

Janusz KACZOROWSKI
Franciszek A. WRÓBEL

Projektowanie zestawów pomp dla przepompowni chroniących tereny rolnicze przed powodzią

Streszczenie

Wykorzystując teorię niezawodności opracowano model pracy zestawu pompowego dla przepompowni chroniącej tereny rolnicze przed powodzią. Dla agregatów stosowanych w krajowych obiektach pompowych podano wartości estymatorów następujących wskaźników niezawodności: intensywności strumienia uszkodzeń, średniego czasu pracy bezawaryjnej, intensywności strumienia odnowy i średniego czasu trwania odnowy. Przedstawiono algorytm oraz założenia programu symulacyjnego, pozwalającego zaprojektować zestaw pomp zapewniający pracę przepompowni z zadaną niezawodnością. Przedstawiono wyniki wykonanego eksperymentu symulacyjnego.

Słowa kluczowe: ochrona przeciwpowodziowa, przepompownie, symulacja komputerowa

1. WSTĘP

Określenia wielkości zespołów maszyn i urządzeń, których zadaniem jest wykonywanie powtarzających się czynności, na zgłaszających się obiektach, przy pewnych upraszczających założeniach, można dokonać stosując znane w technice [1] modele masowej obsługi. Niestety, nie przystają one do opisu działania przepompowni pracujących w środowisku przyrodniczym. Wymagałoby to bowiem przyjęcia, kontrowersyjnego w tych warunkach, założenia stacjonarności strumienia zgłoszeń, tj. dopływu wody do przepompowni. O ile warunek dyskretnego strumienia zgłoszeń jest dopuszczalny, zakładając, że

do przepompowni, jako systemu obsługowego, „zgłasza się” porcja wody równa dziennemu dopływowi do czerpni, to wymagany dla stacjonarnego strumienia warunek niezależności zmiennej losowej jest nie do spełnienia. Na wielkość spływu wody do przepompowni ma również wpływ stopień uwilgotnienia gleby. Należy więc stwierdzić, że system odwadniający wyposażony w przepompownię „pamięta” stany poprzednie. Dla ustalenia optymalnego rozwiązania w zakresie doboru liczby, wielkości i jakości pomp tworzących zestaw roboczy przepompowni, posłużono się opisanym niżej modelem niezawodnościowym, dla którego sformułowano następujące założenia:

- zestaw agregatów pompowych musi być dopasowany do zmienności dopływu wody do czerpni, oznacza to, że praca pomp winna odbywać się w obszarach maksimum charakterystyk sprawności,

- zestaw pomp musi zapewniać niezawodne, na zadanym poziomie, działanie przepompowni i to szczególnie w warunkach ekstremalnych, w okresach wezbrań powodziowych,

- należy zapewnić energooszczędną pracę zestawu, stosując nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne, pozwalające na zmiany charakterystyk dynamicznych pomp oraz przez ograniczenie częstości ich włączeń.

