

WOJCIECH DĄBROWSKI\*, MAŁGORZATA NIEDZIOŁEK\*\*,  
MICAJAH McGARITY\*\*\*

## PROPOZYCJA SPOSOBU OKREŚLANIA WSKAŹNIKA GOTOWOŚCI PROSTYCH PODSYSTEMÓW ZAOPATRZENIA W WODĘ

### PROPOSAL FOR THE METHOD OF DETERMINING INDEX OF REDINESS FOR SIMPLE WATER SUPPLY SUBSYSTEMS

#### Streszczenie

Konieczność zapewniania dostaw wody do odbiorców i odbioru ścieków w sposób ciągły i pewny sprawiła, że do oceny działania tych systemów zaczęto stosować teorię niezawodności. Zauważalna jest jednak różnica w podejściu oceny niezawodności dla systemów wodociagowych i kanalizacyjnych, ze względu na różny czas określenia momentu wystąpienia awarii, różne kryteria dla wykonania zabiegów renowacji i naprawy czy opłacalności ze względu na głębokość posadowienia. Artykuł podsumowuje obecnie stosowaną metodykę określania wskaźnika gotowości systemu. Proponuje się również alternatywne podejście do analizowania wartości tego wskaźnika jako kombinacji wskaźników gotowości  $K^*$  wraz z prawdopodobieństwami, że nie są większe ani mniejsze od zakresów przedziałów. W artykule wykorzystano dane dla rurociągu żeliwnego między Bulkeley a Beetson Moss w Anglii z lat 1955–1999 oraz tranzytowego przewodu 1000 mm prowadzącego wodę z Zakładu Uzdatniania Wody „Raba” w Dobczycach do Krakowa z lat 2003–2009 w celu wykazania zjawiska sezonowości awaryjności rurociągów i zmienności wskaźnika gotowości systemu  $K$  w czasie.

*Słowa kluczowe: awaryjność sieci wodociagowych, prawdopodobieństwo awarii, podsystem zaopatrzenia w wodę, wskaźnik gotowości  $K$*

#### Abstract

The need to supply water to consumers and remove wastewater continuously and reliably resulted in application of the theory of reliability in order to evaluate the performance of these systems.

There is a noticeable difference in approach to assessment of water supply and sewerage systems due to differences in the time of the moment of failure, different criteria for the implementation of restoration and repair operations and profitability due to the depth of the foundation. This review summarizes current methodology used for determining readiness index  $K$ . It is also proposed an alternative approach to analyzing the value of this index as a combination of reliability indices of  $K^*$  together with probabilities that they are larger or smaller than the ranges of compartments. The paper uses data for iron pipeline between Bulkeley and Beetson Moss in England from the years 1955–1999 and 1000mm transit line leading from the Water Treatment Plant “Raba” in Dobczyce to Krakow from the years 2003 to 2009 in order to demonstrate the phenomenon of seasonality of pipeline failures and variability of readiness index  $K$ .

*Keywords: index of readiness,  $K$ , failure probability, pipeline failure, water supply subsystem*

\* Prof. dr hab. inż. Wojciech Dąbrowski, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

\*\* Mgr inż. Małgorzata Niedziołek, doktorant Wydziału Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

\*\*\* Micajah McGarity, John Hopkins University, USA.

## 1. Wstęp

Niniejszy artykuł powraca do samych podstaw obliczania parametrów charakteryzujących niezawodność systemów zaopatrzenia w wodę na tle ogólniejszego i dotychczas nierozwiązanego problemu obliczania parametrów reprezentatywnych dla oceny niezawodności sieci kanalizacyjnych. Ten powrót do podstaw jednoznacznie wskazuje, że w tych podstawowych elementach systemów zaopatrzenia w wodę, które poddane są oddziaływaniom grunt – konstrukcja przewodu rurowego, nie tylko nie można z góry zakładać, że wskaźnik gotowości po pewnym czasie dąży do ustalonej wartości, ale wręcz przeciwnie, należy spodziewać się, że jest on w długim przedziale czasowym funkcją czasu. Ponadto awaryjność przewodów, jak i jakość ujmowanych wód powierzchniowych wyraźnie zależą od pory roku. Tak więc przy tej samej wartości wskaźnika gotowości w różnych porach roku występują różne prawdopodobieństwa chwilowe wystąpienia niesprawności elementu/podsystem, co wymaga innej niż dotychczasowa interpretacji wartości tego wskaźnika.

## 2. Systemy dostawy wody, a systemy odprowadzania ścieków

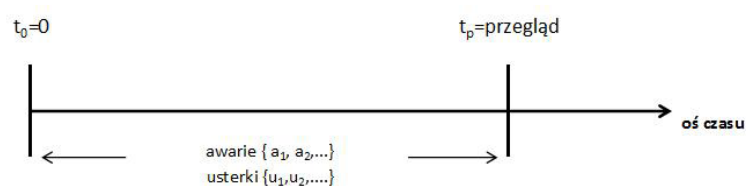
Konieczność ograniczenia w wysokim stopniu awaryjności działania różnorodnych skomplikowanych urządzeń technicznych spowodowała, że do oceny możliwości długotrwałej i właściwej ich pracy opracowano teorię niezawodności. Ponieważ woda powinna być dostarczana odbiorcom w sposób ciągły, a tym bardziej nieprzerwanie powinny być odbierane ścieki, więc najprostsze elementy teorii niezawodności zastosowano również do oceny systemów zaopatrzenia w wodę. To zastosowanie elementów teorii niezawodności w przypadku wodociągów opiera się na założeniu, że stan każdego elementu, który przestaje działać właściwie, jest niemal natychmiast rozpoznawany i z konieczności poddany naprawie. W przypadku kanalizacji sytuacja jest diametralnie różna z uwagi na wieloletnie opóźnienie w diagnozowaniu uszkodzeń kanałów. W trakcie budowy popełniane są błędy wykonawcze, które powodują, że nowo wybudowane kanały ściekowe nierzadko wykazują wady. W czasie eksploatacji błędy te skutkują dalszymi uszkodzeniami, a po pewnym czasie dają o sobie znać procesy starzeniowe w przewodach z materiałów lepkosprężystych i korozyjne w przewodach żeliwnych. Z uwagi na rzadkie inspekcje kanałów w przypadku kanalizacji inny jest czas, w którym kanał zaprzestał spełniać właściwie swoją funkcję, na przykład drenując niedopuszczalnie dużo wód gruntowych, a zupełnie inny czas, w którym poddany jest naprawie. Niekiedy wieloletnie różnice pomiędzy czasem wystąpienia awarii, a jej naprawą wymagają opracowania innych metod określania niezawodności niż te, które przyjęło się stosować w systemach zaopatrzenia w wodę. W dodatku taka nowa metoda z konieczności będzie bazować na jedynych dostępnych informacjach typu: „pomiędzy przeglądem przeprowadzonym w czasie  $T_1$ , a przeglądem wykonanym wiele lat później, powiedzmy w czasie  $T_2$ , wystąpiły awarie  $a_1, a_2$  oraz drobne usterki  $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6$ . Tymczasem w systemach zaopatrzenia w wodę, zamiast z konieczności przypisać tym wszystkim awariom przedział czasowy  $T_2 - T_1$  możemy często określić stosunkowo dokładnie czasy wystąpienia poszczególnych awarii, powiedzmy  $t_1, t_2$  dla awarii  $a_1(t_1), a_2(t_2)$ .

