

Bożena GIL, Wojciech KORAL

INSTYTUT INŻYNIERII WODY I ŚCIEKÓW
POLITECHNIKA ŚLĄSKA

BŁĄD POMIARU JAKO WSKAŹNIK OCENY ROZWIĄZANIA OPOMIAROWANIA SIECI KANALIZACYJNEJ

MEASUREMENT ERROR AS AN INDICATOR FOR THE
EVALUATION OF MEASUREMENT SOLUTIONS FOR THE
SEWERAGE NETWORK

We can observe increasing popularity of monitoring of sewage flow. Currently, this monitoring is used as a tool to support network operation management.

Increased interest in wastewater monitoring is also seen as the basis of fees for the use of sewerage services. In contrast to the control of the correctness of measurements carried out in waterworks, there is no normative regulation for sewage flow measurements. Therefore, in the case of billing measurements, when choosing the optimal technical solution, attention should be paid to the uncertainty measurement (and according to the older nomenclature - measurement error). The uncertainty of measurement is a new concept, therefore the authors of the paper have decided to analyse the measurement error as the basis for the assessment of the measurement used so far.

The aim of the article is to present the influence of the measurement error analysis on the selection of the proposed technical solution for monitoring the flow of sewage for accounting purposes. The analysis was carried out on the basis of statistical analysis of measurements of control sewage flows in the sewage system.

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach stopniowo zwiększa się popularność monitoringu przepływu ścieków w kanalizacji grawitacyjnej. Obecnie monitoring wykorzystywany jest głównie jako narzędzie wspomagające podejmowanie decyzji związanych z zarządzaniem eksploatacją sieci, między innymi do:

- wydawania warunków podłączenia nowoprojektowanych sieci do istniejącej sieci (dotyczy głównie podłączenia stref przemysłowych);
- wytypowania lokalizacji pompowni ścieków;
- określenia optymalnego udziału wód przypadkowych w kanalizacji sanitarnej;
- określenia punktów krytycznych na sieci kanalizacyjnej deszczowej lub kanalizacji ogólnospławnej (analiza linii ciśnienia na sieci);
- określenia i wykorzystania maksymalnej zdolności retencyjnej istniejącej kanalizacji deszczowej;
- kalibracji modeli hydrodynamicznych.

Zwiększone zainteresowanie monitoringiem przepływu ścieków widoczne jest również wśród zakładów przemysłowych jako podstawa rozliczeń za korzystanie z usług kanalizacyjnych. Rozwiązanie takie jest preferowane również przez gminy, które odprowadzają ścieki do sieci lub oczyszczalni ścieków zarządzanej przez inną gminę (rozliczenie opłat pomiędzy gminami za ilość ścieków dopływających do oczyszczalni).

Należy podkreślić, że zgodnie z obowiązującą "Ustawą o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę...": „ilość odprowadzonych ścieków (od dostawcy usług tym przedsiębiorstw przemysłowych lub usługowych) ustala się na podstawie wskazań urządzeń pomiarowych, (...) a w przypadku ich braku ilość odprowadzonych ścieków ustala się na podstawie umowy, jako równą ilości wody pobranej” [1].

Ww. Ustawa nie obejmuje hurtowej dostawy ścieków, czyli „wprowadzania przez przedsiębiorstwo wodociągowo-kanalizacyjne ścieków do urządzeń kanalizacyjnych nie będących w jego posiadaniu.” W tym przypadku „stosuje się przepisy Kodeksu cywilnego” [1]. Ma to miejsce m.in. w przypadku rozliczeń między gminami.

Przy wyborze sposobu opomiarowania istotne znaczenie ma analiza techniczno-ekonomiczna. Jednak w odróżnieniu od kontroli prawidłowości pomiarów prowadzonych na obiektach wodociągowych, dla pomiarów przepływu ścieków brak jest regulacji normatywnych czy aktów prawnych [2] [3] [4], stąd przy wyborze rozwiązania technicznego ważne jest również zwrócenie uwagi na wiarygodność pomiaru. Wiarygodność pomiaru określona jest obecnie przez niepewność pomiaru [5, 6] (a wg starszej nomenklatury błędu pomiarowego [7]). Pojęcie niepewności jest stosunkowo nowe, zostało wprowadzone przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną (ISO) w Przewodniku „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” [5].

Jednakże przy ocenie pomiaru przepływów zarówno wody, jak i ścieków nadal znacznie częściej wykorzystuje się pojęcie błędu pomiarowego niż niepewności pomiaru. Stąd autorzy referatu zdecydowali się wykorzystać w dalszej części artykułu analizę błędu pomiarowego.

W znaczeniu ilościowym błąd pomiaru rozumiany jest jako różnica między wartością zmierzoną a wartością rzeczywistą, natomiast niepewność pomiaru jest przedziałem, w którym z określonym prawdopodobieństwem znajduje się prawdziwa wielkość mierzona [5, 6].

W przypadku szacowania błędu pomiarowego uwzględnia się przede wszystkim: **błędy systematyczne** (określane np. na podstawie błędów instrumentalnych czy też błędów metody), **błędy przypadkowe** (które mają charakter losowy, określane na postawie analizy statystycznej, wynikające z czynników przypadkowych, które mogą mieć wpływ na pomiar) oraz **błędy grube** (czyli wartości znacznie przewyższające wartości oczekiwane w danej serii pomiarowej) [7]. Natomiast podczas szacowania niepewności pomiarowej określa się niepewność standardową typ A (określoną na podstawie analizy statystycznej i dotyczącą przeważnie **błędów przypadkowych**) oraz niepewność rozszerzoną uwzględniającą błąd typu B (która odnosi się do **błędów systematycznych**) [6].

Celem niniejszego artykułu jest analiza błędu pomiarowego dla różnych rozwiązań technicznych opomiarowania punktu pomiarowego, planowanego do rozliczeń pomiędzy usługobiorcą a usługodawcą. Wybór metody opomiarowania zostanie dokonany na podstawie analizy statystycznej pomiaru kontrolnego przepływu ścieków w kanalizacji grawitacyjnej.

