

Roman MIELCAREK

*Institut Informatyki
Politechnika Poznańska*

OPTIMALIZACJA KOSZTÓW PRZEPOMPOWNI ŚCIEKÓW

OPTIMIZATION OF SEWAGE PUMPING STATIONS COST

The paper presents the problem of reducing the costs of sewage pumping stations. Taking into account the exploitation data of the pumping station considered, the contribution of the operating parameters of each pump in the overall costs have been considered. The individual cost of 1 m³ sewage pumping for each of the pumps has been calculated. This parameter has become a base for the modification of the pump control algorithm. This resulted in savings of more than 10% of electricity consumed by a pump.

1. Sterowanie przepompownią

Określenie kolejności sterowania pompami przepompowni (jeśli jest ich co najmniej dwie), wymaga uwzględnienia kilku, czasami wykluczających się aspektów. Można je wymienić w następującej, wg hierarchii ważności, kolejności:

- liczba załączonych pomp ma być minimalna ale taka, aby nie dopuścić do wylania ścieków na zewnątrz zbiornika przepompowni,
- opróżnienie zbiornika przepompowni następuje do tzw. poziomu wyłączenia, po uzyskaniu którego wszystkie pompy zostają włączone,
- zapewniać równomierne zużycie wszystkich pracujących pomp,
- zapewnić najmniejsze zużycie energii elektrycznej do realizacji procesu pompowania
- włączenie i wyłączenie pomp odbywa się wg ustalonej kolejności, nigdy nie jednocześnie.

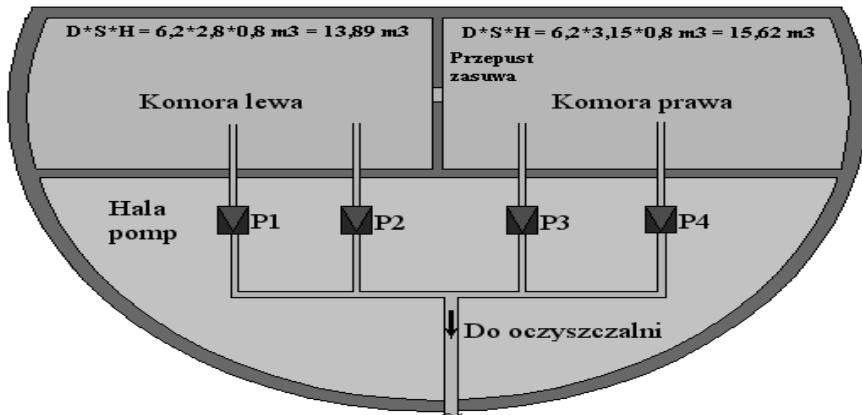
Aspekt pierwszy wymaga załączania kolejnej pompy jeśli pompa pracująca nie może podołać napływowi ścieków wejściowych do przepompowni. Aspekt drugi i trzeci wymaga uwzględnienia w algorytmie sterowania pomp ich rotacyjnego załączania, najlepiej wg sumarycznego czasu pracy pompy. Aspekt czwarty jest najrzadziej brany pod uwagę, ze względu na brak danych o kosztach pompowania przed instalacją pompy. Program układu sterowania jest zaimplementowany w układzie sterowania

pompami w momencie jego kompletacji, zanim znajdzie się on na rzeczywistym obiekcie, a więc najczęściej dość trudny do późniejszej zmiany.

Z doświadczenia autora wynika, że rozpatrywanie energooszczędności układu polegało najczęściej na intuicyjnym podejściu do tego problemu. Zakładało ono, żeby na wstępie załączać pompę o małej wydajności (małej mocy), gdyż pobiera ona mniej energii elektrycznej a zatem proces pompowania powinien być tańszy. Jeśli praca "małej" pompy jest nieskuteczna (ma mniejszą wydajność niż przepływ bieżący q_{we} ścieków wpływających), wówczas należy włączyć alternatywnie lub równoległe drugą pompę najczęściej o większej mocy (wydajności). Taki sposób rozumowania był zawsze podstawą konstrukcji algorytmu sterowania pompami przepompowni, również i tej rozpatrywanej poniżej.

