

Maciej MROWIEC, Kamil PLUTA, Oliwia KOCHAŃSKA

Politechnika Częstochowska, Instytut Inżynierii Środowiska  
ul. Brzeźnicka 60a, 42-200 Częstochowa

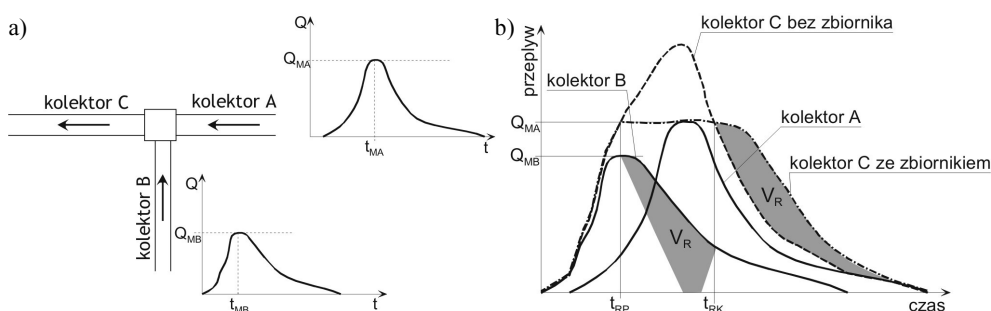
## Zastosowanie układów RTC do regulacji odpływu ze zbiorników retencyjnych

Przedstawiono problematykę regulacji przepływu ścieków opadowych poprzez zastosowanie zbiorników retencyjnych wyposażonych w układy sterowania w czasie rzeczywistym. Opracowany autorski algorytm o nazwie CORT umożliwia regulację odpływu ścieków przy współdziałaniu dwóch lub większej liczby zbiorników retencyjnych. Przykład wykorzystania algorytmu CORT do szeregowego połączenia dwóch zbiorników retencyjnych przy występującej nierównomierności opadu na poszczególnych zlewniach umożliwił porównanie pasywnego i dynamicznego wariantu sterowania przepływem. Wyniki symulacji wykazały, że dynamiczne sterowanie przepływem pozwala w pełni wykorzystać zdolności retencyjne zbiorników, co przekłada się zarówno na redukcję podtopień w obrębie zlewni, jak i minimalizację objętości odprowadzanych do odbiornika nieczyszczonych ścieków opadowych.

**Słowa kluczowe:** zbiorniki retencyjne, systemy kanalizacyjne, sterowanie w czasie rzeczywistym

### Wprowadzenie

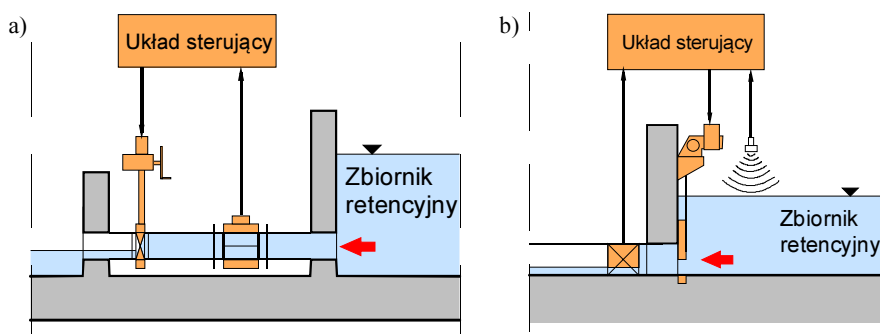
Zbiorniki retencyjne stanowią obecnie podstawowy element nowoczesnych systemów odwodnienia obszarów zurbanizowanych, umożliwiając kontrolę działania sieci w aspekcie ilościowym i jakościowym. Tradycyjne podejście do projektowania zbiorników kanalizacyjnych odcciążających hydraulicznie sieć kanalizacyjną ogranicza się zwykle do uwzględnienia pojedynczych opadów o stałej wartości natężenia odpływu  $Q_0$ . W rzeczywistych warunkach sieć kanalizacyjna jest układem bardzo złożonym, w którym zmienność czasowa i przestrzenna opadów oraz niestabilny przepływ ścieków w kanałach powoduje inne efekty niż dla przyjętych do projektowania opadów modelowych [1]. Klasycznym przykładem może być tutaj występowanie zjawiska nakładania się szczytowych wartości przepływu w węzłach łączących dwa lub więcej dopływów. Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie przykład takiej sytuacji przy założeniu, że kolektor C ma zdolność przepustową równą maksymalnemu przepływowi przez kolektor A ( $Q_{MA}$ ). W przypadku braku możliwości budowy typowego zbiornika odcciążającego na kolektorach A i C oznaczałoby to niemożność przyłączenia kolektora B. Analizując hydrogramy dopływu obydwu kolektorów (A i B), widać, że ich wartości szczytowe ( $Q_{MA}$  i  $Q_{MB}$ ) występują w innym momencie (tzn.  $t_{MB} < t_{MA}$ ), co można wykorzystać, projektując zbiornik retencyjny, regulujący odpływ z kolektora B.