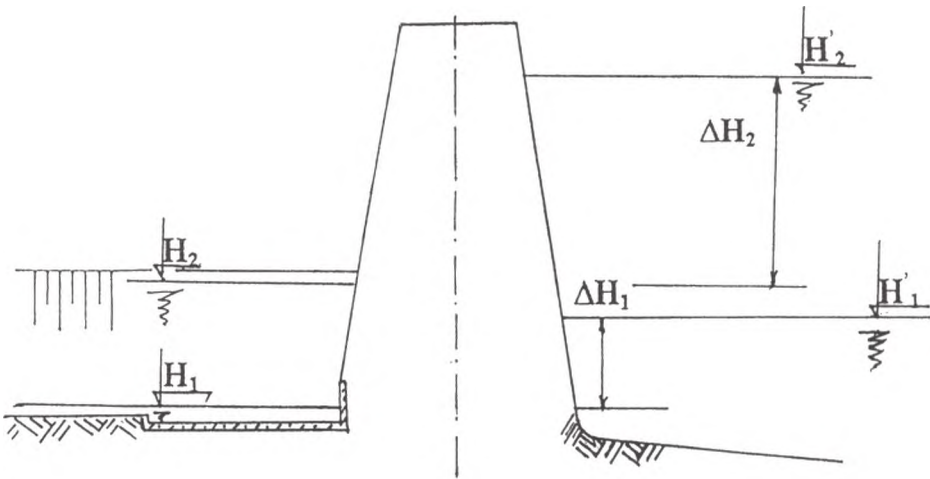
2. METODYKA BADAŃ

2.1. Charakterystyka pracy przepompowni przeciwpowodziowej

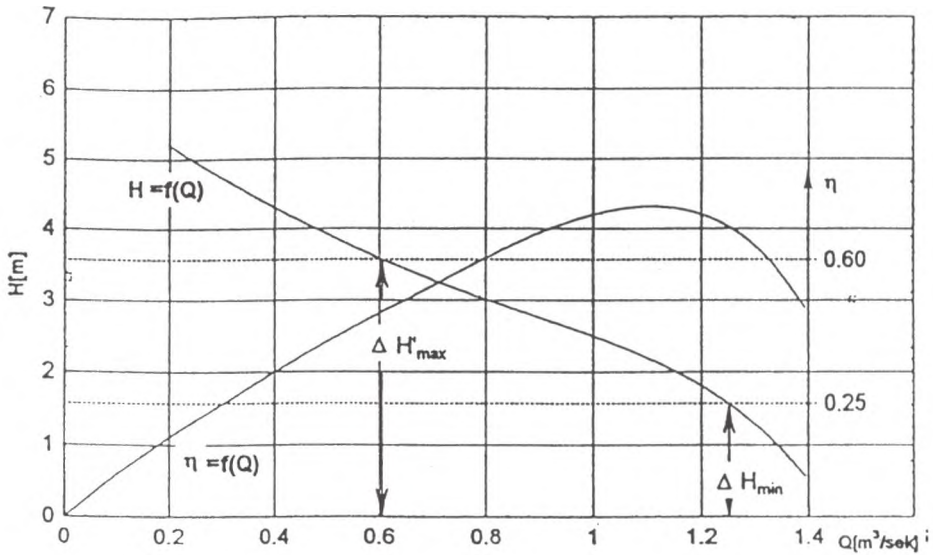
Schemat pracy przepompowni ilustruje rys. 1a. Woda ze zlewni gromadzona jest w zbiorniku retencyjnym i stąd przez ujęcie dopływa do czerpni, w której zainstalowane są rurociągi ssawne pomp. Upraszczając, w projektowaniu wyróżnia się następujące charakterystyczne stany wody na dopływie, tzw. woda górna:

- dopuszczalny poziom wezbrania H_2 , który nie może być przekroczony, gdyż groziłoby to zalaniem terenu chronionego. Z chwilą osiągnięcia tego poziomu służby energetyczne wyłączają zasilanie, w obawie przed zalaniem maszynowni obiektu pompowego i uszkodzeniem stacji trafo.

- minimalny poziom pracy pomp H_1 , odpowiadający minimalnemu poziomowi tzw. warstwy wyrównawczej, przy którym zatopienie kosza ssawnego pompy chroni przed zassaniem powietrza i wzmożoną kawitacją łopatek wirnika i kierownicy.



Rys. 1a. Schemat pracy przepompowni



Rys. 1b. Przebieg zmienności wydatku i sprawności pomp w zależności od wysokości podnoszenia

Na odpływie, czyli po stronie międzywala wyróżnia się również dwa najbardziej charakterystyczne poziomy wody:

– poziom wielkiej wody miarodajnej H_2^+ , odpowiadający maksymalnej fali powodziowej w rzece, liczonej z określonym w danych warunkach prawdopodobieństwem pojawiania się, np woda jednoprocetowa, czyli stuletnia woda wielka,

– poziom minimalny H_1^- , odpowiadający średniej normalnej wodzie, chociaż w przypadku niskiego piętrzenia w rzece zwierciadło wody może układać się poniżej wylotu rurociągu tłocznego. Następuje wtedy swobodny wypływ wody, bardzo niebezpieczny dla konstrukcji betonowych urządzenia zrzutowego.

W krańcowych przypadkach wysokość podnoszenia wody zmienia się od minimalnej, oznaczonej na rys. 1 symbolem ΔH_1 , do maksymalnej ΔH_2 .

