

TECHNICZNO-EKONOMICZNY WYBÓR RUROCIĄGÓW SIECI WODOCIĄGOWEJ DO RENOWACJI

Wraz z upływem czasu eksploatacji wzrasta oporność hydrauliczna przewodów wodociągowych, a w konsekwencji wzrasta zużycie energii elektrycznej na pokonanie zwiększonych oporów hydraulicznych, a nawet zachodzi konieczność wymiany pomp, budowy rurociągów odciażających, lub poddania przewodów sieci renowacji, przywracającej im początkową sprawność. W niniejszej pracy omówiono metodę optymalnego wyboru rurociągów sieci do renowacji.

W dalszych rozważaniach przyjęto, że renowacja przewodu wodociągowego polega na oczyszczeniu go i wykonaniu wewnętrznej wykładziny cementowo-piaskowej, z tworzyw sztucznych lub innych materiałów odpornych na korozję.

Założono, że wybór rurociągów do renowacji odbywa się z odpowiednim wyprzedzeniem w odniesieniu do przyjętych etapów programu renowacji sieci. Jeden etap programu renowacji może obejmować okres 1, 2, 5 lub więcej lat eksploatacji sieci.

Proponowana metoda polega na poszukiwaniu takiego ciśnienia w źródle zasilania (pompowni), przy którym wskaźnik efektywności ekonomicznej renowacji sieci osiąga najmniejszą wartość. Po opracowaniu na tej podstawie optymalnego programu renowacji w danym etapie (okresie eksploatacji) następuje sprawdzenie, czy sieć po takiej renowacji będzie spełniać przyjęte ograniczenia techniczne, wynikające z założonej niezawodności działania systemu, stanu technicznego sieci i urządzeń zasilających. Jeśli któreś z ograniczeń technicznych tego wymaga, następuje odpowiednia korekta programu.

Analogiczna procedura obowiązuje w odniesieniu do wszystkich kolejnych etapów, z tym, że w obliczeniach dotyczących kolejnego etapu uwzględnia się odpowiednio zaktualizowany stan sieci i fakt, że rurociągi wybrane uprzednio do renowacji zostały jej poddane.

Podstawy rachunku ekonomicznego

Wskaźnik efektywności ekonomicznej renowacji sieci

Dla potrzeb określenia kryterium ekonomicznego renowacji wprowadzono pojęcie wskaźni-

ka efektywności ekonomicznej renowacji sieci opisanego wzorem:

$$E_r = \frac{I_r(r+s) + El_r}{W} \quad (1)$$

w którym:

I_r — koszt renowacji sieci, zł,
 r — stopa dyskontowa; można przyjąć $r=0,08$ jak przy obliczaniu wskaźnika efektywności ekonomicznej inwestycji wodociągowej,
 s — średnia stawka amortyzacyjna; ze względu na brak danych przyjęto jak dla rurociągów sieci rozdzielczej $s=0,01$,
 El_r — dodatkowe koszty eksploatacyjne zależne od liczby wybranych do renowacji rurociągów i ich przeznaczenia w sieci, równe dodatkowym kosztom energii elektrycznej zużywanej na tłoczenie wody do sieci o chropowatości przewodów większej od normatywnej, zł/rok,
 W — średnia w danym etapie programu renowacji dostawa wody do odbiorców, m^3/rok .

Koszty renowacji

Według literatury [1, 2] jednostkowy koszt renowacji rurociągu K_r jest proporcjonalny do kosztu budowy rurociągu i nie zależy w istotny sposób od jego chropowatości. Zatem koszt renowacji „l” przewodów sieci można obliczyć z zależności:

$$I_r = \sum_{i=1}^I K_{ri} \cdot L_i, \quad (2)$$

w której:

K_{ri} — jednostkowy koszt renowacji 1 m i-tego rurociągu zł,
 L_i — długość i-tego rurociągu w m.

Jednostkowy koszt renowacji można obliczyć ze wzoru:

$$K_{ri} = a \cdot J_i \quad (3)$$

w którym:

a — współczynnik proporcjonalności kosztów renowacji do kosztów inwestycyjnych rurociągu, wg [1, 2] $a=0,2-0,3$, a według danych z NRD $a=0,4$.

J_i — jednostkowy koszt budowy rurociągu na odcinku i-tym, zł.