2. Analizowana przepompownia

Rozpatrywana poniżej przepompownia należy do kategorii przepompowni zbiorczych, otrzymujących ścieki z przepompowni satelickich, które przyjmują z kolei ścieki od dostawców indywidualnych. Jej celem jest tłoczenie ścieków do oczyszczalni. Dlatego jej wyposażenie jest bogatsze od przepompowni satelickich, zapewniające wystarczającą niezawodność i wydajność procesu pompowania. Jej uproszczony schemat we widoku z góry pokazano na rys.1.

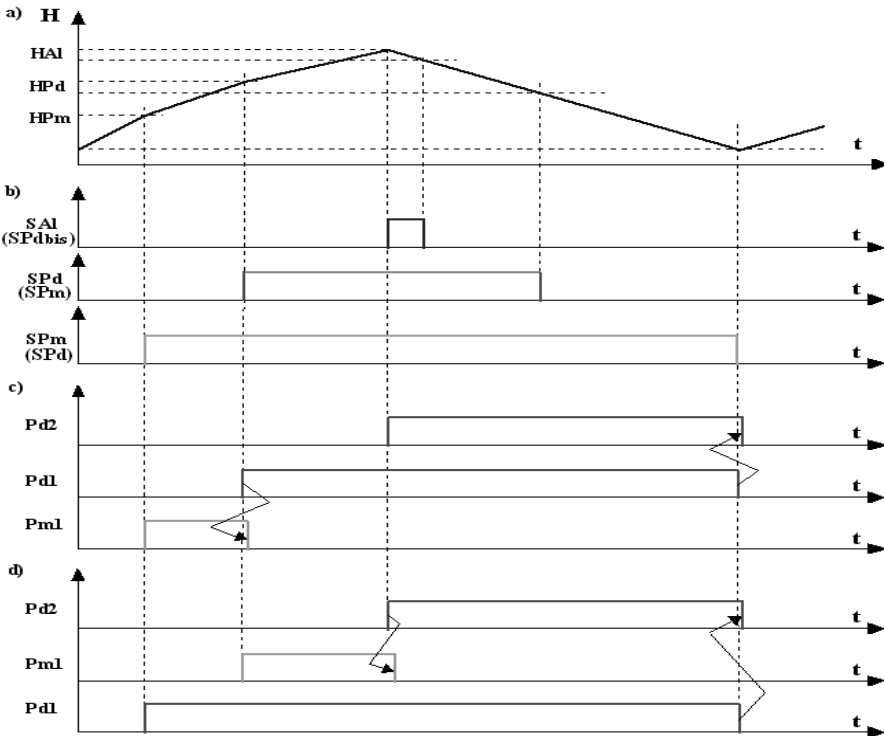


Rys.1. Schemat przepompowni - widok z góry

Fig.1. Pumping station scheme – top view

Widok z góry obiektu przepompowni jest okręgiem, któremu na rys.1 ścięto łuk komór osadników piasku w celu ograniczenia rozmiarów rysunku. Cała konstrukcja przepompowni mieści się pod ziemią a hala pomp znajduje się na najniższej kondygnacji, ok. 10m pod poziomem gruntu. Zbiornik ściekowy jest podzielony przegrodą poprzeczną na dwie komory, które połączone są przepustem o średnicy 0,3m zaopatrzonym w zasuwę. Poziom roboczy zbiornika wynosi ok. 0,8m, co przy pozostałych wymiarach komór daje ok. 29,5 m³ pojemności roboczej zbiornika.

Pomiar poziomu ścieków odbywa się metodą ultradźwiękową. Przetwornik pomiarowy, oprócz wyjścia ciągłego, posiada trzy nastawne wyjścia dwustanowe o sygnalizowanym poziomie i konfigurowanej histerezie. Wyjścia te służą do sterowania pracą pomp za pośrednictwem sterownika PLC typu Alpha XL firmy Mitsubishi Electric [1-5]. Charakterystykę wyjść dwustanowych przetwornika i pracę pomp pokazano na rys.2b w przykładowej sytuacji pracy pompowni.