Stosowane w przepompowniach pompy śmigłowe odznaczają się bardzo stromą charakterystyką dławienia $H=f(Q)$ i sprawności $\eta=f(Q)$. Oznacza to, że małe zmiany wysokości podnoszenia wody powodują duże zmiany wydajności pomp. Obszar optymalnej sprawności jest bardzo ograniczony. Dynamikę pracy pomp ilustruje rys. 1. b. Gdy więc zaprojektujemy zestaw pompowy złożony z małej liczby agregatów, to należy się liczyć z bardzo niekorzystnymi warunkami pracy. Będą to pompy o dużym wydatku, bardzo czułe na zmiany wysokości pompowania. Przy niskich stanach wody i małej różnicy poziomów (ΔH_1), dysponując dużą wydajnością pomp spowodujemy szybkie odpompowanie wody, a więc nieekonomiczne, częste włączenia pomp, przyspieszony ruch wody w kanale dopływowym wywołujący erozję dna i skarp, wzmożony ruch rumowiska wleczony powodujący uszkodzenia łopatek wirnika i kierownicy pompy. Praca pompy odbywa się przy tym w niskim zakresie współczynnika sprawności. W stanach wysokich, przy maksymalnej różnicy poziomów wody (ΔH_2), poprawia się sprawność pomp, lecz spada wydajność. W przypadku awarii pompy powstaje zagrożenie zalania terenu chronionego. Dla uniknięcia wskazanych zagrożeń autorzy proponują następujące zmiany w przepisach i zaleceniach projektowych w zakresie rozwiązań hydraulicznych, odnoszących się do projektowania zestawów pompowych dla przepompowni przydepresyjnych:

– wyeliminować stosowanie pomp śmigłowych, są to bowiem konstrukcje nie przystosowane do pracy na małych zlewniach, o krótkim czasie zejścia fali powodziowej i dużej zmienności dopływu. Mogą być używane do ochrony dużych obszarów depresyjnych, pod warunkiem udoskonalenia sterowania dynamiki ruchowej, nie tylko przez zmianę kąta ustawienia łopatek, ale również przez zmianę prędkości obrotowej;

– szerzej stosować pompy helikoidalne typu UM i UMW o przebadanej i potwierdzonej dużej niezawodności działania [2, 3]. Szczególnie przydatne

winy być konstrukcje monoblokowe z wirnikiem 4- i 5-łopatkowym, ze sterowaną prędkością obrotową;

– projektować przepompownie małe, o wydatku (1,0-1,4) m³/s, celem uzyskania możliwości równomiernego zejścia wody w czasie fali powodziowej i spełnienia warunków racjonalnego gospodarowania wodą. Wymagane byłoby wypracowanie rachunku optymalizacyjnego podziału terenu chronionego na zlewnie cząstkowe.

2.2. Modelowanie pracy zestawu agregatów

Z uwagi na potrzebę sterowania wydajnością pompowania w dostosowaniu do zmienności dopływu, w przepompowniach agregaty łączone są w zestaw roboczy równoległe. Każdy agregat pracuje z reguły oddzielnie, tzn. posiada indywidualny rurociąg ssawny i tłoczny, wyposażony w odpowiednią armaturę. W przypadku awarii jednego z agregatów pozostałe mogą być włączane niezależnie od uszkodzonych. Istnieją jednak często uwarunkowania hydrauliczne, gdy poziom posadowienia pomp jest zróżnicowany. Kolejność włączania pomp jest wtedy zdeterminowana poziomem zwierciadła wody w czepni. Kiedy pompy usytuowane są na jednakowym poziomie, praca zestawu spełnia warunki modelu niezawodnościowego o strukturze równoległej. Kierując się wynikami dotychczasowych badań eksploatacyjnych [4, 5] zaprojektowanie zestawu o żądanej niezawodności działania lub prognoza niezawodności działania zestawu istniejącego jest możliwa pod warunkiem, że wcześniej zostaną szczegółowo rozpoznane dwie podstawowe przesłanki: zmienność dopływu wody do przepompowni, opisana dystrybucją zmiennej losowej dopływów dobowych i niezawodność agregatów pompowych tworzących zestaw, opisana wskaźnikami intensywności strumienia uszkodzeń i intensywności odnowy. Miarą jakości pracy zestawu jest wskaźnik gotowości.