Dodatkowe koszty energii elektrycznej

Koszt nadwyżki energii elektrycznej El_r można obliczyć ze wzoru:

$$El_r = El - El_n, \quad (4)$$

w którym:

El — koszt energii elektrycznej zużytej na tłoczenie wody do sieci przed renowacją, zł/rok,

El_n — koszt energii elektrycznej zużytej na tłoczenie wody do sieci o normatywnej chropowatości wszystkich rurociągów sieci (np. $k=1,5$ mm).

Przy założeniu równomiernej pracy pomp z wydajnością Q , roczny koszt energii elektrycznej El zużytej na tłoczenie wody do jednostronnie zasilanej sieci przed renowacją można obliczyć ze wzoru:

$$El = \varepsilon \cdot Q \cdot (H_g + h_d) \quad (5)$$

w którym:

ε — roczny koszt energii elektrycznej zużywanej na podnaszenie $1 \text{ m}^3/\text{s}$ wody na wysokość 1 m ,

$$\varepsilon = \frac{85882 \cdot e}{\eta}, \text{ zł/rok}$$

gdzie:

η — współczynnik sprawności zespołu pompowego,

e — cena energii elektrycznej w zł za 1 kWh ,

Q — wydajność pompowni, m^3/s ,

H_g — wysokość geometryczna podnoszenia pompy, m.

Występującą we wzorze (5) wartość h_d można utożsamić z sumą wysokości strat hydraulicznych między węzłem zasilania a węzłem końcowym sieci, liczonych po dowolnej drodze łączącej te dwa węzły, pod warunkiem, że spełnione jest w sieci II prawo Kirchhoffa $\Delta h = 0$.

obw

Roczny koszt energii elektrycznej zużywanej na tłoczenie wody do sieci o chropowatości normatywnej można obliczyć ze wzoru (5) wstawiając w miejsce h_d wysokość strat w sieci h_n obliczoną przy wydajności źródła zasilania Q i normatywnej chropowatości przewodów. Wzór (5) przyjmie wówczas postać:

$$El_n = \varepsilon \cdot Q \cdot (H_g + h_n) \quad (6)$$

Uwzględniając we wzorze (4) zależność (5) i (6) otrzymamy po uproszczeniu wyrażenie:

$$El_r = \varepsilon \cdot Q \cdot (h_d - h_n) \quad (7)$$

określające roczny koszt energii elektrycznej zużywanej na pokonanie podwyższonej oporności rurociągów.

W warunkach zmieniającej się w czasie wydajności pompowni Q i wzrostu oporności hydraulicznej sieci, roczny koszt energii El_r wprowadzony do wyrażenia (1) stanowi średnią arytmetyczną rocznych kosztów z całego rozpatrywanego etapu programu renowacji sieci wodociągowej:

$$El_{rt} = 1/t \sum_{k=1}^t El_{rk} \quad (8)$$

w której:

t — liczba lat w rozpatrywanym etapie renowacji,

El_{rk} — koszty energii elektrycznej na pokonanie oporów hydraulicznych w sieci w roku k -tym danego etapu renowacji, zł/rok.

Prawidłowe określenie średnich rocznych kosztów energii elektrycznej w danym etapie programu wymaga znajomości:

— rozkładu godzinowego zaopatrzenia w wodę w ciągu doby we wszystkich latach danego etapu renowacji (w okresie t lat),

— krzywej wzrostu średniego dobowego zapotrzebowania na wodę w tym samym okresie,

— opłat za energię elektryczną w zależności od pory dnia i roku we wszystkich latach etapu renowacji,

— stanu i sprawności hydraulicznej sieci wodociągowej we wszystkich latach etapu renowacji, itd.

Uzyskanie tych informacji jest przy obecnym stanie wiedzy i sprawozdawczości niezmiernie trudne. Z tego względu w dalszych rozważaniach, za podstawę obliczenia rocznych kosztów energii elektrycznej zużytej na pokonanie oporów hydraulicznych w sieci, przyjęto wzór (7) wprowadzając do niego w miejsce:

Q — średnie godzinowe zapotrzebowanie na wodę w dobie o maksymalnym zapotrzebowaniu w ostatnim roku danego etapu renowacji — Q_{srt} , m^3/s ,

ε — jednostkowy roczny koszt energii elektrycznej obliczony przy przyjęciu aktualnej średniej ceny energii elektrycznej,

h_d — wysokość straty hydraulicznej h_{dt} w sieci (przed renowacją) w ostatnim roku danego etapu renowacji, przy zapotrzebowaniu na wodę Q_{srt} ,

h_n — wysokość straty hydraulicznej h_{nt} w sieci o normatywnej oporności w ostatnim roku danego etapu renowacji przy rozbiórce wody Q_{srt} .