Kolejną różnicą jest to, że w kanalizacji bardzo często wszystkie awarie i usterki usuwa się równocześnie, poddając kanały renowacji, a nie naprawie. Kanał kwalifikuje się do zabiegu renowacyjnego dopiero, gdy sumaryczna punktacja uszkodzeń (zarówno awarii,

jak i usterek) według jednego z wielu opracowanych na świecie systemów, szczegółowo podsumowanych w krajowej literaturze [2, 3, 4] przekroczy wartość kwalifikującą go do renowacji. Punktacja ta zależy nie tylko od rodzaju kanału, ale również od roli, którą pełni on w systemie odprowadzania ścieków [1]. Odmiennie stanowisko w tej sprawie zajęła E. Kuliczowska [2, 3], która proponuje, aby decyzję o renowacji kanałów ściekowych opierać na punktacji przypisanej najpoważniejszemu ze stwierdzonych uszkodzeń, a nie na sumie wszystkich punktów.

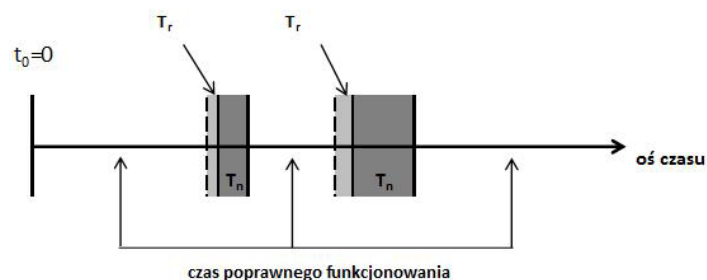
W przeciwieństwie do kanalizacji zabiegi renowacyjne przewodów wodociągowych są rzadziej opłacalne z uwagi na miejsce i głębokość posadowienia przewodów wodociągowych. Tak więc dla systemów rozprowadzania wody, w przeciwieństwie do kanalizacji, realne jest założenie, że naprawy prowadzone są zaraz po wystąpieniu uszkodzenia, a więc również pojedynczo. Chociaż łatwo można wyobrazić sobie przypadki, w których jedne awarie wywołują następne, to jednak w wielu przypadkach realne jest również przyjęcie, że wystąpienie jednej awarii w systemie zaopatrzenia w wodę nie powoduje powstania następnej, a więc, że awarie są zdarzeniami niezależnymi.

Przy tak uproszczonych założeniach niezawodność elementu, podsystemu i systemu zaopatrzenia w wodę opisuje kilka parametrów, spośród których jednym z podstawowych są wskaźniki gotowości, którym przyglądnijemy się tutaj bliżej.



Rys. 1a. Poglądowy rysunek o informacjach na temat awarii i usterek zebranych w okresie pomiędzy oddaniem kanału do użytku i pierwszym przeglądem eksploatacyjnym, albo pomiędzy kolejnymi przeglądami

Fig. 1a. Scheme presenting information about failures collected during the period between put the sewer into operation and first service or between services



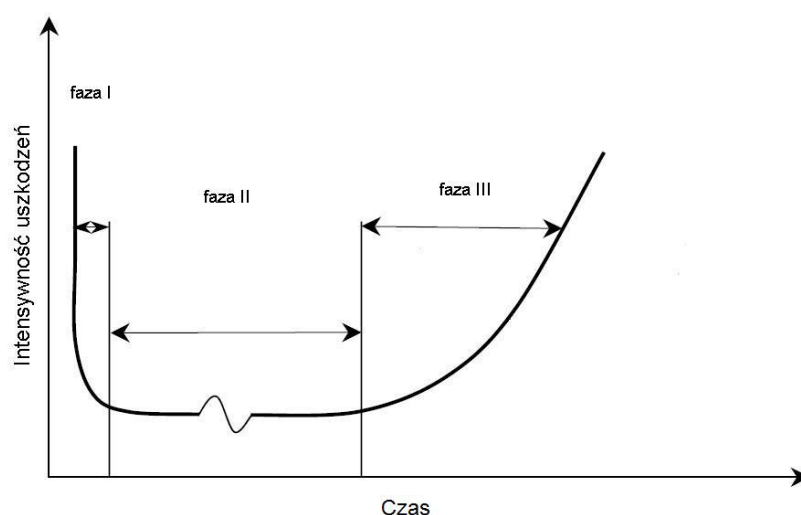
Rys. 1b. Poglądowy rysunek o informacjach na temat awarii i czasu ich usuwaniu w sieci wodociągowej. Przez  $T_r$  oznaczono czas zużyty na rozpoznanie awarii i jej zlokalizowanie, a przez  $T_n$  czas naprawy. Czas  $T_n$  zawsze jest częścią składową czasu niesprawności przewodu, a  $T_r$  często do niego należy

Fig. 1b. Scheme presenting information about failures and time of repair for water supply system

### 3. Intensywność uszkodzeń

W literaturze krajowej dotyczącej niezawodności systemów zaopatrzenia w wodę przyjmuje się często bez badań sprawdzających, że procesy pracy i odnowy są stacjonarne. Dokładniej założenie to opiera się na przyjęciu, że intensywność uszkodzeń elementu zaopatrzenia najpierw po jego wykonaniu jest większa, ale w bardzo krótkim czasie spada do stałej wartości i utrzymuje ją przez długi okres, aż do chwili, gdy obiekt w wyniku długotrwałego użytkowania utraci zdolność normalnej pracy i intensywność uszkodzeń ulegnie zwiększeniu [9].