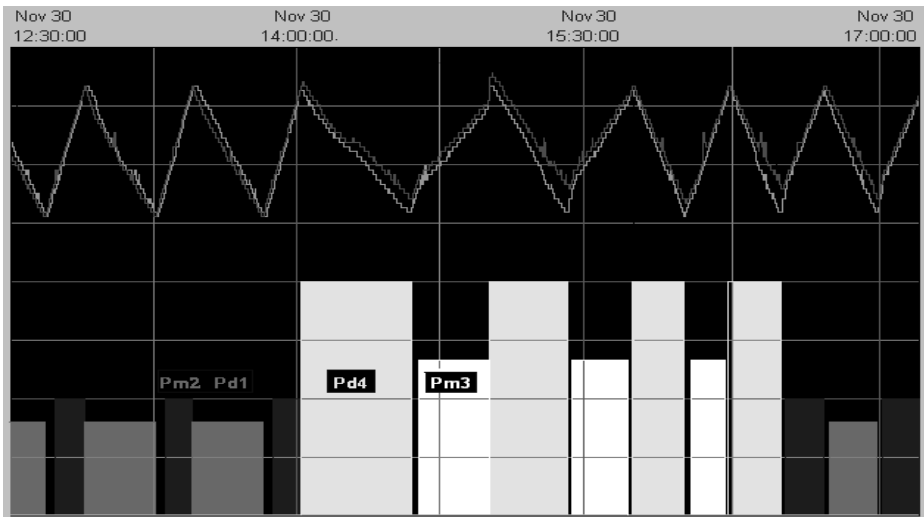


Rys.2. Wykres: a) poziomu, b) wyjść dwustanowych przetwornika poziomu, c) praca pomp - wariant pierwotny, d) praca pomp - wariant zoptymalizowany

Fig.2. Graphs of a) levels, b) two-position level transducer outputs, c) the pumps work - the original variant, d) the pumps work - optimized variant

Na wykresie poziomym **H** (rys.2a) przyjęto trzy strefy: **HPm** - poziom pompy małej, **HPd** - poziom pompy dużej i **HAl** - poziom alarmowy. Każda z tych stref posiada swoją histerezę (rys.2b) i definiuje stan swojego sygnału dwustanowego: **SPm** - sterowanie pompą małą (**Pmi**), **SPd** - sterowanie pompą dużą (**Pdj**), **SAl** - sterowanie alarmowe - włączenie drugiej pompy dużej. Rysunek 2c pokazuje kolejność włączania i wyłączania pomp wg zasad przedstawionych w p.1. W chwili konieczności włączenia pompy dużej zostaje włączona pompa **Pd1**, gdyż sumaryczny czas pracy tej pompy $TspPd1 < TspPd2$.

Na rys.3 przedstawiono fragment ekranu wykresów ze systemu wizualizacji dyspozytorskiej SCADA (ang.: *Supervisory, Control and Data Acquisition*) poziomów w komorach przepompowni i stanów pracy poszczególnych pomp. Stan pracy danej pompy jest przedstawiony w postaci słupka o zmiennej wysokości a cztery z nich opisano symbolami danej pompy. Wykresy poziomu i pracy pomp są zgodne z wykresami teoretycznymi z rys.2.



Rys.3. Ekran wykresów poziomów i stanów pracy pomp ze systemu SCADA

Fig.3. Display of the pumps level and states charts for working pumps with the SCADA system

Z rysunku 3 wynika, że pompy małe (**Pmi**) w czasie rejestracji nie miały wystarczającej wydajności, przez co zawsze po pewnym czasie włączała się pompa duża (**Pdj**).

