

# Eksplatacyjny system wyznaczania w trybie online zużycia młynów wentylatorowych – narzędziem do zmniejszania kosztów wytwarzania

On-line fan mill wear control – as a tool to reduce production costs

JAROSŁAW HERCOG, MIROŚLAW MALINOWSKI, PAWEŁ SAŁEK, CZESŁAW ANDRYJOWICZ, ANDRZEJ DUKAT, TOMASZ BORUTA, MACIEJ GRABOWSKI

DOI 10.36119/15.2023.4.1

W pracy przedstawiono System kontroli młynów wentylatorowych (ADM) przeznaczony do bezpośredniej aplikacji w systemie elektrownianym, w postaci oprogramowania stanowiącego narzędzie wspomagania bezpiecznej eksploatacji, kontroli zużycia a także w zakresie planowania remontów. Program realizuje następujące funkcje eksploatacyjne dla każdego młyna: obliczanie w trybie online bieżącej wartości zużycia erozyjnego zespołu młynowego, prognozy dalszej, bezpiecznej pracy i przewidywanej daty remontu, jak również archiwizacji oraz wizualizacji wybranych parametrów pracy i wskaźników zużycia młyna w kolejnych okresach eksploatacji. W artykule przedstawiono również założenia oraz wyniki zastosowanego algorytmu, jak również doświadczenia z eksploatacji oprogramowania.

*Słowa kluczowe: zużycie erozyjne, młyn wentylatorowy, bijak młyna*

The Monitoring system for fan mills intended for direct application in a power plant system, in the form of software that is a tool supporting safe operation, consumption control, as well as in the field of repair planning, has been presented in the paper. The software performs the following operational functions for each mill: online calculation of the remaining lifetime of beater mill unit, forecast of further safe operation and the expected date of repair, as well as archiving and visualization of selected device operating parameters and wear factors in operational periods. Also, the assumptions and results of the algorithm used, as well as experience from the operation of software has been presented in the paper.

*Keywords: erosive wear, fan mill, millbeater*

## Wstęp

Bezawaryjna praca młynów wentylatorowych jest podstawą prawidłowego funkcjonowania kotła i bloku energetycznego, na które wpływ mają warunki ich eksploatacji, własności fizyczne węgla, zastosowane materiały oraz odpowiedni monitoring zużywania się kluczowych elementów młyna. Adekwatna ocena stanu technicznego młyna oraz prognoza jego dalszej pracy ma kluczowe znaczenie dla bezawaryjnej pracy kotła oraz kosztów eksploatacji. Jak dotąd prace związane ze zbieraniem, analizą danych i oceną żywotności wykonywane są w niewielkim stopniu w sposób zautomatyzowany, wpływając na efektywność i dokładność uzyskiwanych wyników. By sprostać tym wyzwaniom,

PGE GiEK S.A. Oddział Elektrownia Bełchatów oraz Instytut Energetyki Instytut Badawczy opracowały i wdrożyły w Elektrowni Bełchatów system doradczy służący do analizy „on-line” stanu technicznego młynów i wykonywania obliczeń predykcyjnych ich żywotności.

Aplikacja do diagnostyki młynów wentylatorowych (skrótowo ADM) powstała w celu dokładniejszej kontroli procesów zużycia młynów, predykcji ich dalszej, bezpiecznej pracy oraz zoptymalizowania procesu planowania remontów. W obecnej chwili aplikacja obejmuje kontrolą wszystkie młyny elektrowni i na bieżąco dostarcza zarówno dane eksploatacyjne jak i obliczeniowe. Wśród danych dostępnych dla użytkownika znajdują się parametry skumulowane, związane z warunkami eksploatacyjnymi młynów, jak również wyznaczone wskaźniki, związane z ich zużyciem.

Program realizuje następujące funkcje eksploatacyjne dla każdego młyna: obliczanie w trybie online bieżącej wartości zużycia erozyjnego zespołu młynowego, prognozy dalszej, bezpiecznej pracy i przewidywanej daty remontu, jak również archiwizacji oraz wizualizacji wybranych parametrów pracy i wskaźników zużycia młyna w kolejnych okresach eksploatacji. W artykule przedstawiono również założenia oraz wyniki zastosowanego algorytmu, jak również doświadczenia z eksploatacji oprogramowania.

Oprogramowanie rejestruje wszystkie okresy eksploatacji międzyremontowej, a następnie udostępnia je w postaci tabelarycznej, wykresów oraz zestawień dla całej elektrowni. Ponadto umożliwia użytkownikowi wprowadzanie nowych remontów, jak również modyfikację danych.

