

Włodzimierz Wójcik  
Andrew P. Covar

## ANALIZA NIEZAWODNOŚCI DZIAŁANIA POMPOWNI ŚCIEKÓW NA SIECI KANALIZACYJNEJ W AUSTIN, USA

Stosowanie pompowni ścieków na sieciach kanalizacyjnych wynika z konieczności rozszerzania zasięgu sieci, co powoduje w wielu miejscach trudności w przepływie grawitacyjnym. Pompownie te mogą ulegać awarii, powodując przelewanie się ścieków. Aby zmniejszyć niebezpieczeństwo przelewania się ścieków celowe jest prowadzenie studiów niezawodności pracy pompowni, z uwzględnieniem analiz ilościowych, tzn. wymiernych wskaźników (parametrów) niezawodności.

W artykule omówiono wyniki takich badań prowadzonych w Austin w USA. W mieście tym eksploatowanych jest około 60 pompowni usytuowanych na sieci kanalizacji sanitarnej. W pierwszym etapie badań analizowano tylko awarie całego systemu pompowni, prowadzące do przelewania się ścieków. Nie uwzględniano natomiast tych awarii poszczególnych elementów, które nie doprowadziły do przelewania się ścieków. Do opracowania wyników oraz sporządzania tabel i wykresów wykorzystano mikrokomputer typu PC oraz program SYMPHONY.

### Analiza danych statystycznych

W pierwszym kroku badań dokonano segregacji danych archiwalnych z okresu od 1982 do 1986 r. Przeanalizowano również konstrukcje pompowni dla stwierdzenia, czy można traktować je jako należące do jednego zbioru. Następnie zgrupowano awarie prowadzące do przelewania się ścieków w następujące kategorie przyczyn:

1. Związane z pompą:
  - zatkana pompa,
  - pompa zapowietrzona (w tym zatkany zawór odpowietrzający),
  - uszkodzenie wirnika,
  - brak pompy; ta podkategoria została oddzielona dla pokazania, że może wystąpić przypadek, w którym rezerwowanie pompy nie jest wystarczające (rzeczywistą przyczyną przelewania było np. zatkanie pompy, ale w tym samym czasie pompa podstawowa była w reperacji).
2. Związane z energią zasilania:
  - awaria silnika,
  - awaria bezpiecznika; w tych przypadkach rzeczywista przyczyna zadziałania bezpiecznika nie była znana i po jego wymianie pompa ponownie pracowała,

- awaria wyłącznika,
- brak dopływu energii z zewnątrz pompowni,
- awaria transformatora.

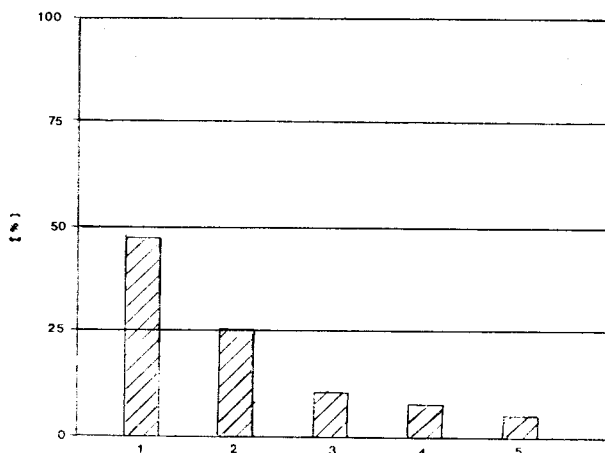
3. Związane z rurociągami:
  - awaria zasuwy,
  - awaria rurociągu tłocznego.
4. Związane z systemem kontrolnym:
  - awaria rurki kontrolnej sprężonego powietrza,
  - awaria wyłącznika kompresora,
  - awaria czujnika ciśnienia powietrza,
  - awaria kompresora.
5. Inne przyczyny:
  - głównie spowodowane przez pomyłkę operatora (np. wyłącznik pozostawiony w pozycji wyłączzonej) lub przez wandalów.