3. Koszty pompowania

Ponieważ wg przyjętego algorytmu pompy zawsze pracują parami, stąd wykonano pomiary poboru mocy i wydajności pompowania dla każdej pompy oddzielnie i dla wszystkich kombinacji pracy pary pomp. Pomiary te przedstawiono w tabeli 1 wraz z obliczeniami wtórnymi na danych źródłowych. Pozwoliło to uzyskać tzw. jednostkowy koszt pompowania dla każdego zestawu pompowego wyrażający się mianem: zł/m³ przepompowanych ścieków.

Koszt **K** pracy danego zestawu (**i**) pomp w godzinie wyraża się zależnością:

$$K = \frac{K_h}{Q} \quad [\text{zł/m}^3] \quad (1)$$

gdzie: **K_h** - koszt godziny pompowania [zł],

Q - przepompowana objętość ścieków w godzinie [m³].

Tab. 1. Parametry eksploatacyjne i kosztowe zestawów pomp

Tab. 1. Exploitation and costs parameters of the set of pumps

1	2	3	4	5	6	7
i : nr zestawu pomp	Włączone pompy	Wydajn. q [m ³ /h]	Prąd I [A]	Moc P _i (3*I*230V) [kW]	Koszt K=P _i *c/q c=1 [zł/kWh] [zł/m ³]	% współcz. kosztu K _{pi} /K _{p0}
1	1	143	27	18,63	0,130	0
2	2	66	17	11,73	0,178	36,42
3	3	55	29	20,01	0,188	44,44
4	4	143	29	20,01	0,140	7,41
5	1+2	163	42	28,98	0,178	36,47
6	1+3	162	42	28,98	0,179	37,31
7	1+4	181	49	33,81	0,187	43,38
8	2+3	111	33	22,77	0,205	57,46
9	2+4	167	44	30,36	0,182	39,54
10	3+4	165	44	30,36	0,184	42,23

Zatem określając powyższe wielkości:

$$K = \frac{P * I_h * c}{I_h * q} = \frac{P * c}{q} \quad [\text{zł/m}^3] \quad (2)$$

gdzie: **P** - moc zestawu pompowego,

c – umowna cena jednostkowa energii elektrycznej 1kWh [1zł/kWh],

q - realizowany przepływ bieżący danego zestawu pompowego [m³/h].

Przyjęta do obliczeń wartość c nie ma znaczenia, gdyż w docelowo obliczanym, względnym współczynniku kosztów, składnik ten ulegnie likwidacji (uproszczeniu). Względny, % współczynnik kosztów pompowania określono w kolumnie 7 tabeli, biorąc za wielkość bezwzględną odniesienia koszt tego zestawu pompowego, który miał najmniejszą wartość, a więc pompy nr 4.

Określone w kolumnie 7 koszty względne pokazują, że przyjęte w p.1 założenie, w którym każdy cykl pompowania zaczyna się od włączenia pompy małej, nie jest optymalne z punktu widzenia kosztów pompowania. Koszt pracy tych pomp jest zawsze średnio około 40% większy do pracy pomp dużych. W celu oszacowania tych kosztów zarejestrowano w danym momencie sumaryczne czasy pracy T_{spi} wszystkich czterech pomp pompowni za pewien okres czasu. Przedstawiono je w tabeli 2 wraz z dalszymi wyliczeniami kosztów.

Tab. 2. Sumaryczne czasy pracy pomp i koszty pompowania

Tab. 2. The aggregated working time and cost of pumping

1	2	3	4	5
Pompa nr i	T_{spi} [godz]	Wydajność pompy q_i [m ³ /h]	K_i - koszt jednostkowy [zł/m ³]	Koszt pompowania $K_{Pi} = T_{spi} * q * K_i$ [zł]
1	1419	143	0,13	26435,97
2	2325	66	0,18	27272,25
3	2326	55	0,19	24074,10
4	1419	143	0,14	28394,19
Sumaryczny koszt pompowania SKPa				106176,51

Kolumna 2 tabeli potwierdza zasadę załączania pompy w oparciu o mniejszy sumaryczny czas jej pracy dla pary pomp "małych" i pary pomp "dużych".

