

Pomiar i regulacja strumienia ścieków w kanałach z powierzchnią swobodną

Zdzisław Kabza, Mariusz R. Rząsa

Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Instytut Informatyki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole

Streszczenie: Pomiar parametrów ścieków należy do stosunkowo trudnych zadań. Ścieki, w większości przypadków, to mieszanina dwufazowa. W ściekach zanieczyszczeniami mogą być ciała stałe lub ciecze, które rozpuszczają się w wodzie lub nie. W pracy autorzy zaproponowali, rozwiązanie systemu do pomiaru strumieni ścieków o szerokim zakresie pomiarowym, odporne na osadzanie się frakcji stałej oraz możliwe do zamontowania na już istniejących kanałach ściekowych. Zaproponowane rozwiązanie oparte jest na przepływomierzu szczelinowym z możliwością regulowania szczeliny w przegrodzie pomiarowej. Podstawowym mierzonym parametrem, na podstawie którego obliczany jest strumień objętościowy przepływających ścieków, jest wysokość ustawienia przegrody. Jest ona funkcją pola przekroju poprzecznego przewężenia. Autorzy przedstawili szczegółowy opis metody pomiarowej.

Słowa kluczowe: pomiar przepływu ścieków, kanały otwarte, przepływomierz spiętrzający, metody zwężkowe, kryza szczelinowa

1. Wprowadzenie

Ścieki są to zużyte ciecze, roztwory, koloidy lub zawiesiny, a także odpadowe ciała stałe, powstałe w wyniku działalności człowieka – na skutek działalności produkcyjnej i bytowej człowieka, mogą również pochodzić z innych źródeł. Ze względu na źródło pochodzenia ścieki dzieli się na [1]:

Ścieki bytowe – pochodzą z gospodarstw domowych oraz różnego rodzaju budynków użyteczności publicznej. W ich skład wchodzi detergenty, resztki pożywienia i odchody. Znajdują się w nich duża ilość związków organicznych, stąd możliwy jest szybki rozwój bakterii i pasożytów.

Ścieki przemysłowe – pochodzą z zakładów przemysłowych, powstające podczas procesów produkcyjnych. Ich skład zależy od profilu działalności zakładu. Duże zróżnicowanie składu tych ścieków sprawia, że metoda ich pomiaru musi być dobrana w oparciu o specyfikę tego zakładu.

Ścieki opadowe – powstają podczas opadów atmosferycznych, spływają do kanalizacji. Pewną trudność w odprowadzaniu tego rodzaju ścieków może stanowić rozwój infrastruktury drogowej, utwardzenia gruntu i zmniejszenie jego chłonności. Powoduje to konieczność odprowadzania zwiększonej ilości ścieków opadowych z powierzchni dróg, które wymagają podczysz-

czania i dalszego transportu do odbiornika. W tym przypadku pojawia się potrzeba ograniczenia maksymalnego odpływu, tym samym wydłużenia czasu ich spływu (retencji). Gromadzenie ścieków opadowych może odbywać się zarówno w zbiornikach zamkniętych, jak i otwartych. Jednak odpływ ścieków, ze względów bezpieczeństwa, powinien być kontrolowany.

Ścieki komunalne – pochodzą głównie z terenów miejskich i są mieszaniną ścieków bytowych, ścieków pochodzących z zakładów przemysłowych oraz ścieków powstających podczas opadów atmosferycznych.

Z uwagi na problematykę pomiaru strumienia ścieków, bardziej praktycznym podziałem ścieków jest podział ich ze względu na skład frakcyjny i rodzaj zanieczyszczeń, którymi są ciecze oraz ciała stałe.

Przemieszczanie poszczególnych faz tej mieszaniny, zależne jest od gęstości cieczy wchodzących w jej skład. Ciecze o gęstości większej od gęstości wody, będą się przemieszczały przy dnie kanału z prędkością inną niż prędkość ruchu wody. W przypadku cieczy o gęstości mniejszej od gęstości wody, będzie ona unoszona na powierzchni płynącego płynu. Podobnie w ściekach poruszają się ciała stałe. Ciała o gęstości mniejszej od gęstości wody są unoszone na jej powierzchni, a o gęstości większej, zazwyczaj toczą się po dnie.

