

Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej
Politechniki Wrocławskiej

42

Seria: Monografie

A3428 I

D2.8

16

Cezary Madryas

Odnowa przewodów kanalizacyjnych

Wrocław 1993



Cezary MADRYAS

Renovation of sewers



Cezary Madryas

Odnowa przewodów kanalizacyjnych



Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej · Wrocław 1993

Recenzenci
Józef CZACHOROWSKI
Marek ROMAN

Redaktor naukowy
Stanisław KROCZAK

Opracowanie redakcyjne
Aleksandra WAWRZYŃKOWSKA

Korekta
Zofia JASINA

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1993

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

ISSN 0324-9727

Nakład 150+50 egz. Ark. wyd. 7,75. Ark. druk. 8¹/₄. Papier offset. kl. III, 70 g. B1.
Oddano do powielenia w marcu 1993 r. Druk ukończono w kwietniu 1993 r.
Zakład Graficzny Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 192/93.

*Przewód kanalizacyjny, niezawodność,
strategia odnowy, technika odnowy,
kryterium kosztów*

Cezary MADRYAS*

ODNOWA PRZEWODÓW KANALIZACYJNYCH

Sformułowano teoretyczne podstawy programowej odnowy przewodów kanalizacyjnych w rozumieniu czynności związanych z utrzymaniem stanu konstrukcji tych przewodów na poziomie technicznym umożliwiającym spełnienie wymagań technologicznych stawianych systemom kanalizacyjnym oraz standardów ochrony środowiska. Rozważany proces jest modelem procesu rzeczywistego, który odpowiada formalnemu opisowi działania sieci kanalizacyjnej w losowo zmiennych warunkach. Rozwiązanie oparto na identyfikacji i opisie przewodów w ujęciu teorii niezawodności, gradacji uszkodzeń oraz na opracowanych założeniach dotyczących optymalizacji procesu odnowy jako podstawowego elementu eksploatacji programowej. Dzięki wprowadzeniu charakterystyki technik i metod odnowy, a także sformułowaniu kryteriów oceny rozwiązań w ujęciu rachunku ekonomicznego, umożliwiono ich klasyfikację i wybór w praktyce inżynierskiej.

1. WSTĘP

1.1. Wykaz podstawowych oznaczeń

C	- zbiór cech sieci,
C_m	- podzbiór mierzalnych cech sieci,
C_n	- podzbiór niemierzalnych cech sieci,
$E(t), Q(t)$	- zbiór wymuszeń działających na sieć,
$Q_m(t)$	- podzbiór mierzalnych wymuszeń,
$Q_n(t)$	- podzbiór niemierzalnych wymuszeń,

* Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

$R(t)$	- funkcja niezawodności,
τ	- zmienna losowa typu ciągłego traktowana jako czas,
$Z(t)$	- funkcja zawodności,
$F(t), Z(t)$	- rozkład trwałości,
$A(0)$	- podzbiór błędów konstrukcyjnych,
$B(0)$	- podzbiór błędów technologiczno-materiałowych,
$C(t)$	- podzbiór błędów eksploatacyjnych,
$D(t)$	- podzbiór uszkodzeń starzeniowych,
$f(t)$	- częstość uszkodzenia,
$\lambda(t)$	- intensywność uszkodzenia,
S	- stan poprawnej pracy sieci,
$\bar{S}$	- stan uszkodzenia sieci,
$F(t_a), G(t_a)$	- rozkład odnowy,
$f(t_a)$	- częstość odnowy,
$\mu(t_a)$	- intensywność odnowy,
$\bar{t}_p$	- średni czas poprawnej pracy sieci,
$\bar{t}_a$	- średni czas odnowy,
$\hat{p}$	- wskaźnik gotowości (współczynnik niezawodności),
$\hat{q}$	- współczynnik przestoju (zawodności),
P	- macierz przejścia,
N	- liczba obiektów w systemie,
k'	- liczba ekip remontowych,
$n(t)$	- liczba uszkodzeń w chwili t ,
T^C	- czas trwania cyklu praca-odnowa,
$\hat{S}$	- odchylenie standardowe,
α	- poziom istotności,
t_K	- czas kontroli,
t_D	- czas diagnostyki,
t_N	- czas naprawy,
t'_K	- czas kontroli po naprawie,
K_r	- koszty roczne,
K_{rr}	- roczne koszty rozszerzonej reprodukcji,
K_e	- roczne koszty eksploatacji,
r	- współczynnik reprodukcji rozszerzonej,
p	- stopa akumulacji,
a_r	- współczynnik amortyzacji progresywnej,
T	- czas amortyzacji,
K_z	- koszty zawodności,
K_{rz}	- koszty roczne powiększone o koszty zawodności,
ε	- współczynnik efektywności ekonomicznej,
u	- uszkodzenie,
U	- zbiór uszkodzeń,

R	- relacja rozmyta,
T_{opt}	- optymalny okres prewencji,
i_{opt}	- optymalna krotkość kontroli,
K_{OP}	- zdyskontowane na rok zerowy koszty odnowy pełnej,
K_{ON}	- zdyskontowane na rok zerowy koszty odnowy niepełnej,
k_k	- jednostkowy koszt zatrudnienia konserwatora,
k_δ	- optymalna liczba konserwatorów,
k_n	- dochód jednostkowy z pracy przewodów.

1.2. Uzasadnienie podjęcia tematu

Sterowanie eksploatacją systemów technicznych polega na takiej organizacji procesu ich użytkowania i obsługi, aby - z punktu widzenia określonego kryterium - skuteczność jego przebiegu była możliwie największa. Precyzowanie zasad takiej polityki jest przedmiotem badań teorii odnowy, której celem są analizy przebiegu zużycia zbiorowości obiektów technicznych i ustalanie zasad ich racjonalnej eksploatacji w długich okresach [42]. W świetle założeń tej teorii do zasad racjonalnej eksploatacji trzeba zaliczyć:

- przeciwdziałanie powstawaniu uszkodzeń,
- przewidywanie liczby uszkodzeń, którym nie da się zapobiegać,
- usuwanie skutków uszkodzeń dzięki naprawie lub wymianie obiektów na nowe przy możliwie najmniejszych nakładach.

Osiągnięcie poziomu eksploatacji spełniającej wymienione warunki jest trudne, gdyż wymaga poznania mechanizmów rządzących zjawiskami zużycia się elementów w celu prognozowania zmian ich stanu. Nie jest to w obecnym czasie możliwe, ze względu na brak niezbędnych do osiągnięcia celu wyników badań niezawodności przewodów sieci kanalizacyjnych.

Taki stan wiedzy w kraju jest faktem, mimo że omawiana problematyka znajduje się w obszarze zainteresowań wąskiej grupy badaczy już od kilkunastu lat. Do pierwszych opublikowanych prac na temat niezawodności przewodów kanalizacyjnych można zaliczyć prace Kłoss i Romana z początku lat siedemdziesiątych [36], [37], [38]. Prace te, opublikowane na przestrzeni trzech lat, stanowią stosunkowo szerokie ujęcie problemu: od analizy zagadnień ogólnych i stanu badań w zakresie niezawodności systemów kanalizacyjnych i wodociągowych [36], przez prezentację teoretycznych podstaw wyboru wskaźników niezawodności [37], do opisu zasad gromadzenia niezbędnych do ich określania danych [38]. Zaprezentowany przez autorów materiał mógł zatem stanowić przyczynek do zmiany polityki eksploatacyjnej systemów kanalizacyjnych i wodociągowych w kraju pod warunkiem, że znalazłby odbicie w decyzjach administracyjnych i dalszych badaniach. Tak się jednak nie stało, a w obszarze zainteresowań wymie-

nionych i innych badaczy w następnych latach pozostały prawie wyłącznie problemy niezawodności sieci wodociągowych. Zaowocowało to znaczną liczbą zaawansowanych i wartościowych opracowań dotyczących tego tematu. Ich najnowsze zestawienie w porządku chronologicznym przedstawia w swojej pracy Wieczysty [98]. Rozwój badań w tym kierunku stymulowany był prawdopodobnie bezpośrednio odczuwalnymi uciążliwościami, jakie wynikają z zawodnego działania tych sieci. Tymczasem skutki działania uszkodzonych przewodów kanalizacyjnych są zazwyczaj zauważane dopiero po upływie dłuższego czasu i to przeważnie w formie degradacji naturalnego środowiska. Nie były one, niestety, brane pod uwagę przez ówczesne władze.

Do badań niezawodności przewodów kanalizacyjnych powrócono dopiero w latach osiemdziesiątych [21], [30], [39], [43], [83]. W pracy [21] omówiono problemy awaryjności przewodów kanalizacyjnych w Rudzie Śląskiej. Zaprezentowane wyniki badań (procentowe udziały poszczególnych typów uszkodzeń) nie mogą niestety, ze względu na specyfikę badanych sieci wynikającą z ich położenia na terenach szkód górniczych, stanowić podstawy do ogólniejszych analiz. Znaczenie przyjętych rozwiązań projektowych dla niezawodności funkcjonowania sieci w całym okresie eksploatacji, a także potrzebę prowadzenia badań eksploatacyjnych, podnosi autor referatu [43]. Opracowanie to ma jednak charakter dyskusji wstępnej i nie jest poparte analizą teoretyczną, ani wynikami bezpośrednich badań przewodów. Charakter analizy wstępnej ma również praca [30], której autorka podjęła próbę oceny parametrów niezawodności urządzeń wodociągowych i kanalizacyjnych. Celowość prowadzenia badań niezawodności sieci kanalizacyjnych, ze względu na bardzo skromny stan wiedzy w tym zakresie, podkreśla autor opracowania [83]. Nie wyklucza on także, że wyniki takich analiz mogą nawet przesądzić o potrzebie ustalenia w perspektywie normatywnych wskaźników niezawodności przewodów w grawitacyjnym układzie kanalizacji. Do problemu budowy bazy danych i ich zbierania w przedsiębiorstwach wodociągów i kanalizacji powrócono w pracy [39]. Potrzebę gromadzenia takich badań, a nawet administracyjnego zobligowania przedsiębiorstw do ich prowadzenia, postulowano jednak już w latach 70. [38]. Świadczy to dobitnie o tym, że w czasie dwunastu lat, jakie upłynęły między publikacjami, nie uczyniono w tej dziedzinie żadnego postępu. Co więcej, po rozpoznaniu problemu autor niniejszego opracowania stwierdza, że sytuacja ta nadal nie uległa zmianie, mimo że jest to problem o podstawowym znaczeniu.

Jak zatem wynika z dokonanego przeglądu piśmiennictwa z zakresu niezawodności systemów sieci przewodów kanalizacyjnych, dokonania w tym kierunku, aczkolwiek cenne jako inicjatywy, nie są na tyle wystarczają-

ce, aby mogły stanowić podstawę ewentualnej zmiany polityki eksploatacyjnej przewodów.

Szersze ujęcie teoretyczne problemów niezawodności sieci kanalizacyjnych i wodociągowych przedstawiono dopiero w latach późniejszych [98]. Przytoczona praca jest jednak przede wszystkim skryptem do celów dydaktycznych. I tu zresztą problemy niezawodności systemów kanalizacyjnych schodzą wyraźnie na drugi plan po problemach niezawodności systemów wodociągowych, które są od dawna celem badań autora tego opracowania.

Nieznaczny wzrost zainteresowań problematyką niezawodności systemów kanalizacyjnych w latach 80. w kraju był spowodowany prawdopodobnie ich złym stanem [97] oraz uaktywnieniem badań naukowych, a także działań w kierunku ochrony środowiska w państwach wysoko rozwiniętych. Działania takie nie mogły nie obejmować prac dotyczących odnowy przewodów kanalizacyjnych w miastach, ukierunkowanych zarówno na nowe technologie, jak i analizy teoretyczne. Szczególnie dotyczy to takich państw, jak: Niemcy [90], Wielka Brytania [96], Francja [96], USA [96], Japonia [68], Australia [10] oraz Szwecja i Norwegia [25], [67], a więc krajów, w których rozwój infrastruktury sieciowej rozpoczął się jeszcze w XIX wieku, i w których dynamika rozwoju miast jest bardzo duża. Autorzy wszystkich publikacji zgodnie podkreślają, że potrzeba radykalnej poprawy stanu przewodów kanalizacyjnych wynika przede wszystkim z przyczyn ekologicznych, ale także z konieczności stworzenia warunków do dalszego zagospodarowania przestrzeni podziemnej miast. Stan sieci jest na ogół podobny, tzn. wszystkie przewody wymagają przeglądu, a duża ich część odnowy. Wyjątek stanowi stan sieci w Norwegii [67], gdzie większość przewodów ma nie więcej niż 30 lat. W przyjętej tam polityce eksploatacji zakłada się w związku z tym, że w przeciągu najbliższych 10-20 lat przeprowadzi się wyłącznie badania kontrolne, których celem będzie stworzenie bazy danych dla dalszej, w pełni programowej strategii eksploatacji. W pozostałych krajach stan techniczny przewodów wyklucza takie rozwiązanie i gromadzenie danych przebiega tam równocześnie z odnową zniszczonych przewodów. W wymienionych opracowaniach, w odróżnieniu od prac krajowych, znaczną część uwagi poświęca się zagadnieniom organizacji procesu odnowy, jej technologiom oraz kosztom.

Inspirowany rozwojem badań w państwach wysoko uprzemysłowionych i skromnym zaawansowaniem takowych w kraju, autor niniejszego opracowania rozpoczął także analizy, związane z odnową i niezawodnością przewodów. Ich efektem są publikacje teoretyczne o charakterze ogólniejszym [52], [57], [58], [59], [62] i technologiczno-organizacyjnym [45], [46], [60], [61], [63], [64], z których wynika wniosek o potrzebie zawężenia badań i skoncentrowania ich na problemach odnowy przewodów kanalizacyjnych.

1.3. Założenia oraz cele i kierunki badań

Skutkiem opisanego stanu jest brak w kraju racjonalnej polityki eksploatacji przewodów kanalizacyjnych z czego wynika, że prace nie są wcześniej planowane, a odnowa nie obejmuje drobnych (nie sygnalizowanych z zewnątrz) uszkodzeń, lecz jedynie te, których skutki są wyraźnie widoczne. Środki są więc zużywane na pozornie racjonalne rozwiązania, dotyczące pojedynczych zadań. Wydatkowanie ma zatem charakter losowy, wynikający li tylko z kosztów usuwania większych awarii. Jednocześnie postępuje destrukcja nie przeglądanej programowo części sieci oraz degradacja otaczającego sieć środowiska, wynikająca z infiltracji wody gruntowej do sieci lub eksfiltracji ścieków do gruntu, pomieszczeń piwnicznych itp. Z ekologicznego punktu widzenia jest to strategia niedopuszczalna. Problem ten nabiera także szczególnego znaczenia z uwagi na perspektywę integracji Polski z krajami Europejskiej Wspólnoty Gospodarczej, co implikuje wprowadzenie znacznych obostrzeń w dziedzinie ochrony środowiska i wykorzystania przestrzeni podziemnej w miastach [26], [63].

Eksploatację pojedynczego elementu sieci (przewodu) można rozważać jako wielostanowy proces stochastyczny, a zaobserwowany przebieg eksploatacji jako jedną z możliwych realizacji tego procesu. Sformułowanie stochastycznego modelu opisującego rzeczywistą eksploatację jest zadaniem złożonym i wymaga rozpoznania praw i zależności rządzących eksploatacją. Należy przy tym mieć na uwadze, aby opracowywany model eksploatacji, w wyniku przyjętych uproszczeń, nie okazał się nieprzydatny w praktyce. Wydaje się, że nie uda się osiągnąć pełnej zgodności założeń teoretycznych z warunkami rzeczywistymi, wobec czego należy dążyć do opracowań, które w możliwie największym stopniu przyczyniają się do zbliżenia teorii z praktyką.

Przewody sieci kanalizacyjnej działającej w układzie grawitacyjnym są połączone szeregowo i stanowią część systemu z pracą bez przestojów. Oznacza to, że wszystkie czynności eksploatacyjne, w tym przede wszystkim odnowa, muszą się odbywać podczas funkcjonowania sieci, co wymaga:

- powiązania stanów przewodów z techniczno-organizacyjnymi możliwościami realizacji odnowy (liczbą i kwalifikacjami konserwatorów, problemem części zamiennych i dostępności technologii, itp.),
- analizy kosztów wynikających z potencjalnej zmiany polityki eksploatacji.

Mając na uwadze przedstawione wymagania, a także uwarunkowania zewnętrzne (stan wiedzy o teorii niezawodności i odnowy oraz metodach rachunku kosztów i oceny wielkości niemierzalnych, dostępność technolo-

gii) oraz niezadowalający poziom polityki eksploatacyjnej przewodów w kraju, sformułowano główną tezę pracy:

istnieje potrzeba i jest możliwe - na podstawie znanych metod teorii niezawodności i odnowy oraz rachunku ekonomicznego, przy aktualnej dostępności technologii - sformułowanie teoretycznych podstaw programowej strategii odnawiania przewodów kanalizacyjnych, jako zasadniczego składnika udoskonalonej polityki ich eksploatacji.

Przedstawiona teza implikuje zakres i najważniejszy cel pracy. I tak, zakresem swym praca obejmuje:

- analizę działań w krajach wysoko rozwiniętych,
- niezawodnościową charakterystykę przewodów kanalizacyjnych oraz prezentację zasad estymacji parametrów,
- klasyfikację uszkodzeń,
- klasyfikację technik i metod odnowy,
- analizę kosztów i wielkości niemierzalnych,
- analizę sposobu gromadzenia informacji o przebiegu procesu eksploatacji,

- opracowanie na podstawie przedstawionych analiz kryteriów optymalizacji odnowy, uwzględniających koszty zawodności przewodów, strategię i organizację odnowy oraz technologię jej realizacji.

Sformułowanie założeń i kryteriów, a także ich matematycznych opisów stanowi realizację podstawowego celu, którym jest wykazanie, że:

- bez wyników badań eksploatacyjnych nie jest możliwe wyłonienie (według wyników obliczeń matematycznych) optymalnej polityki eksploatacji z komputerowo wspomaganym systemem decyzyjnym,

- zachodzi konieczność stymulowania badań eksploatacyjnych przewodów, przez przyjęcie a priori programowej strategii ich odnowy.

Utylitarnym celem pracy jest opracowanie modelu takiej strategii.

1.4. Zadania, rodzaje i budowa sieci kanalizacyjnej

Kanalizacja - jako zespół współdziałających urządzeń i budowli inżynierskich, ma za zadanie odprowadzenie z obszaru zabudowanego (miasa, osiedla, zakładu przemysłowego itd.) wszystkich rodzajów ścieków, jakie powstają w wyniku życia ludności, działalności gospodarczej i usługowej oraz wód opadowych. Wody gruntowe przyjmowane są do kanalizacji w sporadycznych przypadkach. Ścieki transportowane przez system kanalizacji dzielą się na gospodarcze, przemysłowe oraz opadowe, do których zalicza się także odpływy pochodzące z polewania i mycia ulic oraz spławiany siecią kanalizacyjną śnieg. Wielkość spływu ścieków deszczowych zależy od natężenia deszczu i współczynnika szczelności zlewni

(współczynnika spływu), będącego funkcją jej zagospodarowania. Sekundowa ilość ścieków deszczowych jest kilka, a nawet kilkadziesiąt razy większa od ilości ścieków bytowo-gospodarczych i przemysłowych. W ciągu roku jednak ilość ścieków bytowo-gospodarczych jest kilka razy większa niż ilość wód deszczowych.

W systemie kanalizacyjnym można wyróżnić następujące zasadnicze elementy [36]: sieć przewodów, pompownie, przewody tranzytowe, oczyszczalnie ścieków i wyloty kanalizacyjne.

Przedmiotem rozważań w niniejszej pracy pozostanie sieć przewodów ulicznych, nazywanych zazwyczaj miejską siecią kanalizacyjną. W skład tej sieci wchodzi przewody oraz uzbrojenie sieci, do którego zalicza się: studnie rewizyjne na kanałach nieprzełazowych, studnie wjazdowe na kanałach przełazowych, boczne wejścia, przewietrzniki, płuczki kanałowe, zamknięcia przekrojów kanałowych (klapy, zasuw, drzwi), a także specjalne obiekty na sieci, jak: zbiorniki sieciowe, komory przelewowe, syfony, akwedukty i inne konstrukcje na skrzyżowaniach z obiektami inżynierskimi. Największy wpływ na funkcjonowanie sieci mają jednak przewody kanalizacyjne, których udział jest niewspółmiernie duży w porównaniu z innymi elementami. Do nich też należy odnosić przedstawione w pracy rozważania.

Przekroje kanałów w sieciach kanalizacyjnych stanowią rozmaite odmiany przekrojów kołowych, jajowych zwykłych i podwyższonych, eliptycznych, gruszkowych, dzwonowych, prostokątnych i trapezowych [75]. Przekrój kołowy określa się jednym wymiarem - średnicą, pozostałe zaś dwoma - wysokością i szerokością [8], [9].

Materiał i gabaryty obudowy kanału zależą przede wszystkim od wielkości przepływów, warunków hydrogeologicznych, głębokości ułożenia oraz ciśnienia, pod jakim kanał może się ewentualnie znaleźć. Rodzaj obudowy zależy także od technologii wykonania kanału - odkrywkowej lub bezodkrywkowej. Bywa też, że do jej realizacji stosuje się więcej niż jeden materiał konstrukcyjny. Materiałami używanymi do budowy kanałów są: cegły (konstrukcje najstarsze), beton (konstrukcje starsze, a obecnie kanały o małych średnicach), żelbet (w tym także sprężony), materiały ceramiczne (kamionki), żeliwa, a ostatnio także tworzywa sztuczne (PCW, PE, PEHD, PP). Tworzywa sztuczne znajdują większe zastosowanie poza granicami kraju, gdzie używa się ich także do budowy elementów uzbrojenia sieci (szczególnie studzienek kontrolnych, kinet, rozgałęzień) [5], [14], [15]. W kraju stosowalność tworzyw sztucznych zarówno w przewodach, jak i ich uzbrojeniu jest jeszcze znikoma [34], [50], [74], [76], [102]. Niedługi czas eksploatacji tworzyw powoduje ponadto, że problemy wynikające z ich użytkowania są nieodczuwalne w

porównaniu z problemami występującymi w przewodach z innych materiałów. Jeżeli kanały nie są monolityczne, to są łączone kielichowo lub (rzadziej) na zakład. Uszczelnienia złączy są wykonywane sznurem konopnym smołowanym, uszczelkami gumowymi lub z tworzyw sztucznych, a wypełnienia kitem bitumicznym, cementem itp.

W zależności od zadań, które ma spełniać kanalizacja, rozróżnia się [8], [9], [27], [79]:

- kanalizację pełną, którą odprowadza się zarówno ścieki bytowo-gospodarcze i przemysłowe, jak i wody opadowe,
- kanalizację częściową, którą odprowadza się przeważnie tylko ścieki bytowo-gospodarcze i przemysłowe jako najbardziej niebezpieczne, a tylko w niektórych przypadkach wyłącznie ścieki opadowe i wody gruntowe.

W eksploatacji ważna jest także liczba przewodów do odprowadzania ścieków w poszczególnych systemach. Kanalizacja ogólnospławna charakteryzuje się tym, że do odprowadzenia wszystkich rodzajów ścieków buduje się tylko jedną sieć, której uzupełnieniem są burzowce, odprowadzające nadmiar wód deszczowych zmieszanych ze ściekami wprost do odbiornika. W kanalizacji rozdzielczej buduje się podwójną sieć, osobną do odprowadzania wód opadowych i osobną dla pozostałych ścieków. W kanalizacji półrozdzielczej, również dwusieczowej, stosuje się separatory do kierowania ścieków deszczowych z pierwszej fazy opadu z kanałów deszczowych do kanałów, które odprowadzają pozostałe ścieki, dzięki czemu osiąga się mniejsze zanieczyszczenie odbiornika. Pomijając względy ekologiczno-ekonomiczne, wynikające z typu kanalizacji, użytkownik eksploatuje system jednosieczowy lub dwusieczowy.

Normalnie, jako najprostsze pod względem technicznym, budowlanym i eksploatacyjnym są i będą rozwijane układy grawitacyjne, bezciśnieniowe. Wynika to także z faktu, że wszystkie urządzenia, z których odpływają ścieki bytowo-gospodarcze (miski klozetowe, wanny, zlewy, wpusty podłogowe) oraz urządzenia do odprowadzania wód opadowych (wpusty dachowe, podwórzowe i uliczne) działają bez ciśnienia, wykorzystując siłę ciężkości cieczy i dążenie do zmian tej naturalnej zasady byłoby niecelowe. Przedstawione w pracy techniki napraw sieci i ich modernizacji nie zmierzają zatem do zmian charakteru ruchu ścieków (tzn. przejścia na systemy ciśnieniowe, podciśnieniowe lub mieszane), lecz do poprawy stanu systemów grawitacyjnych dzięki możliwościom wprowadzania zmian, wynikających z postępu cywilizacyjnego oraz rozwoju technik i metod odnowy.

2. NIEZAWODNOŚCIOWY OPIS SIECI PRZEWODÓW KANALIZACYJNYCH

2.1. Cechy przewodów i wymuszenia

2.1.1. Charakterystyka cech przewodów

Przewody kanalizacyjne charakteryzują określone funkcje, związane niejako z ich stroną czynną oraz właściwości mające charakter bierny. Wszystkie właściwości i funkcje stanowią zbiór cech przewodów C , będący sumą podzbiorów cech mierzalnych C_m i cech niemierzalnych C_n

$$C = C_m \cup C_n. \quad (2.1)$$

Cechy mierzalne (ilościowe) opisują w sposób obiektywny (za pomocą liczb rzeczywistych) te funkcje i właściwości przewodów, które w danym przedziale czasu można pomierzyć. Cechy niemierzalne (jakościowe) opisują w sposób subiektywny te właściwości i cechy przewodów, których nie można pomierzyć.

Do cech mierzalnych zalicza się: charakterystyki geometryczne przewodów (wymiały przekrojów poprzecznych i elementów konstrukcyjnych, długości i spadki podłużne przewodów oraz wymiały opisujące ich położenie w planie i zagłębienia), charakterystyki konstrukcyjno-wytrzymałościowe (parametry materiałów konstrukcyjnych, nośność i odkształcalność elementów konstrukcyjnych oraz osiadanie), parametry hydrauliczne (przepustowość, prędkość przepływu, szorstkość) oraz wiek.

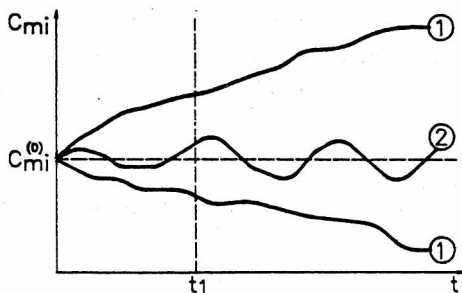
Do cech niemierzalnych zalicza się: szczelność, odporność na korozję chemiczną, objawy technicznego i ekonomicznego starzenia.

W konkretnych warunkach pracy przewodów dla każdej cechy mierzalnej podaje się dopuszczalne granice C_{mi} , $\overline{C_{mi}}$ takie, że każda wartość i -tej cechy (funkcji lub właściwości), zawarta w przedziale $(C_{mi}, \overline{C_{mi}})$, odpowiada prawidłowemu (założonemu) działaniu przewodów. Również dla cech niemierzalnych można podejmować próby sprecyzowania w miarę ścisłych kryteriów oceny, by móc jak najdokładniej określić, czy dana cecha odpowiada warunkom prawidłowego działania przewodów (rozdz. 3.2). Ze względów formalnych przyjmuje się zerojedynkowy system identyfikacji cechy. Oznacza to, że spełnienie przez cechę warunków stawianych przewodowi zapisuje się $C_{nj} = 1$, a niespełnienie $C_{nj} = 0$.

Wartości cech mierzalnych są zawarte w przedziałach liczbowych, zwanych przedziałami tolerancji. W celu uwzględnienia probabilistycznego charakteru tych cech, należy wprowadzić pojęcie przedziału ufności, którym na wyznaczonym poziomie istotności α nazywa się taki przedział ograniczony wartościami brzegowymi C_{mi} i $\overline{C_{mi}}$, w którym spełniona jest relacja

$$P \left\{ C_{mi} \in [\underline{C_{mi\alpha}}, \overline{C_{mi\alpha}}] \right\} = 1 - \alpha = \beta. \quad (2.2)$$

W praktyce nie znamy funkcji gęstości, ani nawet charakteru rozkładu większości cech mierzalnych przewodów kanalizacyjnych. Mało prawdopodobne jest również, aby podjęto natychmiast badania empiryczne w celu identyfikacji rzeczywistych przedziałów tolerancji. W praktyce inżynierskiej często przyjmuje się, że funkcja gęstości cechy jest zdeterminowana granicą przedziału ufności, tzn. $\beta = 1$, co jest matematycznie niesłuszne i może prowadzić do błędnych wyników oraz zaniżyć niezawodność eksploatowanych obiektów. Podobnie trudne są pomiary stabilności cech w czasie. Teoretycznie charakter zmian może być wówczas odwracalny i nieodwracalny, co pogłęboko ilustruje rys. 2.1.



Rys. 2.1. Zmiany cech mierzalnych w czasie: 1 - nieodwracalne, 2 - odwracalne

Fig. 2.1. Changes of measurable characteristics with time: 1 - irreversible, 2 - reversible

W praktyce mamy jednak do czynienia w przeważającej mierze z nieodwracalnymi zmianami cech sieci. Wyjątek może stanowić częściowy "powrót" do pierwotnej przepustowości przewodów w sieci ogólnospławnej lub półrozdzielczej, zamulonej piaskiem w czasie dłuższych okresów bezdeszczowych. Sieć taka jest zdolna do samoprzepłukania przewodów w okresie intensywnych opadów, kiedy wydatki ścieków deszczowych są duże.

Zmiana cech przewodów w czasie zależy od intensywności działania zespołu wymuszeń i jeśli zmiany są nieodwracalne, może być wyrażona formułą

$$\Delta C_{mi}(t_1) = C_{mi}(t_1) - C_{mi}(0) = \psi(Q(t), t_1), \quad (2.3)$$

gdzie: $\Delta C_{mi}(t_1)$ - zmiana cechy mierzalnej, wyznaczona jako różnica wartości cechy na początku i na końcu przedziału czasu $(0, t_1)$,

$C_{mi}(0)$, $C_{mi}(t_1)$ - wartości cechy przewodu, wyznaczone odpowiednio w chwilach $t = 0$ i $t = t_1$,

$Q(t)$ - zespół wymuszeń działających na przewód.

W przypadku odwracalnych zmian cech przewodu, za miarę stabilności dla danego zespołu wymuszeń $Q_1 = E_{t_1} Q(t)$ uważa się wartość przeciętną

$$\Delta \bar{C}_{mi}(t_1) = E_{t_1, Q_1} \Delta C_{mi}(t, Q) \quad (2.4)$$

lub wartość maksymalną

$$\Delta C_{mi}(t_1) = \max \Delta C_{mi}(t, Q). \quad (2.5)$$

Ponieważ pomiary stabilności cech urządzeń technicznych są pracochłonne i sprowadzają się do procesów stochastycznych, dla uproszczenia w praktyce często wprowadza się pojęcie dostatecznej stabilności cechy. Za dostatecznie stabilną uważa się taką cechę, która dla każdej chwili czasu z przedziału $(0, t_1)$ spełnia warunek

$$\Delta C_{mi}(t) \leq C_1, \quad (2.6)$$

gdzie C_1 - założona wartość charakteryzująca stabilność cechy.

2.1.2. Charakterystyka wymuszeń

Sieć przewodów kanalizacyjnych, jak wszystkie rzeczywiste obiekty techniczne, działa w konkretnych warunkach opisanych przez zbiór czynników wymuszających (w skrócie - wymuszeń), który dzieli się na:

- podzbiór czynników wynikających z roboczej funkcji przewodów (wymuszeń wewnętrznych),
- podzbiór czynników wynikających z oddziaływania otoczenia przewodów (wymuszeń zewnętrznych).

Wymuszenia można też dzielić na podzbiór wymuszeń mierzalnych i podzbiór wymuszeń niemierzalnych.

Czynniki robocze wynikają z temperatury i agresywności ścieków (ich składu chemicznego), zawartości frakcji ściernych w ściekach (szczególnie piasku) oraz wydatków i prędkości przepływu ścieków. Wyeliminowanie wymuszeń roboczych jest niemożliwe, gdyż są one następstwem fizycznych procesów realizowanych przez przewody (ich funkcji). Stopień odporności przewodów na działanie tego podzbioru wymuszeń zależy przede wszystkim od przyjętych rozwiązań projektowych. Jednakże zmienność w czasie liczby tych wymuszeń, a także intensywności ich działania powodują, że rozwiązania projektowe obiektów o długim okresie eksploatacji nigdy nie są wystarczająco dobre. W przypadku sieci kanalizacyjnych szczególnie dotkliwie odczuwalne są skutki zwiększonej ilości ścieków oraz ich agresywności chemicznej, którym dawno projektowane kanały nie są w stanie sprostać.

Czynniki zewnętrzne są najczęściej procesami stochastycznymi, trudnymi do jednorazowego określenia. Również prognozowanie zmian intensywności ich działania w czasie jest iluzoryczne. Do tego podzbioru wymuszeń zalicza się przede wszystkim obciążenia mechaniczne (statyczne i

dynamiczne), agresywność chemiczną środowiska gruntowego, destrukcyjne działanie korzeni drzew oraz szkodliwe oddziaływanie innych budowli (szczególnie w razie ich awarii lub realizacji), a także ruchy otoczenia gruntowego (sejsmiczne i parasejsmiczne). Najdotkliwiej odczuwalny jest wzrost obciążeń mechanicznych przewodów, wynikający ze zmiany rodzajów pojazdów i struktury ruchu w miastach, wzrost chemicznej agresywności gruntu, wód gruntowych, a także intensywności wymuszeń powodowanych awaryjnością i realizacją innych budowli podziemnych, których liczba i asortyment dynamicznie wzrastają z postępem cywilizacyjnym.

