

WYBRANE STRATEGIE STEROWANIA REDUNDANTNYMI URZĄDZENIAMI OKRĘTOWYMI

SELECTED CONTROL STRATEGIES OF REDUNDANT MARINE EQUIPMENT

Agata Albrecht^{1*}, Adam Muc¹, Adam Szeleziński²

¹ Akademia Morska w Gdyni, Morska 81-87, 81–225 Gdynia, Wydział Elektryczny,
Katedra Automatyki Okrętowej, e-mail: a.albrecht@we.am.gdynia.pl

² Akademia Morska w Gdyni, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Techniki

* Adres do korespondencji/Corresponding author

Streszczenie: Artykuł przedstawia wybrane strategie sterowania urządzeniami redundantnymi zawarte w jednym programie, dzięki czemu istnieje możliwość zmiany trybu pracy w zależności od sytuacji i zapotrzebowania. Sterowanie zrealizowano z wykorzystaniem sterownika programowalnego PLC oraz panelu operatorskiego HMI. Celem pracy było przedstawienie kilku uzupełniających się rozwiązań, do efektywnego i optymalnego wykorzystania urządzeń okrętowych.

Słowa kluczowe: urządzenia okrętowe, redundancja, sterowanie, sterownik programowalny, PLC.

Abstract: This paper presents selected control strategies of redundant devices implicated in one program so that there is a possibility to change the operating mode depending on situation. The problem was evolved on pumps example because of their often use both in marine, and shore environment. Simulation model was based on two parallel pumps working in one system. First and second control mode assumes one of the pump working as 'Master' and second as 'Stand-by'. It gives freedom in selection which pump is 'Master' and opportunity to change the choice. Third mode comprehends rotating work of two pumps depending on medium pressure value in the system. The control was implemented by using Programmable Logic Controller (PLC) and Human Machine Interface (HMI). Described strategies were checked and simulated in a few different configurations. The aim was to present several complementary solutions to achieve efficient and optimum use of the devices.

Keywords: marine devices, redundancy, control, programmable logic controller, PLC.

1. WSTĘP

Rozwój przemysłu spowodował zaostrzenie wymagań dotyczących wydajności pracy oraz zmniejszenia awaryjności układów, a tym samym i poszczególnych urządzeń, znajdujących się na jednostkach pływających lub obiektach lądowych. W okrętownictwie problem ten jest większy ze względu na trudności związane z wymianą bądź naprawą sprzętu przez serwisy zewnętrzne, gdy statek znajduje się w morzu. W związku z tym często instaluje się nadmiarowe urządzenia, co wiąże się z dodatkowymi kosztami. Jednak dzięki dobrze dobranym strategiom sterowania uzyskuje się zwiększenie niezawodności pracy danego systemu. Ponadto towarzystwa klasyfikacyjne wymagają stosowania nadmiarowości w systemach dla bezpieczeństwa statku [Liberacki 2010].

Pompy, wchodzące w skład zespołów pompowych (m.in. silnik elektryczny, pompa, dodatkowe oprzyrządowanie), znalazły bardzo szerokie zastosowanie w okrętownictwie, dlatego też na ich przykładzie postanowiono rozważyć problem sterowania urządzeniami redundantnymi. W regularnej eksploatacji pojedyncze pompy stosowane są jedynie w małych systemach. Przeważnie w pompowniach wykorzystuje się układy złożone z dwu lub więcej pomp. Pozwala to na regulację wydajności i ciśnienia cieczy w systemie. Niejednokrotnie instalacje wyposażane są w większą liczbę pomp również ze względów bezpieczeństwa.

W artykule przeanalizowano kilka wariantów pracy dwóch pomp połączonych równolegle. Sterowanie zostało opracowane na programowalnym sterowniku logicznym PLC (ang. *Programmable Logic Controller*) z wykorzystaniem panelu operatorskiego HMI (ang. *Human Machine Interface*).

2. WYBRANE STRATEGIE STEROWANIA

Dobrze wiadomo, że nadmiarowe elementy zwiększają niezawodność systemu. Pojawia się wtedy jednak pytanie: jak optymalnie przydzielić nadmiarowe elementy? Odpowiedź zależy od kryterium optymalizacji i struktury zaprojektowanego systemu [Lobos i Momot 2002].

W artykule przedstawiono trzy wybrane sposoby sterowania redundantnymi pompami, które w odróżnieniu od tradycyjnego podejścia zostały ze sobą sprzężone. Rozwiązanie takie ma na celu zapewnienie płynnej zmiany trybu pracy urządzeń w zależności od zmieniających się warunków. Możliwość ta znacznie zwiększa efektywność wykorzystania urządzeń oraz może prowadzić do redukcji zużycia energii i części zamiennych pomp.

