

**Maciej KWAŚNY\*, Jacek SPAŁEK\***

**WSPOMAGANIE IDENTYFIKACJI PROCESÓW  
TRIBOLOGICZNYCH W BADANIACH  
INNOWACYJNYCH KONSTRUKCJI PRZEKŁADNI  
PLANETARNYCH POPRZEZ ZASTOSOWANIE  
METODY TERMOWIZYJNEJ**

**IDENTIFICATION OF TRIBOLOGICAL PROCESSES IN THE  
RESEARCH OF AN INNOVATIVE DESIGN PLANETARY GEAR  
THROUGH THE USE OF THERMAL IMAGING METHODS**

**Słowa kluczowe:**

przekładnie zębate, stanowisko badawcze, metoda termowizyjna, stan termiczny, procesy tribologiczne

**Key words:**

gears, test stand, thermal imaging method, thermal state, tribological processes

**Streszczenie**

W opracowaniu przedstawiono w sposób syntetyczny problem wykorzystania metody termowizyjnej do pośredniej identyfikacji pól temperatur generowa-

---

\* Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii, Instytut Mechanizacji Górnictwa, ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska, tel./fax: (32) 237 15 84, e-mail: maciej.kwasny@polsl.pl, jacek.spalek@polsl.pl.

nych w węzłach tribologicznych (łożyskowania i zazębienia) podczas badań stanowiskowych innowacyjnych konstrukcji planetarnych przekładni zębatych dużych mocy. Zwrócono uwagę na wielokryterialny system oceny funkcjonalności omawianych przekładni i na tym tle na ważność problematyki procesów tribologicznych kształtujących ich stan termiczny.

## WPROWADZENIE

Stosowane współcześnie w polskim górnictwie węgla kamiennego systemy ścianowe o wysokiej koncentracji wydobycia, a także zaostrzająca się konkurencja na rynku maszyn górniczych wymuszają konieczność opracowywania i wdrażania nowych rozwiązań konstrukcyjnych maszyn urabiających i transportujących. Dotyczy to w dużym stopniu przenośników górniczych, które w przypadkach wymienionych systemów technologicznych stanowią barierę uzyskania wymaganego wydobycia [L. 1]. Taka sytuacja wymusza poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych ścianowych i podścianowych przenośników zgrzeblowych oraz odstawczych przenośników taśmowych. Wiąże się to m.in. z koniecznością wprowadzenia nowych postaci konstrukcyjnych napędów przenośników, a w tym stosowania silników o dużej mocy (często dwubiegowych) oraz wysoko momentowych przekładni zębatych cechujących się podwyższoną sprawnością, trwałością i niezawodnością. Stosowane dotychczas w zespołach napędowych przenośników górniczych przekładnie klasyczne, tzn. z nieruchomymi osiami wałów, głównie z uwagi na względnie duże rozmiary i masy oraz niższe sprawności nie znajdują już technicznego uzasadnienia dalszego ich stosowania w wysokowydajnych przenośnikach.

Zatem przyszłościowym kierunkiem rozwojowym jest zastosowanie w napędach wyżej wymienionych maszyn górniczych przekładni zębatych planetarnych, uzupełnianych w częstych przypadkach klasycznym stopniem stożkowym [L. 2, 3, 4].

Uzasadnienie stosowania przekładni planetarnych w układach napędowych maszyn roboczych przenoszących duże momenty obrotowe (moc wejściowa powyżej 150 KW, przy nominalnej prędkości obrotowej  $1500 \text{ min}^{-1}$ ) wynika z przesłanek analizy ogólnej, jak też z analizy szczegółowej ujmującej górnicze warunki eksploatacji.

Generalnie rozwój przekładni zębatych w nowoczesnych napędach maszyn roboczych i pojazdów mechanicznych podporządkowany jest naczelnemu kierunkowi, jakim jest osiągnięcie najkorzystniejszych parametrów, a zwłaszcza wskaźników masy i objętości, które mogą tworzyć konkurencyjność napędów z przekładniami zębatymi względem napędów bezprzekładniowych [L. 4, 5, 6, 7].