Niech zmienna losowa dopływu ze zlewni, dla której projektujemy zestaw, będzie określona na podstawie szczegółowej analizy hydrologicznej. Badania autorów [4] dowodzą, że dla małych zlewni przydepresyjnych dopływ wody jest dobrze opisany rozkładem logarytmiczno-normalnym. Znając funkcję gęstości rozkładu, wartość średnią $m(q)$ przyjmujemy jako odpowiadającą wartości wydatku umownej, modułowej pompy. Tak więc w pracy zestawu mogą zaistnieć następujące przypadki: dopływ dzienny nie przekracza wartości średniej, spośród pomp modułowych pracuje tylko jeden agregat, a pozostałe są w rezerwie. Wzrost dopływu powyżej średniego wymusza włączanie kolejnych pomp. Pojawienie się dopływu maksymalnego Q_{max} powoduje pracę wszystkich agregatów. Rezerwa „obciążona” zostaje wyczerpana. Dla każdego przypadku przelicza się wskaźnik gotowości zestawu. Musi on być co najmniej równy założonemu. Dopływ maksymalny jest jednak kilkakrotnie do kilkun-

stokrotnie większy od średniego i liczba pomp modułowych $N=Q_{\max}/m'(q)$ byłaby bardzo duża. Układ posiadałby rezerwę zapewniającą niezawodność ponad żądany poziom, stawiany obiektom hydrotechnicznym chroniącym środowisko produkcji rolniczej. Wobec tego, w kolejnym etapie projektowania należy połączyć pompy modułowe w większe zestawy o wydajności $Q_i = k \cdot m'(q)$. W kolejnym kroku iteracyjnym dokonujemy wyliczenia wskaźnika gotowości, aż do uzyskania wartości zadanej, przy najmniejszej możliwej liczbie pomp, tworzących projektowany zestaw. Wymaga to oczywiście bardzo pracochłonnych obliczeń. Szukając efektywnej metody projektowania zestawu pompowego i oceny oraz prognozowania niezawodności przepompowni istniejących, opracowano algorytm i program komputerowy symulacji pracy systemu pompowego.

2.3. Symulacja pracy zestawu pompowego

Wymagane wielkości wejściowe do realizacji programu, to:

- dystrybuanta rozkładu dopływu wody do czerpni, wyznaczona w wyniku szczegółowej analizy hydrologicznej zlewni obejmującej obszar spływu wód do przepompowni,

- projektowany, tzw. miarodajny wydatek przepompowni, odpowiadający maksymalnemu dopływowi o określonym prawdopodobieństwie pojawiania się,

- wskaźniki niezawodności agregatów pompowych wyznaczone z danych eksploatacyjnych: estymatory intensywności strumienia uszkodzeń λ_i oraz intensywności odnowy μ_i .

Uwarunkowania programu:

- wskaźnik gotowości technicznej zestawu nie może być mniejszy od wartości zadanej, wyznaczonej na drodze techniczno-ekonomicznej analizy inwestycji,

- jednostkowy czas pracy pompy, charakteryzujący częstość włączeń i dynamikę ruchu pompy jest większy od ustalonego w projekcie technicznym.

Przebieg symulacji:

1. Wykorzystując określone parametry rozkładu dopływu wody generuje się szereg M wartości tego rozkładu, służących do zbudowania ciągu $d(j)$ dopływu wody do przepompowni. Ciąg ten powstaje przez wygładzenie wartości ciągu podstawowego filtrem uwzględniającym warunki meteorologiczne i charakterystykę zlewni, wymuszające wahania dopływu wody.

2. Wykorzystując wartości estymatorów strumienia uszkodzeń i odnowy, dla wszystkich agregatów generuje się czasy pracy bezawaryjnej $T_{ba}(i)$ oraz czasy odnowy $T_{od}(i)$.

3. Na wejście do zestawu podaje się wygenerowaną dzienną porcję wody $d(j)$.

4. Ustala się kolejność włączania pomp na podstawie łącznego czasu pracy i sprawdzenia ich stanu zdatności.

5. Dla kolejnych agregatów wyznacza się ilości wody, którą dany agregat może przepompować w ciągu 22 godzin (brak awarii) lub do uzyskania łącznego czasu $T_{ba}(i)$ (wystąpienie awarii). Ta ilość wody, odpowiadająca dobowemu wydatkowi $w_d(i)$ jest porównywana z wartością $d(j)$. Gdy $w_d(i)$ jest większe od $d(j)$ skraca się czas pracy agregatu i przechodzi do następnego dnia eksploatacji. W przypadku przeciwnym uzyskany wydatek dobowy odejmuje się od dopływu dobowego i powtarza cały krok 5. dla następnego w kolejce agregatu, aż do momentu wypompowania dopływającej wody lub wykorzystania wszystkich sprawnych agregatów.