Rys. 1. Przykład wymiarowania zbiornika retencyjnego z uwzględnieniem nierównomierności obciążenia kolektorów kanalizacyjnych

Stosując superpozycję hydrogramów dopływu z kolektorów A i B, otrzymuje się hydrogram odpływu przez kolektor C bez zastosowania zbiornika retencyjnego. Ponieważ wartość graniczna jest zadana ( $Q_{MC} = Q_{MA}$ ), to możliwe jest określenie, o jaką wartość trzeba zredukować przepływ na kolektorze B, by spełnić założony warunek. W efekcie możliwe jest wyznaczenie wymaganej pojemności retencyjnej  $V_R$  (szare pole na rysunku 1b). Jak widać, retencja ścieków rozpoczyna się po wystąpieniu szczytowej wartości przepływu w kolektorze B, a przez krótki czas cały przepływ ścieków  $Q_B$  jest retencjonowany. W ten sposób otrzymuje się paradoksalną sytuację, w której maksymalny chwilowy przepływ nie został zredukowany ani w kolektorze A, ani w B. Trudno też w tym przypadku określić współczynnik redukcji przepływu, stosując jego definicję jak dla typowych zbiorników odciażających, bo odpływ jest zmienny w zakresie od 0 do  $Q_{MB}$ .

Taki rodzaj zbiornika będzie wymagał przynajmniej podstawowego systemu sterowania w czasie rzeczywistym, w którym zamknięcie/otwarcie klap i zaworów jest uzależnione od podanych stanów mierzonych przez czujniki poziomu bądź przepływu, zlokalizowane w kluczowych punktach, tworzących sieć monitoringu [2, 3]. W przypadku pojedynczego zbiornika kwestia zdalnego sterowania odpływem sprowadza się do zastosowania jednego z prostych układów sterowania [4] (rys. 2).



Rys. 2. Schemat automatycznego sterowania odpływem ścieków ze zbiornika retencyjnego z wykorzystaniem: a) czujnika przepływu, b) czujnika napelnienia

W sytuacji gdy w systemie zlokalizowanych jest więcej zbiorników retencyjnych, a ich synergiczne oddziaływanie na sieć kanalizacyjną na odcinkach położonych poniżej jest trudne do określenia za pomocą metod uproszczonych, to zwykle konieczne jest poszukiwanie optymalnych ustawień poprzez modelowanie oraz stosowanie procesów optymalizacji [5]. Można przy tym wyróżnić optymalizację prowadzoną w trybie on-line (w czasie rzeczywistym) bądź off-line, czyli niezależnie od działającej w danym momencie sieci. Tryb on-line musi się charakteryzować dużą szybkością obliczeń, gdyż ich wyniki są bezpośrednio stosowane do bieżących ustawień regulatorów [6]. Wymusza to użycie modeli symulacyjnych działających w wersjach uproszczonych (np. model fali kinematycznej), natomiast proces optymalizacji oparty jest najczęściej na programowaniu liniowym. W trybie off-line bazuje się zwykle na archiwalnych danych o opadach i stosuje się bardziej szczegółowe i czasochłonne modele (np. model fali dynamicznej) oraz bardziej zaawansowane metody optymalizacyjne (sieci neuronowe, algorytmy genetyczne). Efektem optymalizacji w trybie off-line jest zwykle opracowany zbiór reguł sterujących oraz warunkowych (ang. *control rules*, *condition rules*), które obejmują złożoną skalę i dynamikę opadów atmosferycznych [7, 8]. Wadą takiego rozwiązania jest jednak konieczność budowania bardzo złożonych algorytmów sterowania, obejmujących nierzadko kilkadziesiąt czy nawet kilkaset reguł [9]. Ponadto pozostaje niepewność co do tego, czy rozpatrzone w trybie off-line opady stanowią wystarczający zbiór danych do wyznaczenia strategii sterowania. Dlatego też w systemach sterowania działaniem zbiorników retencyjnych preferowane są algorytmy rozwiązujące zadania optymalizacji w trybie on-line [10].

## 1. Koncepcja sterowania w czasie rzeczywistym z zastosowaniem algorytmu CORT

Ponieważ większość prezentowanych w literaturze algorytmów optymalizacji działania zbiorników retencyjnych ma ograniczoną dostępność (nie są opracowane w formie gotowych aplikacji, charakteryzują się wysoką ceną) bądź jest przedstawiana jedynie w formie ogólnych założeń, podjęto prace nad własnym programem. Opracowano algorytm o nazwie CORT (*Control and Optimization of Retention Tanks in a Real Time*), którego głównym zadaniem jest nie tyle dokładne symulowanie zachowania się całego układu kanalizacyjnego, ile określenie najlepszej strategii sterowania przepływem na podstawie przybliżonych danych przepływu w sieci kanalizacyjnej [11]. Skoncentrowano się przy tym na poszukiwaniu optymalnych wartości natężenia odpływu ze zbiorników retencyjnych tak, by minimalizować funkcję celu. W większości przypadków celem będzie redukcja objętości ścieków przelewających się awaryjnie do odbiornika bądź ścieków wypływających w danym węźle systemu kanalizacyjnego.

