalny zakres rozmiaru szczeliny wrębowej wynoszący od 0,5 do 0,65 mm.

Wpływ rozmiaru szczeliny wrębowej na ogólną wydajność procesu ciecienia był przedmiotem badań prowadzonych przez J. Marenča i innych [128]. Wykazali oni, że wraz ze wzrostem rozmiaru szczeliny wrębowej rosła wydajność ciecienia. Jednocześnie pogorszeniu ulegają warunki i komfort pracy – większe siły powodujące intensyfikację drgań oddziałujących na operatora pilarki.

Rozrzut wielkości rozmiaru szczeliny wrębowej ma istotny wpływ na zmienność chwilowych wartości sił technologicznych, a tym samym drgań [102].

Porównanie wielkości ogniw skrawających dla łańcucha o normalnym profilu wysokości (RAPID) i obniżonym profilu wysokości (PICCO) przy zachowaniu tej samej wartości podziałki łańcucha przedstawiono na rysunku 4.7.



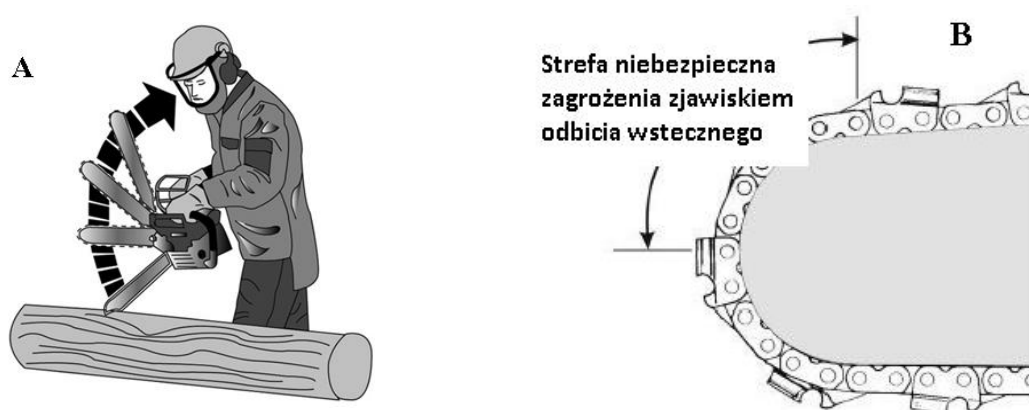
Rysunek 4.7 Różnica profili wysokościowych łańcuchów tnących marki STIHL [116]

Profil RAPID jest stosowany w pilarkach średnich i dużych mocy (do zastosowań profesjonalnych i półprofesjonalnych). Dla urządzeń o niewielkiej mocy (zastosowanie amatorskie) stosuje się piły o obniżonym profilu wysokości zęba – tzw. profil PICCO.

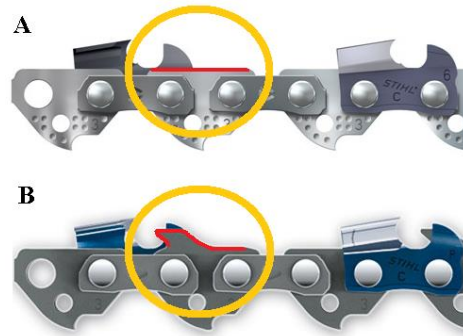
Wpływ profilu wysokości zęba tnącego na drgania rękojeści pilarki został opisany przez M. Bačić i innych [129]. Autorzy wykazali, że pilarka łańcuchowa o napędzie spalinowym wyposażona w łańcuch o profilu Rapid generuje mniejsze drgania niż pilarka akumulatorowa wyposażona w łańcuch o pomniejszonym profilu – Picco. Wyniki tych badań nie są pod tym kątem jednoznaczne, ponieważ nie można stwierdzić co ma większy wpływ na drgania: omówiony już wcześniej rodzaj jednostki napędowej pilarki czy wysokość profilu ogniw tnących.

Kolejnym z czynników konstrukcyjnych związanych z łańcuchem tnącym mającym wpływ na bezpieczeństwo użytkownika – redukcję niebezpiecznego zjawiska tzw. odbicia wstecznego, jak również na drgania są elementy antyodbiciowe. Zjawisko odbicia wstecznego i związaną z nim strefę niebezpieczną prowadnicy, której kontakt z materiałem powoduje powstanie tego zjawiska, przedstawiono na rysunku 4.8 – patrz następna strona.

Wersja COMFORT, w przeciwieństwie do wersji NORMAL, jest wyposażona w elementy antyodbiciowe, które ograniczają lub nawet całkowicie eliminują zjawisko odbicia wstecznego. Podczas korzystania z pilarki wyposażonej w łańcuch posiadający elementy antyodbiciowe proces skrawania przebiega równomiernie, jest wolny od szarpnięć, które w znaczący sposób mogłyby wpływać na przyjmowaną przez operatora pilarki dawkę drgań. Różnicę konstrukcyjną pomiędzy wersją NORMAL a COMFORT przedstawiono na rysunku 4.9.



Rysunek 4.8 Zjawisko odbicia wstecznego (A) i strefa niebezpieczna prowadnicy (B) [116]



Rysunek 4.9 Konstrukcja ogniw prowadzącego dla wersji NORMAL (A) oraz wersji z obniżoną skłonnością do odbicia wstecznego – wersja COMFORT (B) [116]

Zjawisko niebezpiecznego dla zdrowia i życia operatora odbicia wstecznego występujące podczas niewłaściwej pracy pilarką, która nie została wyposażona w łańcuch posiadający elementy antyodbiciowe, było badane przez A. Dąbrowskiego [130, 131] oraz A. Kaliniewicza i innych [132].

Ważnym czynnikiem, aczkolwiek często pomijanym jest stan ostrza skrawającego – stopień naostrzenia łańcucha tnącego. Dla typowych warunków pracy łańcuch tnący podlega procedurze wymiany/regeneracji (ostrzenia) co najmniej raz dziennie.

Zagadnienie wpływu stanu technicznego łańcucha tnącego na wydajność procesu cięcia zostało poruszone w pracy K. Wójcika i T. Kalinowskiego [133]. Badacze wykazali, że większą podatność na tępienie się posiada ostrze typu pełne dłuto (full-chisel). Co więcej średnia powierzchniowa wydajność cięcia dla ostrzy typu pełne dłuto jest mniejsza niż dla ostrzy typu pół-dłuto (semi chisel) co przekłada się na niższą wydajność pracy i dla określonego zadania roboczego zwiększa finalnie całkowitą dawkę drgań na jaką narażony jest operator.

A. Poje i M. Mihelič [134] wykazali, że dla ostrza stępionego czas konieczny do realizacji zadania wzrasta 8-mio krotnie w porównaniu do ostrza o dobrej kondycji.

Zagadnienie wpływu zużycia ostrzy tnących na wartości przyspieszeń drgań rejestrowanych na uchwytach pilarki poruszone zostało również przez W. Rukata i B. Jakubka, którzy wykazali, że dla stosunkowo niewielkiej sumarycznej powierzchni przecięć dokonanej za pomocą jednego łańcucha – poniżej 4,0 m² zużycie ostrzy tnących łańcucha pilarki nie powoduje wyraźnych zmian zmierzonych wartości przyspieszeń drgań w trakcie pracy z pełnym obciążeniem, zarówno w przypadku zastosowania łańcucha o profilu pełne dłuto (full

chisel) i pół-dłuto (semi chisel). Pomimo niewielkiego czasu pracy (wykonanej powierzchni przecięć) oba łańcuchy wykazywały pierwsze, wizualne objawy zużycia [101].

Ostatnią grupą czynników jaki mogą mieć wpływ na wartość przyspieszeń drgań emitowanych przez pilarki łańcuchowe lub dawkę drgań na jaką narażony jest pilarz-drwal, są te związane ze stanem technicznym jednostki napędowej. Ogólny stan techniczny urządzenia zależy nie tylko od jego wieku i czasu pracy urządzenia, ale również od polityki serwisowo-remontowej prowadzonej przez użytkownika. Jeżeli wszelkie czynności obsługowe i serwisowe były prowadzone zgodnie z zaleceniami producenta, to z dużym prawdopodobieństwem można założyć, że urządzenie znajduje się w lepszym stanie technicznym niż pilarka (o podobnym wieku i przebiegu), dla której nigdy nie dokonywano jakichkolwiek przeglądów czy napraw.

Zagadnienie wpływu stanu technicznego jednostki napędowej pilarki – luzów łożyskowych oraz bicia czopa wału na wartości generowanych przez urządzenie drgań zostało opisane przez J. Skarżyńskiego i K. Wójcika [135]. Autorzy wykazali, że zarówno wzrost luzu łożyskowego jak i bicia promieniowego czopa wału oraz bicia bębna sprzęgłowego negatywnie wpływa na wartości przyspieszeń drgań korpusu i rękojeści pilarki. Zależności te mają charakter liniowy o istotnym statystycznie charakterze, aczkolwiek przeciętnym dopasowaniu modelu – współczynnik korelacji liniowej $R \approx 0,64$ w przypadku luzu łożysk głównych wału i $R \approx 0,69$ dla bicia promieniowego czopa.

Warto również wspomnieć, że ponad 50 % uszkodzeń pilarek powodujących wyłączenie urządzenia z ruchu związane jest z układem zasilania paliwem (ok. 26 %) oraz cylindrem i układem korobowo-tłokowym. Niewłaściwa praca jednego z tych układów – szczególnie gaźnika objawia się nieregularną pracą i barakiem dynamiki jednostki napędowej, która negatywnie wpływa na kulturę pracy urządzeniem. Generowane wówczas drgania mogą powodować, już po krótkim czasie pracy, dyskomfort u operatora. Przyczyny uszkodzeń pilarek zostały opisane przez Z. Pilarka i P. Mielnickiego w pracy [136].

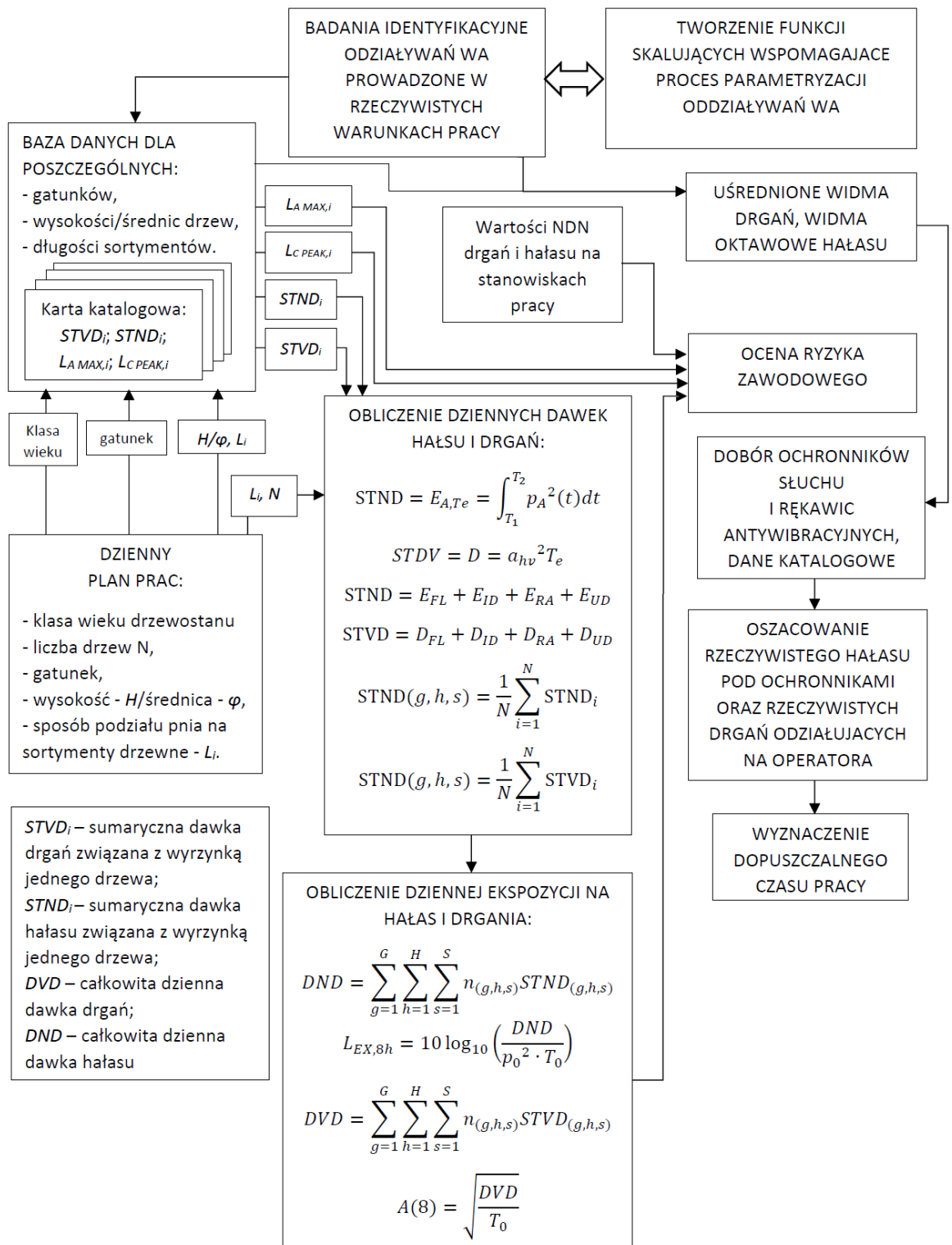
5. Koncepcja i zarys proponowanej metodyki pomiarowej

Metody, które teoretycznie najlepiej byłoby zaimplementować do realizacji pomiarów związanych z oszacowaniem i oceną zagrożenia operatorów pilarek na drgania i hałas na stanowisku pracy to metody pomiarów bezpośrednich – dozymetryczne, lub alternatywnie jedną z opisanych w rozdziałach 2.1.5. oraz 2.2.5. strategii pomiarowych. Mimo tego, że pozwalają one precyzyjnie określić rzeczywiste narażenie na oddziaływania wibroakustyczne, to ich stosowanie na stanowisku pracy pilarsza-drwala niesie ze sobą liczne trudności i ograniczenia. Należą do nich:

- ograniczona swoboda ruchów operatora (związana z koniecznością montażu na urządzeniu czujników, przewodów sygnałowych i aparatury pomiarowej) co zwiększa ryzyko utraty zdrowia i życia,
- konieczność wykonywania wielokrotnych pomiarów – często kosztownych (trwających np. dla 3-ciej strategii pomiarowej związanej z hałasem minimum 3 dni),
- czasochłonność pomiarów (zazwyczaj 8 h),
- konieczność żmudnej obróbki i analizy statystycznej uzyskanych danych w przypadku większości strategii pomiarowych,
- obniżenie poziomu bezpieczeństwa personelu wykonującego pomiary,
- wysokie ryzyko uszkodzenia i zniszczenia aparatury pomiarowej,
- rozbudowany tor pomiarowy (minimum 7 kanałów),
- ograniczona możliwość korygowania wyników pomiarów – szczególnie tych związanych ze zdarzeniami incydentalnymi,
- prowadzenie pomiarów terenowych w zastanych warunkach atmosferycznych (niekiedy uniemożliwiających wykonanie pomiarów),
- trudności w eliminacji wpływu tła i zakłóceń.

Mnogość czynników mających wpływ na drgania i hałas na jakie narażony jest pilarsz, przy jednoczesnych ograniczeniach stosowania proponowanych w normach PN-EN ISO 9612:2011 [14], PN-EN ISO 5349 cz. 1 i cz. 2 [53, 59] metod i strategii pomiarowych drgań i hałasu na stanowiskach pracy powoduje, że uzasadnione jest opracowanie nowej metody pośredniej, oszacowania narażenia operatorów pilarek na hałas i drgania.

Idea nowej metody wyznaczania narażenia pracownika zatrudnionego na stanowisku pilarz-drwal na drgania i hałas została przedstawiona na rysunku 5.1.



Rysunek 5.1 Idea proponowanej metody pośredniej wyznaczania zagrożenia drganiami i hałasem na stanowisku pilarza [oprac. R. Barczewski]

Zaproponowana metoda zakłada oszacowanie narażenia na podstawie obliczeń, do wykonania których niezbędna jest baza danych zawierająca zestawy dawek drgań i hałasu związanych z wyrzynką pojedynczego drzewa (różne gatunki, parametry, średnice pnia, wysokości) oraz dziennego (lub tygodniowego) planu zadań (pracy) zawierającego informacje nt. liczby drzew, gatunków oraz sposobie podziału pnia na tzw. sortymenty drzewne itp.

O ile określenie dziennego planu zadań pilarsza jest zadaniem stosunkowo prostym, to utworzenie bazy danych jest poważnym zagadnieniem badawczym. Można rozważyć dwie niżej opisane metody tworzenia baz danych z dawkami STND i STVD.

Metoda pierwsza może być oparta na pomiarach dawek uzyskanych podczas wyrzynki dużej, reprezentatywnej grupy drzew. Grupa ta powinna obejmować drzewa: różnych gatunków (np. typowych dla polskich lasów: sosna, dąb, brzoza, świerk, buk, olsza), o różnych wysokościach i średnicach pnia (związanych z wiekiem drzewa). Istotne byłoby również odrębne wyznaczanie dawek dla typowych sortymentów drzewnych o długościach np. 1,2 mb, 2,4 mb, 3,6mb itd. Do uzyskania średnich wartości dawek uzasadnione byłoby uśrednienie wyników z minimum 30 pomiarów wykonanych dla wszystkich możliwych wariantów obejmujących: gatunki, klasy wieku oraz sortymenty. Wiązałoby się to z wycinką ok. 1000 drzew. O ile podejście to byłoby uzasadnione w ujęciu statystycznym, to strona formalna wynikająca z obowiązujących przepisów i zasad, mogłaby stanowić realną przeszkodę w realizacji takiego zadania badawczego.

Metoda druga zaproponowana w tej rozprawie jako alternatywna do pierwszej metody, oparta jest na oszacowaniu dawek STND i STVD na podstawie zidentyfikowanych dawek cząstkowych związanych zarówno z reżimami pracy pilarki (bieg jałowy, pełne obciążenie, obroty maksymalne bez obciążenia oraz pozostałe stany – niezdefiniowane), jak i operacjami (ścinka, okrzesywanie i przerzynka). Zaletą tej metody wynika ze zdecydowanie mniejszej grupy drzew niezbędnych do utworzenia bazy danych, mniejszego nakładu pracy i czasochłonności. Dawki drgań i hałasu są wyznaczone na podstawie badań identyfikacyjnych prowadzonych na ograniczonej grupie drzew.

Wynika to z uwzględnienia w procedurach szacowania dawek trzech funkcji skalujących. Funkcje skalujące $D=f(\varphi)$ oraz $E=f(\varphi)$ pozwalają na oszacowanie dawek drgań i hałasu w zależności od średnicy pnia w miejscu przecięcia. Trzecia funkcja skalująca $\varphi=f(L_h)$ pozwala wyznaczać średnicę pnia w miejscu przecięcia w zależności od odległości względem gruntu. Warto nadmienić, że funkcje te otrzymano na drodze szczegółowej analizy wyników

parametryzacji zarejestrowanych sygnałów WA, zapisu audio–wideo oraz pomiarów średnic pnia.

Kluczowa dla implementacji proponowanej metody parametryzacji oddziaływań WA jest zatem baza danych (niezależnie od metody tworzenia) zawierająca karty katalogowe z dawkami drgań i hałasu. Dawki te zostały zdefiniowane jako:

- STND (ang. *Single Tree Noise Dose*) – dawka hałasu związana z wyrzynką jednego drzewa,
- STVD (ang. *Single Tree Vibration Dose*) – dawka drgań związana z wyrzynką jednego drzewa.

Dawka hałasu związana z wyrzynką jednego drzewa – STND jest równa ekspozycji na hałas – E_{A,T_e} (dawce hałasu) wyznaczonej dla czasu uśredniania (ekspozycji) T_e . Czas ekspozycji – T_e jest w tym przypadku równy przedziałowi czasu związanemu z wyrzynką jednego drzewa (tj. łącznym czasem: ścinki, okrzesywania oraz przerzynki pnia na określonej długości sortymenty).

W przypadku tworzenia bazy danych dawek metodą pierwszą (na podstawie dużej reprezentatywnej grupy drzew):

- dawkę hałasu – STND można obliczyć, z równania:

$$\text{STND} = E_{A,T_e} = \int_{T_1}^{T_2} p_A^2(t) dt \text{ [Pa}^2\text{s]}, \quad (5.1)$$

gdzie: T_e – czas uśredniania (ekspozycji) – czas trwania wyrzynki jednego drzewa,
 $T_e = T_2 - T_1$; T_1 – czas rozpoczęcia wyrzynki, T_2 – czas zakończenia wyrzynki,
 $p_A(t)$ – ciśnienie akustyczne skorygowane charakterystyką A.

- dawkę drgań – STVD można wyznaczyć z zależności:

$$\text{STVD} = D = a_{hv}^2 T_e \left[\frac{m^2}{s^3} \right], \quad (5.2)$$

gdzie: a_{hv} – uśredniona dla całego procesu wyrzynki jednego drzewa wartość sumy wektorowej, z trzech wzajemnie prostopadłych kierunków, wartości skutecznych, ważonych częstotliwościowo (W_h) przyspieszeń drgań,
 T_e – czas uśredniania (ekspozycji) – czas trwania wyrzynki jednego drzewa,
 $T_e = T_2 - T_1$; T_1 – czas rozpoczęcia wyrzynki, T_2 – czas zakończenia wyrzynki.

Karty katalogowe bazy danych powinny jednak zawierać uśrednione dawki $STND(g, h, s)$ i $STVD(g, h, s)$ wyznaczone z pomiarów np. 30 drzew tego samego gatunku (g), o zbliżonej wysokości (h), i rodzaju sortymentu (s). Wartości średnie dawek $STND(g, h, s)$ i $STVD(g, h, s)$ można wyznaczyć ze wzorów:

$$STND(g, h, s) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N STND_i, \quad (5.3)$$

$$STVD(g, h, s) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N STVD_i, \quad (5.4)$$

gdzie: $STND_i$, $STVD_i$ – dawki hałasu i drgań wyznaczone podczas wyrzynki i -tego drzewa tego samego gatunku o zbliżonych parametrach,
 i – liczba drzew tego samego gatunku o zbliżonych parametrach,
 N – łączna liczba ściętych przez pilarza drzew.

Natomiast w przypadku, gdy baza danych tworzona jest zgodnie metodą drugą, dawkę drgań – $STND$ oraz hałasu – $STVD$ oblicza się na podstawie wzorów:

$$STVD = D_{FL} + D_{ID} + D_{RA} + D_{UD}, \quad (5.5)$$

gdzie: D_{FL} – dawka cząstkowa drgań związana z pracą przy pełnym obciążeniu,
 D_{ID} – dawka cząstkowa drgań związana z pracą na obrotach jałowych,
 D_{RA} – dawka cząstkowa drgań związana z pracą na obrotach maksymalnych bez obciążenia,
 D_{UD} – dawka cząstkowa drgań związana z pracą w stanach niezdefiniowanych.

$$STND = E_{FL} + E_{ID} + E_{RA} + E_{UD}, \quad (5.6)$$

gdzie: E_{FL} – dawka cząstkowa hałasu związana z pracą przy pełnym obciążeniu,
 E_{ID} – dawka cząstkowa hałasu związana z pracą na obrotach jałowych,
 E_{RA} – dawka cząstkowa hałasu związana z pracą na obrotach maksymalnych bez obciążenia,
 E_{UD} – dawka cząstkowa hałasu związana z pracą w stanach niezdefiniowanych.

Na podstawie przeprowadzonych badań identyfikacyjnych, opisanych w rozdziale 6, można stwierdzić, że dawka cząstkowa drgań związana z pracą pilarki przy pełnym obciążeniu – D_{FL} jest sumą dawki wynikającej ze ścinki drzewa i dawek związanych z przerzynką pnia w celu pozyskania określonych sortymentów drzewnych. Ilość uzyskanych sortymentów zależy od wysokości drzewa (zatem od klasy wieku) oraz założonego, zgodnie z planem ciec, sposobu podziału pnia na sortymenty.

Dawka drgań związana z pracą na obrotach jałowych – D_{ID} zasadniczo odpowiada czynnościom takim jak: poruszanie się pilarza w obrębie stanowiska i wzdłuż osi pnia, pomiary sortymentów, usuwaniu odciętych gałęzi itp.

Dawka drgań związana z pracą na obrotach maksymalnych bez obciążenia – D_{RA} odpowiada operacji okrzesywania – odcinaniu odrostów gałęziowych o nieznaczących średnicach, które nie mają istotnego wpływu na obciążenie i spadek obrotów pilarki.

Dawka drgań związana z pracą w stanach niezdefiniowanych – D_{UD} odpowiada pozostałym procesom związanym np. z: rozruchem urządzenia (szarpnięcie linki układu rozruchowego), rozpędzaniem i swobodnym spadkiem prędkości obrotowej silnika pilarki.

Mając powyższe na uwadze dawkę drgań związaną z wyrzynką jednego drzewa – $STDV$ można wyznaczyć na podstawie wzoru (5.5) sprowadzonego do postaci:

$$STVD = D_{FL,Ścinka} + \sum_{i=1}^j D_{FL,Przerzynka_i} + \sum_{i=1}^k D_{ID,Obr.jałowe_i} + \sum_{i=1}^l D_{RA,Okrzesywanie_i} + \sum_{i=1}^m D_{UD,Stany\ niezdefiniowane_i}, \quad (5.7)$$

gdzie: i – indeks wyliczeń, $i = 1, 2, 3, \dots$,
 j – liczba cykli pracy przy pełnym obciążeniu,
 k – liczba cykli pracy na obrotach jałowych,
 l – liczba cykli pracy na obrotach maksymalnych bez obciążenia,
 m – liczba cykli pracy w stanach niezdefiniowanych.

Analogicznie jak dla drgań, dawkę hałasu $STND$ można zapisać w postaci:

$$STND = E_{FL,Ścinka} + \sum_{i=1}^j E_{FL,Przerzynka_i} + \sum_{i=1}^k E_{ID,Obr.jałowe_i} + \sum_{i=1}^l E_{RA,Okrzesywanie_i} + \sum_{i=1}^m E_{UD,Stany\ niezdefiniowane_i}, \quad (5.8)$$

gdzie: i – indeks wyliczeń, $i = 1, 2, 3, \dots$,
 j – liczba cykli pracy przy pełnym obciążeniu,
 k – liczba cykli pracy na obrotach jałowych,
 l – liczba cykli pracy na obrotach maksymalnych bez obciążenia,
 m – liczba cykli pracy w stanach niezdefiniowanych.

Dawki cząstkowe drgań i hałasu związane z poszczególnymi reżimami pracy pilarki uzyskano na podstawie krótkoczasowego sekwencjonowania i parametryzacji sygnałów WA i skorelowania z poklatkową analizą materiału audio-wideo.

Grupowanie sekwencji dawek i przyporządkowanie ich do poszczególnych reżimów pracy pilarki umożliwiło obliczenie dawek cząstkowych – D_{FL} , D_{ID} , D_{RA} , D_{UD} dla drgań oraz E_{FL} , E_{ID} , E_{RA} , E_{UD} dla hałasu.

Możliwe jest jeszcze inne podejście prowadzące do oszacowania dawek drgań – STVD i hałasu – STND. Odniesienie dawek związanych z pracą pilarki na obrotach jałowych (Idle – ID), pracy pilarki na obrotach maksymalnych bez obciążenia (Racing – RA) oraz pracy w stanach niezdefiniowanych (Undefined – UD) do dawki wyznaczonej dla pracy pilarki przy pełnym obciążeniu (Full Load – FL) było podstawą wyznaczenia współczynników wagowych – α_{D1} , α_{D2} , α_{D3} , (dla drgań), oraz α_{E1} , α_{E2} , α_{E3} (dla hałasu).

Dysponując współczynnikami wagowymi dawek drgań i hałasu STVD i STND oraz dysponując dawkami wyznaczonymi dla pracy pilarki w trybie pełnego obciążenia (Full Load – FL) odpowiednio D_{FL} i E_{FL} , które najłatwiej jest zidentyfikować na podstawie analizy sygnałów WA oraz audio–video.

Należy dodać, że dawki D_{FL} i E_{FL} można również oszacować na podstawie funkcji skalujących, oraz znajomości współczynników wagowych i dziennego planu pracy. Funkcje skalujące i współczynniki wagowe zostały zaprezentowane w dalszej części pracy.

Mając powyższe na uwadze dawkę drgań STVD związaną z wyrzynką jednego drzewa można oszacować na podstawie równania:

$$STVD = D_{FL}[1 + \alpha_{D1} + \alpha_{D2} + \alpha_{D3}] , \quad (5.9)$$

gdzie: D_{FL} – oszacowana dla ścinki i przerzynki pnia dawka drgań dla trybu pracy przy pełnym obciążeniu,

α_{D1} – współczynnik wagowy: stosunek dawki drgań dla trybu ID – D_{ID} do dawki drgań dla trybu FL – D_{FL} ,

α_{D2} – współczynnik wagowy: stosunek dawki drgań dla trybu RA – D_{RA} do dawki drgań dla trybu FL – D_{FL} ,

α_{D3} – współczynnik wagowy: stosunek dawki drgań dla trybu UD – D_{UD} do dawki drgań dla trybu FL – D_{FL} .

Podobnie jak w dla drgań, dawkę hałasu STND można oszacować na podstawie zależności:

$$STND = E_{FL}[1 + \alpha_{E1} + \alpha_{E2} + \alpha_{E3}] , \quad (5.10)$$

gdzie: E_{FL} – oszacowana dla ścinki i przerzynki pnia dawka hałasu dla trybu pracy przy pełnym obciążeniu,

α_{E1} – współczynnik wagowy: stosunek dawki hałasu dla trybu ID – E_{ID} do dawki hałasu dla trybu FL – E_{FL} ,

α_{E2} – współczynnik wagowy: stosunek dawki hałasu dla trybu RA – E_{RA} do dawki hałasu dla trybu FL – E_{FL} ,

α_{E3} – współczynnik wagowy: stosunek dawki hałasu dla trybu UD – E_{UD} do dawki hałasu dla trybu FL – E_{FL} .

Należy nadmienić, że badania identyfikacyjne prowadzone w rzeczywistych warunkach pracy na stanowisku pilarza, opisane w rozdziale 6, były podstawą do wyznaczenia funkcji skalujących i wyznaczenia wartości współczynników korekcyjnych dla dawek cząstkowych, na podstawie których będzie możliwe oszacowanie narażenia pilarza na drgania i hałas oraz utworzenia pilotażowej bazy danych STND i STVD dla trzech gatunków drzew o znanych parametrach i sortymencie.

Nowa metoda oszacowania STND i STVD powinna uwzględniać wszystkie istotne czynniki przyczyniające się do uzyskania największej zgodności z wynikami pomiarów metodą dozymetryczną.

Na etapie opracowywania nowej metodyki konieczne było uwzględnienie istotnych aspektów związanych ze specyfiką pracy urządzenia jakim jest pilarka łańcuchowa. Należą do nich:

- koegzystencja zjawisk WA i uwzględnienie zakłóceń zewnętrznych, oraz wynikająca z tego konieczność synchronicznej rejestracji sygnałów: drganiowego, akustycznego i wizyjnego,
- specyfika niestacjonarnego trybu pracy pilarki związana z:
 - zmiennym obciążeniem,
 - częstymi i nagłymi zmianami prędkości obrotowej,
 - rodzajem wykonywanej operacji technologicznej,
 - techniką posługiwania się urządzeniem,
 - geometrią łańcucha tnącego i konfiguracją zespołu tnącego,
 - rodzajem obrabianego materiału,

- uwzględnienie normowych pasm pomiarowych.

Dysponując uśrednionymi dawkami drgań i hałasu – $STND(g,h,s)$ i $STVD(g,h,s)$, uprzednio wyznaczonymi i zawartymi w bazie danych można wyznaczyć dzienną dawkę drgań – DVD (ang. *Daily Vibration Dose*) oraz dzienną dawkę hałasu – DND (ang. *Daily Noise Dose*).

Dzienna dawka drgań i hałasu opisane są poniższymi zależnościami:

$$DVD = \sum_{g=1}^G \sum_{h=1}^H \sum_{s=1}^S n(g, h, s) \cdot STVD(g, h, s), \quad (5.11)$$

$$DND = \sum_{g=1}^G \sum_{h=1}^H \sum_{s=1}^S n(g, h, s) \cdot STND(g, h, s), \quad (5.12)$$

gdzie: g – gatunek drzewa; G – liczba gatunków wycinanych drzew,
 h – klasa wieku (grupa drzew o określonej wysokości), H – liczba klas wieku drzew,
 s – grupa sortymentów drzewnych; S – liczba klas sortymentów drzewnych,
 $n(g,h,s)$ – liczba drzew danego gatunku, o określonej wysokości i sposobie podziału pnia na sortymenty drzewne,
 $STND(g,h,s)$, $STVD(g,h,s)$ – zaczerpnięte z bazy danych dawki hałasu i drgań dla danego gatunku, o określonej wysokości i znanym sposobie podziału pnia na sortymenty drzewne.

Finalnie, na podstawie dziennych dawek drgań – DVD i hałasu – DND można obliczyć dzienną ekspozycję na drgania – $A(8)$ i hałas – $L_{EX,8h}$ zgodnie ze wzorami:

$$A(8) = \sqrt{\frac{DVD}{T_0}}, \quad (5.13)$$

$$L_{EX,8h} = 10 \log_{10} \left(\frac{DND}{p_0^2 \cdot T_0} \right), \quad (5.14)$$

gdzie: T_0 – czas odniesienia, $T_0 = 8 \text{ h} = 28\,800 \text{ s}$,
 p_0 – ciśnienie odniesienia, $p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$.

Wpływ na otrzymane wartości dawek drgań i hałasu będą miały także wilgotność drewna – ρ i stan techniczny pilarki. Co wymagałoby także uwzględnienia tych czynników poprzez realizację tzw. *cięcia kalibracyjnego* pozwalającego obliczyć odpowiednią poprawkę. Dawki drgań STDV i hałasu STND mogą być funkcją wielu innych niewymienionych zmiennych.

Tworząc pilotażową bazę danych dawek STND i STVD uwzględniono jedynie najważniejsze zmienne tj. gatunek drzewa, klasę wieku oraz sortymenty. Przykładowa postać karty katalogowej tworzącej bazę danych pokazano na rysunku 5.2.

Karta katalogowa parametryzacji oddziaływań WA na stanowisku pilarza dla operacji wyrzynki w I klasie wieku drzewostanu (do 20 lat) – trzebież wczesna i zabiegi pielęgnacyjne długości sortymentu 1,2 mb																
Wysokość pnia [m]	0 ÷ 3				3 ÷ 6				6 ÷ 9				9 ÷ 12			
Średnica pnia przy gruncie [cm]	Poniżej 4		4 ÷ 6		6 ÷ 8		8 ÷ 10		10 ÷ 12		12 ÷ 14		14 ÷ 16		16 ÷ 18	
GATUNKI DRZEW:	STND	STVD	STND	STVD	STND	STVD	STND	STVD	STND	STVD	STND	STVD	STND	STVD	STND	STVD
Iglaste																
Sosna																
Świerk																
Jodła																
Modrzew																
...																
Liściaste																
Dąb																
Grab																
Buk																
Jesion																
Brzoza																
Grochodrzew																
...																

Rysunek 5.2 Propozycja postaci bazy danych dawek hałasu i drgań związanych z wyrzynką

Można również rozważyć uzupełnienie baz danych o wartości poziomów dźwięku: L_{Cpeak} , L_{Amax} , $L_{A,eq}$, $L_{C,eq}$, widma oktawowo hałasu oraz uśrednione widma przyspieszeń drgań. Te parametry i charakterystyki byłyby niezbędne do oceny ryzyka zawodowego, a także do oszacowania drgań i hałasu oddziałujących na pilarza po zastosowaniu indywidualnych ochronników słuchu i/lub rękawic antywibracyjnych.