2. Główne źródła błędów w pomiarach przepływu ścieków

Czynniki wpływające na wielkość błędu pomiarowego zależą od wybranej metodyki pomiaru, rodzaju urządzenia pomiarowego wykorzystywanego do określenia przepływu czy zakresu przepływu, ilości ścieków, etc. W przypadku kanalizacji grawitacyjnej do pomiaru przepływu ścieków stosuje się urządzenia służące do określenia natężenia przepływu ścieków w korytach otwartych metodami bezpośrednimi lub metodami pośrednimi [8, 9, 10]. W dalszej części pracy zostaną przedstawione główne czynniki wpływające na wielkości błędu pomiarowego przepływu wykorzystującego:

- przepływomierz ultradźwiękowy wykorzystujący efekt Dopplera do pomiaru przepływu ścieków w przewodach grawitacyjnych, którego montaż nie wymaga przebudowy sieci kanalizacyjnej [9, 11];
- przepływomierz elektromagnetyczny, którego montaż wymaga przebudowy fragmentu sieci kanalizacyjnej umożliwiającej przejście z przewodu grawitacyjnego w przewód całkowicie wypełniony [9].

2.1 Czynniki wpływające na błąd pomiaru przepływu ścieków przepływomierzem ultradźwiękowym

Pomiar przepływu ścieków przepływomierzem ultradźwiękowym, wykorzystującym efekt Dopplera w kanalizacji grawitacyjnej, polega na równoczesnym pomiarze prędkości (za pomocą czujnika zlokalizowanego najczęściej w osi przewodu na dnie przewodu) i napełnienia ścieków w kanale. Zmierzona prędkość przepływu przekształcana jest przez procesor przepływomierza na prędkość średnią, a pomiar napełnienia ścieków w powierzchnię czynną przekroju poprzecznego strumienia cieczy A (po wcześniejszym określeniu dokładnych wymiarów kanału).

Popularność tej metody wynika między innymi z możliwości montażu urządzeń pomiarowych bez konieczności przebudowy sieci kanalizacyjnej, a sama instalacja tych urządzeń nie powoduje z punktu widzenia hydraulicznego znaczących strat hydraulicznych. Przy obliczeniach błędu całkowitego w tej metodzie błąd jest złożony i wynika: z błędów powstałych przy pomiarze napełnienia w kanale, wynikających z kształtu kanału, profilu prędkości przepływu oraz wysokości warstwy osadu. Błąd całkowity pomiaru przepływu można przedstawić jako składową błędu systematycznego i błędu przypadkowego:

$$X_Q = \sqrt{X_Q'^2 + X_Q''^2}$$

gdzie

X_Q - błąd całkowity, %

X_Q' - błąd systematyczny, %

X_Q'' - błąd przypadkowy, %

Błąd systematyczny i błąd przypadkowy można obliczyć korzystając z następującej formuły:

$$X_Q' = \sqrt{X_h'^2 + X_b'^2 + X_v'^2 + X_o'^2}$$

$$X_Q'' = \sqrt{X_h''^2 + X_b''^2 + X_v''^2 + X_o''^2}$$

gdzie

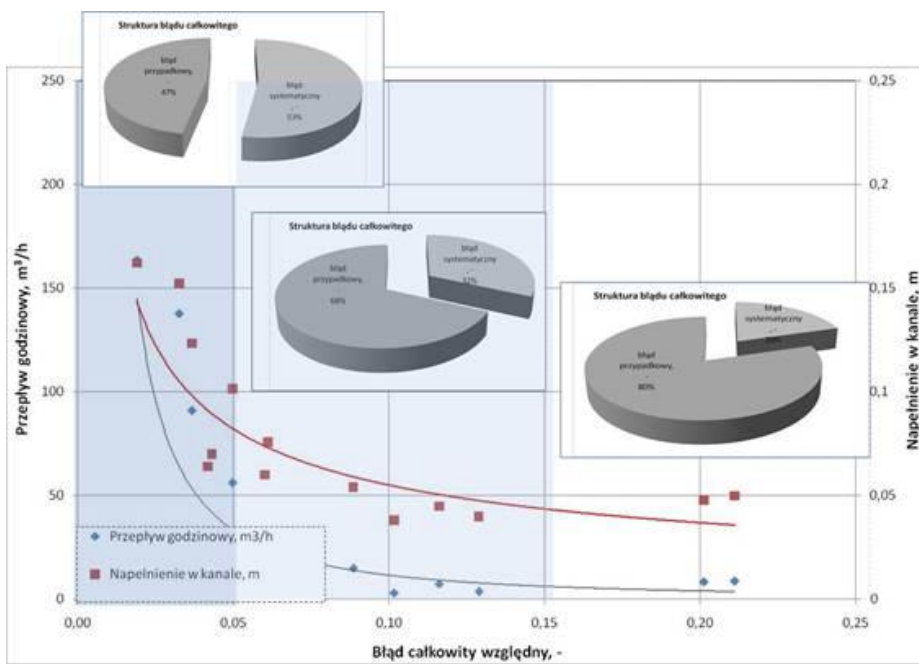
X_h' ; X_h'' – błąd systematyczny/ błąd przypadkowy pomiaru napełnienia w korycie, %

X_b' ; X_b'' – błąd systematyczny/ błąd przypadkowy pomiaru szerokości koryta, %

X_v' ; X_v'' – błąd systematyczny/ błąd przypadkowy pomiaru prędkości w korycie, %

X_o' ; X_o'' – błąd systematyczny/ błąd przypadkowy pomiaru grubości osadu kanalizacyjnego, %.

Na wielkość błędu pomiarowego ma wpływ nie tylko wybór rodzaju przepływomierza i zmienność przepływów, ale również warunki hydrauliczne panujące w punkcie pomiarowym. W takich przypadkach niezbędne jest wyznaczenie błędu całkowitego indywidualnie dla danego punktu pomiarowego [8, 12]. Przykład zmiany względnego błędu całkowitego przedstawia Rys. 1.



