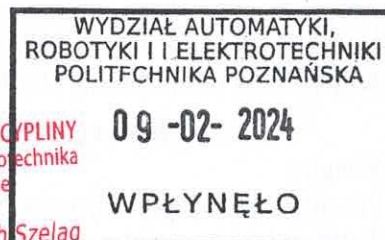


Prof. dr hab. inż. Waldemar Minkina
Uniwersytet Jana Długosza w Częstochowie
Wydział Nauk Ścisłych, Przyrodniczych i Technicznych
Katedra Matematyki i Informatyki
Al. Armii Krajowej 13/15
42-200 Częstochowa
e-mail: [REDACTED]
w.minkina@ujd.edu.pl
Tel. [REDACTED]

Częstochowa, dnia 06.02.2024 r.

PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
prof. dr hab. inż. Wojciech Szela



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Dziarskiego pod tytułem
„*Termowizyjne pomiary temperatury elementów półprzewodnikowych*”

Uwagi wstępne

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Grzegorz Wiczyński, prof. PP, promotorem pomocniczym jest dr inż. Arkadiusz Hulewicz. Przewód doktorski jest prowadzony przez Radę Dyscypliny „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” Wydziału Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, Zakład Metrologii, Elektroniki i Techniki Światłowej Politechniki Poznańskiej. Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” Prof. dr hab. inż. Wojciecha Szela pismem (DR-012/8/2024) z dnia 22.01.2024 r.

Praca recenzowana jest zgodnie z zapisami § 3 ust. 1 pkt 2 rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. „*W sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora*” (Dz. U. z dnia 30 stycznia 2018 r. poz. 261), zaś ocena dotyczy dyscypliny: *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne* zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Edukacji i Nauki z dnia 11 października 2022 r. w „*sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych*” (Dz. U. z dnia 25 września 2018 r. poz. 1818) oraz Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. „*o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*” (Dz.U. 2003 Nr 65 poz. 595) art. 13. 1., tj. w zakresie oceny „*czy rozprawa doktorska, przygotowywana pod opieką promotora albo pod opieką promotora i promotora pomocniczego, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o opracowanie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne, oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej*”. Niniejsza praca doktorska recenzowana jest także zgodnie z zapisami art. 186 oraz 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668).

Tematyka ocenianej pracy doktorskiej dotyczy opracowania metody termowizyjnego, pośredniego pomiaru temperatury elementów półprzewodnikowych. Umożliwia ona oszacowanie temperatury elementu półprzewodnikowego w działającym układzie elektronicznym. Metoda składa się z następujących dwóch głównych etapów:

- termowizyjnego pomiaru temperatury odpowiednio wybranego miejsca na obudowie urządzenia półprzewodnikowego oraz
- oszacowania temperatury elementu półprzewodnikowego na podstawie wyniku uprzednio wykonanego pomiaru termowizyjnego temperatury obudowy z wykorzystaniem długofa-

lowej kamery termowizyjnej (LWIR), wyposażonej w matrycę niechłodzonych detektorów mikrobolometrycznych.

Dla oszacowania temperatury elementu półprzewodnikowego wykonano symulacje numeryczne z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych (MES) rozkładu temperatury w wybranych obudowach urządzeń półprzewodnikowych. Ponadto opracowano budżet niepewności pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego.

Recenzowana rozprawa składa się z pięciu rozdziałów:

1. Wstęp.
2. Przegląd metod pomiaru temperatury struktur półprzewodnikowych.
3. Termowizyjny pomiar temperatury struktury półprzewodnikowej umieszczonej w zamkniętej obudowie. Rozdział zawiera: podstawy fizyczne, ograniczenia, czynniki wpływające na wynik pomiaru termowizyjnego temperatury obudowy, wyznaczenie zależności pomiędzy temperaturą struktury półprzewodnikowej i temperaturą ściany zewnętrznej obudowy oraz wyznaczenie niepewności termowizyjnego pomiaru temperatury struktury półprzewodnikowej umieszczonej w obudowie.
4. Przykładowe wyniki pomiarów temperatury struktur półprzewodnikowych w obudowach znajdujących się w otwartej przestrzeni lub zabudowanych na radiatorze.
5. Wnioski i podsumowanie. W tym rozdziale przedstawiono najważniejsze wnioski z przeprowadzonych prac badawczych, podsumowanie dotyczące właściwości opracowanych przez Doktoranta modeli dla wszystkich serii, ograniczenia związane z wykorzystaniem opisanych metod oraz nieuwzględnione w pracy, możliwe kierunki dalszych badań.