Powstaje pytanie, jaki byłyby koszt pompowania, gdyby całą objętość ścieków przepompowanych przez pompy małe P_{m2} i P_{m3} przepompować przez pompy duże P_{d1} i P_{d4} . Z uwagi na to, że kryterium załączenia pompy jest mniejszy czas sumaryczny jej pracy, obie pompy będą w tym przypadku pracowały taki sam czas dla przepompowania różnej objętości ścieków, gdyż posiadają różną wydajność. Wyliczenie tego czasu (T_{spw}) można otrzymać z zależności bilansowej:

$$T_{sp2} * q_2 + T_{sp3} * q_3 = T_{spw} * (q_1 + q_4) \quad (3)$$

Zatem:

$$T_{spw} = \frac{T_{sp2} * q_2 + T_{sp3} * q_3}{q_1 + q_4} \quad (4)$$

Wyliczony z zależności (4) czas T_{spw} , na podstawie danych z tabeli 2, wynosi 984 godz. Można więc przyjąć, że np.: $T_{sp1} = (1419 + 984) = 2403$ godz

i $T_{sp4} = (1419 + 984) = 2403$ godz. Koszt pompowania z uwzględnieniem tych danych przedstawiono w tabeli 3.

Jak wynika z tabeli 3, sumaryczny koszt pompowania systemu zmodyfikowanego SKPz jest mniejszy od sumarycznego kosztu systemu aktualnie pracującego SKPa. Względna, procentowa oszczędność modyfikacji (WPOM), przy założeniu że wszystkie ścieki będą przepompowane pompami dużymi o mniejszych kosztach jednostkowych [zł/m³], wyraża się następującą zależnością:

$$WPOM = \frac{SKPa - SKPz}{SKPa} \% = \frac{100*(106177 - 92855)}{106177} = 12,55 \% \quad (5)$$

Zgodnie z oczekiwaniem zaangażowanie w większym stopniu pomp o większej wydajności, które mają mniejszy koszt jednostkowy (K, patrz tabela 1) pompowania, powinno przyczynić się do obniżenia kosztów całkowitych eksploatacji przepompowni.

Tab. 3. Koszty pompowania systemu zmodyfikowanego

Tab. 3. The costs of the modified pumping system

1	2	3	4	5
Pompa nr i	Tspi [godz]	Wydajność pompy qi [m ³ /h]	Koszt Ki [zł/m ³]	Koszt pompowania K = Tspi * qi * Ki [zł]
1	2403	143	0,13	44765,02
4	2403	143	0,14	48080,95
Sumaryczny koszt pompowania SKPz				92854,98

4. Bilans przepływów przepompowni

Przedstawione na rys.2 poziomy załączania pompy jak i histereza sygnałów załączania mogą mieć różne wartości, zatem mogą one wpływać na zakres roboczy pompowania i tym samym na czas pracy pomp. Stąd powstaje pytanie, czy sumaryczny czas pracy pompy tsp, a zatem ważny parametr (czynnik) w tabeli 2 dla obliczenia zużycia energii elektrycznej, zależy od wartości roboczej zbiornika ΔQ_{zb} ? Dla uzyskania odpowiedzi na to pytanie zostanie przeprowadzona analiza bilansowa przepompowni.

Dla pewnej ilości masy ścieków, które wpływają do przepompowni w postaci przepływu sumarycznego Q_{we} , można zapisać równanie bilansowe sumarycznych przepływów: wejściowego Q_{we} i wyjściowego Q_{wy} :

$$Q_{we} = Q_{wy} + Q_{zb} \quad (6)$$

$$Q_{zb} = w * \Delta Q_{zb} \quad (7)$$

gdzie

$0 \leq w \leq 1$ - współczynnik napelnienia części roboczej zbiornika,

ΔQ_{zb} - część robocza zbiornika w której odbywa się napelnianie/oprózniczenie.

wartości napływu q_{we} , jeśli zmieni się wartość robocza zbiornika ΔQ_{zb} ? Przepompowana objętość ścieków na podstawie równania (14) za czas n cykli pompowania wynosi:

$$n * \Delta Q_{zb} = t_{sp} * (q_p - q_{we}) \quad (15)$$

Przyjmujemy, że zmieniona (z) wartość robocza zbiornika ΔQ_{zb} wynosi:

$$\Delta Q_{zbz} = k * \Delta Q_{zb} \quad (16)$$

gdzie współczynnik zmiany $k > 0$.