Eliminacja lub łagodzenie skutków działania wymuszeń wymagają zastosowania dodatkowych rozwiązań technicznych, nie przewidzianych w projekcie przewodów. Typowymi przykładami takich rozwiązań są wzmocnienia istniejących konstrukcji, nowe (skuteczniejsze) izolacje, petryfikacje podłoża gruntowego itp., a więc "odnowa przewodów", która zmienia ich cechy nadając im nową wartość i dostosowuje do nowych wymuszeń.

Podobnie jak w przypadku klasyfikacji cech przewodów, do podzbioru wymuszeń mierzalnych $Q_m(t)$ zaliczają się te wymuszenia, które można opisać liczbami rzeczywistymi. Elementy podzbioru wymuszeń niemierzalnych $Q_n(t)$ identyfikuje się zerojedynkowym systemem identyfikacji, tzn. występowanie wymuszenia oznacza $q_n = 1$, a niewystępowanie $q_n = 0$.

2.2. Pojęcie niezawodności

Funkcja $R(t)$, zwana w skrócie niezawodnością przewodu w czasie $(0, t)$, oznacza prawdopodobieństwo tego, że uszkodzenie wystąpi później niż w momencie t (czyli że przewód będzie sprawny w czasie $(0, t)$) i ma postać

$$R(t) = P(\tau > t) \quad \text{dla } t \geq 0, \quad (2.7)$$

gdzie τ - zmienna losowa typu ciągłego, przyjmująca wartości z przedziału $(0, \infty)$, dla prostoty traktowana jako czas [42].

Zakłada się, że:

- niezawodność przewodu $R(0)$ w chwili początkowej $t = 0$ wynosi 1,
- niezawodność jest nierosnącą funkcją czasu,
- niezawodność po czasie nieskończenie długim jest równa

$$\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0. \quad (2.8)$$

Nawiązując do sformułowanych poprzednio definicji cech przewodów można powiedzieć, że:

niezawodność przewodu jest scharakteryzowana prawdopodobieństwem, że dla zespołu wymuszeń $Q(t)$ wszystkie cechy mierzalne C_{mi} oraz cechy

niemierzalne C_{nj} w danym przedziale czasu $[0, \tau]$ nie zmieniają swoich wartości na tyle, aby sieć nie mogła prawidłowo realizować swoich funkcji.

Przyjmując poprzednio sprecyzowane przedziały ufności dla cech mierzalnych i zerojedynkowy identyfikator cech niemierzalnych, definicję można zapisać

$$R(t) = P \left\{ C_{mi}(t) \in [\underline{C_{mi}}, \overline{C_{mi}}] \wedge C_{nj}(t) = 1 \right\}; t \in [0, \tau], \quad (2.9)$$

$Q(t).$

Rozpatrywany przedział czasu $[0, \tau]$ obejmuje w zasadzie cały okres eksploatacji przewodów. W świetle przedstawionej definicji niezawodności przewodów, ich zawodność polega na tym, że nie spełniają one prawidłowo wszystkich czynności w wymaganym czasie $[0, \tau]$ przy zespole wymuszeń $Q(t)$.

Miarą zawodności jest więc prawdopodobieństwo, że w określonych warunkach eksploatacji i w zadanym przedziale czasu powstanie przynajmniej jedno uszkodzenie przewodu

$$Z(t) = 1 - R(t), \quad (2.10)$$

gdzie $Z(t)$ - zawodność przewodu.

W praktyce informacje o funkcjach niezawodności $R(t)$ i zawodności $Z(t)$ obiektów uzyskuje się w wyniku analizy danych, otrzymanych z badań eksploatacyjnych.

2.3. Uszkodzenia przewodów

2.3.1. Definicja uszkodzeń i ich klasyfikacja

Uszkodzenie przewodu jest przejściem ze stanu zdatności do stanu niezdatności, rozumianego jako niespełnianie stawianych przewodowi wymagań. Stanem uszkodzenia nazywa się zdarzenie losowe, polegające na tym, że przynajmniej jedna cecha ze zbioru cech mierzalnych lub niemierzalnych opisujących przewód przestanie spełniać stawiane mu wymagania [101]

$$\exists i, C_{mi} \notin [\underline{C_{mi}}, \overline{C_{mi}}] \vee \exists j, C_{nj} = 0 \text{ dla } i, j = 1, 2, 3, \dots \quad (2.11)$$

Przejście przewodu ze stanu zdatności do stanu niezdatności może się odbywać w różny sposób, który kwalifikuje uszkodzenia do dwóch podstawowych typów - uszkodzeń katastroficznych (całkowitych) i parametrycznych (częściowych).

Uszkodzenia katastroficzne powodują natychmiastowe przerwanie prawidłowej pracy przewodu i wymagają interwencji obsługi w celu jego naprawy lub wymiany na nowy, ponieważ przewód - nawet częściowo - nie może spełniać swoich zadań. Należy tu zauważyć, że uszkodzeń tych nie można odnieść do sieci jako systemu, gdyż tylko w szczególnych przypad-

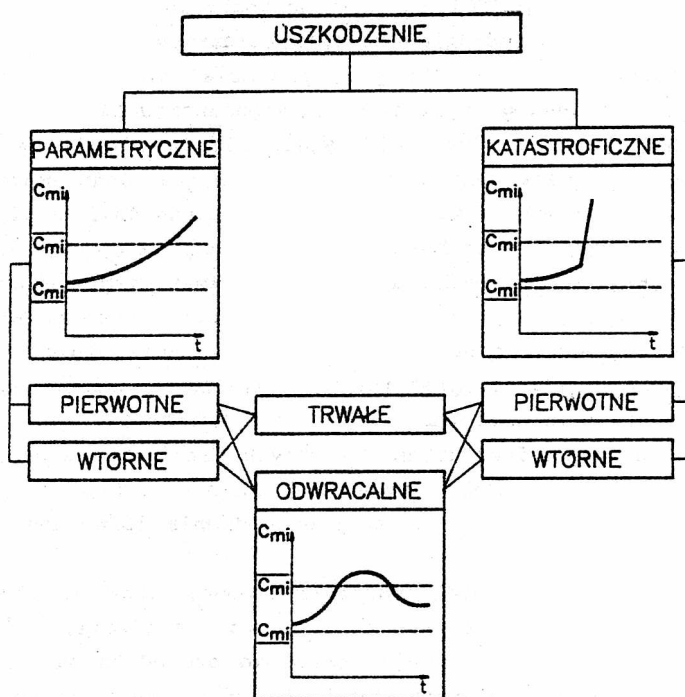
kach uszkodzenie jednego odcinka sieci i konieczność jego odnowy mogą być utożsamiane z katastroficznym uszkodzeniem sieci jako całego systemu przewodów. Przyczyną pojawienia się uszkodzenia katastroficznego jest zazwyczaj skokowe i niespodziewane wyjście wartości co najmniej jednego elementu zbioru wymuszeń $Q_m(t)$ poza przedział wartości dopuszczalnych lub pojawienie się nowego wymuszenia o skoncentrowanej w czasie i dużej intensywności działania. Przykładem występującym w praktyce jest zniszczenie przewodu podczas realizacji innych urządzeń podziemnych, w czasie awarii takich urządzeń, w wyniku wstrząsów parasejsmicznych lub rzadko występujących w naszej szerokości geograficznej - wstrząsów sejsmicznych [16], [23], [69], [70]. Cechą uszkodzeń parametrycznych, zwanych także naturalnymi jest to, że przewód nie spełnia stawianych mu wymagań, lecz wykonuje swe zadania z obniżonym standardem. Szczególnie częstym przykładem takiego stanu sieci jest rozszczelnienie przewodów (wynikiem jest infiltracja wody gruntowej lub eksfiltracja ścieków).

W przypadku uszkodzeń katastroficznym przejście ze stanu sprawności do stanu niesprawności odbywa się bardzo szybko w jednoznacznie określonym czasie. Również usunięcie uszkodzenia jest zazwyczaj natychmiastowe.

W przypadku uszkodzenia parametrycznego, którego skutki nie są widoczne na zewnątrz, proces przejścia odbywa się powoli, a identyfikacja uszkodzenia jest możliwa w wyniku okresowo prowadzonych badań kontrolnych, chyba że uszkodzenie przejdzie w uszkodzenie katastroficzne, o wcześniej zauważalnych skutkach. Oznacza to, że podczas eksploatacji bez kontroli okresowej stwierdzenie większości uszkodzeń parametrycznych jest możliwe dopiero wówczas, gdy są znacznie zaawansowane. Stąd też, w systemach nieprogramowo eksploatowanych (bez okresowej kontroli) czas funkcjonowania tak uszkodzonych przewodów jest bardzo długi. Z punktu widzenia szkodliwości uszkodzenia parametryczne sieci kanalizacyjnych są zatem bardziej niebezpieczne od uszkodzeń katastroficznym, chociaż warunki usuwania uszkodzeń katastroficznym są narzucone i mogą być bardzo trudne (np. w czasie mrozów). Wynika to stąd, że uszkodzenia katastroficzne muszą być usunięte w losowo wybranym okresie, parametryczne natomiast w okresie najwygodniejszym dla użytkownika sieci. Uszkodzenia parametryczne są rezultatem powolnych i nieodwracalnych procesów fizycznych zachodzących w sieci oraz złego wykonawstwa i wad materiałowych. Oznacza to, że po części są nieuniknione, gdyż wynikają z procesu starzenia się przewodów i wystąpią nawet wtedy, gdy żaden z innych elementów zbioru wymuszeń nie wyjdzie poza przedział przyjętych wartości, a także jeśli nie wystąpią nowe wymuszenia.

Uszkodzenia mogą być również klasyfikowane ze względu na stopień ich wpływu na zdolność eksploatowania przewodów, związek z czasem, czy

też związek z innymi uszkodzeniami, co przedstawiono schematycznie na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Klasyfikacja uszkodzeń

Fig. 2.2. Damage classification

Uszkodzenia odwracalne polegają na czasowym przekroczeniu jednej lub kilku cech mierzalnych obiektu. W sieci kanalizacyjnej występują one jedynie podczas przejściowych ograniczeń przepustowości przewodów w wyniku ich zamulenia lub przepełnienia (w czasie opadów o nieprzewidzianym natężeniu).

Uszkodzenia pierwotne są to uszkodzenia inicjujące awaryjne działanie sieci i jeżeli nie są usunięte, powodują uszkodzenia wtórne. Przykładem może być nadmierne osiadanie przewodów lub studzienek w wyniku podmywania ich ściekami wpływającymi przez uszkodzone (nieszczelne) złącza. Uszkodzenie złącza jest w tym przypadku uszkodzeniem pierwotnym, osiadanie kanałów zaś uszkodzeniem wtórnym.

2.3.2. Przyczyny uszkodzeń

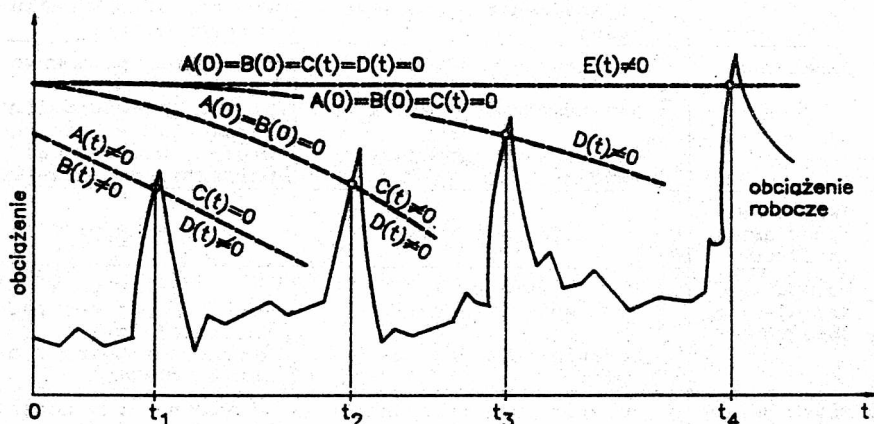
Przyczyny uszkodzeń można podzielić na pięć podstawowych podzbiorów:

$A(0)$ - błędy konstrukcyjne,

- $B(0)$ - błędy technologiczno-materiałowe,
 $C(t)$ - błędy eksploatacji,
 $D(t)$ - procesy starzeniowe,
 $E(t)$ - bodźce zakłócające (wymuszenia - $Q(t)$).

Elementy dwóch pierwszych podzbiorów nie są funkcją czasu użytkowania obiektu, gdyż wynikają z wad wykonawstwa i materiałów, a także z wad rozwiązań projektowych. Wektor warunków pracy $K(t)$ jest więc związany tylko z elementami trzech pozostałych podzbiorów przyczyn uszkodzeń, przy czym:

- błędy eksploatacji $C(t)$ wynikają przede wszystkim z braku właściwej strategii obsługi oraz niekompetencji serwisu,
- starzenie obiektu $D(t)$ jest zjawiskiem naturalnym i nie dającym się (podobnie jak bodźce zewnętrzne $E(t)$) wyeliminować.



Rys. 2.3. Charakterystyka niezawodnościowa występujących wymuszeń skokowych, różnego rodzaju błędów oraz procesów starzeniowych [87]

Fig. 2.3. Reliability characteristic taking into account step functions, different errors, and ageing processes [87]

Poglądowo, na rysunku 2.3 pokazano charakterystyki niezawodnościowe urządzenia technicznego, właściwe różnego rodzaju przyczynom uszkodzeń [87]. Podane na rysunku charakterystyki nie uwzględniają wszystkich możliwych kombinacji przyczyn uszkodzeń, unaoczniają jednakże zasadę, że im więcej przyczyn, tym prawdopodobieństwo uszkodzenia przewodów w czasie eksploatacji wzrasta, a ich niezawodność $R(t)$ maleje. Czasy poprawnej pracy przewodów t_1, t_2, t_3, t_4 mogą przyjmować bardzo zróżnicowane wartości, co odzwierciedla losowy charakter pojawiania się zakłóceń zewnętrznych $E(t)$ i implikowanych nimi uszkodzeń. Stwierdzenie to jest

Opis uszkodzeń sieci przewodów kanalizacyjnych i ich klasyfikacja
Description of the types of damage to sewage
conduit network and their classification

Lp.	Wymuszenie	Opis uszkodzenia	Klasyfikacja uszkodzenia
1	Przeciążenia mechaniczne	↓ Zniszczenie konstrukcji lub złączy przewodów (rozszerzenie sieci) ↓ Podmywanie sieci (eksfiltracja) → osiadanie ↓ Zamulenie sieci (infiltracja) → blokada przepływu	Pierwotne, nieodwracalne, parametr. → katastrof. Wtórne, nieodwracalne, parametr. → katastrof. Wtórne, nieodwracalne, parametr. → katastrof.
2	Wstrząsy (sejsmiczne, parametryczne)	↓ Przemieszczenie przewodów (meandry, spadki) ↓ Rozszerzenie sieci ↓ Ograniczenie przepustowości	Pierwotne, nieodwracalne, katastroficzne Wtórne, nieodwracalne, katastroficzne Wtórne, nieodwracalne, katastroficzne
3	Osiadanie	↓ Deformacja spadków ↓ Rozszerzenie sieci ↓ Ograniczenie przepustowości	Pierwotne, nieodwracalne, parametryczne Wtórne, nieodwracalne, parametr. → katastrof. Wtórne, nieodwracalne, parametr. → katastrof.
4	Awarie sąsiadujących obiektów	jak w p. 2	jak w p. 2
5	Budowa sąsiadujących obiektów	jak w p. 4 ↓ Zamulenie iniektami ↓ Ograniczenie przepustowości	jak w p. 4 Pierwotne, nieodwracalne, katastroficzne Wtórne, nieodwracalne, katastroficzne
6	Piaskowanie ulic	Ograniczenie przepustowości	Pierwotne, odwracalne → nieodwracalne, parametr. → katastrof.
7	Przeciążenie hydrauliczne (sieć pod ciśnieniem)	↓ Rozszerzenie jak w p. 1	Pierwotne, nieodwracalne, parametr. → katastrof. jak w p. 1
8	Agresywność chemiczna (gruntu, ścieków) i biologiczna (bakterie, korzenie drzew)	↓ Korozja, zmiany strukturalne materiałów jak w p. 1	Pierwotne, nieodwracalne, parametryczne jak w p. 1
9	Czas (procesy zmęczeniowe)	↓ Zmiany strukturalne materiałów jak w p. 1	Pierwotne, nieodwracalne, parametryczne jak w p. 1

istotne dla strategii odnowy przewodów, gdyż wynika z niego, że programowa odnowa (z systematyczną kontrolą i diagnostyką lub profilaktyką) w sposób stosunkowo skuteczny może wyeliminować uszkodzenia, wynikające z błędów eksploatacji $C(t)$ oraz - do pewnego stopnia - uszkodzenia parametryczne, których występowanie można w przybliżeniu przewidywać na podstawie doświadczeń z eksploatacji przewodów w podobnych warunkach.

Badanie i modelowanie niezawodności przewodów z uwzględnieniem bodźców zewnętrznych $E(t)$ i ich efektów jest o wiele trudniejsze i wymaga stosowania rachunku prawdopodobieństwa oraz metod statystyki matematycznej.

W tabeli 2.1 przedstawiono typowe dla praktyki eksploatacyjnej przewodów przyczyny uszkodzeń, uszkodzenia oraz ich klasyfikację.

2.3.3. Charakterystyka uszkodzeń

Zdefiniowane dwa podstawowe pojęcia, a mianowicie funkcja niezawodności $R(t)$ i zawodności $Z(t)$ nie wyczerpują wszystkich możliwości niezawodnościowej oceny przewodów. Konieczne jest wprowadzenie dalszych pojęć, niezbędnych do analizy i praktycznych zastosowań teorii niezawodności.

Pierwszą nową miarą jest częstość uszkodzeń, przez którą rozumie się wartości dyskretne funkcji gęstości prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia [87]

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = F'(t) = -R'(t), \quad (2.12)$$

gdzie $F(t)$ - prawdopodobieństwo uszkodzeń, określone za pomocą dystrybuant równoważnych funkcji zawodności $F(t) = Z(t)$ i $F(t) = 1 - R(t)$.

W praktyce, w celu wyznaczenia częstości uszkodzeń wygodnie jest stosować zależności empiryczne. Jeżeli uwzględni się, że $f(t) = F'(t)$, to częstość uszkodzeń w próbce losowej o liczebności początkowej n_0 można aproksymować estymatorem

$$\bar{f}(t) = \frac{n_f(\Delta t)}{n_0 \Delta t}, \quad (2.13)$$

w którym $n_f(\Delta t)$ - liczba uszkodzeń obiektów w przedziale czasu $[t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}]$, gdzie Δt jest długością przedziału czasu.

Oprócz częstości uszkodzeń ważne znaczenie ma intensywność uszkodzeń, która jest opisana zależnością wiążącą ją z funkcjami zawodności i niezawodności

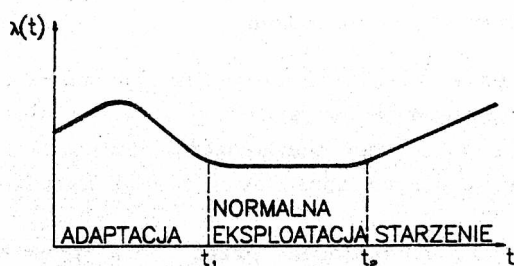
$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t) \Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{F'(t)}{1 - F(t)} = - \frac{R'(t)}{R(t)}. \quad (2.14)$$

Podobnie jak w przypadku gęstości prawdopodobieństwa uszkodzeń, w celach praktycznych można się posługiwać estymatorem intensywności uszkodzeń

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{n_f(\Delta t)}{n(\Delta t) \Delta t}, \quad (2.15)$$

gdzie: $n(\Delta t) = \frac{1}{2}[n(t - \frac{\Delta t}{2}) + n(t + \frac{\Delta t}{2})]$ - średnia liczba obiektów sprawnych w przedziale czasu Δt ,

$n(t - \frac{\Delta t}{2})$, $n(t + \frac{\Delta t}{2})$ - liczba sprawnych obiektów na początku i na końcu przedziału czasu Δt .



Rys. 2.4. Funkcja zmian intensywności uszkodzeń w czasie

Fig. 2.4. Function of changes in damage rate of technical units with time

nologiczno-materiałowych $B(0)$. Ten przedział użytkowania oraz występujące w nim uszkodzenia można odnosić do nowych lub odnowionych przewodów, których udział w systemie jest w zasadzie nieznaczny (w kraju dotyczy to szczególnie przewodów odnowionych). Następnie intensywność uszkodzeń maleje, po czym w stosunkowo długim przedziale czasu pozostaje prawie na stałym poziomie ($\lambda = \text{const.}$). Dla tego przedziału można z dużym przybliżeniem przyjąć, że spełnia on warunki określone wykładniczym prawem niezawodności, opisanym przez Wienera. Funkcje niezawodności, zawodności oraz gęstości prawdopodobieństwa uszkodzeń opisują wtedy wzory:

$$\begin{aligned} R(t) &= e^{-\lambda t}, \\ F(t) &= 1 - e^{-\lambda t}, \\ f(t) &= \lambda e^{-\lambda t}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

W większości obiektów technicznych, w tym także w przewodach kanalizacyjnych, intensywność uszkodzeń w czasie zmienia się kreując standardową funkcję z trzema charakterystycznymi okresami eksploatacji, co przedstawiono na rys. 2.4 [42].

Zwiększona intensywność uszkodzeń w okresie adaptacji jest wynikiem błędów konstrukcyjnych $A(0)$ oraz tech-

Po upływie czasu normalnej eksploatacji intensywność uszkodzeń znów dość znacznie wzrasta ($\lambda \neq \text{const.}$), na co wpływają przede wszystkim skutki procesu starzenia się przewodów. W tym przedziale czasu przestaje również obowiązywać wykładnicze prawo niezawodności, w związku z czym są podejmowane próby zastosowania w tym przedziale: rozkładu normalnego uciętego, logarytmo-normalnego, Weibulla, gamma, a także rozkładów potęgowych i uogólnionego gamma. Długi okres eksploatacji znacznej części przewodów kanalizacyjnych w kraju powoduje, że ze względu na zaistniały proces starzenia część ich znajduje się w trzecim przedziale o rosnącej intensywności uszkodzeń λ . Narastanie uszkodzeń w wyniku procesów starzeniowych dobrze odtwarza rozkład normalny ucięty lub bardziej uniwersalny rozkład gamma. Uzyskanie siodłowego charakteru funkcji, przedstawionej na rys. 2.4, jest jednak możliwe dopiero w wyniku kompozycji kilku rozkładów, opartej na założeniu niejednorodnej populacji obiektów frakcjonowanych pod kątem przyczyn wywołujących uszkodzenia (podzbiory A, B, C, D i E). Zagadnienia te, jak i szczegółowe formuły matematyczne opisujące funkcje niezawodności, zawodności oraz gęstości prawdopodobieństwa uszkodzeń dla wymienionych typów rozkładów i ich kompozycji, są dokładnie omówione w literaturze [13], [41], [92] i w pracy nie zostały zacytowane.

Z przedstawionych zależności wynikają wprost podstawowe zasady budowy i utrzymania urządzeń technicznych, które w odniesieniu do przewodów można sprecyzować następująco:

a) dzięki doborowi materiałów i technologii oraz jakości wykonawstwa nowych przewodów powinno się minimalizować czas trwania przedziału czasu $\langle 0, t_1 \rangle$,

b) stare fragmenty sieci (z przedziału $\langle t_2, \infty \rangle$) o znacznej intensywności uszkodzeń parametrycznych powinny być tak odnawiane, aby natężenie intensywności po odnowie odpowiadało natężeniu z przedziału $\langle t_1, t_2 \rangle$, co wymaga wysokiej jakości metod odnowy, materiałów i robocizny,

c) wszystkie przewody powinny być eksploatowane według przyjętej strategii programowej, tzn. z zachowaniem wszystkich elementów procesu odnowy, co gwarantuje maksymalne wydłużenie przedziału normalnej pracy sieci $\langle t_1, t_2 \rangle$.

Jeżeli zostanie przyjęte założenie, że uszkodzenia powstałe w wyniku zaburzeń eksploatacji, starzenia się przewodów i działania bodźców zakłócających są zdarzeniami niezależnymi, to niezawodność wynikająca z ich pracy można zapisać w postaci iloczynu

$$R(t) = R_C(t) R_D(t) R_E(t), \quad (2.17)$$

gdzie: $R_C(t)$ - składowa niezawodności, wynikająca z błędów eksploatacji,

$R_D(t)$ - składowa niezawodności, wynikająca ze starzenia się sieci,

$R_E(t)$ - składowa niezawodności, wynikająca ze skutków działania zbioru wymuszeń.

Przyjęto tu założenie, że nie uwzględnia się uszkodzeń powstałych podczas produkcji, transportu i montażu przewodów, tzn. $R_{A,B}(0) = 0$. Oznacza to, że chwila $t = 0$ oznacza umowną granicę między czasem przygotowania przewodów do eksploatacji $\langle -\infty, 0 \rangle$, a samą eksploatacją $\langle 0, \infty \rangle$. Jak wykazano w dalszej części pracy, przyjęcie takiego założenia dla procesów stacjonarnych i dostatecznie długiego okresu eksploatacji systemów z odnową jest w pełni uzasadnione.

Niezawodność początkowa $R_{A,B}(0)$ może być uwzględniana, jeżeli dokonuje się analizy niezawodnościowej odcinków sieci nowych lub bezpośrednio po odnowie. Wtedy niezawodność wypadkowa wyrazi się iloczynem

$$R_O(t) = R(t) R_A(0) R_B(0), \quad (2.18)$$

gdzie: $R_A(0)$ - składowa niezawodności, wynikająca z błędów projektowych i montażu,

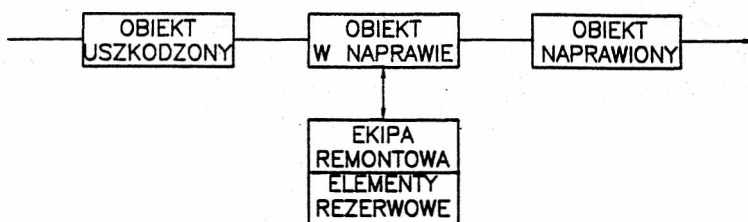
$R_B(0)$ - składowa niezawodności, wynikająca z błędów technologiczno-materiałowych.

2.4. Pojęcie odnowy

2.4.1. Parametry odnowy

Odnową nazywa się przejście obiektu (tu przewodu) ze stanu niezdolności eksploatacyjnej do stanu zdolności. Jeżeli takie przejście jest możliwe dzięki działaniu zewnętrznemu i jest ono gospodarczo uzasadnione, to urządzenie kwalifikuje się do zbioru urządzeń naprawialnych, jak to jest w przypadku systemów kanalizacyjnych. Systemy takie są również często nazywane systemami z odnową [42]. Wynika stąd, że zdefiniowane w poprzednim rozdziale parametry niezawodnościowe (obiektów nienaprawialnych) są słuszne tylko w przedziale czasu od włączenia przewodu do eksploatacji do chwili pierwszego uszkodzenia oraz w przedziałach czasu między kolejnymi uszkodzeniami [87]. Zachodzi zatem potrzeba zdefiniowania parametrów niezawodnościowych, uwzględniających odnawianie przewodów.

Podstawowym parametrem odnowy jest jej rozkład wyrażony prawdopodobieństwem [87]



Rys. 2.5. Schemat odnowy obiektu naprawialnego na miejscu zainstalowania

Fig. 2.5. Scheme of renovation of an object repairable on the spot

$$F(t_a) = P \left\{ S(\tau) = \bar{S} ; 0 < \tau < t_a \mid S(0) = S \right\}, \quad (2.19)$$

gdzie: t_a - czas odnowy,

S - stan poprawnej pracy obiektu,

$\bar{S}$ - stan uszkodzenia obiektu.

Pochodną funkcji $F(t_a)$ nazywa się gęstością prawdopodobieństwa dokonania odnowy

$$f(t_a) = F'(t_a) = \frac{dF(t_a)}{dt_a}. \quad (2.20)$$

Znając powyższe parametry, możemy zdefiniować, podobnie jak w przypadku intensywności uszkodzeń, następny parametr odnowy, a mianowicie jej intensywność

$$\mu(t_a) = \lim_{\Delta t_a \rightarrow 0} \frac{F(t_a + \Delta t_a) - F(t_a)}{[1 - F(t_a)] \Delta t_a} = \frac{f(t_a)}{1 - F(t_a)}. \quad (2.21)$$

Intensywność może być także estymowana na podstawie badań próbki obiektów uszkodzonych

$$\bar{\mu}(t_a) = \frac{n_{t_a} \Delta t}{n(\Delta t) \Delta t}, \quad (2.22)$$

gdzie $n_{t_a} \Delta t$ - liczba odnów w przedziale czasu

$$\left[t_a - \frac{\Delta t_a}{2}, t_a + \frac{\Delta t_a}{2} \right].$$

We wszystkich badaniach empirycznych należy pamiętać, że zgodnie z prawem wielkich liczb Bernoulliego, uzyskamy wyniki tym dokładniejsze, im liczniejsze będą próbki [17].

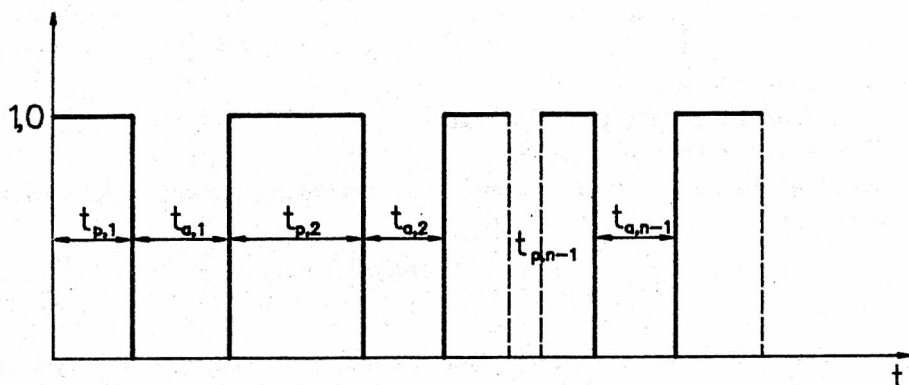
Proces odnowy przebiega różnorodnie, w zależności od typu systemu oraz postępowania obsługi (serwisu). Naprawy przewodów kanalizacyjnych odbywają się zawsze w miejscu ich zainstalowania bez względu na rodzaj

uszkodzeń i metodę ich usuwania, co schematycznie ilustruje rys. 2.5. Ponadto, często uszkadzające się elementy przewodów (np. złącza) są naprawiane w krótkim czasie w porównaniu z naprawami elementów uszkadzających się rzadko (np. konstrukcje przewodów).

Wymienione cechy przewodów kanalizacyjnych pozwalają na przyjęcie założenia, że czas wykonania odnowy ma rozkład wykładniczy, wyrażony dystrybuantą [101]

$$G(t_a) = 1 - e^{-\mu t_a} . \quad (2.23)$$

Proces pracy obiektu podlegającego odnowie przedstawiono na rys. 2.6, z którego wynika, że jest on procesem losowym [41].



Rys. 2.6. Proces pracy obiektu naprawialnego

Fig. 2.6. Process of operation of a reparable object

Odcinki pracy t_{pi} stanowią realizacje chwilowe zmiennych losowych T_{pi} , a czasy odnowy t_{ai} zmiennych losowych T_{ai} . Uwzględnienie wzajemnych zależności między odpowiadającymi sobie zmiennymi t_{pi} od T_{pi} oraz t_{ai} od T_{ai} w opisie procesu do n -tego cyklu wymagałoby znajomości rozkładu o $2n$ zmiennych losowych.

Estymacja postaci funkcyjnej i parametrów takiego rozkładu w praktyce jest nie do wykonania, chociaż znając taki rozkład można by było określać stan obiektu w dowolnej chwili. Chcąc stworzyć realny model matematyczny procesu pracy dla przewodów, należy zatem przyjąć pewne założenia upraszczające:

a) strumień zdarzeń jest bez pamięci, tzn. że prawdopodobieństwo pojawienia się określonej liczby zdarzeń w pewnym przedziale czasu nie zależy od takiegoż prawdopodobieństwa w poprzednim przedziale czasu i nie wpływa na takie prawdopodobieństwo w następnych przedziałach czasu co oznacza, że zmienne T_{pi} i T_{ai} są zmiennymi niezależnymi,

b) strumień zdarzeń jest stacjonarny, tzn. że prawdopodobieństwo wystąpienia pewnej liczby zdarzeń w ciągu pewnego przedziału czasu nie zależy od tego, którą chwilę czasu przyjęto za początkową, lecz zależy jedynie od długości przedziału.