Dodatkową trudność w pomiarze wprowadza rozkład frakcyjny (rys. 1) [2], który może powodować osadzanie się frakcji stałej lub jej pulsacyjne przemieszczanie się. Problematyka pomiaru tego rodzaju ścieków sprowadza się do zagadnień pomiaru przepływów dwufazowych, które stanowią obecnie jedno z najtrudniejszych zagadnień w metrologii przepływów. Ze względu na duże zróżnicowanie właściwości i składu ścieków, nie jest możliwe określenie uniwersalnej metody pomiarowej, nadającej się do zastosowania w szerokim zakresie. Do ścieków, które są zanieczyszczone chemicznie lub stanowiące zawiesiny dwufazowe, możliwe jest zastosowanie metod pomiarowych sto-

Autor korespondujący:

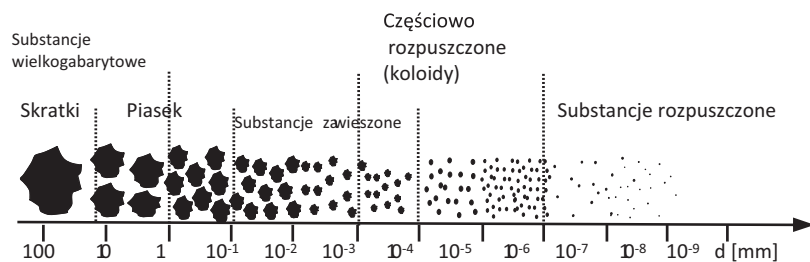
Zdzisław Kabza, z.kabza@po.edu.pl

Artykuł recenzowany

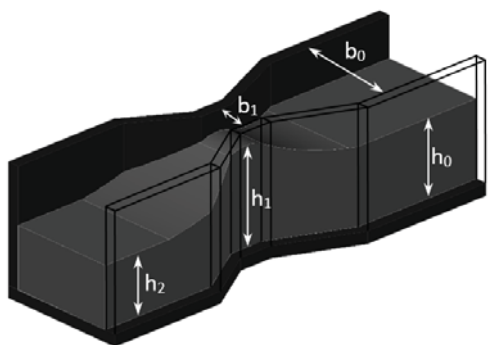
nadesłany 28.03.2020 r., przyjęty do druku 28.05.2020 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 1. Podział frakcji stałej w ściekach
Fig. 1. The distribution of the solid fraction in the sewage



Rys. 2. Zwężka pomiarowa
Fig. 2. The measurement flume

sowanych w pomiarze cieczy jednofazowych (bez cząstek stałych). Metody te są ogólnie znane i dobrze opisane w literaturze.

Znacznie trudniejszym zagadnieniem jest pomiar ścieków, w których znajdują się różnego rodzaju cząstki stałe (tego rodzaju ścieków jest najwięcej). W tym przypadku znane są różne metody pomiarowe w zastosowaniach laboratoryjnych. Brak jest jednak typowych urządzeń produkowanych komercyjnie do zastosowań przemysłowych [3]. Zagadnienie to niewątpliwie wymaga opracowania i wdrożenia odpowiednich rozwiązań. Stosunkowo tanimi i często stosowanymi metodami pomiaru w kanałach otwartych są metody zwężkowe [4, 5]. Polegają one na przewężeniu kanału o szerokości b_0 do szerokości b_1 (rys. 2). Prędkość ruchu cieczy na wysokości przewężenia zwiększa się, dodatkowo następuje spiętrzenie cieczy do wysokości h_1 . Za przewężeniem, wysokość od dna kanału do lustra cieczy h_2 , jest mniejsza od pierwotnej wysokości b_0 . Jest to spowodowane stratami hydraulicznymi.

Wysokość spiętrzenia cieczy w przewężeniu h_1 jest funkcją strumienia cieczy. Funkcję tę teoretycznie opisuje równanie Bernoulliego. W praktyce, najczęściej stosowany jest wzór na obliczanie strumienia objętościowego [6]:

$$Q = \frac{C}{\sqrt{1-m^2}} b_1 h_1 \sqrt{2g(h_1 - h_0)} \quad (1)$$

We wzorze, odpowiednio: C – współczynnik przepływu charakterystyczny dla danego kanału pomiarowego, wyznaczany eksperymentalnie; g – przyspieszenie ziemskie, m – moduł kanału pomiarowego, stanowi stosunek pola przekroju poprzecznego strugi przed przewężeniem do pola przekroju poprzecznego strugi na wysokości przewężenia:

$$m = \frac{b_1 h_1}{b_0 h_0} \quad (2)$$

Przy stałej i znanej geometrii kanału pomiarowego, mierzonymi parametrami są wysokości słupa cieczy przed i w przewężeniu. Następnie, na ich podstawie oblicza się strumień objętościowy przepływającej cieczy. Ponieważ gęstość ścieków