Ponieważ wyznaczenie optymalnej strategii sterowania dla kilku zbiorników generuje bardzo dużą liczbę możliwych wariantów, wymagało to opracowania programu, który w uproszczony sposób umożliwiłby symulowanie zmiennego w czasie

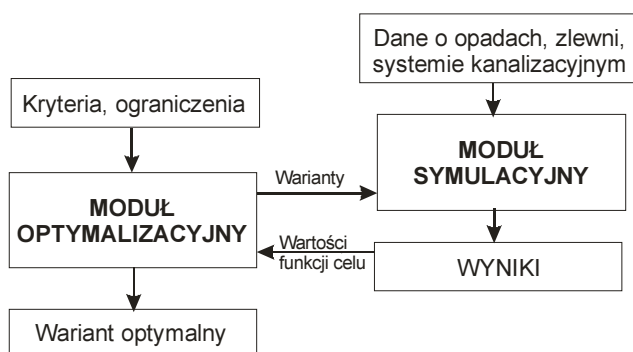
i przestrzeni procesu transformacji opadu w odpływ ze zlewni zurbanizowanej. Dlatego algorytm CORT składa się z dwóch współdziałających modułów: symulacyjnego oraz optymalizacyjnego, których wzajemna relacja została przedstawiona na rysunku 3. Należy przy tym wyjaśnić, że ze względu na swą strukturę sformułowany algorytm poszukiwania najlepszej strategii sterowania nie jest klasycznym zadaniem optymalizacyjnym, a raczej quasi-optymalizacyjnym. Nazwa modułu „optymalizacyjnego” została wprowadzona, by wyraźnie rozdzielić dwie zupełnie odmienne funkcje algorytmu CORT. Szczegóły struktury algorytmu przedstawiono w publikacji [6], natomiast w niniejszym artykule skoncentrowano się na symulacji zbiorników retencyjnych (rys. 4), które stanowią najbardziej złożony element proponowanego algorytmu. Dla każdego zbiornika musi zostać zdefiniowana jego całkowita pojemność retencyjna  $V_{ZB}$ . Zmiana objętości retencyjnej obliczana jest według ogólnego równania bilansu przepływów (w postaci różnic skończonych):

$$\Delta V_{Ri(t)} = (Q_{RiIN} - Q_{RiOUT}) \Delta t$$

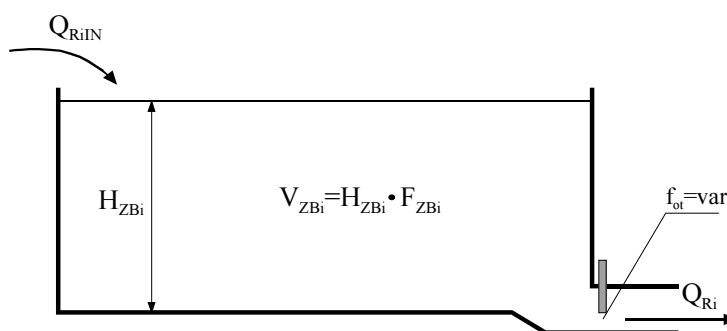
gdzie:

$Q_{RiIN}$  - natężenie dopływu do zbiornika Ri w czasie  $dt$ ,

$Q_{RiOUT}$  - natężenie odpływu ze zbiornika Ri w czasie  $dt$ .



Rys. 3. Ogólna struktura algorytmu CORT



Rys. 4. Schemat obliczeniowy zbiornika retencyjnego zastosowany w module symulacyjnym algorytmu CORT

Natężenie odpływu  $Q_{Ri}$  jest wielkością sterowaną, dla której poszukiwana jest optymalna wartość, spełniająca sformułowane na wstępie kryteria ograniczające. Na wstępie powinien być zatem określony zakres możliwych do ustawienia wartości natężenia odpływu  $Q_{Ri}$  ( $0; Q_{RiMAX}$ ), przy czym zmienność natężenia w tym zakresie jest skokowa - wartości pośrednie także muszą zostać zdefiniowane jako dane wejściowe do modułu optymalizacji. Liczba możliwych ustawień implikuje większą liczbę wariantów, zatem z punktu widzenia czasu obliczeń powinno się dążyć do jej minimalizacji. Z drugiej strony zwiększenie możliwych ustawień zapewnia lepsze dopasowanie wartości  $Q_{Ri}$  do danej sytuacji w systemie, co przekłada się na osiągnięcie lepszych efektów wynikających z regulacji przepływu. Przy tak zdefiniowanym sterowaniu zakłada się, że zmiana pola powierzchni czynnej otworu spustowego ( $f_{oi}$ ) odbywa się płynnie i możliwe jest dopasowanie pola powierzchni otworu spustowego do napełnienia zbiornika ( $H_{ZBi}$ ) tak, by uzyskać żądane w danym momencie natężenie odpływu ścieków ( $Q_{Ri}$ ). Bez względu na liczbę zadanych wartości sterujących zbiornikiem w każdym przypadku bazowym stanem działania zbiornika jest przepływ tranzytowy, który występuje, jeżeli natężenie dopływu do zbiornika jest mniejsze niż  $Q_{RiMAX}$ .

Dla każdego kroku czasowego obliczana jest objętość zatrzymanych w zbiorniku ścieków z uwzględnieniem ograniczenia, jakim jest całkowita objętość zbiornika  $V_{ZBi}$ :

$$\text{jeżeli } V_{Ri(t-1)} + dV_{Ri(t)} \leq V_{ZBi}$$

$$\text{to } V_{ORi(t)} = 0 \quad \text{oraz } V_{Ri} = V_{R(i-1)} + dV_{Ri}$$

oraz:

$$\text{jeżeli } V_{Ri(t-1)} + dV_{Ri(t)} > V_{ZBi}$$

$$\text{to } V_{ORi(t)} = V_{Ri(t)} - V_{ZB} \quad \text{oraz } V_{Ri(t)} = V_{ZB}$$

gdzie:

$V_{Ri(t-1)}$  - objętość ścieków w zbiorniku, obliczona dla poprzedniego kroku czasowego,

$V_{Ri(t)}$  - objętość ścieków w zbiorniku, obliczona w bieżącym kroku czasowym,

$V_{ORi(t)}$  - objętość ścieków, które podtapiają zlewnię w czasie  $dt$ ,

$V_{ZBi}$  - objętość zbiornika retencyjnego.