Przyjęcie założenia stacjonarności oznacza, że rozkłady trwałości $F(t_{pi})$ i odnowy $F(t_{ai})$ są stałe. Stałe są także przy takim założeniu rozkłady zmiennych T_{pi} oraz T_{ai} , a ich wartości oczekiwane można odpowiednio przyrównać do wartości średniego czasu poprawnej pracy $\bar{t}_p$ i wartości średniego czasu odnowy $\bar{t}_a$, co zapisano wzorem (2.24)

$$\left. \begin{aligned} E(T_{pi}) &= \text{const} = \bar{t}_p \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{p,i} \\ E(T_{ai}) &= \text{const} = \bar{t}_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{a,i} \end{aligned} \right\} . \quad (2.24)$$

Na podstawie wyznaczonych wartości $\bar{t}_p$ i $\bar{t}_a$ aproksymuje się:

- wskaźnik gotowości (nazywany często współczynnikiem niezawodności), czyli prawdopodobieństwo znajdowania się obiektu w stanie zdatności w przedziale $<0, \infty>$

$$\hat{p} \approx \frac{\bar{t}_p}{\bar{t}_p + \bar{t}_a} , \quad (2.25)$$

- współczynnik przestoju (nazywany często współczynnikiem zawodności), będący dopełnieniem do jedności współczynnika niezawodności

$$\hat{q} \approx \frac{\bar{t}_a}{\bar{t}_a + \bar{t}_p} , \quad (2.26)$$

- intensywności uszkodzeń i odnowy

$$\lambda = \frac{1}{\bar{t}_p} , \quad \mu = \frac{1}{\bar{t}_a} . \quad (2.27)$$

W przedstawionych równaniach prawe strony są jedynie estymatorami wartości t_p , t_a , $\hat{p}$, $\hat{q}$, λ , μ .

Po dokonaniu przekształceń algebraicznych można także przedstawić wzajemne zależności między opisanymi wielkościami, wyrażając współczynniki niezawodności i zawodności jako funkcje intensywności uszkodzeń i odnowy

$$\hat{p} = \frac{\mu}{\mu + \lambda} , \quad \hat{q} = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} . \quad (2.28)$$

Przedstawione modele i parametry niezawodnościowe przewodów odzwierciedlają rzeczywistość tylko w pewnym przybliżeniu. Nasuwa się bowiem pytanie, czy warunek braku pamięci i stacjonarności jest w pełni zachowany. Szczególnie wątpliwy jest warunek stacjonarności, gdyż prze-

wód po naprawie może teoretycznie zachowywać właściwości niezawodnościowe, jakie miał przed naprawą. Uwaga ta ma niekiedy odniesienie do remontów bieżących (odnowy niepełnej), które nie zmieniają zasadniczo cech przewodów. Ale i wówczas korzystanie z parametrów $\hat{p}$ i $\hat{q}$ jest w praktyce dopuszczalne, gdyż rozkłady $F(t_p)$ i $F(t_a)$ z dostateczną dokładnością są aproksymowane rozkładami wykładniczymi. Powoduje to, że historia obiektu nie ma znaczenia, a uszkodzalność i odnowa mają stałe intensywności, co pozwala na wykorzystanie procesu Markowa w niezawodnościowej analizie przewodów.

Jeżeli przewód poddany jest remontowi kapitalnemu lub modernizacji (odnowie pełnej), co w praktyce wystąpi zdecydowanie częściej (ze względu na wyjątkowo zły stan przewodów w kraju), to warunek braku pamięci i stacjonarności jest w pełni zachowany, gdyż następuje zmiana większości cech przewodu, które mają wpływ na jego niezawodność.

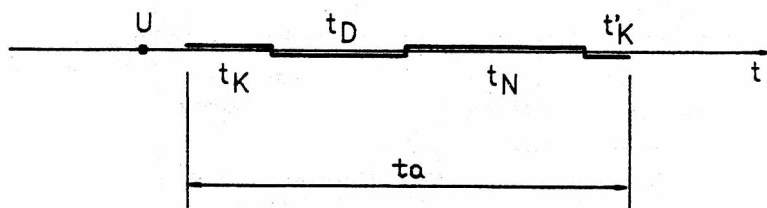
2.4.2. Składniki odnowy

Wprowadzone w poprzednim rozdziale pojęcie czasu odnowy t_a musi być precyzyjnie zdefiniowane, gdyż w tym zakresie występuje najwięcej błędów i nieporozumień, bowiem czas ten jest często mylony z czasem niezdatności systemu lub czasem naprawy.

Czas odnowy jest to czas mierzony od chwili wystąpienia (wykrycia) niezdatności przewodu, do jego ponownego uruchomienia i zawiera takie elementy jak:

- kontrolę (wykrycie uszkodzenia) t_K i diagnostykę (lokalizacja i określenie przyczyn uszkodzenia) t_D ,
- naprawę (nazywaną także remontem) t_N ,
- kontrolę po naprawie t'_K .

Umiejscowienie wymienionych składowych procesu odnowy na osi czasu ilustruje rys. 2.7.



Rys. 2.7. Składniki procesu odnowy: U - uszkodzenie, t_K - kontrola, t_D - diagnostyka, t_N - naprawa, t'_K - kontrola po naprawie

Fig. 2.7. Components of renovation process: U - damage, t_K - control, t_D - diagnosis, t_N - repair, t'_K - control after repair

Odnowa ma zasadniczy wpływ na niezawodność oraz koszty eksploatacji sieci. Implikuje to konieczność poszukiwań optymalnych technik odnowy, tzn. metod kontroli i diagnostyki oraz realizacji remontu.

Kontrola i diagnostyka

Podstawowym zadaniem kontroli jest wykrycie uszkodzenia, a diagnostyki - jego lokalizacja i określenie przyczyn. Badania kontrolne mogą być związane z sygnałem o uszkodzeniu sieci lub podejrzeniem, że uszkodzenie nastąpiło w wyniku zaobserwowanych wymuszeń zewnętrznych o nieprzewidywanej intensywności. Kontrola ma wtedy charakter losowy i implikuje diagnostykę oraz naprawę zdiagnozowanego fragmentu sieci. Kontrola może być prowadzona także okresowo na potrzeby programowej strategii eksploatacji systemu. Ten rodzaj kontroli omówiono w dalszej części pracy.

Według klasyfikacji, przyjętych w teorii niezawodności, kontrola przewodów kanalizacyjnych nie może być zakwalifikowana do sensu stricto kontroli programowej (gdyż nie jest prowadzona za pomocą testów), a tym bardziej do kontroli aparaturowej (gdyż przy obecnym wyposażeniu sieci nie jest realizowana za pomocą wmontowanej na stałe aparatury kontrolnej) [62]. W praktyce kontrola następuje po informacji o wystąpieniu uszkodzenia przewodu (a częściej uszkodzenia wtórnego, spowodowanego tym uszkodzeniem) lub o zaistnieniu nietypowego zespołu wymuszeń, który nasuwa podejrzenie, że przewód mógł zostać uszkodzony. Jeżeli w wyniku kontroli stanu przewodu zostanie stwierdzona jego niesprawność, to przystępuje się do diagnostyki.

Celem diagnostyki jest jak najszybsza lokalizacja uszkodzenia, która wymaga zastosowania odpowiedniej procedury diagnostycznej i sprzętu. Okazuje się, że w praktyce czas lokalizacji uszkodzenia sieci często znacznie przekracza czas naprawy. Lokalizacja może się odbywać ręcznie lub być zautomatyzowana i może przebiegać w sposób quasi-przypadkowy, logiczny lub logiczno-przypadkowy.

W quasi-przypadkowym sposobie lokalizacji uszkodzeń dokonuje się badań elementu wybranego w sposób przypadkowy pamiętając jedynie o tym, ażeby nie sprawdzać już poprzednio badanych elementów. Jest to sposób najprymitywniejszy, o najdłuższym czasie lokalizacji.

W logicznym sposobie lokalizacji uszkodzeń wybór kolejnych badań opiera się na przesłankach logicznych, których celem jest ograniczenie liczby badań (a więc czasu diagnostyki) przez uniknięcie badań zbędnych. Wymaga to bardziej wykwalifikowanego personelu, który opiera działania na przesłankach wynikających przede wszystkim z objawów uszkodzenia. Do podstawowych zasad logicznych należy stopniowe zmniejszanie obszaru

zawierającego uszkodzony element tak, żeby każde następne badanie opierało się na wynikach poprzednich badań. Pozwala to na identyfikację nie uszkodzonej części układu i wyłączenie jej z dalszych badań. W praktyce początkowo lokalizuje się uszkodzony odcinek sieci, a następnie jego część zawierającą uszkodzony element. Jest to metoda kolejnych przybliżeń, stanowiąca ogólną zasadę stosowaną w procedurach logicznych. Należy przy tym pamiętać, że przewody kanalizacyjne (w odróżnieniu od większości urządzeń technicznych) mogą wykonywać swoje czynności nawet w razie uszkodzenia kilku elementów (np. rozszczelnienia złączy), chociaż z teoretycznego punktu widzenia stan taki będzie uznawany za stan ich niesprawności. Powoduje to, że diagnostyka musi obejmować cały fragment sieci, uznany za potencjalnie uszkodzony i nie może być zakończona po identyfikacji pierwszego uszkodzenia.

Naprawa

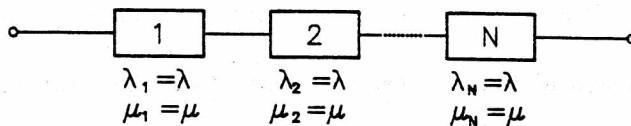
Naprawa jest podstawowym składnikiem procesu odnowy. Czas trwania naprawy t_N zależy od liczby ekip remontowych (występowanie kolejki elementów oczekujących na naprawę lub niewystępowanie), dostępności materiałów i sprzętu, sprawności serwisu oraz przyjętych technik. Powiązanie niezawodnościowych stanów przewodów z możliwościami ich naprawy w odniesieniu do liczby ekip naprawczych uwzględniono w budowie grafu stanów, a nowoczesne techniki napraw scharakteryzowano w rozdziale *Techniki odnowy*.

2.5. Ocena niezawodności

2.5.1. Identyfikacja i cechy systemu

Systemem nazywamy zgrupowania elementów, które mogą być proste i złożone, naprawialne lub nienaprawialne, a ich struktury szeregowe, równoległe albo mieszane. W rozważanym przypadku jako element podstawowy przyjęto traktować odcinek przewodu między studzienkami, który sam w sobie tworzy system elementów wynikających z warunków budowlanych (np. długości prefabrykatu rury). Zarówno tak zidentyfikowane systemy podstawowe, jak i tworzące je elementy są naprawialne i współpracują w strukturze szeregowej. Przedstawione poniżej założenia modelu teoretycznego opracowano z uwzględnieniem obu wymienionych cech.

Systemy naprawialne o strukturze szeregowej są zbudowane z N obiektów, co schematycznie przedstawiono na rys. 2.8. Dla uproszczenia przyjęto, że wszystkie obiekty mają taką samą intensywność uszkodzeń λ i napraw μ .



Rys. 2.8. Naprawialny system o strukturze szeregowej

Fig. 2.8. Reparable system of a series structure

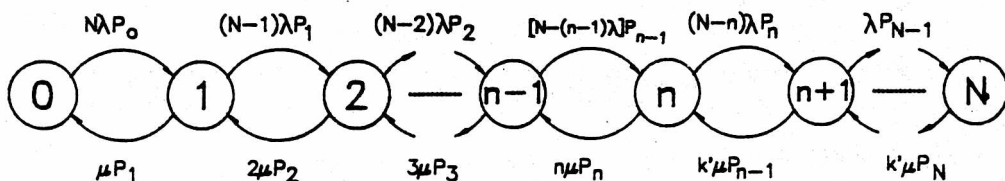
System może się znajdować w jednym ze stanów, których numer odpowiada liczbie uszkodzonych elementów (naprawianych w danej chwili lub oczekujących na naprawę):

- 0 - wszystkie sprawne elementy systemu,
- 1 - jeden element uszkodzony i równocześnie w systemie dokonuje się jednej naprawy,
- 2 - dwa elementy uszkodzone i równocześnie w systemie wykonuje się dwie naprawy lub tylko jedną naprawę (drugi element czeka na naprawę - obecność kolejek),

...

N - N obiektów systemu jest uszkodzonych i w systemie wykonuje się, w zależności od liczby ekip remontowych, odpowiednią liczbę napraw.

Powiązanie stanów systemu z możliwościami jego naprawy ma istotne znaczenie w praktyce, gdyż liczba ekip remontowych jest jednym z podstawowych składników decydujących o niezawodności przewodów. Graf stanów sieci obsługiwanej przez k' ekip pokazano na rys. 2.9.



Rys. 2.9. Graf systemu naprawialnego o strukturze szeregowej obsługiwanego przez $1 \leq k' \leq N$ ekip remontowych, [101]

Fig. 2.9. Graph of reparable system of a series structure serviced by $1 \leq k' \leq N$ crew of workmen [101]

Jeżeli liczba uszkodzonych elementów systemu w danej chwili wynosi $n(t)$ (system jest w stanie S_n), przy czym $n(t) \leq k'$, to intensywność przejścia do stanu poprzedniego ($S_n \rightarrow S_{n-1}$) równa się iloczynowi $n\mu$.

Jeżeli liczba ekip remontowych k' jest mniejsza od liczby uszkodzeń ($k' < n(t)$), to intensywność powrotu ($S_{n+1} \rightarrow S_n$) będzie równa $k'\mu$, przy czym różnica $n_1(t) = n(t) - k'$ jest liczbą elementów czekających na remont.

Opierając się na grafie stanów, można wyznaczyć macierz przejść P

$$P = \begin{bmatrix} 1 - N\lambda & N\lambda & 0 & & 0 & 0 \\ \mu & 1 - [(N-1)\lambda + \mu] & (N-1)\lambda & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu & 1 - [(N-2)\lambda + 2\mu] & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 - [(N-n)\lambda + n\mu] \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 - (\lambda + k'\mu) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Na podstawie przedstawionej macierzy przejść układu się równania prawdopodobieństw stanów systemu. Prawdopodobieństwo, że system w chwili $t + dt$ będzie się znajdował w stanie n -tym zależy od liczby ekip remontowych k' oraz liczby niesprawnych elementów n i wyraża się dla:

$n < k'$:

$$P_n(t + dt) = P_{n-1}(t) [(N - n + 1) \lambda dt] + P_n(t) \cdot [1 - ((N - n) \lambda + \mu n) dt] + P_{n+1}(t) [(n + 1) \mu dt],$$

$n = k'$:

$$P_n(t + dt) = P_{n-1}(t) [(N - n + 1) \lambda dt] + P_n(t) \cdot [1 - ((N - n) \lambda + n \mu) dt] + P_{n+1}(t) [n \mu dt], \quad (2.30)$$

$n > k'$:

$$P_n(t + dt) = P_{n-1}(t) [(N - n + 1) \lambda dt] + P_n(t) \cdot [1 - ((N - n) \lambda + k' \mu) dt] + P_{n+1}(t) [k' \mu dt].$$

Korzystając z otrzymanych formuł można wyznaczyć układ równań różniczkowych, opisujących zachowanie się systemu. Wobec założonych poprzednio warunków stacjonarności procesów oraz warunku dodatkowego $P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1$ otrzymuje się wyrażenia dla:

$n < k'$:

$$0 = (N - n + 1) \lambda P_{n-1} - [(N - n) \lambda + n \mu] P_n + (n + 1) \mu P_{n+1},$$

$$n = k' :$$

$$0 = (N - n + 1) \lambda P_{n-1} - [(N - n) \lambda + n \mu] P_n + n \mu P_{n+1}, \quad (2.31)$$

$$n > k' :$$

$$0 = (N - n + 1) \lambda P_{n-1} - [(N - n) \lambda + k' \mu] P_n + k' \mu P_{n+1}.$$

Rozwiązując układ równań wyznacza się prawdopodobieństwa poszczególnych stanów systemu określone wzorami dla:

$n < k' :$

$$P_n = \frac{N!}{(N - n)! n!} \rho^n P_0,$$

$n \geq k' :$

$$P_n = \frac{N!}{(N - n)! k'!} \rho^{k'} \left(\frac{\rho}{k'} \right)^{n-k'} P_0, \quad (2.32)$$

oraz

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{k'-1} \frac{N!}{(N - n)! n!} \rho^n + \sum_{n=k'}^N \frac{N!}{(N - n)! k'!} \rho^{k'} \left(\frac{\rho}{k'} \right)^{n-k'} \right]^{-1}, \quad (2.33)$$

gdzie $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$.

Ze struktury systemu szeregowego wynika jego podstawowa cecha, tzn. że zdadność systemu wymaga zdadności wszystkich jego elementów, czyli funkcja gotowości systemu odpowiada prawdopodobieństwu stanu 0

$$A(t) = P_0(t), \quad (2.34)$$

a przy założonych warunkach stacjonarnych

$$A = P_0. \quad (2.35)$$

W praktyce istotną informację dla użytkownika stanowią także:

- wartość oczekiwana liczby obiektów uszkodzonych i naprawianych w chwili t

$$E(n) = \sum_{i=0}^N n_i P_i, \quad (2.36)$$

gdzie P_i - prawdopodobieństwo i -tego stanu określone wzorem (2.32),

- odchylenie standardowe liczby równocześnie naprawianych obiektów

$$\sigma^2(n) = \sum_{i=0}^N n_i^2 P_i - E^2(n). \quad (2.37)$$

Funkcja niezawodności systemu o strukturze szeregowej jest równa

$$R_S(t) = e^{-N \lambda t}, \quad (2.38)$$

a średni czas pracy odpowiadający przebywaniu systemu w stanie 0

$$\bar{\tau}_p = \frac{1}{N\lambda}. \quad (2.39)$$

Przedstawione zależności wykazują, że podstawowym warunkiem prowadzenia niezawodnościowych analiz przewodów jest znajomość dwóch opisujących je parametrów, a mianowicie - intensywności uszkodzeń λ oraz intensywności napraw μ . Estymacji tych parametrów został poświęcony następny rozdział pracy.

2.5.2. Zasady estymacji parametrów niezawodnościowych

Podstawowym zadaniem wnioskowania statystycznego o elementach sieci jest oszacowanie statystycznych charakterystyk tych elementów na podstawie badań n -elementowej próbki. Wnioskowanie oparte na takich badaniach jest nazywane estymacją, a badany zbiór elementów populacją generalną. Estymacją nieparametryczną (testem zgodności) jest dobór rozkładu teoretycznego, stanowiącego probabilistyczny model populacji generalnej, estymacją parametryczną zaś jest oszacowanie parametrów tego rozkładu. Estymacja nieparametryczna polega na weryfikacji hipotezy zgodności rozkładu, otrzymanego z badania populacji generalnej (rozkładu empirycznego), z założonym rozkładem teoretycznym. Estymacja parametryczna polega na wyznaczaniu parametrów rozkładu teoretycznego populacji generalnej na podstawie wyników badań empirycznych, co wiąże się z koniecznością uzyskania odpowiednich estymatorów tych parametrów.

Estymatorem parametru θ nazywamy statystykę U_n , której rozkład jest funkcją tego parametru. Oszacowaniem nieznanego parametru θ jest więc wartość u_n statystyki U_n . Estymator parametru może być określony w lepszy lub gorszy sposób, w związku z czym wprowadzono jakościowe cechy estymatorów, a mianowicie ich zgodność, nieobciążalność i efektywność. Oczywiście jest, że w miarę możliwości powinno się korzystać wyłącznie z estymatorów zgodnych, nieobciążonych i efektywnych. Ponieważ jest to często bardzo trudne lub wręcz niemożliwe, opracowano metody wyznaczania estymatorów. W praktyce statystycznej najczęściej korzysta się z estymatorów wyznaczonych metodą największej wiarygodności Fishera, która może znaleźć także zastosowanie w badaniach niezawodności przewodów kanalicyjnych.

Badania statystyczne parametrów niezawodnościowych są trudne i wymagają od badającego nie tylko wiedzy ze statystyki matematycznej, ale także wiedzy inżynierskiej. Trudności i problemy związane z prowadzeniem tych badań dotyczą:

- doboru odpowiednio licznej próbki,
- ograniczonego czasu badań,

- uzyskania jednorodności próbek,
- badania jednorodności warunków użytkowania elementów próbki,
- zmienności w czasie (np. sezonowa) wymuszeń zewnętrznych.

Liczność próbki jest jednym z podstawowych parametrów determinujących dokładność oszacowania. Przedziały ufności oszacowania poszukiwanych parametrów niezawodnościowych λ i $\bar{t}_a$ są dla większości estymatorów odwrotnie proporcjonalne do liczby elementów w próbce (n'), a więc im liczniejsza będzie próbka, tym większą uzyska się dokładność oszacowania. W badaniach niezawodności przewodów kanalizacyjnych można dysponować odpowiednio licznymi próbkami w ciągu kilku lat obserwacji pod warunkiem prowadzenia starannej i rzetelnej dokumentacji uszkodzeń.

Czasem badań statystycznych nazywa się czasem, w którym zbiera się informacje o uszkodzeniach populacji badanej próbki. Badanie próbki jednorodnej wiekowo (wszystkie elementy populacji zostały uruchomione w tej samej chwili), mające na celu wyznaczenie empirycznego rozkładu trwałości $F(t)$ lub funkcji intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ mogłoby wynosić kilkanaście lat [38]. Skrócenie czasu badań jest możliwe w wyniku prowadzenia ich na próbce przewodów o różnym wieku eksploatacji, co po kilkuletnim okresie umożliwia otrzymanie uśrednionego rozkładu trwałości.

Niedogodnością w badaniu próbki niejednorodnej pod względem wiekowym jest konieczność przyjęcia założenia, że bada się elementy jednako- we, bez względu na czas ich budowy, oraz że nie uwzględnia się warunków eksploatacji tych elementów w latach poprzednich, mających przecież wpływ na poziom niezawodności. Ponieważ jednak niemożliwe jest zastosowanie innego podejścia do badań, przyjmuje się odpowiednie metody analizy próbki niejednorodnej wiekowo tak, aby problem tej niejednorodności mógł zostać ominięty. Metody takie przedstawiono w dalszej części rozdziału.

Drugim typem niejednorodności próbki jest niejednorodność wynikająca z właściwości fizycznych obiektów w próbce. Problem ten wiąże się przede wszystkim z rozwiązaniami technologiczno-materiałowymi konstrukcji elementów sieciowych. Porównywanie wyników badań elementów o różnych właściwościach fizycznych prowadzi do zupełnie bezwartościowych wniosków. Należy przy tym podkreślić, że - jak wykazały badania innych obiektów (np. energetycznych [86]) - uwzględnienie jednorodności w tym przypadku wymaga znacznego nakładu pracy.

Jednorodność warunków użytkowania wynika z konfiguracji sieci kanalizacyjnej, poziomu i sprawności obsługi, warunków klimatycznych, obciążeń ściekami sanitarnymi i ich rodzaju (agresywności chemicznej). Różnorodność warunków użytkowania powoduje, że dla takich samych obiektów można uzyskać odmienne wyniki badań. Dlatego też przy podawanych wynikach należy koniecznie zamieścić informację o warunkach, w jakich

elementy próbki były użytkowane. Na tej podstawie dokonuje się segregacji wyników.

Następnym problemem jest zmienność w czasie czynników wymuszających. Zmienność ta może mieć charakter zmian sezonowych i wtedy jest związana z klimatem (w związku z czym może mieć cykliczny przebieg), może także wynikać ze zmian środowiska, w jakim sieć pracuje (przebiega wtedy w sposób losowy).

W pierwszym przypadku szczególnie istotny wpływ mają takie elementy, jak burze, roztopy i związane z nimi zmiany poziomu wód gruntowych, a także okresy bezdeszczowe, w których następuje sedymentacja ścieków sanitarnych na dnie kanałów (szczególnie zbieraczy o małych spadkach). Czynniki te wykazują wyraźną sezonowość, aczkolwiek mogą występować lata wyjątkowo burzowe, śnieżne lub o intensywnych opadach. Zmienność tych elementów można z lepszym lub gorszym skutkiem przewidywać, w związku z czym powinna ona być brana pod uwagę przede wszystkim podczas planowania strategii odnowy sieci (przeglądów kontrolnych, bieżących napraw, a także remontów kapitalnych i modernizacyjnych). Wieloletnia zmienność zagrożeń jest formą odchylenia od wartości średniej, odpowiadającej przeciętnemu rokowi eksploatacji. Badając parametry niezawodnościowe przewodów, należy więc rozpatrywać wartości uśrednione z kilku kolejnych lat, aby otrzymać wartość odpowiadającą średnim warunkom pogodowym na przestrzeni roku.

Pełne rozpoznanie właściwości niezawodnościowych sieci wymagałoby znajomości rozkładu trwałości $F(t)$ lub funkcji niezawodności $R(t)$, albo znajomości funkcji trwałości i rozkładu odnowy oraz danych procesu stochastycznego opisującego pracę sieci. W przypadku ostatniego należy badać takie właściwości procesu, jak: stacjonarność, stałość intensywności uszkodzeń i odnowy itp. W praktyce uzyskanie pełnej informacji o niezawodności sieci jest niezmiernie trudne i pracochłonne. Dlatego w początkowej fazie możliwe będzie tylko prowadzenie obliczeń i analiz przybliżonych, dla których uzyska się wystarczającą dokładność operując średnimi wartościami intensywności uszkodzeń λ_{sr} oraz średnimi wartościami czasów napraw (odnowy) $\bar{t}_a$.

Posługiwanie się uproszczonymi informacjami o niezawodności sieci sprowadza się do przyjęcia omówionych już założeń (rozdz. 2.4.1):

- rozkład trwałości elementów sieci jest rozkładem wykładniczym o stałej intensywności uszkodzeń,
- proces praca-odnowa jest procesem stacjonarnym, tzn. że zmienne losowe $t_{p1}, t_{a1}, t_{p2}, t_{a2}, \dots$ są zmiennymi niezależnymi i spełniają warunki [87]

$$F(t_{p1}) = F(t_{p2}) = \dots F(t_{pn}) = F(t_p), \quad (2.40)$$

$$F(t_{a1}) = F(t_{a2}) = \dots F(t_{an}) = F(t_a).$$

W praktycznych badaniach eksploatacyjnych można oszacować średnie intensywności uszkodzeń elementów sieci o różnych czasach eksploatacji

$$\lambda_{sr} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \lambda(t) dt, \quad (2.41)$$

gdzie T_s - analizowany (skończony) przedział czasu.

Równanie może nie być prawdziwe, jeżeli w badanym zbiorze elementów przeważają obiekty o krótkim czasie użytkowania, co jest związane z przyrostem obiektów w próbce i odnową obiektów uszkodzonych. Wartość przybliżoną λ'_{sr} wyznacza się wtedy z zależności

$$\lambda'_{sr} = \frac{m}{0,5(n_p + n'_k) \Delta t}, \quad (2.42)$$

gdzie: n_p - liczebność próbki na początku okresu obserwacji,

n'_k - liczebność próbki na końcu okresu obserwacji,

m - liczba elementów uszkodzonych w czasie obserwacji,

Δt - czas obserwacji.

Wyznaczone w ten sposób wartości mogą wykazywać zbyt duże odchylenia w stosunku do rzeczywistej wartości λ_{sr} . Bezpieczniejsze jest zatem zastosowanie metody, zezwalającej na dokładne oszacowanie funkcji intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ i średniej intensywności uszkodzeń λ_{sr} mimo dynamicznych właściwości próbki i występowania odnowy. W celu rozwiązania tak postawionego problemu wprowadza się dodatkowe oznaczenia:

n_1 - liczba obiektów oddanych do eksploatacji w roku obserwacji,

n_2 - liczba obiektów wprowadzonych do eksploatacji w roku poprzedzającym rok obserwacji,

n_k - liczba obiektów wprowadzonych do eksploatacji w $k-1$ roku, poprzedzającym rok obserwacji.

Po przyjęciu tych oznaczeń rozważa się dwa typy odnowy. Pierwszy odpowiada wymianie uszkodzonych elementów sieci na nowe. Prawdziwa jest wtedy równość

$$n_1 = n_k - n_p + m, \quad (2.43)$$

a $n_2, n_3, \dots, n_k$ spełniają relację:

$$n_p = n_2 + n_3 + \dots + n_k. \quad (2.44)$$

Oznacza to, że liczebność próbki frakcjonuje się ze względu na rok wybudowania jej elementów. Podobnie frakcjonuje się elementy uszkodzone w przedziale $\Delta t = 1$

$$m = m_1 + m_2 + \dots + m_k, \quad (2.45)$$

gdzie: m_1 - liczebność elementów uszkodzonych w pierwszym roku eksploatacji,

m_2 - liczebność elementów uszkodzonych w drugim roku eksploatacji,

m_k - liczebność elementów uszkodzonych w k -tym roku eksploatacji.

Estymator średniej intensywności uszkodzeń dla dowolnego i -tego roku eksploatacji sieci przyjmuje wtedy postać

$$\hat{\lambda}_i = \frac{m_i}{0,5(n_i + n_{i+1} - m_i)}. \quad (2.46)$$

W drugim typie odnowy, polegającej na naprawie elementów przewodów w czasie pomijalnie krótkim, przedstawiony estymator ulega modyfikacji i równa się

$$\hat{\lambda}_i = \frac{m_i}{0,5(n_i + n_{i+1})}, \quad (2.47)$$

przy czym $n_1 = n_k - n_p$ i zachowana jest słuszność formuły (2.44) określającej wartość n_p .

Znając funkcję intensywności uszkodzeń w postaci wartości dyskretnych λ_i można z łatwością wyznaczyć poprawną wartość średniej intensywności uszkodzeń

$$\lambda_{sr} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \lambda_i. \quad (2.48)$$

Do weryfikacji hipotez o postaciach rozkładów funkcjonalnych konieczna jest znajomość funkcji gęstości rozkładu f_i (częstości uszkodzeń) oraz dystrybuanty F_i . Oszacowanie wartości dyskretnych tych wielkości jest możliwe dzięki wykorzystaniu wartości λ_i z poszczególnych lat eksploatacji sieci, i tak

$$f_i = \lambda_i \prod_{k=1}^{k=i-1} (1 - \lambda_k) \quad (2.49)$$

przy zachowaniu warunku normalizacyjnego $\sum_{i=1}^{\infty} f_i = 1,0$.

Znając f_i bardzo prosto (definicja) wyznacza się

$$F_i = \sum_{k=1}^{k=i} f_k. \quad (2.50)$$

Należy pamiętać, że wyznaczone wartości dotyczą prawego brzegu przedziału Δt_i .

Następnym zagadnieniem jest oszacowanie średniej wartości czasu odnowy $\bar{t}_a$. Parametr ten nie zależy od rozkładu czasu odnowy, w związku z czym jego wyznaczenie jest stosunkowo proste. Estymatorem tej wielkości jest wyrażenie

$$\hat{t}_a = \frac{1}{n'} \sum_{i=1}^{i=n} t_{ai} \quad (2.51)$$

gdzie: t_{ai} - czas trwania i -tej odnowy,
 n' - liczebność próbek.

Niezależnie od funkcyjnej postaci rozkładu odnowy, przedział ufności wielkości estymowanej $\bar{t}_a$ można wyznaczyć ze wzoru [87]

$$P \left\{ \hat{t}_a - u_\alpha \frac{\hat{S}}{\sqrt{n}} < \bar{t}_a < \hat{t}_a + u_\alpha \frac{\hat{S}}{\sqrt{n}} \right\} = 1 - \alpha = \beta, \quad (2.52)$$

gdzie $\hat{S}$ jest odchyleniem standardowym z próby

$$\hat{S} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (t_{ai} - \hat{t}_a)^2}, \quad (2.53)$$

a u_α - wartością zmiennej losowej o rozkładzie normalnym $N(0, 1)$, spełniającej relację

$$P \left\{ |U| \geq u_\alpha \right\} = \alpha, \quad (2.54)$$

gdzie U oznacza obszar krytyczny (zbiór wszystkich wartości zmiennej losowej, dla których jest spełniony warunek (2.54)).

Określenie rozkładu trwałości lub średniego czasu uszkodzeń przewodów na podstawie badań statystycznych funkcji intensywności uszkodzeń nie rozwiązuje problemu, jeżeli analiza obejmuje zgodność typu rozkładu empirycznego z założonym rozkładem hipotetycznym. Problem ten często występuje w badaniach rozkładu czasu odnowy, który z reguły wykazuje zgodność z prostymi rozkładami, np. wykładniczym czy normalnym. Jest to problem estymacji nieparametrycznej, wymagający zastosowania testów zgodności. Najprostszymi, lecz najmniej dokładnymi testami są odpowiednie siatki funkcyjne. Jeżeli korzystanie z siatek funkcyjnych zostanie uznane za niewystarczające, należy zastosować ścisłe testy zgodności χ^2 Pearsona i Kołmogorowa, pozwalające na precyzyjne przyjęcie lub odrzucenie założonej hipotezy H_0 o postaci funkcyjnej rozkładu populacji generalnej. Zasady stosowania testów i siatek są omówione w literaturze dotyczącej statystyki matematycznej, wobec czego nie będą tu przedstawiane [18], [19], [20].

Zaprezentowane metody pozwalają na oszacowanie podstawowych parametrów niezawodnościowych sieci na podstawie badań statystycznych. Nie obejmują jednak wszystkich problemów, jakie występują w badaniach niezawodnościowych prowadzonych według zasad statystyki matematycznej. Do ważniejszych i nie rozwiązanych tu zagadnień należy weryfikacja hipotez o losowości odchyień. Zagadnienie to nabiera znaczenia po kilkuletnim lub kilkunastoletnim okresie badań intensywności uszkodzeń lub średnich czasów odnowy, kiedy badający - po wyeliminowaniu losowości - chce ustalić trendy zmian. Problem ten wystąpi także w badaniach wpływu sezonowości na zmiany niezawodnościowych parametrów przewodów. W ścisłych analizach zakłada się, że w kolejnych latach okresu eksploatacji przewodów $i = 1, 2, \dots, k$ zaobserwowano średnie intensywności uszkodzeń $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$, których (zgodnie z hipotezą zerową H_0) odchylenia względem wartości oczekiwanej λ_{sr} mają charakter losowy, tzn.

$$E(\lambda_1) = E(\lambda_2) = \dots = E(\lambda_n) = \lambda_{sr} \quad (2.55)$$

przy czym λ_{sr} jest oszacowane za pomocą estymatora

$$\hat{\lambda}_{sr} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{i=k} \lambda_i \quad (2.56)$$

otrzymanego metodą największej wiarygodności. Następnie tworzy się chronologiczny ciąg różnic

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_1 &= \hat{\lambda}_{sr} - \lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 &= \hat{\lambda}_{sr} - \lambda_2 \\ &\vdots \\ \Delta\lambda_k &= \hat{\lambda}_{sr} - \lambda_k, \end{aligned} \quad (2.57)$$

które zgodnie z hipotezą H_0 powinny mieć charakter losowy o nieznanym rozkładzie (zazwyczaj normalnym). Weryfikacji tej hipotezy dokonuje się nieparametrycznym testem zgodności, testem serii.