Idealistyczne założenia co do takich zmian w czasie intensywności uszkodzeń przedstawiono na rysunku 2.



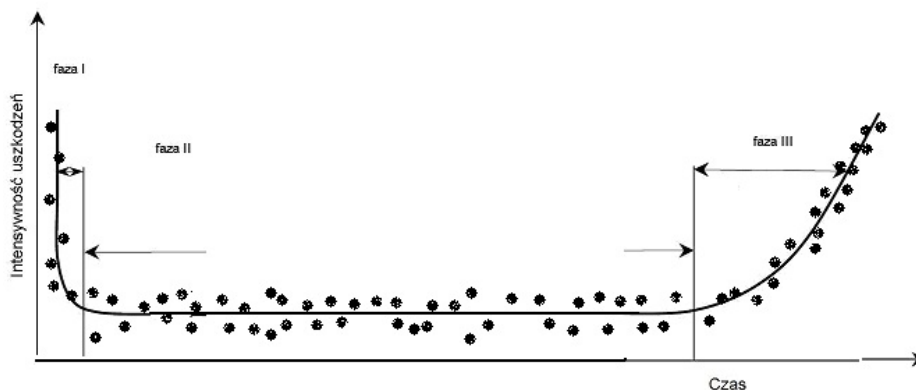
Rys. 2. Uproszczona charakterystyka intensywności uszkodzeń rurociągów [8]

Fig. 2. Simplified characteristics of failure intensity for pipelines

Zgodnie z wyidealizowanym rys. 2 wyróżnia się trzy fazy:

- faza pierwsza „docierania” – gdzie duża liczba awarii tłumaczona jest przez ujawnianie się błędów konstrukcyjnych i materiałowych tuż po instalacji,
- faza druga – faza eksploatacji o stosunkowo małej awaryjności,
- faza trzecia – starzenia systemu, gdzie z powodu starzenia przewodów liczba awarii wzrasta.

Rysunek 2 powstał na podstawie obserwacji różnych urządzeń technicznych naziemnych. Gdyby odnosił się on również do uzbrojenia podziemnego, to oczywiście intensywność awarii, mających w dużej mierze charakter stochastyczny, charakteryzowałaby się w fazie drugiej pewnym rozrzutem punktów możliwych do interpolowania poziomą linią prostą. Tak więc zaobserwowana intensywność uszkodzeń powinna w takim przypadku wyglądać podobnie jak przedstawiono to na rysunku 3.



Rys. 3. Przykładowy rozkład pomierzonych wartości intensywności uszkodzeń, który mógłby potwierdzić wyidealizowany wykres intensywności uszkodzeń pokazany na rys. 2

Fig. 3. Distribution of measured values of failure intensity showing similarity with characteristics on fig. 2

Chociaż w literaturze krajowej bardzo często występują powołania na trzy fazy intensywności uszkodzeń, zgodnie z rys. 2, to jednak przytaczanym argumentem jest zgodność stanowisk w tej sprawie, a nie obserwacje poczynione na określonych obiektach infrastruktury podziemnej. Dlatego interesujące jest przyglądnięcie się temu problemowi na podstawie obiektywnej rzeczywistości.

#### 4. Definicja wskaźnika gotowości

Niestacjonarny wskaźnik gotowości  $K(t)$  został tak zdefiniowany (1) aby charakteryzował strumienie zdarzeń praca – odnowa [9]:

$$K(t) = (\mu + \omega \cdot \exp\{-(\mu + \omega) \cdot t\}) / (\mu + \omega) \quad (1)$$

gdzie:

- $K(t)$  – niestacjonarny wskaźnik gotowości,
- $\omega = \lambda = 1/T_p$ ,
- $T_p$  – czas pracy,
- $\lambda(t)$  – intensywność uszkodzeń,
- $\mu = 1/T_n$  – intensywność odnowy,
- $T_n$  – czas odnowy,
- $\lim_{t \rightarrow \infty} K(t) = K$ ,
- $K$  – stacjonarny wskaźnik gotowości.

Dla stałej intensywności uszkodzeń (faza druga na rys. 2 i 3) czas pracy bezuszkodzeniowej ma charakter wykładniczy, a za miarę niezawodności przyjmuje się stacjonarny wskaźnik gotowości  $K$ :

$$K = T_p / (T_p + T_n) \quad (2)$$

Zauważmy, że obliczając ten wskaźnik, powinno się dowieść, że faza druga, stałej intensywności uszkodzeń rzeczywiście występuje, i dalej, że nie jesteśmy już w fazie trzeciej. Ponadto określając wskaźnik  $K$  dla fazy drugiej należy odrzucić wyniki pochodzące z fazy pierwszej, ewentualnie wykazać, że charakteryzowała się ona tak niedużą intensywnością uszkodzeń i była na tyle krótka, iż nie potrzeba dokonywać tej operacji.

## 5. Ujęcia wody powierzchniowej

Nieodpowiednia jakość wód powierzchniowych jest jedną z podstawowych przyczyn niesprawności systemu zaopatrzenia w wodę. Obliczając wskaźnik gotowości dla jakości wody surowej, po pierwsze, nie jest celowe rozpatrywanie fazy pierwszej intensywności uszkodzeń, gdyż zlewnia rzeki albo zbiornika przepływowego, z którego pobierana jest woda, odbiera od lat ze zlewni różne ładunki zanieczyszczeń. Po drugie, stała intensywność wskaźnika gotowości oznaczałaby, że w zlewni nie zachodzą zmiany w intensywności urbanizacji ani gospodarki wodno-ściekowej lub że zmiany pozytywne neutralizowane są przez negatywne. Jest to możliwe, ale stosunkowo mało prawdopodobne.

