

ŚRODOWISKO

CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

WYDAWNICTWO

POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1-Ś/2011

ZESZYT 1

ROK 108

ISSUE 1

YEAR 108

RYSZARD BŁAŻEJEWSKI*

PROGNOZOWANIE STANU TECHNICZNEGO I OPTYMALIZACJA MODERNIZACJI SIECI KANALIZACYJNYCH

TECHNICAL STATE FORECASTING AND OPTIMAL
RENEWAL PLANNING OF SEWER NETWORKS

Streszczenie

W artykule przedstawiono metody dynamicznego prognozowania stanu technicznego kanałów ściekowych z wykorzystaniem funkcji przetrwania. Przedyskutowano sposoby wyznaczania funkcji przetrwania dla konkretnych systemów kanalizacyjnych, strategie inspekcji stanu technicznego kanałów i optymalizacji techniczno-ekonomicznej modernizacji kanałów, które uległy awarii.

Słowa kluczowe: kanalizacja, niezawodność, modernizacja, optymalizacja

Abstract

The paper presents methods of dynamic forecasting technical states of sewers using survival functions. Procedures of survival function determining for sewer networks are discussed. Surveying strategies and optimization approaches to renewal of failed sewers are also analyzed.

Keywords: sewerage, reliability, renewal, optimization

* Prof. dr hab. inż. Ryszard Błażejowski, Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej, Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu.

Oznaczenia

C_i	– skutki i -tego scenariusza zdarzeń niepożądanych [PLN],
f_r	– czynnik ryzyka [–],
p	– parametr kształtu rozkładu prawdopodobieństwa [–],
$R(t)$	– funkcja przetrwania [–],
w_i	– waga przypisana i -temu scenariuszowi [–],
W_R	– wskaźnik ryzyka [–],
t	– wiek kanału, czas bezawaryjnej pracy, [a],
λ	– intensywność awarii [1/a].

1. Wstęp

Stan sieci kanalizacyjnych pogarsza się z każdym rokiem, głównie z powodu ich starzenia. Z uwagi na to, że większość nowoczesnych europejskich systemów kanalizacyjnych zaczęła powstawać w 2. połowie XIX w., wiele z nich dobiega obecnie kresu swojej żywotności. Żywotność ta jest jednak mocno zróżnicowana w zależności od jakości użytych materiałów i wykonawstwa, warunków eksploatacji kanałów itp. W literaturze można spotkać oszacowania przeciętnej żywotności kanałów w zakresie 50–200 lat, ale znane są przypadki kanałów (np. rzymska Cloaca Maxima) funkcjonujących do dziś od ponad 2000 lat!

W ramach francuskiego projektu RERAU realizowanego w latach 2001–2004 grupa ekspertów analizowała odpowiedzi 20 ankietowanych zarządców sieci kanalizacyjnych. Ankieta obejmowała 8240 km sieci, tj. około 5% całkowitej długości sieci we Francji. Okazało się, że modernizacji poddawano rocznie zaledwie 0,5% długości sieci. Było to niezgodne z czasem amortyzacji kanałów przyjmowanym na 50–60 lat, który wymagałby modernizacji 1,7–2% długości wszystkich kanałów w ciągu roku. Z uwagi na zaniechanie szerszej modernizacji w przeszłości, szacowane potrzeby modernizacji oceniono na 8–20% długości sieci [2]. Podobna sytuacja występuje w większości krajów europejskich.

W niektórych miastach Polski, ze względu na zadłużenie przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych i brak funduszy, modernizację kanałów ogranicza się do przypadków awaryjnych. Warto jednak zdać sobie sprawę, że takie modernizacje są wielokrotnie droższe od wykonywanych planowo, np. w Edmonton (Kanada) naprawy awaryjne kanałów są średnio trzykrotnie droższe od planowych [3]. W tym kontekście istotne jest prowadzenie prognozowanej strategii eksploatacji sieci kanalizacyjnych [12], która może przyczynić się do znacznej poprawy wskaźników ekonomicznych przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych. Takie dynamiczne podejście wydaje się bardziej poprawne niż podejście statyczne, określające klasy pilności odnowy kanałów na podstawie analizy *aktualnego* stanu technicznego kanałów i warunków ich użytkowania [8].