W prezentowanym opracowaniu w sposób syntetyczny, na tle weryfikacji doświadczalnej innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych przekładni planetarnych,

zarysowano problem wykorzystania metody termowizyjnej do pośredniej identyfikacji procesów tribologicznych w badanych przekładniach [L. 8, 9, 10].

Śledzenie zmian pól temperatur w czasie badań eksperymentalnych w poszczególnych obszarach struktury przekładni dostarcza cennych informacji w zakresie:

- określenia rozkładu pól temperatur przypisanych danym węzłom tribologicznym, tj. zazębieniom i łożyskowaniom,
- wyznaczenia dynamiki wzrostu temperatury w funkcji obciążenia i czasu badań,
- skuteczności układu wymuszonego chłodzenia przekładni i wyznaczenia wymaganego natężenia przepływu wody chłodzącej,
- wyznaczenia sprawności przekładni, niezbędnego kryterium zwłaszcza dla przekładni dużych mocy.

### **CHARAKTERYSTYKA INNOWACYJNYCH ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH PRZEKŁADNI PLANETARNYCH DUŻYCH MOCY**

Bazując na szczegółowych założeniach technicznych wynikających z wymagań technologicznych transportu urobku wysokowydajnymi przenośnikami, w Bytomskich Zakładach Urządzeń Technicznych (BZUT) i Rybnickiej Fabryce Maszyn (RYFAMA) opracowano oraz wykonano typoszereg przekładni planetarnych w dwu odmianach konstrukcyjnych, a mianowicie:

- dwa stopnie planetarne z kołami walcowymi,
- dwa stopnie planetarne z kołami walcowymi i stopniem stożkowym.

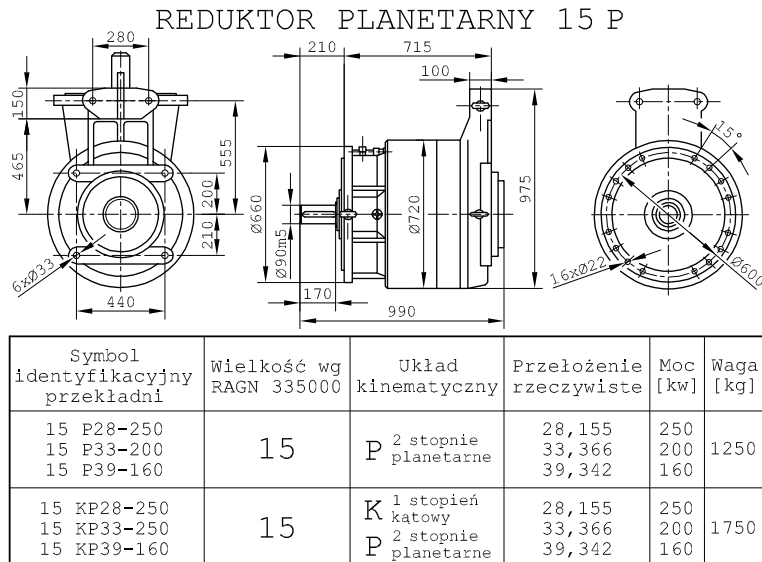
Jako nowe przedsięwzięcie w krajowym górnictwie węgla kamiennego tematyka ta uzyskała dotację Komitetu Badań Naukowych w ramach projektu celowego „Specjalizowane przekładnie planetarne dużych mocy do napędu wysokowydajnych przenośników górniczych” [L. 4].

Przekładnie te są rozwiązaniami o szeregowej strukturze stopni obiegowych typu 2K-H, z pływającymi zębnikami centralnymi, z układem smarowania zanurzeniowo-rozbryzgowego olejem przekładniowym i wymuszonym chłodzeniem wodą za pomocą odpowiednio dobranych płaszczy konwekcyjnych.