W pracy doktorskiej [6] liczone były stacjonarne wskaźniki gotowości dwóch ujęć powierzchniowych przy założeniu, że intensywność przekroczeń parametrów jakości wody jest w długim przedziale czasu stała i podlega jedynie losowym fluktuacjom. Odpowiadając na pytania zawarte w recenzji jednego ze współautorów niniejszego artykułu, doktorantka pokazała wyniki obliczeń wartości wskaźnika gotowości po każdym przekroczeniu parametrów jakościowych. Obliczenia te wykazały jednoznacznie silne tendencje wzrostowe intensywności awarii, a więc zmniejszanie się w czasie wskaźników gotowości. Oznacza to pogarszanie się stanu wody w rzece.

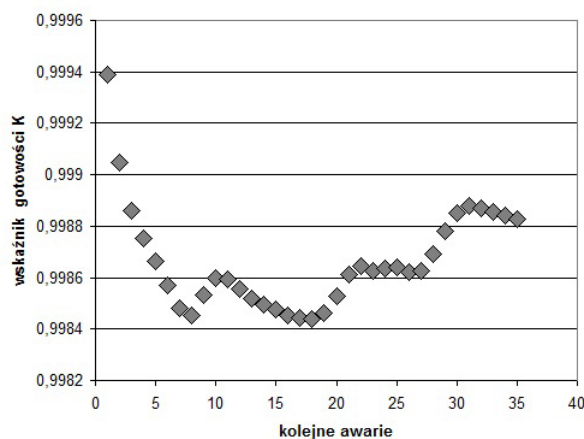
## 6. Jak liczyć wskaźnik gotowości?

Bardzo często wskaźnik gotowości  $K$  liczony jest tak, że bierze się pod uwagę cały okres od zainstalowania urządzenia do chwili, w której zbierane były dane do obliczeń. Jest to oczywiście podejście nieprawidłowe.

Po pierwsze obowiązkiem osoby prowadzącej obliczenia jest stwierdzenie, czy wystąpiła faza I pokazana na rys. 3, a jeżeli tak, to określenie jej długości. Następnie powinno się odrzucić wszystkie wyniki dotyczące zanotowanych awarii w fazie pierwszej jeżeli wartość wskaźnika gotowości ma być traktowana jako stacjonarna i odniesiona do fazy drugiej działania z rys. 3. Dalej, żeby obliczenia  $K$  miały sens, niezbędne jest wykazanie, że intensywność uszkodzeń w fazie drugiej jest stała i że nie korzystamy w interpretacji z wyników pochodzących z fazy trzeciej. Można tego dokonać, aproksymując intensywność uszkodzeń pokazanych na rys. 3 linią prostą i sprawdzając, czy jest ona pozioma, czy też nie, oraz jaki jest współczynnik dopasowania.

Jeżeli okaże się, że wskaźnik gotowości nie jest wielkością stałą, tylko funkcją czasu, to należy podjąć próby jej określenia. Chyba że dokładność, z którą podawana jest wartość wskaźnika gotowości, nie wymaga takiego zabiegu, co zostanie pokazane na przykładzie rys. 4. Jak zauważyła w swojej pracy doktorskiej Pani Aleksandra Polok-Kowalska, [6] czasu bezawaryjnej eksploatacji nie powinno się obliczać aż do chwili, w której zebrane będą dane

o awariach. Nie wiemy bowiem, czy następna awaria nastąpi za chwilę, czy też po dłuższym okresie. Dlatego wartości wskaźnika gotowości liczone tutaj w odniesieniu do chwili czasowej w środku pomiędzy ostatnią i przedostatnią awarią. Niemniej jednak samych obliczeń dokonywano na podstawie wzorów związanych z równaniem (1) i (2) z wykorzystaniem wymienionego założenia. Na rysunku 4 przedstawiono wartości wskaźnika gotowości liczone w ten właśnie sposób po każdej kolejnej awarii dla rurociągu z żeliwa szarego o średnicy 1000 mm na odcinku pomiędzy Bulkeley a Beetson Moss w Anglii, według danych pochodzących od eksploatatora, którym jest United Utilities, a bezpośrednio pobrane z pracy magisterskiej pracownika tego zakładu [8]. Wyniki obliczeń dotyczą okresu 41 lat od 1955–1996. Niestety z okresu II wojny światowej nie dysponowaliśmy danymi o awariach i dlatego na Rys.4 pokazano wyłącznie wynik obliczeń przeprowadzonych dla okresu po 1955 roku. Wartość początkową wyznaczono na podstawie danych dotyczących kilku pierwszych awarii, których nie naniesiono na rys. 4, gdyż wartości  $K$  obliczone na podstawie dwóch, czy trzech awarii, mają zbyt stochastyczny charakter i mogą bardzo odbiegać od wartości obliczonych na podstawie większej liczby danych. Wyniki obliczeń przedstawione na rys. 4 nie dotyczą pierwszej fazy pracy rurociągu, w której spodziewać się można było zmniejszania w czasie awaryjności, a więc podnoszenia wartości  $K$ . Nie jest to również faza trzecia z rys. 3, albowiem po kilku pierwszych awariach wartość wskaźnika  $K$  oprócz fluktuacji okresowych, wykazuje tendencję wzrostową, a więc awaryjność rurociągu malała. Tak więc cały ten rysunek odnosi się prawdopodobnie do fazy drugiej, tak zwanej stacjonarnej. O wysokiej jakości ochronnych warstw bitumicznych i żeliwa zastosowanego do budowy tego rurociągu świadczy to, że wszystkie zanotowane awarie dotyczyły wyłącznie nieszczelności połączeń, a więc ani jedna nie została spowodowana korozją pomimo miękkiej wody, która jest nim transportowana. Rurociąg jest eksploatowany do dnia dzisiejszego i obecnie został poddany renowacji. Z uwagi na zmianę warunków eksploatacji rurociągu dane o awariach po 1995 roku nie były tutaj analizowane.