Następnym etapem analizy jest sprawdzenie hipotezy H_1 , zgodnie z którą rozrzut wartości λ_i względem prostej regresji $a + b$ ma charakter losowy. Weryfikację H_1 przeprowadza się także testem serii. Jeżeli test ten na założonym poziomie istotności α nie daje podstaw do odrzucenia hipotezy H_1 , to analiza jest zakończona. W przeciwnym razie należy szukać możliwości wykorzystania regresji nieliniowych, co jest zadaniem o wiele bardziej złożonym. Procedury te są omówione w literaturze, dotyczącej metod stosowanych w statystyce matematycznej [13], [19], [20], [22].

3. MIARY I ZASADY OCENY WARTOŚCI

3.1. Koszty niezawodności w rachunku ekonomicznym

Znaczenie rachunku gospodarczego w planowaniu rozbudowy i utrzymaniu takich systemów, jak sieci przewodów kanalizacyjnych w miastach, jest ogromne z uwagi na bardzo duże zaangażowanie środków inwestycyjnych, długotrwałość budowy oraz długi okres eksploatacji. Wszystkie te czynniki powodują, że błędne decyzje są przyczyną powstania ogromnych strat. Rachunek gospodarczy może być, podobnie jak w innych tego typu systemach (np. energetycznych [40], [65], [87]) oparty na kosztach rocznych z uwzględnieniem rachunku dyskonta [56]

$$K_r = K_{rr} + K_e = K_{n0} r + K_e, \quad (3.1)$$

gdzie: K_{rr} - roczne koszty rozszerzonej reprodukcji, na które składają się koszty amortyzacji K_{am} i akumulacji K_{ak} ,

K_e - roczne koszty eksploatacji,

K_{n0} - nakłady inwestycyjne sprowadzone do roku zerowego,

r - współczynnik reprodukcji rozszerzonej.

Wartość współczynnika reprodukcji rozszerzonej wynika z przyjętej amortyzacji progresywnej i wyraża się formułą

$$r = p + a_r = p + \frac{p}{(1+p)^T - 1} = \frac{p(1+p)^T}{(1+p)^T - 1}, \quad (3.2)$$

gdzie: p - stopa akumulacji,

T - czas amortyzacji w latach,

a_r - współczynnik amortyzacji progresywnej.

Nakłady inwestycyjne sprowadzone do roku zerowego oblicza się ze wzoru

$$K_{n0} = \sum_{i=-n}^{i=T} K_{ni} (1+p)^{-i}, \quad (3.3)$$

gdzie K_{ni} - nakłady inwestycyjne w $-n, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, T$ latach budowy i eksploatacji obiektu.

Jeżeli koszty w poszczególnych latach są niejednakowe, np. z powodu zmienności kosztów eksploatacji, można je uśrednić stosując zależność

$$K_{sr} = a_r \sum_{i=1}^{i=T} K_i (1+p)^{T-i}. \quad (3.4)$$

Metodę kosztów rocznych stosuje się w celu identyfikacji rozwiązań, zapewniających maksymalny efekt produkcyjny [55]. W badaniach systemów kanalizacyjnych istnieją jednak pewne elementy decyzji, pozornie nie

związane ze sferą produkcyjną, które dotyczą odprowadzania ścieków. Do zagadnień tych będziemy zaliczać decyzje, związane z podnoszeniem walorów technicznych przewodów i sprawności ich obsługi w celu zwiększenia niezawodności działania sieci. Takie podejście do problemu implikuje potrzebę powiększenia rocznych kosztów K_r o koszty zawadności systemu (których uwzględnienie stwarza możliwość wymiernej oceny podjętych działań)

$$K_{rz} = K_r + K_z = K_{n0} \cdot r + K_e + K_z . \quad (3.5)$$

Koszty zawadności, wprowadzone do rachunku kosztów, mają charakter odtworzenia gospodarczego skutków zawodnego funkcjonowania sieci i równają się

$$K_z = K_s + K_{rem} , \quad (3.6)$$

gdzie: K_s - roczne koszty strat u jednostek obsługiwanych przez sieć, wynikających z zawadności przewodów,

K_{rem} - roczne koszty napraw poawaryjnych, powiększone o straty u użytkownika sieci z tytułu niepobranych opłat za odbiór ścieków, spowodowany zawadnością przewodów.

Poszukiwanie optymalnego systemu sieci z uwzględnieniem niezawodności przewodów sprowadza się więc do minimalizacji wyrażenia określającego koszty K_{rz} , co jest równoznaczne z projektowaniem rozwiązań mniej zawodnych w przypadku nowych inwestycji lub optymalizacji eksploatacji sieci użytkowanych.

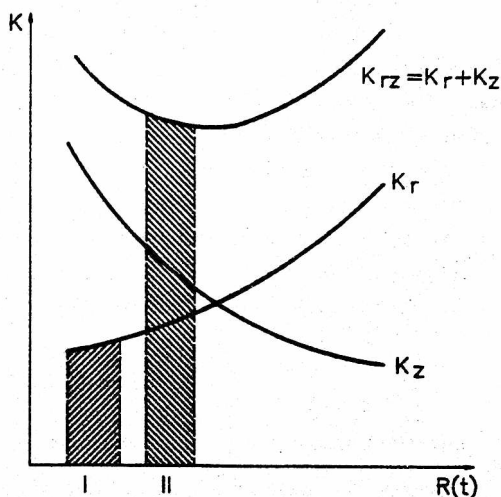
Zmiana kosztów zawadności K_z dzięki zastosowaniu lepszych materiałów lub rozwiązań technicznych implikuje zmianę wartości wszystkich składników wzoru (3.5). Mniej zawodne rozwiązania są przy tym z reguły droższe inwestycyjnie K_{n0} , mogą natomiast charakteryzować się niższymi kosztami eksploatacji K_e i na pewno mniejszymi kosztami zawadności K_z . Stąd też optymalizacja nie polega nigdy na dążeniu do rozwiązań o ekstremalnie dużej niezawodności, gdyż rozwiązania takie ze względu na wzrost kosztów inwestycyjnych okazują się ekonomicznie nieuzasadnione. Poszukiwanie minimum polega więc na porównywaniu sumy kosztów, co schematycznie przedstawiono na rys. 3.1.

W praktyce zazwyczaj (i tak jest w przypadku sieci kanalizacyjnych) mamy do czynienia z dyskretnym modelem kosztów, co umożliwia sformułowanie kryterium różnicowego dla porównywania alternatywnych wariantów:

- I - tańszego, o większej zawadności,
- II - droższego, o mniejszej zawadności.

Rys. 3.1. Schemat graficzny poszukiwania optymalnej ekonomicznie niezawodności układu: I - optymalne rozwiązanie bez oceny niezawodności, II - strefa optymalnej niezawodności

Fig. 3.1. Graphical scheme of searching for the cost-effective system reliability: I - optimum solution without reliability evaluation, II - area of optimum reliability



Droższe rozwiązanie będzie opłacalne wtedy, gdy zostanie spełniony warunek

$$K_{z1} - K_{z2} \geq K_{rz2} - K_{rz1}. \quad (3.7)$$

Nierówność ta odpowiada założeniu, że wariant droższy (II) jest korzystny, jeżeli zmniejszenie kosztów zawodności pokrywa zwiększone koszty roczne. Traktując wielkość $K_{z1} - K_{z2}$ jako zysk wynikający z poprawy niezawodności implikowany dodatkowymi kosztami rocznymi $K_{r2} - K_{r1}$, możemy określić wskaźnik efektywności ϵ , ilustrujący efektywność gospodarczą środków przeznaczonych na zmniejszenie zawodności w analizowanych wariantach

$$\epsilon = \frac{(K_{z1} - K_{z2}) - (K_{rz2} - K_{rz1})}{K_{z1} - K_{z2}} \geq 0. \quad (3.8)$$

Ze wskaźnika efektywności korzysta się przede wszystkim podczas prowadzenia analizy efektywności przejść między wariantami o coraz wyższej niezawodności, polegającej na określaniu "dochodowości" środków ponoszonych na zwiększenie niezawodności, przy przejściu od wariantu I do wariantu II

$$\epsilon_{I,II} = \frac{(K_{zI} - K_{zII}) - (K_{r2II} - K_{r2I})}{K_{zI} - K_{zII}}. \quad (3.9)$$

Istotnym problemem w przedstawionym modelu rachunku gospodarczego jest porównywanie wielkości zdeterminowanych (koszty roczne) z wielkościami

ciami spodziewanymi (koszty zawodności). Zgodnie z teorią podejmowania decyzji postępowanie takie jest słuszne, jeżeli koszty zawodności zostaną wyznaczone na podstawie znanych rozkładów zmiennych losowych, lub odpowiednio bogatego i budzącego zaufanie materiału statystycznego. Niestety oba założenia nie są aktualne w przypadku systemów kanalizacyjnych, w związku z czym musi tu być (do czasu uzyskania wyników odpowiednich badań) zastosowany model strategicznego podejmowania decyzji [86]. W modelu tym kosztom zawodności przypisuje się wagę $1 - \alpha' < 1$, gdzie α' jest miarą nieufności do otrzymanych (w wyniku przybliżonego wyznaczania) wartości K_z . Dla tak przyjętej wagi koszty roczne wyraża równość

$$K_{rz} = K_{n0} r + K_e + (1 - \alpha') K_z, \quad (3.10)$$

a kryterium różnicowe przybiera postać

$$(1 - \alpha') (K_{z1} - K_{z2}) \approx K_{rz2} - K_{rz1} \quad (3.11)$$

oraz po wykonaniu przekształceń algebraicznych

$$\varepsilon_{I, II} = \frac{(K_{zI} - K_{zII}) (K_{rzII} - K_{rzI})}{K_{zI} - K_{zII}} \approx \alpha'. \quad (3.12)$$

W miarę rozszerzania badań empirycznych dotyczących niezawodnościowych parametrów sieci, współczynnik $\alpha' \rightarrow 0$, co oznacza zwiększanie poziomu zaufania do wyznaczonej wartości K_z .

Analiza kosztów sieci nie może przebiegać w oderwaniu od czynnika czasu. Zmiany kosztów zawodności wynikają tu, jak pokazano na rys. 2.4, ze zmian intensywności uszkodzeń. Z reguły intensywność ta jest największa w okresie "docierania się" przewodów, gdy ujawniają się niedoskonałości materiałowe i błędy wykonawstwa. Jest to wtedy intensywność malejąca, która swe minimum osiąga w przedziale normalnej pracy przewodów, tzn. po usunięciu wszystkich usterek. W kraju znaczna część przewodów znajduje się w trzecim przedziale czasowym, kiedy to intensywność uszkodzeń jest funkcją rosnącą i wynika z procesów zmęczenia i starzeniowych oraz korozji. Wzrostowi intensywności uszkodzeń sprzyja ponadto wzrost intensywności wymuszeń zewnętrznych, działających na przewody, oraz wzrost obciążeń hydraulicznych. Nie oznacza to jednak, że w wyniku odnowy przewody nie znajdą się w przedziale normalnej pracy, do którego przede wszystkim powinny się odnosić prowadzone analizy. Wpływ czynnika czasu jest widoczny również w cenach rynkowych materiałów, sprzętu i robocizny, chociaż ten element jest najłatwiejszy do wyznaczenia dzięki zastosowaniu porównywalnych cen.

Zmienność kosztów w czasie oblicza się w wyniku wprowadzenia do przedstawionych uprzednio zależności średnich wartości dyskontowanych, z uwzględnieniem których $K_{rz, \text{sr}}$ wyraża się formułą

$$K_{rz, \text{sr}} = K_{n0} r + a_r \sum_{i=1}^{i=T} [K_{ei} + (1 - \alpha') K_{zi}] (1 + p)^{T-i}. \quad (3.13)$$

Podobnie można przedstawić kryterium różnicowe

$$a_r \sum_{i=1}^{i=T} [(1 - \alpha') (K_{z1i} - K_{z2i}) - (K_{e2i} - K_{e1i})] (1 + p)^{T-i} \geq (K_{n01} - K_{n02}) r \quad (3.14)$$

oraz wskaźnik efektywności

$$c_{I, II} = \frac{a_r \sum_{i=1}^{i=T} [(1 - \alpha') (K_{zIIi} - K_{zIIIi}) - (K_{eIIIi} - K_{eIIi})] (1 + p)^{T-i} - (K_{n0II} - K_{n0I}) r}{a_r \sum_{i=1}^{i=T} (K_{zIIi} - K_{zIIIi}) (1 + p)^{T-i}} \geq \alpha'. \quad (3.15)$$

3.1.1. Składniki kosztu zawodności

Skutki gospodarcze zawodnej pracy sieci kanalizacyjnej są niezmieralnie trudne do oszacowania ze względu na nieprodukcyjną specyfikę tego systemu [57], [58], [59]. W odróżnieniu od sieci zaopatrzeniowych, systemy kanalizacji nie rozprawdzają mediów, będących wynikiem produkcji w miejscach źródłowych (elektrociepłowni, gazowni itp.), lecz odprowadzają ścieki "wyprodukowane" przez mieszkańców miasta oraz opady atmosferyczne. Miejscem docelowym jest w tym przypadku oczyszczalnia ścieków. Praca systemu polega więc na przetransportowaniu ścieków oraz ich oczyszczeniu i za tę funkcję są pobierane opłaty od jednostek podłączonych do sieci. W takim ujęciu systemy kanalizacji można traktować jako systemy "produkcyjne", których koszty, ale także zysk, rosną ze wzrostem ilości odprowadzanych ścieków.

Mogłoby się zatem wydawać, że optymalizacja kosztów powinna się kierować w stronę doboru ilości ścieków. Jest to jednak podejście błędne, gdyż ilość ta wynika z określonych rozwojem cywilizacyjnym potrzeb ludności miasta oraz względów ekologicznych i jest określana wg znanych zasad [9], [80]. W dalszej analizie przyjmuje się więc założenie, że nieodprowadzenie spodziewanej ilości ścieków powoduje straty.

W jednostkach produkcyjnych straty te, ze względu na ich znaczenie społeczne, można podzielić na dwie grupy:

- straty użytkownika (zakładowe) - K_{zu} ,

- straty ogólnospołeczne - K_{zs} .

Na straty użytkownika składają się koszty:

- akumulacji i amortyzacji - K_{rr} ,

- utraty zysku - K_u ,

- dodatkowe - K_a .

Koszty reprodukcji rozszerzonej K_{rr} (akumulacji i amortyzacji) są związane z nakładem inwestycyjnym i zmieniają się jednostajnie w czasie, a zatem w trakcie przestoju zawsze stanowią stratę, jeżeli nie ma możliwości ich nadrobienia podczas przerw produkcyjnych.

Ze względu na specyficzny charakter pracy sieci przewodów kanalizacyjnych polegający na braku przestojów (co opisano poniżej), koszty reprodukcji rozszerzonej mogą być naliczane jako koszty zakładowe nie związane z rachunkiem kosztów zawodności K_{zu} .

Utrata zysku K_u jest naturalną konsekwencją strat, jakie ponosi użytkownik (właściciel) sieci w wyniku niepobrania opłat za odprowadzenie ścieków spowodowane przerwą w pracy przewodu. Element ten w praktyce wystąpi rzadko, gdyż specyfika systemu wymaga odprowadzania ścieków nawet w razie powstania awarii. Uruchamia się wtedy zespoły rezerwujące, których zadaniem jest ewakuacja ścieków do czasu usunięcia uszkodzenia przewodu. Koszt uruchomienia zespołu rezerwowującego obciąża użytkownika systemu i powinien być doliczany do kosztów dodatkowych K_a . Do kosztów tych należy także doliczyć koszty osobowe, materiałów, pracy sprzętu i energii związane z odnową. Koszty te można stosunkowo łatwo wyznaczyć sporządzając kosztorysy powykonawcze. Do kosztów dodatkowych należy także doliczyć ewentualne koszty, jakie ponosi użytkownik sieci z tytułu wypłat odszkodowań za straty powstałe w wyniku awarii (zalania piwnic, zniszczenia nawierzchni ulic itp.).

Z punktu widzenia prowadzonej w pracy analizy, istotne jest uzyskanie czasowej charakterystyki rozkładu strat, co może być przyczynkiem do ich prognozowania. W tym celu potrzebne jest określenie związku strat u użytkownika K_{zu} , wynikających z zawodności z czasem trwania napraw t_a . W praktyce jedyną skuteczną metodą określania takich powiązań jest prowadzenie szczegółowej statystyki, dotyczącej odnowy i wszystkich związanych z nią kosztów. Wadą tej metody jest konieczność prowadzenia obserwacji i gromadzenia danych przez okres co najmniej kilku lat. Zalecą zaś jest to, że oprócz danych dotyczących kosztów strat uzyskujemy dzięki niej informacje statystyczne o zawodnościowych właściwościach systemu, w postaci średniej liczby uszkodzeń w roku i rozkładu czasu ich odnowy (zmiennej losowej t_a).

Jeżeli wyniki badań zostaną uporządkowane według rosnących wartości t_a , to możliwe będzie wykreślenie funkcji $K_{zu} = f(t_a)$, dającej obraz skutków gospodarczych zawodności przewodów. Do tak określonych strat

należałoby doliczyć straty ogólnospołeczne K_{zs} , których próby kalkulacji - mimo iż mogą się wydawać iluzoryczne - powinny być podejmowane. Straty te powstają przede wszystkim w wyniku infiltracji wód gruntowych do ścieków lub eksfiltracji ścieków do gruntu, a także wynikają z utrudnień komunikacyjnych [48], [49] i w zaspokajaniu potrzeb sanitarnych.

W przypadku infiltracji zwiększają się koszty oczyszczenia powodowane wzrostem ilości transportowanych na oczyszczalnię ścieków. Z zasady infiltracja wzrasta z czasem w miarę rozszczelniania się sieci przewodów i jest trudna do wykrycia wyłącznie na podstawie obserwacji przepływów w oczyszczalni ścieków. W wyniku działania rozszczelnionej sieci użytkownik ponosi zazwyczaj opłaty za odprowadzenie ścieków, pokrywając w ten sposób wzrastające koszty oczyszczania. Innym skutkiem infiltracji wody gruntowej mogą być przesuszenia gleby, prowadzące do degradacji terenów zielonych w mieście lub nadmiernego osiadania sąsiadujących z siecią budowli. Również w tym przypadku bezpośrednia identyfikacja przyczyny na podstawie skutków jest trudna.

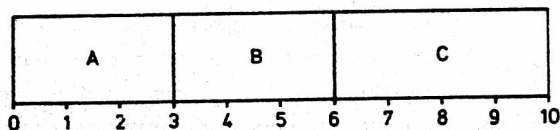
Problem stanowi także analiza kosztów powodowanych eksfiltracją ścieków do gruntu. Sytuacja taka występuje w przypadku rozszczelnienia przewodów, położonych powyżej zwierciadła wody gruntowej. Następuje wtedy skażenie środowiska, które w razie znacznych nieszczelności może doprowadzić do skażenia wód gruntowych na dużym obszarze. Analogicznie i tu identyfikacja przyczyn na podstawie skutków jest stosunkowo trudna, a koszty powstałych strat są w praktyce niemożliwe do określenia. Minimalizacji kosztów zawodności K_{zs} w tych przypadkach należy poszukiwać przez kreowanie polityki eksploatacyjnej sieci, której celem jest likwidacja przyczyn, tzn. utrzymywanie takiego stanu przewodów, aby zagrożenie infiltracją lub eksfiltracją ścieków było jak najmniejsze.

3.2. Ocena wielkości niemierzalnych

Klasyfikacja uszkodzeń ze względu na stwarzany przez nie stopień zagrożenia, a także ocena, grupowanie i szeregowanie innych wielkości niemierzalnych (podzbiory niemierzalnych cech przewodów C_n i niemierzalnych wymuszeń Q_n) jest zazwyczaj kłopotliwa i prowadzi do kontrowersyjnych wyników. Zagadnienie to może być rozwiązywane w sposób uproszczony lub dzięki tworzeniu zapisów sformułowanych werbalnie faktów w symbolicznym języku matematyki.

Pierwsza możliwość polega przeważnie na stosowaniu tzw. wag, którymi mogą być np. liczby naturalne z przyjętego przedziału. Pozwala to na dokładniejszy (niż tylko słowny) opis wielkości i usytuowanie ich w konkretnym miejscu przyjętego przedziału. Przykładowo, w odniesieniu do sformułowania "niebezpieczne uszkodzenie" w dziesięciostopniowej

skali oceny wyrażonej liczbami naturalnymi liczba "5" będzie oznaczać, że jest to uszkodzenie, od którego połowa potencjalnie możliwych uszkodzeń jest niebezpieczniejsza, a 50% uszkodzeń jest mniej niebezpiecznych. W praktyce informacja taka ma wymierne znaczenie, jeżeli wybranym ze skali przedziałom liczbowym zostaną przyporządkowane określone instrukcje działania dla serwisu obsługującego sieć. Przyporządkowanie takie przedstawia schemat na rys. 3.2.



Rys. 3.2. Schemat instruktażowy skali oceny:

A - przedział bezpieczny, B - przedział wstępnego zagrożenia (powtórna kontrola stanu),
C - przedział zagrożenia (naprawa)

Fig. 3.2. Guiding scheme of the estimation scale:

A - safe interval, B - initial hazard interval (repeated control of state),
C - interval of hazard (repair)

W praktyce sposób nadawania wag wielkościom niemierzalnym, ze względu na swą prostotę, jest chętnie stosowany. Należy jednak pamiętać, że jakość oceny zależy tu wyłącznie od umiejętności i subiektywnych odczuć oceniającego, oraz że ocenia się równocześnie cały zbiór elementów, np. uszkodzeń, co powoduje, że wynik może znacznie odbiegać od rzeczywistości. Wiarygodność wyników można zwiększyć w wyniku ankietyzowania losowo wybranych zespołów kompetentnych osób (realizatorów procesu eksploatacji), a następnie metodami statystyki matematycznej uzyskać oceny najbardziej prawdopodobne.

Drugi sposób polega na doborze adekwatnego aparatu matematyki fizycznej do sformułowanych werbalnie faktów, przede wszystkim z powodu występowania nieostrych nazw. Przy czym nieostrość sformułowań nie wynika tu bynajmniej z wady języka, lecz z przyjętej w technice terminologii oraz faktu, że mimo nieostrości niektórych określeń są one rozumiane dość jednoznacznie. Przykładami mogą być takie sformułowania, jak dobra jakość, stabilna cecha, niegroźne uszkodzenie itp.

Przekształcanie tego typu sformułowań polega na dążeniu do zastępowania wyrażen słownych zapisami liczbowymi, rozumowania werbalnego zaś wnioskowaniem dedukcyjnym. Ponieważ jednak większość sformułowań nieostrych nie da się wyeliminować, konieczne jest użycie sposobu umożliwiającego zachowanie nieostrości sformułowań z jednoczesnym zapewnieniem jednoznacznego zrozumienia ich znaczeń. Wydaje się, że najwłaściwszym sposobem modelowania matematycznego w przedstawionym przypadku jest

wykorzystanie pojęcia zbioru rozmytego [71]. Pojęcie to zostało wprowadzone do matematyki niecałe trzydzieści lat temu właśnie w celu umożliwienia definiowania znaczenia pojęć nieostrych. Zagadnienie można przybliżyć na przykładzie uszeregowania wspomnianego już zbioru uszkodzeń przewodu, tak aby było jednoznaczne, które z uszkodzeń jest najmniejbezpieczniejsze i powinno być wyeliminowane w pierwszej kolejności, a które w drugiej itd., aż do wyeliminowania wszystkich.

Przyjmijmy zatem, że zapis $s(u_1, u_2)$ oznacza prawdziwość zdania: "uszkodzenie u_1 jest niebezpieczniejsze od uszkodzenia u_2 ", a prawdziwością tą jest liczba z jednostkowego odcinka na prostej. Określenie tej prawdziwości dla każdej pary uszkodzeń rozważanego ich zbioru U wymaga określenia relacji rozmytej R na tym zbiorze o funkcji przynależności zdefiniowanej równością

$$R(u_1, u_2) = s(u_1, u_2). \quad (3.16)$$

Z pozoru określanie relacji może przypominać omówione nadawanie wag poszczególnym uszkodzeniom. Jest to jednakże odczucie niesłuszne, gdyż w tym przypadku każdorazowo porównywane są tylko dwa uszkodzenia występujące w analizowanej parze, nie zaś cały ich zbiór, co minimalizuje możliwość błędnej oceny.

Zbiór uszkodzeń U z określoną na nim według podanych zasad relacją rozmytą R można nazwać kolejką (rozmytą), gdy są spełnione następujące warunki:

- jeżeli uszkodzenie u_1 jest niebezpieczniejsze od uszkodzenia u_2 , to na pewno nie jest prawdą, że uszkodzenie u_2 jest niebezpieczniejsze od uszkodzenia u_1 ,

- jeżeli między uszkodzeniem u_1 i uszkodzeniem u_3 znajduje się uszkodzenie u_2 , to prawdziwość tego, że uszkodzenie u_1 jest niebezpieczniejsze od uszkodzenia u_3 nie może być mniejsza od prawdziwości tego, że uszkodzenie u_1 jest niebezpieczniejsze od uszkodzenia u_2 i od prawdziwości tego, że uszkodzenie u_2 jest niebezpieczniejsze od uszkodzenia u_3 ,

- dla dowolnych dwóch uszkodzeń jedno z nich jest niebezpieczniejsze od drugiego.

Zdefiniowane warunki W_1, W_2, W_3 są odpowiednikami aksjomatów i mogą być zapisane w postaci symbolicznej. Przedtem jednak należy wprowadzić symboliczne oznaczenie $q(u_1, u_2, u_3)$ wyrażające prawdziwość zdania: "uszkodzenie u_2 jest niebezpieczniejsze od uszkodzenia u_3 , ale mniej niebezpieczne od uszkodzenia u_1 ", którą można zdefiniować równością

$$q(u_1, u_2, u_3) = \min [s(u_1, u_2), s(u_2, u_3)]. \quad (3.17)$$

Wobec przyjętego zapisu, definicje warunków przedstawiają się następująco:

$$W1 : s(u_1, u_2) > 0 \Leftrightarrow s(u_2, u_1) = 0,$$

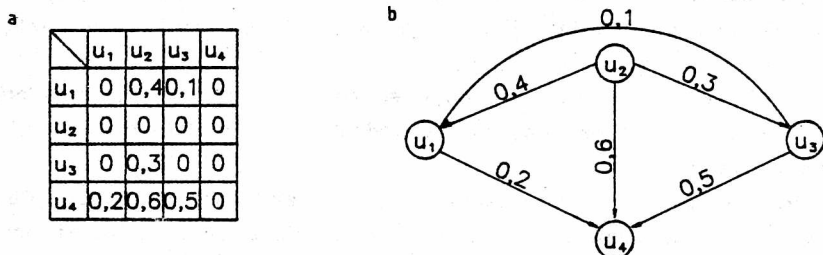
$$W2 : \max q(u_1, u_2, u_3) \leq s(u_1, u_3),$$

$$W3 : \max [s(u_1, u_2), s(u_2, u_3)] > 0.$$

Z warunków tych wynikają cztery wnioski:

- na pewno nie jest prawdą, że uszkodzenie u jest niebezpieczniejsze od siebie samego, tzn. $s(u, u) = 0$,
- jeżeli uszkodzenie u_1 jest niebezpieczniejsze od uszkodzenia u_2 , to są to dwa różne uszkodzenia, tzn. $s(u_1, u_2) > 0 \Rightarrow u_1 \neq u_2$,
- jeżeli u_1 i u_2 są to różne uszkodzenia, to jedno z nich jest niebezpieczniejsze od drugiego, tzn. $u_1 \neq u_2 \Rightarrow \max [s(u_1, u_2), s(u_2, u_1)] > 0$,
- jeśli część uszkodzeń zostanie wyeliminowana, to pozostałe tworzą w dalszym ciągu kolejkę uszkodzeń uporządkowanych ze względu na stopień niebezpieczeństwa stwarzanego przez uszkodzenia.

Aby zatem możliwe było usuwanie w pierwszym rzędzie uszkodzeń najniebezpieczniejszych, konieczne jest utworzenie takiej kolejki. Zadanie to można przeanalizować na przykładzie zbioru czterech uszkodzeń o relacji rozmytej, jak na rys. 3.3, z umownie przyjętymi wartościami liczbowymi.



Rys. 3.3. Relacja rozmyta: a - tablica, b - graf

Fig. 3.3. Fuzzy relation: a - table, b - graph

Analizę rozpoczyna się od znalezienia uszkodzenia najmniej niebezpiecznego, tzn. takiego, które znajduje się na końcu kolejki do remontu. Załóżmy, że jest nim uszkodzenie u_0 , dla którego prawdziwe jest zdanie: " u_0 jest mniej niebezpieczne od uszkodzenia u ", gdzie u - dowolne uszkodzenie ze zbioru rozpatrywanych uszkodzeń. W logice dwuwartościowej zdanie to jest równoważne ze zdaniem: "uszkodzenie u jest niebezpieczniejsze od uszkodzenia u_0 ". W logice rozmytej, rozumianej jako uporządkowany zbiór wartości logicznych, z wyróżnionym elementem największym i najmniejszym oraz określonymi takimi działaniami logicznymi jak koniunkcja, alternatywa, czy negacja, tak nie jest. Jeżeli prawdziwość pierw-

szego zdania oznaczmy symbolem $s'(u_0, u)$, to prawdziwość zdania " u_0 nie jest niebezpieczniejsze od jakiegokolwiek innego uszkodzenia" jest określana następująco:

$$O(u_0) = s'(u_0, u_1) \text{ oraz } s'(u_0, u_2) \text{ oraz } s'(u_0, u_3) \text{ oraz } s'(u_0, u_4).$$

Przyjmując, że prawdziwe jest każde zdanie, którego wartość jest równa jedynce, możemy zapisać

$$s'(u_1, u_2) = 1 - s(u_2, u_1), \quad (3.18)$$

co jest równoznaczne z definicją operatora negacji w logice rozmytej. Korzystając z prawa de Morgana $\bar{a} \wedge \bar{b} = \overline{a \vee b}$ i przyjmując definicję

$$p' \vee q' = \max(p', q'), \quad (3.19)$$

prawdziwość zdania " u_0 nie jest niebezpieczniejsze od jakiegokolwiek uszkodzenia" możemy zapisać następująco:

$$O(u_0) = 1 - \max_i s(u_i, u_0). \quad (3.20)$$

Korzystając z tego zapisu można uszeregować zbiór uszkodzeń, powiązanych przedstawioną na rys. 3.3 relacją rozmytą R . W wyniku przeliczeń otrzymuje się:

$$O(u_1) = 1 - 0,4 = 0,6,$$

$$O(u_2) = 1 - 0 = 1,$$

$$O(u_3) = 1 - 0,3 = 0,7,$$

$$O(u_4) = 1 - 0,6 = 0,4.$$

Uszkodzeniem najmniej niebezpiecznym jest więc uszkodzenie u_2 , dla którego prawdziwość zdania jest równa jedynce. Zgodnie z przedstawionymi poprzednio wnioskami, może ono być wyeliminowane z dalszych obliczeń, wobec czego w dalszej analizie otrzymujemy równości:

$$O(u_1) = 1 - 0,1 = 0,9,$$

$$O(u_3) = 1 - 0 = 1,$$

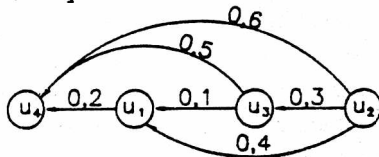
$$O(u_4) = 1 - 0,5 = 0,5,$$

a po wyeliminowaniu uszkodzenia u_3 jako drugiego od końca:

$$O(u_1) = 1 - 0 = 1,$$

$$O(u_4) = 1 - 0,2 = 0,8.$$

Przedstawione rezultaty obliczeń pozwalają na utworzenie rozmytej kolejki uszkodzeń, której graf zilustrowano na rys. 3.4.



Rys. 3.4. Graf kolejki rozmytej

Fig. 3.4. Fuzzy queue graph

W praktyce oznacza to możliwość powiązania stopnia zagrożenia wynikającego z uszkodzeń z techniczno-organizacyjnymi możliwościami ich usuwania. Należy jednak przyjąć założenie, że docelowo będą usuwane wszystkie uszkodzenia, nawet te z końca kolejki, które w chwili szeregowania mogą być odbierane jako nie niebezpieczne. Założenie to wynika z dynamiki i losowości procesu eksploatacji sieci, które implikują także konieczność weryfikacji określonych na zbiorze uszkodzeń relacji rozmytych R po upływie czasu, wynikającym z przyjętej strategii eksploatacji przewodów. Może się bowiem okazać, że w czasie naprawy uszkodzeń z początku kolejki stan pozostałych uszkodzeń uległ zmianie. Jest to szczególnie istotne, jeżeli naprawy są wykonywane powoli. W klasyfikacjach uproszczonych, zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3.2, sytuacja taka odpowiada przejściu uszkodzenia z przedziału B do przedziału C lub z przedziału B do przedziału A. Przypadek drugi występuje incydentalnie, ale jest możliwy i odpowiada np. samouszczelnieniu się betonu, z którego jest zbudowany przewód i implikowanej tym samoeliminacji uszkodzenia, polegającego na nieszczelności przewodu.