6. Rejestracja, parametryzacja i analiza drgań i hałasu

6.1. Miejsce wykonywania pomiarów oraz warunki środowiskowe

Do weryfikacji i walidacji opracowanej nowej metodyki oszacowania oddziaływań drgań i hałasu na stanowisku pilarza oraz utworzenia podstawowej bazy danych w postaci dawek drgań – STVD i hałasu STND niezbędne było wykonanie rejestracji drgań i hałasu w rzeczywistych warunkach pracy pilarza.

Organizacja sesji pomiarowej podczas wyrzynki drzew była możliwa dzięki współpracy z: *Regionalną Dyrekcją Lasów Państwowych* o. w Poznaniu; Nadleśnictwo Babki, leśniczówka Łęčno (w zakresie merytorycznym) oraz z *Zakładem Usług Leśnych „Laspark” Piotr Kiel* (w aspekcie wykonawczym). Dzięki tej współpracy możliwe było utworzenie unikatowej bazy sygnałowej, pozyskanie danych dotyczących specyfiki pracy pilarza w warunkach rzeczywistych a nie laboratoryjnych.

Jako miejsce prowadzenia prac leśnych – podczas których wykonano rejestracje sygnałów WA wskazano oddział leśny 70c leśniczówki Łęčno będącej oddziałem nadleśnictwa Babki. Zdjęcie satelitarne ww. obszaru przedstawiono na rysunku 6.1.



Rysunek 6.1 Zdjęcie satelitarne wraz z zaznaczonym oddziałem 70c (kolor czerwony) na terenie, którego prowadzono pomiary [137]

Po przeprowadzonej wizji lokalnej rejestracja drgań i hałasu w warunkach terenowych zrealizowano w dniu 23 czerwca 2022 pod nadzorem: Zbigniewa Łyszczarza – leśniczego w Nadleśnictwie Babki (leśniczówka Łękno).

Operatorem pilarki był Pan Piotr Kiel – właściciel Zakładu Usług Leśnych, osoba z 13-to letnim doświadczeniem zawodowym, który realizował *Plan ciec* w ww. oddziale.

Zgodnie z normą PN-EN 61672-1:2014-03 *Elektroakustyka – Mierniki poziomu dźwięku – Część 1: Wymagania* [21] zalecane, normowe warunki środowiskowe (klimatyczne) podczas prowadzenia pomiarów powinny być następujące:

- temperatura powietrza – $t_{ot} = 23,0\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- ciśnienie atmosferyczne – $p_{atm} = 1013,25\text{ hPa}$,
- wilgotność względna powietrza – $RH = 50\%$.

Pomiary wykonywano w godzinach 10:00÷15:00. Warunki atmosferyczne panujące w tym dniu określono jako bardzo dobre, pogoda była słoneczna, bezwietrzna. Temperatura powietrza wynosiła $24,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, wilgotność względna powietrza $RH = 44\%$, zmierzone ciśnienie atmosferyczne wynosiło $1006,3\text{ hPa}$. Pomiary wartości parametrów otoczenia zrealizowano za pomocą uniwersalnej stacji pogodowej LAB-EL model LB-575 THP o numerze seryjnym 151.

Na podstawie tych parametrów można stwierdzić, że warunki środowiskowe w jakich realizowana była rejestracja (pomiarów terenowe) określono jako bardzo dobre, i były zbieżne do zalecanych w normie.

6.2. Charakterystyka udostępnionego do badań drzewostanu

Powierzchnię leśną, na której realizowano pomiary wg. *Planu urzędzenia lasu*, udostępnioną przez Nadleśnictwo Babki, wg. tzw. *opisu taksacyjnego* zakwalifikowano jako powierzchnię leśną o charakterze drzewostanu pełniącego funkcję ochronną. Kategorię ochronną określono na wodochronną – ochrona hydrologiczna. Typ siedliskowy lasu – las mieszany świeży (nasadzeniowy).

Wiek drzewostanu w momencie prowadzenia pomiarów wynosił 84 lata. Udział gatunkowy drzewostanu złożony głównie z sosny – ok. 80 % oraz dębu – ok. 20 % z lokalnymi wtrąceniami brzozy.

Dla podstawowych gatunków tworzących drzewostan wartość średnicy pnia zmierzona na wysokości tzw. *pierśnicy* (1,3 m nad poziomem gruntu) wynosiła średnio: 28 cm dla sosny oraz 32 cm dla dębu. Średnia wysokość drzew tworzących drzewostan wynosiła 23 m dla sosny i 20 m dla dębu.

Sygnaly wibroakustyczne oraz skorelowany z nimi sygnał audio-wizualny rejestrowano w trakcie ścinki i obróbki 5-ciu drzew, dla trzech różnych gatunków (sosna, dąb oraz brzoza). Ze względów bezpieczeństwa, fizyczna ścinka drzew – obalenie pnia, była realizowana niezależnie, przed pomiarami. Proces ścinki symulowano, realizując analogiczne cięcia, na pozostawionych fragmentach (z odpowiednim naddatkiem materiału) pni poszczególnych drzew.

Dane statystyczne w postaci: rozmiaru średnicowego pnia w miejscu ścinki, kolejno realizowanych przecięć i długości powstałych w ten sposób sortymentów, oraz wilgotność materiału badawczego zawarto w tabeli 6.1.

Tabela 6.1 Parametry fizyczne materiału obrabianego i dane statystyczne dla uzyskanych w trakcie procesu pozyskiwania sortymentów drzewnych

Parametry fizyczne materiału obrabianego i dane statystyczne dla uzyskanych w trakcie procesu pozyskiwania sortymentów drzewnych					
	Sosna – So		Dąb – Db		Brzoza – Brz
Parametr	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 1
Wilgotność [%]	22,8	22,9	25,7	29	23,5
Średnica pnia w miejscu ścinki [cm]	25	28	23	27	30
Średnice pnia w miejscu kolejnych przecięć [cm]	18;17;15;14; ;13;12;10; 8	25; 25; 24; 22; 20; 19; 16	20; 19; 19; 18; 18; 17; 17; 16; 13; 10; 9	24; 23; 20; 20; 19; 18; 17; 14; 11	23; 22; 21; 19; 17; 16; 15
Długość kolejnych sortymentów [m]	8x2,4	7x2,4	5x1,2; 1x2,4 5x1,2	5x1,2; 2x2,4 2x1,2	5x2,4; 2x1,2
Wysokość korony [m]	2,5	1,5	1,5	2	2

Pomiary średnic i długości pnia w miejscu ścinki i miejscach przerzynki oraz długości otrzymanych w ten sposób sortymentów zmierzono za pomocą miary warsztatowej, natomiast wilgotność drewna w stanie świeżo ściętym wyznaczono z dokładnością do 0,1% za pomocą wilgotnościomierza POWERFIX PROFI + model HG03064C ver. 09/2017.

6.3. Pilarka i osprzęt

W trakcie pracy pilarz korzystał z uznanej na rynku, wiodącej marki pilarki spalinowej przeznaczonej do użytku profesjonalnego. Poddaną testom pilarkę wyprodukowaną w sierpniu 2020 roku. W użytkowaniu *Zakładu Usług Leśnych* wykorzystywana była od marca 2021 roku. Stan techniczny urządzenia oceniono jako bardzo dobry. Deklarowana przez producenta urządzenia moc wynosiła $P = 3,5$ kW. Deklarowana przez producenta wartość przyspieszeń drgań – $a_{hv,eq}$, wyznaczona zgodnie z normą PN-EN ISO 22867:2022-05 [57], generowanych na uchwytach urządzenia wynosi $3,5 \pm 2$ m/s² dla obu uchwytów.

Deklarowany przez producenta poziom równoważny ciśnienia akustycznego – $L_{A,eq}$, wyznaczony zgodnie z PN-EN ISO 22868:2021-08 [138] wynosi 106 dB. Omawianą pilarkę przedstawia rysunek 6.2.



Rysunek 6.2 Używana w trakcie testów pilarka (fot. R. Barczewski)

Pilarka wyposażona była w zestaw tnący składający się z:

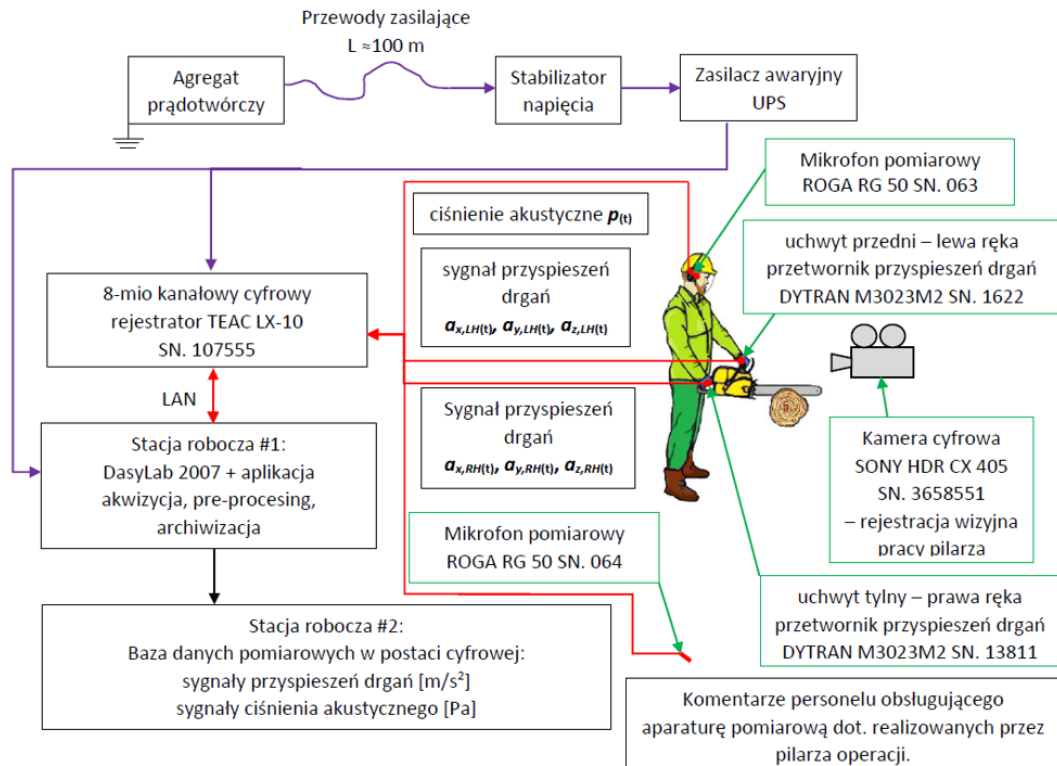
- prowadnicy Rollomatic E-Light®™ o długości roboczej wynoszącej 40 cm,
- koło napędowe pierścieniowe 7-mio ramienne,
- łańcuch tnący (60 ogniów).

Podziałka p współpracującego z prowadnicą i kołem napędowym łańcucha tnącego wynosiła 3/8". Szerokość rowka prowadzącego równa $b = 1,6$ mm. Urządzenie wyposażono w łańcuch typu pełne dłuto – przecinakowy (Full-Chisel) w stanie fabrycznie nowym

o zwiększonym profilu wysokości zęba tnącego – RAPID, oraz wyposażonego w elementy antyodbiłowe – wersja COMFORT.

6.4. System synchronicznej rejestracji sygnałów WA i AV

Schemat systemu synchronicznej rejestracji sygnałów wibroakustycznych i audio-wideo zastosowany podczas badań w warunkach terenowych przedstawiono na rysunku 6.3.

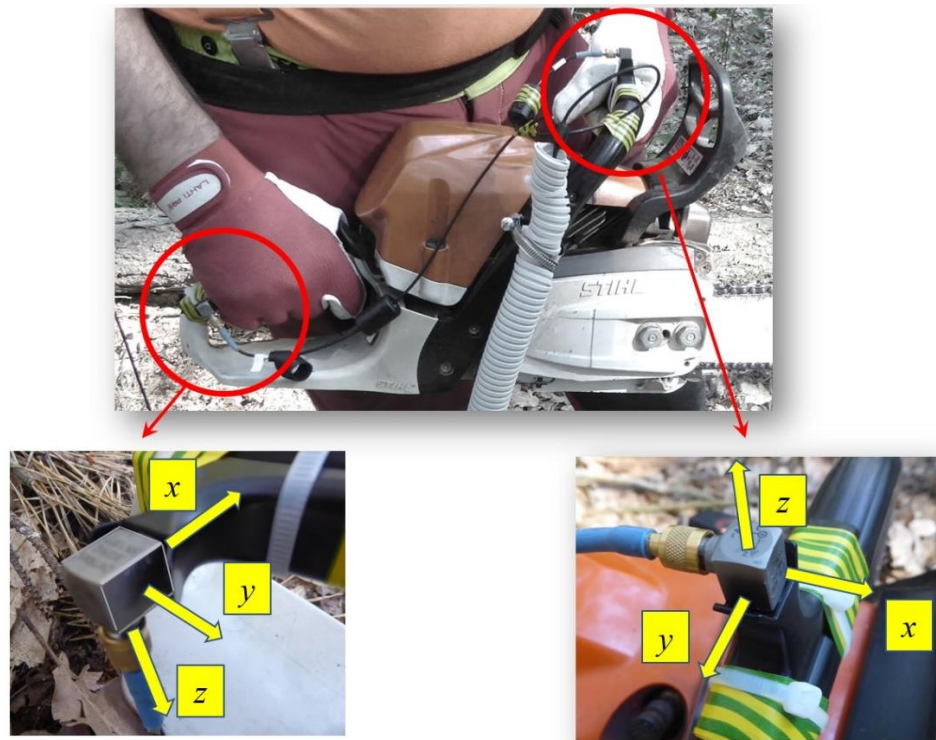


Rysunek 6.3 Schemat systemu rejestracji sygnałów wibroakustycznych i audio-wideo

Na uchwytach pilarki zamocowano dwa trójosiowe przetworniki drgań marki DYTRAN model M3023M2 (standard ICP). Przetworniki drgań – łącznie 6 kanałów, zamocowano wstępnie do rękojeści pilarki za pomocą taśmy klejącej a następnie utwierdzono w zadanym położeniu z wykorzystaniem opasek zaciskowych. Sposób zamocowania przetworników drgań został przedstawiony na rysunku numer 6.4.

W celu zapewnienia naturalnego sposobu chwytu pilarki przez operatora wykorzystano adaptory mocujące SVANTEK SA 50. Na uchwycie przednim (podtrzymującym) – trzymanym lewą dłonią zamocowano przetwornik o numerze seryjnym 1622, natomiast na uchwycie tylnym (sterującym) – trzymanym prawą dłonią zamocowano przetwornik o numerze seryjnym

13811. Na rysunku 6.4 wyróżniono także kierunki osi układu odniesienia dla obu rękojeści pilarki.



Rysunek 6.4 Sposób zamocowania przetworników oraz osie układów odniesienia rękojeści pilarki na podstawie PN-EN ISO 5349 cz. 1 i 2 [53, 59] (fot. R. Barczewski)

Miejsca zamocowania przetworników drgań na uchwytach pilarki są zbliżone do zalecanych w normach PN-EN ISO 5349 cz. 1 i cz. 2 [53, 59]. Przesunięto je nieznacznie względem zalecanych (patrz rysunek 2.5b). Było to podyktowane względami bezpieczeństwa, a mianowicie:

- uniknięcie przypadkowemu naciśnięciu manetki otwarcia przepustnicy gaźnika przez pilarza, w sytuacji, gdy mocowanie przetwornika drgań z wykorzystaniem adaptera mocującego SA 50 powodowało by trwały nacisk na dźwignię zabezpieczającą (uchwyt tylny),
- zapewnienie możliwości zadziałania systemu hamulca bezwładnościowego poprzez uniknięcie kolizji cofającej się dźwigni hamulca z przetwornikiem w sytuacjach niebezpiecznych związanych ze zjawiskiem odbicia wstecznego (uchwyt przedni).

Zastosowano układ odniesienia, w którym: oś podłużna rękojeści pokrywa się z osią y i skierowana jest zwrotem w stronę kciuka danej dłoni (dla obu uchwytów). Kierunek osi

z pokrywa się z osią podłużną przedramienia, zwrotem w dół – ku podłożu. Oś x jest prostopadła do dwóch ww. a jej zwrot skierowany jest w taki sposób, że powstały układ współrzędnych jest prawoskrętny.

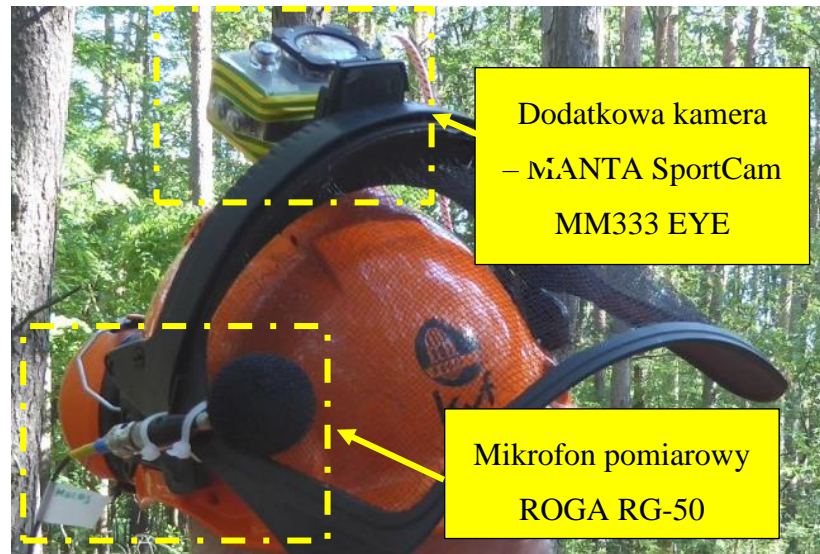
W torze rejestracji hałasu na stanowisku pracy pilarz-drwał zastosowano mikrofon pomiarowy ROGA RG-50, który zamocowano do hełmu ochronnego w pobliżu prawego ucha operatora, tak aby uniknąć zakłóceń np. odbić przez ciało pilarza. Mikrofon zamocowano do przyłbicy opaskami samozaciskowymi, dodatkowo na mikrofon nałożono osłonę przeciwwietrzną. Pomiar hałasu realizowano zgodnie z zaleceniami normy PN-EN ISO 9612:2011 [14] oraz normy PN-EN-ISO 22868:2021-08 *Maszyny leśne i ogrodnicze – Metodyka badania hałasu przenośnych, trzymanyh w ręku maszyn z silnikiem spalinowym – Metoda techniczna (Klasa dokładności 2)* [138]. Sposób zamocowania mikrofonu przedstawiono na rysunku 6.5. Drugi mikrofon pomiarowy (ROGA RG-50) zastosowano w celu uzupełnienia rejestracji sygnałów drgań i hałasu na stanowisku pilarza o komentarz słowny. Komentarze były nagrywane synchronicznie z rejestracją drgań i hałasu i dotyczyły aktualnie wykonywanych przez pilarza czynności. Ułatwiło to późniejszą identyfikację poszczególnych czynności wykonywanych przez pilarza oraz trybów pracy pilarki.

Uzupełnieniem rejestracji sygnałów WA generowanych przez pilarkę była równoległe prowadzona rejestracja audio-wizualna czynności roboczych związanych ze: ścinką, okrzesywaniem i przerzynką pnia na określone sortymenty drzewne. Materiały AV zarejestrowane podczas pracy pilarza zostały udostępnione w internetowym serwisie społecznościowym YouTube⁵.

Do rejestracji audio-wideo wykorzystano kamerę cyfrową SONH HDR CX 405. Sposób prowadzenia rejestracji AV przedstawiono na rysunku 6.6. Drugą, dodatkową kamerę

⁵ linki do materiałów audio-wideo:
proces symulacji ścinki, okrzesywania i wyrzynki dla:
sosny nr. 1, <https://youtu.be/mjzY86jWjdw>,
sosny nr. 2, https://youtu.be/ru2td_2ki_o,
dębu nr. 1, <https://youtu.be/JFbOUWL62Y4>,
dębu nr. 2, <https://youtu.be/UYIkhFiDbxc>,
brzozy nr. 1, <https://youtu.be/kiTgqSIZyKY>.

– MANTA SportCam MM333 EYE, prowadzącą rejestrację obrazu wideo z perspektywy pilarza zamontowano na przyłbicy helmu operatora (rysunek 6.5).



Rysunek 6.5 Sposób zamocowania do helmu ochronnego pilarza mikrofonu pomiarowego oraz dodatkowej kamery do rejestracji AV (fot. R Barczewski)



Rysunek 6.6 Pilarz w trakcie pracy i osoba asystująca prowadząca rejestrację AV i kontrolę położenia przewodów sygnałowych (fot. B. Jakubek)

Pilarzowi w trakcie pracy asystowała osoba – członek personelu realizującego pomiary. Jej zadaniem oprócz filmowania pracy pilarza była kontrola napięcia i położenia przewodów sygnałowych, tak, aby nie zostały one uszkodzone lub nie ograniczały swobody ruchów pilarza. Zapewniono w ten sposób odwzorowanie rzeczywistych warunków pracy i komfortu posługiwania się urządzeniem.

Przetworniki przyspieszeń drgań DYTRAN M3032M2 i mikrofony ROGA RG-50 połączono przewodami sygnałowymi RG174A (złącza BNC) do wejść 8-mio kanałowego cyfrowego rejestratora danych TEAC LX-10. Rejestrator TEAC LX-10 połączono siecią LAN ze stacją roboczą #1. Na tej jednostce zainstalowano dedykowaną aplikację LAS_REC_03.DSB do rejestracji sygnałów WA. Aplikacja ta została opracowana w środowisku *DASYLab*⁶ W rejestratorze TEAC LX-10 sygnały wibroakustyczne poddane były konwersji analogowo-cyfrowej z częstotliwością próbkowania $f_s = 48$ kHz i 24-bitową kwantyzacją. Zastosowano segmentację sygnału na bloki zawierające 4096 próbek.

Aplikacja LAS_REC_03.DSB realizowała również skalowanie polegające na zamianie sygnałów napięciowych (w voltach) na sygnały przyspieszeń drgań i ciśnienia akustycznego odpowiednio w m/s^2 oraz Pa. Sygnały w postaci plików binarnych w formacie zmiennoprzecinkowym DDF (ang. *DASYLab Data File*) archiwizowano w pamięci masowej stacji roboczej #1. Zarejestrowane sygnały obejmowały cały proces wyrzynki drzew objętych planem badań.

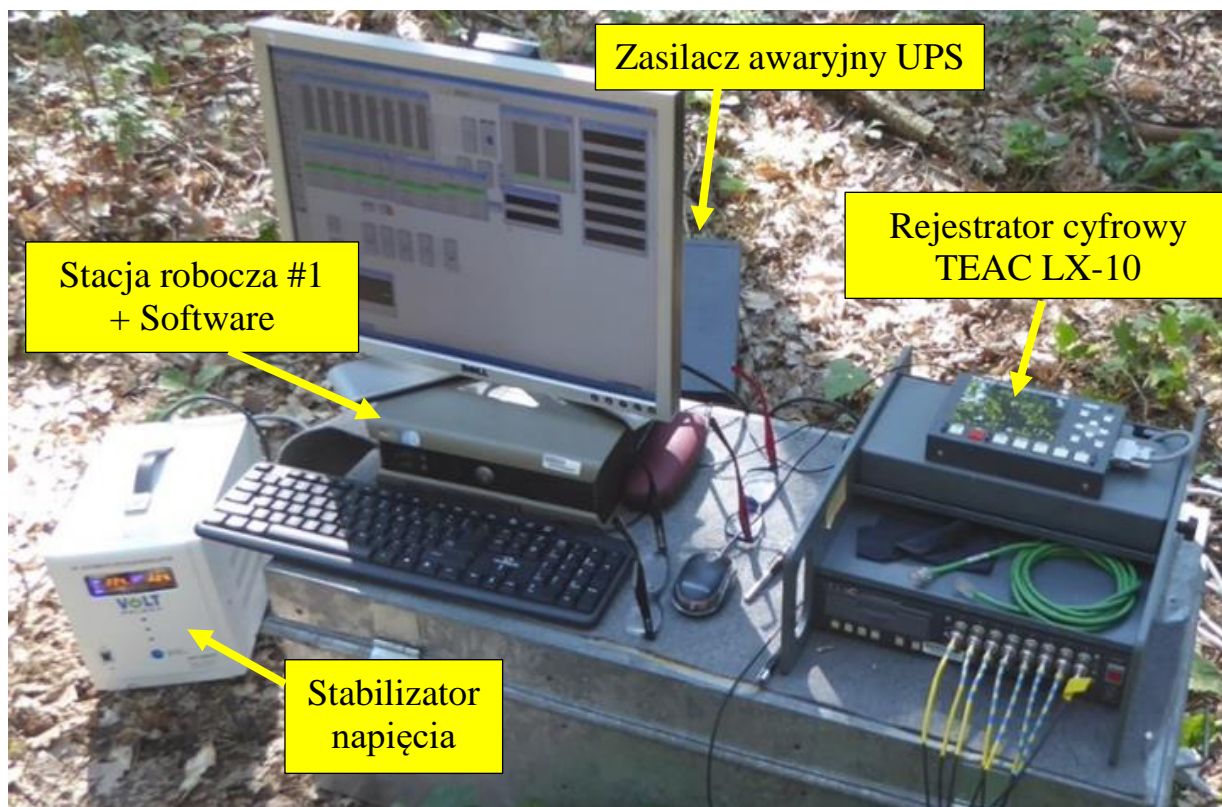
Należy dodać, że tor rejestracji został przed i po sesji pomiarowej poddany wzorcowaniu. Kalibrację kanałów od 1 do 6, związanych z pomiarami drgań wykonano po pomocą wzorcowego źródła drgań EMSON MAT K-10 model RPT 97-146. Wartość skuteczna przyspieszeń drgań sygnału wzorcowego a_{cal} wynosiła $10 m/s^2$, częstotliwość sygnału wzorcowego $f_{cal} = 79,6$ Hz.

Kalibracja kanałów 7 i 8 związanych z pomiarami hałasu i komentarzem słownym została wykonana za pomocą wzorcowego źródła dźwięku SONOPAN KA 10. Poziom wzorcowego ciśnienia akustycznego L_{cal} wynosił 94 dB, częstotliwość sygnału $f_{cal} = 1000$ Hz.

Widok stanowiska rejestracji sygnałów (część aparaturowa) przedstawiono na rysunku 6.7.

Czułości napięciowe użytych w pomiarach drgań przetworników oraz mikrofonów pomiarowych zawarto w tabeli 6.2.

⁶ *DASYLab* – ang. *Data Acquisition System Laboratory*; prod. MMC Measurement Computing



Rysunek 6.7 Stanowisko pomiarowe (fot. R. Barczewski)

Tabela 6.2 Czulości napięciowe przetworników drgań i mikrofonów pomiarowych użytych do rejestracji sygnałów WA

Miejsce montażu	Piezoelektryczny przetwornik przyspieszeń drgań				Mikrofon pomiarowy	
	Uchwyt przedni pilarki - lewa ręka		Uchwyt tylny pilarki - prawa ręka		Hełm ochronny pilarza	Stacja robocza #1 - stanowisko pomiarowe
Producent	DYTRAN		DYTRAN		ROGA	ROGA
Model	M 3220M		M 3220M		RG-50	RG-50
Numer seryjny	1622		16811		476	252
Czułość napięciowa	[mV/m/s ²]				[mV/Pa]	
	Kanał #1	1,060	Kanał #1	1,035	52,00	51,20
	Kanał #2	1,050	Kanał #2	1,034		
	Kanał #3	1,050	Kanał #3	1,066		

Zestawienie przetworników przyspieszeń drgań (z oznaczeniami osi, numerami kanałów wyjść) i mikrofonów pomiarowych uzupełnione o numery kanałów sygnałowych cyfrowego rejestratora danych TEAC LX-10 zamieszczono w tabeli 6.3.

Ze względu na uwarunkowania techniczne jakie występują podczas pomiarów terenowych – m.in. brak dostępu do sieci energetycznej i punktu zasilania, konieczne było skonfigurowanie autonomicznego układu zasilania aparatury (systemu rejestracji sygnałów WA).

Tabela 6.3 Przetworniki drgań oraz mikrofony pomiarowe zastosowane do rejestracji sygnałów WA

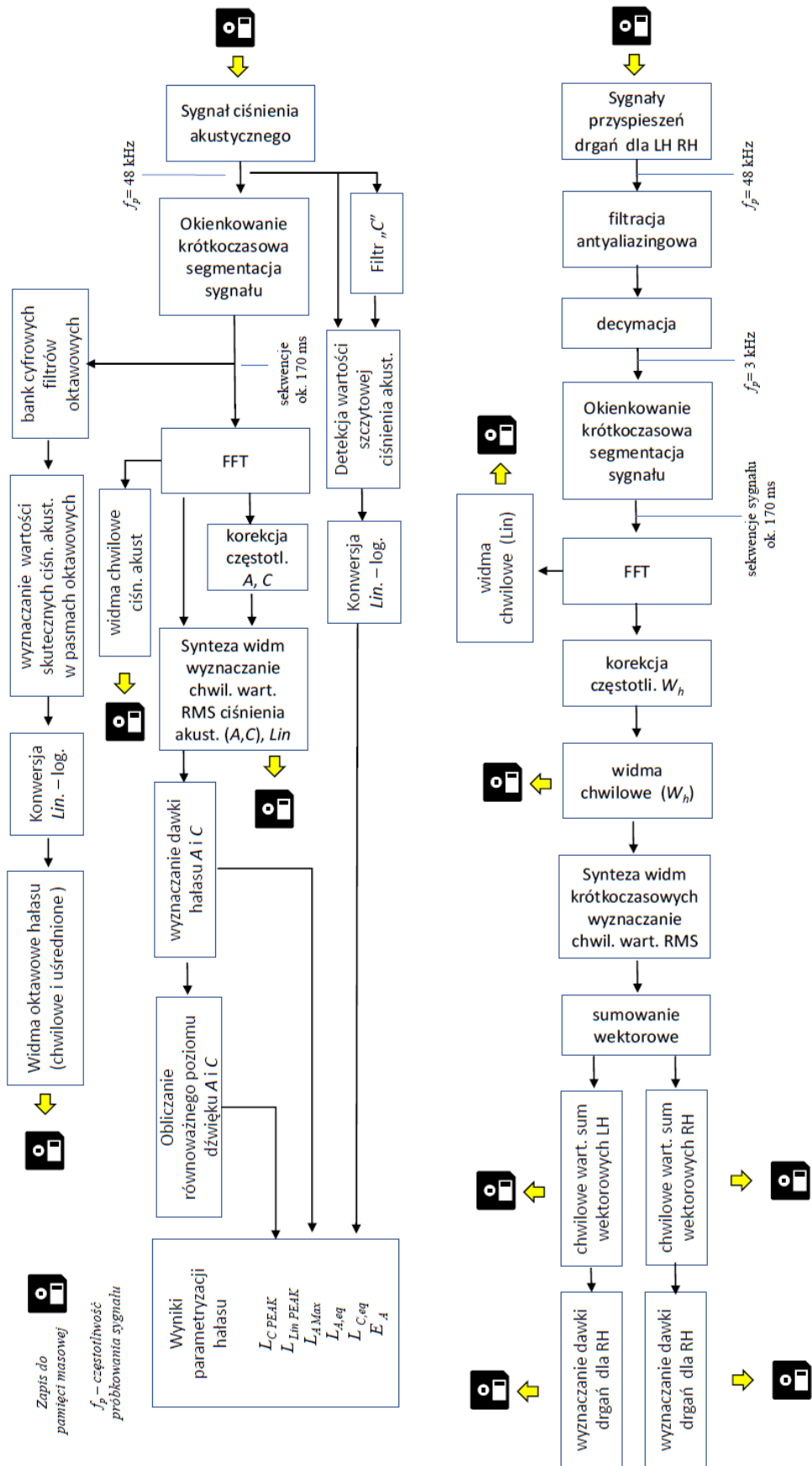
Rodzaj przetwornika	Model	Nr. Seryjny	Położenie	Nr. kanału wyjścia przetwornika	Oś układu odniesienia wg. PN-EN ISO 5349	Nr. kanału rejestratora TEAC LX-10
Przetwornik przyspieszeń drgań	DYTRAN M3023M2	1622	Uchwyt przedni (podtrzymujący) – lewa ręka	1	x	1
				2	y	2
				3	z	3
		16811	Uchwyt tylny (sterujący) – lewa ręka	1	z	4
				2	y	5
				3	x	6
Mikrofon pomiarowy	ROGA RG-50	476	Przyłbica, głowa operatora – przy prawym uchu	nd.	nd.	7
		252	Stanowisko pomiarowe	nd.	nd.	8

Zasilanie aparatury było realizowane z zastosowaniem przenośnego agregatu prądotwórczego marki ENDRESS model ESE 20 BS (o mocy 1,5 kW). Aby zminimalizować wpływ zakłóceń akustycznych, generowanych przez pracujący agregat, na wyniki pomiarów hałasu, urządzenie umieszczono w odległości ok. 100 m od stanowiska pracy pilarza. Dodatkowo, zgodnie z zaleceniami urządzenie uziemiono.

Zasilanie z agregatu prądotwórczego doprowadzono przewodami elastycznymi (przedłużacz budowlany). Ze względu na ich długość, w obawie przed spadkami napięcia, w obwód zasilający wpięto stabilizator napięcia marki VOLT POLSKA, model AVR-3000 VA. Dodatkowo za stabilizatorem umieszczono układ awaryjnego podtrzymania zasilania – UPS marki Energiene model UPS-PC-625 VA.

6.5. System analizy i parametryzacji sygnałów WA

Zarejestrowane cyfrowo sygnały przyspieszeń i ciśnienia akustycznego w na stanowisku pilarza w rzeczywistych warunkach jego pracy poddano cyfrowemu przetwarzaniu aplikacji DOC_ANALIZY_DSB opracowanej i wykonanej w środowisku DASyLab. Uproszczony algorytm aplikacji pokazano na rysunku 6.8.



Rysunek 6.8 Schemat blokowy struktury aplikacji realizującej CPS [wyk. R. Barczewski]

Parametryzacja i analizy sygnałów wibroakustycznych były wykonane w celu dostosowania ich do dalszego przetwarzania (postprocesingu). Uzyskane w wyniku przetwarzania dane miały postać i formę umożliwiającą techniczną realizację opracowanej metodyki oraz jej weryfikację oraz walidację. Dodatkowo wyznaczono wartości podstawowych miar parametryzujących drgania i hałas, a także wykonano analizy sygnałów WA w dziedzinie częstotliwości i analizy czasowo-częstotliwościowe.

Sygnał ciśnienia akustycznego przetwarzany był z częstotliwością próbkowania 48 kHz co umożliwiało ich parametryzację i analizowanie w pełnym paśmie akustycznym. Istotne z punktu widzenia opracowanej metodyki było dokonanie krótkoczasowej segmentacji sygnału ciśnienia akustycznego z zastosowaniem okna prostokątnego o rozmiarze 4096 próbek. Zabieg ten umożliwił prowadzenie analizy czasowo-częstotliwościowej STFT i tworzenie sonogramów. Widma krótkoczasowe były tworzone interwałem $\Delta\tau$ ok. 170 ms, wynikającym z rozmiaru okna czasowego (4096 próbek) i częstotliwości próbkowania (48 kHz).

Widma krótkoczasowe poddane były korekcji częstotliwościowej A oraz C zgodnie z charakterystykami opisanymi wzorami (2.9) i (2.10). Synteza składowych skorygowanych i niekorygowanych częstotliwościowo widm pozwoliła wyznaczać chwilowe wartości skuteczne ciśnienia akustycznego (L_{in} , A , C) oraz elementarne dawki hałasu dla interwału czasowego ($\Delta\tau = 64/375$ s, czyli ok. 170 ms).