6. W sytuacji, gdy dopływ przekroczy dobowy wydatek pomp, pozostałą (po odjęciu wydatku) porcję wody przerzuca się na następny dzień zwiększając czas niesprawności zestawu. W kolejnych krokach symulacyjnych powiększany jest czas trwania niesprawności zestawu o liczbę dni zsumowaną od momentu, w którym dopływ dobowy przekroczył wydatek zestawu pompowego.

7. Pompy, których łączny czas pracy pomiędzy awariami przekroczył czas pracy bezawaryjnej $T_{ba}(i)$, wyłącza się na czas $T_{od}(i)$, wygenerowany ze strumienia odnowy. Następnie generowany jest kolejny czas pracy bezawaryjnej oraz czas odnowy i włącza się ponownie agregat do eksploatacji.

W procesie symulacji, krok po kroku, dla każdej pompy wyznacza się:

- $t_p(i)$ – łączny czas pracy,
- $t_a(i)$ – łączny czas trwania niesprawności (odnowy),
- $t_o(i)$ – łączny czas oczekiwania na pracę,

dla zestawu pompowego określa się:

- T_p – łączny czas poprawnej pracy zestawu,
- T_o – łączny czas trwania niesprawności (odnowy)
- G – wskaźnik gotowości technicznej,

– $V(t)$ – pojemność zbiornika wyrównawczego, niezbędną do zapewnienia pracy pompy o maksymalnym wydatku przez ustalony w projekcie czas, gwarantujący jej ekonomiczną pracę.

3. WYNIKI BADAŃ I EKSPERYMENT SYMULACYJNY

Na podstawie badań eksploatacyjnych przeprowadzonych latach 1992-1994 dla pomp śmigłowych i helikoidalnych, stosowanych w polskich przepompowniach melioracyjnych, wyznaczono wskaźniki niezawodności w zakresie poprawnej pracy i odnowy. Wyniki zestawiono w tabeli 1.

Wskaźniki niezawodnościowe pomp

Typ pompy	Wielkość	Wskaźniki niezawodnościowe pomp			
		$\lambda(i)$ [h ⁻¹]	$\mu(i)$ [h ⁻¹]	Tba (i) [h]	Tod (i) [h]
PSP	małe	0,00293	0,0259	342	40
	średnie	0,00245	0,0147	488	68
PO	małe	0,00202	0,0156	495	64
	średnie	0,00136	0,0119	735	84
PR	małe	0,00291	0,0278	343	35
	średnie	0,00181	0,0179	543	56
	duże	0,00140	0,0125	714	80
P	małe	0,00169	0,0357	591	28
	średnie	0,00145	0,0189	689	53
D	małe	0,00184	0,0189	543	53
	średnie	0,00155	0,0167	645	60
UH	małe	0,00114	0,0178	877	56
	średnie	0,00098	0,0212	1020	47

Uwzględniając opisane założenia odnośnie do rozkładu zmiennej losowej dopływu, na potrzeby eksperymentu ustalono maksymalny dopływ wody do wytypowanej przepompowni $Q_m = 1,8 \text{ m}^3/\text{s}$ oraz wartość średnią, odpowiadającą wydatkowi pompy modułowej $m(q) = 0,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Założono, że dostępne w projektowaniu przykładowego obiektu są pompy typu PR, P i UM. Zadany wskaźnik gotowości zestawu wynosi 0,96. Minimalny czas pracy pompy to 15 minut, a wskaźnik wykorzystania pomp nie może być mniejszy niż 5%. Dla minimalizacji błędu obliczeniowego symulację przeprowadzono w 60. powtórzeniach. Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano opracowany program, napisany w języku Borland PASCAL 7. Zalecany i wykorzystany sprzęt, to komputer klasy PC 486DX2.

Wyniki eksperymentu zestawiono w tabeli 2.