Reasumując, w ramach ocenianej pracy doktorskiej omówiono podstawy termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy elementów elektronicznych, wyszczególniono czynniki wpływające na wynik pośredniego pomiaru temperatury oraz określono ich skutki. Na zbudowanym stanowisku laboratoryjnym wykonano termowizyjne (bezstykowe) i stykowe pomiary temperatury obudowy w zadanych warunkach oraz porównano wyniki termowizyjnych i stykowych pomiarów temperatury obudowy elementów elektronicznych. Wykonano symulacje rozptyłu ciepła w zastosowanych obudowach a na podstawie badań symulacyjnych określono zależność pomiędzy temperaturą struktury półprzewodnikowej i temperaturą obudowy elementów elektronicznych. W pracach eksperymentalnych i symulacyjnych analizowano rozkłady temperatury w obudowach TO-220 i TO-247. Wskazano na obszary obudowy umożliwiające uzyskanie wiarygodnych wyników pomiarów. Na zakończenie określono niepewność termowizyjnego pomiaru temperatury struktury półprzewodnikowej.

Opiniowana praca liczy 118 stron, zawiera 85 rysunków, 36 tabel oraz 116 pozycji literaturowych, w tym 7 współautorskich prac Doktoranta opublikowanych w takich czasopismach jak: dwie publikacje opublikowane w MDPI „*energies*” (2023 rok, 140 pkt MNiSzW), dwie publikacje opublikowane w MDPI „*sensors*” (2021 rok, 100 pkt MNiSzW), jedna w MDPI „*electronics*” (2020 rok, 100 pkt MNiSzW), dwie materiały konferencyjne: 15th „*Quantitative InfraRed Thermography*” Portugalia, 2020 rok oraz 13th „*International Conference on Measurement*”, IEEE, 2021 rok. Dwie z tych prac są pracami samodzielnymi Doktoranta, pozostałe to publikacje współautorskie z Promotorem Pomocniczym oraz z Promotorem pracy doktorskiej.

Ostatnio, ukazała się ósma praca opublikowana w zeszycie specjalnym „*Recent Progress in Infrared Thermography*” czasopisma MDPI „*applied sciences*” (2023, 100 pkt MNiSzW), **której Doktorant nie ujął w spisie literatury:**

- Dziarski K., Hulewicz A., Drużyński Ł., Dombek G.: „Indirect Thermographic Temperature Measurement of a Power Rectifying Diode Die under Forced Convection Conditions”, Appl. Sci. 2023, 13 (7), 4440, <https://doi.org/10.3390/app13074440>.

Wszystkie z tych prac są opublikowane w dobrych, wysokopunktowanych czasopismach oraz dotyczą tematyki opiniowanej pracy doktorskiej - jest to więc monotematyczny cykl

publikacji. Jest to bardzo dobry dorobek z nadmiarem wystarczający dla spełnienia kryterium otrzymania stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

Ocena struktury oraz tezy pracy

Struktura pracy jest poprawna. Podano cel pracy oraz jej tezę. Znacznie ułatwia jej lekturę załączone na początku zestawienie użytych terminów, definicji oraz wykazu skrótów i stałych. Teza jest sformułowana prawidłowo i nosi cechy nowości:

„Na podstawie odpowiednio wykonanego termogramu obudowy urządzenia półprzewodnikowego, przy znajomości niezbędnych wartości parametrów katalogowych obudowy, możliwe jest wystarczająco dokładne określenie temperatury elementu półprzewodnikowego tego urządzenia”.

Tutaj warto zauważyć, że pewne prace w tym zakresie były już wykonywane wcześniej, przykładowo w następujących pracach doktorskich:

- Felczak Marcin: *„Analiza i projektowanie elementów systemu chłodzenia układów elektronicznych w warunkach konwekcji wymuszonej”* praca doktorska broniąca na Wydziale Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki (EEliA) Politechniki Łódzkiej, 2007 rok oraz
- Świąteczak T.: *„Badania właściwości termicznych układów elektronicznych przy użyciu metod termografii aktywnej”* praca doktorska broniąca na Wydziale Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki (EEliA) Politechniki Łódzkiej, 2011 rok.

Szkoda, że Doktorant nie odniósł się do tych prac. W związku z faktem, że znam te prace, to mogę stwierdzić, że recenzowana praca doktorska mgr inż. Krzysztofa Dziarskiego jest znakomitym rozszerzeniem metodyki badawczej podanej w przytoczonych wyżej pracach doktorskich.