## Opis modelu zużycia oraz sposobu walidacji

Elementem, który ulega najszybszemu zużyciu w procesie mielenia węgla jest płyta bijakowa z uwagi na działanie największych sił niszczących spowodowanych bezpośrednim kontaktem strumienia

Dr inż. Jarosław Hercog (<https://orcid.org/0000-0003-4891-4592>), mgr inż. Mirosław Malinowski (<https://orcid.org/0000-0002-9823-2429>) – Instytut Energetyki – Instytut Badawczy, Zakład Procesów Ciepłych, Warszawa,

inż. Paweł Sałek – MultizonelT sp. z o.o., Warszawa

mgr inż. Czesław Andryjowicz, mgr inż. Andrzej Dukat, inż. Tomasz Boruta, inż. Maciej Grabowski – PGE GiEK S.A. Oddział Elektrownia Bełchatów, Bełchatów.

Adres do korespondencji/ Corresponding author: [miroslaw.malinowski@ien.com.pl](mailto:miroslaw.malinowski@ien.com.pl)

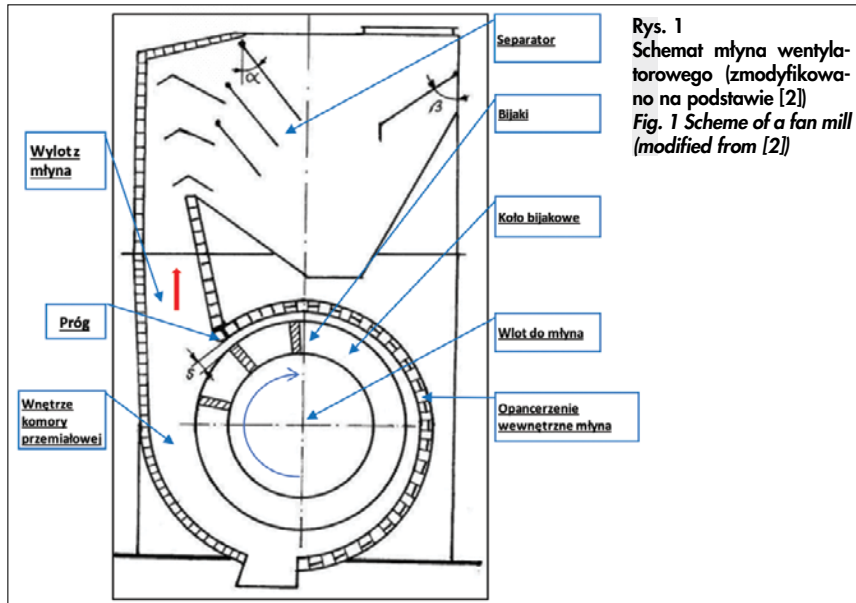
mieszanki (nadawy) z obracającymi się płytami bijakowymi, zainstalowanymi na kole bijakowym. Inne elementy młyna, takie jak parasol, próg czy opancerzenie (rys. 1) również są narażone na uszkodzenia, jednak w znacznie mniejszym stopniu.

owej  $v_0$  i prędkości  $v = r_0$  punktu styku wirującego bijaka z prędkością obrotową. Drugi obszar (II), nazywany obszarem erozji tarciowej, położony w okolicy krawędzi spływu płyty zewnętrznej, to miejsce intensywnego zużycia wskutek tarcia cząstek węgla o powierzchnię płyty. Na pod-

bość i w rezultacie jest zjawiskiem decydującym o trwałości zespołu bijakowego. Na rys. 2 i rys. 3 pokazano przykładowe widoki zużytych płyt bijakowych.



Rys. 3  
Widok zużycia zewnętrznej płyty bijakowej w obszarze spływu  
Fig. 3 View of the erosive wear of the outer beater plate in the trailing area



Rys. 1  
Schemat młyna wentylatorowego (zmodyfikowano na podstawie [2])  
Fig. 1 Scheme of a fan mill (modified from [2])

Zużycie materiału roboczych elementów młyna jest złożonym procesem trybologicznym, o wiele bardziej skomplikowanym niż tradycyjne tarciowe zjawiska trybologiczne. Z uwagi na warunki pracy elementem podlegającym największemu zużyciu erozyjnemu i tym samym decydującym o żywotności młyna jest płyta bijakowa, która ostatecznie została przyjęta jako element kryterialny.

W czasie mielenia węgla oprócz procesów tarciowego usuwania warstwy powierzchniowej bijaków występuje również dynamiczne uderzenie powierzchni cząstkami węgla, co może lokalnie uplastyczniać materiał bijaka oraz powodować kruche mikropęknięcia lub pęknięcia zmęczeniowe (nisko i wysokocyklowe). Wszelkie powierzchniowe pęknięcia przyspieszają zwykłe, tarciowe ubytki materiału bijaka.