Uwzględniając powyższe założenia przybliżony roczny koszt energii elektrycznej El_{rt} , zużywanej w pompowni z płynną regulacją wydajności, można obliczyć ze wzoru:

$$El_{rt} = \varepsilon \cdot Q_{srt} (h_{dt} - h_{nt}) \quad (9)$$

Wyznaczanie optymalnego ciśnienia w źródle zasilania

Wprowadzając do wzoru (1) wyrażenie (2) i (9) otrzymano wzór na podstawie którego można obliczyć wartość wskaźnika efektywności ekonomicznej renowacji sieci wodociągowej:

$$E_r = \frac{1}{W} \left[(r+s) \sum_{i=1}^l K_{ri} L_i + \varepsilon Q_{srt} (h_{dt} - h_{nt}) \right] \quad (10)$$

Minimum funkcji (10) poszukuje się metodą kolejnych przybliżeń, zmieniając skokowo rzędną linii ciśnienia w pompowni. Następnie aproksymuje się utrzymaną wartość E_r i wyznacza się optymalną rzędną linii ciśnienia w pompowni H_{opt} , przy której wskaźnik E_r ma wartość minimalną.

Zasady wyboru odcinków sieci (rurociągów) do renowacji

Wskaźnik opłacalności renowacji rurociągów

Do określenia opłacalności renowacji danego odcinka sieci konieczne są dane:

- koszt renowacji odcinka sieci,
- efekt renowacji, czyli zmniejszenie kosztu energii elektrycznej zużywanej na pokonanie oporów hydraulicznych rurociągu,
- natężenie przepływu w rurociągu jakie ma miejsce przed renowacją,
- oporność hydrauliczna rurociągu zależna od czasu eksploatacji, jakości wody i średnicy przewodu,
- oporność hydrauliczną rurociągu po renowacji.

Wskaźnik opłacalności renowacji i -tego odcinka sieci można obliczyć ze wzoru:

$$Q_{ri} = \frac{\Delta E_{ri} - I_{ri}}{W_i \cdot L_i} \quad (11)$$

w którym:

- Q_{ri} — wskaźnik opłacalności renowacji i -tego odcinka zł/rok,
- I_{ri} — koszt renowacji i -tego odcinka, zł,
- ΔE_{ri} — obniżenie rocznego kosztu energii elektrycznej zużywanej na pokonywanie oporów hydraulicznych przy przepływie wody o natężeniu q_i , osiągnięte na skutek renowacji i -tego odcinka, zł/rok,
- W_i — ilość wody przepływającej rurociągiem w ciągu roku, m^3/rok ,
- L_i — długość rurociągu, m.

Obniżenie rocznego kosztu energii spowodowane renowacją wynosi:

$$\Delta E_{ri} = \varepsilon \cdot q_i^3 (C_i - C_{ri}) L_i, \text{ zł/rok} \quad (12)$$

gdzie:

- q_i — natężenie przepływu w rurociągu przed renowacją, m^3/s ,
- C_i — współczynnik oporności właściwej rurociągu przed renowacją, zależny od czasu eksploatacji i jakości wody [3, 4], s^2/m^6 ,
- C_{ri} — współczynnik oporności właściwej rurociągu po renowacji, s^2/m^6 .

Algorytm optymalnego wyboru rurociągów do renowacji

Wybór rurociągów do renowacji odbywa się metodą kolejnych przybliżeń według następującego algorytmu:

- 1) Oblicza się hydraulicznie sieć przy rozbieżce wody Q_{str} i sprawności hydraulicz-

nej sieci w ostatnim roku pierwszego etapu programu renowacji sieci.

2) Oblicza się wskaźnik efektywności ekonomicznej renowacji ze wzoru (1), przy czym koszt renowacji I_r w pierwszym roku pierwszego etapu jest równy zero.

3) Obniża się rzędne ciśnienia w pompowni i w pozostałych węzłach sieci o założoną wartość ΔH (np. 1—5 m).