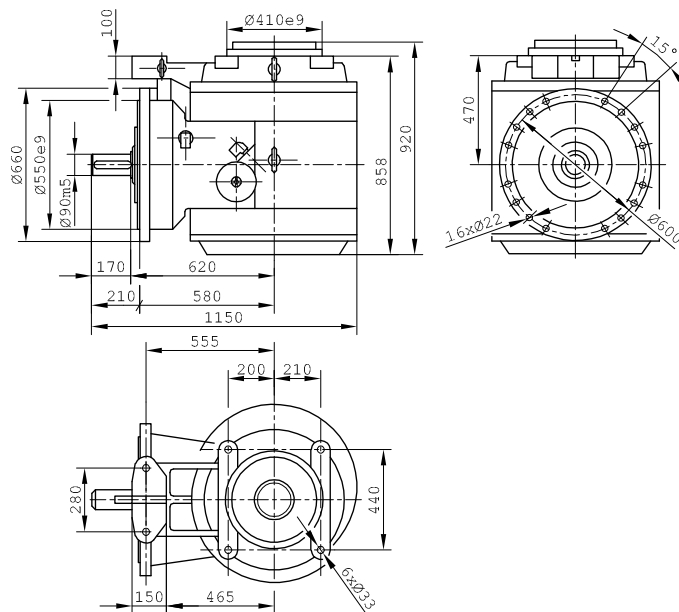
Konstrukcja przekładni spełnia pod względem wytrzymałościowo-trwałościowym wymagania norm ISO 6336 i DIN 3990 oraz wymagania technologiczne branżowej normy niemieckiej RAGN 335000 w zakresie mocy nominalnej, krótkotrwałego (o czasie nie dłuższym niż 3 sekundy) impulsu przeciążenia, dokładności przełożeń oraz cech geometrycznych przyłączy.

Przykładową postać konstrukcyjną, podstawowe cechy geometryczne oraz główne parametry użytkowe przekładni wielkości „15” przedstawiono na **Rysunku 1**. Przez wielkość przekładni (oznaczoną tu przez „15”) rozumie się maksymalną wartość krótkotrwałego, impulsowego momentu roboczego na

wale wyjściowym przekładni (150 kNm). Jest to stan specyficzny dla cyklu pracy przenośników zgrzeblowych; przypadek dość często występujących za-blokowań ruchu ciągną łańcuchowego.



**REDUKTOR KĄTOWO-PLANETARNY 15 KP**



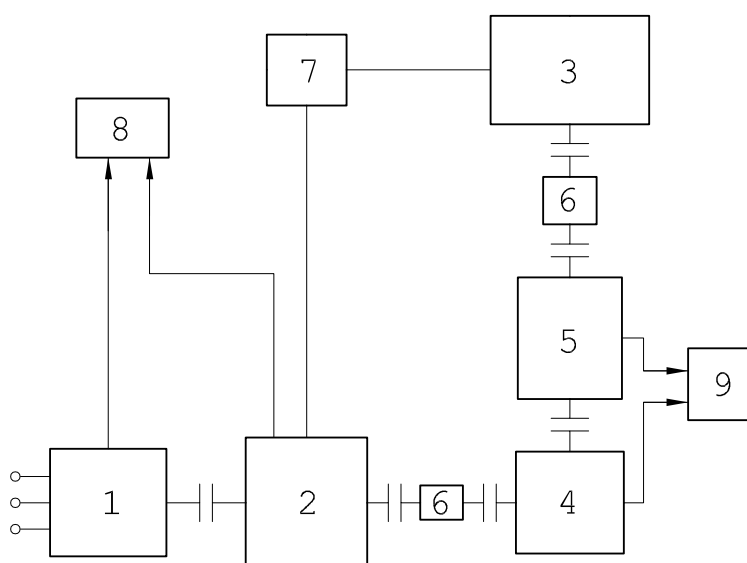
**Rys. 1. Postacie konstrukcyjne, cechy geometryczne i użytkowe przekładni planetarnych wielkości „15”**

**Fig. 1. Design parameters, geometrical and functional features of planetary gear size „15”**

Przeprowadzone analizy i porównanie opracowanych nowych rozwiązań z postaciami konstrukcyjnymi przekładni firm zagranicznych wskazują na ich wzajemne podobieństwo, a zwłaszcza na porównywalność podstawowych cech geometrycznych i funkcjonalnych.