2. Ocena niezawodności kanałów ściekowych

Halfawy i in. [6], podobnie jak wielu innych badaczy, wykorzystali w swoich badaniach następujące charakterystyki niezawodnościowe:

– czynnik ryzyka (ang. *risk factor*)

$$f_R = \sum_{i=1}^n C_i \cdot w_i \quad (1)$$

gdzie:

C_i – skutki i -tego scenariusza zdarzeń niepożądanych, umożliwiające określenie kategorii ryzyka lub wartości strat wyrażonych w pieniądzu,

w_i – waga przypisana i -temu scenariuszowi.

– wskaźnik ryzyka (ang. *risk index*)

$$W_R = f_R \cdot \Pr_F = \sum_{i=1}^n C_i \cdot w_i \cdot \Pr_{Fi} \quad (2)$$

gdzie:

\Pr_{Fi} – prawdopodobieństwo zajścia i -tego scenariusza zdarzeń.

W literaturze polskiej [11, 13] zamiast terminu *wskaźnik ryzyka* używa się często terminu *ryzyko*, mającego to samo znaczenie i wyrażanego wzorem analogicznym do równania (2).

Jak wiadomo, funkcja przetrwania, zwana też funkcją niezawodności (ang. *survival function* lub *reliability function*), określa prawdopodobieństwo, że obiekt przetrwa t lat bez uszkodzeń. Najprostszą postacią funkcji przetrwania – liniową – przedstawia równanie:

$$R(t) = 1 - \Pr_F = 1 - \frac{t}{t_k} \quad (3)$$

gdzie:

t – analizowany wiek przewodu,

t_k – przewidywany końcowy wiek przewodu.

Liniowa postać funkcji niezawodności w praktyce kanalizacyjnej jest mało przydatna. Częściej wykorzystuje się funkcje nieliniowe. Poniżej przedstawiono kilka najczęściej stosowanych postaci funkcji niezawodności.

Niech $R(t)$ będzie prawdopodobieństwem, że odcinek przetrwa bezawaryjnie („przeżyje”) co najmniej t lat. Dla N -elementowej próby z populacji wszystkich odcinków w systemie można utworzyć szereg rozdzielnicy według czasu przetrwania:

$$t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq \dots \leq t_N \quad (4)$$

Z każdym rokiem t_p , zwykle przyjmowanym jako rok dokonania przeglądu stanu technicznego lub awarii, związana jest liczba n_i tych odcinków, o których wiadomo, że dotrwały do tego momentu, wśród których d_i – liczba odcinków awaryjnych w roku t_i . Warto zauważyć, że odległości pomiędzy kolejnymi latami t_i nie muszą być – i najczęściej nie są – stałe, np. jeśli rozpatruje się 100 odcinków, z których jeden uległ awarii po trzech latach ($t_1 = 3$), a kolejny przegląd po 10 latach ($t_2 = 3 + 10 = 13$ lat) obejmował już tylko 90 z tych odcinków (z 10 utracono kontakt w czwartym i kolejnych latach – tzw. obserwacja ucięta lub cenzorowana), w tym jeden wcześniej awaryjny, i stwierdzono wtedy kolejne cztery odcinki awaryjne, to wówczas: $t_1 = 3$, $n_1 = 100$, $d_1 = 1$ oraz $t_2 = 13$, $n_2 = 89$, $d_2 = 4$. Estymator Kaplana-Meiera można wyrazić w postaci iloczynu:

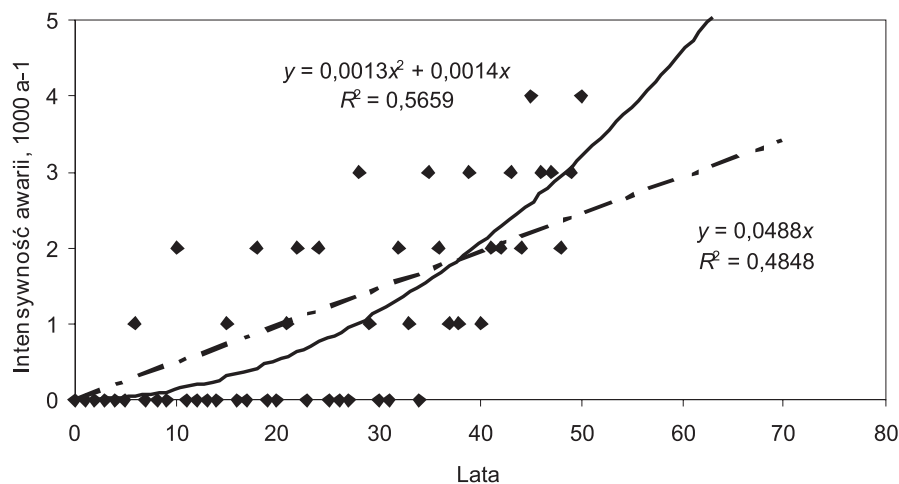
$$R(t) = \prod_{t_i \leq t} \frac{n_i - d_i}{n_i} = \prod_{t_i \leq t} \left(1 - \frac{d_i}{n_i} \right) \quad (5)$$

Jest to nieparametryczny estymator największej wiarygodności. Ten estymator funkcji przetrwania, zaproponowany przez Kaplana i Meiera [7], nazywa się także *estymatorem granicy iloczynów*. W rozpatrywanym przykładzie funkcja niezawodności przyjęłaby następujące wartości: $R(3) = (100 - 1)/100 = 0,9900$, zaś $R(13) = 0,99 (89 - 4)/89 = 0,9455$. Dla stałej wartości intensywności awarii $d_i/n_i = \lambda$ w kolejnych latach, równanie (5) upraszcza się do postaci potęgowej, równoważnej w przybliżeniu (dla wartości $\lambda < 0,2$ błąd jest $\leq 2\%$) postaci wykładniczej:

$$R(t) = \prod_{t_i \leq t} \left(1 - \frac{d_i}{n_i} \right) = (1 - \lambda)^t \approx \exp(-\lambda t) \quad (6)$$

Funkcję przetrwania można zatem oszacować bezpośrednio na podstawie znajomości ciągłych czasów bezawaryjnej pracy. W tym celu tworzy się tablicę trwania życia, w której dla każdego przedziału czasowego (np. roku) t_i przedstawiono wartości częstości awarii $\lambda = d_i/n_i$ (rys. 1), powodujących wypadnięcie odcinka z eksploatacji lub konieczność jego modernizacji. Mnożąc kolejne prawdopodobieństwa przetrwania z tych przedziałów wg wzoru (6), otrzymuje się funkcję przetrwania (rys. 2).

Parametry rozkładu można wyestymować metodą momentów lub metodą największej wiarygodności.



Rys. 1. Częstość awarii kanałów ściekowych w okresie 50 lat ich eksploatacji

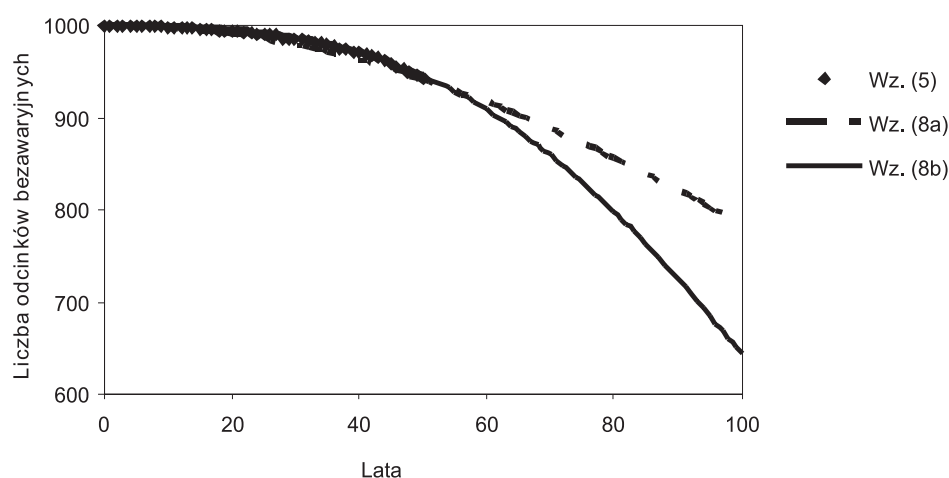
Fig. 1. Failure rates of sewers during 50 years of their operation

Do wyznaczenia funkcji niezawodności przyjmuje się często rozkład Weibulla o postaci:

$$R(t) = \exp \left[-\frac{\lambda(t) t^p}{p} \right] \quad (7)$$

gdzie:

- $\lambda(t)$ – intensywność awarii,
- p – parametr kształtu rozkładu ($p > 0$).