Rys. 1. Przykład zmiany względnego błędu całkowitego oraz struktury wewnętrznej błędu w zależności od napełnienia lub przepływu ścieków. Błąd pomiarowy określony dla kanału DN 500, spadku 0,2%, dla stosunku napełnienia do średnicy do 25%

Fig. 1. An example of changing the relative total error and the internal structure of the error in dependence on the filling or flow of sewage. Measurement error made for DN 500, 0.2% drop, for fill ratio up to 25%

Na wielkość błędu pomiarowego w przedstawionym na Rys. 1 przykładzie istotny wpływ miały błędy przypadkowe (szczególnie w przypadku gdy błąd całkowity był większy niż 5%). Błąd przypadkowy wynika z czynników losowych związanych z charakterystycznymi dla danego punktu pomiarowego warunkami hydraulicznymi panującymi w kanale. W odniesieniu do Rys. 1 - w przypadku błędów powyżej 6% błędy przypadkowe stanowiły przeciętnie 68% błędu całkowitego (dla analizowanego przypadku napełnienie kanału było większe niż 8 cm), a w przypadku błędów powyżej 15% błędy przypadkowe stanowiły około 80% błędu całkowitego (napełnienie kanału mieściło się pomiędzy 4 a 6cm, co odpowiada minimalnej wysokości napełnienia w kanale, przy której możliwe jest wyznaczenie prędkości w kanale). W analizowanym przykładzie największy udział w błędach przypadkowych miał błąd wynikający z pomiaru prędkości.

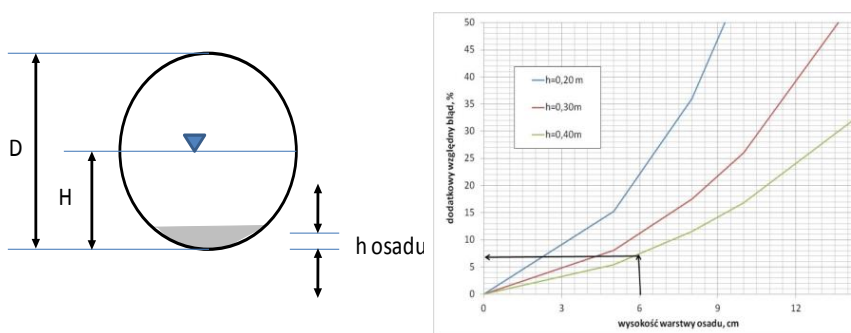
Struktura wewnętrzna błędu pomiarowego wynikała z warunków pomiaru prędkości, które były realizowane przy minimalnym, zalecanym napełnieniu w kanale (wynosi ono 4 cm [11, 12,13], a napełnienie optymalne 8-10 cm [13]).

W celu stworzenia optymalnych warunków pomiaru przy pomiarze przepływomierzem ultradźwiękowym wykorzystującym efekt Dopplera, w przypadku przewodów o swobodnym zwierciadle, należy zwrócić szczególną uwagę na [8, 10, 12, 14, 15]:

- a) wybór odcinka koryta pomiarowego o jednolitym symetrycznym przekroju poprzecznym, tak, aby ograniczyć do minimum zaburzenia rozkładu prędkości;
- b) zachowanie prostego odcinka dopływowego i odcinka odpływowego dla danego punktu pomiarowego - w przypadku występowania zakłóceń w profilu prędkości mogą być wymagane dłuższe odcinki proste uspokajające;
- c) konieczność unikania zmiany spadku na odcinku pomiarowym, konieczność unikania montowania czujnika bezpośrednio przed lub za uskokami dna, elementami wbudowanymi lub bocznymi dopływami;
- d) konieczność unikania koryta o dużym spadku (liczba Frouda nie powinna przewyższać wartości 0,5).

Występowanie zbyt krótkich odcinków prostych [16, 26] zarówno przed, jak i za przeszkodą, występowanie zmian kierunku przepływu lub oddziaływania urządzeń technologicznych powodujących np. wystąpienie cofki - powoduje gwałtowne zwiększenie błędu pomiarowego. W celu zmniejszenia błędu związanego z pomiarem prędkości korzystne jest wykorzystanie przepływomierzy mających możliwość pomiaru rzeczywistego rozkładu prędkości, tzw. przepływomierzy profilujących [14]. W tym przypadku pomiar prędkości odbywa się w osi kanału, na różnych wysokościach (mierząc od dna kanału). Wówczas napełnienie w kanale może być podzielone na maksymalnie 16 „warstw” (liczba warstw zależy od rodzaju urządzenia pomiarowego), przy czym wysokość każdej z warstw może wynosić od 0.01 do 0.10 m [13].

W przypadku pomiaru przepływów z wykorzystaniem metody pośredniej dodatkowo konieczny jest pomiar poziomu osadów w kanalizacji (korekta obliczenia pola powierzchni przekroju). Nieuwzględnienie wysokości osadu przy obliczaniu przepływu ścieków w kanale powoduje dodatkowy błąd względny procentowy (tzw. błąd gruby). W takiej sytuacji błąd ten powinien być uwzględniony przy obliczeniu błędu całkowitego. Przykładowe obliczenie wielkości dodatkowego błędu względnego w przypadku pominięcia w obliczeniach przepływu warstwy osadu kanalizacyjnego dla DN 800 przedstawia Rys. 2.