Zużycie erozyjne płyt bijakowych jest zależne od kąta natarcia strumienia węgla na materiał płyty (największe występuje pod kątem  $20 - 30^\circ$ ), prędkości cząstek, ich twardości, wielkości, kształtu i masy. W płycie bijakowej istnieją dwa obszary zużycia powierzchniowego. Pierwszy obszar (I), określany obszarem erozji uderzeniowej jest umiejscowiony na początku płyty wewnętrznej, w okolicach wewnętrznego promienia koła bijakowego, w którym cząstka węgla uderza w płytę z prędkością będącą wypadkową prędkości wło-

stawie oględzin płyt bijakowych zużytych w okresie eksploatacji międzyremontowej można stwierdzić, iż pomimo znacznego zużycia płyty wewnętrznej na skutek erozji uderzeniowej, zużycie tarciove płyty zewnętrznej ma charakter dominujący z uwagi na konstrukcję płyty oraz jej gru-



Rys. 2  
Widok zużytych płyt bijakowych, wewnętrznej i zewnętrznej: a) widok prostokątny, b) widok izometryczny  
Fig. 2 View of worn beater plates, inner and outer: a) perpendicular view, b) isometric view

## Siły oddziaływania strumienia węgla na powierzchnię płyty bijakowej

Ponieważ w praktyce prędkość wlotowa mieszanki  $v_0$  jest dużo mniejsza od prędkości  $v$  oddziaływania strumienia węgla na płytę bijakową, zatem można założyć, że cząstki uderzają w obszarze I bijaka z prędkością  $v$  prostopadle do jej powierzchni, powodując plastyczne odkształcenia. W obszarze erozji tarciowej dominującym jest natomiast mechanizm mikroskrawania. Ubytki erozyjne w strefie II powstają na skutek oddziaływania sił [3] (rys. 4): aerodynamicznej  $F_{a'}$ , odśrodkowej  $F_{o'}$ , Coriolisa  $F_c$  oraz tarcia  $F_t$ . Zakładając, że prędkość cząstek węgla oraz gazu wzdłuż płyty jest jednakowa, można pominać siłę  $F_a$  i równanie ruchu cząstki o masie  $m$  opisywane jest równaniem (1):

$$m \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} = F_o - F_t \quad (1)$$

oraz:

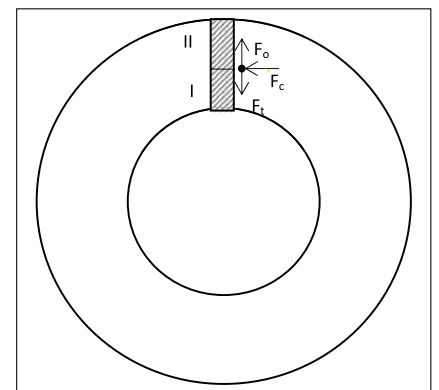
$$F_o = m \cdot 2r \quad (2)$$

$$F_t = fF_c = 2fm \cdot w \quad (3)$$

$$w = \frac{\partial r}{\partial t} \quad (4)$$

gdzie:

- $m$  – masa cząstki,
- $r$  – wektor wodzący,
- $t$  – czas,



Rys. 4  
Rozkład sił na płycie bijakowej  
Fig. 4 Distribution of forces on the beater plate

- prędkość kątowna,
- $f$  - współczynnik tarcia,
- $w$  - prędkość liniowa,
- $F_c = N$  - siła nacisku prostopadła do powierzchni styku ciał.

Równanie (1), po uwzględnieniu zależności (2) - (4) przyjmuje postać (5):

$$\frac{\partial^2 r}{\partial t^2} = \omega^2 r - 2f\omega \frac{\partial r}{\partial t} \quad (5)$$

### Uproszczona metoda wyznaczania zużycia powierzchni płyty bijakowej

Przyjmując uproszczony model zużycia erozyjnego (ściernego), ubytek objętościowy płyty bijakowej można wyrazić ogólną zależnością (6), stosowaną w trybologii:

$$V = k \cdot P \cdot A^r \cdot \frac{L}{H} \quad (6)$$

gdzie:

- $V$  - ubytek objętościowy,
- $P$  - siła oddziaływania,
- $L$  - długość drogi ślizgania,
- $A^r$  - zawartość popiołu w stanie roboczym,
- $H$  - twardość Vickersa materiału bijaka,
- $k$  - współczynnik zużycia.