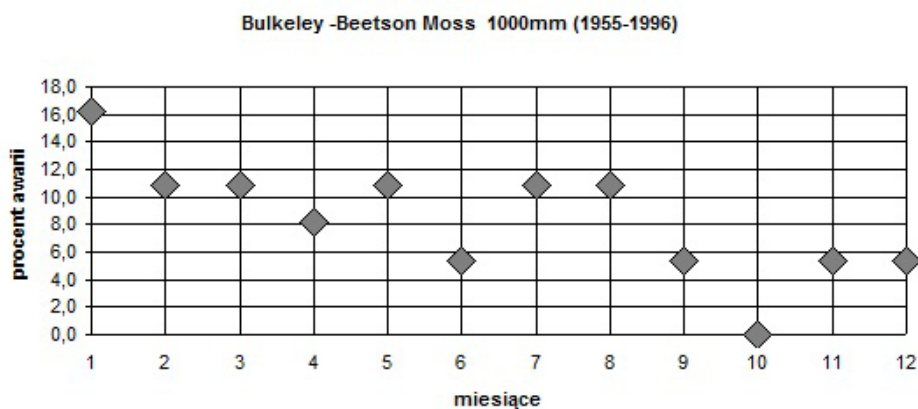
Rys. 4. Obliczone wartości wskaźnika niezawodności  $K$  dla rurociągu żeliwnego z Bulkeley a Beetson Moss w Anglii w latach 1955–1999

Fig. 4.  $K$  index values calculated for cast iron pipeline between Bulkeley and Beetson Moss in England, 1955–1999

Kolejnym problemem praktycznym jest przyjmowanie do obliczeń czasu naprawy. Bardzo często dane dotyczące czasu przestoju mają małą wartość praktyczną. Przykładowo, jeżeli pompownia wody została przewymiarowana i w wyniku spadku zapotrzebowania na wodę na cztery pompy pracujące jest pięć rezerwowych (przykładem przewymiarowania może być pompownia Białogon dla Kielec), to w przypadku utrzymywania rezerwy gorącej (pompy pracują naprzemiennie) ekonomiczniej jest poczekać na awarię następnej i naprawić je razem. Podobnie, jeżeli w piątek odkryta zostanie awaria rurociągu tranzytowego, a jego sprawność nie jest w danej chwili niezbędna dla pełnego zaopatrzenia miasta w wodę, to korzystniejsze ekonomicznie może być rozpoczęcie naprawy w piątek i powrót do pracy dopiero w poniedziałek. Dlatego lepszą metodą wydaje się przyjmowanie w obliczeniach standardowych czasów usuwania awarii zamiast rzeczywistych czasów przestoju.

### 7. Sezonowość intensywności uszkodzeń

Fakt, że przewody położone są poniżej strefy przemarzania, nie oznacza, że ruchy gruntu, zwłaszcza gruntu wysadzinowego, nie wpływają na awaryjność połączeń, szczególnie tradycyjnych połączeń kielichowych uszczelnianych ołowiem, których od lat się nie wykonuje, ale leżą one jeszcze w ziemi.



Rys. 5. Przykład sezonowości awaryjności na przykładzie rurociągu z Bulkeley do Beetson Moss

Fig. 5. Example of failure seasonal fluctuations for Bulkeley-Beetson Moss pipeline

Chociaż w badanych latach 1955–1996 aż 16% awarii (pięć przypadków) zdarzyło się w styczniu, a w październiku ani raz, to jednak rys. 5 nie stanowi dowodu na sezonowość awarii, gdyż mają one charakter zarówno deterministyczny, jak i stochastyczny. W Wielkiej Brytanii zmiana temperatury gruntu nie ma tak istotnego wpływu na awaryjność przewodów jak w Polsce, w której dochodzi niemal każdego roku do zamarzania powierzchniowej warstwy ziemi. Jednak dowodów na sezonowość awarii przewodów wodociągowych w kraju jest dużo, szczególnie w odniesieniu do przewodów żeliwnych układanych w starych technologiach. Oznacza to, że przy tej samej wartości wskaźnika gotowości K w styczniu jest inne prawdopodobieństwo wystąpienia awarii niż w październiku. Nie jest to zgodne z fi-



zyczną interpretacją definicji wskaźnika niezawodności  $K$ , który w założeniach miał określać prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy. Aby można było przypisać mu taką interpretację, konieczne jest określanie wartości  $K$  dla całego roku (niekoniecznie od stycznia do grudnia). Sam podział awaryjności na miesiące kalendarzowe też jest narzucony zupełnie arbitralnie i to raczej zmiany temperatury i intensywność opadów w poszczególnych okresach roku powinny stanowić granice rozpatrywanych przedziałów czasowych. Musi jednak dojść do pewnego kompromisu pomiędzy dokładnością a czasochłonnością obliczeń, byleby nie zawyżać dokładności, z którą podawane są wyniki obliczeń.

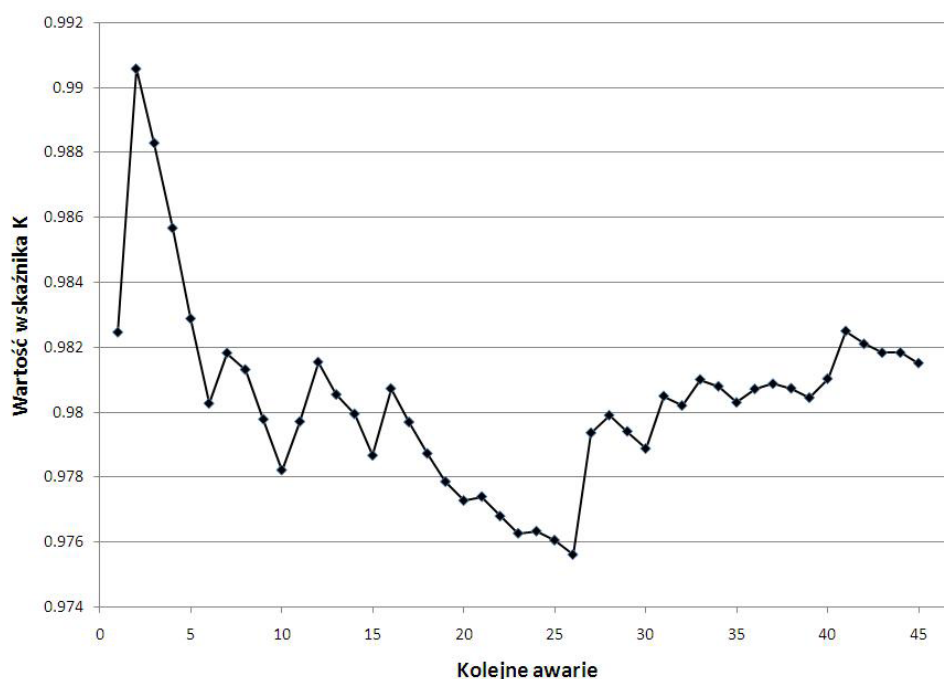
### 8. Dokładność obliczeń wskaźnika $K$