Zatem liczba przepompowań dla nowej objętości roboczej zbiornika ΔQ_{zbz} wynosi:

$$N_z = \frac{n * \Delta Q_{zb}}{\Delta Q_{zbz}} = \frac{n * \Delta Q_{zb}}{k * \Delta Q_{zb}} = \frac{n}{k} \quad (17)$$

Zatem sumaryczny czas pracy pompy dla zmienionej wartości ΔQ_{zb} , na podstawie zależności (10), wynosi:

$$t_{spz} = n_z * \frac{\Delta Q_{zbz}}{q_p - q_{we}} = \frac{n}{k} * \frac{k * \Delta Q_{zb}}{q_p - q_{we}} = \frac{n * \Delta Q_{zb}}{q_p - q_{we}} = t_{sp} \quad (18)$$

Jak wynika z równania (18), sumaryczny czas pracy pompy t_{sp} nie zależy od roboczej objętości zbiornika ΔQ_{zb} . Natomiast jak wynika z zależności (15), liczba załączeń n zależy odwrotnie proporcjonalnie od objętości roboczej ΔQ_{zb} . Im mniejsza objętość robocza ΔQ_{zb} , tym częściej musi załączać się pompa.

5. Optymalizowany algorytm sterowania

Jak wynika z tabeli 2, zmieniony algorytm sterowania pompowni, mający na celu minimalizację kosztów pompowania, czyli pracujący z jak najmniejszą wartością parametru kosztów [zł/m³], powinien załączać pompy w następującej kolejności:

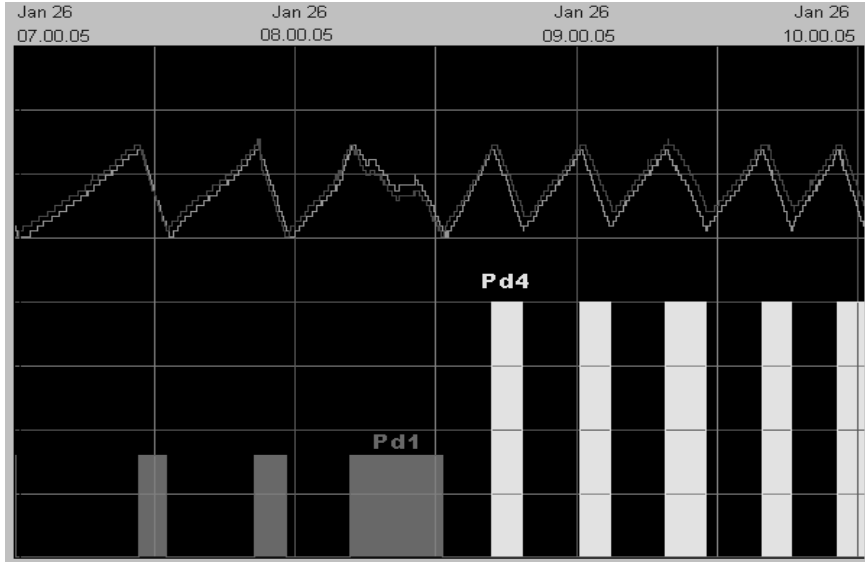
- krok 1: załączenie dużej pompy,
- krok 2: dodatkowe załączenie małej pompy,
- krok 3: wyłączenie małej a załączenie drugiej dużej pompy.

Kroki 2 i 3 realizowane są wówczas, gdy wydajność załączonej w kroku 1 pompy dużej jest mniejsza od przepływu wejściowego ścieków do przepompowni. Ponieważ koszty obu kroków (2 i 3) są porównywalne (wg tabeli 2), stąd nie ma większego znaczenia czy w danym kroku będzie pracowała pompa duża czy mała. Jednak zaproponowana wyżej kolejność nie eliminuje całkowicie pracę pomp małych, co ma duże znaczenie w utrzymaniu ich technologicznej sprawności.