W drugim przypadku następuje przepełnienie zbiornika i wystąpienie objętości, która wypływa na powierzchnię zlewni bądź zrzucana jest przez przelew awaryjny ( $V_{ORi}$ ) - w zależności od przyjętego rozwiązania. Warto przy tym zaznaczyć, że wartość  $V_{ZB}$  może uwzględniać nie tylko objętość samego zbiornika, ale także ewentualną retencję kanałową.

Istotny wpływ na regulację odpływu ścieków ma sposób opróżniania zbiornika (grawitacyjny lub pompowy). W drugim przypadku symulowanie działania zbior-

nika jest dużo prostsze, ponieważ z niewielkim błędem można założyć, że każdą żadaną wartość przepływu  $Q_{Ri}$  można osiągnąć niezależnie od aktualnego napełnienia zbiornika (tzn. jedynym warunkiem jest  $V_{Ri(t)} > 0$ ). Większych problemów nastrocza czysto grawitacyjne opróżnianie, gdyż zwiększanie czynnej powierzchni otworu regulacyjnego  $f_{ot}$  będzie mieć swoje fizyczne granice ( $f_{otmax}$ ). Dlatego też dla każdej wartości przepływu sterowanego  $Q_{Ri}$  będzie określona graniczna wartość napełnienia zbiornika, poniżej której nie będzie już możliwe osiągnięcie zadanej wartości  $Q_{Ri}$ .

Z tego względu konieczne jest wyznaczenie warunków ograniczających zadawanie natężeń przepływu  $Q_{Ri}$  dla znanej wartości napełnienia zbiornika  $h_{Ri(t)}$ , co można wykonać na podstawie powszechnie stosowanego wzoru na wydatek otworów hydraulicznie małych (pomija się zmienny rozkład prędkości na wysokości otworu):

$$Q_{otworu} = \mu f_{ot} \sqrt{2gh_{Ri(t)}}$$

gdzie:

$h_{Ri(t)}$  - napełnienie zbiornika w czasie  $t$ ,

$\mu$  - współczynnik wydatku otworu,

$f_{ot}$  - pole powierzchni czynnej otworu regulacyjnego.

Przyjmując wartość współczynnika  $\mu = \text{const}$  oraz podstawiając maksymalną czynną powierzchnię otworu spustowego  $f_{ot} = f_{otmax}$ , otrzymamy parametr maksymalnego wydatku otworu  $C_0$  w postaci:

$$C_{0max} = \mu f_{otmax} \sqrt{2g}$$

Jeżeli ponadto przyjmiemy przyrządczny kształt zbiornika  $F_{ZB} = \text{const}$ , to można wyznaczyć zależność:

$$\frac{V_{Ri(t)}}{V_{ZBi}} = \frac{h_{Ri(t)}}{H_{ZBi}}$$

gdzie  $H_{ZBi}$  - maksymalne napełnienie zbiornika  $Ri$ .

Dla symulacji procesu opróżniania konieczne jest wprowadzenie dodatkowego parametru opisującego geometrię zbiornika, czyli maksymalnego napełnienia zbiornika  $H_{ZB}$ . Dla przeciętnych warunków maksymalne napełnienie zbiorników mieści się zwykle w granicach 1,5÷3,0 m.

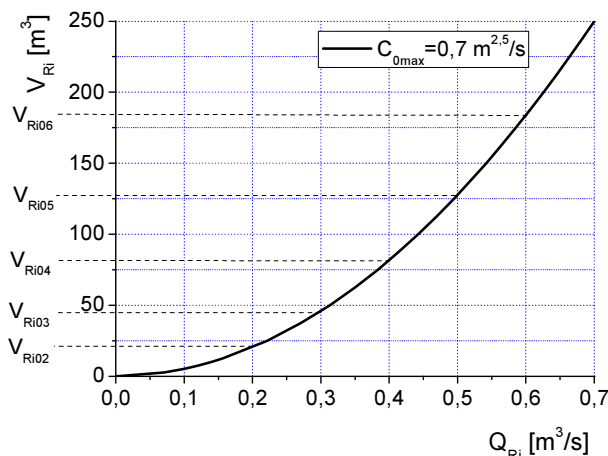
W efekcie otrzymuje się postać wzoru, umożliwiającą wyznaczenie minimalnej głębokości, a w konsekwencji objętości  $V_{Rimin}$ , dla której możliwe jest jeszcze uzyskanie zadanego natężenia sterowanego  $Q_{Ri}$ :

$$Q_{Ri} = C_{0max} \sqrt{\frac{V_{Rimin}}{V_{ZBi}} \cdot H_{ZBi}}$$

zaś po przekształceniu:

$$V_{Ri\min} = \frac{V_{ZBi}}{H_{ZBi}} \left( \frac{Q_{Ri}}{C_{0\max}} \right)$$

Na rysunku 5 przedstawiono sposób wyznaczania wartości ograniczających dla poszczególnych przepływów sterujących  $Q_{Ri}$ , przyjmując parametry zbiornika  $C_{0\max} = 0,7 \text{ m}^{2,5}/\text{s}$ ,  $H_{ZB} = 2,0 \text{ m}$  oraz  $V_{ZB} = 500 \text{ m}^3$ .