Warunki klimatyczne są zmienne, powodując zróżnicowanie warunków współpracy rurociąg–grunt w poszczególnych latach. Na rysunku 6 pokazano przykład obliczenia wybranych wartości wskaźnika gotowości  $K$  po każdej z awarii dla rurociągu 1000 mm prowadzącego wodę pitną z Zakładu Uzdatniania Wody „Dobczyce” do Krakowa. Niestety dysponowano danymi wyłącznie z sześcioletniego okresu pracy. Aby rozpocząć obliczenia przyjęto daną startową, którą była średnia wartość  $K$  z całego sześcioletniego okresu obserwacji, i taką wartość przypisano czasowi  $t = 0$ . Okres sześcioletni jest zbyt krótki aby wnioskować o trendzie zmniejszania, czy też zwiększania wartości wskaźnika gotowości w czasie. Niemniej z rysunku tego wynika, że wartość  $K$  zawarta była pomiędzy 0,9908 a 0,9756, a po zaokrągleniu do dwóch miejsc znaczących pomiędzy 0,99 a 0,98. Tak więc podając pojedynczą wartość policzonego w ten sposób wskaźnika niezawodności można jedynie zapisać  $K = 0,9$  i dodanie jakichkolwiek dalszych miejsc znaczących – jest niezgodne z podstawowymi zasadami rachunku wyrównawczego, a więc błędne. Chyba że podany zostanie czas i wartość  $K$ , albo zamiast mówić o stacjonarnym wskaźniku niezawodności – obliczana będzie wartość  $K$ , jako zgrabnie dobrana funkcja czasu  $t$ , przebiegająca blisko poszczególnych wartości obliczeniowych. Jednakże powstaje pytanie, na ile tak określone funkcyjnie wartości  $K(t)$  odzwierciedlają stan techniczny rurociągu, a na ile zostały utworzone przez przypadek, nieodłączny towarzysz zdarzeń stochastycznych i czy w związku z tym wolno nam zwiększyć dokładność podawanego wyniku. Ponieważ podawanie wskaźnika gotowości w postaci jednej liczby wymaga zaokrągleń, więc dokładniejszym sposobem określenia  $K$  jest przedział wartości, pomiędzy którymi się on mieści. Odnosząc się do rys. 6 określenie  $K$  przez przedział od 0,9908 do 0,9756 jest dokładniejsze od alternatywnie podanej pojedynczej wartości  $K = 0,9$ . Dlatego określanie przedziałów wartości, chociaż komplikuje obliczenia, jest często istotne dla dokładności wyniku końcowego wskaźnika gotowości.

Jeżeli idzie o pojedynczą wartość wskaźnika gotowości, to najbardziej standardowym sposobem jej opisu jest przybliżenie w funkcji czasu wartości współczynników tej funkcji, liczby punktów i odchylenia standardowe. Gdyby w szczególnym przypadku wskaźnik gotowości miał być stały w fazie drugiej z rys. 1 i 2, to taka charakterystyka sprowadzałaby się do wartości średniej  $K$ , liczby punktów i odchylenia standardowego. Cenne jest również podanie zakresów, w których mieszczą się wartości  $K$ . Można też wynik zilustrować za pomocą wartości średniej i kwartyli.

### 9. Propozycja innego sposobu wyrażania $K$

Jest to zaledwie wierzchołek góry lodowej. W systemach zaopatrzenia w wodę, podobnie jak usuwania ścieków, często elementy połączone są szeregowo. Przykładowo ujęcie powierzchniowe, piaskownik, pompa, zasuwa zwrotna, zasuwa odcinająca i cały rurociąg do zakładu uzdatniania wody wraz z uzbrojeniem. Co prawda, wskaźniki gotowości są w przypadku takich elementów znacznie wyższe niż dla całego rurociągu, a więc charakteryzują się większą liczbą miejsc znaczących przez liczbę pewnych dziesiątek po zerze. Niemniej jednak, wskaźnik gotowości układu szeregowego  $K^*$  jest równy iloczynowi wskaźników gotowości  $K_i$  elementów składowych i ponownie podstawowe zasady dokonywania zaokrągleń pozwalają na pozostawienie bardzo małej liczby miejsc znaczących w wartości iloczynu  $K^*$  dla dużej liczby elementów.



Rys. 6. Zmiany wartości wskaźnika K po każdej awarii dla przewodu tranzytowego 1000 mm Dobczyce–Kraków w latach 2003–2009

Fig. 6. K index value fluctuations after each failure for Dobczyce–Kraków transit pipeline in years 2003–2009

Jednakże jest mało prawdopodobne, aby wszystkie z wielu połączonych szeregowo elementów „i” miały równocześnie zawyżone albo równocześnie zaniżone, wskaźniki gotowości  $K_i$ . Jeżeli rachunki prowadzone są zgodnie z podstawowymi regułami zaokrągleń, to największe możliwe zniżenie oznaczać może najniższą wartość na ostatnim miejscu znaczącym i kolejnym miejscu dziesiętnym, po ostatnim miejscu znaczącym, które jeszcze nie spowodują zmiany ostatniego miejsca znaczącego po zaokrągleniu. Podobnie, jeżeli  $K_i$  zostało