Podobne analizy mogą być także przydatne do oceny innych wielkości niemierzalnych. W niniejszej pracy nie będą one kontynuowane, gdyż spowodowałoby to odejście od zasadniczego tematu. Przedstawiony przykład miał na celu wskazanie możliwości wykorzystania zbiorów rozmytych do niezawodnościowej analizy stanu przewodów kanalizacyjnych, a zastosowanie metody w praktyce powinno nastąpić podczas sporządzania szczegółowych programów dla konkretnych zadań.

4. STRATEGIE ODNOWY

4.1. Strategia z optymalnym okresem odnowy

Sieci przewodów kanalizacyjnych zaliczają się do naprawialnych środków trwałych, które zużywają się stopniowo. Wartość użytkowa sieci maleje w miarę upływu czasu, mimo że w trakcie ich użytkowania usuwa się na bieżąco drobne awarie i dokonuje zabiegów konserwacyjnych (odnowa niepełna). Postępujące zużycie fizyczne doprowadza jednak do tego, że po pewnym czasie elementy sieci nie nadają się do remontu i powinny zostać wymienione na nowe lub zrekonstruowane (odnowa pełna).

Celem niniejszego rozdziału jest wykazanie, że odnawianie sieci dopiero po awarii lub doprowadzenie jej do całkowitego zużycia fizycznego może być ekonomicznie nieuzasadnione. Zmiana strategii odnowy wiąże się z rachunkiem ekonomicznym, którego zadaniem jest wyznaczenie optymalnego, z punktu widzenia kosztów, czasu odnawiania.

Wycofanie z eksploatacji i wymiana elementu na nowy, w z góry zaplanowanym momencie, nazywa się odnową prewencyjną. Strategia odnawiania prewencyjnego polega zazwyczaj na przyjęciu jednej z zasad [87]:

- odnowy dokonuje się po osiągnięciu przez element pewnego ustalonego wieku T_0 ,
- odnowy dokonuje się po wykonaniu n remontów kapitalnych (przed $n + 1$ remontem),
- dokonuje się odnowy wszystkich elementów sieci co pewien czas t .

W każdej z wymienionych strategii osiąga się efekty, jeżeli wiek T_0 , liczba remontów n lub okres t zostaną wyznaczone na podstawie rachunku optymalizacyjnego. Jeżeli wymienione parametry ustala się bez przeprowadzenia takiego rachunku, opierając się wyłącznie na doświadczeniach praktycznych, jest to strategia resursów, która może się okazać efektywna tylko przypadkowo. Wybór strategii odnawiania przewencyjnego jest zdeterminowany właściwościami systemu oraz technikami odnowy. O wyborze decyduje także horyzont czasowy, w którym przewiduje się stosowanie strategii.

Proces zużycia przewodów powoduje, że ich utrzymanie w zadowalającym stanie technicznym wymaga nakładów na konserwację, remonty bieżące i kapitalne. W miarę upływu czasu roboty te są coraz bardziej pracochłonne i materiałochłonne. Bardzo trudno jest przy tym wyznaczyć moment "śmierci technicznej" sieci przewodów, gdyż ciągle zawiera ona elementy sprawne. Dlatego też okres eksploatacji sieci jest bardzo długi, a w momencie gdy element sieci z powodu daleko posuniętego zużycia powinien być poddany wymianie lub rekonstrukcji, dokonywany jest zwykle kolejny remont bieżący. Strategia taka jest źródłem pozornych oszczędności, gdyż sztuczne wydłużanie okresu użytkowania elementu może być przyczyną ponoszenia na utrzymanie tego elementu nakładów, które w ogólnym rozrachunku okażą się nieopłacalne. Należy także zaznaczyć, że przedwczesne wycofanie elementu z użytkowania jest również nieopłacalne, gdyż powoduje zwiększenie kosztów rozszerzonej reprodukcji K_{rr} . Ponoszeniu wymienionych nakładów może przeciwdziałać polityka odnawiania przewodów w wyznaczonym dla nich optymalnym wieku T_{opt} .

Jeżeli zostanie przyjęte założenie, że koszty eksploatacji (aczkolwiek zmieniające się w czasie) nie zależą od momentu dokonania odnowy, to mogą one zostać pominięte w kalkulacjach, co znacznie ułatwia prowadzenie rachunku. Przyjmując dalej za jednostkę czasu okres jednego roku, można określić funkcję celu, którą są koszty roczne sieci (lub jej fragmentu) z pominięciem kosztów eksploatacji i z uwzględnieniem kosztów zawadności. Ponieważ koszty zawadności wzrastają wraz ze zwiększaniem się w czasie liczby uszkodzeń, w formułowaniu kryterium konieczne jest więc użycie rachunku dyskonta. Prowadzenie rachunku w praktyce jest możliwe, jeżeli użytkownik sieci dysponuje następującą bazą danych:

- znane są nakłady inwestycyjne elementu K_{n0} związane z jego wybudowaniem i uruchomieniem,
- znane są średnie, jednostkowe koszty zawadności k_z , na które składają się elementy omówione w poprzednim rozdziale,

- znana jest funkcja intensywności uszkodzeń elementu w postaci dyskretnej wartości $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_T$ odpowiadających intensywnościom w kolejnych latach eksploatacji 1, 2, 3, ..., T.

Dla tak przygotowanego pakietu danych, koszty roczne sieci uśrednione za pomocą rachunku dyskonta wynoszą

$$K_r(T) = K_{n0} r(T) + a_r(T) k_z \sum_{i=1}^{i=T} \lambda_i (1+p)^{T-i}, \quad (4.1)$$

gdzie r, a_r - współczynniki określone wyrażeniem (3.2).

Przedstawiona formuła jest słuszna dla losowo zmiennych kosztów zawodności, nie wykazujących istotnej zmienności czasowej. Jeżeli tak nie jest, to zmienność czasową kosztów zawodności można uwzględnić stosując wzór

$$K_r(T) = K_{n0} r(T) + a_r(T) \sum_{i=1}^{i=T} k_{zi} \lambda_i (1+p)^{T-i}, \quad (4.2)$$

gdzie k_{zi} - koszty zawodności w poszczególnych latach użytkowania.

Minimalizowanie przedstawionych funkcji celu odbywa się przez znalezienie odpowiedniej wartości T_{opt} , dla której funkcje osiągają najmniejszą wartość i która w praktyce odpowiada wymianie przewodu na nowy (odnowa pełna) w końcu roku T_{opt} , odpowiadającemu rzeczywistemu okresowi amortyzacji przewodu.

Minimalizacja przedstawionych związków wymaga użycia elektronicznej techniki obliczeniowej, gdyż nie są one różniczkowalne, a zatem poszukiwania T_{opt} należy dokonać w wyniku kolejnych podstawień [89]. Trzeba także podkreślić, że funkcje te mogą nie mieć minimum, którego brak lub występowanie dla bardzo dużej wartości T oznacza, że przyjęta strategia odnowy jest nieuzasadniona [42]. Czas wymiany elementu na nowy określają wtedy techniczne możliwości kontynuowania jego napraw, co odpowiada strategii resursów [77].

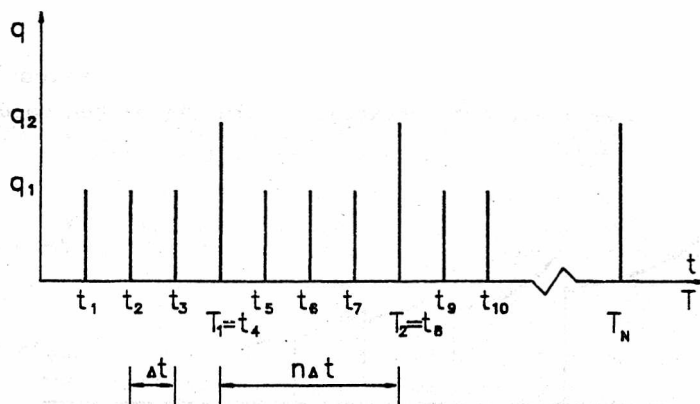
4.2. Strategia z kontrolą

4.2.1. Optymalizacja programu kontroli

Strategia odnowy z kontrolą (strategia stanu) może być stosowana w całym okresie eksploatacji T lub w okresie przechodzenia z eksploatacji nieprogramowej do eksploatacji programowej, w którym brak niezawodnościowych charakterystyk przewodu uniemożliwia stosowanie strategii prewencyjnej z optymalnym okresem prewencji T_{opt} . Realizacja strategii z kontrolą polega na przyporządkowaniu zidentyfikowanym i zdiagnozowanym w wyniku kontroli uszkodzeniom właściwego typu remontów z przyjętej skali odnowy. Przedstawiony przebieg strategii implikuje trzy zasadnicze jej elementy:

- optymalizację kontroli systemu,
- klasyfikację uszkodzeń,
- określenie skali odnowy.

Pod względem organizacyjnym w programie kontroli można wyodrębnić kontrole rutynowe, szczegółowe, a nawet specjalne, których wyróżnikiem jest stopień dokładności oraz krotność występowania. Kontrole rutynowe (o najmniejszym współczynniku dokładności q_1) są prowadzone z największą krotnością i w stałych odstępach czasu Δt , kontrole szczegółowe (o większym współczynniku dokładności q_2) prowadzi się w odstępach będących wielokrotnością odstępów Δt . Kontrole specjalne (ekspertyzowe) są prowadzone tylko wtedy, gdy wyniki poprzednio wymienionych kontroli nie przyniosły oczekiwanych efektów. Stąd też kontrole te występują losowo i nie muszą być wprowadzane do rachunku optymalizującego przebieg kontroli rutynowych i szczegółowych. Przedstawiony program kontroli został zaproponowany dla budowli mostowych, a model graficzny jego przebiegu w czasie zilustrowano jak na rys. 4.1.

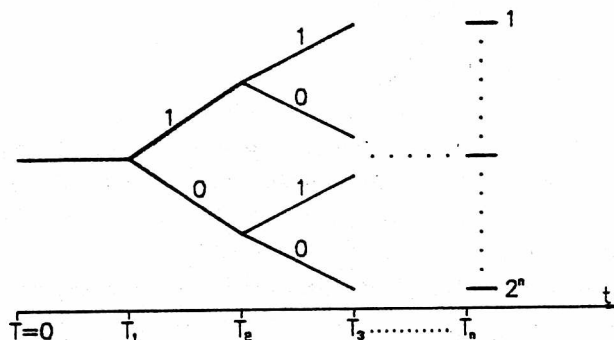


Rys. 4.1. Program kontroli dwustopniowej:
 T - czas amortyzacji,
 q - współczynnik dokładności kontroli [85]

Fig. 4.1. A two-stage control programme:
 T - amortization time,
 q - control accuracy coefficient [85]

Stan obiektów technicznych z czasem ulega pogorszeniu, a prawdopodobieństwo wystąpienia remontu po kolejnych kontrolach wzrasta, co dla systemu jednoelementowego przedstawia rys. 4.2.

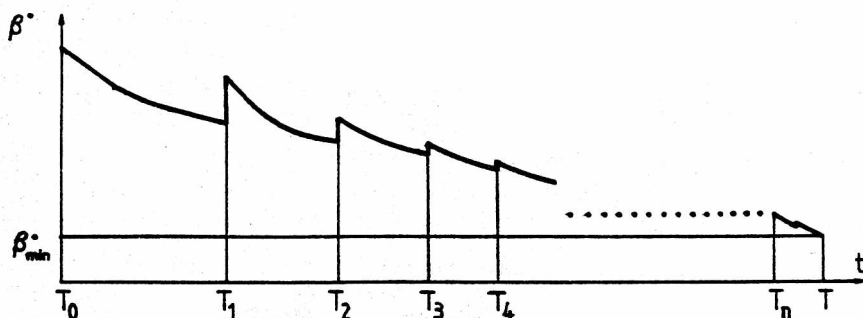
W układach szeregowych o liczbie m elementów liczba gałęzi grafu po n kontrolach wynosi 2^{nm} . Oczywiście jest, że ze względu na lokalny zakres, część napraw odpowiadających poszczególnym gałęziom grafu może być w rozważaniach pominięta, gdyż nie wpływają one zasadniczo na funkcjonowanie systemu i jego niezawodność. Nie zmienia to faktu, że wzros-



Rys. 4.2. Graf zmian intensywności napraw po kolejnych kontrolach:
1 - występowanie naprawy, 0 - niewystępowanie naprawy
 T_i - czas kontroli [95]

Fig. 4.2. Graph of the changes in repair rate after successive controls:
1 - occurrence of repair, 0 - non-occurrence of repair
 T_i - inspection time [95]

towi intensywności odnowy w czasie musi odpowiadać wzrost krotności kontroli. Graficzną ilustrację strategii spełniającej ten warunek przedstawiono na rys. 4.3.



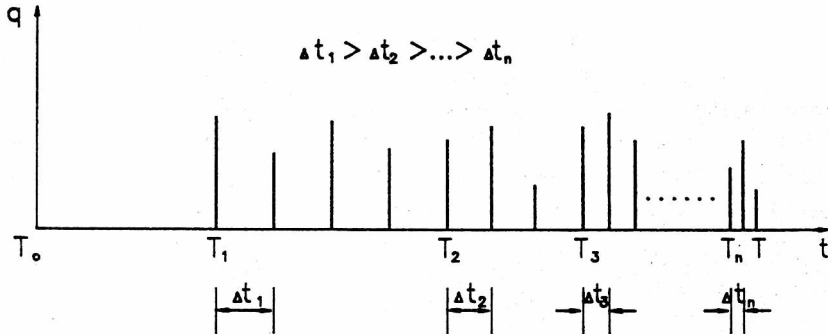
Rys. 4.3. Strategia wzrostu krotności kontroli w kolejnych latach eksploatacji: $\beta^{\cdot}$ - miara niezawodności elementu, $\beta_{\min}^{\cdot}$ - minimalna dopuszczalna niezawodność elementów w całym okresie amortyzacji [95]

Fig. 4.3. Strategy of an increase in control rate in the successive years: $\beta^{\cdot}$ - measure of reliability of the element, $\beta_{\min}^{\cdot}$ - the minimum acceptable reliability of the element in its lifetime [95]

Niedostępność przewodów kanalizacyjnych powoduje, że ich kontrola jest uciążliwa dla obsługi i skomplikowana technicznie. Wydaje się za-

tem, że bardziej uzasadnione od przedstawionej koncepcji dla obiektów mostowych jest w tym przypadku stosowanie jednego typu kontroli o dostosowanym do potrzeb współczynniku dokładności q_n .

Uwzględniając opisane cechy procesu, proponuje się stosowanie programu kontroli o zmiennym współczynniku dokładności q_n oraz zmieniającej się krotności kontroli w kolejnych przedziałach czasu ($\Delta t_1 > \Delta t_2 \dots > \Delta t_n$), ograniczonych odnowieniami przewodów. Schemat programu takiej kontroli przedstawiono na rys. 4.4.

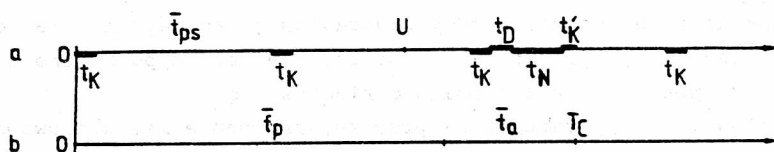


Rys. 4.4. Program kontroli przewodów kanalizacyjnych:
 q - współczynnik dokładności kontroli, T_i - remonty kapitalne,
 Δt_i - czas między kontrolami, T - czas amortyzacji

Fig. 4.4. Programme of the sewers control:
 q - control accuracy coefficient, T_i - general overhauls,
 Δt_i - mean time between controls, T - amortization time

Bez względu na wybór programu kontroli prowadzenie jej wymaga określonych nakładów. Powstaje zatem problem optymalizacji kontroli, którym zainteresowanie w ostatnich latach bardzo wzrosło [85], [94], [95]. Autorzy wszystkich wymienionych opracowań są zgodni, że podstawy rachunku optymalizującego stanowi tu rachunek kosztów, a za kryterium optymalizacji należy przyjmować ich minimum. Potwierdzając to założenie, w pracy przedstawiono propozycje optymalizacji krotności kontroli w poszczególnych przedziałach czasu eksploatacji systemów kanalizacyjnych, przy kryterium minimalizującym łączne koszty odnowy. Zasady optymalizacji przedstawiono na przykładzie systemu jednoelementowego o modelu pracy jak na rys. 4.5. W modelu tym przyjęto, że czas T_C odpowiada sumie czasów $\bar{t}_p$ i $\bar{t}_a$ [101]

$$T_C = \bar{t}_p + \bar{t}_a = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu} . \quad (4.3)$$



Rys. 4.5. Modele pracy systemu z kontrolą okresową:

a - rzeczywisty, b - przyjęty

Fig. 4.5. Model of the system operation with periodical control:
a - real, b - assumed

Dla uproszczenia można przyjąć, że czas kontroli należy do czasu remontu, chociaż w przypadku sieci kanalizacyjnych $i-1$ kontroli odbywa się podczas sprawnej pracy systemu w czasie $\bar{t}_p$ (odzwierciedla to rys. 4.5 a), czyli średni czas odnowy przewodów jest rzeczywiście sumą czasu kontroli T_K i czasu naprawy $T'_N = t_N + t_O + t'_K$ (powiększonego o czas diagnostyki t_D i kontroli po naprawie t'_K)

$$\bar{t}_a = T_K + T'_N = \sum_i t_{Ki} + T'_N, \quad (4.4)$$

gdzie t_{Ki} - czas elementarnej (okresowej) kontroli.

Przyjmując, że kontrole okresowe mają jednakowy średni czas trwania t_K i że są przeprowadzane systematycznie i razy w czasie T_C , zależność (4.4) można zapisać

$$\bar{t}_a = i t_K + T'_N. \quad (4.5)$$

Zgodnie z tym średni czas użytecznej pracy sieci

$$\bar{t}_p = T_C - (i t_K + T'_N), \quad (4.6)$$

a średni maksymalny czas pracy bez kontroli

$$\bar{t}_{ps} = \frac{\bar{t}_p}{i} = \frac{T_C - T'_N}{i} - t_K. \quad (4.7)$$

W czasie $\bar{t}_{ps}$ z prawdopodobieństwem wynikającym z rozkładu niezawodności systemu może pojawić się uszkodzenie, które będzie wykryte dopiero podczas następnej kontroli, zatem maksymalny czas pracy uszkodzonego przewodu

$$t_{NS} = \bar{t}_{ps}. \quad (4.8)$$

Do czasu wykrycia uszkodzenia przewód pracuje, powodując straty wynikające z jego zawadności (patrz rozdz. 3). Krotność kontroli powinna być tak dobrana, aby zapewnić minimum tych strat a także minimum kosztów kontroli. Oznaczając symbolem K_K koszty kontroli, a symbolem K_{NS} koszty

zawodności wynikające z działania uszkodzonego przewodu w czasie między kontrolami, to sumę tych kosztów K_O (będącą funkcją kryterium) można wyrazić równaniem

$$K_O = K_K + K_{NS} = k_{OK} i t_K + k_{ON} T'_N + k_{NS} \left(\frac{T_C - T'_N}{i} - t_K \right), \quad (4.9)$$

gdzie: k_{OK} - jednostkowy koszt kontroli,

k_{NS} - jednostkowy koszt niesprawnego działania przewodu między kontrolami, np. w przeliczeniu na koszt kontroli

$$k_{NS} = a k_{OK}; \quad a \geq 1,$$

k_{ON} - jednostkowy koszt naprawy.

Jeżeli zostanie przyjęte, że funkcje poszczególnych składników przebiegają jak na rys. 4.6, to kryterium minimum kosztów określone wzorem

$$K_{Omin} = 2 \sqrt{(T_C - T'_N) t_K k_{OK} k_{NS}} + k_{ON} T'_N - k_{NS} t_K \quad (4.10)$$

spełnia krotność (liczba kontroli w czasie $\bar{t}_p$) wyrażoną pierwiastkiem

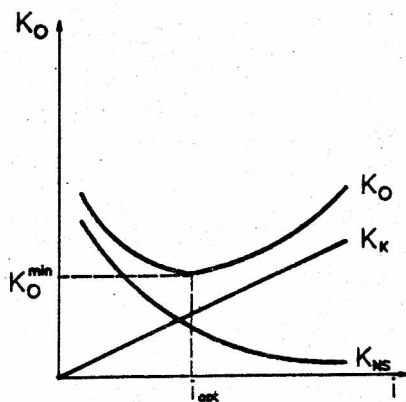
$$i_{opt} = \sqrt{\frac{T_C - T'_N}{t_K} \cdot \frac{k_{NS}}{k_{OK}}}, \quad (4.11)$$

i po wyrażeniu T_C w funkcji parametrów niezawodnościowych

$$i_{opt} = \sqrt{\frac{\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu} - T'_N}{t_K} \cdot \frac{k_{NS}}{k_{OK}}}. \quad (4.12)$$

Rys. 4.6. Zależność kosztów odnowy systemu od krotności kontroli:
 K_O - koszt odnowy, K_K - jednostkowy koszt kontroli, K_{NS} - jednostkowy koszt niesprawnego działania systemu, i - krotność kontroli

Fig. 4.6. Dependence of the cost of the system renovation on the frequency of controls:
 K_O - cost of renovation, K_K - unit cost of control, K_{NS} - unit cost of unreliable operation of the system, i - multiplication of control



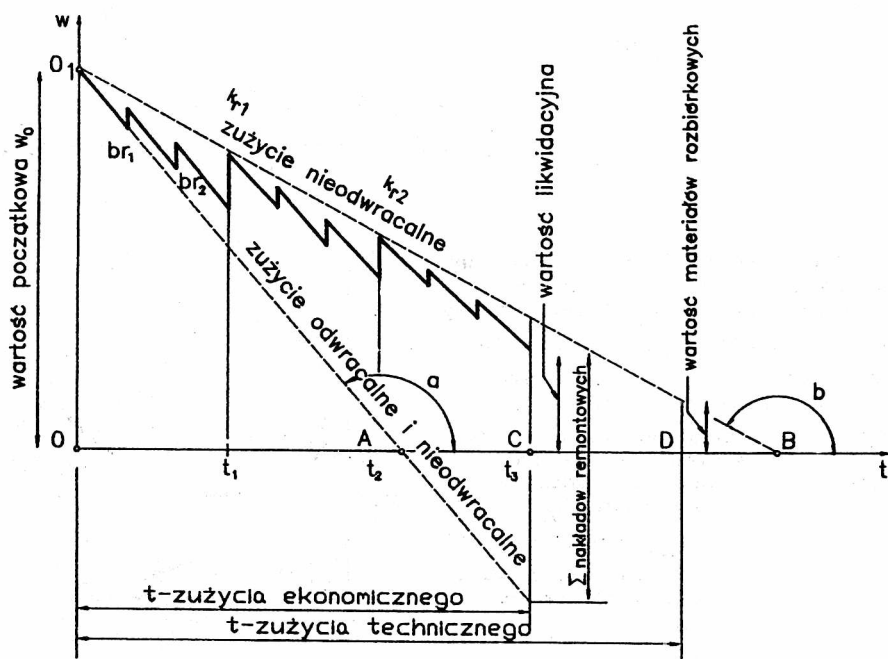
Inne, oparte na podobnych założeniach modele optymalizacji programu kontroli są przedstawione w cytowanych już pracach [85], [94], [95].

4.2.2. Klasyfikacja uszkodzeń i skala odnowy

Zużycie przewodów może być nieodwracalne lub odwracalne, gdy jego skutki można naprawić przez dokonanie remontu (odnowy niepełnej).

Zużycie nieodwracalne polega na zmianach chemicznych i strukturalnych w materiałach, zachodzących wskutek ich starzenia się i działania czynników zewnętrznych - $Q(t)$. Wymiana tak zużytych elementów w trakcie remontów jest możliwa tylko w ograniczonym stopniu. Daleko zaawansowany proces zużycia nieodwracalnego kwalifikuje zazwyczaj budowlę do wymiany, rekonstrukcji lub modernizacji, polegającej na wprowadzeniu w jej miejsce nowocześniejszego rozwiązania (odnowa pełna). Modernizacja ma uzasadnienie w przypadku moralnego zużycia się sieci, np. gdy lokalizacja przewodów nie odpowiada nowej koncepcji zabudowy.

Zużycie odwracalne dotyczy przede wszystkim elementów wykończenia i wyposażenia (izolacji, złączy, armatury), których udział w sieci kanalizacyjnej jest znikomy, chociaż i tu mogą wystąpić uszkodzenia nieodwracalne. Jeżeli jednakże wymiana całkowicie zużytego elementu w takim przypadku nie implikuje zmian w odniesieniu do sieci jako całości, to zużycie nieodwracalne elementu jest traktowane jako odwracalne w skali systemu.



Rys. 4.7. Proces zużycia obiektu majątku trwałego [24]

Fig. 4.7. Wear and tear process of an object of fixed assets [24]

W wyniku postępującego w trakcie eksploatacji procesu zużycia, początkowa wartość przewodu W_0 ulega stopniowemu zmniejszeniu, co zilustrowano na rys. 4.7 (porównaj rys. 4.3). Przebieg globalnego zużycia przewodu przy upraszczającym założeniu, że odbywa się on według zasad funkcji linearnej, przedstawia funkcja O_1A opisana równością

$$W_t = W_0(1 - at), \quad (4.13)$$

gdzie: W_0 - wartość początkowa,

W_t - wartość techniczna obiektu po upływie czasu t ,

a - wskaźnik utraty wartości wskutek zużycia w jednostce czasu.

Analogicznie w postaci odcinka funkcji O_1B możemy przedstawić proces utraty wartości przewodu wskutek zużycia nieodwracalnego

$$W_{nt} = W_0(1 - bt), \quad (4.14)$$

gdzie: W_{nt} - wartość techniczna uwzględniająca zużycie nieodwracalne w czasie t ,

b - wskaźnik utraty wartości w jednostce czasu wskutek zużycia nieodwracalnego.

Z przedstawionej zależności wynika, że wartość techniczna spadnie do zera w czasie równym odcinkowi OB. W praktyce nie doprowadza się użytkownika do tego punktu, lecz zaprzestaje eksploatacji obiektu w momencie wcześniejszym, odpowiadającym punktowi D. W punkcie tym wartość likwidacyjna obiektu (materiałów rozbiórkowych) jest większa od zera. W przypadku przewodów kanalizacyjnych analiza taka jest jednak iluzoryczna, gdyż odzysk materiałów jest tu praktycznie niemożliwy.

Przerwanie użytkowania przewodu może nastąpić już po upływie czasu t_2 , co odpowiada eksploatacji bez napraw. Przedłużenie eksploatacji poza granice minimalne OA wymaga prowadzenia działalności remontowej bieżącej oraz rzadziej, remontów kapitalnych (w skali odnowy - stosowania odnowy pełnej). Pozwala to na przedłużenie okresu użytkowania przewodów do momentu zużycia ekonomicznego, wynikającego z ich niewydolności będącej konsekwencją wzrostu liczby ścieków w czasie jaki upłynął od oddania przewodów do użytku - punkt C. Przebieg eksploatacji z remontami ilustruje wykres o dyskretniej zmienności, w którym małe skoki odpowiadają remontom bieżącym ($b_{r1}, b_{r2}, \dots$), a duże remontom kapitalnym ($k_{r1}, k_{r2}, \dots$). Globalny nakład na prace remontowe K_R wyraża wzór

$$K_R = W_t - W_{nt} = W_0 (a - b) t. \quad (4.15)$$

Przedłużenie eksploatacji poza okres zużycia ekonomicznego (punkt C) jest uzasadnione, jeżeli przewód po odnowieniu ciągu spełnia stawiane

mu wymagania użytkowe (jest w stanie przejąć aktualną ilość ścieków). Kontynuując działalność remontową w takim przypadku, można eksploatować przewód do momentu zużycia technicznego (punkt D), w którym zostają podjęte decyzje o odnowie pełnej lub likwidacji. Przypadek drugi występuje, jeżeli lokalizacja przewodów nie odpowiada nowej koncepcji zagospodarowania przestrzeni podziemnej (zużycie moralne). Zużycie moralne może przyspieszyć moment przerwania eksploatacji przewodów nawet poniżej minimalnego czasu eksploatacji OA. W każdym przypadku politykę remontową należy dostosować do przyjętego okresu amortyzacji sieci. Dotyczy to szczególnie ostatniego remontu kapitalnego, który nie powinien być przeprowadzony później, niż wynika to z odjęcia okresu remontowego od czasu zamierzonego zakończenia użytkowania sieci w aktualnym stanie, tzn. przekazania jej do odnowy pełnej lub rozbiórki (t_2).

Jak z tych rozważań wynika, wielkość globalnych nakładów na remonty zależy od następujących czynników:

- bezwzględnej wielkości wartości początkowej W_0 ,
- długości okresu użytkowania t ,
- rozpiętości między wskaźnikami a i b .

Pierwszy czynnik nie wymaga komentarza. Niezmiernie ważne jest natomiast przeanalizowanie wpływu na koszty trzeciego czynnika. Rozwartość kąta między funkcjami zużycia globalnego a nieodwracalnego jest tym większa, im bogaciej budowla jest wyposażona w elementy wykończenia, instalacje itp. Największe wartości kąt ten osiąga dla budynków przemysłowych ze skomplikowanymi instalacjami, a od czasu wzrostu standardu mieszkań, także mieszkalnych. Kąt ten zbliża się do zera, gdy dotyczy budowli o dominującym udziale części konstrukcyjnych (np. piramidy) co powoduje, że koszty remontów prawie tu nie występują.

Przewody kanalizacyjne stanowią niejako obiekty pośrednie, w których udział remontów (odnowy niepełnej) nie jest tak znaczny jak w wielu innych obiektach budowlanych, jednakże nie mogą one funkcjonować bez prowadzenia działalności remontowej (uszczelnienia złączy, lokalna wymiana lub wzmocnienie konstrukcji rur). Z formalnego punktu widzenia remonty nie zmieniają stanu przewodów, lecz jedynie go odtwarzają w zakresie częściowo przywracającym im pierwotną wartość.

W wyniku odnowy pełnej zmienia się stan sieci, staje się ona nowocześniejsza pod względem konstrukcyjnym, technologicznym lub pod oboma względami, a wartość sieci po takiej odnowie W_{om} może przekroczyć jej wartość początkową W_0 . Odnowienia pełne mogą być prowadzone w przedziale czasowym odpowiadającym odcinkowi CD, a także w każdym innym momencie, jeżeli nastąpi moralne zużycie sieci. W tabeli 4.1 zestawiono uszkodzenia przewodów i odpowiadające im zakresy odnowy z uwzględnieniem priorytetu zadań.

Tabela 4.1

Klasyfikacja uszkodzeń i skala odnowy
Damage classification and renovation range

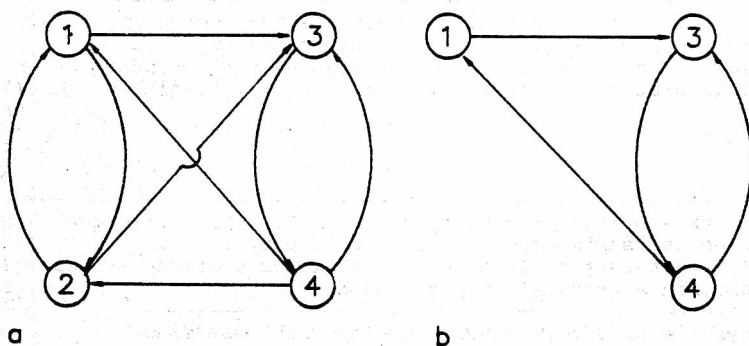
Lp.	Rodzaj uszkodzenia	Skala odnowy
1	Przewody z cegły: korozja cegły i wypłukanie zaprawy do stopnia powodującego utratę nośności konstrukcji kanału. Sieć pracuje dzięki powstaniu naturalnego sklepienia w gruncie. Przewody betonowe: strukturalna korozja betonu do stopnia powodującego całkowitą utratę nośności kanału. Sieć pracuje dzięki powstaniu naturalnego sklepienia w gruncie. Przewody żelbetowe: złuszczenie betonu i korozja wewnętrznej powierzchni do stopnia powodującego odsłonięcie zbrojenia. Przewody ceramiczne i żeliwne: permanentnie występujące spękania rur. Wszystkie przewody: zamulenie gruntem lub materiałami budowlanymi (iniektami itp.) znacznych odcinków sieci do stopnia uniemożliwiającego ich usunięcie (w przewodach o małych średnicach).	Natychmiastowa wymiana przewodów lub rekonstrukcja (odnowa pełna)
2	Przewody z cegły: początki korozji starzeniowej - łuszczenie się cegły, wypłukiwanie zaprawy. Przewody betonowe: początki korozji starzeniowej - wżery, łuszczenie się powierzchni betonu. Przewody żelbetowe: początki korozji starzeniowej - wżery, łuszczenie się powierzchni betonu, początki odsłaniania zbrojenia. Przewody ceramiczne i żeliwne: lokalne, ale powtarzające się spękania rur. Wszystkie przewody: infiltracja lub eksfiltracja, deformacja spadków lub meandrowanie.	Natychmiastowa renowacja sieci (odnowa pełna)
3	Wszystkie rury: widoczne pierwsze efekty procesu starzenia - korozja głównie do średniego poziomu ścieków, lokalne wżery, pęknięcia, deformacje spadków, rozszczelnienia oraz przemieszczenia przekrojów (ścinianie).	Natychmiastowy remont kapitalny (lokalnie), dalej remonty bieżące (odnowa niepełna)
4	Wszystkie przewody: defekty jak w p. 3., lecz dotyczące przede wszystkim dopływów bocznych i przyłączy oraz najstarszych elementów. Mało widoczne efekty procesu starzenia w pozostałych przewodach.	Remonty bieżące (odnowa niepełna)
5	Wszystkie przewody: prawie zupełny brak uszkodzeń.	Powtórna kontrola w późniejszym terminie (bez odnowy)

Przedstawione zestawienie uszkodzeń i przyporządkowanych im działań daje przybliżony obraz skali odnowy, tzn. tworzenia się granicy między remontami bieżącymi, kapitalnymi, renowacją, rekonstrukcją i wymianą przewodów. W dwóch pierwszych przypadkach, gdzie w przeważającej większości występują uszkodzenia starzeniowe, przewody wymagają odnowy pełnej. Według badań przeprowadzonych w Japonii, stan taki dotyczy przede wszystkim przewodów w sieciach eksploatowanych powyżej pięćdziesięciu lat [68].