Rys. 2. Funkcje niezawodności kanałów ściekowych, badanych 50 lat, z prognozą do 100 lat

Fig. 2. Reliability functions of sewers inspected during 50 years with 100 years forecast

Jeżeli intensywność awarii $\lambda(t)$ jest stała w czasie eksploatacji, to parametr kształtu $p = 1$, a rozkład Weibulla sprowadza się do rozkładu wykładniczego (por.: (6)). Taka sytuacja może wystąpić wówczas, gdy poszczególne części kanału były osobno poddawane różnym odnowieniom tak, że po jakimś czasie są one w bardzo różnym wieku. Również urządzenia złożone, podlegające zjawisku zmęczenia mechanicznego, charakteryzują się dużym rozproszaniem czasu życia i stałą intensywnością uszkodzeń [5]. Zwykle jednak $\lambda(t)$ rośnie w czasie (np. wskutek procesów starzeniowych), i dlatego $p > 1,0$. Jeśli intensywność awarii $\lambda(t)$ rośnie liniowo w czasie eksploatacji (por.: przerywana linia prosta na rys. 1), to parametr kształtu $p = 2$, zaś dla wzrostu proporcjonalnego do kwadratu czasu eksploatacji $p = 3$.

W takich przypadkach wygodne jest także zastosowanie wzoru Wienera:

$$R(t) = \exp \left[-\int_0^t \lambda(t) dt \right] \quad (8)$$

Przykładowo, dla danych przedstawionych na rys. 1 i liniowej funkcji $\lambda(t)$ wzór (8) daje:

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t 0,000488 t dt\right) = \exp(-0,000244 t^2) \quad (8a)$$

oraz dla nieliniowej funkcji $\lambda(t)$:

$$R(t) = \exp(-0,0000043 t^3 - 0,000007 t^2) \quad (8b)$$

Na rysunku 2 pokazano wykresy funkcji niezawodności obliczone wzorami (5), (8a) i (8b) dla intensywności uszkodzeń zilustrowanych na rys. 1.

W latach 1989–2004 Martin i in. [10] badali uszkodzenia kanałów betonowych (700 km) i kamionkowych (550 km) w Seattle (o średnim wieku 75 lat). Oszacowali, że wzrost intensywności awarii starzeniowych, 76-metrowych odcinków rur betonowych, w czasie był liniowy i wynosił $\lambda(t) = 1,35 \cdot 10^{-5} t$ (gdzie t – w latach), a odcinków z rur kamionkowych, o takiej samej długości, był dwukrotnie wyższy ($\lambda(t) = 2,7 \cdot 10^{-5} t$).

Herz opracował formułę pozwalającą na precyzyjniejsze oszacowanie funkcji niezawodności kanałów, opisującą prawdopodobieństwa przejścia z lepszego stanu kolektora do stanu gorszego (o jedną kategorię niższego w 5-, 6-punktowej skali), w postaci [1, 14]:

$$R(t) = \frac{A+1}{A + \exp[B(t-C)]} \quad (9)$$

gdzie:

- A – wektor parametrów starzeniowych, [–], im większe A , tym łagodniejsze przejścia ze stanu do stanu,
- B – wektor parametrów przejścia [a^{-1}], im większe B , tym szybsze przejścia ze stanu do stanu,
- C – wektor czasowej odporności na uszkodzenia [a],
- t – wiek kanału [a].

Przykładowe wartości parametrów przedstawionej powyżej funkcji podano w tabeli 1.

Intensywność uszkodzeń przyjęta w modelu Herza jest opisana krzywą logistyczną, tj. jest ona początkowo niska, następnie do przeciętnego wieku kanału rośnie wykładniczo, po czym zdąża asymptotycznie do skończonej wartości maksymalnej.