Rozwinięciem równania (6) są modele [1], zaproponowane przez I.Finniego, J.Bittera, czy H.Nielsona i A.Gilrista. Wymagają one jednak trudnych do wyznaczenia dodatkowych statych, takich jak energia jednostkowa zużycia przez wykruszanie, czy energia jednostkowa zużycia przez skrawanie, w związku z czym, w praktyce, często stosuje się uproszczone wzory empiryczne. Zgodnie z powyższym równanie (6), po uwzględnieniu zależności (1) - (5), można przekształcić do postaci procentowego zużycia płyty bijakowej i wyrazić w postaci (7):

$$Z_{kb} \approx K_b \int \omega^2(t) \cdot \dot{m}(t) \cdot A^r(t) dt \quad (7)$$

gdzie:

- $\dot{m}(t)$  - strumień węgla w [t/h],
- $(t)$  - prędkość obrotowa koła bijakowego w [obr/min],
- $A^r(t)$  - zawartość popiołu w stanie roboczym w [%],
- $K_b$  - empiryczny współczynnik zużycia erozyjnego płyty bijakowej, wyznaczany eksperymentalnie, indywidualnie dla każdego młyna.

Powyższe równanie (7) przedstawia ostateczną postać wzoru zastosowanego do wyznaczania skumulowanego zużycia procentowego płyty bijakowej wykorzystwanego w procesie obliczeniowym oprogramowania ADM.

Współczynnik erozji  $K_b$  we wzorze (7) zależy od wielu parametrów [1], takich jak zmienne w czasie kształt i wielkość cząstek węgla, kąt padania w obszarze II, twardość oraz wiele innych, których wpływ jest trudny do oszacowania. Zakładając jednak ustalone warunki pracy młyna można przyjąć, na użytek modelu uproszczonego, że jest on stały w czasie. Wyznacza się go doświadczalnie na podstawie znajomości pozostałych zmiennych w okresie eksploatacyjnym poprzedzającym remont młyna oraz oceny stopnia zużycia płyt, dokonywanej podczas remontu młyna.

Pozostałe elementy młyna podlegające zużyciu, takie jak parasol, czy próg nie stanowią zagrożenia procesu eksploatacyjnego gdyż w przypadku parasola jego powierzchnia jest chroniona odpowiednio dobranym opancerzeniem, natomiast próg złożony z płyt ustawionych prostopadle względem przepływu mieszanki dysponuje dostatecznym zapasem uniemożliwiającym jego zniszczenie w okresie eksploatacji międzyremontowej. W związku z powyższym dokładnej ocenie zużycia podlegają jedynie płyty bijakowe, natomiast zużycie zarówno płyt ochronnych parasola jak i progu jest określane szacunkowo, w stosunku do zużycia płyt bijakowych.

Na podstawie analizy uszkodzeń oraz badań przeprowadzonych podczas remontów młynów określono wartości współczynnika  $K_b$  dla każdego młyna oddzielnie. Wartość tego współczynnika waha się w zakresie:  $(1,3 - 1,6) \cdot 10^{-10}$  i jest określana indywidualnie po co najmniej dwóch okresach eksploatacyjnych danego młyna. Ponadto współczynnik ten może być kory-

gowany w oprogramowaniu ręcznie na podstawie oceny faktycznego zużycia przeprowadzonej przez zespół remontowy w trakcie prac remontowych młynów.

Wyniki zużycia wybranych młynów otrzymane w aplikacji, po wcześniejszej kalibracji modelu zużycia, skonfrontowane z rzeczywistym zużyciem na podstawie oceny wykonanej podczas remontu potwierdzają dokładność predykcji z błędem nie większym niż 10%.

### Opis budowy aplikacji oraz wykorzystanych technologii do jej produkcji

#### Aplikacja do diagnostyki młynów wentylatorowych ADM

Aplikacja do diagnostyki młynów wentylatorowych składa się z kilku elementów składowych, z których kluczowym jest serwis Windows pobierający dane z bazy danych historycznych elektrowni za pośrednictwem serwerów REST i wykonujący cyklicznie wszystkie zadania obliczeniowe wraz z zapisem wyników do bazy danych SQL. Serwisem pośredniczącym pomiędzy aplikacją klienta a bazą danych programu jest webserwis hostowany przez IIS. Aplikacja klienta, instalowana u użytkownika końcowego służy do prezentacji zarówno wyników bieżących jak i historycznych oraz do sterowania obliczeniami.