Na rys.2d pokazano wykres czasowy pracy pomp dla przedstawionego wyżej wariantu zoptymalizowanego. Sygnały dwustanowe z urządzenia pomiaru poziomu mają w tym przypadku odmiennie przypisane sterowanie pomp, co na rys.2b przedstawiono w nawiasach (...).

Zoptymalizowany algorytm sterowania zaimplementowano w sterowniku Alpha XL, sterującego przepompownią. Na rys.4 przedstawiono fragment ekranu wykresów poziomu i stanów pracy pomp ze systemu wizualizacji dyspozytorskiej po w.w. imple-

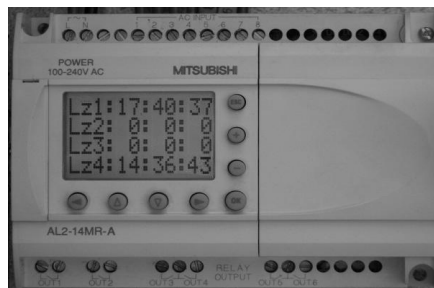
mentacji. Jak było do przewidzenia, pompy „duże” zmajoryzowały pracę przepompowni. Natomiast jak wynika z przeglądu tych wykresów w pozostałej części doby jak i dni poprzednich, w przepompowni załączane były prawie wyłącznie pompy „duże”, co oznacza, że bieżący napływ ścieków w każdej momencie doby był mniejszy od wydajności pomp „dużych”.



Rys.4. Ekran wykresów poziomów i stanów pracy pomp ze systemu SCADA dla wariantu zoptymalizowanego

Fig.4. Display of the pumps level and states charts for the modified variant with the SCADA system

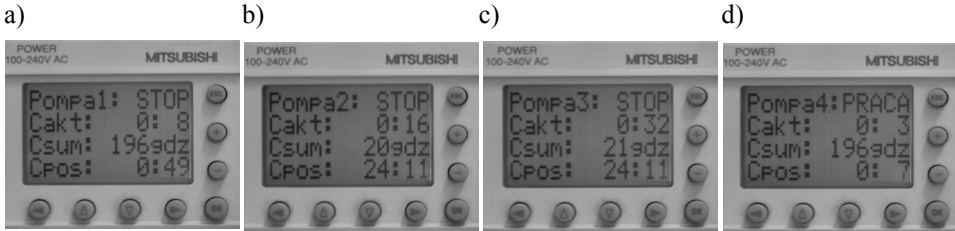
Na rys.5 przedstawiono jeden z ekranów sterownika Alpha XL, pokazujący liczbę załączeń poszczególnych pomp w ciągu bieżącej doby jak i dwóch dób poprzednich.



Rys.5. Sterownik PLC z ekranem liczby załączeń pomp w kolejnych dobach

Fig.5. PLC controller with a screen representing the number of closures in the pump in the consecutive 24 hour periods

Rysunki 6a – 6d przedstawiają ekrany czasów pracy: bieżącego (Cakt), postoju (Cpos) i sumarycznego (Csum) danej pompy.



Rys. 6. Ekrany sterownika PLC pokazujące czasy pracy pomp

Fig. 6. PLC screens showing the times of pumps work

W tabeli 4 przedstawiono sumaryczne czasy pracy pomp z ekranów czasów pracy: rys. 6a - 6d dla okresu czasu 30 dni i koszty pompowania dla zoptymalizowanego wariantu. Potwierdzają one w pełni majoryzację pracy pomp „dużych”. Ponieważ pompy te charakteryzują się najlepszym współczynnikiem kosztów jednostkowych K_i , stąd wyniki względnych oszczędności kosztów przepompowni dla wariantu zoptymalizowanego powinny być zbliżone do wyliczonych wg zależności (5) i wynosić ok. 12%.