Tutaj nasuwa się drobna uwaga dotycząca sytuacji, gdy praca doktorska dotyczy bardzo szerokiej tematyki - tak jak w tym przypadku. Standardowo, na początku pracy powinno się podać ograniczenia pracy - np. znam dany problem, ale go nie rozwiązuję, gdyż jest on bardzo szeroki. Tego nie podano, a szkoda, gdyż wtedy możnaby uniknąć ewentualnych uwag recenzentów dotyczących braków pewnych analiz i eksperymentów.

Praca napisana jest dobrym językiem naukowo – technicznym. Należy stwierdzić na tej podstawie, że Doktorant wykazał się dobrą umiejętnością pisania prac o charakterze naukowym. Drobne uwagi w tym zakresie opiszę w dalszej części niniejszej recenzji.

Ocena tematyki oraz celu rozprawy

Celem niniejszej pracy doktorskiej jest opracowanie metody, która pozwoliłaby na wykonanie pośredniego, termowizyjnego pomiaru temperatury struktury półprzewodnikowej umieszczonej w obudowie. Założono tutaj, że obudowa elementu jest zabudowana na radiatorze lub znajduje się w otwartej przestrzeni.

W tym celu Doktorant zbudował oryginalne stanowisko badawcze opisane w p. 3.3.1. ***Należałoby się zastanowić, czy byłoby celowym opatentowanie tej metody oraz stanowiska badawczego.***

Tutaj jednak wymagałoby wyjaśnienia, dlaczego zastosowano kamerę termowizyjną o niewielkiej rozdzielczości geometrycznej 240 x 180 pikseli z dodatkową optyką zbliżeniową typu „close up 2x”. Przecież badane obiekty, tj. obudowa oraz ewentualnie złącze elementu półprzewodnikowego są obiektami bardzo małymi. Zastosowanie optyki zbliżeniowej typu „close up 2x” tej sytuacji nie poprawi, gdyż nie wpłynie na poprawę rozdzielczości geometrycznej kamery termowizyjnej. Ponadto, kamerę termowizyjną wraz z dodatkową optyką typu „close up 2x” należałoby najpierw wywzorcować, co nie jest proste. Ze względu na rozmycie piksela (opisywane przez tzw. funkcję szczelinową SRF (ang. *slit response function*)), prawidłowy odczyt temperatury gwarantuje dopiero naświetlenie minimum 3 x 3 pikseli ma-

trycy, a jeszcze lepiej, gdy jest to 5 x 5 pikseli matrycy detektorów. Odczyt temperatury tylko z pojedynczego piksela będzie w tym przypadku zaniżony. Te niedoskonałości w pomiarach można wyraźnie zauważyć na rys. 65 – str. 79 czy na rys. 85 – str. 110. Szczegółowo tę problematykę opisano na stronach 140 ÷ 144 w monografii:

Minkina W.: „Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody” Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004, ISBN 83-7193-237-5.

lub w rozszerzonej wersji w publikacji:

Minkina W.: „Problems of Remote Temperature Measurement of Small Objects of Electricity Power Systems - On the Example of Lashing Clamps of Bridge Connections on High Voltage Poles”, *Energies* 2021, Vol. 14, Nr 16, 5041, pp. 1-11. Submitted to the section „Electrical Power and Energy System” and Special Issue „Improvements of the Electricity Power System” <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/16/5041>.

Praca dotyczy interdyscyplinarnej tematyki mieszczącej się w obszarze termodynamiki, elektroniki, automatyki i metrologii. Ściśle dotyczy więc dyscypliny naukowej „automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne”. Aktualność i ważność podjętej tematyki wynika z ciągłego rozwoju zdalnych systemów do pomiaru temperatury. Rozwój tych systemów stymulowany jest nowymi potrzebami i rosnącymi wymaganiami. Przedstawiony problem naukowy jest aktualny i ważny, szczególnie w obecnym okresie poszukiwania nowoczesnych systemów diagnostyki cieplnej elementów i układów elektronicznych. Temat podjęty przez Doktoranta ma bardzo duży potencjał aplikacyjny. Przedstawione wyniki badań modelowych i eksperymentalnych dowodzą, że postawione w pracy zadania zostały osiągnięte w założonym zakresie, a postawiona teza udowodniona.

Z punktu widzenia celu i postawionej tezy, przedstawiona do recenzji rozprawa została zrealizowana poprawnie. **Recenzent nie zauważył poważnych mankamentów obniżających jej jakość.** Układ pracy jest właściwy. Doktorant, niezależnie od wypunktowania wniosków w rozdziale podsumowującym, w poszczególnych wcześniejszych rozdziałach słusznie uwypukla własne dokonania.