#### Opis funkcjonalności oprogramowania

Oprogramowanie do diagnostyki młynów pobiera dane dot. pracy młynów z serwera REST Asix, dokonuje obliczeń i dostarcza użytkownikowi zarówno raporty

**Rys. 5**  
**Raport bieżący młyna**  
**Fig. 5 Mill current report**

| ID | Opis   | Wartość | Minimum    | Maximum | Wartość docelowa |
|----|--|---------|------------|---------|------------------|
| 01 | Data przekazania młyna do ruchu po porządkach remontu    | -       | 2022-12-21 |         |                  |
| 02 | Data bieżących obliczeń                                  | %       | 99,96      |         |                  |
| 03 | Zakresowy czas eksploatacji medianowosłupowej młyna      | h       | 3 903      | 100     |                  |
| 04 | Planowany czas młyna                                     | h       | 3 903      | 100     |                  |
| 05 | Pozostały czas pracy wg zakładanego czasu eksploatacji   | h       | -403       | 100     |                  |
| 06 | Przebiegnięta data remontu wg zakładań                   | -       | 2022-04-29 |         |                  |
| 07 | Przebiegnięta data remontu wg prognozy zużycia           | -       | 2022-07-15 |         |                  |
| 08 | Średni zużycie węgla przez zespół młynowy                | t/h     | 224,290    | 100     |                  |
| 09 | Średni zużycie energii przez zespół młynowy              | MWh     | 3 410      | 100     |                  |
| 10 | Zużycie energii przez zespół młynowy                     | MWh     | 16         | 100     |                  |
| 11 | Wydajność maksymalna trwałego zacczawia                  | t/h     | 72         | 100     |                  |
| 12 | Wydajność maksymalna trwałego zacczawia                  | t/h     | 99         | 100     |                  |
| 13 | Stopień zużycia koła bijakowego                          | %       | 0          | 100     |                  |
| 14 | Pozostały czas pracy koła bijakowego wg prognozy zużycia | h       | 0          | 100     |                  |
| 15 | Współczynnik korekcyjny K zużycia                        | %       | 1,53       |         |                  |
| 16 | Zakres wymiaru opancerzeń na koła bijakowym              | %       | 100        |         |                  |
| 17 | Data zakładowania koła bijakowego                        | -       | 2021-12-21 |         |                  |
| 18 | Materiał płyty bijakowej                                 | -       | 9025       |         |                  |
| 19 | Symbol oznaczenia koła bijakowego                        | -       | 0942       |         |                  |
| 20 | Symbol oznaczenia koła bijakowego                        | -       | 96         |         |                  |
| 21 | Czas pracy koła bijakowego                               | h       | 4 689      | 100     |                  |
| 22 | Całkowita ilość zremontowanego węgla przez koła bijakowa | t       | 275 139    | 100     |                  |
| 23 | Stopień zużycia progu                                    | %       | 21         | 100     |                  |
| 24 | Zakres wymiaru paraola                                   | %       | 100        |         |                  |
| 25 | Data zakładowania paraola                                | -       | 2021-12-21 |         |                  |
| 26 | Materiał paraola   | -       | 695        |         |                  |
| 27 | Czas pracy paraola                                       | h       | 3 903      | 100     |                  |
| 28 | Stopień zużycia paraola                                  | %       | 100        |         |                  |
| 29 | Zakres wymiaru paraola                                   | %       | 100        |         |                  |
| 30 | Data zakładowania paraola                                | -       | 2021-12-21 |         |                  |
| 31 | Materiał paraola   | -       | 9025       |         |                  |
| 32 | Czas pracy paraola                                       | h       | 3 903      | 100     |                  |
| 33 | Temperatura powietrza przed młynem                       | °C      | 407        | 94      | 100              |
| 34 | Temperatura powietrza przed młynem                       | °C      | 416        | 51      | 100              |
| 35 | Temperatura powietrza za młynem                          | °C      | 144        | 37      | 100              |
| 36 | Temperatura powietrza za młynem                          | °C      | 878        | 562     | 100              |
| 37 | Obciążenie silnika młyna                                 | kW      | 11         | 0       | 100              |
| 38 | Obciążenie silnika podopiecznika zgroszowego             | kW      | 23         | 1       | 99               |
| 39 | Prędkość powietrza pierwotnego do rurowozwrotu           | %       | 1          | 0       | 99               |
| 40 | Obciążenie silnika na banku rozpraszającego powietrze    | %       | 1          | 0       | 99               |
| 41 | Temperatura pracy koła bijakowego                        | °C      | 848        | 61      | 865              |
| 42 | Zawartość popiołu w węglu w stanie rob.                  | %       | 12         | 12      | 12               |
| 43 | Zawartość popiołu całkowitego w węglu w stanie rob.      | %       | 33         | 53      | 53               |