W wymienionym okresie 1982—1986 było w sumie 96 przypadków przelewania się ścieków. Procent przypadków dla wymienionych kategorii przedstawia rysunek 1, a dla subkategorii rysunek 2.

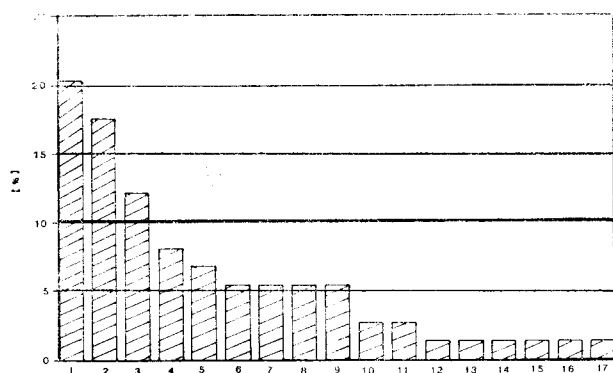
Stwierdzono, że awarie najczęściej związane są z energią (47%) oraz pompami (26%). W zakresie subkategorii najczęstszymi przyczynami przelewania ścieków były: awarie bezpieczników (20%), zatkana pompa (18%) oraz awarie wyłącznika (12%).

### Wyznaczenie niektórych parametrów niezawodnościowych

We wstępnym etapie wyznaczono średni czas pomiędzy awariami (SCPA) dla całego systemu (wszystkich pompowni) oraz dla przelewów spowodowanych awariami analizowanych kom-



Rys. 1. Procent przelewów ścieków spowodowanych awarią (1 — związane z energią, 2 — związane z pompą, 3 — związane z systemem kontrolnym, 4 — związane z rurociągami, 5 — inne).



Rys. 2. Procent przelewań ścieków spowodowanych subkategorią awarii (1 — awaria bezpiecznika, 2 — zatkana pompa, 3 — awaria wyłącznika, 4 — brak energii, 5 — awaria rurociągu tłocznego, 6 — awaria transformatora, 7 — zapowietrzona pompa, 8 — awaria wył. kompresora, 9 — wandalizm i pomyłki ludzkie, 10 — awaria czujnika ciśnienia, 11 — mała wydajność pomp, 12 — awaria silnika, 13 — awaria wirnika pompy, 14 — brak pompy, 15 — awaria rurki kontrolnej w ukt. kontr., 16 — awaria kompresora, 17 — awaria zasuwki).

ponentów. Posłużono się nieco innym wzorem niż stosowany w Polsce, który jest rekomendowany zwłaszcza wtedy, gdy występuje mała ilość awarii:

$$SCPA = \frac{2T}{\chi^2_{0,5;2r+2}} \quad (1)$$

gdzie:

$T$  — czas eksploatacji,  
 $\chi^2_{0,5;2r+2}$  — 50% kwantyl rozkładu  $\chi^2$  przy  $2r+2$  stopni swobody,  
 $r$  — ilość awarii.

Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1  
ŚREDNI CZAS POMIĘDZY AWARIAMI DLA WSZYSTKICH POMPOWNI ORAZ DLA ICH KOMPONENTÓW

| Komponent           | SCPA<br>tys. godz. |
|---------------------|--------------------|
| Wszystkie pompownie | 35,51              |
| Pompa               | 140,91             |
| Silnik              | 1564,28            |
| Kompresor           | 1564,28            |
| Zawór               | 1564,28            |
| Wyłącznik           | 272,33             |
| Bezpiecznik         | 168,46             |
| Transformator       | 562,74             |
| Energia             | 395,19             |

Stąd wyznaczono m. in. funkcję niezawodności całego systemu pompowni:

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad (2)$$

gdzie:

$R(t)$  — funkcja niezawodności,  
 $\lambda = 1/SCPA$  [tys. godz.  $^{-1}$ ],  
 $t$  — czas [tys. godz.].