Rys. 2. Wielkość dodatkowego względnego błęd pomiarowego przy obliczeniu przepływu w przypadku nieuwzględnienia wysokości osadu kanalizacyjnego, przykład dla DN 800, $i=0,16\%$

Fig. 2. The amount of the additional relative measurement error in the calculation of the flow in the case of not taking into account the amount of sewage sludge, example for DN 800, $i = 0.16\%$

2.2 Czynniki wpływające na błąd pomiaru przepływomierzem elektromagnetycznym

Z analizy danych dotyczących błędów systematycznych urządzeń pomiarowych stosowanych w kanalizacji [8, 14, 17-24], wynika, że najmniejsze błędy pomiarowe (pod warunkiem prawidłowego montażu urządzenia) mogą wystąpić w przypadku zastosowania przepływomierzy elektromagnetycznych. W kanalizacji grawitacyjnej mogą być wykorzystywane przepływomierze elektromagnetyczne zarówno do koryt otwartych [25], jak i do przewodów zamkniętych [22-24]. Dużo popularniejszym rozwiązaniem jest drugie rozwiązanie - wymaga ono jednak zaprojektowania przejścia między przewodem o swobodnym zwierciadle a przewodem całkowicie wypełnionym cieczą [16].

Pomiar przepływu ścieków w tym przypadku wykorzystuje prawo Faradaya (ciecz poruszająca się w polu magnetycznym wytwarza napięcie, które jest wprost proporcjonalne do prędkości przepływu [24, 25]). Zmierzone napięcie służy do wyznaczenia prędkości średniej w kanale w oparciu o teoretyczne profile prędkości. Dla znanych wymiarów wewnętrznych głowicy przepływomierza oraz przy uwzględnieniu obliczonej prędkości średniej, wartość przepływu wyliczana jest metodą pośrednią. Pomiar ten jest możliwy w przypadku cieczy prądotrzewodzących (minimalna przewodność $5 \mu\text{S}/\text{cm}$ [24]), co w przypadku ścieków bytowych i komunalnych jest spełnione.

W tym przypadku wielkość błędu pomiarowego jest ściśle skorelowana z pomiarem prędkości. Generalnie większość producentów przepływomierzy podaje jako maksymalny zakres pomiarowy prędkość 10 m/s [24]. W większości przypadków dodatkowo zwraca się uwagę na prędkość 0,5 m/s [21], która jest prędkością rozgraniczającą zakres błędów pomiarowych tzn.:

- z niskim błędem pomiarowym zazwyczaj (poniżej $\pm 0,5\%$) dla prędkości $v > 0,5$ m/s;
- z wysokim błędem pomiarowym (powyżej $\pm 0,5\%$, nawet rzędu kilku - kilkunastu procent przy przepływach dążących do zera) dla prędkości $v \leq 0,5$ m/s.

Optymalnym zakresem pomiarowym przepływomierza jest wg producentów zakres od 0,5 m/s do 5,0 m/s [22-24].

Warunkiem podstawowym uzyskania niskich błędów pomiarowych jest właściwy montaż urządzenia pomiarowego oraz jego uziemienie. Zbyt krótkie odcinki proste zarówno przed, jak i za urządzeniem pomiarowym wpływają negatywnie na dokładność pomiaru, konieczne jest bowiem zagwarantowanie istnienia liniowych i prostoliniowych strumieni przepływu, aby zapewniona była maksymalna dokładność pomiaru.

Na etapie projektowania takiego rozwiązania ważne jest również zapewnienie całego czasu pracy urządzenia pomiarowego w całkowicie napełnionym przewodzie. Przepływomierze elektromagnetyczne muszą pracować w warunkach nie dopuszczających do powstawania pęcherzy powietrza.

W przypadku wykonywania pomiarów służących rozliczeniu pomiędzy usługobiorcą a usługodawcą warto również zwrócić uwagę na wartość „zerową” prędkości (tzw. próg odcięcia). Wartość „zerowa” prędkości jest wartością umowną – w rzeczywistości przepływomierz przestaje mierzyć dla tzw. progu odcięcia, wyrażonego w procentach zakresu pomiarowego lub jednostkach prędkości (m/s). Próg odcięcia pomiaru określa wartość prędkości, poniżej której przepływ nie jest mierzony. Próg ten dotyczy zarówno ruchu medium w przód, jak i wstecz. Próg odcięcia jest ustalany w procentach w odniesieniu do zakresu pomiarowego w przód (F). Funkcja ta umożliwia eliminację zakłóceń spowodowanych np. przez fluktuację cieczy w rurociągu.

W rzeczywistości istnieją dwie wartości progów odcięcia:

- próg odcięcia zmienny (istnieje możliwość jego zmiany przez użytkownika, zazwyczaj w zakresie 0-10% Q_{max});
- próg odcięcia fabryczny (zazwyczaj nie podawany w dokumentacji producenta przepływomierza), który bezwzględnie odcina pomiary przy spadku prędkości poniżej założonej wartości. Wartość ta wynosi od kilku do kilkudziesięciu mm/s (w zależności od producenta urządzenia).

Dla części producentów domyślna wartość progu odcięcia wynosi 1% Q_{max} , co np. dla DN400 oznacza brak pomiarów przy przepływie poniżej 45 m³/h. W związku z tym zalecane jest ustawienie wartości progu odcięcia jako 0%.

3. Wybór rozwiązania technicznego do monitoringu punktu pomiarowego uwzględniając analizę błędu pomiarowego

Do analizy warunków hydraulicznych i analizy wielkości błędu pomiarowego wykorzystano dane pochodzące z pomiarów kontrolnych dla planowanej lokalizacji punktu pomiarowego na sieci kanalizacji grawitacyjnej o średnicy DN 500 (wykonanej z betonu ułożonego ze spadkiem 0,4%). Lokalizacja punktu pomiarowego zamykała zlewnię kanalizacyjną z której odprowadzane były głównie ścieki bytowe z dzielnicy mieszkaniowej. W analizowanej zlewni występował system kanalizacji rozdzielczej, gdzie wody opadowe i roztopowe były odprowadzane do kanalizacji deszczowej. W czasie występowania opadów udział wód przypadkowych w skali rocznej szacowano na poziomie około 12%. Powierzchnia tej zlewni wynosiła około 180,5 ha.