4) Poszukuje się węzłów krytycznych (niedoboru ciśnienia) w sieci i uszeregowuje się je w kolejności od największych do najmniejszych niedoborów ciśnienia.

5) Buduje się drzewo grafu składające się z rurociągów o najwyższych wskaźnikach opłacalności renowacji.

6) Wybiera się z drzewa grafu drogi krytyczne (drogi renowacji) łączące węzeł zasilania z węzłami krytycznymi (niedoboru ciśnienia) i uszeregowuje się odcinki położone na każdej drodze krytycznej w kolejności od największych do najmniejszych wartości wskaźników opłacalności renowacji.

7) Wybiera się tyle odcinków o największych wskaźnikach opłacalności leżących na drodze krytycznej nr 1, których renowacja niweluje niedobór ciśnienia w węźle krytycznym K1.

8) Wybiera się odcinki do renowacji leżące na kolejnych drogach krytycznych, z uwzględnieniem wybranych już uprzednio odcinków.

9) Oblicza się hydraulicznie sieć po renowacji przy założeniach jak w p. 1), a także przy założeniu, że wszystkie wybrane rurociągi są po renowacji.

10) Sprawdza się czy renowacja wybranych rurociągów zlikwiduje niedobory ciśnienia w sieci. W tym celu poszukuje się węzłów krytycznych. Jeśli w którymkolwiek węźle sieci po renowacji ciśnienie jest niewystarczające, wówczas należy powtórzyć obliczenia według punktów 5—10. Natomiast jeśli niedoborów ciśnienia nie ma, to oblicza się wskaźnik efektywności ekonomicznej renowacji sieci.

Poszukiwanie minimum wskaźnika efektywności renowacji sieci przeprowadza się metodą kolejnych przybliżeń, zmniejszając rzędną ciśnienia w pompowni o wartości ΔH i wykonując obliczenia wg punktów 1—10. Obliczenia te przeprowadza się przy kilku różnych, coraz to niższych rzędnych ciśnienia w pompowni spełniających warunek:

$$H_{p \min} \leq H_p \leq H_{p \max} \quad (13)$$

w którym:

$H_{p \min}$ — wymagana rzędna ciśnienia w pompowni współpracującej z siecią po całkowitej renowacji,

$H_{p \max}$ — wymagana rzędna ciśnienia w pompowni współpracującej z siecią przed renowacją.

Uwzględnienie ograniczeń technicznych

W warunkach odbiegających od przyjętych do wyboru optymalnego z ekonomicznego punktu widzenia, programu renowacji sieci, może okazać się, że sieć po renowacji nie spełnia zadań, bądź parametry charakteryzujące jej działanie wykraczają poza ograniczenie natury technicznej. Zachodzi wówczas konieczność rezygnacji ze spełnienia przez sieć przyjętego kryterium optymalizacji takiego skorygowania programu renowacji sieci, aby przy możliwie najmniejszym odstępstwie od rozwiązania podstawowego, spełnione były wszystkie ograniczenia techniczne wynikające z „Normatywu projektowania sieci wodociągowych” i odpowiednich norm.

Rozbudowa (modernizacja) sieci konieczna jest wówczas, gdy:

— sieć ma zbyt małą przepływność, tzn. gdy całkowita jej renowacja nie spowoduje wymaganego podwyższenia ciśnienia w węzłach sieci,

— ciśnienie w pompowni przekracza dopuszczalną wartość mimo renowacji całej sieci,

— prędkości przepływu w rurociągach sieci po renowacji przekroczą wartości określone przez normę.

Do przedstawionej metody techniczno-ekonomicznego wyboru rurociągów sieci opracowany został w Instytucie Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej program RENOS1 w języku FORTRAN.

LITERATURA

1. P. HIROCH: Watermain Cleaning. Water and Sewage Works, January 1960.
2. H. JANCZEWSKI: Renowacja starych rurociągów. GWTS 12/1979.
3. E. Wł. MIELCARZEWICZ, H. PEŁKA: Model matematyczny sieci wodociągowej przystosowany do prognozowania wzrostu oporności hydraulicznej sieci na podstawie składu fizyczno-chemicznego wody. Raport Inst. Inż. Ochr. Środ. Pol. Wrocław SPR-34/81.
4. H. PEŁKA: Wzrost oporności hydraulicznej przewodów wodociagowych. Praca doktorska, Inst. Inż. Ochr. Środ. Pol. Wrocław. 1977.