Na ich podstawie obliczono w toku dalszego przetwarzania dawki hałasu oraz poziomy równoważne dźwięku (z charakterystykami A i C). Zastosowanie w torze przetwarzania ciśnienia akustycznego banku pasmowych filtrów cyfrowych (oktawowych) dało możliwość utworzenia zarówno chwilowych jak i uśrednionych widm oktawowych hałasu. Równolegle wyznaczano szczytowy poziom dźwięku $C - L_{C\ peak}$ oraz szczytowy niekorygowany poziom ciśnienia akustycznego $L_{Lin\ peak}$.

Przetwarzanie sygnałów przyspieszeń drgań prowadzono synchronicznie dla wszystkich 6-ciu kanałów (dwa przetworniki drgań zamontowano na przednim i tylnym uchwycie pilarki, 3 kierunki pomiaru drgań). Sygnał poddano decymacji w celu lokalnego obniżenia częstotliwości próbkowania do 3kHz oraz segmentacji krótkoczasowej (okno czasowe 512 próbek). Dzięki temu uzyskano identyczny interwał przetwarzania krótkoczasowego jak dla przetwarzania cyfrowego hałasu. Widma w uzyskane w wyniku analizy STFT były podstawą do tworzenia spektrogramów. Dalsze przetwarzanie widm obejmowało korekcję częstotliwościową W_h zgodnie z wzorem 2.34 oraz syntezę składowych widm dającą w efekcie

chwilowe wartości skuteczne ważonych częstotliwościowo przyspieszeń drgań. W dalszej kolejności wykonano sumowanie wektorowe wartości skutecznych dla kierunków pomiaru x , y , z . W efekcie uzyskano chwilowe wartości sum wektorowych przyspieszeń drgań dla uchwytu przedniego i tylnego pilarki.

Na ich podstawie wyznaczano chwilowe elementarne dawki drgań wyznaczone z interwałem czasowym ($\Delta\tau = 64/375$ s, ok. 170 ms). Wyznaczono również dawki drgań dla całego analizowanego sygnału.

Wyniki końcowe jak i pośrednie zapisywano do pamięci masowej w postaci tekstowej i binarnej, Oznaczono to piktogramami na rysunku 6.8. Dalsze przetwarzanie danych (postprocessing) realizowano na podstawie uzyskanych w tej aplikacji danych z wykorzystaniem arkusza kalkulacyjnego EXCEL na stanowisku roboczym #3.

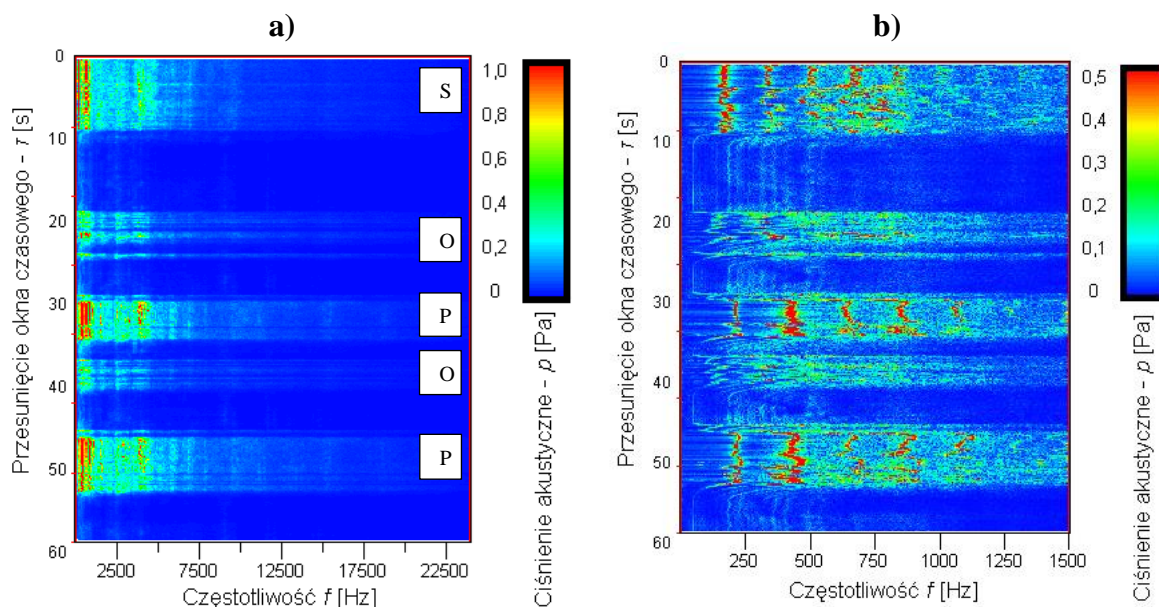
7. Specyfika oddziaływań WA na stanowisku pracy pialrza

W niniejszym rozdziale zamieszczono i opisano wybrane – przykładowe wyniki parametryzacji i analiz sygnałów WA generowanych przez spalinową pilarkę łańcuchową podczas wyrzynki drzew w warunkach leśnych. Zaprezentowano tutaj wyłącznie wyniki badań, które dotyczyły wyrzynki (tj. operacji: ścinki, okrzesywania i przerzynki) dla sosny#1. Zestawienie wyników analiz dla pozostałych drzew zamieszczono w załącznikach do pracy.

7.1. Hałas

Specyfikę oddziaływania hałasu na operatora w ujęciu jakościowym można analizować na podstawie sonogramów. Sonogramy zamieszczone w tym rozdziale oraz załączniku [Z1] uzyskano w wyniku zastosowania krótkoczasowej transformacji Fouriera – STFT, (ang. *Short-Time Fourier Transform*).

Przykładowe sonogramy sygnału ciśnienia akustycznego zarejestrowanego podczas pierwszych 60-ciu sekund początkowej fazy wyrzynki sosny #1 obejmującej: symulację ścinki, dwukrotną przerzynkę oraz dwukrotne okrzesywanie przedstawiono na rysunku 7.1.



Rysunek 7.1 Sonogramy ciśnienia akustycznego na stanowisku pialrza podczas pierwszych 60-ciu sekund procesu wyrzynki sosny #1; a) pasmo do 24 kHz, b) pasmo do 1,5 kHz

Zestawienie sonogramów hałasu zarejestrowanego podczas wyrzynki wszystkich drzew objętych planem badań zamieszczono w załączniku [Z1].

Sonogram zamieszczony na rysunku 7.1.a obejmuje pasmo do 24 kHz. Zakres częstotliwościowy sonogramu przedstawionego na rysunku 7.1.b ograniczono do 1,5 kHz, tak aby było można dokonać jego porównania ze spektrogramami przyspieszeń drgań wykonanymi w takim samym zakresie częstotliwości.

Na podstawie ww. analiz można stwierdzić, że hałas emitowany przez pilarkę ma charakter niestacjonarny zarówno w ujęciu amplitudowym i częstotliwościowym. Na sonogramach widoczne są kolejne operacje związane z wyrzynką drzewa. Można wyróżnić obszary mapy czasowo-częstotliwościowej (TF) różniące się wyraźnie wartościami ciśnienia akustycznego oraz zakresem częstotliwościowym. Na sonogramach oznaczono obszary związane ze ścinką (S), przerzynką (P) oraz okrzesywaniem (O). Pozostałe niewyróżnione obszary map czasowo-częstotliwościowych związane są z pracą pilarki na biegu jałowym (Tryb Idle – ID).

Analizując postać sonogramu przedstawionego na rysunku 7.1.a można stwierdzić, że obszary mapy czasowo-częstotliwościowej dla procesu ścinki (zakres przesunięć okna czasowego analizy τ pomiędzy 0 a 10 sekundą) i przerzynki (zakres przesunięć okna czasowego analizy τ pomiędzy 28 a 35 oraz 47 i 53 sekundą), związane są z trybem pracy Full Load (FL). Dominujące składowe hałasu w tych obszarach sonogramu zawierają się w paśmie do ok. 10÷12 kHz.

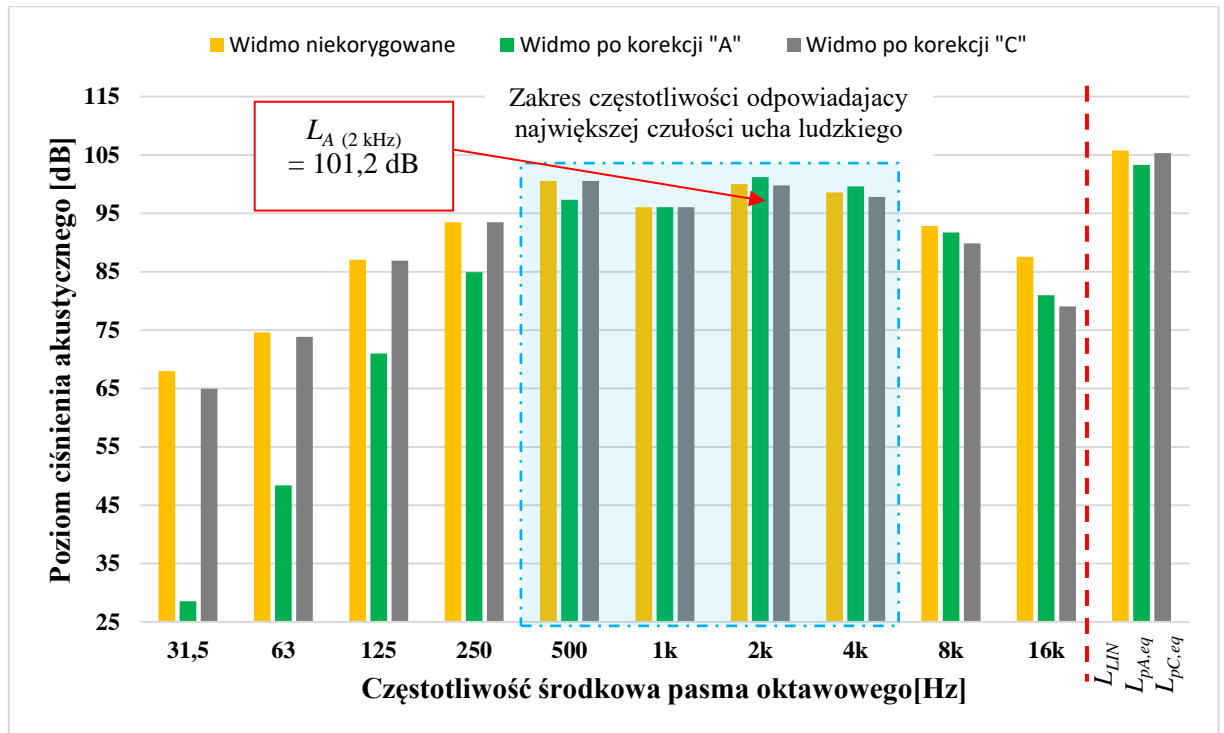
Dla pracy pilarki na biegu jałowym (Idle – ID) dominujące amplitudowo składowe zawierają się w paśmie do ok. 500 Hz, jest to dobrze widoczne na rysunku 7.1.b. Podczas okrzesywania (tryb Racing – RA) dominujące składowe hałasu zawierają się w paśmie do ok. 6 kHz, możliwe jest również oszacowanie liczby okrzesywanych gałęzi.

Na sonogramach hałasu zamieszczonych w załączniku [Z1] można także wskazać na obszary map czasowo-częstotliwościowych związane z innymi operacjami i czynnościami takimi jak:

- ścinka z zastosowaniem klina kierunkowego (K1+K2) oraz cięcia obalającego (SO): rys. Z.1.9. i Z.1.15.,
- ścinkę z wykorzystaniem jednego przecięcia obalającego (SJO): rys. Z.1.18,
- przerzynkę częściową pnia (PC): rys. Z.1.12., Z.1.21.,
- docięcie: (D) rys. Z.1.12., Z.1.21.,
- rozruch urządzenia: (R) rys. Z.1.9., Z.1.15., Z.1.18.

Przykładowe widmo oktawaowe hałasu emitowanego przez pilarkę pokazano na rysunku 7.2. Widmo to obrazuje poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach oktawaowych dla całego procesu wyrzynki sosny#1, czas uśredniania był równy 226,65 sekundy.

Pełne zestawienie widm oktawaowych hałasu związanych z wyrzynką pozostałych drzew zamieszczono w załączniku [Z2].



Rysunek 7.2 Widmo oktawaowe hałasu emitowanego przez pilarkę podczas całego procesu wyrzynki sosny #1 (czas uśredniania $T_e = 226$ s)

Na rysunku 7.2 oprócz widma oktawaowego naniesiono wartości nieskorygowanego poziomu dźwięku L_{Lin} oraz równoważny poziom dźwięku A – L_{A,eq,T_e} oraz C – L_{C,eq,T_e} (czas ekspozycji T_e jest równy czasowi uśredniania widma oktawaowego).

Wartości poziomów ciśnienia akustycznego w pasmach oktawaowych zamieszczono również w tabeli 7.1.

Na podstawie porównania widm oktawaowych hałasu emitowanego przez pilarkę podczas wyrzynki wszystkich drzew objętych planem badań, można stwierdzić, że mają one podobny charakter. Dominujące poziomy ciśnienia akustycznego odnotowano w pasmach oktawaowych o częstotliwościach środkowych od 500 Hz do 4 kHz. Ponadto pokrywają się one z zakresem częstotliwościowym największej czułości ludzkiego ucha. Zatem hałas emitowany przez pilarki będzie szczególnie uciążliwy.

Tabela 7.1 Wartości poziomów ciśnienia akustycznego w pasmach oktaowych podczas procesu wyrzynki sosny #1 (czas uśredniania $T_e = 226$ s)

Wartości poziomów ciśnienia akustycznego w pasmach oktaowych podczas procesu wyrzynki sosny #1 (czas uśredniania $T_e = 226$ s)										
Częstotliwość środkowa pasma oktaowego [Hz]	31,5	63	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k	16 k
Nieskorygowany poziom ciśnienia akustycznego [dB]	68,0	74,6	87,1	93,5	100,5	96,0	100,0	98,6	92,8	87,6
Poziom ciśnienia akustycznego z uwzględnieniem poprawek korekcyjnych dla charakterystyki A [dB]	28,5	48,4	70,9	84,9	97,3	96,0	101,2	99,6	91,7	80,9
Poziom ciśnienia akustycznego z uwzględnieniem poprawek korekcyjnych dla charakterystyki C [dB]	64,9	73,8	86,9	93,5	100,5	96,0	99,8	97,8	89,8	79,0

Po uwzględnieniu w widmie współczynników korekcyjnych dla charakterystyki A można zidentyfikować pasmo oktaowe, o częstotliwości środkowej 2 kHz, w którym poziom ciśnienia akustycznego po korekcji ma największą wartość 101,2 dB.

Oprócz sonogramów i widm oktaowych hałasu dokonano podstawowej parametryzacji hałasu emitowanego przez pilarkę polegającej na wyznaczeniu miar takich jak:

- równoważny poziom dźwięku skorygowany charakterystyką A – $L_{A,eq}$,
- równoważny poziom dźwięku skorygowany charakterystyką C – $L_{C,eq}$,
- równoważny liniowy poziom dźwięku – L_{Lin} ,
- szczytowy nieskorygowany poziom dźwięku C – L_{Cpeak} ,
- szczytowy liniowy poziomu dźwięku – $L_{Lin peak}$,
- maksymalny poziomy dźwięku A – $L_{A max}$,

Czas związany z wyrzynką poszczególnych drzew nieco się różnił. Z tego powodu przy wyznaczaniu wartości ww. miar hałasu dla każdego z przypadków przyjmowano czas parametryzacji (uśredniania) zgodny z czasem wyrzynki danego drzewa. Zestawienie ww. miar hałasu dla procesu wyrzynki sosny#1 zawarto w tabeli 7.2.

Tabela 7.2 Przykładowe wartości miar hałasu emitowanego przez pilarkę podczas wyrzynki sosny#1

Miara – parametr akustyczny	$L_{A,eq}$	$L_{C,eq}$	$L_{Lin,eq}$	$L_{C peak}$	$L_{Lin peak}$	$L_{A max}$
Wartość [dB]	103,1	104,1	104,5	125,4	126,8	114,0

Na podstawie przykładowych wyników uzyskanych podczas wyrzynki sosny#1 można stwierdzić, że:

- poziomy dźwięku wyznaczone z charakterystyką A i C oraz liniowy poziom dźwięku mają zbliżone wartości – ok. 103÷104 dB,
- szczytowy poziom dźwięku C – $L_{C\ peak}$ wynosi 125,4 dB – i nie przekracza wartości NDN tego parametru równej 135 dB,
- maksymalny poziom dźwięku A – $L_{A\ max}$ jest równy 114,0 dB i jest nieznacznie niższy niż określona przepisami wartość dopuszczalna (NDN) tego parametru wynosząca 115 dB.

Zestawienie wyników podstawowej parametryzacji hałasu zarejestrowanego podczas wyrzynki pozostałych drzew zamieszczono w dalszej części pracy w rozdziale 8. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów hałasu dla wszystkich drzew można stwierdzić, że podczas ich wyrzynki:

- szczytowy poziom dźwięku C – $L_{C\ peak}$ nie przekraczał wartości 125÷127 dB, poziomy te są o ok. 10 dB mniejsze od wartości dopuszczalnej NDN wynoszącej 135 dB,
- odnotowano maksymalne poziomy dźwięku A – $L_{A\ max}$ rzędu 112÷115 dB, osiągają one zatem wartość równą poziomowi dopuszczalnemu NDN (115 dB). Wynika stąd konieczność monitorowania tego parametru oraz umieszczania zmierzonych wartości w bazie danych,
- równoważny poziom dźwięku A – $L_{A,eq,Te}$ osiągał wartości 103÷108 dB (zależnie od ścinanego drzewa). Konieczne jest (a wręcz obowiązkowe) stosowanie indywidualnych ochronników słuchu. Przy tak wysokich poziomach dźwięku, w przypadku niestosowania ochronników słuchu dopuszczalny czas pracy pilarką w trakcie 8-mio godzinnej zmiany byłby rzędu kilku minut. W praktyce oznaczałoby to, że możliwa jest wyrzynka 1–2 drzew w trakcie 8-mio godzinnego dnia pracy.

Niestacjonarny charakter oddziaływań pilarki można dobrze zilustrować na podstawie śledzenia chwilowych zmian poziomu ciśnienia akustycznego. Przykładowe zmiany chwilowych wartości poziomu ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką A – L_{pA1} (chwilowy poziom dźwięku A), oraz chwilowych wartości ciśnienia akustycznego

skorygowanego charakterystyką $C - L_{pC1}$ (chwilowy poziom dźwięku C), dla pierwszych 60-ciu sekund sygnału zarejestrowanego podczas wyrzynki sosny #1 obejmującego operacje: ścinki, okrzesywania i przerzynki przedstawiono na rysunku 7.3. Na rysunku dodatkowo naniesiono:

- wartość progu działania – poziom ekspozycji na hałas $L_{EX,8h}$, którego wartość wynosi 80 dB,
- wartość dopuszczalną NDN ekspozycji na hałas – $L_{EX,8h dop.}$ wynoszącą 85 dB,
- wartość dopuszczalną (NDN) maksymalnego poziomu ciśnienia akustycznego – $L_{A max}$ wynoszącą 115 dB.

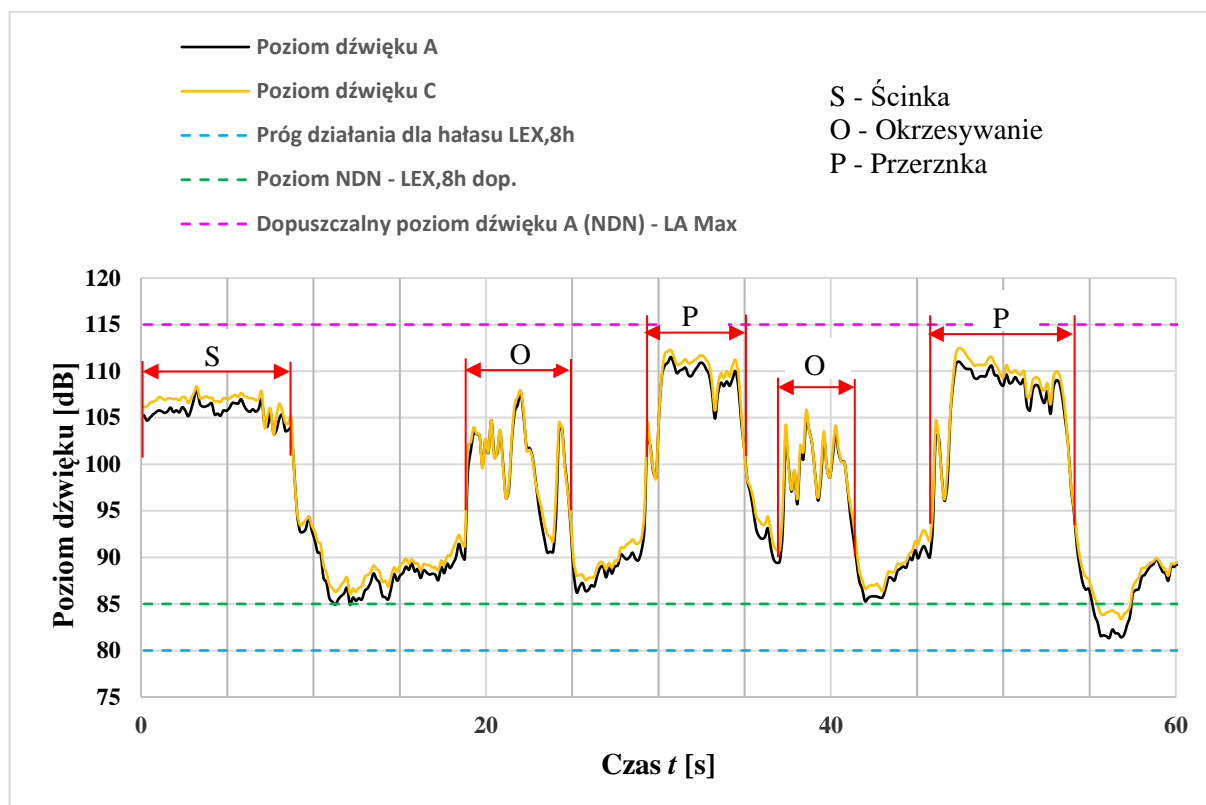
Pełne zestawienie chwilowych zmian dźwięku A i C związanych z wyrzynką wszystkich drzew zamieszczono w załączniku [Z3]. Na charakterystykach zamieszczonych w załączniku pokazano cały proces wyrzynki oraz podobnie jak na rysunku 7.3 pierwszy 60-cio sekundowy fragment (w powiększeniu).

Jak wynika z przykładu pokazanego na rysunku 7.3 charakter zmian chwilowych wartości poziomu dźwięku A oraz C jest prawie identyczny, a wartości różnią się nieznacznie. Poziom dźwięku A przekracza wartość progu działania (80 dB), a także przez większość czasu (za wyjątkiem od ok. 55 do 57 sekundy) wartość dopuszczalną określoną dla narażenia trwającego 8 godzin (85 dB).

Czas rejestracji sygnału jest równy czasowi wyrzynki dla sosny #1 i wynosił 226 sekund z czego jedynie przez ok. 8,3 % chwilowy poziom dźwięku A emitowany przez pilarkę był niższy od 85 dB, natomiast zawsze był wyższy od wartości progu działania (80 dB). Hałas emitowany przez pilarkę zalicza się zatem do grupy hałasów o wysokich poziomach natężenia, do pomiarów których dedykowana jest charakterystyka korekcyjna C. W związku z tym postanowiono prezentować dane związane z hałasem mierzone zarówno z charakterystyką A, i uwzględnieniem korekcji C.

Na rysunku 7.3 można wyróżnić naprzemiennie występujące fragmenty przebiegu o niskich i wysokich poziomach dźwięku. Są one związane z realizacją poszczególnych operacji pozyskania surowca drzewnego. W sposób bezpośredni można je powiązać z poszczególnymi stanami obciążenia jednostki napędowej pilarki. Wysokie poziomy ciśnienia akustycznego – powyżej 95 dB związane są z pracą na pełnych obrotach bez obciążenia

– tryb Racing (RA) lub pracą pod pełnym obciążeniem – tryb Full Load (FL), natomiast niskie poziomy – poniżej 90 dB świadczą o pracy urządzenia na obrotach jałowych – tryb Idle (ID).



Rysunek 7.3 Chwilowe wartości poziomu dźwięku A i C dla pierwszych 60-ciu sekund pracy podczas wyrzynki sosny #1

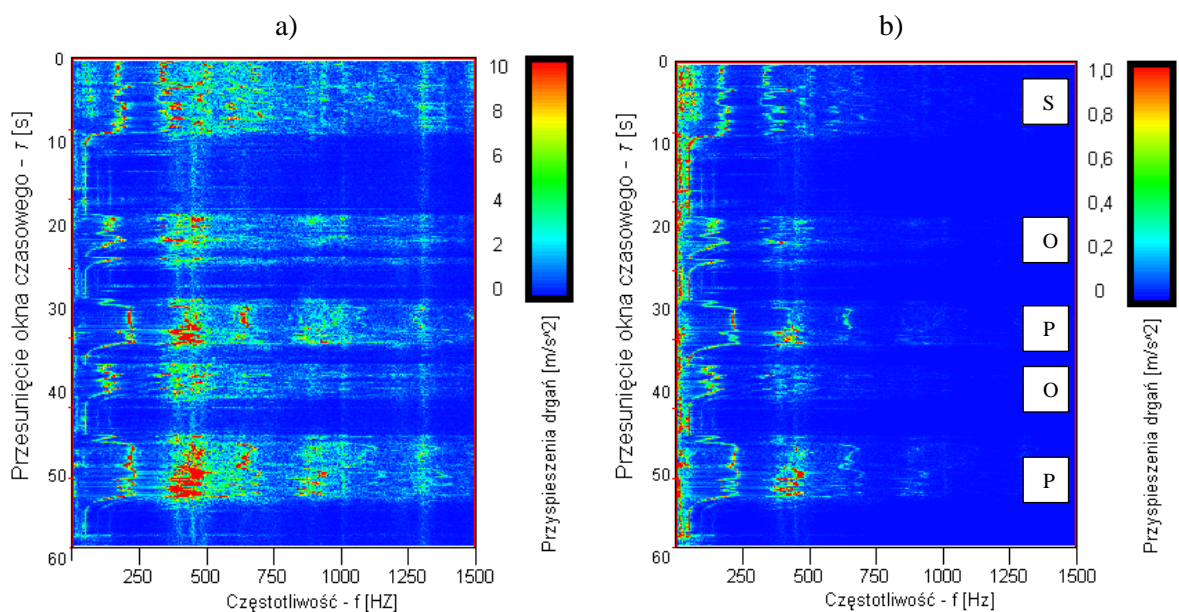
Precyzyjna identyfikacja stanów obciążenia pilarki nie jest jednak możliwa na podstawie śledzenia wyłącznie zmian chwilowych wartości dźwięku A. Identyfikacja ta będzie możliwa, gdy oprócz sygnału zmian wartości L_{pA} posłużymy się dodatkowo analizą poklatkową materiału audio-wideo, opcjonalnie śledzeniem zmian poziomu ciśnienia akustycznego w wybranych pasmach oktawowych lub najlepiej sygnałem tachometrycznym rejestrowanym bezpośrednio na jednostce napędowej pilarki.

7.2. Drgania

Specyfikę oddziaływań drgań w ujęciu czasowo-częstotliwościowym (podobnie jak hałasu) można zobrazować na mapach czasowo-częstotliwościowych – spektrogramach. Przykładowy spektrogram przyspieszeń drgań uchwytu przedniego pilarki pokazano na rysunku 7.4. Ilustruje on proces wyrzynki sosny#1 (pierwsze 60 sekund). Spektrogram na

rysunku 7.4.a wykonano dla niekorygowanych przyspieszeń drgań w pasmie do 1,5 kHz. Natomiast spektrogram na rysunku 7.4.b został wykonany na podstawie przyspieszeń drgań skorygowanych charakterystyką W_h (dedykowaną do pomiarów drgań miejscowych oddziałujących na operatora przez kończyny górne). Uwzględnienie tej charakterystyki umożliwia uwydatnienie pasm częstotliwości, w których składowe przyspieszeń drgań mają największy wpływ na operatora pilarki.

Ze spektrogramu pokazanego na rysunku 7.4 wynika, że przyspieszenia drgań na uchwycie przednim pilarki (patrz rys. 6.4) osiągają najwyższe wartości w zakresie częstotliwości od ok. 300 Hz do ok. 750 Hz. Jest to pasmo częstotliwości związane ze zjawiskiem skrawania materiału. W tym paśmie częstotliwości zawiera się również druga nadharmoniczna składowej obrotowej wału pilarki. Natomiast w paśmie do 250 Hz dominująca amplitudowo jest składowa obrotowa (jej zakres zmienności to 45–225 Hz). W paśmie powyżej 750 Hz nakładają się wyższe nadharmoniczne składowej obrotowej i zjawiska związane głównie ze skrawaniem i tarciami.



Rysunek 7.4 Spektrogramy przyspieszeń drgań przedniego uchwytu pilarki (lewa ręka) w kierunku x dla pierwszych 60-ciu sekund procesu wyrzynki sosny#1; a) spektrogram przyspieszeń bez korekcji częstotliwościowej, b) spektrogram sygnału skorygowanego filtrem W_h

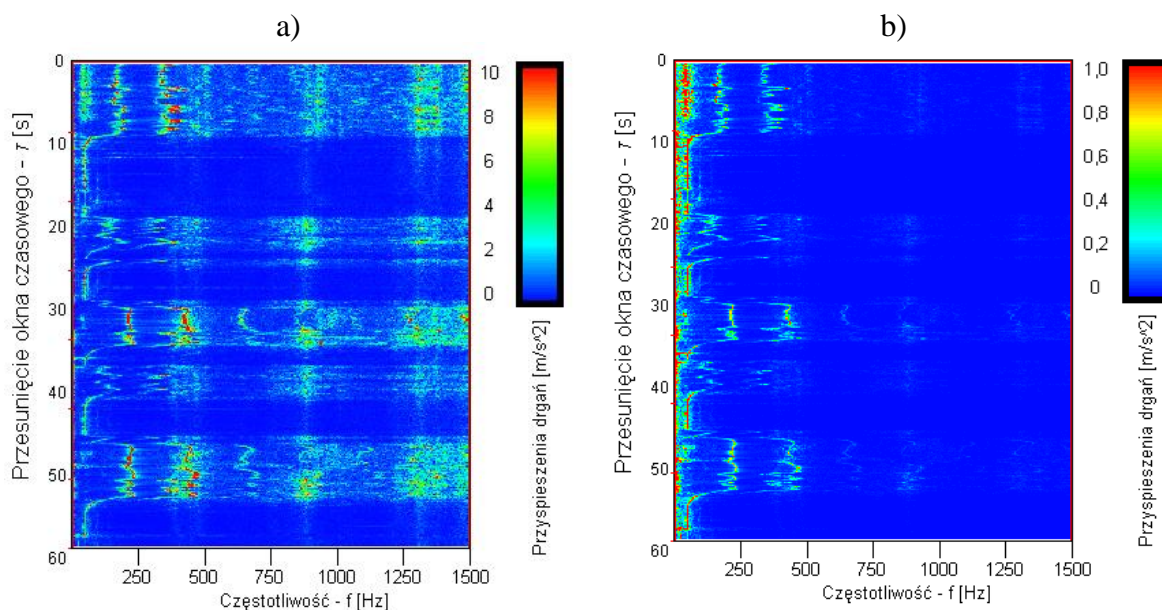
Zastosowanie filtracji W_h – patrz rysunek 7.4.b skutkuje uwydatnieniem zjawisk drganiowych w paśmie do 250 Hz i redukcją wartości przyspieszeń drgań dla wyższych częstotliwości (widocznych na spektrogramie 7.4.a). W zakresie powyżej 250 Hz można

dostrzec jedynie wysokoenergetyczne zjawiska związane z drugą składową obrotową i skrawaniem obrabianego materiału.

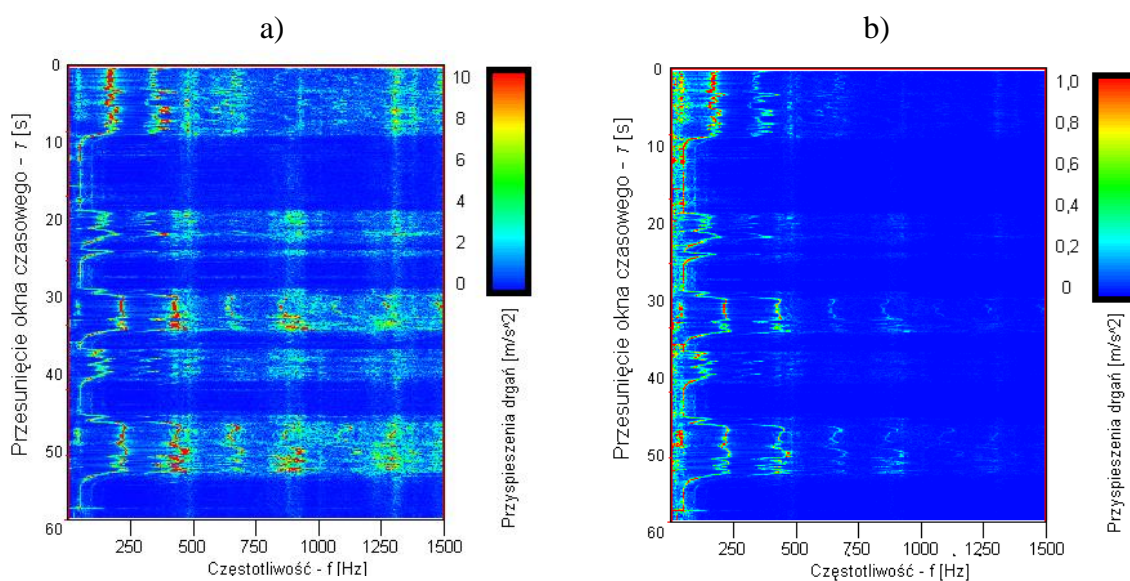
Spektrogramy przyspieszeń drgań nieskorygowanych i skorygowanych filtrem W_h uchwytu przedniego pilarki dla kierunków y i z zaprezentowano na rysunkach 7.5 i 7.6.

Spektrogramy przyspieszeń drgań zarejestrowanych w kierunku y i z wykazują takie same cechy jak spektrogram dla kierunku x. Na rysunkach 7.5 i 7.6 wyraźnie widoczna jest składowa obrotowa – w paśmie do 250 Hz i jej nadharmoniczna – w paśmie 350–500 Hz. Filtracja sygnału z użyciem charakterystyki W_h redukuje wartości składowych związanych ze zjawiskami wysokoczęstotliwościowymi i uwydatnia składową obrotową wału pilarki. Należy tu dodać, że śledzenie zmian częstotliwości składowej obrotowej można potencjalnie wykorzystać do identyfikacji stanów pracy pilarki [139].

Spektrogramy dla wszystkich wykonanych rejestracji przyspieszeń drgań związanych z wyrzynką drzew objętych planem badań zamieszono w załączniku [Z1].