Zestawienie wyników eksperyment symulacyjnego
Dobór zestawu wg zadanego współczynnika gotowości

Dane wyjściowe

Wydatek przepompowni Q_{\max} : 1,8 m³/s
 Wskaźnik gotowości G_z : 0,96
 Min. procent wykorzystania agreg. k% : 5%
 Czas pracy przepompowni : 1500 dni
 Kolejność włączania agregatów : wg równomiernego doboru wydatku do dopływu

Wybrane typy pomp

Nr agregatu	Nazwa agregatu	Rodzaj	Wydatek max [m ³ /s]
3	PR	małe - duże	---
4	P	małe - śred.	1,18
6	UM	małe - śred.	1,18

Dane o agregatach

Nr	Rodzaj	Intens. naprawy	Intens. uszkodzeń	Wydatek (m ³ /s)
1	UM	0,0357	0,0017	0,33
2	UM	0,0357	0,0017	0,33
3	UM	0,0357	0,0017	0,33
4	UM	0,0189	0,0015	0,81

Agr. nr 1 % Wykorzystania: 12,7 % Oczekiwania: 86,6 % Awarii: 0,7
 Agr. nr 2 % Wykorzystania: 12,7 % Oczekiwania: 86,7 % Awarii: 0,6
 Agr. nr 3 % Wykorzystania: 12,7 % Oczekiwania: 86,7 % Awarii: 0,7
 Agr. nr 4 % Wykorzystania: 21,7 % Oczekiwania: 76,5 % Awarii: 1,8

Statystyka czasów pracy i czasów trwania awarii

Średni czas poprawnej pracy : 121,4
 Średni czas trwania niesprawności : 5,1
 Wskaźnik gotowości : 0,960

Minimalny zbiornik retencyjny pozwalający na 15-minutową pracę najmniejszej pompy powinien mieć objętość 296 m³

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wykonany eksperyment symulacyjny obejmował okres około 4 lat (1500 dni). Dla zapewnienia żądanego wskaźnika gotowości technicznej zestaw pomp (podany w tabeli 2. „Dane o agregatach”) musi się składać z czterech agregatów typu UM, w tym trzech o wydatku 0,330 m³/s, a jednego o wydatku 0,810 m³/s. Podkreślenia wymaga fakt, że z dostępnych w założeniu trzech typów pomp wybrane zostały tylko pompy UM. Przeglądając podane w tabeli 1 wartości wskaźników niezawodnościowych agregatów łatwo wywnioskować, że te właśnie pompy charakteryzuje najwyższa jakość, określona miarami niezawodności. Wyznaczona minimalna objętość zbiornika retencyjnego wynosi 296 m³. Zapewnia ona nieprzerwaną pracę pompy w czasie 15 minut.

Zaprezentowane wyniki eksperymentu symulacyjnego potwierdzają słuszność przyjętych złożzeń opracowanej metody doboru zestawu pompowego dla przepompowni przydepresyjnych. Proponowana metoda pozwala ustalić liczebność i skład zestawu o żądanej niezawodności działania, w z góry zadany czas użytkowania. Uwzględnia przy tym warunki hydrologiczne zlewni i warunki hydrauliczne urządzeń pompowych, możliwiając w toku projektowania wypracowanie rozwiązań wariantowych, spośród których można, po szczegółowej analizie ekonomicznej, dokonać wyboru wariantu optymalnego.

5. LITERATURA

- [1] Bała W., Wróbel F.: *Badania wskaźników niezawodności melioracyjnych agregatów pompowych*. Roczn. Nauk Rol. PAN, (1986) t. 76-c-4, s.133-140.
- [2] Kirejczyk J. : „Badania własności energetycznych, dynamicznych i kawitacyjnych pompy 400 UM 259 z wirnikiem 4. i 5. łopatkowym”. Instytut Maszyn Przepływowych, Gdańsk (1985). Maszynopis, nr arch. 56/85.
- [3] Kaczorowski J., Wróbel F.: „Metody oceny niezawodności urządzeń melioracyjnych. Raport z badań”. Maszynopis. Akademia Rolnicza w Krakowie (1994).
- [4] Kaczorowski J., Wróbel F.: *Modelowanie pracy przepompowni chroniących tereny rolnicze*. Zesz. Nauk. Akademii Rolniczej w Krakowie (1993), Techn. Rol. z.13, s.129-135.
- [5] Wróbel F., Bała W., Kaczorowski J.: *Wskaźnik gotowości technicznej miara niezawodności działania przepompowni melioracyjnych*. Zesz. Prob. Post. Nauk Rol. PAN (1995), z.423, s.359-365.