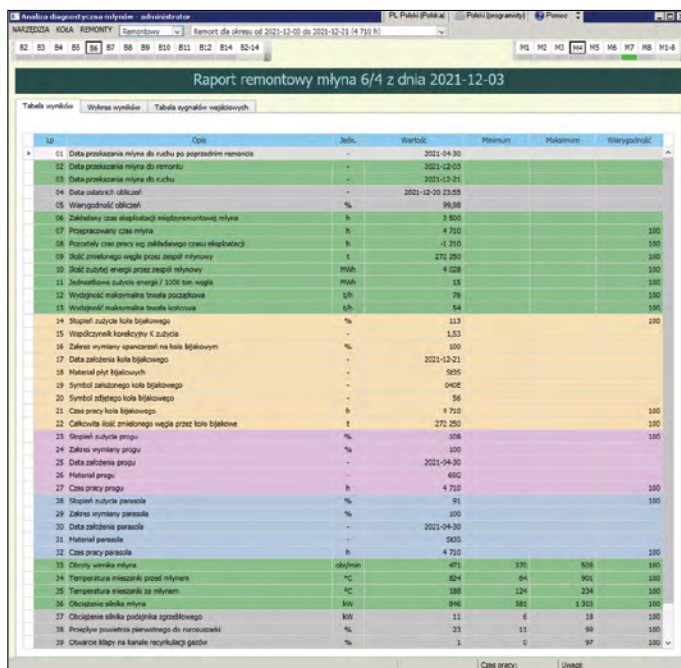
bieżące jak i historyczne wszystkich młynów objętych kontrolą. W szczególności są to:

- raport bieżący młyna – tworzony online, na podstawie danych eksploatacyjnych pozyskiwanych z systemu elektrownianego na bieżąco. Zawiera, obok skumulowanych wartości parametrów eksploatacyjnych, także wskaźniki zużycia kluczowych elementów młyna (rys. 5),
- raport historyczny/remontowy młyna będący podsumowaniem zakończonego okresu eksploatacji międzyremontowej i przedstawiający wartości skumulowane parametrów pracy młyna oraz wartości obliczeniowych dla całego okresu międzyremontowego (rys. 6),
- wykresy kluczowych wskaźników kontrolnych pracy młynów (rys. 7),

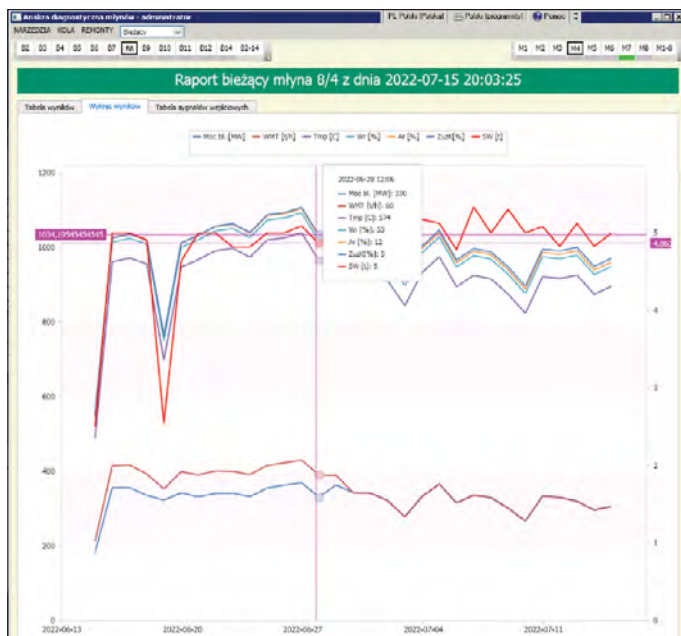
gdzie:

- WMT – bieżąca wydajność maksymalna trwała w [t/h],
- Tmp – temperatura mieszanki gazowo-węglowej przed młynem w [C°],
- Wr – zawartość wilgoci w węglu, w stanie roboczym w [%] (z analizy węgla w danym dniu),
- Ar – zawartość popiołu w węglu w stanie roboczym w [%] (z analizy węgla w danym dniu),
- ZużK – zużycie erozyjne koła bijakowego w jednostce czasu w [%];
- SW – ilość zmielonego węgla w jednostce czasu w [t].

- zestawienia raportów zużycia w skali całej elektrowni;
- raporty historyczne.



Rys. 6  
Raport historyczny/remontowy młyna  
Fig. 6 Historical/renovation mill report



Rys. 7  
Wykresy kluczowych wskaźników kontrolnych  
Fig. 7 Charts of key control parameters

Dodatkowo aplikacja agreguje i archiwizuje zarówno informacje nt. kół bijakowych będących w eksploatacji jak i dostępnych w magazynie, rejestruje błędy w komunikacji z bazą danych bieżących i historycznych oraz udostępnia formularze do wprowadzania nowych remontów oraz korekty współczynnika zużycia.