Pozyskanie wartości parametrów dla konkretnych warunków eksploatacji kanałów (np. kanałów betonowych w danym mieście) umożliwi wykreślenie krzywych niezawodności dla poszczególnych stanów technicznych tych kanałów w czasie, np. $t = 0$ –200 lat. Baur i Herz [1] podali przykładowe wartości dla miasta Drezna. Autorzy ci zaproponowali wydzielenie typów kanałów wg następujących kryteriów:

1. Wiek kanału (> 100 lat, 70–100 lat, < 70 lat).
2. Materiał rurowy (beton, kamionka, inne).
3. Rodzaj kanalizacji (deszczowa, sanitarna, ogólnospławna).
4. Rodzaj kanału (przykanalik, kolektor boczny, kolektor główny).
5. Kształt przekroju (kołowy, jajowy, inny).
6. Średnica kanału (< 300 mm, 300–1000 mm, > 1000 mm).
7. Spadek kanału ($< 1\%$, 1–5%, $> 5\%$),
8. Kategoria ulicy (główna, boczna, inne).

Przykładowe wartości parametrów funkcji (9) uzyskane z kalibracji za pomocą programu komputerowego AQUA-WertMin [14]

Parametr	Przejścia między stanami (stan CI_6 – najlepszy, stan CI_1 – najgorszy) $k \rightarrow k-1$				
	6 → 5	5 → 4	4 → 3	3 → 2	2 → 1
A	5,4	13,5	20,2	26,7	80,2
B	0,0500	0,0490	0,0370	0,0291	0,0452
C	0	0	1	13	64

Jak łatwo obliczyć, tak duża liczba kryteriów generuje $3^8 = 6561$ typów kanałów i dla każdego z nich należałoby określić wartości parametrów funkcji (9). Jest to zadanie trudne do realizacji, ale możliwe dzięki odpowiednio bogatym komputerowym bazom danych. Jednak nawet dla dużego systemu kanalizacyjnego niektóre typy kanałów mogą być reprezentowane przez jedynie kilka lub kilkanaście odcinków, co nie gwarantuje dostatecznej liczności dla oszacowań statystycznych. Zmniejszenie liczby kryteriów do 7 i wydzielenie tylko dwóch (zamiast trzech) poziomów tych kryteriów dałoby już akceptowalną praktycznie liczbę $2^7 = 128$ typów kanałów. Wadą modelu Herza jest także zignorowanie przejść ze stanów wyższych do niższych ze skokiem większym niż jeden oraz ewentualnych przejść ze stanów niższych do wyższych dzięki modernizacji. Wadę tę można byłoby wyeliminować, stosując metodę łańcuchów Markowa.

Madryas i Przybyła [9] zastosowali teorię zbiorów rozmytych do tworzenia jednoznacznie sklasyfikowanych kolejek uszkodzeń kanałów w celu optymalnego programowania ich odnowy. Takie podejście wydaje się bardziej właściwe przy ocenie stanu technicznego kanałów ściekowych niż narzucanie ostrych granic na parametry stanu. Wymagają one jednak od eksperta oceniającego stan kanału dużej wiedzy i doświadczenia.

3. Optymalizacja modernizacji kanałów

Prawidłowa modernizacja sieci kanalizacyjnych powinna – wg Halfawy’ego i in. [6] – mieć na względzie trzy podstawowe funkcje celu:

- średnia miara stanu technicznego (w oryginale gradacja stanów technicznych była odwrotna do przyjętej w niniejszym artykule, tj. $CI = 1$ – stan najlepszy, $CI = 5$ – stan najgorszy) dlatego ta funkcja celu powinna być maksymalizowana, a nie – jak w oryginale – minimalizowana):

$$\frac{\sum_{i=1}^{I_{\text{odc}}} CI_i \cdot l_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{J_{\text{odc}}} CI_j \cdot l_j}{\sum_{i=1}^{(I+J)_{\text{odc}}} l_i} \Rightarrow \max \quad (10)$$

gdzie:

- I_{odc} – liczba odcinków niemodernizowanych,
- J_{odc} – liczba odcinków zmodernizowanych,
- CI – kategoria stanu technicznego kanału na i -tym lub j -tym odcinku,
- i, j – numery odcinków kanałów,
- l – długość odcinka.