Rysunek 7.5 Spektrogramy przyspieszeń drgań przedniego uchwytu pilarki (lewa ręka) w kierunku y dla pierwszych 60-ciu sekund procesu wyrzynki sosny#1; a) spektrogram przyspieszeń bez korekcji częstotliwościowej, b) spektrogram sygnału skorygowanego filtrem W_h



Rysunek 7.6 Spektrogramy przyspieszeń drgań przedniego uchwyty pilarki (lewa ręka) w kierunku z dla pierwszych 60-ciu sekund procesu wyrzynki sosny#1; a) spektrogram przyspieszeń bez korekcji częstotliwościowej, b) spektrogram sygnału skorygowanego filtrem W_h

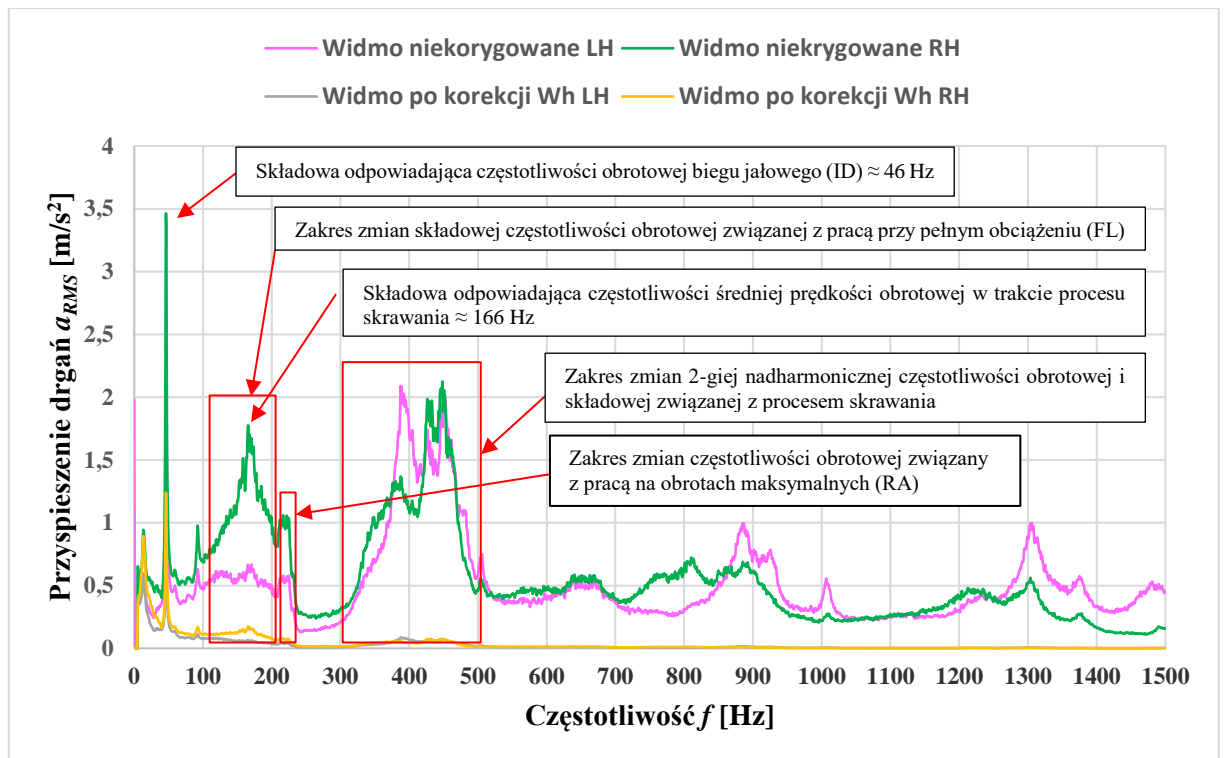
Przykładowe, wysokorozdzielcze widmo przyspieszeń drgań uchwytów pilarki (LH i RH) uśrednione dla całego procesu wyrzynki sosny#1 pokazano na rysunku 7.7. Porównano widma (sumy wektorowej z kierunków x , y , z) niekorygowanych częstotliwościowo i skorygowanych charakterystyką W_h . Pasma częstotliwości ograniczono do 1,5 kHz.

W załączniku [Z4] zamieszczono komplet wysokorozdzielczych widm przyspieszeń drgań (w podobnej formie jak na rysunku 7.7) dla wszystkich pozostałych procesów wyrzynki drzew objętych planem badań.

Z przedstawionego na rysunku 7.7 widma wynika, że częstotliwość dominującej składowej przyspieszeń drgań w zakresie do 250 Hz wynosi ok. 46 Hz. Wartości tej składowej bez korekcji wynoszą $3,46 \text{ m/s}^2$ dla uchwytu tylnego (LH) oraz $2,22 \text{ m/s}^2$ dla uchwytu przedniego (LH). Częstotliwość ta związana jest z obrotami pilarki podczas pracy na biegu jałowym (2800 obr./min) [116].

Istotna pod względem wartości jest składowa o częstotliwości ok. 166 Hz. Odpowiada ona średniej prędkości obrotowej silnika pilarki podczas cięcia (ok. 10 000 obr./min). Widoczna jest ona jedynie w widmie przyspieszeń drgań zarejestrowanych na uchwycie tylnym (RH).

W paśmie poniżej 100 Hz widoczna jest składowa o częstotliwości ok. 93 Hz. Odpowiada ona pracy pilarki z prędkością obrotową wynoszącą ok. 5600 obr./min, poniżej której (ok. 5100 obr./min) następuje wysprężenie i przerwa w działaniu układu przeniesienia napędu.



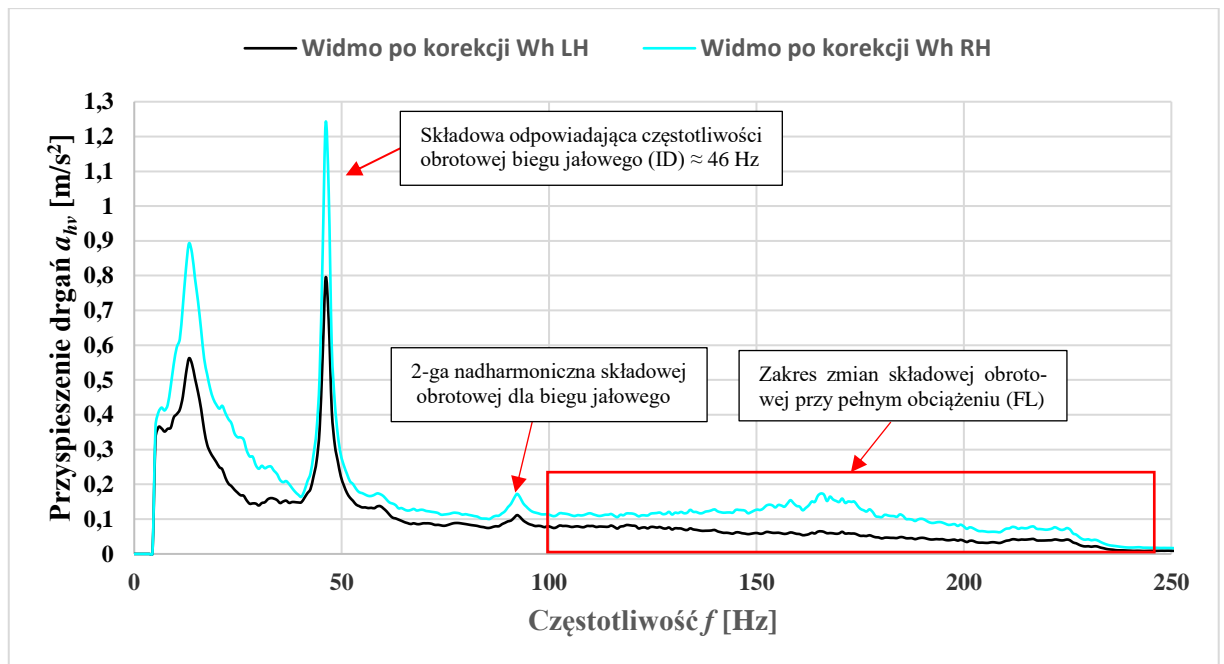
Rysunek 7.7 Porównanie widm przyspieszeń drgań (sumy wektorowej z kierunków x, y, z) zarejestrowanych na przednim (LH) i tylnym (RH) uchwycie pilarki (wyrzynka sosny#1; widmo uśrednione całego procesu, $T_e = 226$ s)

W zakresie niskich częstotliwości można dostrzec składową o częstotliwości ok. 14 Hz. Jest to 3-cia podharmoniczna składowej obrotowej dla biegu jałowego i związana jest najprawdopodobniej z luzami obudowy.

Wysokorozdzielcze uśrednione widmo przyspieszeń drgań po zastosowaniu filtracji W_h przedstawiono na rysunku 7.8. Zakres częstotliwościowy widma ograniczono do 250 Hz (zakres zmian częstotliwości obrotowej silnika pilarki).

Jak przedstawiono na rysunku 7.8 po zastosowaniu filtracji W_h dominująca składowa ma częstotliwość ok. 46 Hz i odpowiada ona częstotliwości obrotowej wału silnika pracującego na obrotach jałowych. Wynika z tego, że głównym źródłem oddziaływań dynamicznych pilarki na operatora jest pracujący na biegu jałowym silnik.

W widmie pokazanym na rysunku 7.8 można zaobserwować istotny wpływ składowej przyspieszeń drgań o częstotliwości ok. 14 Hz. Warto tu zaznaczyć, że dla tej częstotliwości charakterystyka filtra W_h (rys. 2.4) osiąga maksimum. Oznacza to, że drgania o tej częstotliwości są z najwyższą wagą uwzględniane w pomiarach przyspieszeń drgań miejscowych.



Rysunek 7.8 Porównanie widm przyspieszeń drgań (sumy wektorowej z kierunków x , y , z ; (z zastosowaniem filtracji W_h) w paśmie do 250 Hz zarejestrowanych na przednim (LH) i tylnym (RH) uchwycie pilarki dla wyrzynki sosny#1 (widmo uśrednione całego procesu, $T_e = 226$ s)

Na rysunku 7.8 wyraźnie widoczne jest także oddziaływanie o charakterze szerokopasmowym, szczególnie na uchwycie tylnym (RH), w zakresie od ok. 105 do ok. 230 Hz – związane z pracą pilarki w trybie pracy FL (pełne obciążenie) podczas ścinki lub przerzynki drzew.

Powyżej 240 Hz wartości składowych widma przyspieszeń drgań skorygowanego charakterystyką W_h maleją wraz z częstotliwością. Jedynie w paśmie częstotliwości od ok. 300 do ok. 550 Hz widoczne są jeszcze składowe związane z realizacją procesu technologicznego – skrawanie materiału drzewnego. Jest to widoczne na spektrogramach wykonanych z korekcją W_h (np. rysunek 7.4.b)

W uzupełnieniu, w tabeli 7.3 zamieszczono częstotliwości charakterystyczne poszczególnych elementów składowych układu napędowego pilarki. Umożliwiają one m.in. zidentyfikować przyczyny i źródła drgań w pilarce łańcuchowej.

Tabela 7.3 Częstotliwości charakterystyczne elementów składowych układu napędowego pilarki
– opracowanie na podstawie [111]

	Lp.	Charakterystyczne prędkości obrotowe związane z pracą pilarka spalinową i związane z nimi tryby obciążenia jednostki napędowej			
		Obroty Jałowe - ID	Obroty reakcji sprzęgła - UD	Proces technologiczny - FL	Prędkość maksymalna - RA
Średnia wartość prędkości obrotowej dla zjawiska/procesu [RPM]		2800	5100	10 000	13 500
Rodzaj uszkodzenia		Częstotliwość [Hz]			
Niewyrównoważenie wirnika	1	46,7	85	166,7	225
Luz obudowy łożyska	2	23,3/15,6	42,5/28,3	83,3/55,6	112,5/75
Wygięcie wału, błędy pasowania	3	46,7/93,3/140	85/170/255	166,7/333,3/500	225/450/675
Częstotliwość skrawania	4	-	-	480	-
Częstotliwość osiadania łańcucha na kole napędowym/wieloboku	5	-	595	1166,7	1575

Na podstawie zarejestrowanych na uchwytach pilarki, podczas wyrzynki sosny#1, przyspieszeń drgań wyznaczono wartości następujących miar:

- sumy wektorowej wartości skutecznych skorygowanych charakterystyką W_h przyspieszeń drgań dla czasu T_e (czas wyrzynki sosny#1) – $a_{hv,Te}$, oraz maksymalne wartości chwilowe – a_{1hvmax} ,
- oszacowanie (w przypadku wyrzynki wyłącznie sosny#1) ekspozycji na drgania odniesionej do 8-mio godzinnego dnia pracy – $A(8)$.

Uśrednione wyniki dla wyrzynki sosny#1 przedstawiono w tabeli 7.4. Wartości ww. miar dla pozostałych drzew objętych planem badań zamieszczono w rozdziale 8 (tabela 8.3).

Tabela 7.4 Wybrane miary sygnału przyspieszeń drgań zarejestrowanych podczas wyrzynki sosny #1

Miary przyspieszeń drgań zarejestrowanych podczas wyrzynki sosny #1				
Uchwyt urządzenia	Czas uśredniania (ekspozycji) T_e [s]	Suma wektorowa przyspieszeń drgań a_{hv} [m/s ²]		Odniesiona do 8-mio godzinnego dnia pracy ekspozycja na drgania $A(8)$ [m/s ²]
		Wartość uśredniona z czasu T_e $a_{hv,Te}$	Maksymalna chwilowa wartość a_{1hvmax}	
Przedni – lewa ręka (LH)	226,65	3,56	13,6	3,56
Tylny – prawa ręka (RH)		4,99	19,3	4,99

Na podstawie danych zawartych w tabeli 7.4 można stwierdzić, że suma wektorowa wartości skutecznych ważonych częstotliwościowo charakterystyką W_h przyspieszeń drgań odniesiona do czasu pomiaru $T_e = a_{hv,Te}$ krótszego od 30 minut, związanego z wyrzynką

pojedynczego drzewa – sosny#1, nie przekracza wartości NDN dla narażenia krótkotrwałego – $a_{hv,30min\ dop.}$. Jednocześnie został przekroczony próg działania VAL ($2,5\ m/s^2$). Ponieważ wyższa z wartości $a_{hv,Te}$ przekracza $2,8\ m/s^2$ dopuszczalny czas pracy urządzeniem w takich samych warunkach, jakie miały miejsce w trakcie trwania pomiaru, jest krótszy niż 8 godzin.

Maksymalne chwilowe wartości przyspieszeń drgań – $a_{1\ hv\ max}$ na uchwytach pilarki przekraczają wartość narażenia dla narażenia krótkotrwałego $a_{hv,30min\ dop.}$ i wynoszą odpowiednio $13,6\ m/s^2$ na uchwycie przednim (LH) oraz $19,3\ m/s^2$ na uchwycie tylnym (RH). Łączny czas trwania tych przekroczeń jest niewielki w odniesieniu do czasu trwania pomiaru T_e i wynosi: ok. 1 sekundy dla uchwytu przedniego i ok. 4,6 sekundy dla uchwytu tylnego co stanowi odpowiednio 0,45 % i 2,03 % sumarycznego czasu pracy urządzenia – TDOT⁷.

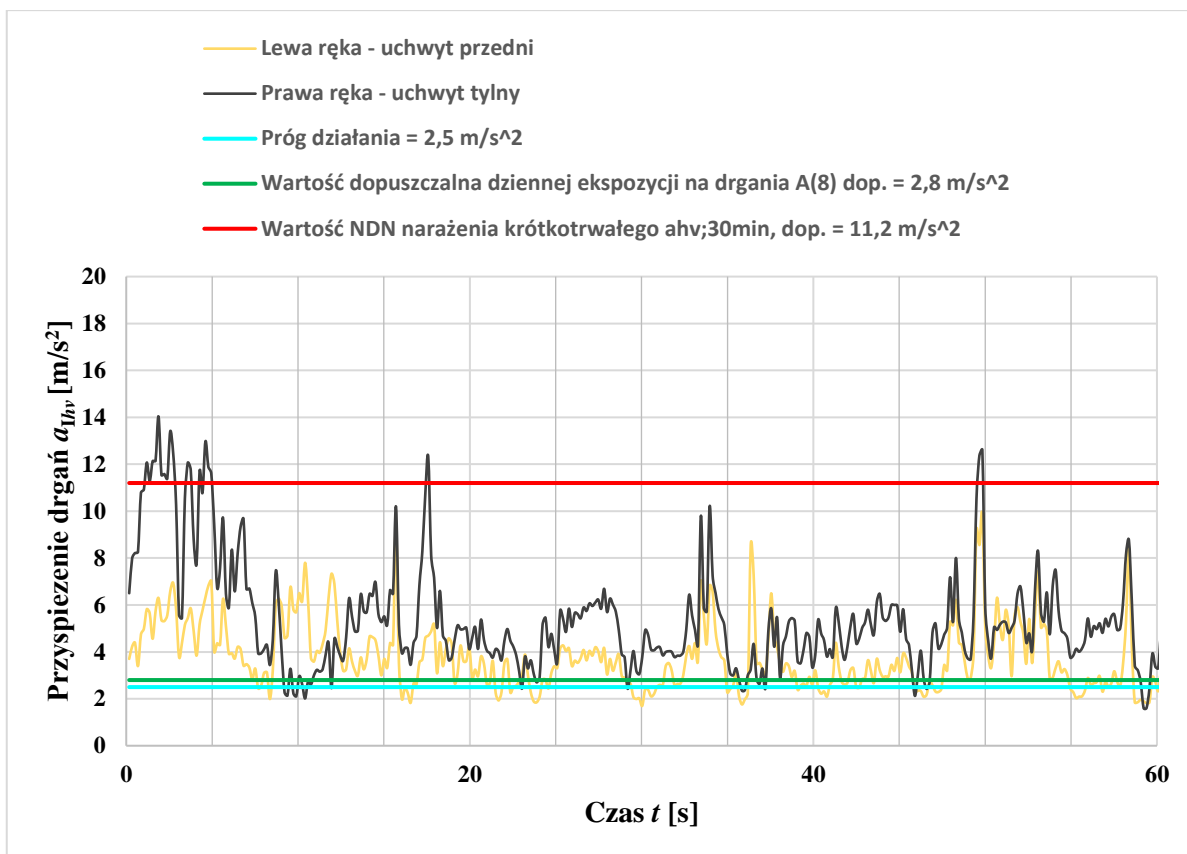
Na podstawie wartości $a_{hv,Te}$ dla bardziej narażonej ręki oszacowano dopuszczalny czas pracy pilarką w trakcie 8-mio godzinowego dnia pracy, który wynosi 150 minut. Mając to na uwadze można określić maksymalną liczbę drzew (o parametrach zbliżonych do sosny#1), którą mógłby ścinać pilarz w trakcie całego dnia pracy. Nie powinna ona przekraczać 40.

Zmiany chwilowych wartości sumy wektorowej dla trzech wzajemnie prostopadłych kierunków, wartości skutecznych przyspieszeń drgań skorygowanych charakterystyką częstotliwościową W_h (ang. *Weighted-Hand*) – $a_{1\ hv}$ zarejestrowanych zarówno na przednim jak i tylnym uchwycie pilarki, dla pierwszych 60-ciu sekund sygnału zarejestrowanego podczas wyrzynki sosny #1, przedstawiono na rysunku 7.9. Na rysunku naniesiono także:

- próg działania dla drgań miejscowych – VAL (ang. *Vibration Action Level*) równy $2,5\ m/s^2$,
- wartość dopuszczalną dziennej ekspozycji na drgania – $A(8)_{dop.}$ równą $2,8\ m/s^2$,
- wartość dopuszczalną przyspieszeń drgań (NDN) dla narażenia krótkotrwałego, trwającego do 30 minut, dla drgań miejscowych – $a_{hv,30min\ dop.}$ wynoszącą $11,2\ m/s^2$.

Wyniki w podobnej formie dla wszystkich objętych planem badań drzew zamieszczono w załączniku [Z3].

⁷ TDOT – całkowity czas pracy urządzeniem (ang. *Total Device Operating Time*)



Rysunek 7.9 Chwilowe wartości skuteczne przyspieszeń drgań – a_{1hv} zarejestrowane na uchwytach pilarki dla pierwszych 60-ciu sekund pracy podczas wyrzynki sosny #1

Z rysunku 7.9 wynika, że chwilowe wartości przyspieszeń drgań a_{1hv} , przez większość czasu przekraczają wartość progu działania ($2,5 \text{ m/s}^2$). Oprócz tego, wyraźnie widoczne są chwilowe przekroczenia wartości dopuszczalnej związanej z narażeniem krótkotrwałym – $a_{hv,30min \text{ dop}}$ (do 30 minut) wynoszącej $11,2 \text{ m/s}^2$.

Dla całego procesu wyrzynki sosny#1 na uchwycie przednim (lewa ręka) przekroczenia wartości progu działania (VAL) wynosiły 85,2% TDOT, a czas przekroczeń wartości $A(8)_{dop}$ wyniósł 73,0 % TDOT. Dla uchwytu tylnego (prawa dłoń) wartości te wynosiły odpowiednio 95,2% TDOT dla przekroczeń wartości VAL oraz 92,8 % TDOT dla przekroczeń wartości $A(8)_{dop}$.

Jedynie przez niespełna 11,1% całkowitego rozważanego czasu trwania pomiaru równego 226,65 sekundy (sumaryczny czas pracy urządzenia: TDOT) wartości przyspieszeń drgań a_{1hv} na uchwycie przednim (LH) były wyższe niż dla uchwytu tylnego (RH).

Maksymalna chwilowa wartość przyspieszeń drgań zmierzona na uchwycie przednim (LH) wynosiła $13,6 \text{ m/s}^2$ (dla całego rozważanego czasu trwania pomiaru równego 226,65

sekundy), natomiast dla uchwytu tylnego (RH) wartość ta była równa 19,3 m/s². Łączny czas w jakim występowało przekroczenie wartości dopuszczalnej NDN przyspieszeń drgań dla narażenia krótkotrwałego (11,2 m/s²) był równy 1,02 sekundy dla uchwytu przedniego (podtrzymującego) – lewa dłoń, oraz 4,61 sekundy dla uchwytu tylnego (sterującego) – prawa dłoń.

Przez analogię do wartości kryterialnych dla hałasu np. $L_{C\ peak}$, w przypadku drgań brak jest w literaturze wzmianek o chwilowej granicznej wartości przyspieszeń drgań jaka nie może/nie powinna zostać nigdy przekroczona. Teoretycznie, przekroczenie wartości granicznej prowadziłoby do nagłego (a czasem także trwałego) fizycznego uszkodzenia dłoni operatora, i odpowiadałoby efektom działania impulsu drganiowego spowodowanego wybuchem ładunku pirotechnicznego trzymanego w dłoni.

8. Metodyka tworzenia baz danych STVD i STND

8.1. Identyfikacja trybów pracy pilarki i operacji realizowanych na stanowisku pilarz-drwal

Zagadnienie identyfikacji poszczególnych stanów obciążenia jednostki napędowej pilarki spalinowej z wykorzystaniem krótkoczasowej analizy i parametryzacji sygnałów WA zostało poruszone w pracy [139]. Autorzy wykazali, że identyfikacja stanów obciążenia pilarki jest możliwa w oparciu o śledzenie zmian chwilowych wartości poziomów ciśnienia akustycznego w pasmach oktawowych o częstotliwościach środkowych 125 i 250 Hz. Pasma to obejmuje zakres zmian częstotliwości obrotowej wału silnika pilarki.

Identyfikacja trybów pracy pilarki łańcuchowej o napędzie spalinowym, możliwa jest również na podstawie śledzenia zmian prędkości obrotowej kosza bębna sprzęgłowego pilarki (na podstawie sygnału tachometrycznego) [140]. Sygnał tachometryczny nie jest wrażliwy na zakłócenia, a skorelowanie go z synchroniczną rejestracją obrazu wideo daje niemal 100% trafność identyfikacji trybu pracy pilarki i operacji jakie wykonuje pilarz. Zamontowanie czujnika tachometrycznego do pilarki wymaga jednak ingerencji w konstrukcję urządzenia. Do tej pory takie rozwiązanie było stosowane jedynie w badaniach laboratoryjnych z wykorzystaniem odpowiednio przystosowanej do badań pilarki.

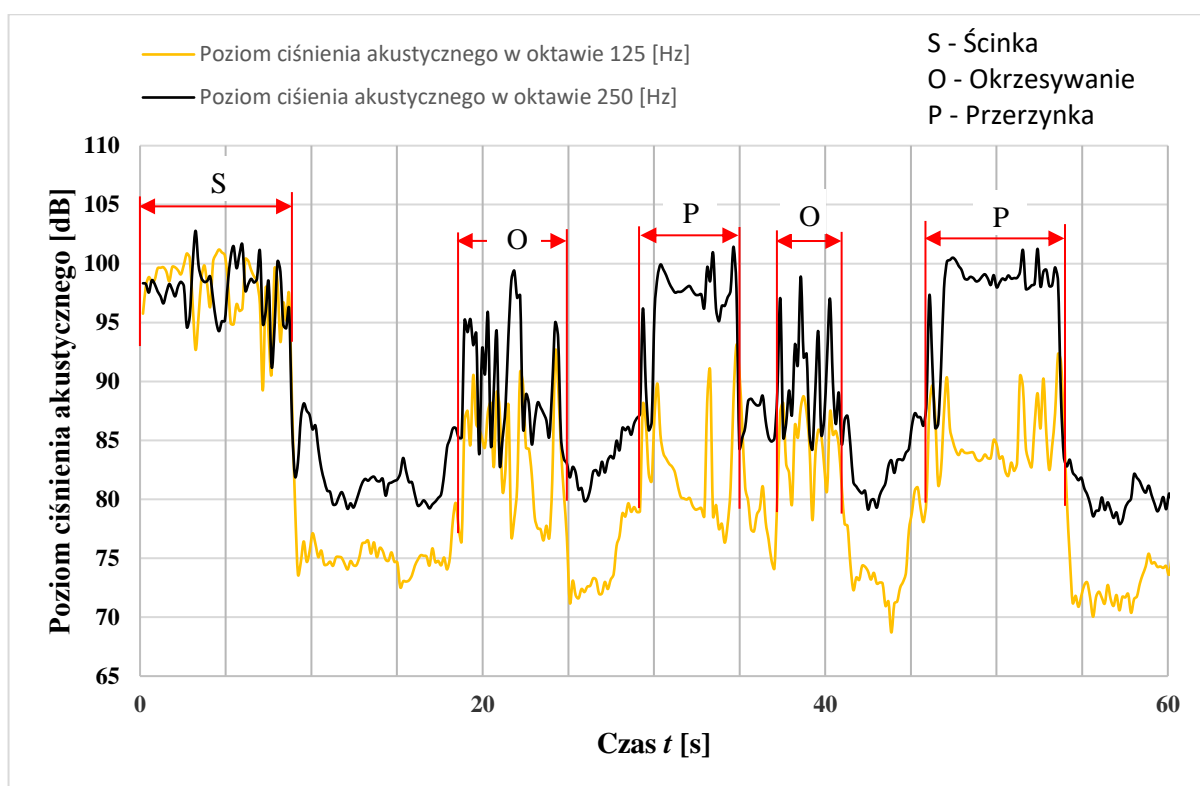
W badaniach terenowych prowadzonych w ramach niniejszej pracy stosowano profesjonalną pilarkę (bez układu tachometrycznego) której dysponentem był ZUL⁸. W związku z powyższym identyfikację stanów pracy pilarki, podobnie jak w [139] prowadzono śledząc chwilowe wartości poziomu ciśnienia akustycznego w oktawie 125 i 250 Hz.

Przykładowe zmiany chwilowych wartości poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach oktawowych 125 i 250 Hz dla pierwszych 60-ciu sekund zarejestrowanego podczas wyrzynki sosny #1 przedstawiono na rysunku 8.1. Na rysunku wyróżniono także fragmenty sygnału związane z określonymi operacjami: ścinki, okrzesywania i przerzynki. Fragmenty te wyróżniono na podstawie analizy poklatkowej materiału audio-wideo.

⁸ ZUL – Zakład Usług Leśnych

Identyfikację trybów pracy pilarki oparto na warunkach logicznych:

- tryb pracy na biegu jałowym – Idle (ID), gdy: $L_p(125\text{Hz}) < L_p(250\text{Hz}) \wedge L_p(125\text{Hz}) < 80 \text{ dB} \wedge L_p(250\text{Hz}) < 85 \text{ dB}$,
- tryb pracy na pełnych obrotach bez obciążenia – Racing (RA), gdy: $L_p(250\text{Hz}) > L_p(125\text{Hz}) \wedge L_p(250\text{Hz}) > 90 \text{ dB}$,
- tryb pracy z pełnym obciążeniem – Full Load (FL), gdy: $L_p(125\text{Hz}) > L_p(250\text{Hz}) \wedge L_p(125\text{Hz}) > 80 \text{ dB} \wedge L_p(250\text{Hz}) > 85 \text{ dB}$,
- w pozostałych przypadkach, gdy żaden z powyższych warunków nie jest spełniony stan obciążenia określono jako niezdefiniowany – Undefined (UD).



Rysunek 8.1 Chwilowe wartości poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach oktawowych 125 i 250 Hz dla pierwszych 60-ciu sekund pracy podczas wyrzynki sosny #1

Należy mieć jednak na uwadze, że sygnał akustyczny jest podatny na zakłócenia, w związku z czym identyfikacja stanów pracy pilarki może być obciążona błędami. Z uwagi na ograniczoną wiarygodność identyfikacji trybów pracy pilarki opartej wyłącznie na śledzeniu zmian poziomów ciśnienia akustycznego podjęto decyzję o przeprowadzeniu weryfikacji w oparciu o poklatkową analizę materiału audio-video i zarejestrowanych synchronicznie komentarzy.

Analiza poklatkowa materiału audio-video pomimo dużej precyzji identyfikacji – rozdzielczość równa 0,04 s (przy częstotliwości rejestracji obrazu wideo 25 klatek/s) ma zasadniczą wadę jaką duża czasochłonność. Ten sposób analizy materiału filmowego o długości kilku minut może trwać nawet kilka godzin.

Przykładowy fragment arkusza stosowanego do identyfikacji stanów pracy pilarki na podstawie analizy poklatkowej zarejestrowanego materiału audio-video podczas wyrzynki sosny#1 został zaprezentowany na rysunku 8.2. Szczegółowe wyniki analizy poklatkowej dla wszystkich zarejestrowanych materiałów audio-video związanych z wyrzynką drzew objętych planem badań zamieszczono w załączniku [Z5].

Czas		Opis zdarzenia/wykonywanej przez pilarza czynności	Stan pracy pilarki	Czas trwania zdarzenia [s]
Początek zdarzenia [m:s]	Koniec zdarzenia [m:s]			
0:00,00	0:8,80	Symulacja ścinki – odcięcie tzw. odziomka; jedno cięcie obalające	FL – Pełne obciążenie	8,80
0:8,80	0:9,60	Wyjście zestawu tnącego z materiału obrabianego, spadek obrotów i zatrzymanie łańcucha	UD – stan niezdefiniowany	0,80
0:9,60	0:18,80	Przejście od korzenia do pnia, pomiar sortymentu	ID – Obroty jałowe	9,20
0:18,80	19,20	Rozpędzenie silnika i wejście zestawu tnącego w materiał obrabiany	UD – stan niezdefiniowany	0,4
0:19,20	0:22,40	Okrzesywanie	RA – obroty maksymalne, niewielkie obciążenie	3,20
0:22,40	0:23,60	Wyjście zestawu tnącego z materiału obrabianego, spadek obrotów i zatrzymanie łańcucha	UD – stan niezdefiniowany	1,20
0:23,60	0:24,00	Rozpędzenie silnika i wejście zestawu tnącego w materiał obrabiany	UD – stan niezdefiniowany	0,40

Rysunek 8.2 Przykład identyfikacji stanów pracy pilarki (ID, FL, RA, UD) na podstawie analizy poklatkowej materiału AV zarejestrowanego podczas wyrzynki sosny#1 oraz komentarzy słownych i przypisanie ich do poszczególnych operacji realizowanych przez pilarza

W tabeli 8.1 zamieszczono porównanie wyników identyfikacji trybów pracy pilarki dwoma metodami, a mianowicie na podstawie:

- poklatkowej analizy materiału audio-video,
- śledzenia zmian poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach oktaowych 125 i 250 Hz.

Skuteczność metody identyfikacji trybów pracy pilarki opartej na śledzeniu zmian poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach oktaowych oceniono na podstawie uzyskanych udziałów czasu pracy pilarki dla trybów: Idle (ID), Full Load (FL), Racing (RA) oraz Undefined (UD) w sumarycznym czasie pracy pilarki (TDOT). Jako wartości referencyjne przyjęto udziały czasu pracy uzyskane na podstawie analizy poklatkowej materiału audio-video.

Tabela 8.1 Porównanie procentowych udziałów czasu trwania poszczególnych trybów pracy pilarki w sumarycznym czasie pracy odniesienia TDOT w zależności od przyjętej metody identyfikacji stanów obciążenia – uzyskane dla wyrzynki sosny #1

Porównanie procentowych udziałów czasu trwania poszczególnych trybów pracy pilarki w sumarycznym czasie pracy odniesienia TDOT w zależności od przyjętej metody identyfikacji stanów obciążenia				
Stan obciążenia jednostki napędowej	Praca na obrotach jałowych Idle (ID)	Praca przy pełnym obciążeniu Full Load (FL)	Praca na obrotach maksymalnych Racing (RA)	Stany niezdefiniowane Undefined (UD)
Analiza poklatkowa materiału audio-video – metoda uprzywilejowana	43,78%	18,34%	19,74%	18,14%
Śledzenie zmian poziomu ciśnienia akustycznego w wybranych pasmach oktaowych	60,16%	10,39%	3,01%	26,44%

Z porównania zamieszczonego w tabeli 8.1 widać spore różnice pomiędzy wartościami procentowych udziałów czasu pracy, określonych na podstawie analizy poklatkowej sygnału audio-video, a tych uzyskanych na podstawie analizy sygnału akustycznego w pasmach oktaowych. Różnice te mogą wynikać z ograniczonej skuteczności detekcji stanów pracy pilarki na podstawie sformułowanych kryteriów identyfikacji dla metody opartej na śledzeniu zmian poziomu ciśnienia akustycznego. Z tego powodu w dalszych badaniach i obliczeniach wykorzystano dane uzyskane na drodze analizy poklatkowej zarejestrowanego materiału audio-video.

8.2. Dawki hałasu dla poszczególnych trybów pracy pilarki

Przykładowe wyniki analizy całego procesu wyrzynki sosny#1 w aspekcie oddziaływań hałasu emitowanego przez pilarkę zamieszczono w tabeli 8.2.

Tabela 8.2 Procentowe udziały sumarycznego czasu trwania poszczególnych stanów obciążenia pilarki w łącznym sumarycznym czasie pracy urządzenia – TDOT

Tryb pracy pilarki	Czas trwania stanu obciążenia [s]	% czasu trwania stanu obciążenia w TDOT	Dawka cząstkowa hałasu wyznaczona z korekcją $A - E_{Ai}$ [$\text{Pa}^2 \cdot \text{s}$]	Procentowy udział dawki cząstkowej hałasu w STND
Obroty jałowe – Idle (ID)	96,73	43,78 %	75,8	4,06 %
Pełne obciążenie – Full Load (FL)	42,23	18,34 %	1251,6	67,06 %
Obroty maksymalne – Racing (RA)	45,13	19,74 %	340,7	18,26 %
Stany niezdefiniowane – Undefined (UD)	41,81	18,14 %	198,1	10,62 %
Łącznie:	226	100 %	1866,2	STND

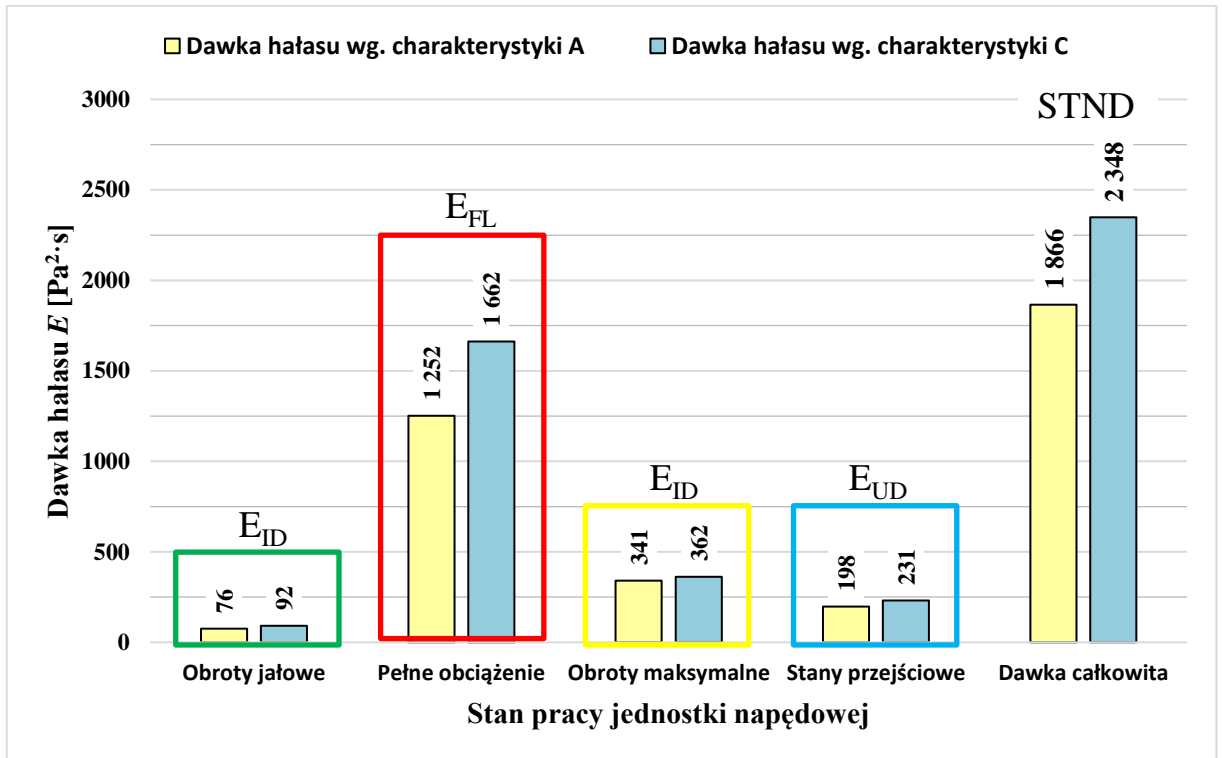
Należy nadmienić, że na potrzeby niniejszej pracy rozważane są nie 3, lecz 4 stany pracy pilarki. W porównaniu do normy PN-EN ISO 22867:2022-05 [57] wprowadzono dodatkowo stan niezdefiniowany (ang. Undefined – UD), który po raz pierwszy został opisany w pracy [139].