3.1 Wstępna analiza statystyczna pomiaru przepływu ścieków

Analizę warunków hydraulicznych, dla analizowanego punktu pomiarowego, przeprowadzono na podstawie pomiaru przepływu ścieków od września do października 2017r. Do pomiarów wykorzystano przepływomierz przenośny ultradźwiękowy profilujący rozkład prędkości w osi przewodu metodą korelacji krzyżowej (PCM 4 firmy NIVUS). Do analizy wykorzystano zarówno dane pochodzące z pomiarów napełnienia ścieków, prędkości, jak i przepływu ścieków. Pomiar napełnienia, prędkości, przepływu i temperatury w kanale rejestrowano z interwałem czasowym 5 minut.

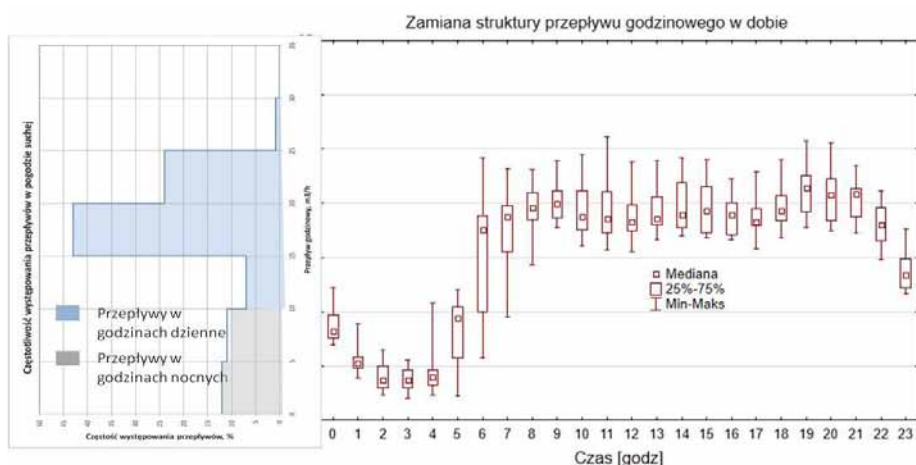
W okresie analizowanym:

- zakres przepływów godzinowych wahał się od $-1,4 \text{ m}^3/\text{h}$ do $377,4 \text{ m}^3/\text{h}$, charakteryzował się dużą zmiennością przepływów podczas występowania opadów atmosferycznych (współczynnik zmienności 1,2 a skośność wynosiła 9);
- udział wód przypadkowych w odniesieniu do całkowitej objętości ścieków zmierzonych wynosił 20% względem ogólnej ilości ścieków zmierzonych;
- zakres napełnienia w kanale wahał się od 0,04 m do 0,27m (współczynnik zmienności wynosił 0,26, a skośność była równa 5), zakres prędkości zawierał się w zakresie od 0,03m/s do 1,0 m/s (współczynnik zmienności wynosił 0,44, a skośność wynosiła poniżej 3).

Przy pogodzie bezdeszczowej:

- zakres przepływów godzinowych wahał się od $2,0 \text{ m}^3/\text{h}$ do $26,0 \text{ m}^3/\text{h}$ (współczynnik zmienności wynosił 0,4, a skośność 0);
- napełnienia ścieków wahały się od 0,03m do 0,07m, a prędkość od 0,08m/s do 0,48m/s).

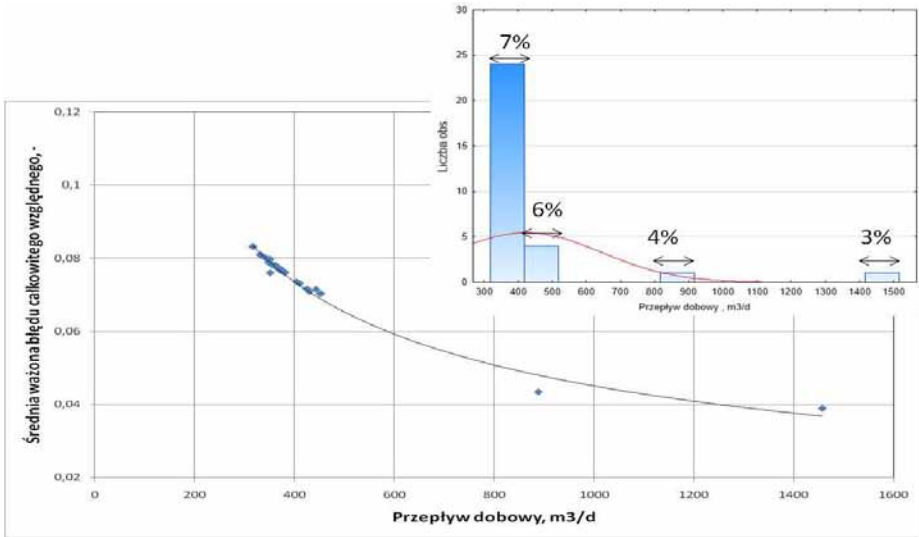
W celu określenia błędu całkowitego, względnego w ciągu doby wzięto pod uwagę częstotliwość występowania przepływów godzinowych (rys. 3), które charakteryzują się inną wielkością błędu całkowitego (zależność wielkości błędu całkowitego od przepływu przedstawia Rys. 1).



Rys. 3. Zmiana struktury przepływów w poszczególnych godzinach doby oraz częstość występowania przepływów w kanale przy pogodzie bezdeszczowej
 Fig 3. Change in the structure of flows in individual hours of the day and the frequency of flows in the channel in rainless weather

Przy pogodzie bezdeszczowej największe wartości błędów całkowitych występowały w godzinach nocnych (tzn. pomiędzy godz. 3 a godz. 5). W tym okresie przez punkt pomiarowy przepłynęło około 11% ogólnej ilości ścieków na dobę, a wielkość błędu na dobę wynosiła 16% błędu całkowitego (co odpowiada największym błędom względnym). Średni błąd pomiaru w ciągu doby bezdeszczowej wynosił około 8% (na podstawie średniej ważonej).