Rys. 5. Przykłady wyznaczania granicznych wartości stosowania dla poszczególnych przepływów  $Q_{Ri}$

Wyznaczenie wartości  $V_{Ri\min}$  ogranicza automatycznie liczbę możliwych wariantów działania zbiornika w procesie poszukiwania optymalnych ustawień regulacji przepływu.

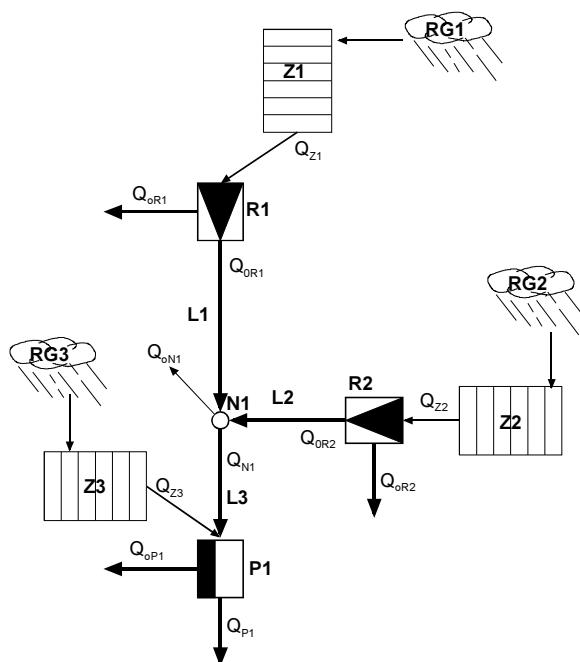
W każdym przypadku symulacyjnym wystąpi moment, dla którego natężenie odpływu z komory retencyjnej obniży się do poziomu będącego poniżej najniższego możliwego przepływu sterowanego (wyłączając z tego przypadek skrajny, gdy  $Q_{Ri} = 0$ ). Dalsze opróżnianie będzie przebiegać analogicznie jak w tradycyjnych zbiornikach pasywnych. Jak widać na przykładzie prezentowanym na rysunku 5, swobodne opróżnianie dotyczy sytuacji, gdy w zbiorniku pozostało zaledwie 6% jego całkowitej objętości.

Jak wykazały badania laboratoryjne prowadzone na modelach zbiorników rurowych [11], opróżnianie zbiorników od głębokości nieznacznie większej od wysokości otworu spustowego jest trudne w opisie matematycznym, gdyż poza problemem przyjmowania wartości współczynnika wydatku pojawiają się pytania, czy jest to nadal wypływ przez otwór hydraulicznie mały czy duży, czy też może jest to już przelew o szerokiej koronie. Praktycznie wszyscy autorzy modeli zbiorników retencyjnych (m.in. [12]) zakładali w opisie ich hydraulicznego działania daleko idące

uproszczenia. Jest to o tyle uzasadnione, że całkowite opróżnianie jest możliwe dopiero po przejściu opadów, gdy system kanalizacyjny nie będzie już wymagać sterowania ani pasywnego, ani dynamicznego. Dlatego też w procesie symulacji działania zbiorników opróżnianie końcowej objętości nie ma praktycznego znaczenia i bez dużej szkody dla jakości uzyskiwanych wyników można przyjąć, że jest ono stałe, równe najmniejszej wartości sterowanego natężenia odpływu [13].

## 2. Przykład regulacji zbiorników retencyjnych z zastosowaniem algorytmu CORT

W celu sprawdzenia skuteczności działania zaproponowanego algorytmu CORT przeanalizowano przykłady optymalizacji fikcyjnego systemu kanalizacyjnego wyposażonego w dwa zbiorniki retencyjne połączone równolegle, z dodatkową zlewnią, z której odpływ nie jest kontrolowany (rys. 6). Założono, że celem optymalizacji jest zminimalizowanie wartości natężenia zrzutu ścieków przez przelew odciażający P przed oczyszczalnią ścieków deszczowych ( $Q_{oP1} \Rightarrow \min.$ ). Jako dodatkowe warunki ograniczające rozwiązanie zadania przyjęto, że niedopuszczalne jest przepięnienie któregośkolwiek ze zbiorników retencyjnych ( $Q_{oR1} \Rightarrow \min.$ ,  $Q_{oR2} \Rightarrow \min.$ ), połączonych ze sobą równolegle. Procesy symulacji prowadzono, przyjmując krok czasowy równy  $\Delta t = 2$  min, natomiast czas prognozy opadów  $\Delta t_{op} = 10$  min.



Rys. 6. Schemat ideowy układu kanalizacyjnego dla dwóch zbiorników retencyjnych połączonych równolegle



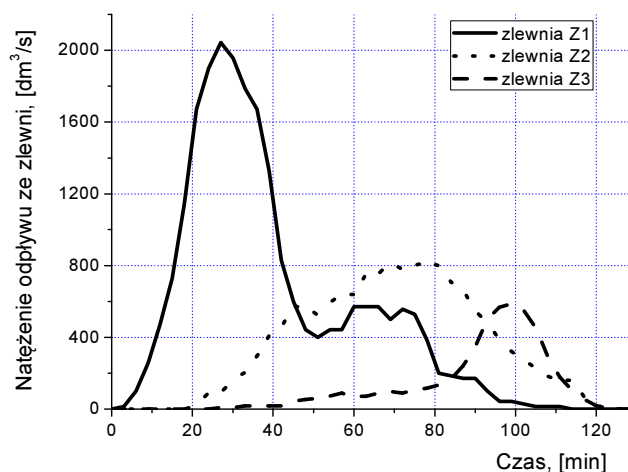
Zbiorniki retencyjne charakteryzowały się następującymi parametrami:

- zbiornik R1: objętość całkowita  $VR1 = 1400 \text{ m}^3$ , maksymalne natężenie odpływu  $Q_{oR1} = 350 \text{ dm}^3/\text{s}$ ,
- zbiornik R2: objętość całkowita  $VR2 = 1600 \text{ m}^3$ , maksymalne natężenie odpływu  $Q_{oR2} = 550 \text{ dm}^3/\text{s}$ .