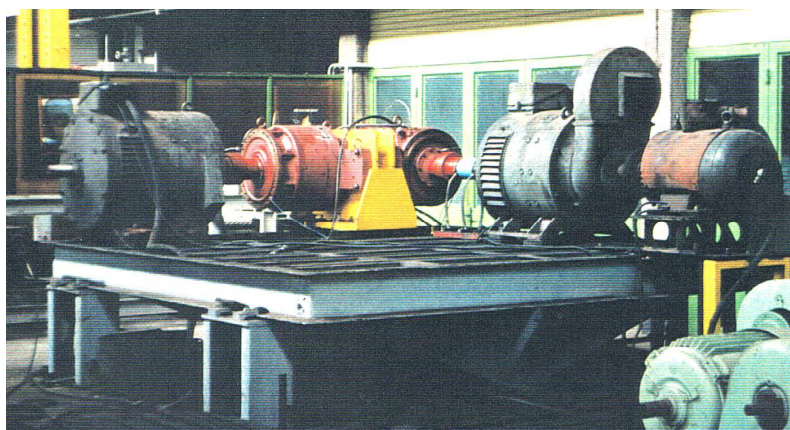
### BADANIA STANOWISKOWE NOWYCH ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH PLANETARNYCH PRZEKŁADNI ZĘBATYCH

Badania doświadczalne przeprowadzono na unikalnym stanowisku, pracującym w tzw. układzie mocy krążącej (zamkniętej). Schemat blokowy stanowiska przedstawiono na **Rysunku 2**, a jego widok pokazano na **Rysunku 3**.



**Rys. 2.** Schemat stanowiska do badań przekładni w układzie mocy zamkniętej, gdzie: 1 – silnik asynchroniczny, 2 – silnik prądu stałego, 3 – prądnica prądu stałego, 4 – przekładnia pracująca jako reduktor, 5 – przekładnia pracująca jako multiplikator, 6 – momentomierze, 7 – układ pomiarowy w obwodzie prądu stałego (obwodzie wywoływania obciążenia), 8 – układ zasilająco-sterujący, 9 – układ pomiarowy temperatury przekładni i układu chłodzenia wodnego

Fig. 2. The scheme of the test stand of planetary gear in a closed power system: 1 – asynchronous engine, 2 – DC motor, 3 – dynamo, 4 – gear working as a reducer, 5 – gear working as a multiplier, 6 – the measuring shaft, 7 – measuring system in the DC circuit, 8 – power supply and control system, 9 – transmission temperature measurement system and water cooling system



**Rys. 3. Widok stanowiska badawczego przekładni wielkości „15”**

Fig. 3. View of test stand of planetary gears size „15”

Zrealizowany program badań doświadczalnych obejmował przeprowadzenie prób trwałościowych dwóch prototypowych przekładni (w parach: przekładnia stożkowo-planetarna ↔ przekładnia planetarna) w tzw. pełnym cyklu nominalnym, tzn. dla mocy 160 kW, przez około 800 godzin [L. 4]. Dla tak przyjętej metodyki badań liczba obrotów (zmian obciążenia) wału wejściowego przekładni wynosiła  $127 \cdot 10^6$ , co przy przełożeniu całkowitym równym 39 odpowiada około  $3,25 \cdot 10^6$  obciążeń (obrotów) jarzma wyjściowego przekładni.