– średnia miara wskaźnika ryzyka:

$$\frac{\sum_{i=1}^{I_{\text{odc}}} WR_i \cdot l_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{J_{\text{odc}}} WR_j \cdot l_j}{\sum_{i=1}^{(I+J)_{\text{odc}}} l_i} \Rightarrow \min \quad (11)$$

– koszty cyklu życia (ang. *total life cost*):

$$\sum_{j=1}^{J_{\text{odc}}} TLC_j \cdot l_j \Rightarrow \min \quad (12)$$

Każda z trzech wymienionych funkcji celu ma wiele ograniczeń narzucanych przez użytkownika sieci i konkretne warunki jej eksploatacji. Logiczne jest modernizowanie w pierwszej kolejności rurociągów w najgorszym (awaryjnym) stanie technicznym, a w następnej kolejności – niedopuszczanie do awarii dzięki modernizacjom odcinków w stanie przedawaryjnym.

4. Koszty oceny stanu technicznego i modernizacji kanałów

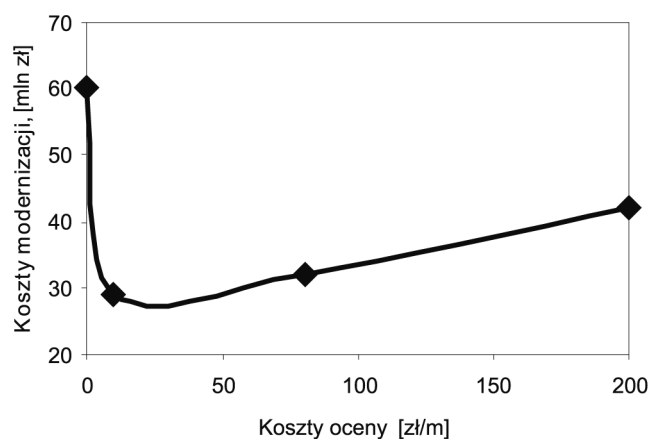
Koszty modernizacji zależą w dużym stopniu od jakości diagnostyki stanu kanałów. Jakość diagnostyki jest z reguły tym lepsza, im droższa. W koszcie jednostkowym oceny zawarte są bowiem koszty czyszczenia kanałów, ich filmowania i interpretacji filmów (ocena pobieżna), a przy bardziej szczegółowych badaniach – koszty badań terenowych (w tym – odkrywek) i laboratoryjnych, a także koszty robocizny wysoko wykwalifikowanych fachowców stawiających diagnozę stanu technicznego kanału i sugerujących odpowiednią metodę ich modernizacji. W tabeli 2 przedstawiono przykładowe koszty oraz prawdopodobieństwa trafnej identyfikacji stanu awaryjnego i/lub prognozy awarii kanału grawitacyjnego, nieprzełazowego.

Tabela 2

Dane do analizy techniczno-ekonomicznej pierwszej oceny stanu technicznego kanału nieprzelazowego o średnicy 600 mm w wieku 50 lat

Parametr	Ocena		
	pobieżna	średnio dokładna	szczegółowa
koszt jednostkowy oceny [zł/m]	10	80	200
prawdopodobieństwo wykrycia awarii i zagrożenia awarią	0,8	0,9	0,95

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki hipotetycznej analizy ekonomicznej modernizacji kanału przy założeniu, że koszt modernizacji kanału w stanie przed awaryjnym wynosi 2 mln zł/km, zaś w stanie awaryjnym i po awarii – średnio 6 mln zł/km. Założono ponadto, że ocenie stanu technicznego podlega 100 km sieci, z czego 10% jest w stanie awaryjnym. Ten ostatni procent nie jest znany użytkownikowi, lecz objawia się w ciągu kilku lat jako szereg awarii.