Przyjęto, że dopuszczalny jednostkowy przepływ na oczyszczalnię wynosi  $15 \text{ dm}^3/\text{sha}$ , co, uwzględniając powierzchnie wszystkich zlewni ( $65 \text{ ha}$ ), daje natężenie graniczne równe  $Q_{pgr} = 975 \text{ dm}^3/\text{s}$ . Wprowadzono dodatkowy warunek brzegowy dla działania zbiorników, polegający na ograniczeniu dopuszczalnego natężenia przepływu w węźle N1 do wartości  $900 \text{ dm}^3/\text{s}$ , zakładając, że podtopienie w tym miejscu może mieć szczególnie dotkliwe skutki (np. spowodowanie dużych strat materialnych poprzez zalewanie posesji).

Zlewnie charakteryzują się następującymi parametrami:

- Z1 - powierzchnia zredukowana  $F1 = 18 \text{ ha}$ , czas koncentracji  $TC1 = 21 \text{ min}$ ,
- Z2 - powierzchnia zredukowana  $F1 = 37 \text{ ha}$ , czas koncentracji  $TC2 = 27 \text{ min}$ ,
- Z3 - powierzchnia zredukowana  $F1 = 10 \text{ ha}$ , czas koncentracji  $TC3 = 15 \text{ min}$ .



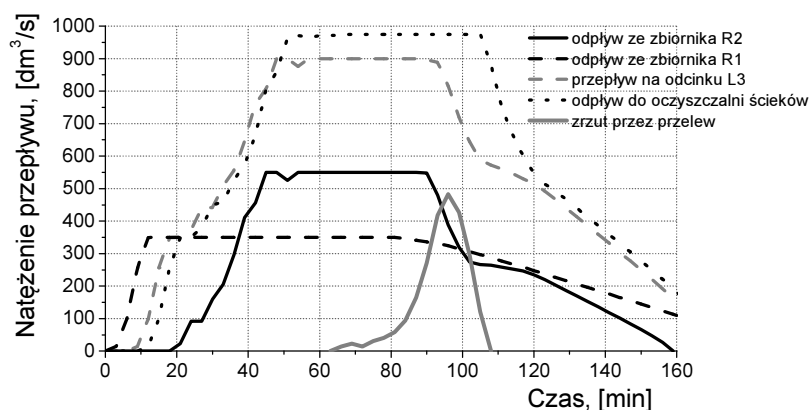
Rys. 7. Natężenie odpływu ścieków opadowych z poszczególnych zlewni

Zadany w symulacji opad charakteryzował się znaczącą zmiennością przestrzenną, powodując występowanie dużych natężeń na zlewni Z1 oraz zdecydowanie mniejszych (o ok. 60%) na zlewniach Z2 i Z3 (rys. 7). Dodatkowo występowanie szczytowych wartości natężeń odpływu ze zlewni Z2 i Z3 było przesunięte w czasie o ponad 40 min względem zlewni Z1.

Symulacje przeprowadzone dla wariantu z pasywnym sterowaniem (rys. 8) dały następujące rezultaty:

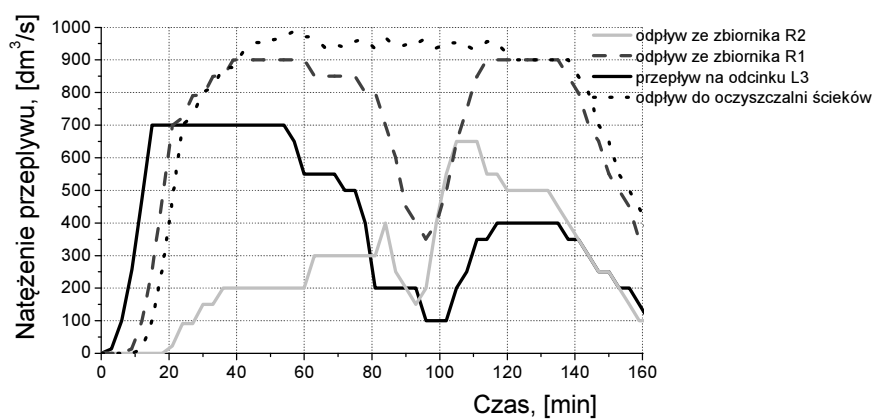
- brak przepełnienia w węźle N1,
- zbiornik R1 został przepełniony, a objętość ścieków podtapiających zlewnię wyniosła  $V_{FLR1} = 1017 \text{ m}^3$ ,

- zbiornik R2 został wypełniony częściowo, największa chwilowa objętość retencjonowanych ścieków wyniosła  $391 \text{ m}^3$ ,
- zrzut ścieków przez przelew P trwał w sumie 45 min, w czasie których do odbiornika odplynęło  $437 \text{ m}^3$  nieoczyszczonych ścieków opadowych, zaś maksymalne chwilowe natężenie zrzutu wyniosło prawie  $500 \text{ dm}^3/\text{s}$ .