Tak więc spełniony został warunek przyjmowany jako konieczny przy weryfikacji zmęczeniowej, a mianowicie by każdy z elementów podlegający zmiennym obciążeniom doznał co najmniej  $3 \cdot 10^6$  zmian obciążenia (według ISO 6336 – DIN 3990), czyli przekraczających tzw. bazową liczbę cykli.

#### **IDENTYFIKACJA PROCESÓW TRIBOLOGICZNYCH W BADANIACH STANOWISKOWYCH PRZEKŁADNI PLANETARNYCH Z WYKORZYSTANIEM METODY TERMOWIZYJNEJ**

Realizowane badania w cyklu ciągłym obejmowały monitoring głównych parametrów, takich jak: obciążenie (moment obrotowy), prędkość obrotowa i wielkości elektryczne w głównym układzie mocy krążącej (napięcia, natężenia i mocy prądu stałego w układzie zamkniętym) oraz w uzupełniającym układzie elektrycznym „rozruchowego” silnika asynchronicznego. Nadto dla identyfikacji stanu termicznego prowadzono ciągłą rejestrację przepływu i temperatury wody chłodzącej oraz temperatur w wybranych charakterystycznych punktach przekładni. Okresowo przeprowadzano pomiary i rejestrację drgań w wybranych charakterystycznych punktach obu przekładni (reduktora i multiplikatora). Metodę termowizyjną wykorzystano dla identyfikacji rozkładu temperatury

oraz dynamiki jego zmian, a zwłaszcza skuteczności chłodzenia układu wodnego przekładni.

Kryterium stanu termicznego rozumiane jako pole temperatur, a odnoszące się zarówno do kadłuba przekładni, układu chłodzenia oraz oleju smarującego można uznać jako zasadnicze w ocenie użytkowej przekładni. Wynika to z tego, że w warunkach eksploatacji górniczej jedynie temperatura kadłuba, oleju smarującego i/bądź wody chłodzącej może stanowić realny symptom diagnostyczny definiujący bieżący stan techniczny przekładni. Stąd te badania prowadzono w zakresie poszerzonym, stosując metody pomiaru konwencjonalnego jak też metodę pomiarów i analizy obrazów termowizyjnych. Łączne zastosowanie tych metod pozwala na ocenę:

- dynamiki procesu nagrzewania się przekładni w funkcji obciążenia i czasu pracy,
- rozkładów pól temperatur na kadłubie przekładni wraz z określeniem obszarów lokalnych „przegrzań” odpowiadających określonym węzłom trybologicznym przekładni,
- skuteczności chłodzenia (z zastosowaniem konwekcyjnego płaszcza wodnego) w funkcji natężenia i temperatury wody chłodzącej,
- temperatury oleju smarującego i jej zmian w funkcji obciążenia i czasu pracy przekładni.

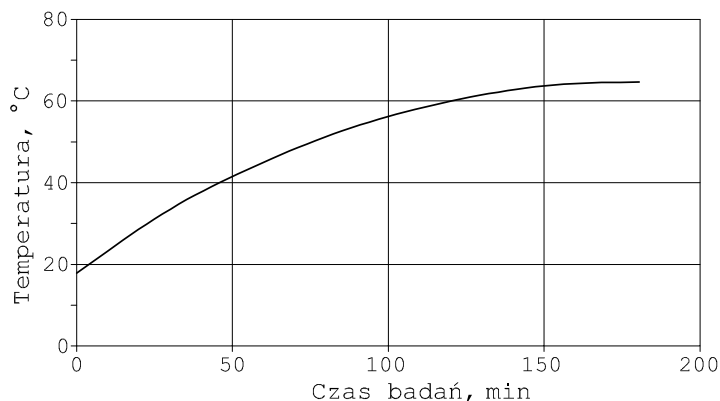
Jak wspomniano, stan termiczny przekładni, tj. reduktora stożkowo-planetarnego oraz multiplikatora planetarnego kontrolowano w cyklu badawczym w sposób ciągły przez pomiary temperatury czujnikami elektrooporowymi oraz z wykorzystaniem metody termowizyjnej. W metodzie tej wykorzystano system INFRAMETRICS 760 złożony z kamery termowizyjnej chłodzonej helem w obiegu Sterlinga oraz jednostki centralnej (komputera) wraz z oprogramowaniem. Zastosowane zakresy pomiarowe w podczzerwieni to:

- $8 \div 12 \mu\text{m}$  i  $3 \div 12 \mu\text{m}$  z dokładnością  $0,1^\circ\text{C}$ ,
- $3 \div 5 \mu\text{m}$  z dokładnością  $0,2^\circ\text{C}$ .

Należy zaznaczyć, że system INFRAMETRICS 760 pozwalał określić już w czasie trwania sesji pomiarowej kilkanaście parametrów obserwowanego obiektu, a mianowicie:

- określenie średniej temperatury wybranego obszaru,
- rozkład temperatury wzdłuż określonego, wybranego odcinka na kadłubie,
- temperaturę danego punktu.

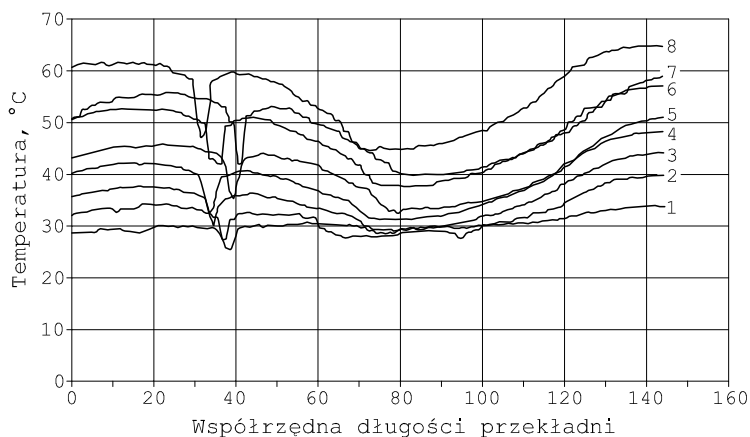
Wynikiem pomiarów termowizyjnych jest kilkanaście termogramów obrazujących rozkład i dynamikę zmiany temperatury na korpusie. Na **Rys. 4** przedstawiono narastanie temperatury kadłuba tej przekładni w zakresie początkowym cyklu badawczego, przy natężeniu przepływu wody chłodzącej  $4 \text{ dm}^3/\text{min}$  i temperaturze na dopływie  $18^\circ\text{C}$ . Okazało się, że w przypadku przekładni 15KP przyjęte natężenie przepływu wody jest wystarczające dla zapewnienia temperatury oleju w przekładni niższej od  $80^\circ\text{C}$ .



**Rys. 4.** Zmiany temperatury w trakcie badań przekładni stożkowo-planetarnej 15KP o mocy 160 kW i przełożeniu całkowitym  $u_c = 39$ , w początkowej fazie pracy, dla natężenia przepływu wody chłodzącej 4 dm<sup>3</sup>/min i temperaturze otoczenia około 20°C

Fig. 4. Illustration of the warm-up of bevel – planetary gear 15KP in the initial phase of operation. Transmission power of gear is 160 kW and transmission ratio  $u_c = 39$ , the flow rate of the cooling water 4 dm<sup>3</sup>/min and ambient temp. about 20°C

Stosując komputerową analizę termogramów, można opisywać rozkład temperatur wzdłuż np. tworzącej powłoki walcowej kadłuba, w kierunku od stopnia wejściowego do wyjściowego przekładni. Przykładowe wyniki dla badanego reduktora stożkowo-planetarnego w funkcji czasu badań przedstawiono na **Rysunku 5**.