Aplikacja oblicza zużycie płyty bijakowej wg formuły (7) i archiwizuje szereg wielkości oraz parametrów związanych z pracą młyna, do najważniejszych można zaliczyć: data przekazania młyna do ruchu, wiarygodność obliczeń, zakładany czas eksploatacji między remontowej młyna, przepracowany czas młyna, przewidywana data remontu wg prognozy zużycia, ilość zmielonego węgla przez zespół młynowy, jednostkowe zużycie energii / 1000 ton węgla, wydajność maksymalna trwała początkowa, wydajność maksymalna trwała bieżąca/końcowa, stopień zużycia koła bijakowego, szacunkowy stopień zużycia przegu, szacunkowy stopień zużycia parasola.

W celu przeprowadzenia obliczeń aplikacja ADM pobiera ok. 150 sygnałów z bazy danych archiwalnych elektrowni, m.in. moc czynna bloku brutto, temperatury mieszanki na wlocie do i wylocie z młyna, obroty młyna, wysteroowanie podajnika zgrzeblowego, itd.

### Walidacja obliczeń przeprowadzonych w aplikacji ADM

W celu weryfikacji poprawności obliczeń, wykonywanych w aplikacji ADM, porównano je z obliczeniami wykonywanymi dotychczasową metodą – manualnym sumowaniem, dokonywanym przez inżynierów elektrowni oraz z ręcznym agregowaniem danych w programie MS Excel. Porównanie to przeprowadzono dla dwóch, dostępnych z danych elektrowni, tj. przepracowanego czasu młyna oraz czasu pracy koła bijakowego.

Analizę przeprowadzono dla kilku okresów i różnych zespołów młynowych. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Dodatkowo porównano obliczenia wykonane automatycznie w aplikacji ADM z obliczeniami przeprowadzonymi w aplikacji MS Excel dla następujących parametrów: pozostały czas pracy wg zakładanego czasu eksploatacji, ilość zmielonego węgla przez zespół młynowy, ilość zużytej energii przez zespół młynowy i stopień zużycia koła bijakowego. Wyniki porównania przedstawiono w tabeli 2.

Jak widać w przedstawionych tabelach różnice zarówno pomiędzy danymi

**Tabela 1 Porównanie parametrów pracy młyna pomiędzy danymi z elektrowni i aplikacją ADM**  
**Table 1 Comparison of the mill operating parameters between the data from the power plant and the ADM application**

| Oznaczenie młyna: 6/3  |                             |      |       |                               |      |      |
|------------------------|-----------------------------|------|-------|-------------------------------|------|------|
| Parametr               | Przepracowany czas młyna, h |      |       | Czas pracy koła bijakowego, h |      |      |
|                        | Dane EB                     | ADM  | Δ, %  | Dane EB                       | ADM  | Δ, % |
| 04.02.2020             | 3140                        | 3465 | -10.4 | 3469                          | 3465 | 0.1% |
| 10.08.2020             | 3141                        | 3138 | 0.1   | 6610                          | 6603 | 0.1% |
| 31.12.2020             | -                           | 504  | -     | 7113                          | 7107 | 0.1% |
| 21.01.2021             | -                           | 851  | -     | 7460                          | 7453 | 0.1% |
| Oznaczenie młyna: 14/6 |                             |      |       |                               |      |      |
| Parametr               | Przepracowany czas młyna, h |      |       | Czas pracy koła bijakowego, h |      |      |
|                        | Dane EB                     | ADM  | Δ, %  | Dane EB                       | ADM  | Δ, % |
| 21.09.2020             | 4066                        | 4073 | -0.2  | 4066                          | 4073 | -0.2 |
| 31.12.2020             | 1414                        | 1415 | -0.1  | 4066                          | 4065 | 0.0  |
| 21.01.2021             | 1874                        | 1868 | 0.3   | 1874                          | 1868 | 0.3  |
| Oznaczenie młyna: 14/5 |                             |      |       |                               |      |      |
| Parametr               | Przepracowany czas młyna, h |      |       | Czas pracy koła bijakowego, h |      |      |
|                        | Dane EB                     | ADM  | Δ, %  | Dane EB                       | ADM  | Δ, % |
| 21.09.2020             | 3957                        | 3951 | 0.2   | 4066                          | 3951 | 2.8  |
| 31.12.2020             | 754                         | 752  | 0.3   | 754                           | 752  | 0.3  |
| 21.01.2021             | 1198                        | 1193 | 0.4   | 1198                          | 1193 | 0.4  |