Do stanów, które uwzględnia norma tzn.: praca na obrotach jałowych – Idle (ID), praca przy pełnym obciążeniu – Full Load (FL) oraz praca na obrotach maksymalnych bez obciążenia – Racing (RA), w normie przypisano arbitralnie równe udziały czasu trwania – po 1/3 (~33 %) w sumarycznym czasie pracy urządzenia TDOT.

Na podstawie wyników zawartych w tabeli 8.2 rzeczywiste udziały czasów trwania trybów pracy ID, RA oraz FL istotnie różnią się od założeń normowych, które ponadto nie uwzględniają stanu UD związanego np. z rozpędzaniem i swobodnym spadkiem prędkości obrotowej silnika. Uznaje się zatem za uzasadnione odejście od wytycznych zawartych w normie i uwzględnienie w obliczeniach rzeczywistego czasu trwania poszczególnych stanów pracy pilarki.

Dla zarejestrowanego procesu wyrzynki sosny#1 udziały poszczególnych trybów pracy pilarki w TDOT wyniosły: dla ID – 43,78 % TDOT, dla FL – 18,34 % TDOT, dla RA – 19,74 % TDOT. W pozostałym czasie pilarka pracowała w stanach UD.

Wyznaczone (z charakterystyką korekcyjną *A* oraz *C*) cząstkowe dawki hałasu dla poszczególnych stanów pracy pilarki (E_{FL} , E_{ID} , E_{RA} , E_{UD}) oraz dawkę hałasu dla całego procesu wyrzynki sosny #1 (STND) przedstawiono na rysunku numer 8.3.



Rysunek 8.3 Dawki cząstkowe hałasu dla poszczególnych stanów pracy pilarki oraz dawka hałasu STND dla procesu wyrzynki sosny #1

Z rysunku 8.3 wynika, że dawka hałasu związana z pracą pilarki na obrotach jałowych stanowi jedynie 4 % całkowitej dawki hałasu zarówno w przypadku zastosowania korekcji *A* jak i *C*. Przy czym dawka ta rozłożona jest na blisko 44% całkowitego czasu pracy urządzeniem – TDOT (patrz tabela 8.2).

Na pracę pilarką przy pełnym obciążeniu przypada 67 % całkowitej dawki hałasu, w przypadku, gdy stosujemy korekcję *A* i 70 % dawki całkowitej przy zastosowaniu korekcji *C*. Zauważmy, że praca pilarki przy pełnym obciążeniu stanowiła zaledwie 18,34 % całkowitego czasu pracy TDOT.

Na pracę urządzenia z pełną prędkością obrotową bez obciążenia (*RA*) przypada 18 % i 15,5 % całkowitej dawki hałasu (odpowiednio w przypadku zastosowania korekcji *A* i *C*). Czas trwania czynności związanych z trybem *RA* obejmuje ok. 20 % TDOT.

Natomiast 12,4 % dawki całkowitej hałasu – dla korekcji *A* i 9,8 % – dla korekcji *C* przypada na tryb pracy UD. Łączny czas trwania faz niezdefiniowanych wynosi nieco ponad 18 % TDOT.

Z powyższych porównań wynika, że wyznaczając narażenie pracownika na hałas generowany przez pilarkę w oparciu o dawkę hałasu *E* można by rozważyć pominięcie pracy urządzenia na biegu jałowym (ID). Natomiast najistotniejsze jest uwzględnienie pracy przy pełnym obciążeniu (FL).

Zestawienie uśrednionych wartości dawek STND dla gatunków i parametrów drzew objętych planem badań zamieszczono w tabeli 7.8.

8.3. Dawki drgań dla poszczególnych trybów pracy pilarki

Dawki cząstkowe wyznaczono na podstawie zidentyfikowanych operacji i trybów pracy pilarki (analiza materiału audio-video) w poszczególnych trybach (ID, FL, RA oraz UD) i skojarzeniu z wynikami krótkoczasowej parametryzacji sygnału przyspieszeń drgań zarejestrowanych na uchwytach urządzenia, rozważanych dla krótkich interwałów czasowych wynoszących 512/3000 sekundy (ok. 0,17 s).

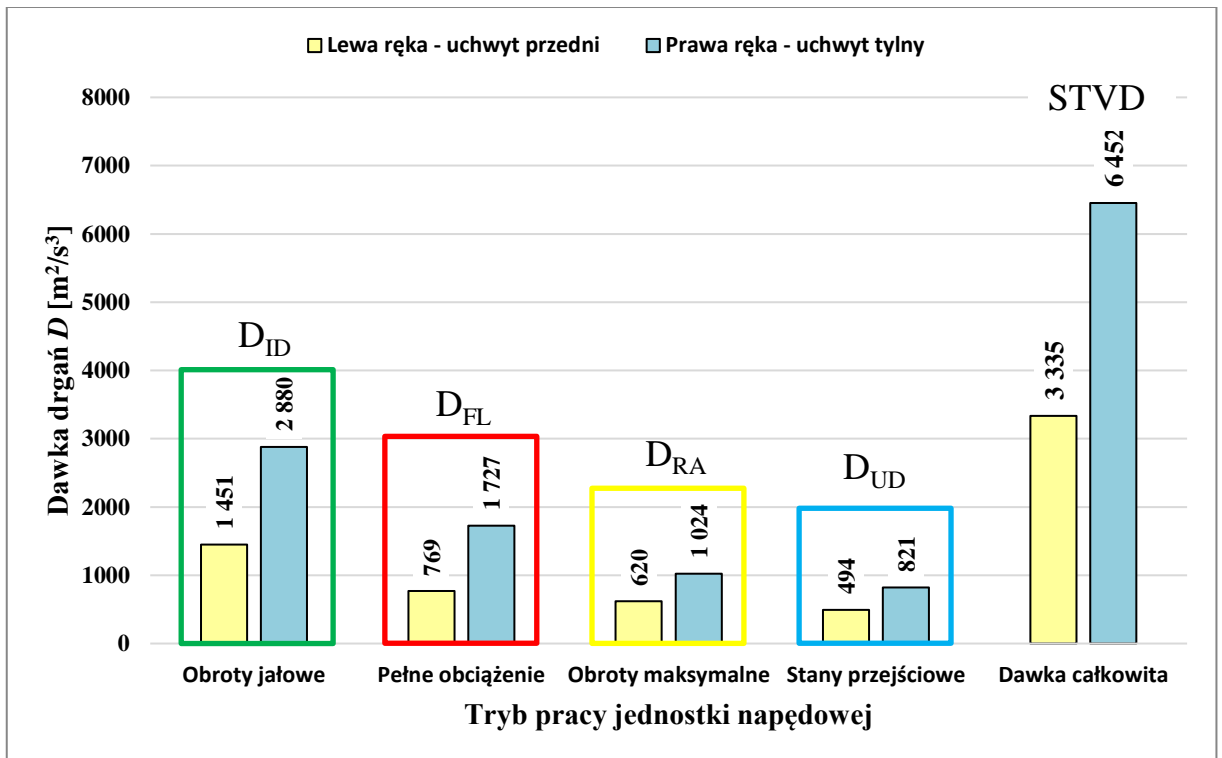
Dla wydzielonych w toku tej analizy fragmentów sygnału drganiowego przypisano odpowiednio określone stany pracy pilarki tzn. obroty jałowe (ID), pełne obciążenie (FL), obroty maksymalne bez obciążenia (RA) oraz stany niezdefiniowane – Undefined (UD).

Cząstkowe dawki drgań dla poszczególnych trybów pracy pilarki oraz dawkę całkowitą drgań dla całego procesu – STVD dla obu uchwytów pilarki, wyznaczone dla wyrzynki sosny #1 przedstawiono na rysunku 8.4.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że sumaryczna dawka drgań dla uchwytu tylnego jest niemal dwukrotnie większa niż dla uchwytu przedniego. W przypadku drgań, dawki cząstkowe związane z wszystkimi czterema stanami pracy pilarki mają istotny udział w dawce całkowitej STVD i żadna z nich nie może być pominięta.

Dawka drgań związana z pracą pilarki na obrotach jałowych (ID) stanowi 43,5 % STVD_{LH} dla uchwytu przedniego oraz 44,6 % STVD_{RH} dla uchwytu tylnego. Dla przypomnienia, czas pracy pilarki na obrotach jałowych stanowi ok. 43,8 % sumarycznego czasu pracy urządzenia TDOT (patrz tabela 8.2).

Na pracę pilarki przy pełnym obciążeniu (FL) – wycinka i przerzynka przypadają odpowiednio 23 % $STVD_{LH}$ dla uchwytu przedniego i 26,7 % $STVD_{RH}$ związanej z uchwytem tylnym. Należy mieć na uwadze, że czas pracy pilarki z pełnym obciążeniem obejmował ok. 18 % TDOT dla omawianego przypadku – sosna #1 (patrz tabela 8.2).



Rysunek 8.4 Dawki cząstkowe drgań dla poszczególnych stanów obciążenia pilarki oraz dawka hałasu STVD dla całego procesu wyrzynki sosny #1, wyznaczone dla tylnego i przedniego uchwytu pilarki

Na operacje związane z pracą pilarki z pełną prędkością obrotową (RA) – okrzyszanie przypada 18,6 % dawki drgań jaką przyjmie operator za pośrednictwem przedniego uchwytu i 15,9 % dawki przekazanej przez urządzenie za pośrednictwem uchwytu tylnego. Łączny czas trwania stanów związanych z pracą pilarki w trybie Racing wynosi nieco poniżej 20% TDOT (patrz tabela 8.2).

Pozostała część całkowitej dawki drgań – tzn. ok. 15% przekazanej operatorowi poprzez uchwyt przedni i ok. 13% dawki przez uchwyt tylny związana jest z pracą pilarki w stanach UD. Stany UD trwały ok. 18 % całkowitego czasu pracy urządzeniem TDOT podczas wyrzynki sosny #1.

Zestawienie uśrednionych wartości dawek STVD dla gatunków i parametrów drzew objętych planem badań zamieszczono w tabeli 8.8.

8.4. Funkcje skalujące

8.4.1. Wprowadzenie

Tworzenie bazy danych zawierających wartości dawek drgań i hałasu STVD, STND na podstawie bezpośrednich pomiarów dozymetrycznych wiązało by się z wycinką bardzo dużej liczby drzew. W przypadku ograniczonej liczby drzew dostępnej do tworzenia bazy danych pomocne może być utworzenie funkcji skalujących. W podrozdziale tym opisano sposób tworzenia funkcji skalujących umożliwiającich określić:

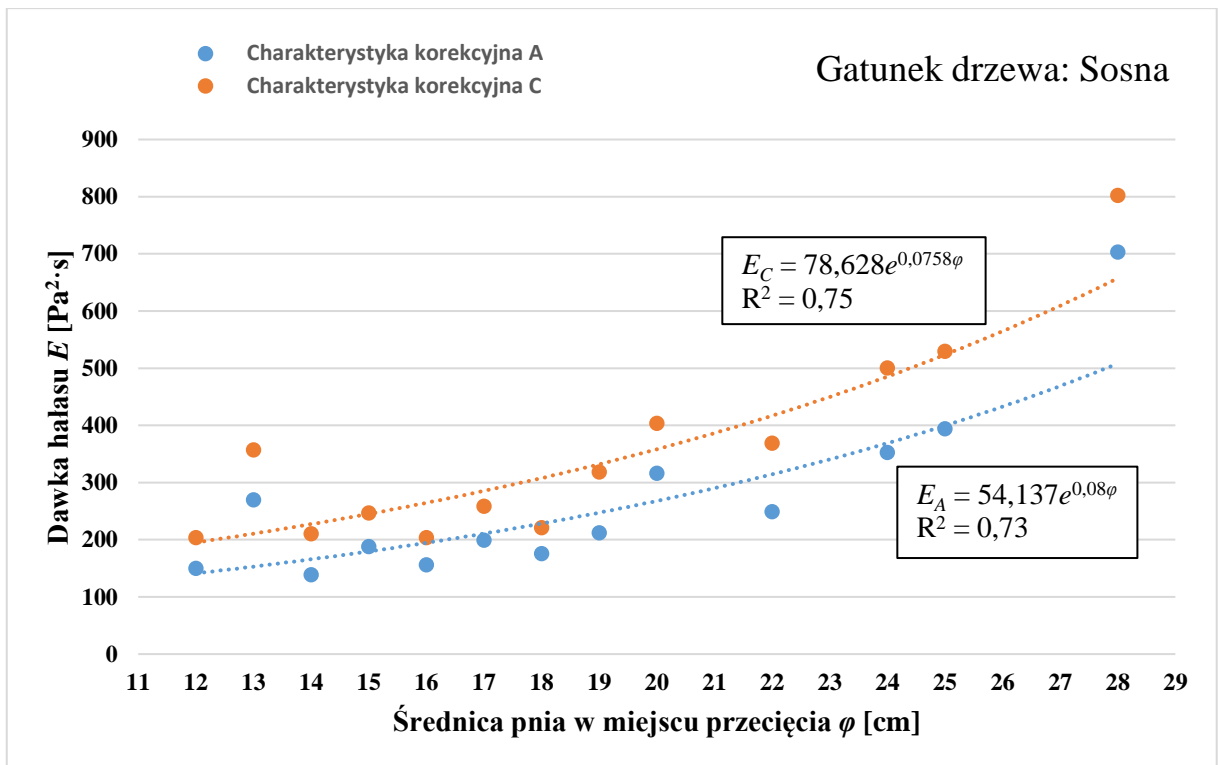
- dawki hałasu w zależności od średnicy pnia $E = f(\varphi)$,
- dawki drgań w zależności od średnicy pnia $D = f(\varphi)$,
- średnicy pnia w zależności od gatunku (dla znanej wysokości drzewa lub klasy wieku) $\varphi = f(L_h)$.

Podstawą do zdefiniowania dwóch pierwszych funkcji były wyniki pomiarów w postaci dawek hałasu – E oraz dawek drgań – D w zależności od średnicy pnia. Dane te pozyskano na podstawie zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych sygnałów WA związanych z wyrzynką wszystkich 5-ciu drzew, dla których przeprowadzono pomiary. Funkcje te wyznaczono oddzielnie dla każdego gatunku drzewa.

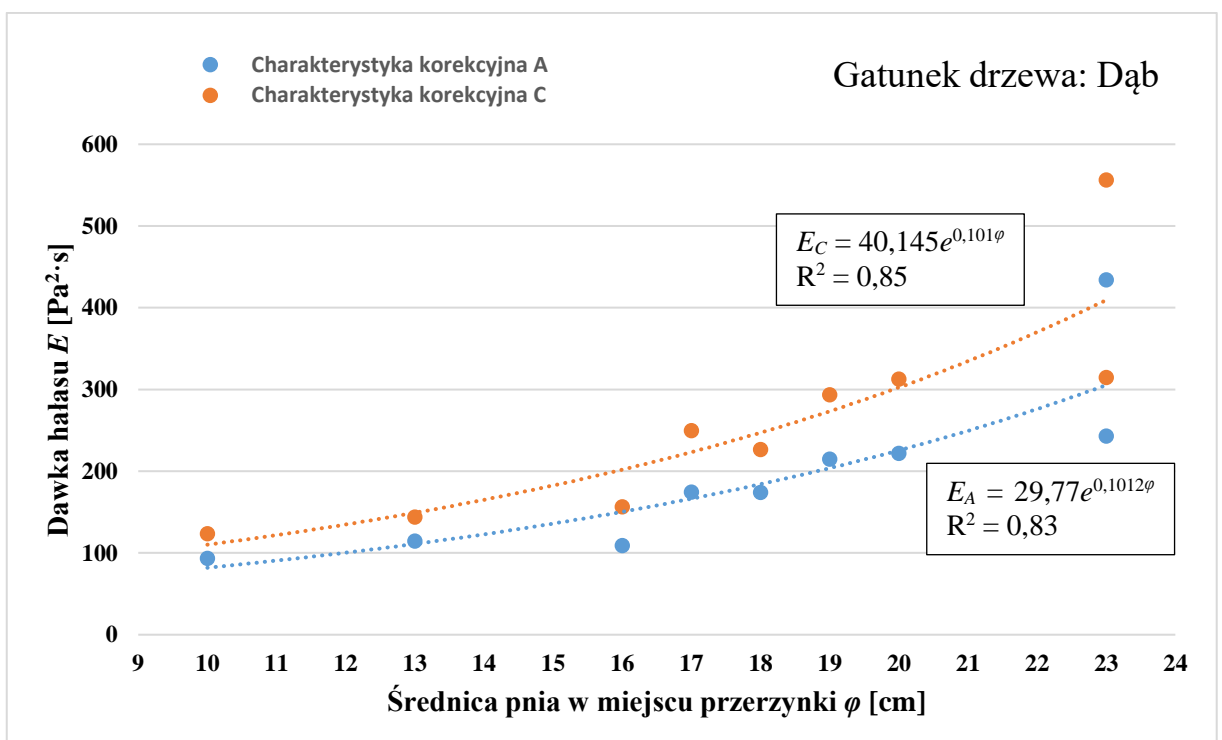
8.4.2. Dawki hałasu w zależności od średnicy pnia

Wartości dawek hałasu w zależności od średnicy pnia w miejscu przecięcia dla gatunku sosna oraz wyznaczone na podstawie uzyskanych danych dla dwóch drzew funkcje skalujące $E = f(\varphi)$ zostały zaprezentowane na rysunku 8.5. Funkcje skalujące wyznaczono dla charakterystyki korekcyjnej A i C . Należy dodać, że dawki hałasu stanowiące zbiór danych wyjściowych do aproksymacji zostały pozyskane na podstawie zarejestrowanych sygnałów WA podczas pracy pilarza w rzeczywistych warunkach pracy oraz danych statystycznych zawartych w tabeli 6.1.

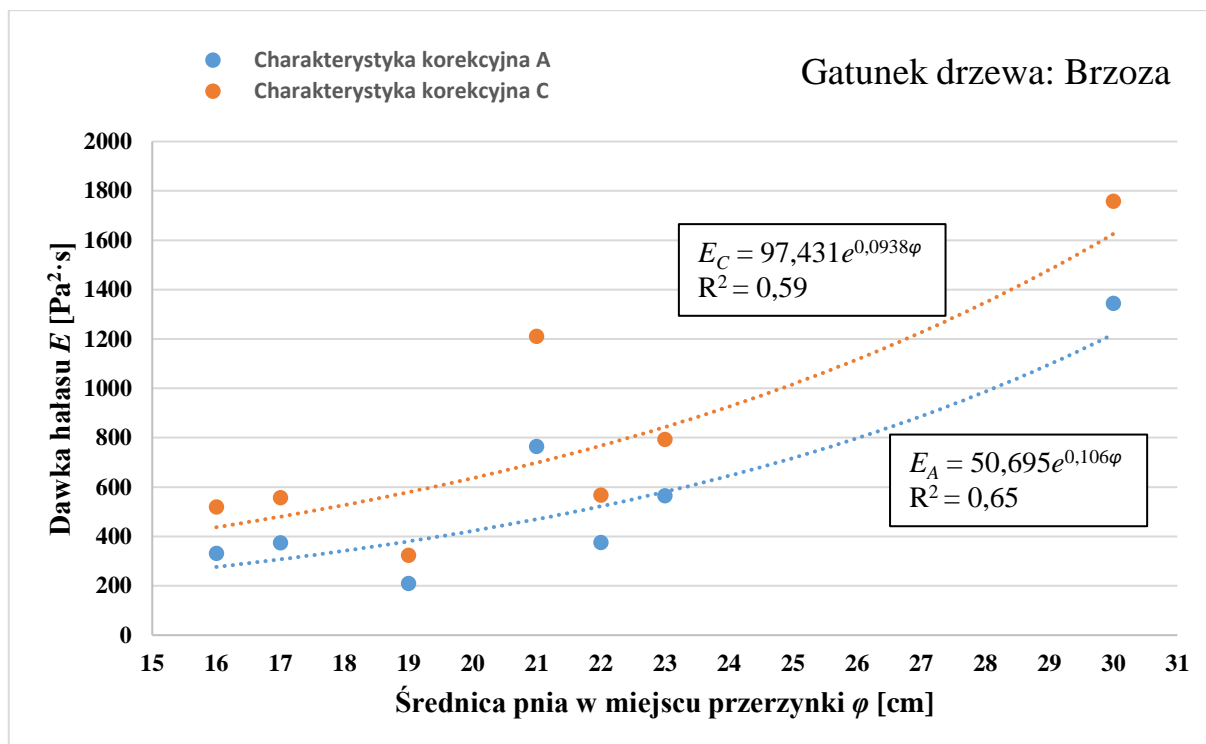
W analogiczny sposób utworzono pozostałe funkcje skalujące $E_A = f(\varphi)$ oraz $E_C = f(\varphi)$ dla dębu i brzozy, które zaprezentowano na rysunkach 8.6 i 8.7.



Rysunek 8.5 Zależność dawki hałasu od średnicy pnia sosny – funkcja skalująca $E = f(\phi)$, wartości uśrednione dla dwóch drzew



Rysunek 8.6 Zależność dawki hałasu od średnicy pnia dębu – funkcja skalująca $E = f(\phi)$, wartości uśrednione dla dwóch drzew



Rysunek 8.7 Dawka hałasu w zależności od średnicy pnia brzozy– funkcja skalująca $E = f(\varphi)$, wartości dla jednego drzewa

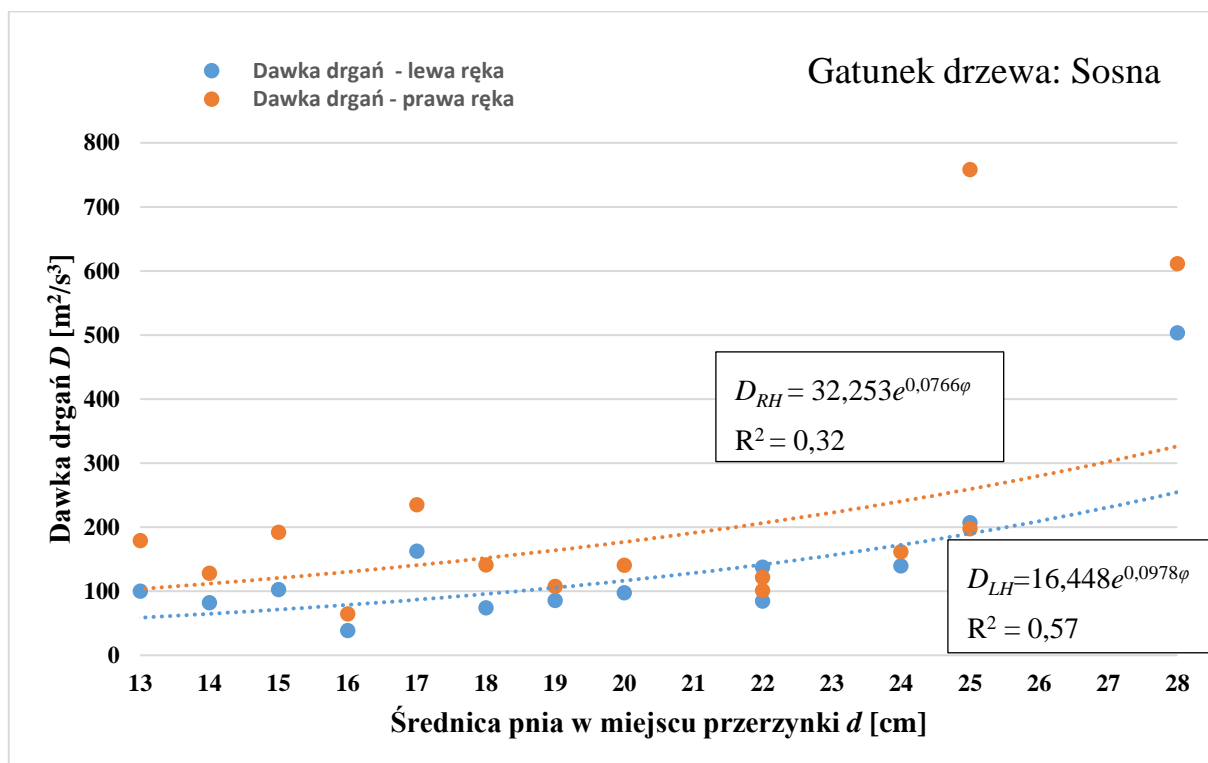
Z rysunków 8.5 do 8.7 wynika, że dawki hałasu dla gatunków drzew: sosna, dąb i brzoza są zależne od średnicy pnia. Zależności te mają charakter wykładniczy (rosnący).

Współczynniki determinacji R^2 dla sosny, dębu i brzozy wynoszą odpowiednio ok. 0,75; 0,85 oraz 0,65. Świadczy to o dobrym dopasowaniu modelu w przypadku sosny i dębu oraz przeciętnym dopasowaniu modelu dla brzozy.

Aby finalnie zwiększyć wiarygodność oszacowania dawki hałasu funkcje skalujące powinny być wyznaczone, w ramach konkretnego gatunku i klasy wieku, z uwzględnieniem możliwie największej liczebności grupy statystycznej. Uzasadnione jest kontynuowanie pomiarów w ramach kolejnych prac badawczych, aby zebrać odpowiednią ilość danych pozwalających na uzyskanie lepszych postaci funkcji skalujących.

8.4.3. Dawki drgań w zależności od średnicy pnia

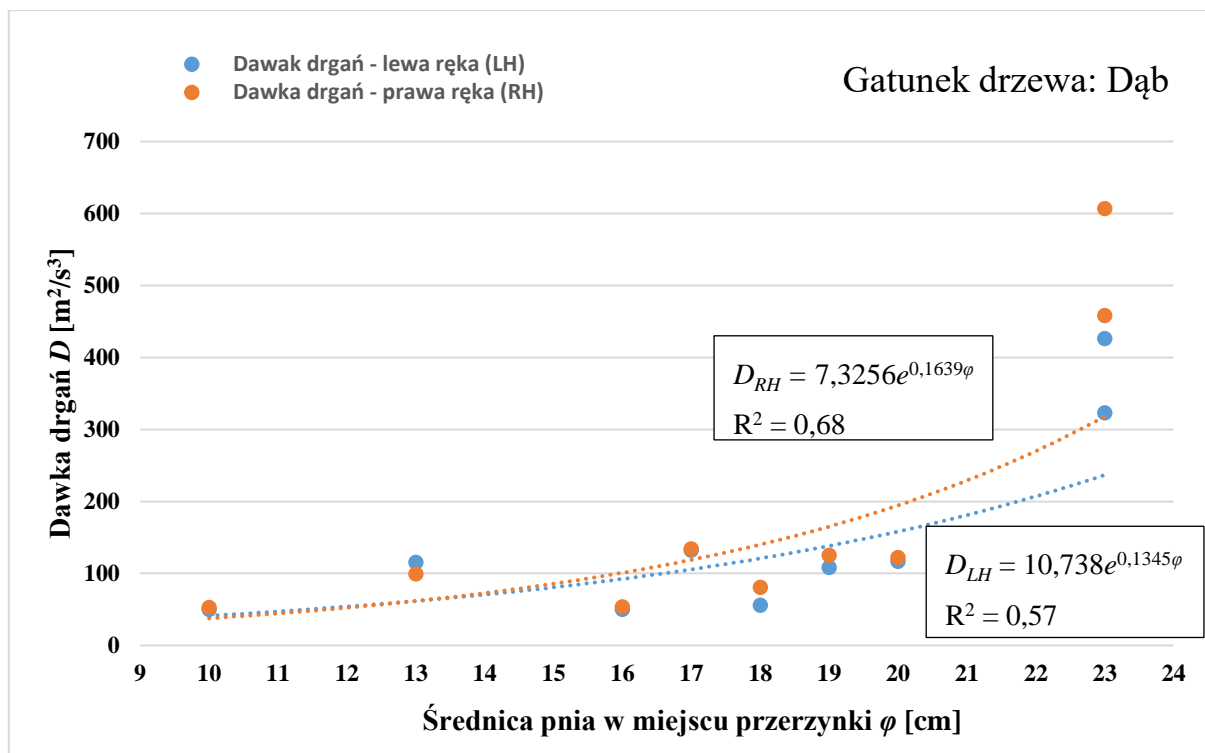
Wyznaczone eksperymentalnie dawki drgań w zależności od średnicy pnia w miejscu przecięcia dla gatunku sosna – uśrednione dla wyrzynki dostępnych dwóch drzew oraz aproksymowane na ich podstawie funkcje skalujące $D = f(\varphi)$, oddzielnie dla obu uchwytów pilarki (lewa ręka – LH; prawa ręka – RH) zostały zaprezentowane rysunku 8.8.



Rysunek 8.8 Zależność dawki drgań od średnicy pnia sosny – funkcja skalująca $D = f(\varphi)$, wartości uśrednione dla dwóch drzew

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że dla gatunku jakim jest sosna cząstkowa dawka drgań, związana z przecięciem pnia (przerzynka pnia w określonym jego miejscu), jest zależna od średnicy pnia. Zależność ta ma charakter wykładniczy (rosnący). Współczynnik determinacji R^2 wynosi odpowiednio 0,32 dla uchwytu tylnego (RH) oraz 0,57 dla uchwytu przedniego (LH). Świadczy to o słabym dopasowaniu modelu dla tylnego uchwytu i braku dopasowania dla uchwytu przedniego.

Wartości dawek drgań (wyznaczone eksperymentalnie) w zależności od średnicy pnia w miejscu przecięcia dla gatunku dąb oraz funkcje skalujące $D = f(\varphi)$ zostały zaprezentowane na rysunku 8.9.

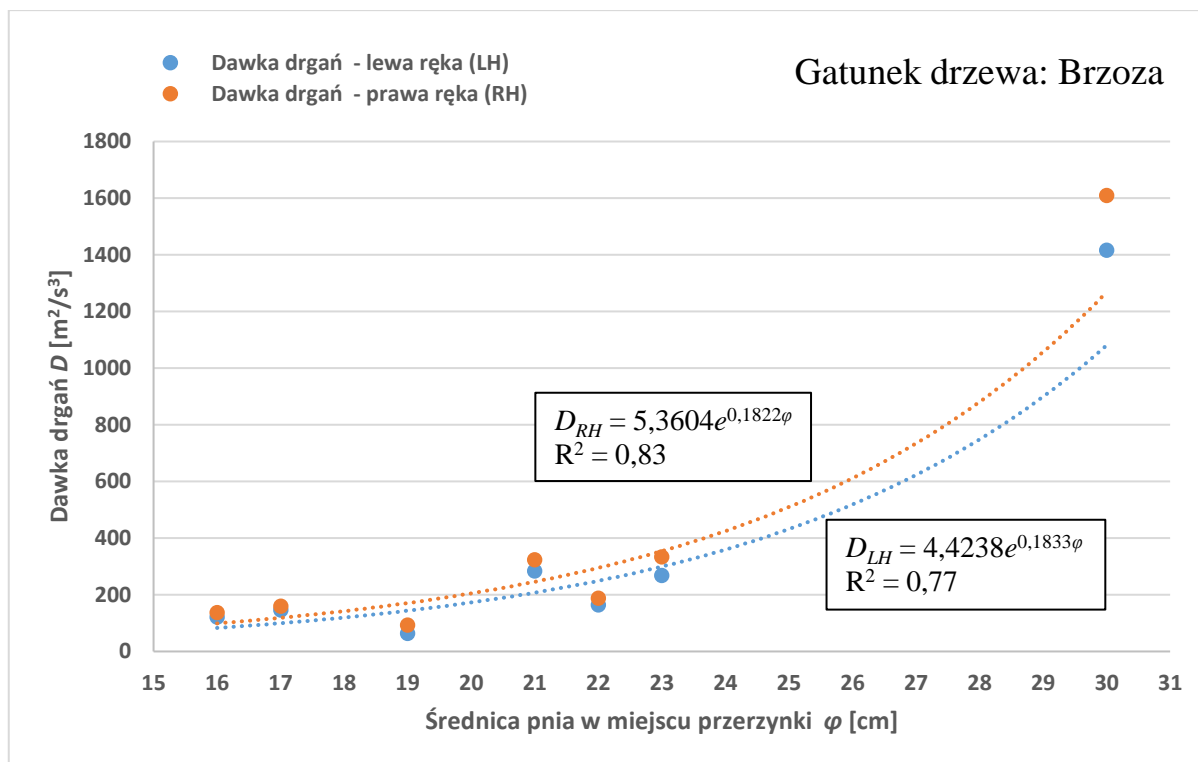


Rysunek 8.9 Zależność dawki drgań od średnicy pnia dębu – funkcja skalująca $D = f(\varphi)$, wartości uśrednione dla dwóch drzew

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że dla gatunku jakim jest dąb cząstkowa dawka drgań, związana z przecięciem pnia (przerzynka pnia w określonym jego miejscu), jest zależna od średnicy pnia. Zależność ta ma charakter wykładniczy (rosnący). Współczynnik determinacji R^2 wynosi odpowiednio 0,68 dla uchwytu tylnego (RH) oraz 0,57 dla uchwytu przedniego (LH), co świadczy o przeciętnym dopasowaniu modelu.

Wartości dawek drgań w zależności od średnicy pnia w miejscu przecięcia dla gatunku brzoza oraz funkcje skalujące $D = f(\varphi)$, jakie wyznaczono na podstawie danych dostępnych zaledwie dla jednego drzewa pokazano na rysunku 8.10.

Jak widać na rysunku 8.10, podobnie jak dla sosny i dębu cząstkowa dawka drgań związana z przerynką pnia w określonym jego miejscu, jest zależna od średnicy pnia. Zależność ta ma charakter wykładniczy rosnący o dobrym dopasowaniu do modelu dla obu uchwytów pilarki. Wartości współczynników determinacji wynoszą odpowiednio: $R^2 = 0,77$ dla uchwytu przedniego (podtrzymującego) – lewa ręka (LH), oraz $R^2 = 0,83$ dla uchwytu tylnego (sterującego) – prawa ręka (RH). Co świadczy o dobrym dopasowaniu modelu.