Pytania szczegółowe i uwagi edytorskie

W trakcie studiowania rozprawy doktorskiej nasunęły się następujące pytania i komentarze szczegółowe:

1. Str. 21, 22 itd., itd. – termin „termopara” jest rusycyzmem i nie jest prawidłowym terminem metrologicznym stosowanym w polskim słownictwie technicznym. Polska Norma PN-71/N-02050 „*Metrologia, nazwy i określenia*” zaleca stosowanie terminu „termoelement”.
2. Str. 25, 26, 39, 46, rys. 36 i dalsze – „temperatura odbita” nie jest trafnym terminem. Temperatura nie może się przecież odbijać. Odbijać się może np. piłka a nie temperatura. Jeżeli już to „temperatura odbiciowa”, ale to także nie jest prawidłowe. Wynika z niefortunnego tłumaczenia angielskiego terminu „reflected temperature”, co należy tłumaczyć jako „temperatura otoczenia”. Z kolei to co Doktorant nazywa „temperaturą otoczenia”, należy określić jako „temperatura atmosfery” – patrz pozycje literatury [62, 63, 66].
3. Rys. 12 przedstawia zależność temperatury obudowy elementu półprzewodnikowego od emisyjności powierzchni obudowy. Zasadniczo takie charakterystyki należy przedstawiać w postaci odwrotnej, tj. $\varepsilon_c = f(T_C)$. Ta sama uwaga dotyczy przykładowo rysunku 19. Wynika to z prostego faktu, że wartość emisyjności badanego obiektu ε_c charakteryzuje się najczęściej w postaci funkcji $\varepsilon_c = f(\lambda, T_C)$. Ponadto, cytowana praca [60] dotyczy „oceny emisyjności ludzkiego szkliwa i zębiny”, a nie obudowy elementu półprzewodnikowego. Nie jest to publikacja z zakresu nauk technicznych.

W tym zakresie dobrze by było porównać te wyniki z bardziej adekwatnymi materiałami, lub, np. z wynikami podanymi w fundamentalnym, trzytomowym dziele ujmującym emisyjności różnych materiałów:

- Touloukian Y.S., DeWitt D.P.: (1970), Seria: „Thermophysical properties of matter: Thermal radiative properties – metallic elements and alloys”, Vol. 7, IFI/Plenum Data Corporation Publishing Company UM, New York – Washington.
- Touloukian Y.S., DeWitt D.P.: (1972a), Seria: „Thermophysical properties of matter: Thermal radiative properties – nonmetallic solids”, Vol. 8, IFI/Plenum Data Corporation Publishing Company, New York – Washington.
- Touloukian Y.S., DeWitt D.P., HERNICZ R.S.: (1972b), Seria: „Thermophysical properties of matter: Thermal radiative properties – coatings”, Vol. 9, IFI/Plenum Data Corporation Publishing Company, New York – Washington.

4. Skąd wzięto wzór (9)?

5. We wzorze (15) jest coś nie tak. Wzór ten ma niby określać współczynnik przejmowania ciepła na drodze konwekcji α_k . Dlaczego raz tę wielkość oznacza się jako α_k a innym razem jako h_c ? Dodatkowo, we wzorach (14) oraz (15) występuje dodawanie ($T_s + T_s$) – to dlaczego nie zapisać po prostu $2T_s$?

6. Dlaczego w pomiarach opisanych na str. 86 zastosowano rezystor termometryczny Pt 1000 a nie zastosowano przykładowo odpowiedniej klasy miernika temperatury wyposażonego w małego rozmiaru (perełkowy) termistor półprzewodnikowy, który w temperaturach występujących w eksperymencie jest znacznie czulszy niż rezystor Pt 1000?

7. W tabeli 18 na str. 91 w rubryce „Niepewność standardowa” umieszczono niepotrzebnie zbyt dużo cyfr znaczących. Ogólnie, zasada jest taka, że niepewności zapisuje się z 1 lub 2 cyframi znaczącymi. Ta sama uwaga dotyczy pozostałych kolumn. Dodatkowo, w każdej z kolumn powinno być tyle samo cyfr znaczących. Np. w kolumnie „Estymata wielkości wejściowej” na początku są 2 cyfry, zaś na końcu aż 5 cyfr znaczących: 130.00 - uwzględniając oczywisty fakt, że 0 jest cyfra znacząca.