W analizowanym okresie (30 dni) liczba dni z opadem wynosiła 5, w tym dni z opadem powyżej 10mm było powyżej 2. Opad atmosferyczny był głównym źródłem wód przypadkowych, których udział, w stosunku do całej ilości ścieków, wynosił 12%. W przypadku dni z opadem przepływ charakteryzował się mniejszym błędem całkowitym względnym, co przedstawia Rys. 4. W analizowanym okresie ilość ścieków, jakie przepływały przez punkt pomiarowy, wynosiła 12 600 m³ z przeciętnym błędem względnym $\pm 6,4\%$.



Rys. 4. Zmiana średniego błędu całkowitego względnego w zależności od przepływu dobowego oraz częstość występowania przepływów dobowych w okresie wykonywania pomiarów

Fig 4. Change of the average total relative error in dependence of the daily flow, and the frequency of daily flows during the period of measurement

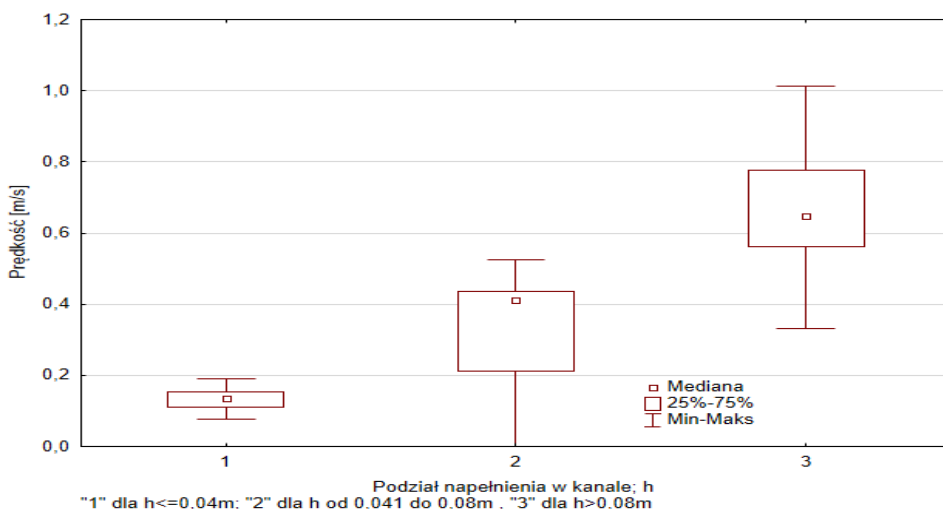
3.2 Dobór techniczny urządzenia pomiarowego na podstawie analizy błędu pomiarowego

W przypadku zastosowania, w analizowanym punkcie pomiarowym przepływomierza ultradźwiękowego, wykorzystującego efekt Dopplera i mającego możliwość pomiaru rzeczywistego rozkładu prędkości, względny błąd pomiaru w czasie dni z opadem poniżej 1mm wahałby się pomiędzy 7 a 8% wartości mierzonej.

Analiza danych historycznych wykazała, że średnia wysokość opadów wynosiła około 713 mm, liczba dni z opadem powyżej 1 mm wynosiła około 266 dni (występował wtedy minimalny udział wód przypadkowych), średnia ilość dni z opadem pomiędzy 10 a 31 mm wynosiła 17 dni, a liczba dni z opadem powyżej 30 mm wynosiła 2 dni. Z analizy opadów atmosferycznych wynika, że w roku przeciętnym przez dłuższy czas (266 dni w roku, czyli 72% okresu pomiarowego) względny błąd pomiarowy mieściłby się w granicach 7-8% względnego błędu całkowitego.

Największy udział w błędzie całkowitym miały, dla analizowanych przepływów, błędy przypadkowe (co przedstawia Rys. 1), związane z dokładnością pomiaru prędkości. Z analizy dokładnego rozkładu napełnienia w kanale wynika, że największe błędy pomiarowe występowały gdy napełnienie kanału wynosiło poniżej 5-8cm, (przypomnijmy, że zalecane napełnienie w kanale podczas pomiaru powinno wynosić ponad 8-10 cm a napełnienie minimalne - przy zastosowaniu przepływomierza profilującego - może wynosić około 4 cm) [11].

W celu spełnienia tego warunku można zastosować nastawne rynny spiętrzające, co pozwala na redukcję przekroju w dolnej części kanału [14]. W wyniku podwyższenia poziomu napełnienia i zmniejszenia prędkości przepływu poprawiają się warunki pomiaru z punktu widzenia hydraulicznego. Jednak w analizowanym przypadku, dla napełnienia kanału do 8 cm, prędkość wynosiła do 0,5m/s (Rys. 5), więc w przypadku zastosowania rynny spiętrzającej istniało ryzyko odkładania się osadu kanalizacyjnego przed urządzeniem pomiarowym.



Rys. 5. Struktura prędkości dla poszczególnych zakresów napełnienia w kanale.
Fig 5. Velocity distribution for individual filling ranges in the channel.

Analizując wymagania dotyczące prognozowanej ilości odprowadzanych ścieków (dzielnica mieszkaniowa o liczbie mieszkańców-3120), oraz prognozowany rozwój dzielnicy (współczynnik 1,2), przy założeniu zużycia jednostkowego wody $110 \text{ dm}^3/\text{M}\cdot\text{d}$ oraz przy przyjęciu współczynników nierównomierności godzinowej ($N_h=2$) i nierównomierności dobowej ($N_d=1,5$), sprawdzono możliwość przebudowy fragmentu sieci kanalizacyjnej dla projektowanego punktu pomiarowego. Przy analizie rozwiązań uwzględniono dwa warianty, tzn.:

- pierwszy wariant zakładający wykorzystanie przepływomierza ultradźwiękowego do koryt otwartych mającego możliwość wyznaczenia rzeczywistego profilu prędkości;
- drugi wariant zakładający wykorzystanie przepływomierza elektromagnetycznego, uwzględniając konieczność wykonania syfonu na kanalizacji sanitarnej.