Rysunek 8.10 Dawka drgań w zależności od średnicy pnia brzozy – funkcja skalująca $D = f(\phi)$, wartości dla jednego drzewa

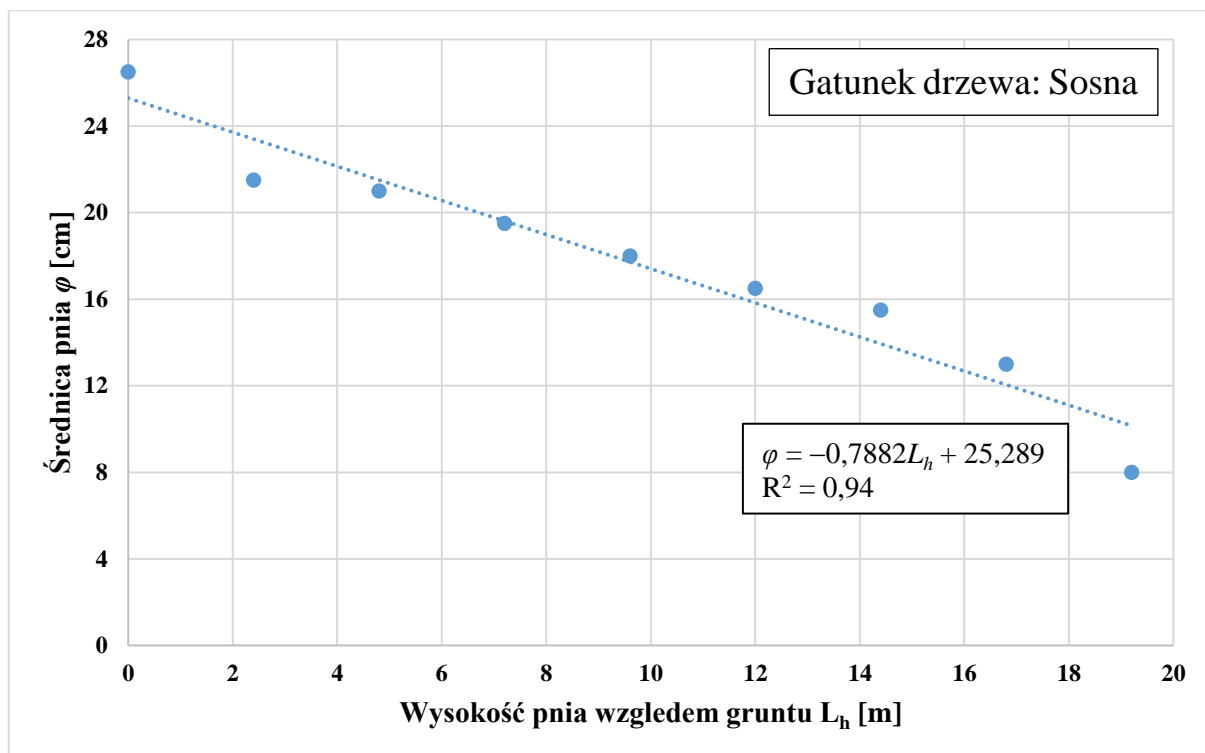
W odniesieniu do wszystkich trzech rozpatrywanych gatunków drzew, dla brzozy uzyskano najwyższe wartości współczynnika determinacji R^2 pomimo, że funkcje skalujące uzyskano na podstawie danych dla jednego drzewa.

Zwiększenie liczby drzew lub zmniejszenie odległości między kolejnymi cięciami (sortymenty o długości np. 0,25 m) zwiększyłoby liczbę danych wyjściowych i przyczyniłoby się do uzyskania lepszego dopasowania funkcji skalujących.

8.4.4. Średnica strzały pnia w funkcji wysokości

Uśrednione wartości średnicy pnia dla sosny w zależności od odległości względem podłoża mierzonej wzdłuż pnia oraz funkcja skalująca $\phi = f(L_h)$ zostały przedstawione na rysunku 8.11.

Jak widać (rys. 8.11) zmiana średnicy wzdłuż strzały (pnia) sosny jest funkcją liniową o charakterze malejącym i bardzo dobrym dopasowaniu modelu. Wartość współczynnika determinacji R^2 wynosi 0,94.



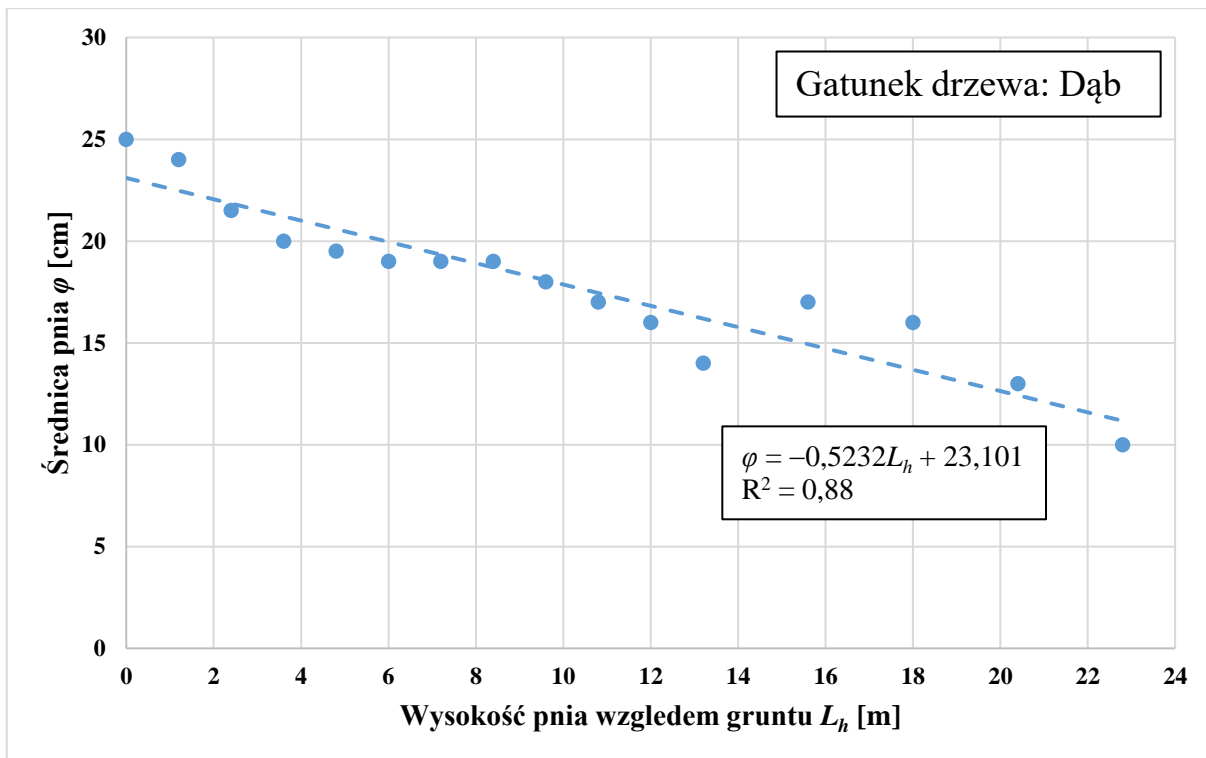
Rysunek 8.11 Uśredniona średnica pnia sosny w miejscu przecięcia w funkcji odległości od podłoża – funkcja skalująca $\varphi = f(L_h)$

Na rysunku 8.12 zamieszczono uśrednione wartości średnicy pnia dla dębu w zależności od odległości względem podłoża (mierzonej wzdłuż pnia) oraz uzyskaną w wyniku aproksymacji funkcję skalującą $\varphi = f(L_h)$.

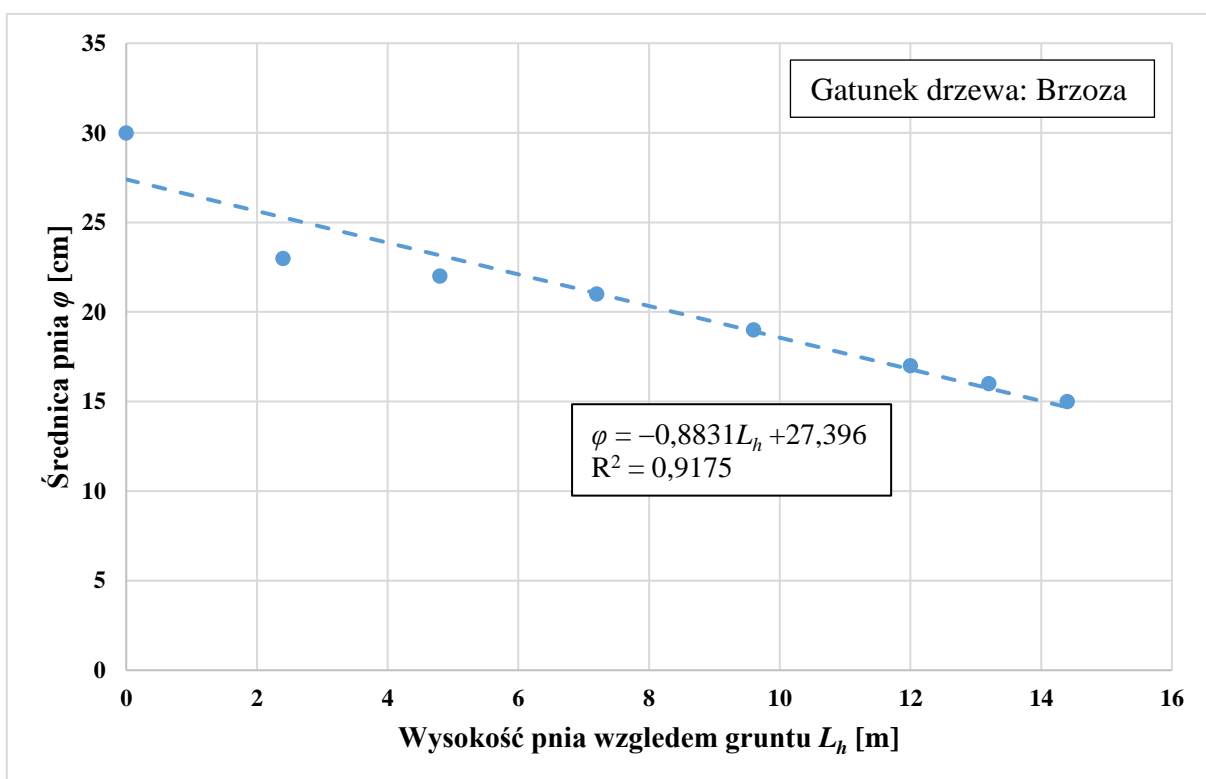
Jak wynika z rysunku 8.12 zmiana średnicy pnia dębu wzdłuż strzały pnia jest również funkcją liniową o charakterze malejącym i dobrym dopasowaniu do modelu. Wartość współczynnika determinacji R^2 wynosi 0,88.

Zmiany średnicy pnia dla brzozy w zależności od odległości względem podłoża mierzonej wzdłuż pnia – funkcja skalująca $\varphi = f(L_h)$ zostały przedstawione na rysunku 8.13.

Uzyskana funkcja skalująca jest funkcją liniową i ma bardzo dobre dopasowanie modelu. Współczynnik determinacji R^2 wynosi 0,92.



Rysunek 8.12 Uśredniona (dla dwóch drzew) średnica pnia dębu w miejscu przecięcia w funkcji odległości od podłoża – funkcja skalująca $\varphi = f(L_h)$



Rysunek 8.13 Średnica pnia brzozy w miejscu przecięcia w funkcji odległości od podłoża – funkcja skalująca $\varphi = f(L_h)$

Należy tutaj dodać, że zamieszczone w tym podrozdziale funkcje skalujące zostały utworzone dla drzew V klasy wieku (tzn. wiek drzew 80–100 lat) i orientacyjnej wysokości ok. 22 metrów. Docelowo należałoby utworzyć rodzinę funkcji skalujących dla różnych klas wieku.

Wyznaczając dawki drgań związane ze ścinką i przerzynką strzały pnia należy jednocześnie skorzystać z funkcji $D = f(\varphi)$ oraz $\varphi = f(L_h)$; natomiast oszacowując dawki hałasu należy skorzystać z funkcji $E = f(\varphi)$ oraz $\varphi = f(L_h)$.

Należy mieć na uwadze, że oszacowane na podstawie funkcji skalujących dawki drgań i hałasu odnoszą się jedynie do trybu pracy pilarki FL związanego z pracą przy pełnym obciążeniu.

Aby oszacować sumaryczną dawkę drgań STVD lub hałasu STND związaną z wyrzynką jednego drzewa należy, oprócz oszacowania dawki cząstkowej dla trybu pracy przy pełnym obciążeniu (FL), uwzględnić pozostałe dawki cząstkowe związane z pracą pilarki na: obrotach jałowych (ID), obrotach maksymalnych bez obciążenia (RA) oraz pracą silnika pilarki w stanach niezdefiniowanych (UD).

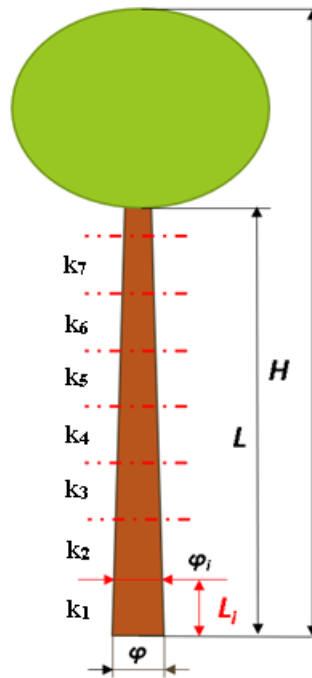
Sposób oszacowania dawek dla pozostałych trybów pracy pilarki oraz dawki sumarycznej STVD i STND na podstawie współczynników wagowych został przedstawiony w rozdziale 5.

8.5. Przykład oszacowania dawki drgań na podstawie współczynników wagowych

W niniejszym rozdziale opisano sposób szacowania dawek drgań i hałasu związanego z przerzynką pnia drzewa o danej średnicy, wysokości i znanym gatunku.

Na rysunku 8.14 pokazano schematycznie podział pnia drzewa na sortymenty. Załóżmy, że cały proces będzie się składał ze ścinki oraz przerzynki na sortymenty L_i o stałej długości wynoszącej 1,2 mb.

Wysokość drzewa H zależy od tzw. klasy wieku oraz gatunku i wpływa ona również na długość tzw. strzały pnia – L , co przekłada się na liczbę możliwych do uzyskania sortymentów – n_i o określonej długości L_i . Informacje o wysokości drzew uzyskuje się na podstawie pomiarów lub z tabeli zawartych w *Planie urzędzenia lasu*.



Rysunek 8.14 Schemat podziału strzały pnia na sortymenty o określonej długości

Długość poszczególnych sortymentów decyduje o liczbie przecięć pnia, jakie należy/można wykonać w ramach wyrzynki jednego drzewa oraz o średnicach pnia (przekrojów poprzecznych) w miejscach przecięć. Średnice w miejscach przecięć i liczba przecięć wpływają na wynik oszacowania cząstkowej dawki drgań – D_{FL} i hałasu – E_{FL} związanych z pracą pilarki przy pełnym obciążeniu – Full Load (FL) (co odpowiada operacji ścinki drzewa i przerzynki na sortymenty).

Wartości D_{FL} i E_{FL} oraz znajomość współczynników wagowych pozwalają oszacować sumaryczną dawkę drgań i hałasu – STVD i STND. Sumaryczną dawkę drgań na jaką narażony jest pilarz w związku z wyrzynką sortymentów pochodzących wyłącznie od jednego drzewa wyznacza się zgodnie z zależnościami (5.7) i (5.9).

Dla przypomnienia wzory (5.7) i (5.9) mają postać:

$$STVD = D_{FL,Ścinka} + \sum_{i=1}^j D_{FL,Przerzynka_i} + \sum_{i=1}^k D_{ID,Obr.jałowe_i} + \sum_{i=1}^l D_{RA,Okrzesywanie_i} + \sum_{i=1}^m D_{UD,Stany\ niezdefiniowane_i}$$

$$STVD = D_{FL}[1 + \alpha_{D1} + \alpha_{D2} + \alpha_{D3}] ,$$

gdzie: D_{FL} – oszacowana dla ścinki i przerzynki pnia dawka drgań dla trybu pracy przy pełnym obciążeniu,
 D_{ID} – dawka cząstkowa drgań związana z pracą na obrotach jałowych,
 D_{RA} – dawka cząstkowa drgań związana z pracą na obrotach maksymalnych bez obciążenia,
 D_{UD} – dawka cząstkowa drgań związana z pracą w stanach niezdefiniowanych,
 α_{D1} – iloraz dawki drgań dla trybu pracy na obrotach jałowych i dawki drgań dla trybu pracy przy pełnym obciążeniu,
 α_{D2} – iloraz dawki drgań dla trybu pracy na obrotach maksymalnych i dawki drgań dla trybu pracy przy pełnym obciążeniu,
 α_{D3} – iloraz dawki drgań dla trybu pracy na obrotach jałowych i dawki drgań dla pracy w stanach przejściowych.

Przyjmijmy, że szacujemy teoretyczną dawkę drgań związaną z wycinką sosny o średnicy pnia przy gruncie wynoszącej 25,3 cm oraz wysokości pnia 19,2 m. Zakładając stały podział pnia na sortymenty o długości 1,2 mb każdy, wyznaczamy łączną liczbę przecięć konieczną do wyrzynki sortymentów. Dla tak przyjętych danych liczba uzyskanych sortymentów $n = 16$.

Następnie korzystając z wyznaczonych funkcji skalujących: $D = f(\varphi)$, $\varphi = f(L_h)$ oraz wartości współczynników wagowych zawartych w karcie katalogowej (patrz tabela 8.10) wyznacza się wartość STVD.

W tabeli 8.3 zawarto zestawienie wartości wysokości pnia liczonej względem podłoża dla kolejno realizowanych przecięć, teoretyczne średnice pnia w miejscach tych przecięć oraz związane z nimi dawki cząstkowe drgań związane z trybem pracy Full Load (FL).

Tabela 8.3 Zestawienie wyników obliczeń dawek cząstkowych związanych z trybem pracy FL oraz dawki sumarycznej STVD dla wyrzynki sosny o założonych parametrach

Odległość miejsca przecięcia względem podłoża [m]	Teoretyczna średnica pnia w miejscu przecięcia w [cm] – wyznaczona na podstawie funkcji skalującej $\varphi = f(L_h)$	Teoretyczna dawka drgań w [m ² /s ³] związana z kolejnymi przecięciami – wyznaczona na podstawie funkcji skalującej $D_{LH} = f(\varphi)$
0	25,3	224,0
1,2	24,4	208,3
2,4	23,4	193,8
3,6	22,5	180,2
4,8	21,5	167,6
6	20,6	155,9
7,2	19,6	145,0
8,4	18,7	134,9
9,6	17,7	125,5
10,8	16,8	116,7
12	15,8	108,5
13,2	14,9	101,0
14,4	13,9	93,9
15,6	13,0	87,3
16,8	12,1	81,2
18	11,1	75,6
19,2	10,2	70,3
	Dawka cząstkowa dla trybu pracy FL D_{FL}	2269,7
	STVD	10009,4

Jak wynika z tabeli 8.3 teoretyczna dawka drgań STVD jaką przyjmie pilarz realizujący wyrzynkę jednego drzewa o założonych parametrach wynosi ok. 10 000 m²/s³.

Wyznaczenie dawki hałasu STND prowadzi się w analogiczny sposób jak dla drgań z tą różnicą, że należy wówczas skorzystać z funkcji skalujących $E_A = f(\varphi)$, $\varphi = f(L_h)$ oraz wartości współczynników korekcyjnych α_{Ei} zawartych w tabeli 8.10.

8.6. Zestawienie wyników badań

Do utworzenia pilotażowej bazy danych, na podstawie której będzie można zaimplementować zaproponowaną w pracy metodykę oszacowania narażenia na hałas i drgania operatorów posługujących się zmechanizowanym narzędziem ręcznym o niestacjonarnym trybie pracy (jakim jest pilarka łańcuchowa) niezbędne są zestawy danych różnego typu i w różnej formie. W kolejnych podrozdziałach zamieszczono dane przydatne do utworzenia takiej bazy, a także jej finalną formę w postaci kart katalogowych.

8.6.1. Wyniki parametryzacji hałasu

Wartości wyznaczonych parametrów i miar hałasu emitowanego przez pilarkę podczas wyrzynki drzew objętych planem badań zamieszczono w tabeli 8.4. Kolorem szarym wyróżniono kolumny dotyczące miar, które związane są z określeniem zagrożenia na hałas. Kolorem zielonym wskazano wartości parametrów, dla których nie wystąpiły przekroczenia NDN, natomiast kolorem czerwonym wskazano te, dla których zostało stwierdzone przekroczenie wartości dopuszczalnych NDN dla danej wielkości pomiarowej.

Tabela 8.4 Wyniki parametryzacji hałasu zarejestrowanego podczas wyrzynki jednego drzewa

Wyniki parametryzacji hałasu zarejestrowanego podczas wyrzynki drzew								
Drzewo	Wielkość pomiarowa							
	$L_{A,eq,Te}$ [dB]	T_e [s]	$L_{EX,8h}^*$ [dB]	$L_{C,eq,Te}$ [dB]	$L_{Lin,eq,Te}$ [dB]	$L_{C peak}$ [dB]	$L_{Lin peak}$ [dB]	$L_{A max}$ [dB]
Sosna#1	103,1	226,7	82,1	104,1	104,5	125,4	126,8	114,0
Sosna#2	106,1	287,9	85,1	108,1	108,5	126,7	127,2	113,1
Dąb#1	106,4	281,1	86,3	108,8	109,2	126,2	129,2	114,2
Dąb#2	104,2	347,7	85,0	106,2	106,7	124,1	125,5	112,2
Brzoza#1	107,6	288,1	87,6	109,9	110,4	127,5	127,8	115,2

* – oszacowanie w przypadku wyrzynki tylko jednego, konkretnego drzewa w ramach 8-mio godzinnego dnia pracy

Na podstawie zamieszczonych w tabeli 8.4 wyników można stwierdzić, że:

- w żadnym z przypadków nie stwierdzono przekroczenia wartości NDN dla szczytowego poziomu dźwięku C – $L_{C peak}$ (135 dB),
- maksymalny poziom dźwięku A – $L_{A max}$, dla którego wartość dopuszczalna NDN wynosi 115 dB został nieznacznie przekroczony jedynie w przypadku wyrzynki brzozy#1.

Dawki hałasu STND związane z wyrzynką pojedynczego drzewa wyznaczone z charakterystyką korekcyjną A oraz C zawarto w tabeli 8.5. Natomiast wartości uśrednione dawek hałasu dla wybranych trzech gatunków drzew w V-tej klasie wieku (80–100 lat) podano w tabeli 8.6.

Tabela 8.5 Dawki hałasu związane z wyrzynką jednego drzewa – STND

Drzewo	Dawka hałasu dla jednego drzewa – STND [Pa ² ·s]	
	Wyznaczona z charakterystyka korekcyjną A	Wyznaczona z charakterystyka korekcyjną C
Sosna#1	1866,3	2347,6
Sosna#2	4357,7	5446,2
Dąb#1	4874,5	6767,2
Dąb#2	3900,0	4889,1
Brzoza#1	7686,4	9165,8

Tabela 8.6 Uśrednione wartości dawek STND dla trzech wybranych gatunków drzew

Uśrednione wartości dawek STND dla trzech wybranych gatunków drzew		
[Pa ² ·s]		
Gatunek drzewa	Wyznaczona z charakterystyka korekcyjną A	Wyznaczona z charakterystyka korekcyjną C
Sosna	2851	3575
Dąb	4360	5750
Brzoza	9079	9080

8.6.2. Wyniki parametryzacji drgań

Wartości wyznaczonych miar przyspieszeń drgań zarejestrowanych na przednim (LH) i tylnym (RH) uchwycie pilarki podczas wyrzynki drzew objętych planem badań zamieszczono w tabeli 8.7.

Jak przedstawiono w tabeli 8.6 dla każdego z analizowanych przypadków, na podstawie wartości $a_{hv,eq,Te}$ nie stwierdzono przekroczeń wartości NDN dla narażenia krótkotrwałego – $a_{hv,30min dop.}$ wynoszącego $11,2 \text{ m/s}^2$ – czas ekspozycji dla każdego z przypadków był mniejszy niż 30 minut. Natomiast na podstawie wartości $a_{I hv max}$ stwierdzono chwilowe przekroczenia wartości NDN przyspieszeń drgań dla ekspozycji krótkotrwałej – $a_{hv,30min dop.}(11,2 \text{ m/s}^2)$. Zdarzenia te mają charakter incydentalny.

Można stwierdzić, że drgania uchwytów pilarki stanowią zagrożenie dla zdrowia operatora. Długotrwała praca urządzeniem może prowadzić do poważnych i nieodwracalnych zmian w organizmie operatora.

Tabela 8.7 Wyniki parametryzacji przyspieszeń drgań zarejestrowanych na uchwytach pilarki podczas wyrzynki drzew

	Drzewo									
	Sosna#1		Sosna#2		Dąb#1		Dąb#2		Brzoza#1	
Czas ekspozycji T_e [s]	226		287		281		347		288	
	Lewa ręka	Prawa ręka	Lewa ręka	Prawa ręka	Lewa ręka	Prawa ręka	Lewa ręka	Prawa ręka	Lewa ręka	Prawa ręka
Suma wektorowa wartości skutecznych ważonych (W_h) przyspieszeń drgań a_{hv,eq,T_e} [m/s^2] *	3,56	4,99	4,00	5,20	4,46	4,64	3,98	5,16	4,57	5,45
Maksymalna chwilowa wartość $a_{1hv,max}$ [m/s^2]	13,6	19,3	29,3	23,2	42,3	48,5	32,4	24,3	30,7	28,2
Ekspozycja na drgania $A(8)$ [m/s^2] **	0,344	0,474	0,443	0,564	0,523	0,519	0,484	0,610	0,579	0,627
Dawka drgań dla jednego drzewa – STVD [m^2/s^3]	3335	6425	5634	9119	7631	7511	8076	12294	7686	9165

* – wartości dla wyrzynki jednego drzewa z uwzględnieniem czasu ekspozycji T_e

** – oszacowanie w przypadku wyrzynki tylko jednego, konkretnego drzewa w ramach 8-mio godzinowego dnia pracy

Wartości uśrednionych dawek STVD dla sosny, dębu oraz brzozy w V-tej klasie wieku (80–100 lat) o wysokości ok. 20 metrów zamieszczono w tabeli 8.8.

Tabela 8.8 Uśrednione wg. gatunków wartości parametrów STVD

Uśrednione wg. gatunków wartości parametrów STVD		
[m^2/s^3]		
Gatunek drzewa	Uchwyt przedni – lewa ręka (LH)	Uchwyt tylny – prawa ręka (RH)
Sosna	4335	7654
Dąb	7850	9609
Brzoza	7686	9165

Na podstawie danych zawartych w tabeli 8.8 można stwierdzić, że większe dawki drgań przekazywane są przez tylny uchwyt pilarki na prawą rękę operatora.

8.6.3. Wartości współczynników korekcyjnych α_{Di} i α_{Ei}

Uśrednione dla poszczególnych gatunków drzew wartości współczynników korekcyjnych α_{Di} dla drgań oraz α_{Ei} dla hałasu uzyskane na podstawie przetwarzania danych dla zarejestrowanych podczas pomiarów terenowych sygnałów przedstawiono w tabeli 8.9.

Tabela 8.9 Uśrednione dla poddanych testom gatunkom drzew uśrednione wartości współczynników korekcyjnych dla drgań – α_{Di} oraz hałasu – α_{Ei}

Uśrednione wartości współczynników korekcyjnych												
Gatunek drzewa	Drgania						Hałas					
	Uchwyt przedni – lewa ręka (LH)			Uchwyt tylny – prawa ręka (RH)			Charakterystyka A			Charakterystyka C		
	$\alpha_{D1,LH}$	$\alpha_{D2,LH}$	$\alpha_{D3,LH}$	$\alpha_{D1,RH}$	$\alpha_{D2,RH}$	$\alpha_{D3,RH}$	$\alpha_{E1,A}$	$\alpha_{E2,A}$	$\alpha_{E3,A}$	$\alpha_{E1,C}$	$\alpha_{E2,C}$	$\alpha_{E3,C}$
Sosna	1,61	0,88	0,59	2,01	0,87	0,53	0,06	0,19	0,16	0,06	0,22	0,14
Dąb	2,14	0,60	0,72	2,02	0,60	0,72	0,05	0,38	0,19	0,04	0,35	0,18
Brzoza	0,91	0,26	0,30	0,97	0,29	0,31	0,02	0,11	0,10	0,01	0,08	0,09

Dla przypomnienia – współczynniki te są stosowane do oszacowania dawek STND i STVD w przypadku, gdy dysponujemy tylko wartością dawki cząstkowej związanej z trybem pracy przy pełnym obciążeniu – Full Load (FL). Dawkę tą z kolei szacuje się na podstawie przedstawionych wcześniej funkcji skalujących.

Na podstawie danych zawartych w tabeli 8.9 można stwierdzić, że podczas szacowania dawki drgań STND należy uwzględnić wszystkie dawki cząstkowe związane z pracą pilarki we wszystkich trybach pracy (E_{ID} , E_{FL} , E_{RA} oraz E_{UD}). Natomiast podczas szacowania dawki hałasu STND można pominąć cząstkową dawkę związaną z pracą silnika pilarki na biegu jałowym – E_{ID} (co wyróżniono w tabeli 8.9). Dla wszystkich trzech gatunków największy udział w sumarycznej dawce hałasu STND ma składnik związany z pracą pilarki przy pełnym obciążeniu E_{FL} .

8.7. Pilotażowa baza danych STND i STVD

Na podstawie wyników przeprowadzonej wielowariantowej parametryzacji sygnałów WA zarejestrowanych podczas wyrzynki drzew objętych planem badań utworzono karty katalogowe oddziaływań WA na stanowisku pracy pilarza. Karty te stanowią elementy pilotażowej bazy danych. Tabele 8.10 – 8.12 są przykładowymi kartami katalogowymi odpowiednio dla: sosny, dębu i brzozy w V-tej klasie wieku (80–100 lat)

Tabela 8.10 Karta katalogowa parametryzacji oddziaływań WA na stanowisko pilarz-drwal – wartości uśrednione dla sosny

Karta katalogowa parametryzacji oddziaływań WA na stanowisko pilarz-drwal								
Gatunek: Sosna		Klasa wieku: V (80÷100 lat)		Średnia średnica pnia przy gruncie [cm]: 25,3		Średnia wysokość pnia [m]: 20		
Drgania:								
Miara i jednostka	Dawka drgań [m ² /s ³]		Wartość równoważna przyspieszeń drgań [m/s ²]		Maksymalna chwilowa wartość przyspieszeń drgań [m/s ²]			
Oznaczenie	STVD _{LH}	STVD _{RH}	<i>a_{hv,eq,Te LH}</i>	<i>a_{hv,eq,Te RH}</i>	<i>a_{lvh max LH}</i>	<i>a_{lvh max RH}</i>		
Wartość	4335	7654	4,00	5,20	29,3	23,2		
Miara i jednostka	Współczynnik korekcyjny α _{Di} metody szacunkowej [-]					Uśrednione dla procesu nieskorygowane i poddane korekcji <i>W_h</i> widmo przyspieszeń drgań (w postaci cyfrowej)		
Oznaczenie	α _{D1LH}	α _{D1RH}	α _{D2LH}	α _{D2RH}	α _{D3LH}		α _{D3RH}	
Wartość	1,61	2,01	0,88	0,87	0,59		0,53	
Hałas:								
Miara i jednostka	Dawka hałasu [Pa ² s]		Równoważny poziom ciśnienia akustycznego [dB]		Maksymalny poziom dźwięku A [dB]	Szczytowy poziom dźwięku C [dB]		
Oznaczenie	STND _A	STND _C	<i>L_{A,eq,Te}</i>	<i>L_{C,eq,Te}</i>	<i>L_{A max}</i>	<i>L_{C peak}</i>		
Wartość	2851	3577	106,1	108,1	114,0	126,7		
Miara i jednostka	Współczynnik korekcyjne α _{Ei} metody szacunkowej [-]					Uśrednione widmo ciśnienia akustycznego (w postaci cyfrowej)	Widmo oktafowe hałasu (w postaci cyfrowej)	
Oznaczenie	α _{EA1}	α _{EC1}	α _{EA2}	α _{EC2}	α _{EA2}			α _{EC2}
Wartość	0,06	0,05	0,19	0,22	0,16			0,14
Uśredniona funkcja skalująca <i>D=f(φ)</i> <i>D_{LH}</i> = 16,448e ^{0,0978φ} ; R ² = 0,57 <i>D_{RH}</i> = 32,253e ^{0,0766φ} ; R ² = 0,32			Uśredniona funkcja skalująca <i>E=f(φ)</i> <i>E_A</i> = 54,137e ^{0,08φ} ; R ² = 0,73 <i>E_C</i> = 78,628e ^{0,0758φ} ; R ² = 0,75			Uśredniona funkcja skalująca <i>φ =f(L_h)</i> <i>φ</i> = -0,7882L _h + 25,289; R ² = 0,94		

Tabela 8.11 Karta katalogowa parametryzacji oddziaływań WA na stanowisko pilarz-drwal – wartości uśrednione dla dębu

Karta katalogowa parametryzacji oddziaływań WA na stanowisko pilarz-drwal								
Gatunek: Dąb		Klasa wieku: V (80÷100 lat)		Średnia średnica pnia przy gruncie [cm]: 23		Średnia wysokość pnia [m]: 16		
Drgania:								
Miara i jednostka	Dawka drgań [m ² /s ³]		Wartość równoważna przyspieszeń drgań [m/s ²]		Maksymalna chwilowa wartość przyspieszeń drgań [m/s ²]			
Oznaczenie	STVD _{LH}	STVD _{RH}	<i>a_{hv,eq,Te LH}</i>	<i>a_{hv,eq,Te RH}</i>	<i>a_{lvh max LH}</i>	<i>a_{lvh max RH}</i>		
Wartość	7850	9609	4,46	5,16	42,3	48,5		
Miara i jednostka	Współczynnik korekcyjny α _{Di} metody szacunkowej [-]					Uśrednione dla procesu nieskorygowane i poddane korekcji <i>W_h</i> widmo przyspieszeń drgań (w postaci cyfrowej)		
Oznaczenie	α _{D1LH}	α _{D1RH}	α _{D2LH}	α _{D2RH}	α _{D3LH}		α _{D3RH}	
Wartość	2,14	2,02	0,6	0,6	0,72		0,72	
Hałas:								
Miara i jednostka	Dawka hałasu [Pa ² s]		Równoważny poziom ciśnienia akustycznego [dB]		Maksymalny poziom dźwięku A [dB]	Szczytowy poziom dźwięku C [dB]		
Oznaczenie	STND _A	STND _C	<i>L_{A,eq,Te}</i>	<i>L_{C,eq,Te}</i>	<i>L_{A max}</i>	<i>L_{C peak}</i>		
Wartość	4608	6071	106,4	108,8	114,2	126,2		
Miara i jednostka	Współczynnik korekcyjne α _{Ei} metody szacunkowej [-]					Uśrednione widmo ciśnienia akustycznego (w postaci cyfrowej)	Widmo oktafowe hałasu (w postaci cyfrowej)	
Oznaczenie	α _{EA1}	α _{EC1}	α _{EA2}	α _{EC2}	α _{EA2}			α _{EC2}
Wartość	0,05	0,04	0,38	0,35	0,19			0,18
Uśredniona funkcja skalująca <i>D=f(φ)</i> <i>D_{LH}</i> = 10,738e ^{0,1345φ} ; R ² = 0,57 <i>D_{RH}</i> = 7,3256e ^{0,1639φ} ; R ² = 0,68			Uśredniona funkcja skalująca <i>E=f(φ)</i> <i>E_A</i> = 29,77e ^{0,1012φ} ; R ² = 0,83 <i>E_C</i> = 40,145e ^{0,101φ} ; R ² = 0,85			Uśredniona funkcja skalująca <i>φ =f(L_h)</i> <i>φ</i> = -0,5232L _h + 23,101; R ² = 0,88		

Tabela 8.12 Karta katalogowa parametryzacji oddziaływań WA na stanowisko pilarz-drwal – wartości dla brzozy

Karta katalogowa parametryzacji oddziaływań WA na stanowisko pilarz-drwal								
Gatunek: Brzoza		Klasa wieku: V (80÷100 lat)		Średnica pnia [cm]: 27,3		Wysokość pnia [m]: 14,5		
Drgania:								
Miara i jednostka	Dawka drgań [m ² /s ³]		Wartość równoważna przyspieszeń drgań [m/s ²]		Maksymalna chwilowa wartość przyspieszeń drgań [m/s ²]			
Oznaczenie	STVD _{LH}	STVD _{RH}	<i>a_{hv,eq,Te LH}</i>	<i>a_{hv,eq,Te RH}</i>	<i>a_{lv,max LH}</i>	<i>a_{lv,max RH}</i>		
Wartość	7686	9166	4,57	5,45	30,7	28,2		
Miara i jednostka	Współczynnik korekcyjne α_{Di} metody szacunkowej [-]					Uśrednione dla procesu nieskorygowane i poddane korekcji W_h widmo przyspieszeń drgań (w postaci cyfrowej)		
Oznaczenie	α_{D1LH}	α_{D1RH}	α_{D2LH}	α_{D2RH}	α_{D3LH}		α_{D3RH}	
Wartość	0,91	0,97	0,26	0,29	0,3		0,31	
Hałas:								
Miara i jednostka	Dawka hałasu [Pa ² s]		Równoważny poziom ciśnienia akustycznego [dB]		Maksymalny poziom dźwięku A [dB]	Szczytowy poziom dźwięku C [dB]		
Oznaczenie	STND _A	STND _C	<i>L_{A,eq,Te}</i>	<i>L_{C,eq,Te}</i>	<i>L_{A,max}</i>	<i>L_{C,peak}</i>		
Wartość	9079	9080	107,6	110	115,2	127,5		
Miara i jednostka	Współczynnik korekcyjne α_{Ei} metody szacunkowej [-]					Uśrednione widmo ciśnienia akustycznego (w postaci cyfrowej)	Widmo oktafowe hałasu (w postaci cyfrowej)	
Oznaczenie	α_{EA1}	α_{EC1}	α_{EA2}	α_{EC2}	α_{EA2}			α_{EC2}
Wartość	0,02	0,01	0,11	0,08	0,1			0,09
Uśredniona funkcja skalująca $D=f(\varphi)$ $D_{LH} = 4,4238e^{0,1833\varphi}$; $R^2 = 0,77$ $D_{RH} = 5,3604e^{0,1822\varphi}$; $R^2 = 0,83$			Uśredniona funkcja skalująca $E=f(\varphi)$ $E_A = 50,695e^{0,106\varphi}$; $R^2 = 0,65$ $E_C = 97,431e^{0,0938\varphi}$; $R^2 = 0,59$			Uśredniona funkcja skalująca $\varphi = f(L_h)$ $\varphi = -0,8831L_h + 27,396$; $R^2 = 0,9175$		

9. Implementacja i walidacja opracowanej metody

W rozdziale tym zamieszczono przekłady implementacji opracowanej metodyki dla dwóch różnych scenariuszy cieć

9.1. Przykładowe scenariusze prac leśnych

Przypadek #1

Trzebież średnia na powierzchni leśnej opisanej w rozdziale 6.1.; przy założeniu, że łączna liczba drzew w ciągu dnia poddana wyrzynce wynosi 17 w tym: 7 sosen, 7 dębów, 3 brzozy.