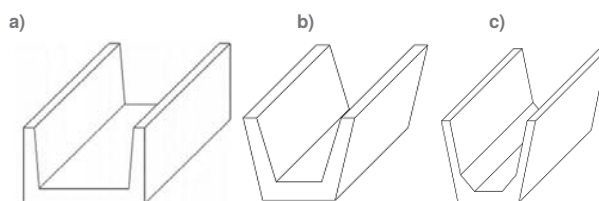
silnie zależy od ich składu, w praktyce nie określa się strumienia masowego a jedynie strumień objętościowy.

Przedstawione rozwiązanie jest praktyczne i dobrze nadaje się do pomiaru przepływu ścieków z powierzchnią swobodną. Zwiększona prędkość ruchu cieczy w przewężeniu powoduje, że nie osadzają się w nim cząstki stałe. Wadą tego rozwiązania jest to, że zakres pomiarowy jest stosunkowo mały. W przypadku monitorowania przepływu ścieków komunalnych, gdy ich natężenie znacząco zmienia się w ciągu doby, tego typu rozwiązania nie zapewniają wystarczającej dokładności pomiaru.

Autorzy postanowili opracować rozwiązanie, które umożliwiłoby prowadzenie pomiarów w szerokim zakresie pomiarowym, a jednocześnie byłoby tanie i możliwe do zastosowania już na istniejących kanałach ściekowych, przy zachowaniu założonej niepewności pomiarów.

2. Kanały ściekowe

W zależności od zapotrzebowania hydraulicznego, statycznego i technologii procesu budowlanego, stosuje się różnego rodzaju kanały [7]. W technice budowlanej najtańszym i najłatwiejszym rozwiązaniem do wykonania kanału ściekowego jest zastosowanie różnego rodzaju prefabrykowanych, koryt betonowych (rys. 3). Koryta o przekroju prostokątnym (rys. 3a) stanowią najtańsze z rozwiązań, jednak mogą być stosowane jedynie do dużych strumieni ścieków, gdyż przy małych prędkościach ruchu cieczy na dnie kanału osadza się duża ilość cząstek stałych tworząc zatry. Koryta o przekroju trapezowym (rys. 3b) w pewnym stopniu redukują tę niedogodność, jednak w dalszym ciągu występuje tu osiadanie cząstek stałych przy małych strumieniach przepływu. Trudniejsze do wykonania są kanały typu Krakowskiego (rys. 3c), jednak o znacznie lepszych właściwościach dla małych strumieni przepływu ścieków.



Rys. 3. Typowe koryta betonowe stosowane na kanały ściekowe
Fig. 3. Typical concrete troughs used for sewers

Innym rozwiązaniem są kanały ściekowe, które zakopywane pod ziemią. Chociaż kanały te są zamknięte, ze względu na to, że ścieki nigdy nie płyną całym przekrojem kanału, zastosowanie mają tu przepływomierze z powierzchnią swobodną (rys. 4). Dla małych przepływów stosuje się kanały o przekroju kołowym (rys. 4a). Z kolei dla większych przepływów, mniejsze opory występują w kanałach o kształcie dzwonowym (rys. 4b).

W obu przypadkach, dno kanału jest sferyczne, co zapobiega osiadaniu cząstek stałych przy mniejszych strumieniach ścieków. Natomiast dla przepływów, w których mają miejsce duże róż-



Rys. 4. Kształty typowych kanałów ściekowych
Fig. 4. Shapes of typical sewers

nice strumieni płynących ścieków, stosuje się kanały o kształcie jajowatym (rys. 4c).

W przypadku ścieków komunalnych, strumienie w pewnych okresach w ciągu doby są bardzo małe, a czasami zerowe, natomiast w innych okresach mogą przyjmować znaczne wartości. Tak duże różnice w strumieniach płynących ścieków, wymagają kanałów o specyficznych kształtach (rys. 5). W celu zapobiegania osadzaniu się frakcji stałej przy małych przepływach, stosuje się kanały o przekroju kołowo-trójkątnym (rys. 5a). Gdy wzrasta przepływ ścieków tego rodzaju kanały bardzo szybko wypełniają się cieczą. Z tego względu, niejednokrotnie stosuje się kanały kołowe z kinetą (rys. 5b) lub dla dużych strumieni prostokątne z kinetą (rys. 5c).