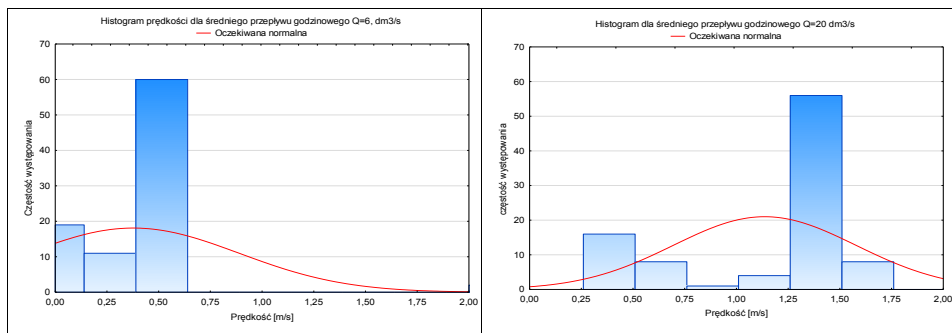
W przypadku pierwszego rozwiązania uwzględniono wymagania dotyczące minimalnych odcinków prostych przed i za punktem pomiarowym (stopień napełnienia do 80% przy pogodzie deszczowej, wymagane odcinki proste przed punktem pomiarowym większe niż $5 \cdot DN$ i za punktem pomiarowym większe niż $20 \cdot DN$ [14]). Dobrano kanał DN 315 z zachowaniem istniejącego spadku kanału 0,4%.

Do analizy wpływu zmiany średnicy na warunki hydrauliczne przeprowadzono symulację przepływu ścieków, w kanalizacji grawitacyjnej, przy pogodzie bezdeszczowej (są to najniekorzystniejsze warunki pracy sieci pod względem wielkości błędu względnego). Symulację przeprowadzono w programie SWMM5 EPA. Na podstawie symulacji stwierdzono, że napełnienia w kanale wyniosłyby w ciągu całej doby powyżej 0,05m (przeciętnie przez 7 godzin w ciągu doby napełnienie byłoby mniejsze niż 0,08m), a prędkość minimalna w kanale wyniosłaby powyżej 0,4m/s. Podczas przeprowadzania analizy błędu systematycznego dla pogody bezdeszczowej okazało się, że wielkość błędu wynosiłaby około $\pm 2\%$ (podczas wstępnych pomiarów kontrolnych średni błąd systematyczny -średnia ważona- wynosił około $\pm 4\%$).

W przypadku projektu wykorzystującego przepływomierz elektromagnetyczny dobrano przepływomierz DN 150, który charakteryzował się:

- dla prędkości $v \geq 1 \text{ m/s}$ błędem pomiaru $\pm 0,5\%$;
- dla prędkości od 0,5m/s do 1m/s błędem pomiaru $0,502 \cdot v^{-0,58}$ (max $\pm 0,75\%$);
- dla prędkości od 0,1m/s do 0,5m/s błędem pomiaru $0,288 \cdot v^{-1,59}$ (max $\pm 5\%$).

Do analizy wielkości błędu systematycznego wykorzystano symulację przepływów ścieków przy pogodzie bezdeszczowej (opracowaną w programie SWMM5 EPA), która była podstawą do analizy częstotliwości występowania prędkości w punkcie pomiarowym (Rys. 6). Na podstawie analizy częstotliwości występowania prędkości określono średni błąd względny dla analizowanych przepływów przy pogodzie bezdeszczowej, który wynosił około $\pm 1,6\%$. Wysoka wartość względnego błędu systematycznego wynikała z zakresu prędkości (dla przepływów poniżej $10 \text{ dm}^3/\text{s}$ najczęściej występowała prędkość poniżej 1 m/s). Pomiar prędkości w takim przypadku obarczony był błędem pomiarowym powyżej $\pm 0,5\%$.



Rys. 6. Przykłady różnych histogramów prędkości dla różnych średnich przepływów godzinowych dla fragmentu sieci kanalizacyjnej, w której nastąpiła zmiana kanału ze swobodnym zwierciadłem w kanał całkowicie wypełniony

Fig 6. Examples of different speed histograms for various average hourly flows for a part of a sewerage network in which a change of type of channel occurred (from a free mirror channel into a completely filled channel)

4. Podsumowanie

Rozpowszechnienie zasad pomiaru przepływu ścieków sprzyja większemu zainteresowaniu wykorzystania opomiarowania ilości lub/i przepływu ścieków między usługobiorcą a usługodawcą.

Istnieje wiele urządzeń i metod pozwalających na wykonanie pomiarów, jednak przy wyborze rozwiązania na cele rozliczeniowe istotne znaczenie ma nie tylko analiza techniczno-ekonomiczna, ale przede wszystkim wiarygodność pomiaru. Opisywana jest ona przez cechy jakościowe pomiaru np. przez błąd lub niepewność pomiaru.

Na wielkość błędu pomiarowego (i niepewność pomiaru) mają wpływ różne czynniki. W przypadku wykorzystania urządzeń pomiarowych w korytach o swobodnym zwierciadle istotne znaczenie ma wielkość błędu, która zależy nie tylko od zakresu pomiaru, rodzaju ścieków i wyboru urządzeń pomiarowych, ale również warunków hydraulicznych panujących w punkcie pomiarowym. Wartość błędu pomiarowego musi być związku z tym określana indywidualnie.

Na wielkość błędu całkowitego ma wpływ zarówno wielkość błędu systematycznego jak i wielkość błędów przypadkowych. Błąd przypadkowy w dużej mierze jest związany z warunkami hydraulicznymi panującymi w punkcie pomiarowym. W celu poprawy warunków pomiarowych niezbędne jest zwrócenie uwagi na wymagane odcinki proste przed i za punktem pomiarowym, brak zmiany kształtu i spadku koryta, itd.

Odcinki proste przed i za punktem pomiarowym wszystkich urządzeń pomiarowych, w tym również przepływomierzy elektromagnetycznych (które obecnie na rynku charakteryzują się największą dokładnością i stabilnością pomiaru), są wymagane w celu zapewnienia wiarygodnych i powtarzalnych pomiarów.