Rys. 3. Koszty modernizacji 10 km kanałów w zależności od jednostkowych kosztów ich oceny

Fig. 3. Renewal costs of 10 km of sewers depending on unit surveying costs

Z analizy wykresu przedstawionego na rysunku 3 wynika, że najefektywniejsza ekonomicznie jest pobieżna diagnostyka kanałów po kilkudziesięciu latach od ich wybudowania lub ostatniej szczegółowej inspekcji. Nie znaczy to, że należy czekać na kolejną ocenę stanu technicznego kilkadziesiąt lat; zależy to od wieku i stanu kanałów. Baur i Herz [1] podają sposób oszacowania terminu pierwszej inspekcji TV, w zależności od wieku kanałów i intensywności ich uszkodzeń.

Davies i in. [4] zalecają prowadzenie profilaktycznych modernizacji kanałów w stanie krytycznym (stanowiących zwykle ok. 25% długości sieci), zaś pozostałe kanały – w lepszym stanie technicznym – modernizowanie po wystąpieniu awarii wymuszających taką modernizację.

5. Wnioski

Określenie funkcji niezawodności poszczególnych rodzajów kanałów ściekowych jest podstawą wieloletniego planowania i optymalizacji ekonomicznej remontów tych kanałów.

Pobieżna diagnostyka kanałów jest szczególnie efektywna po kilkudziesięciu latach od ich wybudowania lub ostatniej szczegółowej inspekcji.

Literatura

- [1] Baur R., Herz R., *Selective inspection planning with aging with forecast for sewer types*. Proc. 2nd IWA World Water Congress, Berlin 2001.
- [2] Breysse D., Vanconcelos E., Schoefs F., *Management strategies and improvement of performance of the sewer networks*, Computer-aided Civil and Infrastructure Eng., 22(7), 462-477, 2007.
- [3] Chua K.A., Kwan Ng H., *Funding evaluation of trenchless rehabilitation needs for sewer infrastructure management* (www.nastt.org/store/technical_papersPDF/166.pdf 7.12.2009).
- [4] Davies J.P., Clarke B.A., Whiter J.T., Cunningham R.J., *A statistical investigation of structurally unsound sewers*, Underground Infrastructure Research: Municipal, Industrial and Environmental Applications, Swets & Zeitlinger B.V., Lisse 2001.
- [5] Dethoor J.M., Groboillot J.L., *Trwałość urządzeń technicznych*, WNT, Warszawa 1971.
- [6] Halfawy M.R., Dridi L., Baker S., *Integrated decision support system for optimal renewal planning of sewer networks*, Journal of Computing in Civil Eng., Vol. 22, No. 6, 2008, 360-372.
- [7] Kaplan E.L., Meier P., *Nonparametric estimation from incomplete observations*, J. Am. Stat. Assoc. 53, 1958, 457-481.
- [8] Kuliczowska E., *Kryteria planowania bezwykopowej odnowy nieprzelazowych przewodów kanalizacyjnych*, Wyd. Polit. Św., Kielce 2008.
- [9] Madryas C., Przybyła B., *Fuzzy set theory approach to sewer failure assessment*, Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. 21, 1-2, 1999, 49-61.
- [10] Martin T., Johnson D., Anschell S., *Using repair data to create customized predictive failure rate curves for sewer pipe risk modeling*, IWA 2nd Leading-Edge Conf. on Strategic Asset Management, LESAM, Lisbon 2007.
- [11] Mikołajczyk M., Feluch W., *Metoda oceny ryzyka uszkodzeń elementów infrastruktury budowlanej na przykładzie podsystemu dystrybucji wody w Płocku*, Zeszyty Naukowe SGSP, 34, 2006.
- [12] Przybyła B., Szot A., *Możliwości prowadzenia prognozowanej strategii eksploatacji sieci kanalizacyjnych w świetle przeprowadzonej ankiety*, Infrastruktura podziemna miast. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej, 53, Seria Konferencje 20, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2009.
- [13] Rak J., Tchórzewska-Cieślak B., *Metody analizy i oceny ryzyka w systemie zaopatrzenia w wodę*, OWPRz, Rzeszów 2005.
- [14] Schmidt T., *Deterioration models for sewer networks (Modele pogarszania się stanu technicznego kanałów sanitarnych)*, Infrastruktura podziemna miast. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej, 53, Seria Konferencje 20, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2005.