Korzystając z danych zawartych w tabeli 8.8 wyznaczamy dzienną ekspozycję na drgania – $A(8)$, posługując się danymi zawartymi w tabeli – wartości STVD związane z uchwytem o dominującym charakterze drgań – uchwyt tylny (prawa ręka) wyznaczam wartość dziennej ekspozycji na drgania zgodnie ze wzorem (5.13).

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{T_0} (n_{\text{sosna}} \cdot STVD_{\text{sosna}} + n_{\text{dąb}} \cdot STVD_{\text{dąb}} + n_{\text{brzoza}} \cdot STVD_{\text{brzoza}})} = \sqrt{\frac{1}{28800} (7 \cdot 7654 + 7 \cdot 9609 + 3 \cdot 9166)} = 2,30 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

Analogicznie wyznaczam poziom dziennej ekspozycji na hałas – $L_{EX,8h}$ posługując się wzorem (5.14) i danymi zawartymi w tabeli 8.6.

$$L_{EX,8h} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{n_{\text{sosna}} \cdot STND_{\text{sosna}}}{p_0^2 \cdot T_0} + \frac{n_{\text{dąb}} \cdot STND_{\text{dąb}}}{p_0^2 \cdot T_0} + \frac{n_{\text{brzoza}} \cdot STND_{\text{brzoza}}}{p_0^2 \cdot T_0} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{7 \cdot 2851}{0,00002^2 \cdot 28800} + \frac{7 \cdot 4360}{0,00002^2 \cdot 28800} + \frac{3 \cdot 9079}{0,00002^2 \cdot 28800} \right) = 98,3 \text{ [dB]}$$

Wartość oszacowanej dziennej ekspozycji na drgania wynosi $2,30 \text{ m/s}^2$ i nie przekracza wartości NDN. Jednocześnie nie przekracza wartości progu działania. Natomiast wartość oszacowanego poziomu dziennej ekspozycji na hałas wynosi $98,3 \text{ dB}$ i przekracza wartość NDN. W związku z czym należy dobrać na podstawie procedur opisanych w rozdziale 2.2.8

indywidualne środki ochrony osobistej w postaci dousznych wkładek antyhałasowych lub/i nauszników antyhałasowych.

Przypadek #2

Trzebież średnia na powierzchni leśnej opisanej w rozdziale 6.1.; łączna liczba ściętych drzew w ciągu dnia wynosi 55, co odpowiada średniej dziennej wydajności ilościowej pracy pilarza w zadanych warunkach, przy założeniu pracy w wymiarze 6h dziennie (ze względu na bardzo duży wydatek energetyczny); w tym: 31 sosny, 13 dębów, 6 sztuk brzozy.

I powtarzamy obliczenia jak w poprzednim przypadku.

$$\begin{aligned}
 A(8) &= \sqrt{\frac{1}{T_0} (n_{\text{sosna}} \cdot STVD_{\text{sosna}} + n_{\text{dąb}} \cdot STVD_{\text{dąb}} + n_{\text{brzoza}} \cdot STVD_{\text{brzoza}})} = \\
 &= \sqrt{\frac{1}{28800} (31 \cdot 7654 + 13 \cdot 9609 + 6 \cdot 9166)} = \\
 &= 3,86 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \\
 L_{EX,8h} &= \\
 &= 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{n_{\text{sosna}} \cdot STND_{\text{sosna}}}{p_0^2 \cdot T_0} + \frac{n_{\text{dąb}} \cdot STND_{\text{dąb}}}{p_0^2 \cdot T_0} + \frac{n_{\text{brzoza}} \cdot STND_{\text{brzoza}}}{p_0^2 \cdot T_0} \right) = \\
 &= 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{31 \cdot 2851}{0,00002^2 \cdot 28800} + \frac{13 \cdot 4360}{0,00002^2 \cdot 28800} + \frac{6 \cdot 9079}{0,00002^2 \cdot 28800} \right) = \\
 &= 102,4 \text{ [dB]}
 \end{aligned}$$

Jak wynika z powyższych obliczeń podczas typowego dnia pracy piliarz narażony jest na znaczne przekroczenia wartości dopuszczalnych NDN zarówno dla drgań jak i hałasu.

Także i w tym przypadku należy przeprowadzić procedurę doboru indywidualnych środków ochronnych w postaci: rękawic antywibracyjnych oraz dousznych wkładek antyhałasowych lub/i nauszników antyhałasowych. Procedury doboru wspomnianych elementów ochronnych ubioru piliarza przedstawiono w rozdziałach 2.1.8. oraz 2.2.8.

9.2. Walidacja opracowanej metody oszacowania narażenia na hałas i drgania

Błąd oszacowania dziennej ekspozycji na drgania – $A(8)$ oraz poziomu dziennej ekspozycji na hałas, wyznaczonej z charakterystyką korekcyjną $A - L_{EX,8h,A}$ oraz charakterystyką $C - L_{EX,8h,C}$ został wyznaczony na podstawie scenariuszy prac leśnych zamieszczonych w poprzednim podrozdziale.

W przypadku metody dozymetrycznej do obliczeń przyjęto rzeczywiste dawki drgań i hałasu związane z wycinką jednego drzewa – STVD oraz STND otrzymane na podstawie zarejestrowanych sygnałów: ich wartości uśrednione – dla całej puli statystycznej (dla określonego gatunku drzewa).

Ileokroć mowa o metodzie szacunkowej to do obliczeń przyjęto: uśrednione dla każdego z analizowanych gatunków drzew dawki drgań: $D_{LH,FL} \text{ ŚR}$, $D_{RH,FL} \text{ ŚR}$ i hałasu: $E_{A,FL} \text{ ŚR}$, $E_{C,FL} \text{ ŚR}$, związane wyłącznie z pracą pilarki przy pełnym obciążeniu.

W przypadku, gdy znana jest klasa wieku, gatunek drzewa i sposób podziału pnia na sortymenty drzewne, wyżej wymienione dawki podlegają oszacowaniu (na podstawie opisanych w niniejszej pracy funkcji skalujących), lub ich wartości dobiera się na podstawie opracowanych kart katalogowych dawek drgań i hałasu na stanowisku pilarz-drwal.

Oprócz wymienionych dawek drgań i hałasu, do szczegółowych obliczeń przyjęto także:

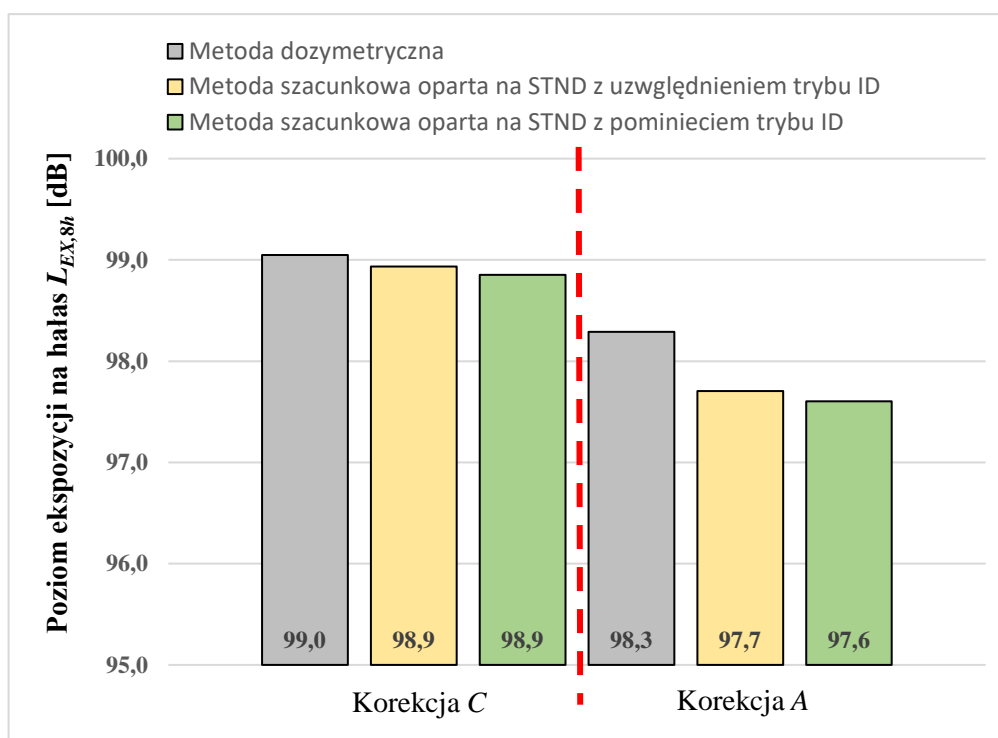
- uśrednione wartości współczynników korekcyjnych: $\alpha_{D1} \text{ ŚR}$, $\alpha_{D2} \text{ ŚR}$, $\alpha_{D3} \text{ ŚR}$
 - w przypadku drgań zarówno prawej jak i lewej rękojeści pilarki;
- uśrednione wartości współczynników korekcyjnych: $\alpha_{E1} \text{ ŚR}$, $\alpha_{E2} \text{ ŚR}$, $\alpha_{E3} \text{ ŚR}$
 - dla hałasu wyznaczonego zarówno z charakterystyką korekcyjną A i C ;

Wyżej wymienione miary i parametry uwzględniające wszystkie stany obciążenia jednostki napędowej pozwalają oszacować rozrzut wartości zarówno w przypadku metody dozymetrycznej jak i szacunkowej, co pozwoli określić przydatność zaproponowanej metodyki na potrzeby wyznaczania poziomu narażenia pracownika zatrudnionego na stanowisku pilarza na drgania i hałas. Wyniki obliczeń przedstawiono poniżej.

9.2.1. Hałas

Przypadek #1:

Dzienny poziom ekspozycji na hałas wyznaczony z charakterystyką korekcyjną $A - L_{EX,8h,A}$ oraz $C - L_{EX,8h,C}$ dla metody: dozymetrycznej, metody szacunkowej oraz metody szacunkowej z pominięciem dawki hałasu wynikającej z pracy pilarki na obrotach jałowych, dla założonego w rozdziale 9.1. pierwszego przypadku związanego z tzw. *Dziennym Planem Cień* przedstawiono na rysunku 9.1. Plan ten dotyczy wycinki 7-miu sosen, 7-miu dębów oraz 3 brzoź.



Rysunek 9.1 Porównanie dziennej ekspozycji na hałas wyznaczonej: metodą dozymetryczną oraz metodą szacunkową opartą na STND z uwzględnieniem i pominięciem pracy pilarki na obrotach jałowych wyznaczonej na podstawie danych ze scenariusza #1

Jak wynika z rysunku 9.1 dzienny poziom ekspozycji na hałas, wyznaczony metodą dozymetryczną z zastosowaniem charakterystyki korekcyjnej A wynosi 98,4 dB, natomiast z zastosowaniem charakterystyki korekcyjnej C wynosi 99,2 dB.

Poziom ekspozycji na hałas wyznaczony zgodnie z procedurą metody szacunkowej opisanej w rozdziale 5 wynosi odpowiednio 97,7 dB dla charakterystyki korekcyjnej A oraz 98,9 dB dla charakterystyki korekcyjnej C .

Różnica pomiędzy wynikiem uzyskanym na podstawie metody szacunkowej (z uwzględnieniem pracy pilarki na obrotach jałowych) a metody dozymetrycznej jest niewielka i wynosi -0,7 dB w przypadku dźwięku A, oraz -0,3 dB dla dźwięku C.

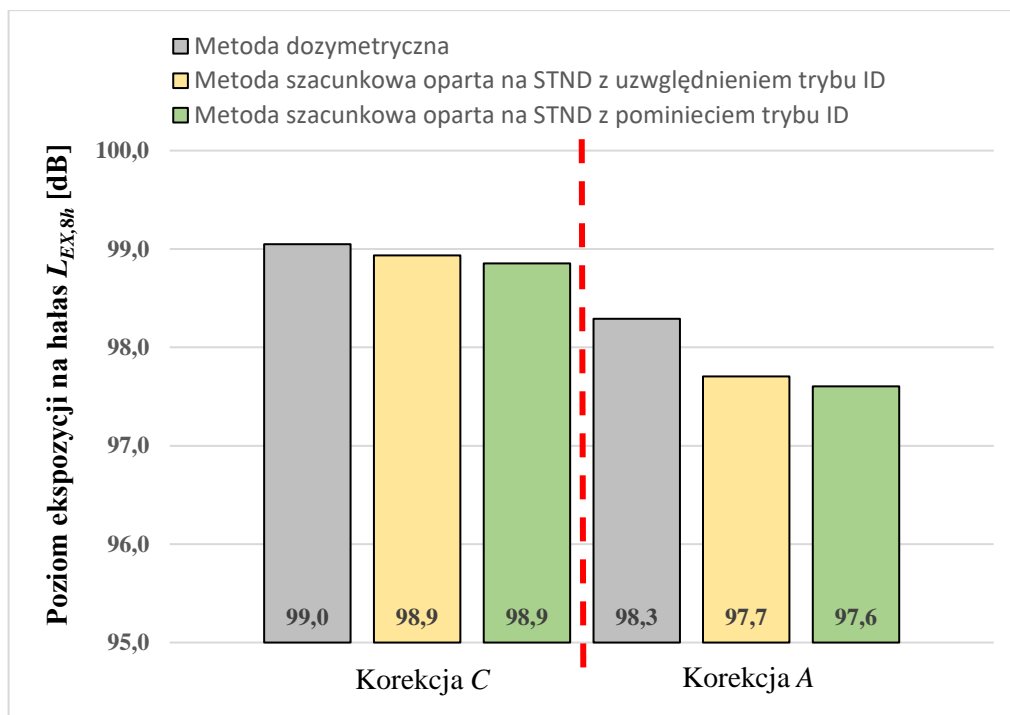
Zgodnie z spostrzeżeniami zawartymi w rozdziale 8.3.6 związanymi z pomijalnie małym udziałem dawki hałasu związanej z pracą pilarki na obrotach jałowych – wartości współczynników korekcyjnych α_{E1} α_{SR} wynoszące mniej niż 0,1; wyznaczono także poziom dziennej ekspozycji na hałas z pominięciem trybu pracy na obrotach jałowych.

Jak widać, różnica pomiędzy wynikiem uzyskanym na podstawie metody szacunkowej – równanie (5.6), i uproszczonej postaci wzoru – z pominięciem dawki cząstkowej E_{ID} , a metody dozymetrycznej jest niewielka i wynosi 0,8 dB w przypadku korekcji A, oraz 0,3 dB dla korekcji C. Można stwierdzić, że uproszczona metoda oszacowania dziennej ekspozycji na hałas daje zbliżone wyniki jak metoda szacunkowa dokładna.

Metoda szacunkowa zaniża niemniej wartość poziomu dziennej ekspozycji na hałas (o ok. 0,1 do 0,7 dB) wyznaczoną zarówno z charakterystyką korekcyjną A oraz C, przy czym charakterystyka korekcyjna C cechuje się większą precyzją oszacowania w porównaniu do charakterystyki A – oszacowanie jest bliższe wartości uzyskanej metodą dozymetryczną.

Przypadek #2:

Analogicznie jak dla przypadku #1, na rysunku 9.2 porównano wyniki poziomów dziennej ekspozycji na hałas wyznaczonych metodą dozymetryczną oraz metodą szacunkową dokładną i uproszczoną z zastosowaniem krzywych korekcyjnych A i C. Przypadek #2 w ramach *Dziennego Planu Cięć* zakłada wycinkę: 31 sosen, 13-tu dębów oraz 6-ciu brzoź.



Rysunek 9.2 Porównanie dziennej ekspozycji na hałas wyznaczonej: metodą dozymetryczną oraz metodą szacunkową opartą na STND z uwzględnieniem i pominięciem pracy pilarki na obrotach jałowych wyznaczonej na podstawie danych ze scenariusza #2

Poziomą dziennej ekspozycją na hałas (rys. 9.2) wyznaczoną metodą dozymetryczną wynosi 102,5 dB (korekcja A) oraz 103,3 dB (korekcja C), co świadczy o przekroczeniu wartości NDN.

Oszacowanie poziomu dziennej ekspozycji na hałas metodą dokładną (z uwzględnieniem) pracy pilarki na obrotach jałowych daje następujące wyniki: 101,9 dB (korekcja A) oraz 103,1 dB (korekcja C).

Pominięcie stanów pracy pilarki związanych z obrotami jałowymi powoduje nieznaczną zmianę (spadek) poziomu dziennej ekspozycji na hałas w porównaniu do metody szacunkowej dokładnej. Oszacowane wartości wynoszą odpowiednio: 101,8 dB dla korekcji A i 103,0 dB dla korekcji C.

Analogicznie jak dla przypadku #1 metoda szacunkowa zaniża wartość poziomu dziennej ekspozycji na hałas, wyznaczoną zarówno z charakterystyką korekcyjną A oraz C, przy czym charakterystyka korekcyjna C cechuje się większą precyzją oszacowania w porównaniu do charakterystyki A – oszacowanie jest bliższe wartości uzyskanej metodą dozymetryczną.

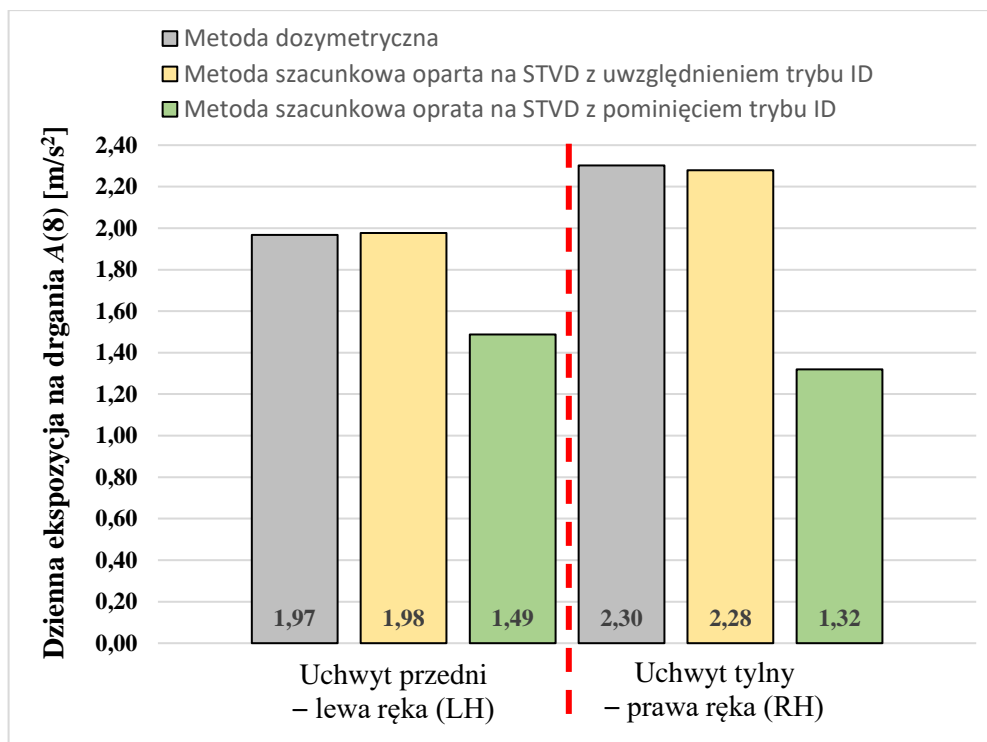
9.2.2. Drgania

Przypadek #1:

Dzienną ekspozycję na drgania, dla obu rękojeści pilarki, wyznaczoną metodą dozymetryczną, metodą szacunkową dokładną – z uwzględnieniem wszystkich 4-rech stanów obciążenia jednostki oraz metodą szacunkową uproszczoną (z pominięciem pracy urządzenia na obrotach jałowych) przedstawiono na rysunku 9.3.

Na podstawie zaprezentowanych wyników (rys. 9.3) można stwierdzić, że uchwytem dominującym jest uchwyt tylny pilarki (sterujący) – w większym stopniu narażona jest prawa ręka.

Dzienna ekspozycja na drgania związana z uchwytem przednim (podtrzymujący) – lewa ręka wynosi: $1,97 \text{ m/s}^2$ dla metody dozymetrycznej i $1,98 \text{ m/s}^2$ dla metody szacunkowej. Natomiast dla uchwytu tylnego (sterujący) – prawa ręka dzienna ekspozycja na drgania wyznaczona metodą dozymetryczną wynosi $2,30 \text{ m/s}^2$, a metodą szacunkową $2,28 \text{ m/s}^2$. Różnica pomiędzy wynikiem uzyskanym metodą dozymetryczną a metodą szacunkową dokładną wynosi $0,01 \text{ m/s}^2$ dla uchwytu przedniego pilarki i $0,02 \text{ m/s}^2$ dla uchwytu tylnego. Wyniki uzyskane metodą szacunkową dokładną są zatem niemal identyczne z tymi jakie otrzymano metodą dozymetryczną co potwierdza duże walory aplikacyjne opracowanej metodyki – błąd wynosi poniżej 0,5%.



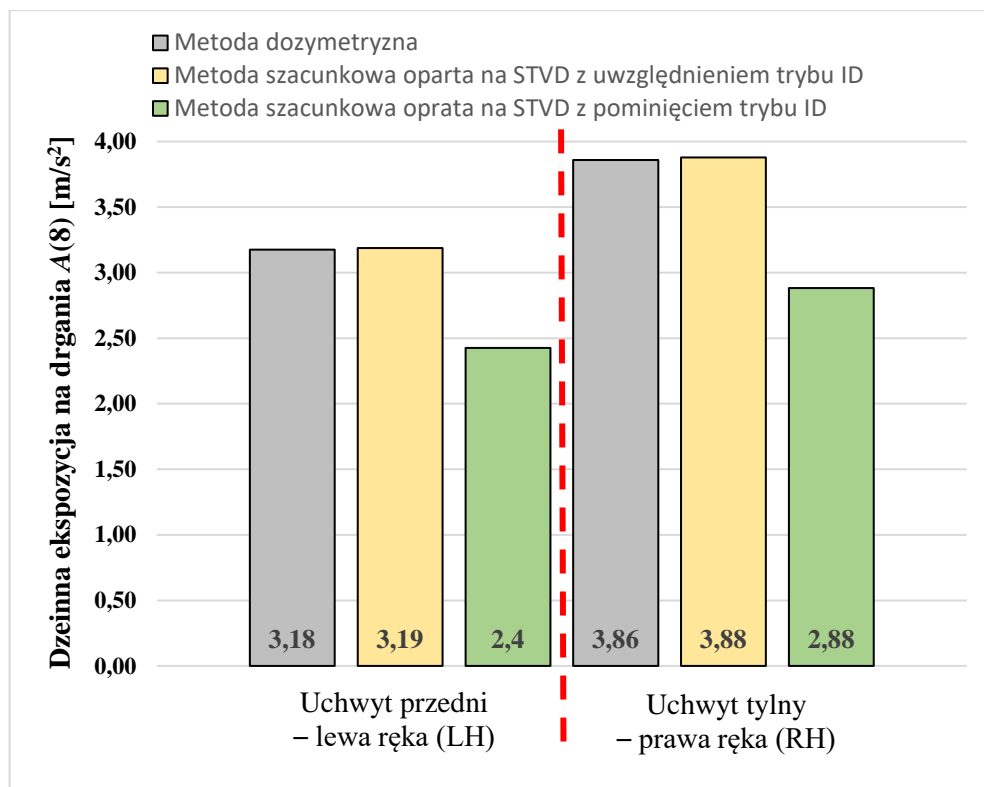
Rysunek 9.3 Porównanie dziennej ekspozycji na drgania wyznaczonej: metodą dozymetryczną oraz metodą szacunkową opartą na STVD z uwzględnieniem i pominięciem pracy pilarki na obrotach jałowych wyznaczonej na podstawie danych ze scenariusza #1

Natomiast zaniedbanie któregośkolwiek ze stanów obciążenia pilarki powoduje znaczny błąd oszacowania dziennej ekspozycji na drgania rzędu 30 % (np. w przypadku pominięcia dawki drgań związanej z pracą na biegu jałowym).

Przypadek #2:

Dzienną ekspozycję na drgania (dla obu rękoności pilarki), uzyskaną na podstawie trzech wymienionych wyżej metod (dozymetrycznej, szacunkowej dokładnej i szacunkowej uproszczonej), na jaką narażona jest osoba zatrudniona na stanowisku pilarz-drwał realizująca *Dzienny Plan Ciec* związany z opisanym przypadkiem #2 przedstawiono na rysunku 9.4.

Dzienna ekspozycja na drgania związana z uchwytem przednim (podtrzymujący) – lewa ręka wynosi: $3,18 m/s^2$ dla metody dozymetrycznej i $3,19 m/s^2$ dla metody szacunkowej dokładnej. Natomiast dla uchwytu tylnego (sterujący) – prawa ręka dzienna ekspozycja na drgania wyznaczona metodą dozymetryczną wynosi $3,86 m/s^2$, a metodą szacunkową dokładną $3,88 m/s^2$.



Rysunek 9.4 Porównanie dziennej ekspozycji na drgania wyznaczonej: metodą dozymetryczną oraz metodą szacunkową opartą na STVD z uwzględnieniem i pominięciem pracy pilarki na obrotach jałowych wyznaczonej na podstawie danych ze scenariusza #2

Tak jak dla przypadku #1, także i tym razem różnica pomiędzy wynikiem uzyskanym metodą dozymetryczną a metodą szacunkową dokładną wynosi 0,01 m/s² dla uchwytu przedniego pilarki i 0,02 m/s² dla uchwytu tylnego – błąd oszacowania dziennej ekspozycji na drgania z użyciem metody szacunkowej dokładnej względem metody dozymetrycznej wynosi poniżej 0,5%.

10. Wnioski

Na podstawie wyników badań przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy sformułowano wnioski oraz przesłanki do dalszych badań w zakresie parametryzacji niestacjonarnych oddziaływań zmechanizowanych narzędzi ręcznych o niestacjonarnym trybie pracy.

Wnioski ogólne:

Aktualnie stosowane metody i strategie pomiarów drgań i hałasu na stanowiskach pracy są, za wyjątkiem pomiarów całodziennych (dozymetrycznych) nieadekwatne do zastosowania na stanowisku pracy jakim jest pilarz-drwal. Wynika to ze specyfiki pracy pilarza oraz ograniczeń tych metod. Uzasadnionym było zatem opracowanie alternatywnej do pomiarów dozymetrycznych metody szacunkowej, opartej na zdefiniowanych w pracy dawkach drgań i hałasu związanych z wyrzynką jednego drzewa – STVD i STND, pozwalającej na oszacowanie narażenia na drgania i hałas bez konieczności wykonywania pomiarów w strefie zagrożenia (wycinki drzew).

Wnioski poznawcze:

- Obowiązujące normy dotyczące pomiarów drgań i hałasu na stanowiskach pracy nie są ze sobą spójne. W kolejnych częściach norm stosowane są różne pojęcia i nazwy tych samych miar. Treść norm w wersjach polskojęzycznych, wprowadza dodatkowe nieścisłości dotyczące terminologii.
- Strategie związane z pomiarami dozymetrycznymi pomimo największej dokładności i wiarygodności ze względów technicznych mogą przysparzać trudności w realizacji pomiarów, szczególnie w przypadku specyficznej grupy stanowisk, której główną cechą jest mobilność pracownika.
- W normach związanych z pomiarami drgań miejscowych brak jest konsekwencji dotyczącej osi i układów odniesienia. Normy ISO 5349 oraz ISO 22867 sugerują inne położenie punktów mocowania przetworników drgań, co może skutkować rozbieżnościami otrzymywanych wyników. Ponadto zalecane w normie ISO 22867 miejsce

zamocowania przetwornika uniemożliwia (w przypadku pilarki) zadziałanie systemów bezpieczeństwa.

- Zarejestrowany na stanowisku pracy hałas i utworzone na ich podstawie spektrogramy pozwalają stwierdzić, że hałas emitowany przez pilarki ma niestacjonarny charakter zarówno w ujęciu amplitudowym jak i częstotliwościowym. Dla pracy przy pełnym obciążeniu i pracy na obrotach maksymalnych dominujące amplitudowo składowe widma widoczne są w zakresie do ok. 12 kHz, natomiast w przypadku pracy pilarki na biegu jałowym składowe widma występują w zakresie do 500 Hz.
- Na podstawie sonogramów można wskazać przedziały czasu, w których pilarka pracuje przy pełnym obciążeniu, co jest związane ze ściną lub przerzynką pnia drzewa oraz pracą na obrotach maksymalnych bez obciążenia (okrzesywanie gałęzi). Jednakże występowanie ww. należy weryfikować na podstawie analizy poklatkowej synchronicznie zarejestrowanego obrazu wideo.
- Widma oktawowo hałasu emitowanego przez pilarkę podczas wyrzynki różnych gatunków drzew mają podobny charakter. Najwyższe wartości poziomu ciśnienia akustycznego zmierzono w oktawach o częstotliwościach środkowych 500Hz do 4 kHz, co pokrywa się pasmem największej czułości ludzkiego ucha. Hałas emitowany przez pilarkę jest szczególnie uciążliwy.
- Na podstawie pomiarów hałasu nie stwierdzono przekroczeń wartości NDN dla szczytowego poziomu dźwięku $C - L_{C peak}$. Zmierzone wartości były o ok. 10 dB niższe niż poziom dopuszczalny wynoszący 135 dB. Maksymalne poziomy dźwięku $A - L_{A max}$ osiągały wartości 113 do 115 dB, co wskazuje na konieczność monitorowania wartości tego parametru (NDN dla $L_{A max} = 115$ dB).
- Chwilowe poziomy dźwięku A i C zmieniają się w trakcie pracy pilarki od ok. 82 do 117 dB, co potwierdza niestacjonarny charakter pracy tego urządzenia. Praca pilarki na obrotach jałowych generuje hałas, którego poziom przekracza wartość progu działania (80 dB).
- Charakter oddziaływań drgań generowanych przez pilarkę, ma charakter niestacjonarny. Dominujące amplitudowo składowe widma przyspieszeń drgań zawierają się w pasmach: do 250 Hz oraz w zakresie od ok. 300 do 500 Hz. Są to zakresy odpowiednio zmian częstotliwości składowej obrotowej wału pilarki oraz zakresu zmian częstotliwości związanej z drugą nadharmoniczną składowej obrotowej i procesu technologicznego (skrawania).

- Zastosowanie korekcji W_h w odniesieniu do spektrogramów przyspieszeń drgań pilarki uwydatnienia zjawiska i procesy istotne z punktu oddziaływania na operatora pilarki. Dominująca amplitudowo składowa związana jest z pracą pilarki na biegu jałowym (ok 46 Hz). Źródło drugiej istotnej składowej o częstotliwości ok. 14 Hz, nie zostało zidentyfikowane. Z dużym prawdopodobieństwem może ona mieć związek z częstotliwością rezonansową układu zawieszenia silnika pilarki lub częstotliwością rezonansową układu ręka-ramię-narzędzie.
- Na podstawie uśrednionych dla całego procesu wyrzynki drzew a_{hv} można stwierdzić, że większe narażenie operatora pilarki na drgania pochodzi z uchwytu tylnego pilarki, zatem pomiary drgań można by ograniczyć wyłącznie do niego.
- Maksymalny dopuszczalny czas pracy pilarką użytą do badań w ciągu zmiany roboczej nie powinien przekroczyć 150 minut.
- Współbieżna analiza materiału audio-video z krótkoczasowo parametryzowanymi sygnałami WA umożliwiła precyzyjne wskazanie poszczególnych operacji jak i stanów pracy pilarki. Dodatkowo możliwe było określenie procentowych udziałów czasu pracy pilarki (dla poszczególnych stanów) w sumarycznym czasie pracy urządzenia.
- Dzięki krótkoczasowemu sekwencjonowaniu sygnałów WA możliwe było wyznaczenie dawek cząstkowych drgań i hałasu związanych z pracą pilarki w trybach pracy (ID, FL, RA oraz UD) oraz dawki sumarycznej STVD i STND związanej z wyrzynką pojedynczego drzewa.
- Najwyższe udziały dawek drgań w sumarycznej dawce STVD związane są z pracą pilarki na biegu jałowych i przy pełnym obciążeniu – odpowiednio 44,5 i 26,8 %. Najwyższy udział w sumarycznej dawce hałasu STND – 67%, ma praca pilarki przy pełnym obciążeniu.
- Przy szacowaniu narażenia drganiowego należy uwzględnić wszystkie dawki cząstkowe związane z poszczególnymi stanami pracy pilarki. Oszacowując poziom dziennej ekspozycji na hałas można pominąć dawkę hałasu związaną z pracą urządzenia na biegu jałowym.
- Znajomość dawek cząstkowych i dawki sumarycznej umożliwia wyznaczenie wartości współczynników wagowych, które są istotne z punktu widzenia opracowanej metody.