Uszkodzenia zestawione w punkcie 3. kwalifikują przewody do napraw kapitalnych prowadzonych lokalnie (w miejscu największych zniszczeń), a na pozostałych odcinkach napraw bieżących (odnowa częściowa). Pozycja 4. odpowiada stosunkowo dobremu stanowi przewodów, którego utrzymanie wymaga prowadzenia systematycznych napraw bieżących. W punkcie 5. opisano przypadek, kiedy stan przewodów jest na tyle dobry, że w chwili badań kontrolnych nie wymaga jakichkolwiek napraw. Odnowa przewodów wiąże się wówczas z ponowną kontrolą, po upływie czasu wynikającego z optymalizacji jej krotności.

4.2.3. Kontrola jako element badań eksploatacyjnych

Kontrola jest podstawą budowy bazy danych, niezbędnej do estymacji niezawodnościowych parametrów systemu, a więc jest także podstawowym elementem badań eksploatacyjnych. Konieczność kontroli wynika także ze specyfiki procesu eksploatacji sieci, który w odróżnieniu od procesów eksploatacji większości urządzeń technicznych jest grafem nie czterostanowym, lecz trójstanowym, co zilustrowano na rys. 4.8.



Rys. 4.8. Grafy procesów eksploatacji: a - czterostanowy, b - trójstanowy, 1 - użytkowanie, 2 - postój, 3 - oczekiwanie na odnowę, 4 - odnowa

Fig. 4.8. Graphs of the operating processes: a - four states, b - threestates, 1 - operation, 2 - standstill, 3 - waiting for renovation, 4 - renovation

Przedstawione na rysunku stany odpowiadają:

- 1 - stanowi użytkowanie obejmującemu okres, w którym urządzenie realizuje przyporządkowane mu zadania,
- 2 - stanowi postój, w którym urządzenie jest zdadne do realizacji przyporządkowanego mu zadania, lecz go nie realizuje ze względu na warunki zewnętrzne, np. brak energii elektrycznej na pompowni w systemie rurociągów ciśnieniowych,
- 3 - stanowi oczekiwanie na odnowę, podczas którego urządzenie nie jest zdadne do realizacji przyporządkowanego mu zadania, gdyż jest uszkodzone,
- 4 - stanowi odnowa, podczas którego urządzenie jest odnawiane i nie wykonuje przyporządkowanego mu zadania.

Czterostanowemu modelowi procesu eksploatacji odpowiada dwustanowy model niezawodności, w którym stany użytkowania i postoju odpowiadają stanowi zdadności urządzenia, a stany oczekiwania na odnowę i odnowa stanowi niezdadności. Stąd też, czasem zdadności urządzenia jest suma czasów dwóch pierwszych z wymienionych stanów, a czasem niezdadności suma czasów dwóch pozostałych stanów. Czasy zdadności i niezdadności mogą być aproksymowane odpowiednio czasami $\bar{t}_p$ i $\bar{t}_a$.

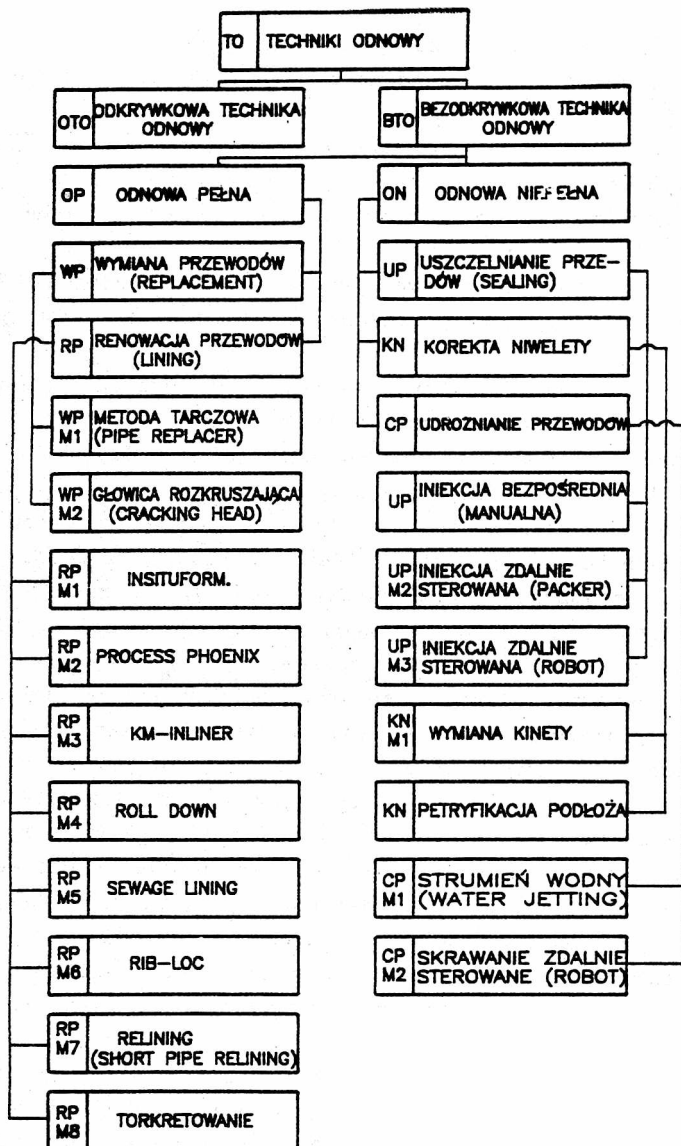
Ciągłość zrzutu ścieków oraz grawitacyjny system ich transportu powodują, że wyróżnienie stanu postoju w systemach kanalizacji nie jest możliwe. Także stan oczekiwania na odnowę ze względu na niedostępność przewodów jest przeważnie stanem ukrytym, ponieważ zdecydowana większość uszkodzeń przewodów nie jest natychmiast zauważana (o czym była już mowa w poprzednim rozdziale). Może to spowodować błędne wyznaczanie rzeczywistych czasów zdadności $\bar{t}_p$ i niezdadności $\bar{t}_a$, gdyż czas stanu oczekiwania na odnowę jest odmierzany dopiero w chwili identyfikacji uszkodzenia podczas prowadzonej kontroli, nie zaś podczas jego powstania. W konsekwencji tworzy się nieprawdziwy obraz pracy sieci o nadmiernie wydłużonych czasach stanu jej zdadności.

Opisane cechy procesu eksploatacji sieci powodują, że kontrola, a ściślej jej krotkość staje się regulatorem poziomu dokładności estymacji parametrów $\bar{t}_p$ i $\bar{t}_a$ i ma decydujący wpływ na ich wiarygodność. Implikuje to konieczność prowadzenia kontroli w całym okresie badań eksploatacyjnych. Należy się zatem spodziewać, że strategia z kontrolą będzie strategią wiodącą w okresie co najmniej kilkunastoletnim.

4.3. Techniki odnowy

4.3.1. Podział technik odnowy

Techniki odnowy dzielą się, ze względu na sposób ich realizacji, na odkrywkowe i bezodkrywkowe, a pod względem zakresu, na remontowe (odnowa niepełna) i rekonstrukcyjno-modernizacyjne (odnowa pełna).



Rys. 4.9. Podział technik i metod odnowy przewodów kanalizacyjnych

Fig. 4.9. Division of techniques and methods of renovation of sewage conduits

Techniki odkrywkowe są najstarszymi, najlepiej znanymi technikami odnowy i nie wymagają stosowania nowoczesnych metod. Są to jednak techniki bardzo uciążliwe, a często także bardzo kosztowne, ponieważ z ich realizacją w warunkach miejskich wiążą się takie wady, jak:

- duże koszty robót ziemnych,
- duże koszty reorganizacji ruchu (objazdów, ruchu pieszych) [48], [49],
- długi czas realizacji odnowy,
- obniżenie komfortu zamieszkania,
- duże koszty z tytułu opłat za rozległy plac budowy.

Wymienione najważniejsze wady technik odkrywkowych skłaniają bądź do ich zaniechania, bądź do stosowania tylko w wyjątkowych sytuacjach. Typowym przykładem takiej sytuacji jest przełożenie sieci infrastruktury technicznej ułożonych bezpośrednio w gruncie do tuneli wieloprzewodowych. Tematowi temu autor poświęcił wiele miejsca w poprzednich pracach [45], [51], [56], [60], [64]. Stąd też, oraz wobec faktu, że techniki odkrywkowe są szeroko omówione w dostępnej literaturze technicznej, w pracy nie będą charakteryzowane [9], [44], [47], [51], [88]. Techniki bezodkrywkowe mogą obejmować pełną odnowę przewodów lub umożliwiać ich remonty w ograniczonym zakresie. Mogą być także stosowane do odnowy przewodów o dowolnych wymiarach i kształtach. Wymagają jednak użycia nowoczesnych metod, które w kraju nie są jeszcze dostatecznie znane. W zakresie odnowy pełnej techniki te polegają na wymianie przewodów lub wzmocnieniu i uszczelnieniu konstrukcji przewodów, a w zakresie odnowy niepełnej techniki umożliwiają:

- uszczelnienie przewodów,
- korektę niwelety przewodów,
- udrożnianie przewodów.

Przedstawiony podział technik uszczegółowiono na schemacie zilustrowanym na rys. 4.9.

Określenia w języku angielskim odpowiadają oryginalnym nazwom technik, a ich tłumaczenie mogłoby prowadzić do nieporozumień, uniemożliwiających identyfikację technik w literaturze zagranicznej. Wprowadzono ponadto mnemotechniczny, literowo-cyfrowy kod identyfikacyjny dla poszczególnych metod przypisanych odpowiednim technikom, co ma zwiększyć czytelność schematu i powiązać go z charakterystykami metod zaprezentowanymi w tabeli 4.2.

Charakterystyka metod odnowy
Characteristic of renovation methods

Kod metody	Charakterystyka robót	Zakres stosowania
1	2	3
WPM1 [72]	Metoda polega na wydrążeniu wzdłuż osi zniszczonego kanału otworu o wymaganej średnicy (przy użyciu tarczy) i wepchnięciu w to miejsce nowego przewodu. Tarcza drążąc otwór niszczy konstrukcję starego przewodu.	Przewody o ϕ 300-2000 mm, ze wszystkich materiałów.
WPM2 [73], [93]	Metoda polega na kruszeniu konstrukcji zniszczonego przewodu przy użyciu przeciąganej między studzienkami udarowej głowicy. Głowica przesuując się do przodu ciągnie nowy przewód (z PCW, modyfikowanego PE).	Rury do ϕ 600 mm, żeliwne, betonowe, kamionkowe, azbestocement.
RPM1 [10], [28], [32]	Metoda polega na wprowadzeniu do zniszczonego przewodu zaślepionego "rękawa" (poliesterowa rura impregnowana żywicą z warstwą poliuretanowej folii) i "przenicowaniu" go oraz dociśnięciu na odcinku między studzienkami, za pomocą parcia hydrostatycznego wlewanej wody. Utwardzenia powstałej wykładziny dokonuje się promieniami cieplnymi lub ultrafioletowymi.	Przewody o dowolnych kształtach przekroju i wymiarach od 100 do 2700 mm. Wszystkie rodzaje materiałów.
RPM2 [4]	Jw., lecz zamiast parcia hydrostatycznego jest używane sprężone powietrze, a materiałem renowacyjnym jest "rękaw" z żywicy epoksydowej utwardzony parą wodną.	Przewody ze stali, żeliwa, azbestocementu, betonu od 80 do 700 mm.
RPM3 [35]	Jak RPM1, ale z użyciem gorącej wody (70-90 °C). Materiałem renowacyjnym jest poliesterowy "rękaw" impregnowany żywicą, który zostaje utwardzony po ostygnięciu wody.	Rury i przekroje jajowe o wymiarach 100-1200 mm.

1	2	3
RPM4 [91]	Metoda polega na wprowadzeniu do zniszczonego przewodu ściśniętej w tzw. rolerze ustawionym obok studzienki rury z PEHD (zmniejszenie średnicy ca 10%). Powrót rury do pierwotnych wymiarów następuje (po zakończeniu jej wprowadzania) na skutek działania ciśnienia wlanej do przewodu wody.	Rury ϕ 250-600 mm z dowolnych materiałów.
RPM5 [2]	Metoda polega na wciąganiu do zniszczonego przewodu przewężonej (na skutek działania siły ciągnącej) rury z PEHD rozgrzanej do temperatury 70 °C w komorze cieplnej ustawionej obok wjazdu studzienki. Rura rozpręża się osiągając pierwotną średnicę i dociskając do ścianki przewodu po zakończeniu przeciągania. Utwardzenie następuje po schłodzeniu powłoki.	Rury ϕ 50-900 mm z dowolnych materiałów.
RPM6 [33], [66], [82]	Rib-Loc. Metoda polega na wprowadzaniu do wnętrza zniszczonego przewodu tuby ze spiralnie skręconej taśmy PCW z usztywniającymi żeberkami. Tuba jest tak formowana, że posuwa się do przodu. Między tubą a przewód iniektuje się zaczyn cementowy. Rib-Loc Expanda. Metoda Rib-Loc stosowana tylko wtedy, gdy niewskazane jest zbytne zmniejszanie średnicy modernizowanej rury. Po wprowadzeniu tuby jest ona dodatkowo dociśnięta (rozepchana) za pomocą przeciąganego między studzienkami mechanizmu rozpierającego.	Rury ϕ 200-800 mm z dowolnego tworzywa.
RPM7 [31], [33], [81], [93]	Metoda polega na wprowadzaniu do zniszczonego przewodu wykładziny z PEHD, polipropylenu i in. Wykładziny mogą być monolityczne (rury) lub łączone w studzience z krótkich elementów. Między wykładziną i przekrój iniektowana jest zaprawa cementowa.	Rury i przekroje o dowolnych kształtach (GRP) i wymiarach od 100-2600 mm.
RPM8 [1], [29], [61]	Metoda polega na wykonaniu na wewnętrznej powierzchni zniszczonego kanału warstwy zbrojonego lub niezbrojonego torkretu.	Przewody przełazowe z betonu i cegły.

cd. tabeli 4.2

1	2	3
UPM1 [68], [84]	Metoda polega na iniektowaniu materiału uszczelniającego (żywice, poliuretan) lub wzmacniającego konstrukcje (cement) bezpośrednio w miejsca nieszczelne lub pęknięte za pomocą ręcznych pistoletów.	Kanały przełączowe ze wszystkich materiałów.
UPM2 [7], [68], [93]	Jw., lecz przy użyciu zdalnie sterowanego pakera (ciągniętego przez wózek z kamerą TV).	Przewody od 250 do 600 mm.
UPM3 [6]	Metoda polega na zastosowaniu dwóch robotów (z głowicą skrawająco-wierzącą i z głowicą iniektującą). Pierwszy robot skrawa miejsce uszkodzone, nawierca otwór w płaszczu rury oraz czyści to miejsce parą wodną pod ciśnieniem 15 at. Drugi robot dokonuje iniekcji powierzchniowej (w miejscu zeskrwanym) oraz wgłębnej przez nawiercone otwory. Do uszczelnienia pęknięć stosowane są żywice podatne. Proces jest kontrolowany przy użyciu kamery TV.	Jw., z kamionki, betonu, żelbetu.
KNM1	Metoda polega na wykonaniu wewnątrz kanału nowej kinety o skorygowanym spadku (betony bazaltowe, PEHD i inne wykładziny trudno ścieralne).	Kanały przełączowe.
KNM2 [68]	Metoda polega na iniektowaniu z zewnątrz (kanały nieprzełączowe) lub z wewnątrz (kanały przełączowe) zaprawy (cementy, szkło wodne, żele) w podłoże posadowienia przewodu (forma petryfikacji) w celu jego wzmocnienia z ewentualną korektą spadków (podnoszenie kanału spowodowane ciśnieniem iniektu).	Wszystkie rodzaje przewodów.
CPM1	Metoda polega na usuwaniu strumieniem wodnym pod wysokim ciśnieniem depozytu gruntu, stwardniałych zapraw i inkrustracji, a nawet korzeni.	Kanały przełączowe (jetting), przewody nieprzełączowe (płukanie).
CPM2 [3], [7], [93]	Metoda polega na przepuszczaniu między studzienkami zdalnie sterowanego robota z głowicą skrawającą i kamerą TV. W razie potrzeby (w miejscu depozytu) robot rozpiera się o ścianki kanału za pomocą teleskopowych rozpieraków i rozpoczyna skrawanie depozytu. Skrawki usuwane - płuczką wodną.	Przewody φ 200-600 mm.

4.3.2. Charakterystyka metod odnowy

Liczba metod realizacji bezodkrywkowych technik odnowy jest tak duża, że niemożliwe jest omówienie wszystkich z nich. W pracy zestawiono zatem podstawowe charakterystyki tych metod, które na bazie doświadczeń wynikających z ich stosowania w krajach wysoko uprzemysłowionych [10], [25], [33], [68], [96] są uznane za najefektywniejsze. Zestawienia charakterystyk dokonano w tabeli 4.2.

Wobec zaprezentowanej w tabeli 4.2 mnogości metod realizacji bezodkrywkowych technik odnowy, każdorazowo w rzeczywistych warunkach eksploatacji powstanie problem wyboru najodpowiedniejszej metody dla ograniczeń wynikających z:

- rodzaju i skali destrukcji (uszkodzeń) przewodów,
- rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych przewodów,
- kształtów i wymiarów przekroju poprzecznego przewodów,
- zagłębienia i niwelety przewodów,
- sposobu podłączania przykanalików i częstości ich występowania,
- charakterystyki ścieków,
- technologiczności realizatorów odnowy (dostępność metod),
- potrzeby rezerwowania odnawianego przewodu,
- kosztów alternatywnych metod.

Znaczna liczba czynników determinujących racjonalny wybór metody może powodować, że inwestor (użytkownik sieci) stanie przed problemem decyzyjnym przekraczającym jego możliwości. Jeżeli zaś realizatorem odnowy jest wykonawca zewnętrzny (co często ma miejsce), użytkownik jest zdany na akceptację metody zaproponowanej przez wykonawcę, bez możliwości jej weryfikacji pod kątem przydatności technicznej. Optymalizacja technicznej strony rozwiązania jest tu o tyle wiodąca, że minimalizacji kosztu dokonuje się i tak w drodze przetargu między realizatorami odnowy.

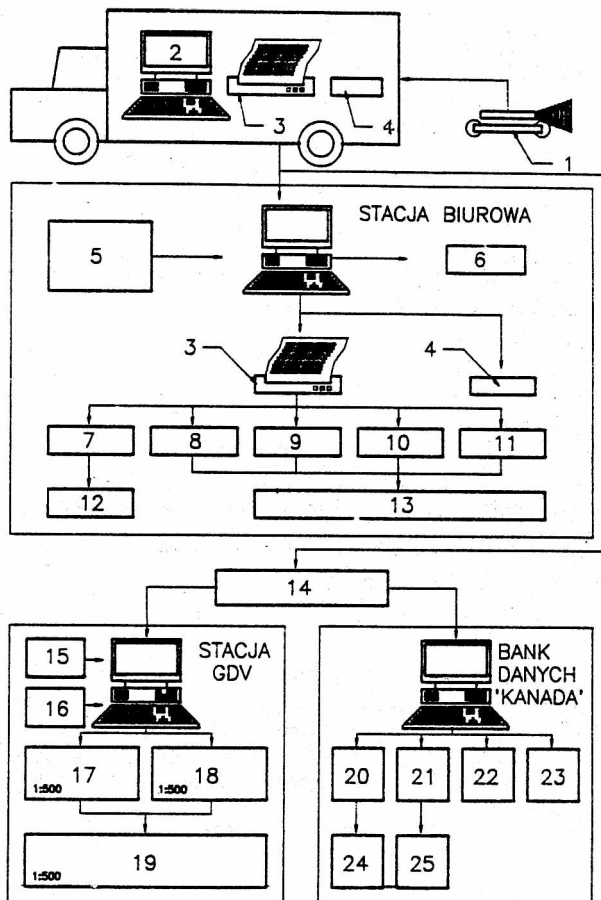
Wydaje się, że rozwiązanie problemu może ułatwić komputerowe wspomaganie decyzji oparte na systemach definiowanych jako programy, których zadaniem jest symulowanie ludzkiej ekspertyzy w określonej - na ogół wąskiej - dziedzinie. Zgodnie z tym założeniem problem wyboru metody może być rozwiązywany np. na drodze adaptacji systemu PC-SHELL v.1.1, który to system jest predysponowany do rozwiązywania problemów o charakterze diagnostycznym i klasyfikacyjnym oraz interpretacji danych. Składa się on z pięciu współpracujących modułów (sterującego, pozyskiwania wiedzy, wnioskującego, wyjaśnień, przeglądania bazy wiedzy) i może być uruchamiany w każdym komputerze kompatybilnym z IBM (XT, AT, 386), pracującym pod kontrolą systemu operacyjnego DOS.

4.3.3. Charakterystyka technik kontroli i diagnostyki

Kontrola i diagnostyka sieci mogą odbywać się techniką bezpośrednią (przez ludzkie oko) lub niebezpośrednią (z użyciem kamer telewizyjnych) [7], [11], [12], [99]. Ponieważ w obu przypadkach przyrządy nie są na stałe powiązane z siecią, z formalnego punktu widzenia techniki te kwalifikują się do technik ręcznych (nieautomatycznych). Metoda bezpośrednia jest najstarszą i w dalszym ciągu bardzo skuteczną metodą kontroli i diagnostyki. Podstawowym etapem tej metody jest inwentaryzacja uszkodzeń (z ewentualnym pobraniem próbek do badań laboratoryjnych), polegająca na wykonaniu dokumentacji graficznej, fotograficznej lub filmowej, albo wszystkich rodzajów zapisu. Inwentaryzacja jest wykonywana przez pracowników znajdujących się wewnątrz kanału, skąd wynika podstawowe ograniczenie stosowalności metody do kanałów przełączowych o średnicy nie mniejszej niż 800 mm. Przygotowany w czasie inwentaryzacji materiał stanowi dane wyjściowe dla analitycznej części metody opracowywanej w warunkach kameralnych. Diagnostyka bezpośrednia umożliwia lokalizację i opis wszystkich rodzajów uszkodzeń.

Odmianą metody bezpośredniej jest prowadzenie przeglądu przewodów ze studzienek kontrolnych, znajdujących się na sieci. Przewód jest oświetlony, a lokalizacji uszkodzeń i ich rozmiarów dokonuje się za pomocą luster. Sposób ten jest mało dokładny i umożliwia w praktyce kontrolę stanu przewodów w bezpośrednim sąsiedztwie studzienek. Można go natomiast stosować, gdy średnice przewodu są mniejsze od 800 mm. Prowadzenie kontroli metodą bezpośrednią (szczególnie we wnętrzach kanałów) wymaga zachowania określonych warunków, w celu zapewnienia bezpieczeństwa pracownikom, co powoduje wzrost kosztów i uciążliwość metody. Wprowadzenie ekipy do studzienki, a następnie kanału, odbywa się po uprzednim ich przewentylowaniu i analizie wyników pomiaru składu atmosfery wewnątrz sieci. Pracownicy powinni być ponadto wyposażeni w detektory gazu, pasy bezpieczeństwa podłączone do urządzeń wyciągowych, maski i butle tlenowe, radiotelefon oraz lampy i ubrania ochronne. Całość badań jest koordynowana z powierzchnią, przy czym niezależnie dokonuje się pomiaru składu atmosfery w studzienkach ograniczających kontrolowany odcinek. W razie zagrożenia podejmuje się stosowne działania zabezpieczające.

Za pomocą metody niebezpośredniej, używając techniki telewizyjnej (CCTV - Closed Circuit Television) można kontrolować przewody o średnicach mniejszych niż 800 mm lub dokonywać kontroli w warunkach zagrożenia, wykluczających obecność ludzi. CCTV umożliwia lokalizację i identyfikację uszkodzeń stosunkowo szybko i niedużym kosztem, zważywszy na liczebność personelu i warunki pracy. W związku z tym jest metodą najchętniej stosowaną do gromadzenia danych zarówno w celu wykonania napraw

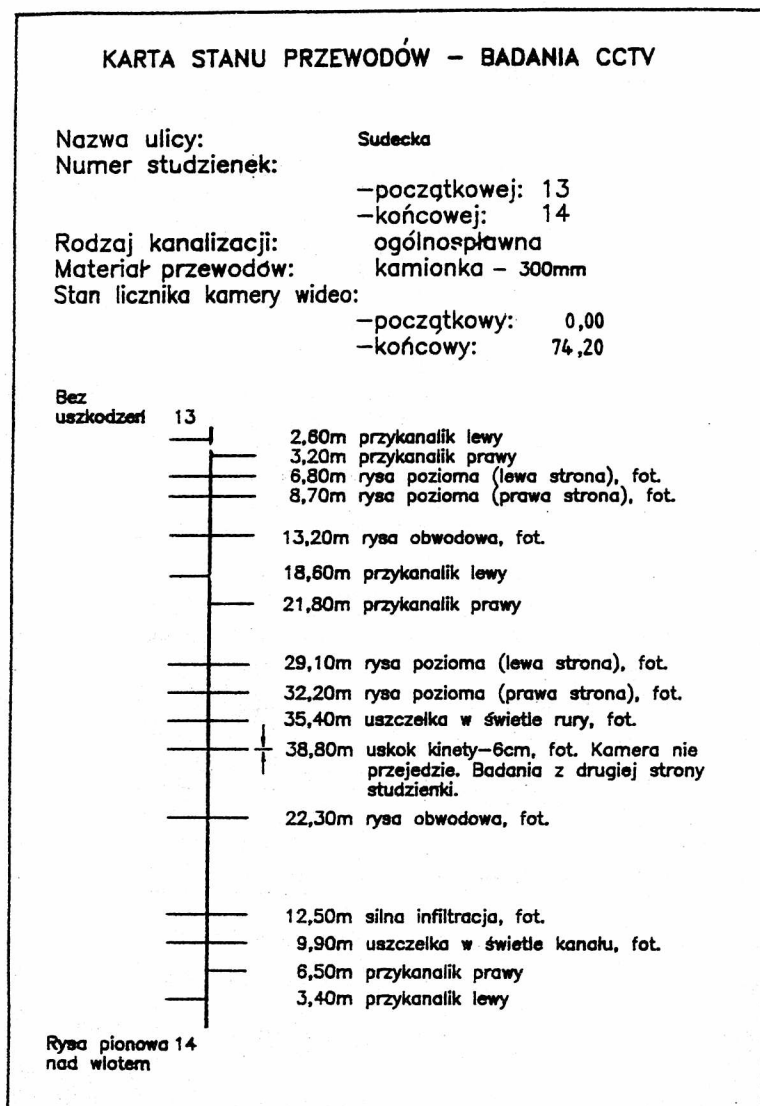


Rys. 4.10. Schemat przepływu danych z badań kontrolnych stanu przewodów [7]:

- 1 - kamera TV, 2 - baza danych, 3 - protokół roboczy, 4 - grafika stanów, 5 - baza "starych" danych, 6 - archiwizacja, 7 - sprawozdanie z badań, 8 - fotodokumentacja, 9 - bieżący video-protokół, 10 - ustalenia wymiarowe, 11 - baza grafiki stanów, 12 - protokół szkód, 13 - metoda odnowy, 14 - dalsze przetwarzanie danych, 15 - pomiar danych, 16 - dygitalizacja, 17 - plan kanalizacji, 18 - kataster działek, 19 - plan kanalizacji i kataster uszkodzeń, 20 - dyspozytornia danych, 21 - klasyfikacja szkód, 22 - obliczenia hydrauliczne, 23 - analiza kosztów, 24 - analiza statystyczna, 25 - strategia odnowy

Fig. 4.10. Flowchart of data gathered during control of the state of sewers [7]:

- 1 - TV camera, 2 - data base, 3 - a draft of work protocol, 4 - graphics of states, 5 - "old" data base, 6 - archiving, 7 - report about testing, 8 - photodocumentation, 9 - current video-protocol, 10 - rating of dimensions, 11 - states graphics base, 12 - damage report, 13 - renovation method, 14 - further data processing, 15 - data measurement, 16 - digitization, 17 - sewage system location plan, 18 - land register, 19 - sewage system location plan and damage register, 20 - data dispatching, 21 - damage classification, 22 - hydraulic calculation, 23 - cost analysis, 24 - statistical analysis, 25 - renovation strategy



Rys. 4.11. Wzór karty stanu przewodów określanego za pomocą systemu CCTV

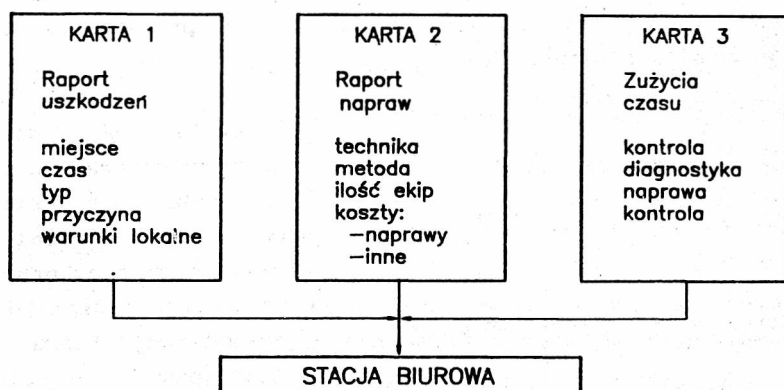
Fig. 4.11. Example of the state card of sewers, determined using CCTV

bieżących, jak i opracowania prognostycznych programów eksploatacji [7], [12]. [25], [54], [67]. Obecne rozwiązania sprzętowe umożliwiają w praktyce przegląd przewodów o średnicach od 100 do 1200 mm i długości do 300 metrów. Jest to zakres stosowalności, pozwalający praktycznie na kontrolę całego systemu, z wyjątkiem zbieraczy przełazowych, gdzie ze

względem na trudności oświetlenia tak dużych przekrojów kanału, użycie systemu może uniemożliwić identyfikację detali uszkodzeń.

Typowy zestaw kontrolny mieści się i jest obsługiwany w półciężarowym samochodzie. Część transmisyjna zestawu zawiera kamerę, wózek do przewożenia kamery, kable do zdalnego sterowania oraz jednostkę kontrolną, magnetowid, a także komputerowy system rejestracji i analizy wyników. Na rysunku 4.10 przedstawiono schemat przepływu danych stosowany w Niemczech [7].

Jak widać, system polega na etapowaniu analizy zgromadzonych informacji. Punktem wyjścia jest natychmiastowa rejestracja obrazu przekazywanego z umieszczonej w kanale kamery TV oraz sporządzanie protokołu roboczego i graficznej ilustracji stanu badanego odcinka sieci, której przykład przedstawiono na rys. 4.11. Wyniki rejestrowane są w samochodzie, na miejscu badań. Opracowane materiały oraz rejestr danych na dyskietce zostają przekazane do stacji biurowej, dysponującej "starymi" danymi o sieci. W stacji biurowej podejmuje się także decyzje o sposobie przeprowadzenia odnowy. Wzór karty informacyjnej zilustrowano na rys. 4.12.



Rys. 4.12. Karta informacji o odnowie

Fig. 4.12. Information card of renovation

Kataster stanu i uszkodzeń kanału w formie graficznej (skala 1:500) zostaje opracowany w stacji GDV po analizie i dygitalizacji dostarczonych ze stacji biurowej "starych" i "nowych" danych o sieci. System może być uzupełniony o przedstawiony na rys. 4.10 bank danych "Kanada", umożliwiający prowadzenie analiz statystycznych w celu optymalizacji odnowy, opartych na zestawianiu stanów kanałów z ich parametrami, z uwzględnieniem oceny stopnia zagrożenia implikowanego uszkodzeniem. Efektem przeszukiwań są listy priorytetów w celu racjonalnego wykorzystania ludzi i sprzętu. System umożliwia także prowadzenie analiz kosztów i obliczeń

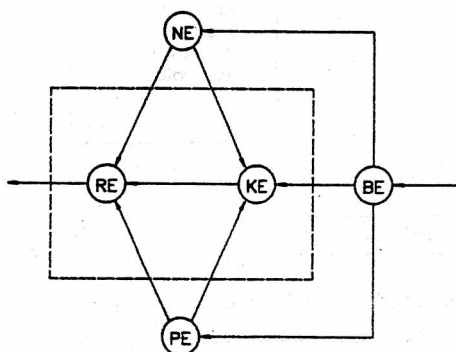
hydraulicznych. Jeśli brak jest banku danych "Kanada", to pakiet informacji ze stacji biurowej może być przekazany do wyspecjalizowanych instytutów w celu dokonania podobnych analiz.

4.4. Kształtowanie postępu eksploatacyjnego

4.4.1. Założenie i warunki ograniczające

Eksploatacyjną strategię rozwoju systemu można realizować tylko przez pobudzanie działań uczestników procesu eksploatacyjnego, do których w ogólności zaliczani są:

- realizatorzy procesu eksploatacji (użytkownicy, obsługa),
- kierownicy procesu eksploatacji (kierownicy użytkowania, kierownicy obsługi),
- nauczyciele kadr eksploatacyjnych,
- badacze procesów eksploatacji (badacze procesów użytkowania, badacze procesów obsługi, badacze procesów sterowania eksploatacją),
- projektanci systemów eksploatacji (projektanci systemów użytkowania, projektanci systemów obsługi, projektanci systemów kierowania eksploatacją).