Tab. 4. Sum. czasy pracy pomp i koszty dla wariantu zoptymalizowanego

Tab. 4. Aggregated working time and cost for the optimized variant

1	2	3	4	5
Pompa nr i	Tspi [godz]	Wydajność pompy qi [m3/h]	Koszt jednostkowy Ki [zł/m3]	Koszt pompowania KPi = Tspi * q * Ki [zł]
1	196	143	0,13	3663,14
2	20	66	0,18	237,60
3	21	55	0,19	219,45
4	196	143	0,14	3923,92
Sumaryczny koszt pompowania SKPa				8044,11

Na podstawie wartości SKPa z tabeli 4 i zależności (5) określającej wskaźnik procentowej oszczędności modyfikacji WPOM, rzeczywistego kosztu 1kWh w wysokości 0,45zł (netto) oraz przyjęcia wartości przybliżonej wartości WPOM=12% (pompy małe mają ok. 6% udziału w kosztach pompowania), można oszacować bezwzględną oszczędność pompowania ΔKP na kwotę netto ponad 550zł na miesiąc pracy przepompowni

6. Podsumowanie

Jak zaznaczono w p.1, wybór algorytmu sterowania pompami przepompowni wymaga zawsze uwzględnienia pewnych kompromisów pomiędzy założonym celem a realiami pracy pomp. Przyjęcie zaproponowanego w p.5 algorytmu zoptymalizowanego może okazać się niemożliwy do przyjęcia, z uwagi na wymagania samego procesu oczyszczania ścieków w postaci równomiernego a zatem i najwolniejszego napływu ścieków do oczyszczalni. Wariant pierwotny też tego nie zapewniał całkowicie, ale z punktu widzenia tego wymogu realizował proces pompowania w krótkich przedziałach czasowych zdecydowanie wolniej. Dla wariantu zoptymalizowanego, który tak jak pierwszy przepompowuje całą objętość roboczą przepompowni ΔQ_{zb} , w celu zbliżenia się do postulatu równomierności, można byłoby np. zmniejszyć w wartość ΔQ_{zb} , co jak wykazano w p.4 nie ma wpływu na sumaryczny czas pompowania a więc i koszty bieżące tego procesu. Jednakże w miarę zmniejszania objętości roboczej przepompowni, zwiększy się liczba cykli pracy pomp a tym samym szybciej zużywać się będą elementy układu sterowania, jeśli układ ten wykonany jest w technice stykowej z użyciem styczników.

Problem ten mógłby być do pominięcia w przypadku bezstykowych układów sterowania opartych na softstartach lub falownikach. Zastosowany falownik do zasilania pompy mógłby realizować ciągle jej sterownie, ze wspomnianym wyżej postulatem równomierności pompowania ścieków do oczyszczalni. Powyższe założenie musi zawsze uwzględniać realia pracy przepompowni, w której średni wypływ ścieków do odbiorcy następnego (w tym przypadku jest nim oczyszczalnia) musi być równy średniemu napływowi ścieków do przepompowni. Samo buforowanie ścieków w zbiorniku przepompowni, z uwagi na jego zazwyczaj niewielką pojemność, ma w tym przypadku znikomy udział w wymaganym postulatcie równomierności napływu.

Bibliografia

- [1] Mielcarek,R. Zwiększenie efektywności zdalnej kontroli i sterowania w sterowniku Alpha XL firmy Mitsubishi Electric. Rozd.22. Praca zbiorowa pod red. A.Kwietnia i P.Gaja. Systemy Informatyczne z Ograniczeniami Czasowymi. WKŁ Warszawa 2006
- [2] Mitsubishi Electric. α 2 SIMPLE APPLICATION CONTROLLERS - Programing Manual. 2005/8
- [3] MPL Technology. Jeszcze raz Alpha – teraz w formie XL. Napędy i Sterowanie 2002/6/
- [4] Panasiewicz A. Alpha XL. Napędy i Sterowanie 2002/9
- [5] Strona internetowa: <http://mpl.pl>