- Pomiaru geometryczne pozyskanych w trakcie testów sortymentów drzewnych i powiązanie ich z poszczególnymi dawkami cząstkowymi drgań i hałasu są niezbędne do utworzenia funkcji skalujących, które są istotną częścią opracowanej metodyki.
- Dawki sumaryczne drgań i hałasu – STVD, STND oraz współczynniki wagowe i funkcje skalujące są podstawowymi danymi w kartach katalogowych pilotażowej bazy danych opracowanej na potrzeby zaproponowanej metodyki.

Wnioski użyteczne:

- W miarę realizacji kolejnych pomiarów w warunkach rzeczywistych możliwa będzie rozbudowa bazy danych STVD i STND, co powinno przyczynić się do zwiększenia wiarygodności oszacowania narażenia na drgania i hałas na stanowisku pilarza. Jednakże, będzie to wymagało prowadzenia długoletnich badań w warunkach rzeczywistych.
- Aby ocena narażenia na hałas była pełna oraz przydatna z punktu widzenia doboru ochronników słuchu, to oprócz obecnie wymaganych wartości: $L_{EX,8h}$, $L_{A max}$, oraz $L_{C peak}$. postuluje się, aby wprowadzić obowiązek informacyjny związany z wartościami następujących wielkości/parametrów: składem widmowym hałasu – szczególnie w pasmach oktawowych, w przypadku wystąpienia przekroczeń wartości NDN dla $L_{A max}$ i $L_{C peak}$ uzasadnione byłoby wprowadzenie obowiązku informacyjnego dotyczącego parametrów i charakterystyk niezbędnych do doboru ochronników słuchu.
- W przypadku narażenia na drgania miejscowe oprócz podawania informacji o wartościach $A(8)$ i $a_{hv,i max}$ uzasadnione byłoby podawanie maksymalnej wartości przyspieszeń drgań – $a_{I hv max}$, oraz łącznego czasu przekroczeń wartości NDN dla narażenia krótkotrwałego tj. $a_{hv,30min dop}$. (powyżej $11,2 \text{ m/s}^2$)

Opracowana metodyka z powodzeniem może być stosowana jako alternatywa do metody dozymetrycznej pomiarów drgań i hałasu. Pozwala na oszacowanie dziennego poziomu ekspozycji na drgania oraz hałas na jakie narażony jest pilarz, bez konieczności prowadzenia regularnych pomiarów dozymetrycznych, które w przypadku przekroczenia wartości NDN powinny być realizowane co 6 miesięcy.

Opracowana metodyka umożliwia prowadzenie bieżącej kontroli narażenia na drgania i hałas, a także opracowania planów dziennych (lub tygodniowych) wycinki drzew gwarantujących uniknięcie przekroczeń wartości NDN dla drgań i hałasu.

Spis literatury

UWAGA !!!: Kolejność wymienionych w spisie pozycji literaturowych odpowiada kolejności ich cytowania w niniejszej pracy.

Dostęp do źródeł internetowych został zweryfikowany i potwierdzony dnia: 25 maja 2023r.

- [1] *Wypadki przy pracy – w pierwszym półroczu 2022 roku - dane wstępne*; Raport Państwowej Inspekcji Pracy;
<https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/rynek-pracy/warunki-pracy-wypadki-przy-pracy/wypadki-przy-pracy-w-pierwszym-polroczu-2022-roku-dane-wstepne,3,48.html>;
- [2] Gliński Z., Kostro K., (2009). *Zwierzęta nieudomowione źródłem chorób odzwierzęcych – zoonotyczne czynniki wirusowe*. *Życie weterynaryjne*, 84 (7): 536–541;
- [3] Skorupski M., Wierzbicka A., (2013). *Vademecum wybranych chorób odzwierzęcych w środowisku leśnym*. Katedra Łowiectwa i Ochrony Lasu, Wydział Leśny Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu;
- [4] Calcante A., Facchinetti D., Pessina D., (2018). *Analysis of Hazardous Emissions of Hand-Operated Forestry Machines Fuelled with Standard Mix or Alkylate Gasoline*. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 39 (1): 109–116;
- [5] Dimou V., Anezakis V., Demertzis K., Lliadis L. S., (2017). *Comparative Analysis of Exhaust Emission caused by Chainsaws with Soft Computing and Statistical Approaches*. *International journal of Environmental Science and Technology*, 15 (3): 1–12;
- [6] Lijewski P., Fuc P., Dobrzyński M., Markiewicz F., (2017). *Exhaust emissions from small engines in handheld devices*. *MATEC Web of Conferences*, VII International Congress on Combustion Engines, 188 (00016): 1–5;
- [7] Neri F., Foderi C., Laschi A., Fabiano F., Cambi M., Sciarra G., Aprea M. C., Cenni A., Marchi E., (2016). *Determining exhaust fumes exposure in chainsaw operators*. *Environmental Pollution*, 218: 1162–1169;
- [8] *Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej; Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dn. 12.06.2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy*; Dz. U. 2018 poz. 1286 (z późniejszymi zmianami);
<https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20180001286>;
- [9] *Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej; Ustawa z dn. 26 czerwca 1974 r. Kodeks Pracy*; Dz. U. 1974 Nr. 24 poz. 141 (z późniejszymi zmianami);
<https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu19740240141>;
- [10] Griffin M. J., Howart H. V. C., Pitts M. P., Fischer S., Kaulbars U., Donati P. M., Bereton P. F.; *Guide to Good Practice on Hand-Arm Vibration. Non-Binding Guide to Good Practice with a View to*

Implementation of Directive 2002/44/EC on the Minimum Health and Safety Requirements Regarding the Exposure of Workers to the Risks Arising from Physical Agents (Vibrations); HAV Good Practice Guide V7.7.: 12;

- [11] *Hałas w środowisku pracy. Zagrożenia i profilaktyka. Materiały szkoleniowe.* Serwis internetowy „Bezpieczniej” Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego;
https://m.ciop.pl/CIOPPortalWAR/file/84313/BEZPIECZNIEJ_Halas_Materialy_szkoleniowe_2017.pdf;
- [12] PN-EN ISO 11200:2014-10 *Akustyka – Hałas emitowany przez maszyny i urządzenia – Wytyczne stosowania norm podstawowych dotyczących wyznaczania poziomów ciśnienia akustycznego emisji na stanowisku pracy i w innych określonych miejscach;*
- [13] ISO 25417:2007 *Acoustics — Definitions of basic quantities and terms (Akustyka – Definicje podstawowych wielkości i terminologia);*
- [14] PN-EN ISO 9612:2011 *Akustyka – Wyznaczanie zawodowej ekspozycji na hałas – Metoda techniczna;*
- [15] Bortkiewicz A., Czaja N., (2018). *Extra-hearing effects of noise, with particular emphasis on cardiovascular diseases.* Forum medycyny rodzinnej: wybrane problemy kliniczne, 12 (2): 41–49;
- [16] Basner M, Babisch W., Davis A., Brink M., Clark C., Janssen S., Stansfeld S.; (2014). *Auditory and non-auditory effects of noise on health.* The Lancet, 383(9925): 1325–1332;
- [17] Basner M., Brink M., Bristow A., de Kluizenaar Y., Finegold L., Jiyoung Hong, Janssen S. A., Klæboe R., Leroux T., Liebl A., Matsui T., Schwela D., Śliwińska-Kowalska M., Sörqvist P.; (2015). *ICBEN review of research on the biological effects of noise 2011–2014.* Noise and Health, 17 (75): 57–82;
- [18] Fonseca A., Aghazadeh F., de Hoop C., Ikuma L., Al-Quaisi S., (2015). *Effect of Noise Emitted by Forestry Equipment on Worker’s Hearing Capacity.* International Journal of Industrial Ergonomics, 46: 105–112;
- [19] https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo_Webera-Fechnera;
- [20] PN-EN ISO 1996:1–2006 *Akustyka – Opis, pomiary i ocena hałasu środowiskowego – Część 1: Wielkości podstawowe i procedury oceny;*
- [21] PN-EN 61672-1:2014-03 *Elektroakustyka – Mierniki poziomu dźwięku – Część 1: Wymagania;*
- [22] IEC 801-21-22: *Acoustics and electroacoustics: General terms;*
- [23] <https://www.acoustic-glossary.co.uk/sound-pressure.htm#reference-sound-pressure>;
- [24] *Podstawy Akustyki;* M. Kirpluk; edycja 2021-12;
<https://www.ntlmk.com/biblioteka/M.Kirpluk%20-%20Podstawy%20akustyki%20-%202021-12.pdf>;
- [25] PN-N-01307:1994 *Hałas – Dopuszczalne wartości hałasu w środowisku pracy – Wymagania dotyczące wykonywania pomiarów;*
- [26] Bernard P.; (1986). *Environmental noise Measurements in Technical Review;* No. 1 – 1986; Brüel&Kjær, Nærum, Danemark;

- [27] <https://docplayer.pl/3440333-Halas-na-stanowiskach-pracy-witold-mikulski-anna-karczmarzka-jolanta-koton.html>;
- [28] Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej; *Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 5 sierpnia 2005 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne*; Dz. U. 2005, nr 157, poz. 1318 (z późniejszymi zmianami);
<https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20051571318>;
- [29] Szyber J.; (2007). *Narzędzia i maszyny do głównych operacji pozyskiwania drewna: notatki autoryzowane*; Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, ISBN 8360691339;
- [30] PN–N–18002:2011 *Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Ogólne wytyczne do oceny ryzyka zawodowego*;
- [31] Materiały szkoleniowe przekazane przez CIOP w trakcie szkolenia z zakresu „Zagrożenie hałasem i wibracją w miejscu pracy” – Centrum Edukacyjne Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego; 11 maja 2022
- [32] https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?_nfpb=true&_pageLabel=P620059861340178661073&html_tresc_root_id=32274&html_tresc_id=3000244&html_klucz=32274&html_klucz_spis;
- [33] PN–EN 458:2016 *Ochronniki sluchu. Zalecenia dotyczące doboru, użytkowania, konserwacji codziennej i okresowej. Dokument przewodni*;
- [34] Chetter I. C., Kent P. J., R. C. Kester R. C.; (1998). *The Hand Arm Vibration Syndrome: A Review*. SAGE Journal, Cardiovascular Surgery, 6 (1):1–9;
- [35] Heaver C., Goonetilleke K. S., Ferguson H., Shiralkar S.; (2011). *Hand–arm vibration syndrome: a common occupational hazard in industrialized countries*. Journal of Hand Surgery, 36(5): 354–363;
- [36] Bovenzi M.; (1998). *Exposure-response relationship in the hand-arm vibration syndrome: an overview of current epidemiology research*. International archives of occupational and environmental health, 71: 509–519;
- [37] Virokannas H.; (1990). *Cardiovascular Reflex in Workers Exposed to Hand–Arm Vibration*. The Kurume Medical Journal, 37: 101–107;
- [38] Sakaguchi S., Miyai N., Takemura S., Fukumoto J., Tomura T., Shiozaki M., Kurasawa S., Yokoi K., Terada K., Yoshimasu K., Miyashita K.; (2011). *Morphologic Classification of Nail fold Capillary Microscopy in Workers Exposed to Hand–Arm Vibration*. Industrial Health, 49: 614–618;
- [39] Harazin B., Harazin–Lechowska A., Kałamarz J.; (2007). *Effect of Individual Finger Skin Temperature on Vibrotactile Perception Threshold*. International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health, 20(3): 223–227;

- [40] Harazin B., Harazin–Lechowska A.; (2013). *Effect of Changes in Finger Skin Temperature on Vibrotactile Perception Threshold*. International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health, 26(6): 930–939;
- [41] Harada H.; (1994). *Autonomic Nervous Function of Hand–Arm Vibration Syndrome Patients*. Nagoya Journal of Medical Science, 57: 77–85;
- [42] Ando H., Noguchi R., Ishitake T., Matoba T.; (2002). *Effect of Cold Ambient Temperature on Palmar Sweating Response to Vibration Stress*. European Journal Applied Physiology, 87: 315–317;
- [43] Su A. T., Maeda S., Fukumoto J., Miyia N., Isahak M., Yoshioka A., Nakajima R., Bulgiba A., Miyashita K.; (2014). *A Cross Sectional Study on Hand-Arm Vibration Syndrome Among a Group of Tree Fellers in a Tropical Environment*. Industrial Health, 52: 367–376;
- [44] Futatsuka M., Miyakita T., Miura H.; (1996). *An Experimental Study on Changes in Finger Blood Pressure during Chain-Saw Operation*. Industrial Health, 34: 93–100;
- [45] Sakaguchi S., Miyai N., Takemura S., Fukumoto J., Tomura T., Shiozaki M., Kurasawa S., Yokoi K., Terada K., Yoshimasu K., Miyashita K.; (2011). *Morphologic Classification of Nail fold Capillary Microscopy in Workers Exposed to Hand–Arm Vibration*. Industrial Health, 49: 614–618;
- [46] Tanaka M., Nakamura K., Sato K., Tanaka K.; (1997). *Influence of Local Vibration on Finger Functions of Forest Workers*. Industrial Health, 35: 337–342;
- [47] Miyakita T., Miura H., Futatsuka M.; (1990). *Hand-Arm Vibration, Noise, Temperature and Static Load – An Experimental Study of Peripheral Circulation while Operating Chain-saw*. The Kurume Medical Journal, 37: S73–S83;
- [48] Kumlin T., Wiikeri M., Sumari P.; (1973). *Radiological Changes in Carpal and Metacarpal Bones and Phalanges Caused by Chain Saw Vibration*. British Journal of Industrial Medicine, 30: 71–73;
- [49] Lagerstrom E., Magzamen S., Brazile W., Rosecrance J.; (2019). *Active Surveillance of Musculoskeletal Disorder Symptoms in the Development of Safety Interventions for Professional Loggers*. Safety, 5(23): 1–12;
- [50] Grzywiński W., Wandycz A., Tomczak A., Jelonek T.; (2016). *The Prevalence of Self-reported musculoskeletal Symptoms Among Loggers in Poland*. International Journal of Industrial Ergonomics, 52: 12–17;
- [51] Une H., Esaki H.; (1988). *Urinary excretion of adrenaline and noradrenaline in lumberjacks with vibration syndrome*. British Journal of Industrial Medicine, 45: 570–571;
- [52] Matoba T., Chiba M., Sakurai T.; (1985). *Body reactions during chain saw work*. British Journal of Industrial Medicine 42: 667–671;
- [53] PN–EN ISO 5349–1:2004 *Drgania mechaniczne – Pomiar i wyznaczanie ekspozycji człowieka na drgania przenoszone przez kończyny górne – Część 1: Wymagania ogólne*;
- [54] PN–EN ISO 8041–1:2017–07 *Drgania mechaniczne działające na człowieka – Mierniki – Część 1: Mierniki drgań do zastosowań ogólnych*;

- [55] PN-EN 14253+A1:2011 Drgania mechaniczne – Pomiar i obliczanie zawodowej ekspozycji na drgania o ogólnym działaniu na organizm człowieka dla potrzeb ochrony zdrowia – Wytyczne praktyczne;
- [56] Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej; *Rozporządzeniem Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. W sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy*; Dziennik Ustaw 2002, nr. 217, poz. 1833 (z późniejszymi zmianami) <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20022171833>;
- [57] PN-EN ISO 22867:2022-05 *Maszyny leśne i ogrodnicze – Metodyka badania drgań przenośnych maszyn ręcznych z silnikiem spalinowym – Drgania na uchwytach*;
- [58] Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej; *Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 2 lutego 2011 r. W sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy*; Dziennik Ustaw nr. 33; poz. 166 (z późniejszymi zmianami); <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20110330166>
- [59] PN-EN ISO 5349-2:2004 *Drgania mechaniczne. Pomiar i wyznaczanie ekspozycji człowieka na drgania przenoszone przez kończyny górne. Część 2: Praktyczne wytyczne do wykonywania pomiarów na stanowisku pracy*;
- [60] ISO/TS 22704:2022 *Mechanical vibration – Uncertainty of the measurement and evaluation of human exposure to vibration. (Drgania Mechaniczne – Niepewność pomiaru i oceny narażenia człowieka na drgania)*;
- [61] <http://archiwum.ciop.pl/26023.html>;
- [62] PN-EN ISO 10819:2013-12/A1:2019-03 *Drgania i wstrząsy mechaniczne – Drgania działające na organizm człowieka przez kończyny górne – Metoda pomiaru i oceny współczynnika przenoszenia drgań przez rękawice na dłoń operatora*;
- [63] PN-EN ISO 21420:2020-9 *Rękawice ochronne – Wymagania ogólne i metody badań*;
- [64] PN-EN ISO 388+A1:2019-01 *Rękawice chroniące przed zagrożeniami mechanicznymi*;
- [65] Kowalski P., Zając J.; (2022). *Wymagania co do prawidłowego doboru prawidłowego doboru rękawic antywibracyjnych do narzędzi ręcznych – materiały informacyjne*. Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy; https://m.ciop.pl/CIOPPortalWAR/file/93578/Wymagania-do-doboru-rekawic-antywibracyjnych-3SP05_2021_mat-informacyjne.pdf
- [66] Kowalski P., Zając J.; (2022). *Badania wybranych rękawic antywibracyjnych dostępnych na polskim rynku*. Bezpieczeństwo Pracy, 6: 9– 11; https://m.ciop.pl/CIOPPortalWAR/file/94987/20220726113332&BP_6_2022_9_11.pdf
- [67] Irzmańska E.; (2013). *Ocena bezpiecznego czasu użytkowania rękawic ochronnych*. Pomiary Automatyka Kontrola, 59(4): 376– 379;

- [68] Koton J., Kowalski P.; (2002). *Dobór środków ochrony indywidualnej w profilaktyce zespołu wibracyjnego. Bezpieczeństwo Pracy: nauka i praktyka*, 9: 10–12;
- [69] Rukat W., Barczewski R., Jakubek B., Wróbel M.; (2018). *The comparison of vibro-acoustic impact of chainsaws with electric and combustion drives*. In: MATEC Web of Conferences 182, 17th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles; EDP Sciences: 02020;
- [70] Colantoni A., Mazzocchi F., Cossio F., Cecchini M., Bedini R., Monarca D.; (2016). *Comparisons between battery chainsaws and internal combustion engine chainsaws: performance and safety*. *Contemporary Engineering Science*, 9(27): 1315–1337;
- [71] Huber M., Hoffmann S., Brieger F., Hartsch F., Jaeger D., Sauter U. H., (2021). *Vibration and Noise Exposure during Pre-Commercial Thinning Operations: What Are the Ergonomic Benefits of the Latest Generation Professional-Grade Battery-Powered Chainsaws?*. *Forests*, 12(8)/1120: 1–23;
- [72] Wojtkowiak R., Piszcz B., Rzecznik Z., Kowszyński T., Glazar K.; (2007). *Hałas emitowany przez pilarkę łańcuchową z rezonansowym układem wydechowym*. *Prace Komisji Nauk Rolniczych i Komisji Nauk Leśnych; Poznańskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk*, 257–264;
- [73] Skarżyński J., Lipiński R.; (2013). *Effect of kerf height on noise emission level in the internal combustion chain saw Stihl MS 211 and the electric chain saw Stihl E 180C during cross cutting of wood*. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Agriculture Forest Engineering*, 62: 55–62;
- [74] Taş İ., Eyke A.; (2018). *Analysis of Noise Level Caused by a Chainsaw During Tree Feeling Operations. The fourth "INES International Academic Research Congress" (INES-2018)*; DTI University and Alanya Alaaddin Keykubat University, Turkey; 30 Oct.-3 Nov. 2018;
- [75] Billo D., Mendes L., Nascimento G., Fiedler N., Berude L.; (2019). *Analysis of noise transmitted to workers in motor-manual forest harvesting in Minas Gerais State*. *Floresta e Ambiente*, 26(1): e20180395;
- [76] Wojtkowiak R., Kromulski J., Dubowski A.; (2007). *Measurements of noise resulting from cutting chain movements on a chain-saw bar, lubricated with different oils*. *Acta Scientiarum Polonorum. Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria*, 6(1): 85–93;
- [77] Skarżyński J.; (2007). *Wpływ średnicy drewna na wielkość drgań na uchwytach pilarki podczas przerzynki (Effects of wood diameter on vibrations on chain saw handles during crosscutting)*. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*, 05: 2–4;
- [78] Skarżyński J., Wójcik K.; (2008). *Wpływ twardości drewna na poziom drgań uchwytów pilarki spalinowej podczas przerzynki (Timber Hardness Impact on the Level of Vibrations in I.C.E.-Powered Sawing Machine Ggrips During Cutting)*. *Inżynieria Rolnicza*, 1(99): 345–351;
- [79] Rottensteiner C., Tsioras P., Stampfer K.; (2012). *Wood density impact on hand-arm vibration*. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 33(2): 303–312.

- [80] F. Krzysik; (1961). *Wpływ wilgoci i wody na podstawowe własności drewna*; Ochrona Zabytków, 14(1–2); (#52-53): 50–65;
- [81] Otto A., Parmigiani J. P.; (2015). *Velocity, depth-of-cut, and physical property effects on saw chain cutting*. BioResources,10(4); #72: 73–7291;
- [82] Kuvik T., Krilek J., Kováč J., Štefánek M.; (2017). *Impact of the selected factors on the cutting force when using a chainsaw*. Wood Resources, 62: 807–814;
- [83] Rukat W., Jakubek B., Barczewski R., Wróbel M.; (2020). *The influence of the direction of wood cutting on the vibration and noise of chainsaws*. Tehnički vjesnik, 27(6): 1879–1886;
- [84] Suchomel J., Tajboš J., Slančík M.; (2011). *Analysis of Work Time Consumption in the Cutting the Beech Using Motor-Manual Method*. Proceedings of the: 4th International Scientific Conference – Wood-Working Technique; Czech University of Life Sciences Prague: Faculty of Forestry and Wood Sciences, Department of Wood Processing and Department of Forests Harvesting University of Zagreb: Faculty of Forestry Zagreb, Institute for Process Techniques; 7-10 September 2011, Prague, Czech Republic: 548–548;
- [85] Câmpu R. V., Ciubotaru A.; (2017). *Time consumption and productivity in manual tree felling with a chainsaw – a case study of resinous stands from mountainous areas*. Silva Fennica, 51(2); #1657: 1–19;
- [86] Glazar K.; (2013). *Order statistics of effective active time of limbing and conversion at use chainsaw*. Acta Scientiarum Polonorum. Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria, 12(1): 5–13;
- [87] Ciubotaru A., Câmpu R. V.; (2018). *Delimiting and Cross-cutting of Coniferous Trees–Time Consumption, Work Productivity and Performance*. Forests, 9(4); #206: 1–16;
- [88] Wójcik K.; (2012). *Wpływ wielkości pilarki spalinowej i długości jej prowadnicy na wielkość drgań emitowanych podczas okrzesywania*. Nauka Przyroda Technologie, 6(2); #24:1–12;
- [89] Wójcik K., Skarżyński J. G.; (2008). *Wpływ techniki pracy przy przerzynce drewna na drgania i siły na uchwytach pilarki spalinowej*. Inżynieria Rolnicza, 12: 425–431;
- [90] *Instrukcja obsługi pilarki łańcuchowej o napędzie spalinowym marki Stihl ® model MS-181*; <https://www.stihl.pl/instrukcje-obslugi-i-broszury-bezpieczenstwa.aspx>
- [91] Neely G., Burström L., Johansson M.; (2001). *Subjective Responses to Hand-Arm Vibration: Implication for Frequency-Weighting and Gender Differences*. Swedish National Institute for Working Life;
- [92] Neely G., Burström L.; (2006). *Gender differences in subjective responses to hand–arm vibration*. International journal of industrial ergonomics36(2)2: 135–140;
- [93] Bylund S. H.; (1998). *Skador och besvär av vibrationer – en jämförelse mellan kvinnor ochmän (Vibration-induced disorders and symptoms – a comparison between women and men)*. Arbete & Hälsa (Work & Health), 26: 1–21;
- [94] Jakubek B., Rukat W.; (2015). *Influence of a tool’s working diameter on the level of handle vibrations of an impact drill*. Vibroengineering Procedia, 6: 288–291;

- [95] *Instrukcja bezpieczeństwa i higieny pracy przy wykonywaniu podstawowych prac z zakresu gospodarki leśnej*. (2012). Załącznik do zarządzenia nr 36 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z dnia 12 kwietnia 2012 r.;
<https://www.krosno.lasy.gov.pl/documents/149008/3081719/Instrukcja+BHP+PGL+LP.pdf/c66e2293-3f86-5a9e-7a22-5408447c7661>;
- [96] Minetti L., de Souza A. P., Alves J. U., Fiedler N. C.; (2002); *Estudo antropométrico de operadores de motosserra (Anthropometric study of chainsaw operators)*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 6(1): 166–170;
- [97] PN–EN ISO 11681–1:2022–10 *Maszyny dla leśnictwa – Wymagania bezpieczeństwa i badanie pilarek łańcuchowych przenośnych – Część 1: Pilarki łańcuchowe do prac leśnych*;
- [98] Brzózko J., Skarżyński J., Wójcik K., Rednowski M.; (2016). *Doświadczenie pilarza a ryzyko wypadku przy ścinie drzew*. Sylwan, 160(6): 452–458;
- [99] Başbuğ H. S., Özişik K.; (2017). *Brachial Artery Reconstruction After Chainsaw Injury*. Turkiye Klinikleri Cardiovascular Sciences, 29(3): 86–87;
- [100] Gendek A., Aniszewska M., Nurek T., Moskalik T.; (2018). *Stan wyszkolenia i wyposażenie operatorów pilarek spalinowych zatrudnionych przy pozyskaniu drewna w polskich lasach*. Sylwan, 162(2): 118–126;
- [101] Rukat W., Jakubek B.; (2017). *The influence of the cutting tooth design and wear of a saw chain on the vibration level of a chainsaw*. Vibrations in Physical Systems, 28: 1–8;
- [102] Maciak A., Kubańska M., Moskalik T.; (2018). *Instantaneous cutting force variability in chainsaws*. Forests, 9(10), #660: 1–13;
- [103] Wójcik K., Kalinowski T.; (2018). *The speed of blunting of saw chain cutting edges during cross-cutting*. Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Agriculture Forest Engineering, 71: 51–59;
- [104] Maciak A., Kubańska M., Młodzińska E.; (2017). *Impact of saw chain cutters type on cutting efficiency and fuel consumption in timber cutting*. Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Agriculture Forest Engineering, 69: 71–77;
- [105] Sawastian K., Grzywiński W., Turowski R.; (2015). *Analysis of postural strain of loggers during timber harvesting in a spruce stand*. Forestry Letters, 108: 1–6;
- [106] Zhang W., Wang Q., Xu Z., Xu H., Li H., Dong J., Ma X.; (2021). *An experimental study of the influence of hand-arm posture and grip force on the mechanical impedance of hand-arm system*. Shock and Vibration, #9967278: 1–11;
- [107] Lindenmann A., Uhl M., Gowosch T., Matthiesen S.; (2012). *The influence of human interaction on the vibration of hand-held human-machine systems – The effect of body posture, feed force, and gripping forces on the vibration of hammer drills*. Applied Ergonomics 95, #103430: 1–12;

- [108] Jakubek B., Rukat W.; (2016). *Comparison of vibration impact of an impact drill on the human body under different working conditions*. *Vibrations in Physical Systems*, 27: 135–142;
- [109] Stokes B. J.; (1987). *Vibration comparison of twin-cylinder and single-cylinder chainsaws*. *Transactions of the ASAE*, 30(6): 1619–1623;
- [110] Fushimi T., Isemoto H.; (1992). *The measured values of a twin-cylinder chain saw handle's vibration and their changes by conditions of the saw-chain tension*. *Bulletin of the Ehime University Forest (Japan)*, 30: 23–35;
- [111] Inaga H., Ohno S., Kamata Y., Fukuoka T., Nagao Y.; (1987). *Research and Development of Chain Saw Driven by Horizontally Opposed Twin Cylinder Two-stroke Gasoline Engine*. SAE Technical Paper, #870992: 1–12;
- [112] Takimoto, Y., Sukenaga, T., Fujii, Y., Sasaki, I., Gotou, J.; (1984). *On the characteristics of twin-chainsaw: Vibration*. *Bulletin of the Kyoto University Forests (Japan)*, 56: 178–189;
- [113] Neri F., Laschi A., Foderi C., Fabiano F., Bertuzzi L., Marchi E.; (2018). *Determining noise and vibration exposure in conifer cross-cutting operations by using Li-Ion batteries and electric chainsaws*. *Forests*, 9(501): 1–13;
- [114] Landekič M., Bačić M., Pandur Z., Šušnjar M.; (2020). *Vibration levels of used chainsaws*. *Forests*, 11(2) #249: 1–10;
- [115] Wojtkowiak R., Piszcz B., Zembrowski K.; (2012). *Drgania mechaniczne emitowane przez pilarkę spalinową Husqvarna 357xp z rezonansowym układem wydechowym*. *Nauka Przyroda Technologie*, 6(3): # 61: 1–10;
- [116] Katalogi, materiały reklamowe, poradniki i instrukcje użytkownika pilarek spalinowych marek: Stihl, Husqvarna; Johnsered, Stiga, Oleo-Mac, Dolmar, Hitachi, Makita, Echo, Shindaiwa – materiały internetowe;
- [117] Skarżyński J., Pietrkiewicz P.; (2013). *Effect of chain saw pitch on vibration level on the internal combustion chain saw handles during cross cutting of wood*. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Agriculture Forest Engineering*, 61: 57–63;
- [118] Kováč J., Krilek J., Dado M., Beňo P.; (2018). *Investigating the influence of design factors on noise and vibrations in the case of chainsaws for forestry work*. *FME transactions*, 46(4): 513–519;
- [119] Wójcik K.; (2017). *Vibrations produced by petrol chainsaws with variable-length guide bars during cross-cutting*. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW, Agricultural and Forest Engineering*, 70: 37–47;
- [120] Tomczak A., Jelonek T.; (2104). *Obsługa pilarki spalinowej – materiały szkoleniowe*. ATJ s.c. Centrum Szkoleń Specjalistycznych, Poznań;
- [121] <http://slideplayer.pl/slide/824447/>;
- [122] Maciak A., Gendek A.; (2015). *Effect of cutting with the chainsaw with two pairs of cutting link per section*. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW, Agriculture*, 50: 59–63;

- [123] Dos Santos Depoi J., Brandelero C., Werner V., Schlosser J. F., Russini A., de Vargas F.; (2022). *Hand-arm Vibration in Different Operating Conditions with a Chainsaw*. Floresta, 52(1): 074–082;
- [124] Pahlitzsch G., Heinz P.; (1968). *Investigations on the cutting with chain saws—Part II: The influence of cutting angles and the importance of chip-thickness-limiter on chain sawing (Untersuchung des Schnittvorganges an Sägeketten—Zweite Mitteilung: Einfluß der Schneidenwinkel und Bedeutung des Spandickenbegrenzers beim Kettensägen)*. Holz als Roh-und Werkstoff, 26: 382–388;
- [125] Stempski W., Jabłoński K., Wegner J.; (2010). *Relations between top-plate filing angle values of cutting chains and chainsaw vibration levels*. Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria, 9(2): 31–39;
- [126] Stempski W., Jabłoński K., Wegner J.; (2010). *Effect of the Edge Geometry in a Cutting Chain on the Chain-Saw Vibration Level*. Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria, 9(1): 25–33;
- [127] Osypiuk R., Gendek A.; (2011). *Ocena prawidłowej obsługi piły łańcuchowej na podstawie parametrów ogniwi*; Współczesne Aspekty Inżynierii Produkcji. XX Międzynarodowa Konferencja Naukowa Studentów. Warszawa, 25 maja 2011; 127–133; <https://depot.ceon.pl/handle/123456789/11829?show=full>;
- [128] Marenč J., Mihelič M., Poje A.; (2017). *Influence of chain filing, tree species and chain type on cross cutting efficiency and health risk*. Forests, 8(12) #464: 1–10;
- [129] Bačić M., Landekić M., Šušnjar M., Šporčić M., Pandur Z.; (2023). *Vibration levels and daily vibration exposure while using different tools in a forest cleaning*. Central European Forestry Journal, 69: #000–000: 1–10;
- [130] Dąbrowski A.; (2012). *Reducing kickback of portable combustion chain saws and related injury risks: laboratory tests and deductions*. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 18 (3): 399–417;
- [131] Dąbrowski A.; (2015). *Kickback risk of portable chainsaws while cutting wood of different properties: laboratory tests and deductions*. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 21 (4): 512–523;
- [132] Kaliniewicz Z., Maleszewski Ł., Krzysiak Z.; (2018). *Influence of saw chain type and wood species on the kickback angle of a chainsaw*. Technical Sciences, 21 (4): 323–334;
- [133] Wójcik K., Kalinowski T.; (2018). *The speed of blunting of saw chain cutting edges during cross-cutting*. Annals of Warsaw University of Life Sciences—SGGW, Agriculture, 71: 51–59;
- [134] Poje A., Mihelič M.; (2020). *Influence of chain sharpness, tension adjustment and type of electric chainsaw on energy consumption and cross-cutting time*. Forests, 11(9), #1017;

- [135] Skarżyński J., Wójcik K.; (2006). *Analysis of influence of technical condition parameters of the petrol chain saw and wood cutting on the magnitude of emitted vibrations*. Acta Scientarum Polonorum, Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria, 5(1): 63–72;
- [136] Pilarek Z., Mielnicki P.; (2008). *Causes of defects of power chainsaws*. Acta Scientarum Polonorum, Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria, 7(4): 45–54;
- [137] <https://polska.geoportal2.pl/map/www/mapa.php?link=862C35FD39808>;
- [138] PN–EN ISO 22868:2021–08 *Maszyny leśne i ogrodnicze – Metodyka badania hałasu prze-nośnych, trzymany w ręku maszyn z silnikiem spalinowym – Metoda techniczna (Klasa dokładności 2)*
- [139] Rukat W., Jakubek B., Barczewski R., Grochalski K.; (2022). *Identification of operating mode of a petrol chainsaw based on short-time parametrization and analysis of vibro-acoustic signals*. Applied Acoustics, 192, #108704: 1–13;
- [140] Wróbel M., Jakubek B., Rukat W.; (2021). *A Device for Measuring the Rotational Speed of a Chain Sprocket of a Petrol Chainsaw*. Advances in Science and Technology Research Journal, 15(3): 99–107;

ZAŁĄCZNIKI:

- [Z1] Spektrogramy przyspieszeń drgań zarejestrowanych na rękojeściach pilarki oraz sonogramy ciśnienia akustycznego zmierzonego w odległości 10 cm od prawego ucha operatora pilarki zarejestrowanych w trakcie wyrzynki wszystkich drzew objętych planem badań;
- [Z2] Widma oktawowo hałasu zmierzonego w odległości 10 cm od prawego ucha operatora pilarki, zarejestrowanych w trakcie wyrzynki wszystkich drzew objętych planem badań;
- [Z3] Zmiany chwilowych wartości sum wektorowych przyspieszeń drgań a_{hv} zarejestrowanych na rękojeściach pilarki oraz zmiany chwilowych wartości ciśnienia akustycznego L_p wyznaczonych z charakterystyką A i C, zmierzonego w odległości 10 cm od prawego ucha operatora pilarki, zarejestrowanych w trakcie wyrzynki wszystkich drzew objętych planem badań;
- [Z4] Uśrednione dla całego procesu wyrzynki wysokorozdzielcze widma przyspieszeń drgań (sumy wektorowej z kierunków x , y , z ; niekorygowane i skorygowane charakterystyką W_h) zarejestrowanych na przednim i tylnym uchwycie pilarki dla każdego z drzew objętych planem badań;
- [Z5] Przykłady identyfikacji stanów pracy pilarki (ID, FL, RA, UD) na podstawie analizy poklatkowej materiału AV zarejestrowanego podczas wyrzynki drzew objętych planem badań wraz z komentarzami przypisującymi i poszczególne operacje realizowane przez pilarza;