Ocena rozprawy doktorskiej

Opiniowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Krzysztofa Dziarskiego ma charakter analityczno-eksperymentalny. Dotyczy trudnego i ważnego aspektu związanego z oryginalnym wykorzystaniem metod termografii komputerowej do pośredniego określania temperatury struktury półprzewodnikowej umieszczonej w obudowie elementów elektronicznych. Doktorant udowodnił sformułowaną przez siebie tezę co powoduje, że Jego praca stanowi dojrzały, osobisty dorobek. Istnieje realna perspektywa wdrożenia opracowanej przez Doktoranta metodyki badawczej na etapie projektowania układów elektronicznych różnych urządzeń. Wiadomo bowiem, że jedną z podstawowych przyczyn awarii urządzeń elektronicznych jest wadliwe zaprojektowanie elektroniki pod względem warunków odprowadzania ciepła.

Za osiągnięcia własne Autora uznaje:

1. Stworzenie autorskiego stanowiska badawczego,
2. Opracowanie oryginalnej metodyki badawczej pośredniego określania temperatury struktury półprzewodnikowej umieszczonej w obudowie elementów elektronicznych.
3. Przeprowadzenie bardzo szczegółowych badań teoretycznych dotyczących pośredniego określania temperatury struktury półprzewodnikowej umieszczonej w obudowie elementów elektronicznych z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych (MES) oraz środowisk programistycznych takich jak SolidWorks.
4. Umiejętność posługiwania się nowoczesnymi technikami pomiarowymi i narzędziami programistycznymi.
5. Przeprowadzenie bardzo szczegółowych badań eksperymentalnych dotyczących pośredniego określania temperatury struktury półprzewodnikowej umieszczonej w obudowie ele-

mentów elektronicznych na stanowisku badawczym wykonanym w oparciu o własną koncepcję.

6. Opracowanie budżetu niepewności termowizyjnego, pośredniego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego

Przeprowadzona pozytywna, eksperymentalna weryfikacja metody daje podstawy do praktycznego wykorzystania proponowanej metody przez zespoły badawcze zajmujące się problematyką dotyczącą diagnostyki jeszcze innych elementów elektronicznych, np. tyrystorów, czy innych obiektów cieplnych. Należy zaznaczyć, że Doktorant w prawidłowy sposób opisał warunki prac doświadczalnych, co jest bardzo ważną, pozytywną cechą dokumentowania badań eksperymentalnych. Na podkreślenie zasługuje staranność wykonania licznych, w większości barwnych, rysunków i wykresów, ich właściwe rozmiary i czytelność opisów.

Wniosek końcowy

Z punktu widzenia celu i postawionej tezy, przedstawiona do recenzji rozprawa została zrealizowana poprawnie. Układ pracy jest właściwy. Doktorant słusznie uwypukla własne dokonania. ***Na podstawie wnikliwej analizy pracy mogę stwierdzić, że nie nasuwają się zasadnicze uwagi krytyczne o charakterze merytorycznym.***

Przedstawione wyżej niewielkie uwagi mają na celu inspirację i zachęcenie Doktoranta do kontynuowania prac w tej dziedzinie. Samą pracę doktorską oceniam jako bardzo dobrą, choćby z powodu na jej wielkie walory użyteczne.

Recenzowana rozprawa mgr inż. Krzysztofa Dziarskiego pod tytułem „*Termowizyjne pomiary temperatury elementów półprzewodnikowych*”, stanowi dobry, samodzielny wkład doktoranta w nauki techniczne, w szczególności w zagadnienia dotyczące wykorzystania pomiarów termowizyjnych w szeroko rozumianej diagnostyce. Uzyskane rezultaty mają istotne znaczenie zarówno poznawcze jak i użyteczne i mogą być wykorzystane w dalszych pracach badawczych w tym zakresie.

Podane w rozprawie rozważania i wyniki, mimo wykazanych uwag i zastrzeżeń, pozwalają na stwierdzenie, że Doktorant dysponuje ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej „*automatyka, elektronika i elektrotechnika i technologie kosmiczne*”, podjął się rozwiązania oryginalnego i ważnego zadania, rozwiązał je, stosując poprawne metody badawcze oraz wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Stwierdzam więc, że recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Krzysztofa Dziarskiego nie wymaga uzupełnień ani poprawek i spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artykule 187 ustęp 1 i ustęp 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce* (Dziennik Ustaw z 2018 poz. 1668 z późniejszymi zmianami) oraz Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. „*o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*” (Dz.U. 2003 Nr 65 poz. 595) art. 13. i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jednocześnie, ze względu na duży dorobek Doktoranta, przeprowadzenie bardzo szczegółowych, oryginalnych badań w zakresie tematyki pracy oraz jej walory użyteczne, wnoszę o jej wyróżnienie.

.....
Waldemar Minkina

(Waldemar Minkina)