Stąd:

$$R(t) = \exp(-t/35,5) \quad (3)$$

Wymienione kalkulacje traktowano jako wstępne, gdyż zauważono, że awarie występują coraz rzadziej jako skutek postępującej lepszej eks-

ploatacji, konserwacji oraz bardziej właściwych materiałów. Aby ilościowo oszacować to zjawisko zastosowano test Laplace'a (zwany inaczej centroidalnym):

$$U = \frac{\sum x_i (n - x_o)^2}{x_o \sqrt{1/12 n}} \quad (4)$$

gdzie:

$U$  — estymator testu centroidalnego,  
 $x_o$  — okres obserwacji,  
 $n$  — ilość zdarzeń (awarii),  
 $x_i$  — czas do kolejnego zdarzenia (awarii).

Jeżeli  $U=0$  wtedy trend nie występuje. Jeżeli  $U<0$  wtedy występuje trend zniżkowy, tzn. czasy pomiędzy kolejnymi awariami są coraz większe. Odwrotnie, gdy  $U>0$  wtedy odstępy pomiędzy kolejnymi awariami są sukcesywnie coraz mniejsze. Wyniki testów przedstawiono w tabeli 2. Ponadto, ale nie jest to ujęte w artykule, sprawdzono hipotezy zerowe trendu dla danych poziomów istotności.

Tabela 2  
WYNIKI TESTU CENTROIDALNEGO DLA WSZYSTKICH POMPOWNI ORAZ NIEKTÓRYCH KOMPONENTÓW

| Komponent           | U     | Interpretacja         |
|---------------------|-------|-----------------------|
| Wszystkie pompownie | -2,37 | coraz radsze awarie   |
| Bezpiecznik         | 0,94  | coraz częstsze awarie |
| Wyłącznik           | -0,25 | brak trendu           |
| Zatkana pompa       | -1,69 | coraz radsze awarie   |
| Zapowietrzona pompa | -2,53 | coraz radsze awarie   |
| Transformator       | -1,34 | coraz radsze awarie   |
| System kontrolny    | -0,11 | brak trendu           |

### Wyznaczenie parametrów niezawodnościowych napraw

Jednym z celów pierwszego etapu badań było wstępne oszacowanie statystyczne napraw i remontów. W tym celu wyznaczono średni czas napraw (SCN) dla wszystkich przelewań wg wzoru:

$$SCN = \frac{\sum T}{N} \quad (5)$$

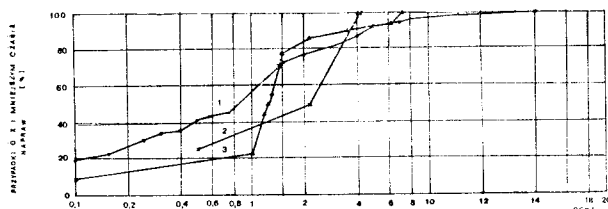
gdzie:

$T$  — sumaryczny czas napraw,  
 $N$  — ogólna ilość napraw.

stąd:  $SCN = 127,01 \text{ h} / 61 = 2,08 \text{ h}$ .

Bardzo ważna jest znajomość nie tylko średniego czasu napraw ale również rozkładu czasu napraw. W tym celu sporządzono krzywe sumowe czasu napraw awarii powodujących przelewanie ścieków dla wszystkich pompowni oraz dla niektórych ich wybranych elementów (rys. 3 i 4).

Na podstawie przebiegu tych krzywych można zauważyć, że występowała duża ilość bardzo prostych awarii i mogły być one szybko naprawione. Mniej niż 10 minut było potrzebne dla usunięcia około 23% awarii, a około 1,5 godziny dla usunięcia ponad 70% awarii. Wymienione krzywe pozwalają oceniać z pewnym

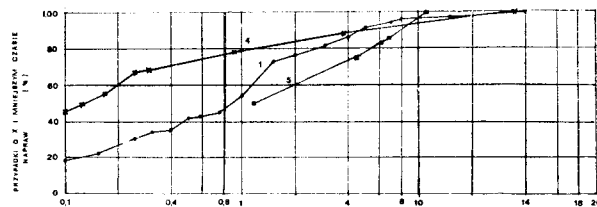


Rys. 3. Krzywe sumowe czasu napraw awarii powodujących przelewanie ścieków dla wszystkich pompowni oraz wybranych elementów (1 — wszystkie pompownie, 2 — rurociąg tłoczny, 3 — bezpiecznik).