Rys. 4.13. Trajektorie postępu eksploatacyjnego [78]: RE - realizator eksploatacji, KE - kierownik eksploatacji, NE - nauczyciel eksploatacji, BE - badacz eksploatacji, PE - projektant eksploatacji, SE - system eksploatacji

Fig. 4.13. Trajectory of maintenance run [78]: RE - maintenance contractor, KE - maintenance supervisor, NE - maintenance instructor, BE - maintenance researcher, PE - maintenance designer, SE - maintenance system

Rola wymienionych uczestników jest zróżnicowana, co prowadzi do ich podziału na dwie grupy: grupę wewnętrzną (realizatorzy i kierownicy) oraz grupę zewnętrzną (nauczyciele, badacze i projektanci). Każda z wymienionych grup ma określone zadania w realizacji postępu eksploatacyjnego, a sztuka inicjowania i rozwijania działań polega na pobudzaniu wybranego uczestnika i zapewnieniu warunków do przeniesienia efektów jego działań do bezpośredniego realizatora postępu, w eksploatowanych systemach. Trajektorie przepływu postępu eksploatacyjnego zilustrowano graficznie na rys. 4.13, a opisowo w tabeli 4.3.

Tabela 4.3

Trajektorie postępu eksploatacyjnego [78]
Trajectories of maintenance run [78]

Postęp	Nośnik	Strategia	Trajektoria
Wewnętrzny	realizator	racjonalizacja stanowisk eksploatacyjnych	RE
	kierownik	instrukcja	KE-RE
Zewnętrzny	nauczyciel	nawyki poradnik	NE-RE PE-KE-RE
	projektant	norma struktura	PE-RE PE-KE-RE
	<u>badacz</u>	zasady, metody: identyfikacji oceny optymalizacji	BE-NE-RE BE-PE-KE-RE BE-PE-RE

Przedstawione w pracy rozważania i wynikające z nich strategie odnowy przewodów, jako elementy kształtowania postępu eksploatacyjnego sieci, zawierają się w grupie zadań badaczy procesów eksploatacyjnych, a ściśle w grupie zadań badaczy procesów obsługiwanian. Kształtowanie procesu eksploatacyjnego polegające na wykorzystaniu zaproponowanych strategii wymaga ich przeniesienia do bezpośredniego użytkownika sieci. Aby to ułatwić, należałoby dokonać wyboru jednej spośród alternatywnych propozycji, a następnie optymalizacji obsługi w wybranej strategii. Zadania te są przedmiotem sterowania, którego podstawowym elementem jest system decyzyjny składający się z sytuacji decyzyjnych oraz kryteriów i algorytmów lub innych reguł rozwiązywania problemów.

Do analitycznej realizacji (uzyskiwania rozwiązań ścisłych) procesów decyzyjnych niezbędne są pakiety danych charakteryzujących wybrane obszary eksploatacji urządzeń, które są opisywane metodą "prób i błędów" opartą na doświadczeniu realizatora procesu eksploatacji, wynikających z badań eksploatacyjnych na obiektach rzeczywistych. Brak współpracy

między użytkownikami sieci a ich badaczami sprawił (co już w pracy podkreślono - punkt 1.3), że w kraju pomimo podejmowanych w tym kierunku inicjatyw ze strony badaczy [38], [39], nie ma reprezentatywnych pakietów danych. Uniemożliwia to wyłanianie optymalnych rozwiązań, opartych na wynikach obliczeń matematycznych lub metodach symulacyjnych, które również wymagają wprowadzenia do modelu danych z poprzedzających symulacje badań eksploatacyjnych. Dodatkowo, urealnienie wyników analiz ekonomicznych utrudnia w kraju nienaturalnie duża inflacja.

Wobec przedstawionych warunków ograniczających, w chwili obecnej do dyspozycji badacza pozostają jedynie heurystycznie ukierunkowane metody intuicyjne. W myśl takiego założenia do czasu powstania bazy danych umożliwiających weryfikację niektórych z przyjętych założeń teoretycznych, pozostaje przyjęcie a priori jednej z zaproponowanych strategii odnowy. A właściwie, wobec potrzeby intensyfikacji programu kontroli stanu dla celów badań eksploatacyjnych - strategii z kontrolą.

Słuszność takiego wyboru potwierdza zaobserwowany w kraju rozwój metod odnowy z elementem kontroli stanu prowadzonej przy użyciu techniki telewizyjnej, co praktycznie stanowi niezamierzoną inicjację takiej strategii [53], [54]. Podobnie jak odbywało się to kilka lat temu w krajach wysoko rozwiniętych [10], [25], [68], [96].

Wybór strategii odnowy bez weryfikacji decyzji opartej na wynikach eksploatacyjnych badań przewodów nie oznacza, że już teraz nie jest celowe przedstawienie:

- kryterium zmiany warunków eksploatacji,
- pomocniczych kryteriów oceny alternatywnych zakresów odnowy,
- ogólnych założeń modelu cyfrowej symulacji odnowy i optymalnej organizacji pracy konserwatorów,
- wyników próbnych obliczeń weryfikacyjnych przeprowadzonych na przykładzie po części intuicyjnie przyjętych wielkości liczbowych.

4.4.2. Kryterium zmiany warunków eksploatacji

Przez termin *warunki eksploatacji* są rozumiane wszelkie warunki, w jakich znajduje się sieć w trakcie jej użytkowania. Warunki te dzieli się na:

- obiektywne, niezależne od ludzi związanych z eksploatacją sieci (gruntowo-wodne, starzeniowe, chemiczne, obciążeniowe, hydrauliczne),
- subiektywne, zależne od ludzi związanych z obsługą sieci (kwalifikacje, doświadczenie, organizacja procesu eksploatacji, techniki odnowy).

Warunki subiektywne mają tę specyficzną cechę, że trudno je ująć w postaci analitycznej, a równocześnie decydują o jakości procesu eksploatacji, wpływając tym samym na niezawodność przewodów.

Zagadnieniem podstawowym jest tu kształtowanie rozkładu odnowy, który zależy przede wszystkim od sprawności jej przeprowadzenia i zastosowanych technik. Stąd też zwiększenie niezawodności sieci uzyskuje się dzięki stosowaniu coraz lepszych i "szybszych" metod realizacji odnowy, wymagających jednak wysoko kwalifikowanej kadry. Metody te to przede wszystkim metody związane z bezodkrywkową techniką odnowy i niebezpośrednią techniką kontroli oraz ze skomputeryzowanym systemem analizy i gromadzenia danych.

Nowe warunki eksploatacji uzyskuje się jednak kosztem dodatkowych nakładów inwestycyjnych, wobec czego powstaje istotny problem gospodarczy, w jakim stopniu nakłady te są opłacalne i do jakiego stopnia mogą być zwiększane. Implikuje to konieczność zastosowania optymalizacyjnego rachunku ekonomicznego, obejmującego koszty ponoszone na poprawę niezawodności sieci wymienionymi sposobami.

Przedmiotem analizy jest więc koszt zakupu sprzętu do realizacji bezodkrywkowych metod odnowy, koszt przeszkolenia personelu oraz koszt merytoryczno-sprzętowej organizacji bazy danych i komputeryzacji analizy wyników. Zakłada się, że znane są:

- funkcja intensywności uszkodzeń obiektów w obecnych warunkach ich eksploatacji w postaci wartości dyskretnych $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$,
- odpowiednia funkcja dla obiektów w przypadku zmiany warunków eksploatacji $\lambda'_1, \lambda'_2, \dots, \lambda'_n$,
- koszty zakupu urządzeń związanych z obecną eksploatacją K_n ,
- koszty zakupu urządzeń i szkolenia załogi, wynikające ze zmiany warunków eksploatacji $K'_n > K_n$,
- średnie koszty zawodności w obecnych i nowych warunkach eksploatacji k_z i k'_z ,
- spodziewane czasy użytkowania sieci $E(t)$ i $E(t)'$, wynikające z przyjętych okresów amortyzacji.

Dla powyższych założeń możliwe jest sformułowanie dwóch zależności, określających odpowiednio koszty roczne sieci z uwzględnieniem rachunku dyskonta (lecz bez kosztów eksploatacyjnych) wariantu obecnego i wariantu z nowym wyposażeniem eksploatacyjnym [87]

$$K_r = [K_n + k_z \sum_{i=1}^{i=E(t)} \lambda_i (1+p)^{-i}] r[E(t)], \quad (4.16)$$

$$K'_r = [K'_n + k'_z \sum_{i=1}^{i=E(t')} \lambda'_i (1+p)^{-i}] r[E(t')]. \quad (4.17)$$

Zakładając większą niezawodność drugiego wariantu $K'_r < K_r$ otrzymujemy nierówność, będącą kryterium opłacalności zmiany warunków eksploatacji

$$K_n' < [K_n + k_z \sum_{i=1}^{i=E(T)} \lambda_i (1+p)^{-i}] \frac{r[E(T)]}{r[E(T')]} - k_z' \sum_{i=1}^{i=E(T')} \lambda_i' (1+p)^{-i}. \quad (4.18)$$

Jeżeli w wyniku zmiany warunków eksploatacji oprócz poniesionych kosztów stałych K_n i K_n' wystąpią znaczące różnicowania w kosztach eksploatacji bieżącej (wynikające z nowych metod odnowy, systematycznej kontroli stanu sieci itp.), to koszty te należy uwzględnić, stosując zmodyfikowane kryterium opłacalności

$$K_n' < [K_n + \sum_{i=1}^{i=E(T)} (k_z \lambda_i + k_{ei}) (1+p)^{-i}] \frac{r[E(T)]}{r[E(T')]} - \sum_{i=1}^{i=E(T')} (k_z' \lambda_i' + k_{ei}') (1+p)^{-i}, \quad (4.19)$$

w którym k_{ei} - koszty eksploatacyjne w obecnych warunkach,
 k_{ei}' - koszty eksploatacyjne w nowych warunkach.

4.4.3. Kryterium wyboru zakresu odnowy

Prawidłowy wybór zakresu odnowy ma podstawowe znaczenie dla kosztów utrzymania przewodów. Celowość remontu (niepełnej odnowy) czy wymiany przewodów lub ich rekonstrukcji (odnowa pełna) musi być uzasadniona rachunkiem ekonomicznym, z wyjątkiem przypadku, gdy skala uszkodzenia jednoznacznie determinuje rodzaj odnowy. W sytuacjach niejednoznacznych każdorazowo nasuwa się pytanie, czy zamiast remontu, który także jest kosztowny i powoduje, że obiekt po remoncie jest bardziej podatny na uszkodzenia i ma nieraz gorsze parametry eksploatacyjne, nie opłaca się zastosować z reguły droższej, lecz całkowicie zmieniającej stan przewodów odnowy pełnej. W związku z przedstawionymi wątpliwościami konieczne jest sformułowanie kryterium ekonomicznego, w celu podjęcia jednoznacznie uzasadnionych decyzji.

Jako kryterium określające opłacalność typu odnowy należy przyjąć porównanie jej kosztów dla dwóch wariantów:

- odnowy niepełnej - ON,
- odnowy pełnej - OP.

Zdyskontowane na rok zerowy koszty odnowy niepełnej dla k -letniego czasu użytkowania sieci wyraża wzór [87]

$$K_{ON}(k) = k_{ON} \sum_{i=1}^{i=k} u_i' (1+p)^{-i}, \quad (4.20)$$

gdzie: k_{ON} - koszt odnowy niepełnej,
 u_i' - prawdopodobieństwo odnowy w i -tym roku użytkowania przy strategii odnowy niepełnej, określone wyrażeniem

$$u_i' = f_i^x + f_{i-1}^x u_1' + f_{i-2}^x u_2' + \dots + f_1^x u_{i-1}', \quad (4.21)$$

w którym $f_1^x, f_2^x, \dots$ - wartości dyskretne częstości uszkodzeń obiektów po remoncie (odnowie niepełnej), w kolejnych latach eksploatacji.

Analogicznie koszty odnowy pełnej wyraża formuła

$$K_{OP}(k) = k_{OP} \sum_{i=1}^{i=k} u_i (1+p)^{-i}, \quad (4.22)$$

gdzie: k_{OP} - koszt odnowy pełnej,

u_i - prawdopodobieństwo odnowy w i -tym roku użytkowania przy strategii odnowy pełnej, określone wyrażeniem

$$u_i = f_i + f_{i-1} u_1 + f_{i-2} u_2 + \dots + f_1 u_{i-1}, \quad (4.23)$$

w którym $f_1, f_2, \dots$ - wartości dyskretne częstości uszkodzeń po odnowie pełnej w kolejnych latach eksploatacji.

Kryterium opłacalności odnowy pełnej jest spełnione, jeżeli zachodzi warunek

$$K_{OP}(k) < K_{ON}(k), \quad (4.24)$$

co jest równoważne z faktem, że odnowa pełna wymaga mniejszych kosztów.

W praktyce bardzo często preferuje się pogląd, że $K_{OP}(k) > K_{ON}(k)$, wynikający z faktu, że koszty odnowy pełnej są przeważnie wyższe niż koszty remontów $k_{OP} > k_{ON}$. Jednocześnie jednak zachodzi druga relacja $f < f^x$ potwierdzająca zasadę, że awaryjność elementów remontowanych jest większa od awaryjności elementów po odnowie pełnej. Orzekanie o kosztach bez przeprowadzenia ich rachunku dla planowanego okresu eksploatacji jest zatem niemożliwe.

4.4.4. Założenia dla modelu cyfrowej symulacji odnowy przewodów

W pracy przedstawiono alternatywne strategie odnowy przewodów, których wprowadzenie do eksploatacji ma na celu jej udoskonalenie. Teoretycznie można jednak założyć, że żadna ze strategii nie przyniesie spodziewanych efektów ekonomicznych i użytkownicy sieci pozostaną przy dotychczasowej polityce eksploatacyjnej. Uwzględnienie takiego założenia ma na celu obiektywizację wyników oceny efektywności wprowadzanej strategii.

Podstawę budowy modeli cyfrowych procesów eksploatacji urządzeń technicznych stanowią bazy danych z badań eksploatacyjnych, służące do

stworzenia modelu reprezentatywnego [77], [78]. Dodatkowo, bazy danych technicznych uzupełniają zbiory informacji o kosztach eksploatacyjnych i różnych wielkościach niemierzalnych wpływających na proces. W przedmiotowym przypadku uważa się, że materiały powinny być gromadzone przez użytkownika sieci (przedsiębiorstwa wodociągów i kanalizacji) lub na jego zlecenie przez badacza procesów eksploatacji (instytuty naukowe). Na podstawie wyników takich badań zostaną utworzone reprezentatywne zbiory przewodów, dla których będą wyznaczone niezbędne charakterystyki niezawodnościowe, koszty oraz klasyfikacje i opisy wielkości niemierzalnych. Istnieje jednak obawa, uzasadniona wnioskami z poprzednich opracowań [38], [39], że gromadzenie danych nie będzie możliwe bez zarządzeń obligujących użytkowników sieci do działań w tym kierunku.

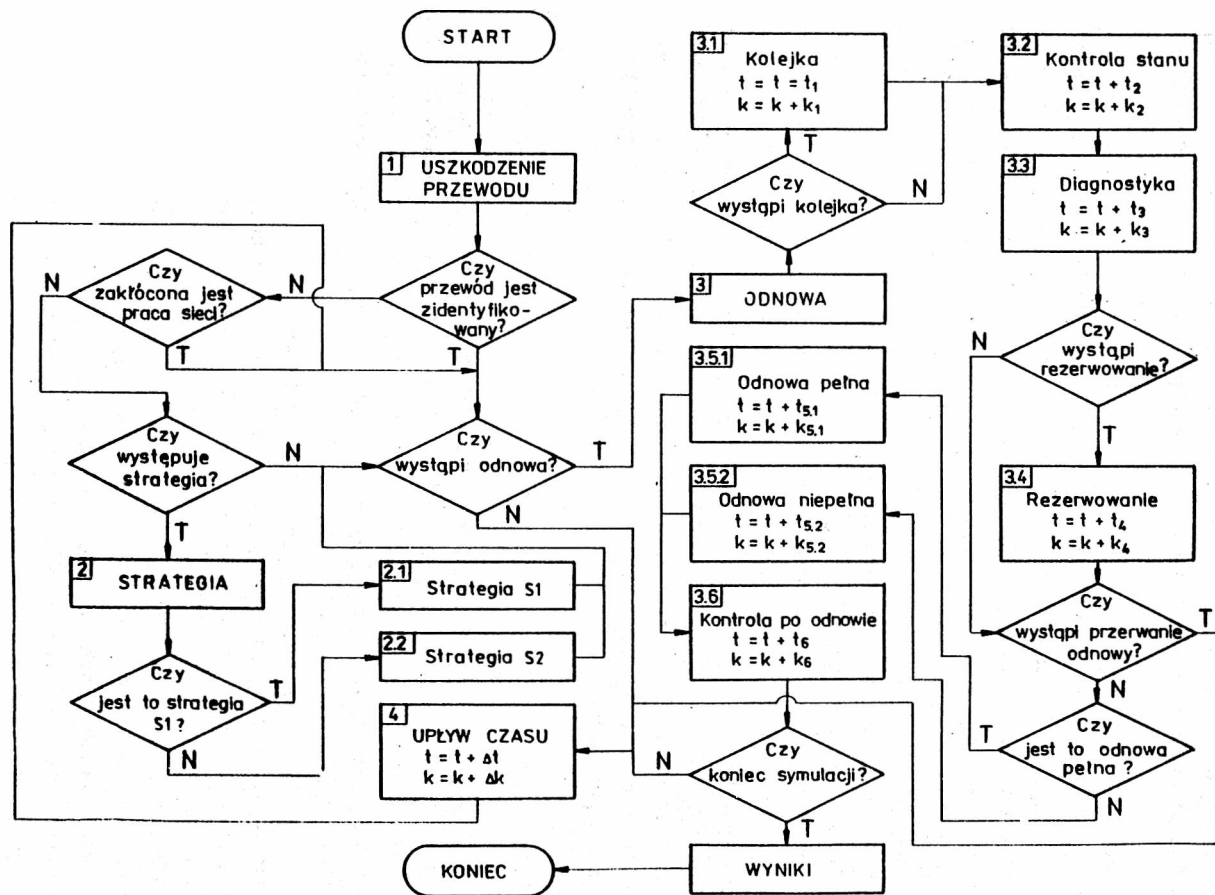
Algorytm modelu jest oparty na metodzie kolejnych zdarzeń, zaproponowanej dla modelu cyfrowej symulacji procesu eksploatacyjnego silnika [77]. Schemat algorytmu skonstruowano modelując układ pytań i zdarzeń wynikających z uszkodzenia przewodu, jako zdarzenia inicjującego potencjalną odnowę, według jednej z przyjętych w modelu strategii. Wyróżniono cztery zdarzenia podstawowe (które są odpowiedziami na zadane przez użytkownika sieci pytania):

- zdarzenie 1: uszkodzenie przewodu,
- zdarzenie 2: strategia,
- zdarzenie 3: odnowa,
- zdarzenie 4: upływ czasu.

Zdarzenia podstawowe nr 2 i nr 3 implikują (wynikające z podjętych decyzji i organizacji odnowy) występowanie zdarzeń wtórnych oznaczonych na schemacie algorytmu szczegółowego podwójnymi i potrójnymi indeksami cyfrowymi. Zdarzeniami tymi są:

- zdarzenie 2.1.: strategia S1 (strategia z optymalnym okresem prewencji),
- zdarzenie 2.2.: strategia S2 (strategia z kontrolą),
- zdarzenie 3.1.: kolejka,
- zdarzenie 3.2.: kontrola stanu,
- zdarzenie 3.3.: diagnostyka,
- zdarzenie 3.4.: rezerwowanie,
- zdarzenie 3.5.1.: odnowa pełna,
- zdarzenie 3.5.2.: odnowa niepełna,
- zdarzenie 3.6.: kontrola po odnowie.

Schemat opisanego modelu zilustrowano na rys. 4.14.



Rys. 4.14. Ideowy schemat blokowy algorytmu sterowania procesem odnowy
 Fig. 4.14. Schematic block diagram of an algorithm of the renovation process control

Przedstawiony schemat algorytmu ma umożliwić eksperymentatorowi (w założeniu użytkownikowi sieci) przeprowadzanie systemem zerojedynkowym ($0 = N$, $1 = T$) analizy kosztów odnowy w zależności od podjętych decyzji eksploatacyjnych. Użytkownik może określać zmiany kosztów, implikowane wprowadzeniem jednej z zaproponowanych strategii odnowy i porównywać je z kosztami obecnie stosowanej polityki eksploatacyjnej. Może także porównywać koszty obu strategii i na tej podstawie dokonać wyboru strategii efektywniejszej. Możliwe jest ponadto określanie kosztów, jakie wynikają z nieodnawiania lub przerywania odnowy po diagnostyce, bądź rezerwowaniu. Narzędziem sterowania są decyzje użytkownika (zdeteterminowane) wyrażające się:

- przyjęciem lub odrzuceniem strategii,
- podjęciem lub niepodjęciem odnowy,
- zakończeniem lub przerywaniem odnowy,
- doborem czasu symulacji.

Założenia dla modelu zostały tak sformułowane, że zarówno niepodjęcie odnowy jak i jej przerywanie uniemożliwia zakończenie symulacji. Powoduje to, że koszty wynikające z działania uszkodzonego przewodu są naliczane do czasu wykonania odnowy, niezależnie od woli użytkownika. Wprowadzenie takiego trybu pracy modelu ma na celu uniemożliwienie zniekształcenia rachunku kosztów, polegającego na pomijaniu kosztów zawodności przewodów.

4.4.5. Założenia dla optymalnej organizacji odnowy

W rozdziale 2.5.1 omówiono teoretyczne podstawy procesu uszkodzeń i odnowy systemu złożonego z N niezależnie obsługiwanych przewodów przez k' ekip remontowych (umownie nazwanych konserwatorami). Pokazano, że w dowolnym momencie czasu $t \geq 0$ system znajduje się w jednym ze stanów $n \in S_n$, gdzie $S_n = \{0, 1, 2, \dots, N\}$.

Zagadnienie optymalnej organizacji odnowy sprowadza się w takich przypadkach do minimalizowania oczekiwanego czasu przestoju i oczekiwanego kosztów odnowy. Techniczne rozwiązanie pierwszego problemu jest możliwe w wyniku:

- zmniejszenia oczekiwanego czasu przestoju (maksymalizowanie współczynnika gotowości), przez intensyfikację odnowy μ ,
- zwiększanie liczby konserwatorów k' .

Wymienione działania nie prowadzą jednak do optymalnej organizacji odnowy, bez uwzględnienia związanych z nią kosztów, gdyż mogą spowodować, że koszty zatrudnienia i wyposażenia konserwatorów przewyższą korzyści, wynikające z niezawodnej pracy przewodów. W rozdziale tym wykazano, że w rozwiązaniu problemu organizacji odnowy z uwzględnieniem jej kosztów

może być wykorzystane zadanie optymalizacji procesu Markowa z wypłatą [42].

Niech K_n oznacza dochód otrzymany w jednostce czasu pracy przewodów będących w stanie 0 (pracują wszystkie przewody). Prawdopodobieństwo P_n znalezienia się przewodów w n -tym stanie w okresie stacjonarnym (po długim czasie funkcjonowania) zależy od liczby konserwatorów k' . Jeżeli liczba ta jest równa liczbie przewodów $k' = N$, to już w chwili uszkodzenia dowolnego przewodu rozpoczyna się jego odnowa z intensywnością $\mu_n = n \mu$, co oznacza równoczesne odnawianie wszystkich uszkodzonych przewodów. W praktyce jest to niemożliwe ze względów ekonomicznych, a przewody są obsługiwane przez konserwatorów, których liczba zawiera się w przedziale $1 \leq k' < N$. Intensywność przejścia ze stanu n do stanu $n-1$ określa wtedy równanie

$$\mu_n = \begin{cases} n\mu & \text{dla } 1 \leq n \leq k' \\ k'\mu & \text{dla } k' \leq n \leq N. \end{cases} \quad (4.25)$$

Oznacza to, że jeśli przewód zostanie uszkodzony w momencie, gdy nie wszyscy konserwatorzy są zajęci, jego odnowa zaczyna się natychmiast. Przewody uszkodzone w czasie, gdy wszyscy konserwatorzy są zajęci, muszą oczekiwać na rozpoczęcie odnowy w kolejce (zdarzenie (3.1) w modelu odnowy). Takiemu typowi uszkodzeń i odnowy można przyporządkować model masowej obsługi typu $M/M/k' : (N, N-k')$, co wynika z założenia, że czas życia przewodów i czas ich odnowy są zmiennymi losowymi o rozkładzie wykazującym zgodność z rozkładem wykładniczym (porównaj p. (2.5.2)), a liczba konserwatorów k' jest liczbą aparatów obsługi. Prawdopodobieństwa poszczególnych stanów sieci przewodów dla takiego modelu określono zależnościami (2.32) i (2.33).

Przy ustalonej liczbie przewodów N wchodzących w skład sieci, znanej intensywności ich uszkodzeń λ i znanej intensywności odnowy μ , prawdopodobieństwo P_n można traktować jako funkcję k' , czyli $P_n(k')$ dla $k' = 1, 2, \dots, n$. Oczekiwanym dochodem z niezawodnej pracy sieci w jednostce czasu okresu stacjonarnego jest wtedy $\sum_{n=0}^N K_n P_n(k')$. Jeżeli przypadający na jednostkę czasu koszt zatrudnienia konserwatora oznaczy się przez k_k oraz przez $K(k')$ oczekiwany dochód netto w jednostce czasu przy liczbie konserwatorów k' , to

$$K(k') = \sum_{n=0}^N K_n P_n(k') - k_k k', \quad (4.26)$$

dla $k' = 1, 2, \dots, N$.

Z równania tego wynika optymalizacyjne kryterium organizacji obsługi w sensie techniczno-ekonomicznym, które można wyrazić równaniem

$$K(k^0) = \max_{k' = 1, 2, \dots, N} \{K(k')\} \quad (4.27)$$

gdzie k^0 - liczba konserwatorów (ekip remontowych) maksymalizująca oczekiwany dochód w okresie stacjonarnym.

W przedstawionych rozważaniach przyjęto, że ekipy remontowe pracują niezależnie z jednakową intensywnością. Oznacza to, że każda z ekip samodzielnie z intensywnością μ wykonuje odnowę uszkodzonych przewodów. W pewnych przypadkach może jednak zaistnieć potrzeba organizacji odnowy opierającej się na współpracy ekip, gdyż przy umiejętnym podzieleniu zadań intensywność pracy kilku ekip może być większa od sumy intensywności każdej z nich z osobna.

W takim modelu organizacji odnowy różnym wariantom współpracy brygad odpowiadają różne intensywności μ_n przejścia procesu uszkodzeń i odnowy ze stanu n do $n-1$.

Każdemu w -temu wariantowi organizacji współpracy między ekipami remontowymi przyporządkować można macierz A_j intensywności przejść przewodów ze stanu n do stanu $n-1$ lub stanu $n+1$, gdzie $j = 1, 2, \dots, w$. Elementy takiej macierzy przy założeniu, że analizowany proces Markowa jest procesem urodzin i śmierci, określa równanie

$$a_{ni}^{(j)} = \begin{cases} (N - n)\lambda & \text{dla } n = 0, 1, \dots, N - 1; \quad i = n + 1 \\ \mu_n^{(j)} & \text{dla } n = 1, 2, \dots, N; \quad i = n - 1 \\ -\mu_n^{(j)} - (N - n)\lambda & \text{dla } n = 0, 1, \dots, N; \quad i = n \\ 0 & \text{dla pozostałych } N; \quad i \in S, \end{cases} \quad (4.28)$$

przy czym $\mu_0 = 0$.

Zakładając, że znany jest koszt wynikający z przejścia sieci ze stanu n do stanu $n+1$ (uszkodzenie $n+1$ -szego przewodu), przejścia ze stanu n do stanu $n-1$ (odnowa jednego z n uszkodzonych przewodów) lub pozostania w stanie n , dla każdego z w rozważanych wariantów obsługi, można utworzyć macierz K_j z kosztów odpowiadających j -temu wariantowi, dla $j = 1, 2, \dots, w$. W takim razie dowolny wariant organizacji odnowy jest określany przez dwójkę macierzy A_j i K_j , a wybór optymalnej organizacji odnowy sprowadza się do wyboru jednej z tych par. Odpowiada to problemowi optymalizacji procesu Markowa z wypłatą (kosztami odnowy). Zadanie można rozwiązywać metodą Howarda [42], co umożliwia wyłonienie

sposobu organizacji odnowy o minimalnych oczekiwanych kosztach w długim okresie czasowym.

Jak wykazały przeprowadzone rozważania, problem wyboru optymalnej organizacji odnowy przewodów nie jest problemem metodologicznym, gdyż możliwe jest tu wykorzystanie gotowych modeli matematycznych, lecz wynika z braku niezbędnego do jego rozwiązania pakietu danych z eksploatacyjnych badań przewodów.

4.4.6. Przykład liczbowy

Rozważono koszty odnowy przewodu kanalizacyjnego o długości 1 km w okresie $T = 50$ lat. Porównano koszty strategii z optymalnym okresem odnowy (S_1) i strategii z kontrolą (S_2), z ustalonym a priori 10-letnim okresem między kontrolami, przy pierwszej kontroli w 25. roku eksploatacji przewodu. Założono także, że po każdej kontroli są usuwane na bieżąco zidentyfikowane w jej wyniku uszkodzenia (odnowa niepełna).

Obliczenia wykonano dla przewodu z rur betonowych, kielichowych o średnicy 300 mm uszczelnionych zaprawą cementową, ułożonego na głębokości ca' 3,00 m w wykopie skarpowym wykonanym mechanicznie w gruncie kat. III. Założono, że znane są:

$K_{n0} = 1500 \cdot 10^6$ zł/km - nakłady inwestycyjne [100],

$K_{zi} = 15 \cdot 10^6$ zł/uszk. - średnie koszty napraw uszkodzeń w poszczególnych latach użytkowania przewodu, powiększone o koszty zawadności i jednakowe z wyjątkiem lat, w których przez ich zwiększenie uwzględniono koszty kontroli i odnow niepełnych (przy strategii S_2):

$K_{z25} = 50 \cdot 10^6$ zł/uszk.,

$K_{z35} = 100 \cdot 10^6$ zł/uszk.,

$K_{z45} = 150 \cdot 10^6$ zł/uszk.,

λ_i - intensywności uszkodzeń, wg wartości zestawionych w tab. 4.4,

$$\frac{1}{a \cdot km},$$

$p = 0,008$ - stopa akumulacji.

W analizie porównawczej kosztów dla obu strategii posłużono się zależnością (4.2), określającą uśrednione za pomocą rachunku dyskonta koszty roczne przewodu $K_r(T)$, w mln. zł/rok.

Jak wynika z obliczeń, optymalną chwilą T_{opt} dla wykonania pełnej odnowy w przypadku strategii S_1 , jest koniec 40. roku eksploatacji przewodu, gdyż wtedy funkcja określona równaniem (4.2) osiąga minimum.

Odnowianie przewodu w latach kontroli powoduje znaczne skokowe zmiany wartości λ_i w latach następujących po odnowie, w wyniku czego koszty roczne $K_r(T)$ przy tej strategii osiągnęły minimum dopiero w 49. roku użytkowania. Oznacza to, że odnowa pełna przewodu przy strategii z kontrolą (S_2) powinna być wykonana pod koniec tego roku.