Przed wyborem metodyki pomiaru oraz urządzenia pomiarowego korzystne jest wykonanie pomiarów kontrolnych. Pomiary kontrolne służą do określenia zmienności przepływów, napełnienia i prędkości, do określenia struktury danych (statystyki opisowej, częstotliwości występowania), warunków hydraulicznych.

Długość okresu pomiarowego, w przypadku kanalizacji sanitarnej, do której odprowadzane są ścieki bytowe z terenów zurbanizowanych, powinna uwzględniać, zarówno okresy pogody z opadami poniżej 1 mm (mały udział wód przypadkowych), jak i z opadami o wyższej wysokości.

Dane pochodzące pomiarów przepływów w dni w których wysokość opadów jest mniejsza niż 1 mm pozwalają określić skalę największych względnych błędów pomiarowych. Co istotne okres taki może występować przez większą część roku.

Natomiast dane pochodzące pomiarów przepływów przy pogodzie deszczowej (które charakteryzują się najniższą wartością błędu pomiarowego) mają znaczenie przy symulacji przepływów dla różnych wariantów rozwiązania np. analizę możliwość występowania popiętrzeń w kanalizacji w związku ze zmianą średnicy kanału czy zmianą charakteru przewodu oraz uwzględnieniem strat miejscowych związanych z zastosowaniem np. przepływomierza elektromagnetycznego.

Przy wyborze rozwiązania technicznego korzystne jest przeprowadzenie symulacji przepływów ścieków dla różnych wariantów rozwiązania technicznego. Symulację można przeprowadzić wykorzystując różne modele hydrodynamiczne np. model opracowaną w programie SWMM5 EPA.

Niezależnym zagadnieniem jest opracowanie warunków kontroli punktu pomiarowego, które będą akceptowalne zarówno dla usługodawcy, jak i usługobiorcy.

Bibliografia

- 1) Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 10 lutego 2017 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków. Dz.U 2017 poz. 328 wraz z późniejszymi zmianami
- 2) Ustawa z dnia 11 maja 2001 r. Prawo o miarach. Dz.U. 2001 nr 63 poz 636 wraz z późniejszymi zmianami
- 3) Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 7 stycznia 2008 r. W sprawie prawnej kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych. Dz.U. 2008r. nr 5 poz. 29 wraz z późniejszymi zmianami
- 4) Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 27 grudnia 2007 r. w sprawie rodzajów przyrządów pomiarowych podlegających prawnej kontroli metrologicznej oraz zakresu tej kontroli. Dz.U. 2008 nr 3 poz. 12 i 13 wraz z późniejszymi zmianami
- 5) Wyrażenie niepewności pomiaru, Przewodnik, Główny Urząd Miar, Warszawa, 1999
- 6) SKUBIS T. Opracowanie wyników pomiaru. Przykłady. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2003
- 7) TAYLOR J.R. Wstęp do analizy błędu pomiarowego. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1995
- 8) MICHALSKI A. Pomiary przepływu wody w kanałach otwartych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2004
- 9) Erb, H. G. Technika pomiarów przepływu wody i ścieków. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Szczecin, 1999
- 10) Dąbrowski W. Oddziaływanie sieci kanalizacyjnych na środowisko. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2003
- 11) WALUŚ St. Przepływomierze ultradźwiękowe. Metodka stosowania. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1997
- 12) PN-ISO 1100-1 Pomiary przepływu w korytach otwartych. Część 1: Zakładanie i użytkowanie stacji pomiarowych. 2002
- 13) Klepiszewski K., Teufel M., Seiffert S., Henry E. Measurement of Flow Velocity Profiles in Tank Structures using the Prototype Device OCM Pro LR. NOVOTECH, Lyon, 2010
- 14) Instrukcja obsługi przenośnego przepływomierza PCM 4 wraz z należącymi do niego czujnikami. NIVUS GmbH, 2008
- 15) PN-EN ISO 748 Hydrometria. Pomiary natężenia przepływu cieczy w korytach otwartych z wykorzystaniem młynków hydrometrycznych lub pływaków. 2009
- 16) GIL B., KORAL W. Możliwości kalibracji przepływomierzy do pomiaru ilości ścieków w kanalizacjach grawitacyjnych. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 2018 t. 92 nr 3, s. 85-90
- 17) Instrukcja obsługi przenośnego przepływomierza PCM F wraz z należącymi do niego czujnikami. NIVUS, Eppingen, Niemcy, 2004
- 18) Instrukcja obsługi i konserwacji. Przepływomierz modułowy ISCO seria 2100, TELEDYNE ISCO, OMC ENVAG, 2004
- 19) FLO-DAR™. Radarowy, bezkontaktowy przepływomierz dla kanałów otwartych. Instalowanie i obsługa. Marsh-McBirney, Welkenraedt, Belgia, 2000
- 20) Flow SIREN, Blue Siren Inc., Melbourne, Florida, 2015
- 21) Teledyne Isco Non-Contact LaserFlow™ Velocity Sensor. TELEDYNE ISCO, OMC ENVAG, 2016

- 22) Przepływomierz elektromagnetyczny FM300. Instrukcja obsługi. Dokumentacja Technicznoruchowa. Zakład Elektroniki Pomiarowej TECHMAG, Gliwice, 2014
- 23) Karta danych DS/WM-EN ver. U. WaterMaster Przepływomierz elektromagnetyczny. ABB
- 24) Podręcznik użytkownika. Przepływomierz Elektromagnetyczny WaterMaster. IM/WM Wydanie 3. ABB
- 25) PARTI-MAG II. Information for Installations in Partially Full and Full Pipelines. ABB, D184A007U02
- 26) SOLLIEC L., TEUFEL M. Velocity Profiles through a sewer channel: Using CFD to obtain velocity Fields. NOVATECH 2010

Badania zostały sfinansowane z dotacji MNiSW przeznaczonej na działalność statutową