prawdopodobieństwem czas trwania awarii. Ma to duże znaczenie praktyczne. Dla przykładu, w przypadku sygnału, że uszkodzony jest przewód tłoczny, można z prawdopodobieństwem 80% przyjąć, że będzie on naprawiony do 3 godzin, a z prawdopodobieństwem 90%, że do 3,5 godz. W przypadku przelewania ścieków spowodowanego awarią bezpiecznika, istnieje prawdopodobieństwo 80%, że będzie on naprawiony do około 1,5 godz. oraz prawdopodobieństwo 90%, że do 3,5 godz. Z drugiej strony prawdopodobieństwo, że naprawa bezpiecznika będzie trwała co najmniej godzinę jest również około 80%. Wynika stąd, że około 65% przypadków awarii naprawianych jest w przedziale 1÷2 godz. Jeżeli chodzi o awarie wyłącznika, to istnieje prawdopodobieństwo 70%, że będzie on naprawiony w czasie do 20 minut. Gdy zdarzy się, że operator otrzymał sygnał o awarii (bez określenia przyczyn), to może on podejmować kroki organizacyjne przyjmując prawdopodobieństwo 90%, że awaria zostanie usunięta do 4,5 godziny, a prawdopodobieństwo 80%, że do 2,5 godzin.

## Wnioski

1. Sposób podejścia w USA do stosowania teorii niezawodności systemów w inżynierii sanitarnej jest podobny jak w Polsce. Pierwszym etapem analizy niezawodnościowej działa-



Rys. 4. Krzywe sumowe czasu napraw awarii powodujących przelewanie ścieków dla wszystkich pompowni oraz wybranych elementów (1 — wszystkie pompownie, 4 — wyłącznik, 5 — transformator).

nia pompowni ścieków powinna być segregacja danych i wstępne obliczenie wybranych parametrów niezawodnościowych.

2. W Austin stwierdzono, że zasilanie energią jest najbardziej krytycznym czynnikiem (w tym głównie awarie bezpieczników i wyłączników), powodującym przelewanie się ścieków w pompowniach. Dla oceny trendu czasu pomiędzy awariami, a stąd skuteczności zabiegów konserwatorskich, można zastosować centroidalny test Laplace'a.

3. Krzywe sumowe czasu napraw mogą posłużyć do bardziej sprawnej organizacji naprawy awarii. W przypadku sygnału o awarii dają one możliwość określenia przypuszczalnego czasu naprawy z danym prawdopodobieństwem.

## LITERATURA

1. A. H-S. ANG, W. H. TANG: Probability Concepts in Engineering Planning and Design. John Wiley and Sons. 1984.
2. E. J. HENLEY, H. KUMAMOTO: Reliability Engineering and Risk Assessment. Prentice Hall, Inc., 1981.
3. A. M. POLEVKO: Fundamentals of Reliability Theory. Scripts Technica, Inc., Academic Press 1968.
4. W. WOJCIK: Assessment of the Overflows in the City of Austin Lift Stations. Water and Wastewater Utility, June 1987.

## RELIABILITY ANALYSIS FOR THE SEWAGE PUMPING STATIONS IN THE SEWER SYSTEM OF AUSTIN, USA

The sanitary sewer system of Austin involves approximately 60 sewage pumping plants. In case of mal-operation, there is an overflow of the sewage stream, which leads to environmental, economic and aesthetic damage. With the aim to improve control, maintenance, and repair (as well as to modify some of

the design recommendations), the operation of the pumping plants was analyzed in terms of the system reliability theory. In this paper presented is some part of the study, which gives the reliability parameters for the entire system, for the pumping plants, and for their components, as well as the operation reliability function for the pumping plants. The time required for emergency repair is assessed by taking into account the mean repair time and the cumulative curves of the repair time.