**Rys. 5.** Ilustracja rozkładu temperatury wzdłuż tworzącej powłoki walcowej kadłuba przekładni – reduktora, w funkcji czasu badań kolejno po: 1 – 30 min, 2 – 40 min, 3 – 50 min, 4 – 60 min, 5 – 75 min, 6 – 105 min, 7 – 120 min, 8 – 180 min

Fig. 5. Illustration of temperature distribution along a cylindrical shell of the hull gear working as reducer in function of test time in succession: 1 – 30 min, 2 – 40 min, 3 – 50 min, 4 – 60 min, 5 – 75 min, 6 – 105 min, 7 – 120 min, 8 – 180 min



Z **Rysunku 5** wynika, że istnieje duża nierównomierność rozkładu temperatury wzdłuż kadłuba, „najgorętsze” obszary znajdują się na krańcach powłoki, a więc w okolicy stopnia szybkobieżnego i gniazda wyjściowego przekładni. Fakt ten został potwierdzony w szczegółowych oględzinach, które wykazały konieczność zmiany rodzaju łożyskowania i poprawy dokładności wykonania gniazd łożyskowych w kadłubie przekładni. Wyniki te wskazują także na potrzebę modyfikacji postaci konstrukcyjnej płaszcza wodnego badanej przekładni.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zasadniczym celem niniejszego opracowania jest pokazanie problemu złożoności metodyki weryfikacyjnych badań przewidywanych do wdrożenia innowacyjnych konstrukcji przekładni planetarnych i w tym aspekcie zwrócenie uwagi na istotność identyfikacji procesów tribologicznych decydujących o ich stanie termicznym. Stan ten stanowi podstawowe kryterium oceny sprawności przekładni planetarnych, zwłaszcza dużych mocy.

W artykule zaakcentowano, że metoda termowizyjna wraz z klasycznymi sposobami identyfikacji temperatury roboczej przekładni dostarcza istotnych informacji wyprzedzających o funkcjonalności węzłów tribologicznych, czyli głównie zazębień i łożyskowań poszczególnych stopni przekładni. Daje to podstawę do wprowadzania niezbędnych zmian konstrukcyjnych przed zastosowaniem przekładni w rzeczywistych układach napędowych.

## LITERATURA

1. Sikora W., Dolipski M. i in.: Systemy mechanizacyjne w przodkach o wysokiej koncentracji produkcji. Skrypt nr 2089. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
2. Suchoń J.: Górnicze przenośniki zgrzebłowe. Tom 1 i 2. Wydawnictwo Instytutu Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2012.
3. Antoniak J.: Przenośniki taśmowe w górnictwie podziemnym i odkrywkowym. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
4. Projekt celowy: 7T07C-036-96-C/2999. Realizator prac B-R: Instytut Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej.
5. Niemann G., Winter H.: Maschinenelemente. Band II. 2 Auflage, Springer – Verlag, Berlin – Heidelberg – Tokyo, 1989.
6. Linke H.: Stirnradverzahnung: Berechnung – Werkstoffe – Fertigung. Varl Hanser – Verlag, München – Wien, 1996.
7. Müller L. Wilk A.: Zębate przekładnie obiegowe. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.
8. Nadolny K.: Tribologia kół zębatych – zagadnienia trwałości i niezawodności. Wydawnictwo ITeE, Radom – Poznań 1999.

9. Spalek J.: Zarys tribologii i inżynierii smarowania, [w:] Podstawy konstrukcji maszyn. Tom 2. WNT, Warszawa 2008.
10. Zwierzycki W.: Prognozowanie niezawodności zużywających się elementów maszyn. Wydawnictwo ITeE, Radom 2000.

### **Summary**

**The paper presents the problem of the use of thermal imaging methods for indirect identification of temperature fields generated in the tribological nodes, such as bearing and meshing, during bench testing of an innovative design of high power planetary gear. Attention is paid to the multi-criteria evaluation system's functionality in relation to gears and the validity of the problems of tribological processes that shape their thermal state.**