Rys. 8. Hydrogram odpływu z przelewu oraz ze zbiorników retencyjnych w wariacie sterowania pasywnego

W wariacie sterowania dynamicznego założono, że maksymalne natężenie odpływu z obydwu zbiorników może wynieść  $Q_{OR1} = Q_{OR2} = 700 \text{ dm}^3/\text{s}$ . W przypadku zbiornika R2 jest to tylko o 27% więcej niż przepływ zredukowany w wariacie pasywnym, natomiast dla zbiornika R1 występuje wzrost o 100%. W rzeczywistych przypadkach często nie będzie możliwości, by zwiększyć natężenie odpływu aż o 100% (nawet w warunkach ciśnieniowych), bo ograniczeniem będzie przepustowość kanału za zbiornikiem.



Rys. 9. Hydrogram odpływu z przelewu oraz ze zbiorników retencyjnych w wariacie sterowania dynamicznego

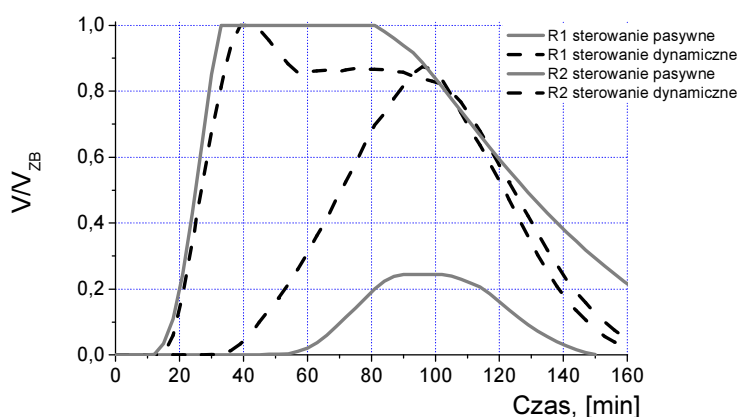
W rozpatrywanym przykładzie założono, że redukcja przepływu zbiornika R1 nie jest skutkiem braku przepustowości kanału L1, ale wynikiem problemów występujących poniżej węzła N1, czyli na odcinku L3. Sytuacja taka może mieć miejsce, gdy zlewnia Z1 jest zupełnie nowym obszarem zurbanizowanym, dołączanym do istniejącego systemu kanalizacyjnego. Przyjęto, że dokładność kontrolowanego natężenia odpływu ze zbiorników wynosi  $50 \text{ dm}^3/\text{s}$  w całym zakresie dopuszczalnych natężeń odpływu ze zbiornika.

Symulacje przeprowadzone dla wariantu z dynamicznym sterowaniem natężenia odpływu dały następujące rezultaty (rys. 9):

- brak przepełnienia w węźle N1,
- zbiornik R1 został przepełniony, a objętość ścieków podtapiających zlewnię wyniosła  $V_{\text{FLR1}} = 51 \text{ m}^3$  (w ciągu 6 minut), co stanowi 5% objętości uzyskanej w wariantcie sterowania pasywnego,
- zbiornik R2 został wypełniony częściowo, największa chwilowa objętość retencjonowanych ścieków wyniosła  $1398 \text{ m}^3$ ,
- zrzut ścieków przez przelew P nie wystąpił w ogóle.

Znaczące ograniczenie objętości ścieków, które podtapiały zlewnię w punkcie R1, było możliwe dzięki zwiększeniu natężenia odpływu z tego zbiornika do wartości maksymalnej ( $700 \text{ dm}^3/\text{s}$ ) przy jednoczesnym ograniczeniu odpływu ze zbiornika R2 (aż do 60 minuty nie przekracza  $200 \text{ dm}^3/\text{s}$ ). W ten sposób następuje pośrednie wyrównanie bilansu masy ścieków retencjonowanych w obydwu zbiornikach z jednoczesnym zachowaniem dopuszczalnego natężenia przepływu w węźle N1.

Drugi charakterystyczny moment w przedmiotowej symulacji występuje od 60 minuty jej trwania, gdy stopniowo zmniejsza się natężenia przepływu na odcinku L3, poniżej dopuszczalnej wartości  $900 \text{ dm}^3/\text{s}$  (w 96 minucie osiąga wartość jedynie  $350 \text{ dm}^3/\text{s}$ ). Dzięki temu szczytowe wartości niekontrolowanego natężenia odpływających ścieków ze zlewni Z3 nie skutkują zrzutem ścieków przez przelew P.



Rys. 10. Wykorzystanie objętości retencyjnej zbiorników w warunkach sterowania pasywnego i dynamicznego

Odzwierciedleniem zupełnie odmiennej charakterystyki sterowania odpływem ze zbiorników retencyjnych w układzie równoległym jest zmiana ich względnego napełnienia w czasie trwania symulacji (rys. 10). W wariantcie pasywnym zbiornik R1 po 33 minutach od rozpoczęcia symulacji jest wypełniony całkowicie i przez następnych 45 minut występuje jego przepelnienie, podczas gdy w warunkach kontroli dynamicznej przepelnienie jest krótkotrwałe (6 minut), w pozostałym czasie retencjonowania zbiornik posiada stale blisko 15% rezerwy objętości.