Rys. 5. Kształty kanałów ściekowych komunalnych
Fig. 5. Shapes of channels for municipal sewage systems

Duże zróżnicowanie kształtów kanałów ściekowych powoduje, że przepływomierze do pomiaru ścieków powinny być łatwo adaptowalne do kształtu kanału.

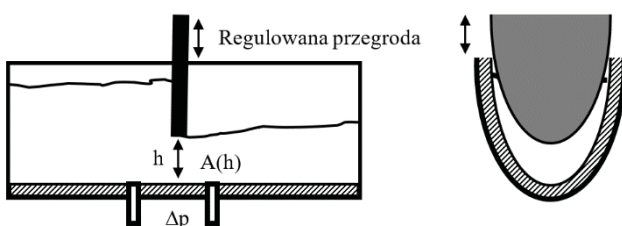
3. Urządzenie do pomiaru i regulacji strumienia ścieków z powierzchnią swobodną

Zaproponowane rozwiązanie polega na tym, że przewężenie kanału stanowi regulowana przegroda segmentowa (rys. 6). Przegroda jest dopasowana do kształtu kanału. Zasada działania polega na tym, że tak reguluje się przesuwając przegroda, aby uzyskać stałą wartość ciśnienia różnicowego, niezależnie od wartości strumienia płynu. Umożliwi to prowadzenie badań w szerokim zakresie pomiarowym. Wówczas, do zmiany zakresu pomiarowego, wystarczy jedynie zmienić daną wartość ciśnienia różnicowego Δp , odpowiadającego danemu zakresowi pomiarowemu, co w konsekwencji prowadzi do zmiany wysokości przegrody.

W odróżnieniu od dotychczas stosowanych metod pomiarowych z zastosowaniem zwężek pomiarowych, wartością mierzoną, na podstawie której jest obliczany strumień, jest zmieniające się pole przekroju poprzecznego przewężenia. Stąd wzór na obliczenie strumienia objętościowego płynu będzie miał postać:

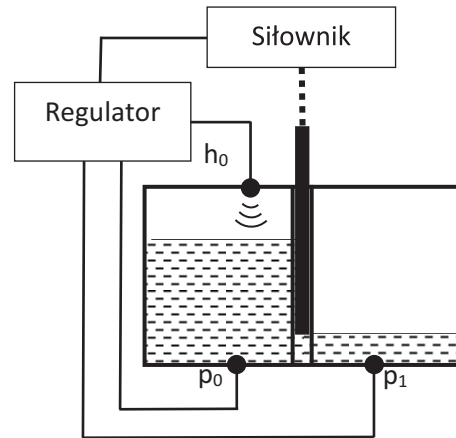
$$Q = B(h)A(h)\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (3)$$

gdzie: $B(h)$ – zależność funkcjonalna wyznaczona eksperymentalnie dla każdego kanału, $A(h)$ – pole powierzchni otworu przepływowego w funkcji wysokości h podniesienia przegrody; ρ – gęstość cieczy; Δp – różnica ciśnień przed i za przegroda.



Rys. 6. Budowa przepływomierza
Fig. 6. Flow meter design

Na rysunku 7 przedstawiono schemat blokowy układu pomiarowego. Przegroda jest regulowana za pomocą siłownika, dla którego nastawy są wyliczane przez regulator. Regulator ustawia wysokość przegrody na podstawie zmierzonych wartości ciśnień p_0 i p_1 . Następnie na podstawie ustawionej wysokości przegrody, oblicza strumień przepływającego płynu. Pomiar wysokości słupa cieczy przed przegroda, służy do określenia gęstości płynu oraz do skorygowania zadanej wartości ciśnienia różnicowego. Dzięki temu możliwe jest zautomatyzowanie zmiany zakresu pomiarowego. Przez zmianę wartości zadanej ciśnienia różnicowego możliwe jest sterowanie strumieniem płynu, przy jednoczesnym pomiarze jego wartości. Taka funkcjonalność jest korzystna w układach retencji ścieków.