Tabela 4.4

Wyniki obliczeń kosztów rocznych przewodu
Calculation of annual costs of sewers

i	λ_i		$K_r(T)$		i	λ_i		$K_r(T)$	
	S1	S2	S1	S2		S1	S2	S1	S2
1	0,30	0,30	1624,35	1624,35	26	0,40	0,16	141,92	142,61
2	0,18	0,18	844,61	844,61	27	0,42	0,17	140,52	140,83
3	0,08	0,08	584,71	584,71	28	0,48	0,19	139,32	139,24
4	0,07	0,07	455,09	455,09	29	0,56	0,22	138,53	138,04
5	0,06	0,06	377,53	377,53	30	0,60	0,26	137,72	136,85
6	0,05	0,05	326,14	326,14	31	0,65	0,28	137,11	135,85
7	0,06	0,06	288,10	288,10	32	0,67	0,34	136,44	134,89
8	0,07	0,07	262,47	262,47	33	0,74	0,38	135,99	134,14
9	0,08	0,08	241,27	241,27	34	0,76	0,40	135,82	133,65
10	0,09	0,09	224,78	224,78	35	0,81	0,45	135,74	136,07
11	0,10	0,10	211,31	211,31	36	0,87	0,17	135,40	134,89
12	0,11	0,11	200,25	200,25	37	0,92	0,22	135,32	134,02
13	0,12	0,12	191,15	191,15	38	0,94	0,25	135,16	133,17
14	0,13	0,13	183,26	183,26	39	1,01	0,30	134,97	132,34
15	0,14	0,14	176,73	176,73	40	1,08	0,34	<u>135,11</u>	131,83
16	0,15	0,15	170,95	170,95	41	1,12	0,37	135,20	131,32
17	0,16	0,16	166,07	166,07	42	1,20	0,41	135,25	130,81
18	0,17	0,17	161,82	161,82	43	1,28	0,45	135,75	130,64
19	0,19	0,19	158,02	158,02	44	1,37	0,47	136,28	130,47
20	0,20	0,20	154,67	154,67	45	1,45	0,51	136,14	135,00
21	0,22	0,22	151,80	151,80	46	1,52	0,20	136,52	134,02
22	0,26	0,26	149,26	149,26	47	1,63	0,25	137,66	133,70
23	0,28	0,28	147,03	147,03	48	1,77	0,35	138,03	132,84
24	0,34	0,34	145,01	145,01	49	1,94	0,47	138,83	<u>132,07</u>
25	0,36	0,36	143,29	144,38	50	1,98	0,67	139,51	132,19

Analiza zawartych w tabeli 4.4 wartości liczbowych może sprawiać wrażenie, że różnice między kosztami nie są duże, w związku z czym nieznaczne są także oszczędności z tytułu wprowadzenia jednej z zaproponowanych w pracy strategii odnowy. Odczucie to nie jest prawdziwe, gdyż zdyskontowane oszczędności, w porównaniu z nieprogramową eksploatacją przewodu do końca okresu T , wyniosą odpowiednio:

$$K_{S1} = 50 (139,51 - 135,11) = 220 \cdot 10^6 \text{ zł/km (co stanowi 14,6\% nakładów inwestycyjnych)}$$

$$K_{S2} = 50 (139,51 - 132,07) = 372 \cdot 10^6 \text{ zł/km (co stanowi 24,8\% nakładów inwestycyjnych)}.$$

5. PODSUMOWANIE

W rozprawie przeanalizowano najważniejsze problemy, związane z programową odnową przewodów kanalizacyjnych. Pierwszy problem obejmuje teoretyczne podstawy do sformułowania założeń i kryteriów optymalizacji odnowy, jako najważniejszego elementu procesu eksploatacji. W ramach przedstawionej w rozdziale drugim analizy tego problemu, opierając się na znanych modelach teorii niezawodności i odnowy, wykonano sformalizowane opisy cech sieci i oddziałujących na nie wymuszeń, zdefiniowano pojęcia: uszkodzenie, niezawodność i odnowa oraz ich parametry. Ta część pracy zawiera również niezawodnościową identyfikację systemu, macierz przejścia, a także zasady estymacji parametrów, niezbędnej do przyspieszonego wnioskowania na podstawie danych z badań eksploatacyjnych rzeczywistych obiektów. Wykorzystanie znanych modeli teorii niezawodności i odnowy jest zgodne z tezą pracy. Oryginalnym elementem jest natomiast sposób zastosowania tych modeli do opisu odnowy przewodów sieci kanalizacyjnych.

Drugi z rozważanych problemów dotyczy metody wartościowania rozwiązań i wielkości niemierzalnych. Przyjęto zasadę wartościowania rozwiązań według kryteriów ekonomicznych (kosztów) oraz zasady szeregowania wielkości niemierzalnych ze względu na założone kryteria nieostre.

Zagadnienie rozwiązano korzystając z metody kosztów rocznych w rachunku ekonomicznym oraz z modeli teorii zbiorów rozmytych dla wartościowania wielkości niemierzalnych. Oryginalnymi elementami tej części pracy są:

- uwzględnienie kosztów zawadności funkcjonowania sieci oraz przedstawiona analiza ich struktury,

- próba zastosowania teorii zbiorów rozmytych, która - zdaniem autora - może prowadzić do nadania realnych wymiarów analizom techniczno-ekonomicznym, wymagającym uwzględniania wielkości niemierzalnych.

Trzeci problem dotyczy praktycznych możliwości wykorzystania przedstawionych w pracy rozważań teoretycznych. Problemowi temu poświęcono czwarty rozdział pracy, w którym zaprezentowano propozycje dwóch strategii odnowy przewodów kanalizacyjnych, wykaz i charakterystykę wiodących w świecie technik i metod odnowy, procedury pomocnicze dla procesu decyzyjnego oraz ideowy schemat algorytmu odnowy. Jako pierwszą omówiono strategię prewencyjną z optymalnym okresem prewencji T_{opt} . Funkcje celu sformułowano uwzględniając intensywność uszkodzeń λ

a za kryterium optymalizacji przyjęto minimum kosztów. Określono także warunki stosowalności strategii wskazując na fakt, że wobec nieznanomości procesu eksploatacji sieci kanalizacyjnych, strategia ta nie może być obecnie wykorzystana.

W dalszej części zaprezentowano strategię z kontrolą, której podstawowy element (kontrola stanu) jest także głównym elementem wszelkich badań eksploatacyjnych, dotyczących obiektów rzeczywistych. Oryginalnym rozwiązaniem jest propozycja programu kontroli ze zmiennym, każdorazowo dopasowywanym do potrzeb współczynnikiem dokładności q oraz zmieniającej się w przedziałach czasu, ograniczonych remontami kapitalnymi, krotności kontroli. Zdaniem autora, taki program kontroli będzie najefektywniejszy zarówno pod względem minimalizowania uciążliwości, jakie wiążą się z jej prowadzeniem, jak i możliwości powiązania krotności kontroli z procesem starzenia się sieci.

Zagadnieniom stricte technicznym poświęcono część pracy, w której przedstawiono syntetyczną charakterystykę technik odnowy, jakie są obecnie najczęściej stosowane w krajach wysoko rozwiniętych i jakie zaczynają być i niewątpliwie będą stosowane także w Polsce. Wskazano na możliwość adaptacji systemu ekspertowego PC-SCHELL v.1.1. dla komputerowego wspomaganie decyzji przy wyborze tych technik w zależności od warunków lokalnych. Omówiono ponadto przebieg i techniczne wymagania kontroli z użyciem sprzętu telewizyjnego oraz klasyczny schemat gromadzenia danych i ich przepływu. Zaprezentowano również przykłady wzorów karty stanu przewodów oraz karty informacji o przebiegu odnowy, jakie mogą być z powodzeniem zastosowane w kraju. Przedstawiony na końcu czwartego rozdziału schemat blokowy algorytmu sterowania procesem odnowy oraz procedury pomocnicze i założenia dla jej optymalnej organizacji, a także wyniki próbnych obliczeń weryfikacyjnych, stanowią przyczynek do udoskonalenia procesu decyzyjnego, który w perspektywie może być oparty na metodach symulacji cyfrowej. Dalsze rozwijanie tej problematyki w chwili obecnej uznano za niecelowe, gdyż z powodu braku danych o eksploatacji przewodów, mogłoby ono prowadzić do błędnych rozwiązań.

Rozprawa wnosi do inżynierii miejskiej teoretyczne podstawy programowej strategii odnowy, których wykorzystanie w procesie eksploatacji przewodów kanalizacyjnych zwiększy techniczno-ekonomiczną efektywność tego procesu.

Praca stanowi pewien zamknięty etap badań naukowych; począwszy od sformułowania problemu, przez rozważania teoretyczne, do wskazania rozwiązań technicznych i może być stymulatorem postępu eksploatacyjnego, pomimo że w pełni miarodajna weryfikacja zaproponowanej zmiany strategii odnowy przewodów nie jest obecnie możliwa. Nie może to jednak być czyn-

nikiem hamującym, gdyż wszelkie obecne opóźnienia spowodują dalsze przesunięcie terminu zmian dotychczasowej polityki eksploatacji przewodów. Podobnie jak było przed kilkunastu i kilku laty, gdy autorzy opracowań [36], [39] wskazywali na potrzebę budowy banku danych, nie znajdując odpowiedniego potwierdzenia w praktyce. Wydaje się zatem, że wzorem niektórych krajów wysoko rozwiniętych (rozdz. 4.4.1), celowe jest gromadzenie danych i ich przetwarzanie dla urzeczywistnienia komputerowego wspomaganie decyzji oraz weryfikacji zaprezentowanych założeń teoretycznych na drodze zaawansowania badań eksploatacyjnych, spowodowanego przyjęciem *a priori* strategii z kontrolą jako strategii wiodącej w okresie najbliższych kilkunastu lat.

Osobnym, nie mniej ważnym problemem jest kształcenie kadry inżynierskiej w zakresie teorii niezawodności. Ogromny postęp w tym kierunku może nastąpić dzięki opublikowaniu pierwszego w kraju podręcznika kompleksowo ujmującego zagadnienia niezawodności i jej zastosowań w odniesieniu do sieci wodociągowych i kanalizacyjnych [98]. Edukacji teoretycznej powinno towarzyszyć zapoznanie kadry z technikami i metodami odnowy, jakie są stosowane poza granicami kraju. Stosowanie rozwiązań zagranicznych musi być przy tym ograniczone do przypadków koniecznych, przy intensyfikacji badań nad własnymi metodami. Badania takie, podobnie jak badania eksploatacyjne, powinny być jak najszybciej podejmowane.

Rozprawa została napisana w ramach projektu badawczego nr DNS-T/04/034/90-2 pt. *Utrzymanie, modernizacja i model rozbudowy infrastruktury podziemnej miast*, zatwierdzonego na wniosek jej autora przez Ministerstwo Edukacji Narodowej i kontynuowanego na podstawie Decyzji nr 262/7/91 Przewodniczącego Komitetu Badań Naukowych.

LITERATURA

- [1] BÜCHLI R., BÜRGE T., *Admixtures for sprayed concrete*, World Tunelling, 2, 5, 1989.
- [2] *Biuletyn Informacyjny* Firmy British Gas. Sewage Linning, Manchester, England.
- [3] *Biuletyn Informacyjny* Firmy Hitkamp GmbH, Herne, RFN.
- [4] *Biuletyn Informacyjny* Firmy Imbema. Process Phoenix, Berlin, RFN.
- [5] *Biuletyn Informacyjny* Firmy Europlast-Rohrwerk GmbH, Oberhausen, RFN.
- [6] *Biuletyn Informacyjny* Firmy Kunststoff-Technik A. G., Zürich, Szwajcaria.
- [7] *Biuletyn Informacyjny* Firmy Kanal Müller Gruppe, RFN.
- [8] BŁASZCZYK W., ROMAN M., STAMATELLO H., *Kanalizacja*. T. 1, Arkady, Warszawa, 1974.

- [9] BŁASZCZYK W., STAMATELLO H., *Kanalizacja. Sieci i pompownie*, T. 1, Arkady, Warszawa, 1983.
- [10] CADDEN R., G., *Pipeline renovation - the Australian experience*, The First International Conference on Pipeline Construction, CCH Hamburg, 1987.
- [11] CCTV Data while you wait, *Underground*, No.6, 1990.
- [12] COX G., *CCTV-changes in the U.K.market*, No-Dig International. 1, 6, 1990.
- [13] CRAMER H., *Matematyczne metody w statystyce*, PWN, Warszawa, 1958.
- [14] DAHM K., *Die Profileen-Rohrentwicklung heute*, Die Röhre, No. 1, 1987.
- [15] *Der Strauraumkanal Bauku Information*, Troisdorfer Bauund Kunststoff Geseuschaft mbH, Wiehl, Deutschland, C1, 1987.
- [16] ELHMADI K., O'ROURKE M., J., *Seismic Damage to Segmented Buried Pipelines*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, 1990.
- [17] FELLER W., *Wstęp do rachunku prawdopodobieństwa*, PWN, Warszawa, 1969.
- [18] FIDELIS E., FIRKOWICZ S., GRZESIAK K., KOŁODZIEJSKI J., WIŚNIEWSKI K., *Matematyczne podstawy oceny niezawodności*, PWN, Warszawa, 1966.
- [19] FIDELIS E., SMALKO Z., *Teoria i technika niezawodności w projektowaniu*, ZODOK, Warszawa, 1971.
- [20] FISZ M., *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna*, PWN, Warszawa, 1969.
- [21] FUKAS-PŁONKA L., *Analiza awaryjności sieci kanalizacyjnych*, Ochrona Środowiska, PZITS Oddział Wrocław, nr 3-4, 1988.
- [22] GNIEDENKO B., BIELAJEW J., K., SOŁOWIEW A., D., *Metody matematyczne teorii niezawodności*, PWN, Warszawa, 1968.
- [23] GRIGORIU M., O'ROURKE T., *Serviceability of San Francisco auxiliary water supply system*, ICOSAR' 89, The 5th International Conference on Structural Safety and Reliability, San Francisco, 1989.
- [24] GORYŃSKI J., *Ekonomika budownictwa i polityka budowlana*, PWE, Warszawa, 1976.
- [25] HOLM E., *Sewerage and rehabilitation in Skandinavia*, The Second International Conference on Pipeline Construction, CCH Hamburg, 1989.
- [26] HOU XUEYUAN, SHU YU, *The model of underground space of the city*. The Third International Conference on Underground Space and Earth Sheltered Buildings, Tongji University Press, Shanghai, 1988.
- [27] IMHOFF K., IMHOFF K., R., *Kanalizacja miast i oczyszczanie ścieków*. Poradnik, Arkady, Warszawa, 1976.
- [28] *In situ form World*, Pipeline reconstruction without digging, No.3, 1989.
- [29] *Instandsetzung von Abwasserkanälen durch Torkretierung und Injection*, Torkret GmbH, Essen, Deutschland.
- [30] JAMSKA H., *Wstępna ocena parametrów niezawodności sieci wodociągowej i kanalizacyjnej*, Materiały na XII Seminarium Projektantów Wodociągowych, PZITS Oddział Kraków, nr 411, Zakopane 1983.
- [31] JONES M., *Man-entry sever renovation*, No-Dig International, 1, 3, 1990.

- [32] JONES M., Rotterdam plans for city development, No-Dig International, 1, 3, 1990.
- [33] JONES M., Techniques for Remote Relining, No-Dig International, 1, 6, 1990.
- [34] KACZOROWSKI A., Rury wodociągowe i kanalizacyjne z nowych materiałów, Inżynieria i Budownictwo, nr 5, 1989.
- [35] Kanal Müller Gruppe, Scieder-Schwatenberg, Weiterentwicklungen auf dem gebiet der Schlauch-Reliningverfahren mit KM-Inliner, The First International Conference on Pipeline Construction, CCH Hamburg, 1987.
- [36] KLOSS H., ROMAN M., Ogólne problemy niezawodności systemów wodociągowych i kanalizacyjnych, Gaz Woda i Technika Sanitarna, nr 9, 1974.
- [37] KLOSS H., ROMAN M., Zagadnienia wyboru wskaźników niezawodności systemów wodociągowych i kanalizacyjnych, cz. I i II. Gaz Woda i Technika Sanitarna, nr 10, 1975, nr 11, 1975.
- [38] KLOSS H., ROMAN M., Zasady zbierania danych dotyczących niezawodności urządzeń wodociągowych i kanalizacyjnych, Gaz Woda i Technika Sanitarna, nr 2, 1976.
- [39] KLOSS-TREBACZKIEWICZ T., Założenia do stworzenia systemu zbierania danych dotyczących niezawodności urządzeń w miejskich przedsiębiorstwach wodociągów i kanalizacji, Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna nt. Problemy Eksploatacji Wodociągów, Oszczędność Energii, PZITS, nr 557, Kraków, 1988.
- [40] KOPECKI K., Ogólne założenia i metodyka rachunku gospodarczego w pracach planowo-projektowych w elektroenergetyce, PAN Komitet Elektryfikacji Polski, Materiały i Studia, t. V, Zasady ekonomicznego rachunku - część I, Warszawa, 1960.
- [41] KOPOCIŃSKI B., Zarys teorii odnowy i niezawodności, PWN, Warszawa, 1973.
- [42] KOŹNIEWSKA J., WŁODARCZYK M., Modele odnowy niezawodności i masowej obsługi, PWN, Warszawa, 1978.
- [43] KRZEMIŃSKI R., Ocena eksploatacyjna niezawodności działania sieci kanalizacyjnej, Materiały na Konferencję nt. Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych, Polski Komitet IWSA i PZITS Oddział Kielce, Kielce 1986.
- [44] KUCZYŃSKI J., Miejskie budowle sanitarne i podziemne, PWN, Warszawa, 1980.
- [45] KUCZYŃSKI J., MADRYAS C., Technical and economic faces of reconstruction and expanding the underground armour infrastructure grids in cities, The First International Conference on Pipeline Construction, CCH Hamburg, 1987.
- [46] KUCZYŃSKI J., MADRYAS C., Potrzeby badawczo-wdrożeniowe w gospodarce miejskiej, XXXV Konferencja Naukowa, KILIW PAN, Komitet Nauki PZITB, Krynica 89, t. 6, Wrocław, 1989.
- [47] KUCZYŃSKI J., MADRYAS C., Miejskie budowle podziemne. Skrypt nr 194, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 1990.
- [48] KULICZKOWSKI A., Optymalizacja kolektorów kanalizacyjnych przebudowywanych w warunkach miejskich. Prace nauk. Inst. Inż. Łąd. PWR., seria Monografie, nr 12/35, Wrocław, 1988.
- [49] KULICZKOWSKI A., Optymalizacja parametrów projektowych i realizacyjnych kolektorów kanalizacyjnych budowanych w warunkach miejskich, Raport Inst. Inż. Łąd. PWR. serii PRE nr 43/1978, Wrocław 1984.

- [50] KULICZKOWSKI A., KOLONKO A., *Zastosowanie tworzyw sztucznych w budowie sieci infrastruktury technicznej miast*, Konferencja Naukowo-Techniczna pt. Infrastruktura podziemna miast, PZiTb, Kudowa Zdrój, 1981.
- [51] KULICZKOWSKI A., MADRYAS C., *Tunele wieloprzewodowe*, Skrypt nr 169, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 1989.
- [52] KULICZKOWSKI A., MADRYAS C., *Reliability of sewage systems as an element of environmental protection in urban areas*, International Conference on Sewage into 2000, Aqatech, RAI, Amsterdam, 1992.
- [53] KULICZKOWSKI A., *Renowacja przewodów kanalizacyjnych systemem "krótki relining" w Tarnowie*, Gaz Woda i Technika Sanitarna, nr 7, 1992.
- [54] KULICZKOWSKI A. i in., *Dokumentacja protokolarna kolektora ogólnospławnego w Rynku we Wrocławiu*, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Wodociągów i Kanalizacji, maszynopis niepublikowany, Kielce 1992.
- [55] LANGE O., *Teoria reprodukcji i akumulacji*, PWN, Warszawa, 1975.
- [56] MADRYAS C., *Optymalizacja projektowania sieci infrastruktury technicznej uzbrojenia podziemnego z uwzględnieniem warunków eksploatacji*, Raport Inst. Inż. Łąd. PWr. serii PRE nr 2/81, Wrocław, 1981.
- [57] MADRYAS C., *Zawodność funkcjonowania sieci uzbrojenia podziemnego jako kryterium oceny rozwiązań*, Gaz Woda i Technika Sanitarna, nr 1, 1983.
- [58] MADRYAS C., *Methods of Gathering Data for Determining the Cost of Underground Infrastructure Failure*, Tunelling and Space Technology, 3, 3, 1988.
- [59] MADRYAS C., *Direction of research in town underground armour grids infrastructure reliability*, International Congress on Large Underground Openings, ITA, 2, Florence, 1986, Proceedings, Vol. 2.
- [60] MADRYAS C., *Some problemes of the underground grids rebuilding*, The Third International Conference on Underground Space and Earth Sheltered Buildings, Tongji University Press, Shanghai, 1988.
- [61] MADRYAS C., TASZYCKI H., *The building realization of a large cross-section area sewage tunnel laid in an open cut*, International Congress on Tunnels and Water, ITA, Madrid, 1988.
- [62] MADRYAS C., *Control and diagnosis of underground grids in urban areas*, The Second international Conference on Pipeline Construction, CCH Hamburg, 1989.
- [63] MADRYAS C., *Functional and qualitative aspects of the development of underground space in town*, International Conference on Underground Crossing for Europe, AFTES, Lille, 1990.
- [64] MADRYAS C., *Service Tunnels in Newly Build Residential Areas*, Tunelling and Underground Space Technology, 5, 4, 1990.
- [65] MEJRO C., *Podstawy gospodarki energetycznej*, WNT, Warszawa, 1974.
- [66] MENZEL S., W.O., *Plastic spirally wound tubes (Rib-Loc)*, The First International Conference on Pipeline Construction, CCH Hamburg, 1987.
- [67] MOSEVOLL G., *Strategies for preventative maintenance, rehabilitation and renewal of water supply and sewage networks in Norway*, The Second International Conference on Pipeline Construction, CCH, Hamburg, 1989.
- [68] NAKOMATO J., *The status quo of Japan's sewer*, The First International Conference on Pipeline Construction, CCH, Hamburg, 1987.

- [69] O'ROURKE M., J., *Response analysis of crude oil transmission system*. ICSSAR '89, 5th International Conference on Structural Safety and Reliability, San Francisco, 1989.
- [70] O'ROURKE M., J., AYALA G., *Seismic Damage to Pipeline, Case Study*, Journal of Transportation Engineering, 116, 2, 1990.
- [71] OSTASIEWICZ W., *Zastosowanie zbiorów rozmytych w ekonomii*, PWE, Warszawa, 1986.
- [72] *Pipe replacer*, Iseki-Poly-Tech, INC Printed by Mitsuno Japan, September, 1989.
- [73] *Pipe replacement system using "Grundocrack" system*, Grundocrack, Bedford, England, 1989.
- [74] PŁASKI J., PŁASKI H., *Tworzywa sztuczne w sieci wodociągowej*, Arkady, Warszawa, 1981.
- [75] PN-71 B-02710, *Przekroje poprzeczne zamkniętych kanałów ściekowych*.
- [76] PN-74 C-89200, *Rury z nieplastyfikowanego polichlorku winylu. Wymiary*.
- [77] *Praca zbiorowa, Badania i ocena niezawodności maszyn w systemie transportowym*, WKŁ, Warszawa, 1983.
- [78] *Praca zbiorowa, Sterowanie i zarządzanie eksploatacją systemów technicznych*, PWN, Warszawa, 1985.
- [79] *Praca zbiorowa, Wodociągi i kanalizacja*, Poradnik, Arkady, Warszawa, 1971.
- [80] *Praca zbiorowa, Wskaźniki urbanistyczne do projektowania mieszkalnictwa w planach ogólnych, perspektywicznych zagospodarowania przestrzennego miast*, Raport Zakładu Studyjno-Projektowego Politechniki Wrocławskiej Serii SPR nr 2 II, Wrocław, 1979.
- [81] *Relining*. Hans Brochier GmbH, Nürnberg, Germany.
- [82] *Rib-Loc*. Publication No. 09 2 1088, Rib.-Loc. Group Limited, Guetersloh, Germany, 1988.
- [83] ROMAN M., *Problemy kryteriów niezawodności komunalnych systemów wodociągowych i kanalizacyjnych*, Materiały na Konferencję nt. Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych, Polski Komitet IWSA i PZITS Oddział Kielce, Kielce 1986.
- [84] *Sanierung und Instandsetzung abwassertechnischer Anlagen*, Ombram, Woellner-Werke GmbH, Deutschland.
- [85] SORENSEN J., D., THOFT-CHRISTENSEN P., *Inspection strategies for concrete bridges*, Lecture Notes in Engineering, Reliability and Optimization of structural Systems, Springer-Verlag, 1988.
- [86] SOZAŃSKI J., *Niezawodność urządzeń i układów elektroenergetycznych*, PWN, Warszawa, 1974.
- [87] SOZAŃSKI J., *Niezawodność zasilania energią elektryczną*, WNT, Warszawa, 1982.
- [88] STAMATELLO H., *Tunele i miejskie budowle podziemne*, Arkady, Warszawa, 1970.
- [89] STARK R., M., NICHOLLS R., L., *Matematyczne podstawy projektowania inżynierskiego*, PWN, Warszawa, 1979.
- [90] STEIN D., DOHMANN M., *Planning of Sewerage Systems in Accordance With the Requirements for Maintenance*, The second International Conference on Pipeline Construction, CCH, Hamburg, 1989.
- [91] *Subterra increases its pipe lining possibilities*, Underground, No. 12, 1988.
- [92] SZTARSKI M., *Niezawodność i eksploatacja urządzeń elektronicznych*, WKŁ, Warszawa, 1972.

- [93] Theiner IFAT-Bericht, Teil 3, Kanalisation, Abwassertechnik, No. 5, 1987.
- [94] THOFT-CHRISTENSEN P., *Application of optimization methods in structural systems reliability theory*, Structural Reliability Theory, Paper No. 33; Institute of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, Denmark, 1987
- [95] THOFT-CHRISTENSEN P., SORENSEN J., D., *Optimal strategy for inspection and repair structural systems*, Civ. Eng. Syst., 4, 6, 1987.
- [96] TRIANTAFILLOU C., *International experience in the maintenance of sewerage systems. Comparisons of strategies in France in the USA and in The UK*, The Second International Conference on Pipeline Construction, CCH, Hamburg, 1989.
- [97] WAYS M., *Aktueller Stand der Abwasserableitung in Polen*, Internationaler Kongress Leitungsbau, KZH, Hamburg, 1987.
- [98] WIECZYSTY A., *Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych. Teoria niezawodności i jej zastosowania*, t. I, cz. I i II. Skrypt Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1990.
- [99] WINNEY M., *New sonar survey cracks flooded pipe problems*, Underground, No. 3, 1989.
- [100] Wytyczne do projektowania; Informacyjny zestaw wskaźników nakładów na scalone asortymenty robót budowlanych i instalacyjnych, Ośrodek Organizacji Obsługi Budownictwa, Poznań, 1992.
- [101] ZAMOJSKI W., *Teoria i technika niezawodności*. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1976.
- [102] ZN-70 MPCh-TE 2527, *Rury polietylenowe, typ 50. Wymiary*.

RENOVATION OF THE SEWERS

Renovation of the existing, worn out sewers in the towns in Poland is one of the basic elements of both adapting these towns to European standards of environmental protection and using underground space in accordance with requirements of civilization.

In order to control the process of renovating technical systems which just like sewage systems in towns encompass very large areas, it is necessary to organize the process of their operation and maintenance in such a way that, from the point of view of a particular criterion, it should be as effective as possible.

The most important problems of programmed renovation of sewers have been presented. The first problem concerns theoretical basis for formulating assumptions and establishing criteria applied in optimization of renovation considered to be basic element of operating process. Within the scope of analysis of the above problem made in the second chapter, and on the basis of the known models of reliability theory and renovation, formalized descriptions of the characteristics of networks and of the forces exerted on them are provided, the notions of reconstruction reliability and damage as well as related indicators are defined. There are also given reliability identification of the sewers, transition matrix, and principles of parameter estimation, necessary to speed up inference from the data obtained during inspection of operation of real objects.

The second problem discussed refers to the method of evaluating solutions and non-measurable indicators. There have been assumed a principle in which evaluation of solution is based on economic criteria

(costs) and the one in which non-measurable indicators are classified in accordance with some blunt criteria. The problem has been solved taking advantage of the method of annual costs in economic calculation and the models of the fuzzy sets theory for evaluating non-measurable magnitudes.

The third problem concerns possibilities of practical use to theoretical considerations presented in the paper. This issue is dealt with in chapter four, in which two strategies are proposed for renovating sewers. There are also given a list and characteristics of modern, worldwide used techniques and methods of renovation, auxiliary procedures for a decision process as well as schematic diagram of renovation algorithm. First, preventive strategy has been discussed with optimum preventive time T_{opt} . The objective functions have been formulated taking into

account failure rate λ , with minimum costs being assumed as optimization criterion. Next, a strategy with control has been discussed the basic element (state control) of which is also an essential element of any examination of operating performed on real objects.

Strictly technical issues have been discussed in this part of the work which provides synthetic characteristics of renovation techniques that are nowadays most frequently used in high-technology countries and that are also beginning and undoubtedly will be used in Poland. Furthermore, the course and technical requirements of control with the aid of tv equipment as well as classical schemes of data gathering and flow, starting from the monitoring device to the place of processing, have been discussed. There have also been presented examples of specimen cards of conduit states and information cards of renovation run, which could be successfully used in Poland. A schematic block diagram of the process control algorithm, as well as auxiliary procedures and assumptions regarding optimum organization of renovation, and results of preliminary verifying calculations contribute to improvement of decision process, which in a long run can be based on digital simulation methods.

Verified by Halina Cislak

*Praca wpłynęła 16 stycznia 1992 r.
Po poprawieniu 10 listopada 1992 r.*

SPIS RZECZY

1. WSTĘP	3
1.1. Wykaz podstawowych oznaczeń	3
1.2. Uzasadnienie podjęcia tematu	5
1.3. Założenia oraz cele i kierunki badań	8
1.4. Zadania, rodzaje i budowa sieci kanalizacyjnej	9
2. NIEZAWODNOŚCIOWY OPIS SIECI PRZEWODÓW KANALIZACYJNYCH	12
2.1. Cechy przewodów i wymuszenia	12
2.1.1. Charakterystyka cech przewodów	12
2.1.2. Charakterystyka wymuszeń	14
2.2. Pojęcie niezawodności	15
2.3. Uszkodzenia przewodów	16
2.3.1. Definicja uszkodzeń i ich klasyfikacja	16
2.3.2. Przyczyny uszkodzeń	18
2.3.3. Charakterystyka uszkodzeń	21
2.4. Pojęcie odnowy	24
2.4.1. Parametry odnowy	24
2.4.2. Składniki odnowy	28
2.5. Ocena niezawodności	30
2.5.1. Identyfikacja i cechy systemu	30
2.5.2. Zasady estymacji parametrów niezawodnościowych	34
3. MIARY I ZASADY OCENY WARTOŚCI	41
3.1. Koszty niezawodności w rachunku ekonomicznym	41
3.1.1. Składniki kosztu zawodności	45
3.2. Ocena wielkości niemierzalnych	47
4. STRATEGIE ODNOWY	52
4.1. Strategia z optymalnym okresem odnowy	52
4.2. Strategia z kontrolą	54
4.2.1. Optymalizacja programu kontroli	54
4.2.2. Klasyfikacja uszkodzeń i skala odnowy	60
4.2.3. Kontrola jako element badań eksploatacyjnych	64
4.3. Techniki odnowy	65
4.3.1. Podział technik odnowy	65
4.3.2. Charakterystyka metod odnowy	71
4.3.3. Charakterystyka technik kontroli i diagnostyki	72
4.4. Kształtowanie postępu eksploatacyjnego	76
4.4.1. Założenia i warunki ograniczające	76
4.4.2. Kryterium zmiany warunków eksploatacji	78
4.4.3. Kryterium wyboru zakresu odnowy	80
4.4.4. Założenia dla modelu cyfrowej symulacji odnowy przewodów	81
4.4.5. Założenia dla optymalnej organizacji odnowy	84
4.4.6. Przykład liczbowy	87
5. PODSUMOWANIE	89
LITERATURA	91

CONTENTS

1. INTRODUCTIONS	3
1.1. List of basic designations	3
1.2. Significance of the problem	5
1.3. Assumptions, aims and directions of investigation	8
1.4. Tasks, types and construction of sewers	9
2. RELIABILITY DESCRIPTION OF SEWERS	12
2.1. Sewers properties and forces	12
2.1.1. Characteristic of sewers properties	12
2.1.2. Characteristic of forces	14
2.2. Definition of reliability	15
2.3. Sewers damage	16
2.3.1. Definition of damage types and their classification	16
2.3.2. Causes of damage	18
2.3.3. Damage characteristic	21
2.4. Definition of renovation	24
2.4.1. Renovation parameters	24
2.4.2. Renovation elements	28
2.5. Reliability estimation	30
2.5.1. Identification and properties of the system	30
2.5.2. Principles of estimating reliability parameters ...	34
3. MEASURES AND PRINCIPLES OF VALUE ASSESSMENT	41
3.1. Reliability costs in economic calculation	41
3.1.1. Components of unreliability cost	45
3.2. Estimation of non-measurable magnitudes	47
4. RENOVATION STRATEGIES	52
4.1. Strategy with optimum renovation period	52
4.2. Strategy with control	54
4.2.1. Optimization of the programme of control	54
4.2.2. Damage classification and range renovation	60
4.2.3. Control as an element of operation examination ...	64
4.3. Renovation techniques	65
4.3.1. Division renovation techniques	65
4.3.2. Characteristic of renovation methods	71
4.3.3. Characteristic of control techniques and diagnosis	72
4.4. Modelling of operation run	76
4.4.1. Assumptions and limiting conditions	76
4.4.2. Criterion of a change in operating conditions	78
4.4.3. Criterion of a choice of renovation range	80
4.4.4. Assumptions of the model of digital simulation of sewers renovation	81
4.4.5. Assumptions of optimum organization of renovation .	84
4.4.6. Numeral example	87
5. SUMMARY	89
LITERATURE	91

PRACE NAUKOWE INSTYTUTU INŻYNIERII LĄDOWEJ
(wydane w latach 1986—1993)

- Nr 32, Monografie nr 10, J. Biliszczyk, *Beton — tworzywo do budowy mostów*, Wrocław 1986
- Nr 33, Monografie nr 11, P. Konderla, *Mechanika ciała odkształcalnego o narastającej masie*, Wrocław 1986
- Nr 34, Konferencje nr 12, *Konstrukcje powłokowe — teoria i zastosowanie*, Wrocław 1986
- Nr 35, Monografie nr 12, A. Kuliczkowski, *Optymalizacja kolektorów kanalizacyjnych przebudowywanych w warunkach miejskich*, Wrocław 1988
- Nr 36, Monografie nr 13, M. Klasztorny, *Drgania jednotorowych mostów kolejowych wywołane ruchem pociągów z dużymi prędkościami*, Wrocław 1987
- Nr 37, Konferencje nr 13, *Bezpieczeństwo budowli mostowych*, Wrocław 1987
- Nr 38, Konferencje nr 14, *X Sympozjon poświęcony reologii*, Wrocław 1987
- Nr 39, Monografie nr 14, M. Krużyński, *Analiza doświadczalna drgań układu koło ruchome — szyna, wywołanych nierównościami toru*, Wrocław 1988
- Nr 40, Konferencje nr 15, *Investigations of Materials and Civil Engineering Structures*, Szklarska Poręba, April 27—29, Wrocław 1988