poprawnie obliczone, to największe możliwe zawyżenie jego wartości nie może zmienić ostatniego miejsca znaczącego, z którym wartość  $K_i$  została podana. Przyjmując, że zaniżenie, jak i zawyżenie wartości  $K_i$  nie jest uprzywilejowane, a więc, że jeden i drugi przypadek charakteryzuje się prawdopodobieństwem 50% można obliczyć kilka przedziałów wartości  $K_i$  oraz prawdopodobieństwo, z jakim określamy, że obliczona wartość  $K^*$  jest nie mniejsza, i z jakim nie większa od wartości rzeczywistej. Ponieważ wartości  $K_i$  poszczególnych elementów składowych są od siebie niezależne (zdarzenia rozłączne), więc prawdopodobieństwa dla wspólnych części przedziałów  $K^*$  można sumować. Dla systemu szeregowego złożonego z  $m$  elementów możliwe jest obliczenie  $2 \cdot m!$  przedziałów  $K^*$  oraz odpowiadających im prawdopodobieństw, ale obliczenia można zawęzić do tych kombinacji, które mają stosunkowo wysoką wartość prawdopodobieństwa, że nie są mniejsze i większe od wartości rzeczywistej. W ten sposób wskaźnik gotowości, który z założenia jest miarą prawdopodobieństwa, byłby wyznaczany w postaci zbioru zakresu wartości  $K^*$ , wraz z wartościami prawdopodobieństw, że  $K^*$  się w nich zawiera. Taki sposób scharakteryzowania wartości wskaźnika gotowości przez kombinację wskaźników niezawodności  $K^*$  wraz z prawdopodobieństwami, że nie są większe ani mniejsze od zakresów przedziałów, może być atrakcyjną alternatywą dla obliczanej tradycyjnie wartości  $K^*$ , gdy rachunek wyrównawczy pozwala nam określić wyłącznie jedną, dwie, czy nawet trzy cyfry znaczące.

Objaśnijmy to na najprostszym możliwym przykładzie, a mianowicie dwóch elementów połączonych szeregowo. Niech jeden z nich ma wskaźnik gotowości  $K_1 = 0,992$ , a drugi  $K_2 = 0,989$ . Zawężając rozważania do wartości  $K_1, K_2$  o pięciu miejscach znaczących, taki zapis oznacza, że  $K_1$  jest zawarte pomiędzy 0,99151 a 0,99249, a  $K_2$  pomiędzy 0,98851 i 0,98949. Tak więc  $K^*$  zawiera się pomiędzy 0,98012 i 0,980118, a więc  $K^* = 0,980$ . W tym mnożeniu nie zmniejszyła się liczba miejsc znaczących, gdyż mamy jedynie dwa czynniki. Można rozważyć cztery sytuacje o tym samym prawdopodobieństwie wystąpienia:

pierwsza:  $K_1(0,99151 - 0,99200)$  oraz  $K_2(0,98851 - 0,98900)$ , a więc  $K^*(0,98012 - 0,98109)$   
 druga:  $K_1(0,99151 - 0,99200)$  oraz  $K_2(0,98900 - 0,98949)$ , a więc  $K^*(0,98060 - 0,98157)$   
 trzecia:  $K_1(0,99200 - 0,99249)$  oraz  $K_2(0,98851 - 0,98900)$ , a więc  $K^*(0,98060 - 0,98157)$   
 czwarta:  $K_1(0,99200 - 0,99249)$  oraz  $K_2(0,98900 - 0,98949)$ , a więc  $K^*(0,98109 - 0,98206)$ .

Każdy z tych czterech przedziałów  $K^*$  z założenia (zapewnie nie zawsze słusznego) ma prawdopodobieństwo 25%. Kolejnym krokiem jest poszukiwanie wspólnych części przedziałów  $K^*$ , tam gdzie nałożą się dwa przedziały, prawdopodobieństwo wystąpienia rzeczywistej wartości  $K^*$  wyniosłoby w tym przykładzie 50%, a trzy 75%. Przy większej liczbie elementów połączonych szeregowo można utworzyć wiele par – zakres wartości  $K^*$  i prawdopodobieństwo wystąpienia w tym zakresie. Później na tej podstawie można będzie pokusić się o określenie przedziału, w którym z zadaniem prawdopodobieństwem zawiera się rzeczywista wartość wskaźnika gotowości  $K^*$  z istotnie większą liczbą miejsc znaczących niż wartość opisana pojedynczą liczbą.

Przedstawiony tutaj algorytm jest prymitywny i należy go rozumieć wyłącznie jako ilustrację do przedstawionej ogólnej koncepcji obliczania wskaźnika gotowości jako zawartego w przedziale zadanych wartości ze znanym prawdopodobieństwem wystąpienia w tym przedziale.