Rys. 7. System pomiarowy
Fig. 7. Measurement system

W praktyce cykl pomiaru rozpoczyna się od wprowadzenia odpowiedniej wartości zadanej ciśnienia różnicowego Δp . Wartość ta determinuje zakres pomiarowy przepływomierza. Następnie regulator ustawia wysokość przegrody, w taki sposób, aby ciśnienie różnicowe na przegrodzie Δp było równe wartości zadanej. Gdy wysokość słupa cieczy przed przegroda jest poniżej wartości granicznej, następuje automatyczne skorygowanie wartości zadanej ciśnienia różnicowego Δp . Na podstawie zmierzonej wysokości słupa cieczy i ciśnienia przed przegroda p_0 , oblicza się gęstość cieczy.

Po czasie potrzebnym na ustabilizowanie się przepływu, następuje odczyt wysokości przegrody h . Na tej podstawie określa się wartość współczynnika $B(h)$. Funkcja $B(h)$ jest wyznaczana eksperymentalnie i jest charakterystyczna dla danego kanału. Strumień ścieków oblicza się na podstawie wzoru (3).

Automatyczny układ regulacji w określonych cyklach czasowych otwiera całkowicie przegroda w celu oczyszczenia kanału z frakcji unoszących się na powierzchni cieczy i zalegających w górnej części przegrody.

4. Podsumowanie

Przedstawione rozwiązanie jest przeznaczone do pomiaru ścieków komunalnych, dla których występują duże dobowe zmiany wartości strumienia płynących ścieków. Rozwiązanie to jest w pełni zautomatyzowane. System regulacji umożliwia automatyczne dobranie odpowiedniej zadanej różnicy ciśnienia Δp w taki sposób, aby zapewnić energooszczędną eksploatację systemu, przy zachowaniu założonej dokładności pomiaru. Taki układ może być również stosowany do pomiaru cieczy dwufazowych w szerokim zakresie mierzonych strumieni.

Cytowana bibliografia wskazuje na wiele problemów eksploatacyjnych, które rozwiązywano przez dobór kształtu kanału do odprowadzenia ścieków.

Autorzy proponują możliwości dalszych usprawnień systemów odprowadzających ścieki z wykorzystaniem zautomatyzowanych systemów pomiaru i regulacji strumienia ścieków, z możliwością okresowego usuwania zanieczyszczeń z przestrzeni pomiarowej. Układy regulacji przepływu ścieków w szczególności są pożądane w instalacjach odprowadzających ścieki opadowe, gdzie nie bez znaczenia jest retencja.

W celu usprawnienia procesu wyznaczania funkcji przepływu $B(h)$, można zastosować numeryczne modelowanie i projektowanie układów przepływowych [8, 9]. Przy wyznaczaniu funkcji przepływu $B(h)$ dla przepływów wielofazowych niejednokrotnie konieczne jest określenie udziału objętościowego poszczególnych frakcji. Można to zmierzyć stosując metody oparte na tomografii procesowej [10] lub ultradźwiękowe [11, 12].

Zaletą zaproponowanego rozwiązania jest możliwość montażu urządzenia na istniejącym kanale ściekowym, bez konieczności jego przebudowy. Dodatkową zaletą jest możliwość wykorzystania układu do regulacji przepływu ścieków w kanałach.