Podobnie jak dla układu szeregowego także w tym przypadku czas, po którym następuje całkowite opróżnienie obydwu zbiorników, występuje wcześniej dla wariantu ze sterowaniem dynamicznym. Jest to o tyle istotne osiągnięcie, że w wariantcie dynamicznym maksymalna chwilowa objętość retencjonowanych ścieków w obydwu zbiornikach wyniosła 2572 m<sup>3</sup>, podczas gdy dla wariantu pasywnego było to tylko 1788 m<sup>3</sup>.

## Podsumowanie

Wyniki symulacji uzyskanych z zastosowaniem algorytmu CORT wykazały przewagę zmiennego, dynamicznie regulowanego natężenia odpływu w porównaniu do wariantu sterowania pasywnego z ustaloną wartością maksymalnego natężenia odpływu  $Q_0$ . Główną przyczyną jest zwiększenie efektywności działania zbiorników w fazie ich opróżniania. W zbiornikach pasywnych, zarówno jedno-, jak i wielokomorowych, natężenie odpływu w fazie opróżniania jest zależne wyłącznie od napełnienia zbiornika, podczas gdy w zbiornikach sterowanych dynamicznie możliwe jest zwiększenie czynnej powierzchni otworu odpływowego. W efekcie nawet przy częściowym napełnieniu zbiornika możliwe jest uzyskiwanie natężeń, które przy sterowaniu pasywnym występują jedynie w momencie całkowitego napełnienia komory retencyjnej. Symulowane układy współdziałania dwóch lub większej liczby zbiorników wskazują także, że zastosowanie pasywnych zbiorników wielokomorowych wcale nie musi być rozwiązaniem optymalnym dla całego układu sieci. Wynika to z faktu, że zbiorniki tego typu powodują przyspieszone wystąpienie maksymalnej wartości przepływu zredukowanego  $Q_0$ , co dla wielu rzeczywistych zdarzeń opadowych będzie skutkowało zwiększeniem natężeń przepływu na odcinkach położonych poniżej zbiornika wskutek nałożenia się dopływów z innych kanałów.

## Literatura

- [1] Zawilski M., Schutze M., Modelowanie zintegrowane jako narzędzie do modernizacji i optymalizacji systemów unieszkodliwiania ścieków, II Kongres Inżynierii Środowiska, Materiały T. 1, Lublin 2005, 589-597.
- [2] Schilling W., Real Time Control of Urban Drainage Systems, The state-of-the-art, IAWPRC Task Group on Real-Time Control of Urban Drainage Systems, London 1989.

- [3] Schilling W., Potential and limitations of real-time control, 7<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage, Hannover 1996, 803-808.
- [4] Colas H., Introduction and objectives of real time control, 6<sup>th</sup> International Conference NOVATECH, Workshop: Real Time Control 2007, 1-10.
- [5] DWA-M 180E, Framework for Planning of Real Time Control of Sewer Networks, DWA, 2005.
- [6] Cassar A., Verworn H.-R., Modifications of rainfall runoff and decision finding models for on-line simulation in real-time control, Water Science and Technology 1999, 39, 9, 201-207.
- [7] Mrowiec M., Malmur M., Channel storage as the effective component of the real time, 7<sup>th</sup> Int. Conf. Environmental Engineering, 2 Water Engineering and Energy for Buildings, Vilnius, Lithuania 2008, 613-618.
- [8] Schilling W., Smart sewer systems improved performance by real time control, Eur. Water Pollution Control 1994, 4, 5, 24-31.
- [9] Lobbrecht A.H., Solomatine D.P., Machine learning in real-time control of water systems, Urban Water 2002, 4, 283-289.
- [10] Schütze M., Campisano A., Colas H., Schilling W., Vanrolleghem P., Real-time control of urban wastewater systems - where do we stand today? Journal of Hydrology 2004, 299, 335-348.
- [11] Mrowiec M., Efektywne wymiarowanie i dynamiczna regulacja kanalizacyjnych zbiorników retencyjnych, Seria Monografie nr 171, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2009.
- [12] Kisiel A., Hydrauliczna analiza działania grawitacyjno-podciśnieniowych zbiorników kanalizacyjnych, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1998.
- [13] Schütze M., Erbe V., Haas U., Scheer M., Weyand M., A guideline document for sewer system real time control, SOM Conference, Vienna, 26.-28.10.2006, 225-232.

## Flow Regulation from Storage Tanks Using Real Time Control (RTC) Systems

Majority of urban drainage systems operate statically, relies on gravity to discharge runoff from an urban area. Statically operated systems have no control possibility whatsoever and therefore sometime lead to serious operational problems. The paper presents potential possibilities for improving hydraulic efficiency of storage tanks by dynamic regulation of the outflow-rate in a real time. The proposed original algorithm (CORT) have been developed to optimize the operation of storage tanks and it contains two main modules: optimization and simulation. The simulation module is based on the simplified scheme of the drainage system and original rainfall-runoff model. Connection between both modules makes possible to search the best control strategy for two or more storage units in a real time. Flow regulation strategy is determined by how the inflows are to be distributed between storage, spillage and transport downstream. The practical significance of the algorithm CORT was presented for the example of series connection of two tanks. Simulation results show significant advantages of RTC utilization over traditional approach as result of utilizing the full storage capacity. Significant reduction is observed in volume of pollution spills as well as in risk of local flooding.

**Keywords:** storage reservoirs, drainage systems, real time control