## 10. Wnioski

1. W przeciwieństwie do kanalizacji, w której nie wiadomo, kiedy nastąpiły awarie pomiędzy kolejnymi przeglądami, w wodociągach można obliczać wskaźnik gotowości poszczególnych przewodów, zakładając w przybliżeniu, że okres eksploatacji pokrywa się z okresem bezawaryjnej pracy, a nieszczelności tak szybko dają o sobie znać, że okres niesprawności ogranicza się do czasu zamknięcia rurociągu do naprawy. Pomijamy w ten sposób niesłusznie stosunkowo nieduże i bardzo trudne do wykrycia nieszczelności w utworach żwirowych i piaszczystych, ale takie założenie upraszczające wydaje się jeszcze dopuszczalne. W kanalizacji przez okres bezawaryjnej pracy nie można uznać samej zdolności odprowadzenia ścieków, gdyż wówczas występowałyby wyłącznie dwa stany: sprawności i katastrofy budowlanej. Tak więc najwygodniej jest zdefiniować sprawność kanału ściekowego jako możliwość odprowadzania ścieków z zachowaniem punktacji spełniającej warunki stawiane przez jeden, wybrany spośród kilku istniejących, systemów oceny stanu technicznego kanału. Przyjęcie takiej definicji oznacza, że w kanalizacji występują wieloletnie okresy bezawaryjnej pracy, wieloletnie okresy awaryjnej pracy i krótkie czasy naprawy lub renowacji, przy czym renowacja z reguły nie jest prowadzona w pojedynczym kanale. Dlatego w przeciwieństwie do kanalizacji w wodociągach przyjęto definicje wskaźników gotowości, opracowane wcześniej dla urządzeń elektronicznych, telekomunikacyjnych, regulacyjnych itp. Ten sposób postępowania nie budzi zastrzeżeń. W wątpliwość poddano natomiast przyjęcie, że wskaźnik ten można definiować jako ustalony w czasie dla współdziałania przewód–grunt w zmiennych w skali roku i wielolecia warunkach pogodowych.
2. Obliczając wskaźnik gotowości jako jedną ustaloną wartość, niezbędne jest stwierdzenie, czy rzeczywiście w badanym okresie awaryjność można aproksymować poziomą linią w układzie współrzędnych rys. 3, to znaczy czas (albo kolejna liczba awarii) i awaryjność. Podobnie można badać wartość wskaźnika gotowości  $K$  w funkcji czasu. Jeżeli wynik analizy pokazałby, że rzeczywiście rurociąg, albo ujęcie powierzchniowe charakteryzują się stałą wartością wskaźnika gotowości, to należałoby stwierdzić, które wartości z obliczeń należy odrzucić ze względu na fazę pierwszą z rys. 2 i 3 i czy nie należy dokonać odrzuceń ze względu na fazę trzecią na tychże rysunkach. Jeżeli wyniki analizy wykażą, że wskaźnik gotowości jest funkcją czasu, to obrać można jedną z dwóch dróg postępowania. Pierwsza polega na określeniu postaci tej funkcji, a druga na zmniejszeniu tak liczby miejsc znaczących wskaźnika gotowości, aby w całym okresie funkcja, którą aproksymujemy  $K$ , nie przekroczyła jej wartości w dół ani w górę. Ta druga droga może skutkować istotnym zredukowaniem liczby miejsc znaczących, na przykład do dwóch, co zazwyczaj nie jest satysfakcjonujące.
3. Stosunkowo ubogie doświadczenia własne autorów artykułu, ale również stosunkowo liczne dane literaturowe na temat sezonowości awarii przewodów wskazują, że wskaźnik gotowości powinien być podawany bardzo ostrożnie i z reguły dla układu grunt–przewód jest funkcją czasu. Niedopuszczalne jest znaczne zawyżanie dokładności obliczania tego wskaźnika, co niestety jest w Polsce często praktykowane. Znaczne zawyżenie dopuszczalnej liczby miejsc znaczących w obliczeniach prowadzi do błędnych wniosków, a zazwyczaj lepiej jest czegoś nie wiedzieć, niż zdobyć błędne informacje. Ogólnie można powiedzieć, że dla prawidłowo prowadzonych obliczeń niezawodności bardzo ważne jest, aby pamiętać takie podstawowe zasady prowadzenia obliczeń, jak to, że 0,999 oraz 0,999000000000 charakteryzują fizycznie dwie różne wartości.
4. Dla ujęcia wody powierzchniowej przyjęcie ustalonej w czasie wartości wskaźnika goto-

wości oznacza, że sumaryczny wpływ urbanizacji, zmian gospodarki wodno-ściekowej i klimatu jest zerowy, co jest teoretycznie możliwe, ale praktycznie wydaje się mało prawdopodobne.

5. Zamiast podawać jedną wartość wskaźnika gotowości  $K$  rurociągu współpracującego w gruncie, co wymaga znacznych zaokrągleń, dokładniej można scharakteryzować wskaźnik gotowości, określając przedział, w którym się on zawiera.
6. Biorąc pod uwagę konieczność zwrócenia uwagi na małą dokładność, z którą można wyznaczyć wskaźnik gotowości, tak aby był reprezentatywny dla długiego okresu, stajemy przed problemem zaokrągleń obliczania wskaźnika gotowości wielu szeregowo połączonych elementów. W artykule przedstawiono ogólną propozycję podawania zakresu wartości wskaźnika gotowości wraz z prawdopodobieństwem, że jego wartość nie wyjdzie poza określony przedział. Dla małej liczby elementów jest to bezcelowe, ale gdy jest ich sześć, czy dziesięć, to prawdopodobieństwo tego, że wszystkie dziesięć elementów ma równocześnie zawyżone albo zaniżone wartości wskaźnika gotowości, jest bardzo małe, a duża liczba elementów pozwala wyznaczyć wiele przedziałów wskaźnika  $K$  dla całego układu, z odpowiednimi prawdopodobieństwami. To zaś może w wielu wypadkach pozwolić na poszukiwanie przedziału  $K$  dla całego układu szeregowego, który odpowiada narzuconej wartości prawdopodobieństwa, które uznajemy za wystarczające, aby wynik był wiarygodny. Przedstawiono bardzo prostą procedurę przykładową, która jest niczym więcej, jak tylko ilustracją do naszej propozycji i z pewnością może być zastąpiona jakąś bardziej zaawansowaną i efektywną metodą.

#### Literatura

- [1] Czaplinski T., *Problemy niezawodności sieci kanalizacyjnych w powiązaniu z systemem GIS*, Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe, 2–3, 2001, 38-49.
- [2] Kuliczowska E., *Kryteria planowania bezodkrywkowej odnowy nieprzelazowych przewodów kanalizacyjnych*, rozprawa doktorska, Politechnika Świętokrzyska 2007.
- [3] Kuliczowska E., *Kryteria planowania bezwykopowej odnowy nieprzelazowych przewodów kanalizacyjnych*, Monografia Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2008.
- [4] Kuliczkowski A., Madryas C., Szewczyk G., *Wybrane zagadnienia oceny stanu technicznego prefabrykowanych rur kanalizacyjnych*, Materiały konferencyjne, Problemy inżynierii środowiska na tle aktualnych potrzeb łódzkiego województwa miejskiego, t. 2, PZiTS Łódź, 1979, 1-14.
- [5] Kuliczkowski A., Kuliczowska E., *Uwagi krytyczne dotyczące stosowanych klasyfikacji uszkodzeń przewodów kanalizacyjnych*, Instal 2007, 42-47.
- [6] Polok-Kowalska A., *Zespolone ujęcia wody z uwzględnieniem kryteriów techniczno-ekonomiczno niezawodnościowych oraz ochrony ichtiofauny*, praca doktorska, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska, Kraków 2009.
- [7] Saegrov S., *Computer aided rehabilitation of sewer and storm water networks*, IWA Publishing, Apr. 2006, 160.
- [8] Stelmach E., *Koncepcja renowacji tranzytowych rurociągów wody w warunkach angielskich*, praca magisterska, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska, Kraków 2009.
- [9] Wiczysty A., (red.), *Metody oceny i podnoszenia niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę*, Monografia Komitetu Inżynierii Środowiska, PAN, Kraków 2001.