Bibliografia

1. Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo Wodne, Dz. U. 2017 poz. 1566
2. Fischer M., Stier E., *Podręczny poradnik eksploatacji oczyszczalni ścieków*, ATV, 1998.
3. Piechurski F.G., *Przeglądowa ocena urządzeń do pomiaru przepływu ścieków*, „Napędy i sterowanie”, Nr 2, 2012 64–70.
4. Michalski A., Sienkiewicz J., Watral Z., *Metody pomiaru przepływu na małych otwartych kanałach*, „Diagnostyka”, Nr 3 (39), 2006, 269–278.
5. Heinz G.E., *Technika pomiarów przepływu wody i ścieków*, Seidel-Przywecki, 1999.
6. Norma międzynarodowa ISO 9826-1992 Measurement of Liquid Flow in Open Channels. Parshall and SANIIRI Flumes
7. PN-71/B-02710 z dnia 6 lipca 1971 r. Kanalizacja zewnętrzna. Przekroje poprzeczne zamkniętych kanałów ściekowych.
8. Dobrowolski B., Kabza Z., *Teoretyczna analiza wpływu osiowosymetrycznych deformacji pola prędkości i zawirowania strugi na właściwości metrologiczne zwęzek pomiarowych*, Studia i Monografie, z. 59, WSI Opole 1992.
9. Kabza Z., *Modelowanie matematyczne przepływomierzy z urządzeniami zwężającymi*, Inżynieria mechaniczna, Leningrad 1981.
10. Rząsa R.M., *Ocena możliwości zastosowania tomografii optycznej w badaniu dwufazowych procesów przepływowych*, Polska Akademia Nauk, Oddział Katowice 2011.
11. Sommerlatt H.D., Andruszkiewicz A., *Dynamic Measurement of Particle Diameter and Drag Coefficient Using the Ultrasonic Method*, „Archives of Acoustics”, Nr 33(3), 2008, 351–362.
12. Synowiec P., Andruszkiewicz A., Wędrychowicz W., Regucki P., *Badania możliwości pomiaru strumienia objętości czynnika dwufazowego przepływomierzem ultradźwiękowym*, „Przegląd Elektrotechniczny”, Nr 10, 2015, 179–182, DOI: 10.15199/48.2015.10.37.

Measurement and Regulation of Wastewater Stream in Open Channels

Abstract: Measurement of sewage parameters is relatively difficult because sewage is, in most cases, a two-phase mixture. Contaminants in wastewater can be liquids and solids. Liquids in water may have a density higher or lower than the density of water. Density affects the movement of individual mixtures. Liquids with a density higher than the density of water move at the bottom of the channel and the speed of their movement are not equal to the speed of the water. In the case of liquids having a density less than the density of water, they are carried on the surface of the flowing water. Solids move very similarly. Solids with a lower density than water are raised to the water surface, and denser usually roll on the bottom. Furthermore, the fractional differential distribution of solids often results in congestion by deposition of the solid fraction in sewers and measuring apparatus. In this work, the authors proposed a solution for a system for measuring wastewater in a wide range of flows. This solution is insensitive to settling of the solid fraction, and can be mounted on the existing sewers. The proposed solution is based on a slotted flow meter with some modification consisting in adjusting the gap in the measuring partition. The basic parameter, measured based on which the volumetric flow of sewage is calculated, is the height of the partition, which is a function of the cross-sectional area of the narrowing. A detailed description of the measurement method and measurement methodology is provided.

Keywords: sewage flow measurement, open channels, accumulation flow meter, constrictive methods, slot orifice

prof. dr hab. inż. Zdzisław Kabza

z.kabza@po.edu.pl

ORCID: 0000-0002-0690-9616

Polski energetyk, specjalizujący się w komputerowym wspomaganie projektowania, metrologii energetycznej, monitorowaniu inwestycji, technice ciepłej. Studia wyższe ukończył na Politechnice Wrocławskiej w 1962 r. Następnie podjął pracę zawodową na macierzystej uczelni, otrzymując kolejno stopnie naukowe doktora w 1971 r. i doktora habilitowanego w 1977 r. z zakresu metrologii energetycznej oraz stanowisko docenta. Od 1996 r. związany jest z Politechniką Opolską, wcześniej Wyższą Szkołą Inżynierską. Od 1994 r. zasiada jako członek rzeczywisty Międzynarodowej Akademii Nauk Inżynierskich i Technologicznych. W latach 1987–2008 był członkiem Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, a od 2008–2022r. wybierany został na członka Komitetu Problemów Energetyki przy Prezydium Polskiej Akademii Nauk.

**dr hab. inż. Mariusz R. Rząsa, prof. PO**

m.rzasa@po.edu.pl

ORCID: 0000-0002-3461-2131

Jest absolwentem Wydziału Elektrycznego Politechniki Opolskiej, o specjalności Automatyka i Metrologia Elektryczna. Po studiach pracował w Katedrze Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej, gdzie uzyskał stopień doktora nauk technicznych. Stopień doktora habilitowanego uzyskał na Politechnice Częstochowskiej na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki. Obecnie pracuje na stanowisku profesora uczelnianego Politechniki Opolskiej na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki. Zajmuje się komputerowymi metodami pomiarowymi i diagnostyką komputerową. Współpracuje z wieloma zakładami przemysłowymi i jest autorem szeregu prac naukowych.