**Tabela 2 Porównanie obliczeń w MS Excel i aplikacji ADM**  
**Table 2 Comparison of calculations in MS Excel and ADM application**

| Oznaczenie młyna: 6/3 (blok 6/młyn 3) |                         |      |       |                           |        |      |                                    |     |      |
|---------------------------------------|-------------------------|------|-------|---------------------------|--------|------|------------------------------------|-----|------|
| Parametr                              | Pozostały czas pracy, h |      |       | Ilość zmielonego węgla, t |        |      | Stopień zużycia koła bijakowego, % |     |      |
|                                       | Dane Excel              | ADM  | Δ, %  | Dane Excel                | ADM    | Δ, % | Dane Excel                         | ADM | Δ, % |
| 04.02.2020                            | 31.6                    | 35   | -10.8 | 207787                    | 207443 | 0.2  | 54.1                               | 55  | -1.7 |
| 10.08.2020                            | -                       | 362  | -     | 180085                    | 179855 | 0.1  | 48.5                               | 50  | -3.1 |
| Oznaczenie młyna: 14/6                |                         |      |       |                           |        |      |                                    |     |      |
| Parametr                              | Pozostały czas pracy, h |      |       | Ilość zmielonego węgla, t |        |      | Stopień zużycia koła bijakowego, % |     |      |
|                                       | Dane Excel              | ADM  | Δ, %  | Dane Excel                | ADM    | Δ, % | Dane Excel                         | ADM | Δ, % |
| 21.09.2020                            | -565                    | -573 | -1.4  | 512150                    | 512271 | 0.0  | 100.3                              | 97  | 3.3  |
| Oznaczenie młyna: 14/5                |                         |      |       |                           |        |      |                                    |     |      |
| Parametr                              | Pozostały czas pracy, h |      |       | Ilość zmielonego węgla, t |        |      | Stopień zużycia koła bijakowego, % |     |      |
|                                       | Dane Excel              | ADM  | Δ, %  | Dane Excel                | ADM    | Δ, % | Dane Excel                         | ADM | Δ, % |
| 21.09.2020                            | -458                    | -451 | 1.5   | 530248                    | 528615 | 0.3  | 101.9                              | 103 | -1.1 |

dostarczonymi z elektrowni oraz danymi obliczonymi ręcznie w oprogramowaniu MS Excel, a wynikami obliczeń w aplikacji ADM są niewielkie, co wskazuje na poprawność tych ostatnich.

### Wnioski końcowe

Aplikacja do diagnostyki młynów wentylatorowych ADM działa w elektrowni od 2019 roku i obejmuje kontrolę wszystkie pracujące młyny. Aplikacja przeznaczona jest do wspomaganie pracy zarówno służb remontowych jak i gospodarki materiało-

wej oraz może służyć do oceny i analiz statystycznych na podstawie danych historycznych z okresów eksploatacji młynów zgromadzonych od początku jej działania. Analiza porównawcza przeprowadzona na wybranych młynach potwierdziła zarówno poprawność obliczeń zużycia jak i predykcji w zakresie dalszej pracy.

Dzięki aplikacji ADM możliwe było osiągnięcie:

- optymalizacji czasu pracy młyna w okresie jego eksploatacji między remontowej,

- poprawy organizacji i planowania remontów poprzez określenie przewidywanej daty remontu każdego młyna,
- zmniejszenia zużycia stali w całej elektrowni poprzez pełne wykorzystanie materiału podczas każdorazowych remontów,
- zmniejszenia awaryjności pracy młynów oraz kosztów ich naprawy na skutek unikania przekroczeń czasu ich bezpiecznej pracy,
- poprawy efektywności energetycznej urządzeń młynowych poprzez pełne wykorzystanie ich okresu eksploatacji,
- bieżącej kontroli w zakresie zarówno warunków pracy oraz zużycia, jak również dostępu i podglądu zarejestrowanych danych historycznych,
- bazy wiedzy w zakresie historii warunków pracy oraz zużycia stanowiącej cenny materiał do wykorzystania w analizach statystycznych w skali całej elektrowni.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Wojciech Mizak, "Metodyka badań zużycia erozyjnego materiałów konstrukcyjnych i funkcjonalnych", praca doktorska, Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i transportu, 2017r.
- [2] Tomasz Parys, „Charakterystyki młynów wentylatorowych z różnymi typami odsiewaczy”, Akademia Górniczo Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska, 2011/2012 r.
- [3] Bazyl Krupicz, „Diagnostowanie zużycia erozyjnego łopatek wentylatora”, Zeszyty Naukowe nr 1(73) Akademii Morskiej w Szczecinie, Explo-Ship 2004, ISSN 0209-2069

### Podziękowania

Praca została opracowana w ramach projektu nr 396/PM/PMR-ELB/ZK/EK/2017 z dnia 11.12.2017 pn. „Program komputerowy do diagnostyki młynów węglowych PGE GIEK S.A. – O. El. Bełchatów”, sfinansowanego przez PGE GIEK S.A.