Pierwszym proponowanym trybem pracy pomp jest tzw. rezerwowanie wzajemne. W tym trybie jedna z pomp traktowana jest jako główna i pracuje jako tzw. wiodąca (ang. *master*). Natomiast w tym samym czasie druga pompa traktowana jest jako pomocnicza i pracuje jako tzw. rezerwa (ang. *slave*).

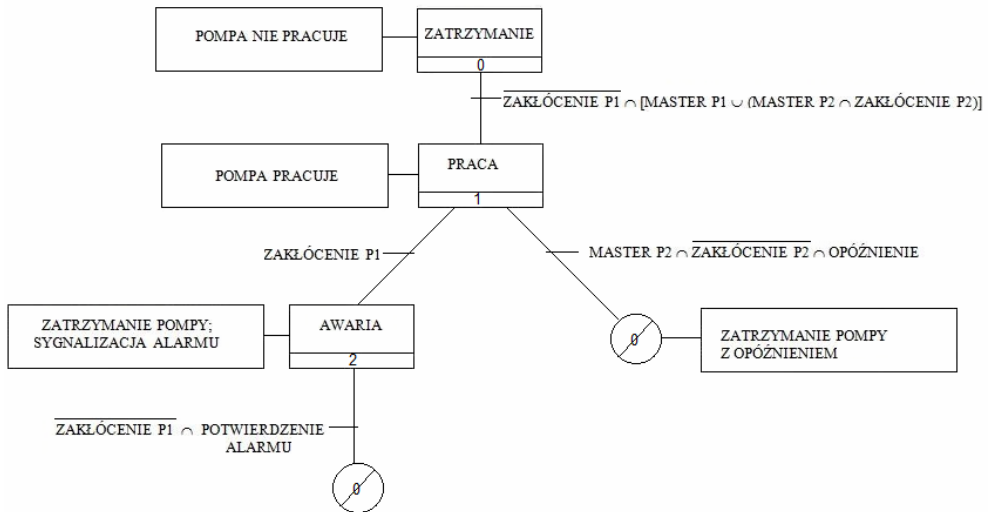
Drugi proponowany tryb oparty jest na podobnej zasadzie, z tą różnicą, że role pomp są zamieniane w zdefiniowanym wcześniej interwale czasowym. W obydwu powyższych trybach, w momencie awarii, remontu lub naprawy jednej z pomp, jej obowiązki przejmuje druga. Wybór, która z pomp ma być wiodąca, a która rezerwowa, pozwala na równomierną eksploatację obydwu pomp.

W powyższych rozwiązaniach każda z pomp może znajdować się w jednym z trzech stanów: zatrzymanie, praca lub awaria.

Funkcje realizowane przez układ są następujące:

- wybór pompy pracującej jako wiodąca i pompy pozostającej w rezerwie;
- symulacje awarii krytycznej pompy 1 i pompy 2;
- alarmowanie w przypadku wystąpienia awarii krytycznej pompy 1 i/lub pompy 2.

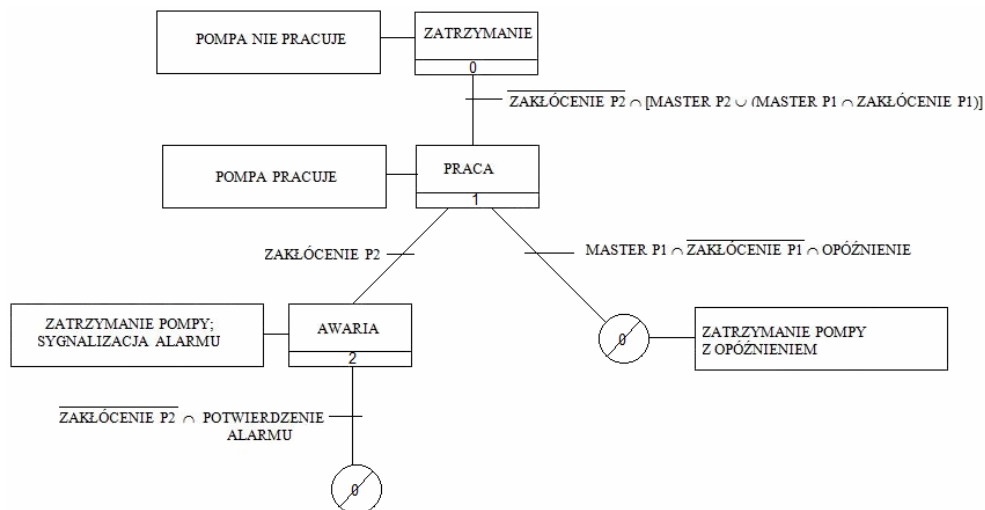
Algorytm sterowania przedstawiono w postaci grafów przejść na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Graf przejść układu dla pompy 1 w trybie rezerwowania wzajemnego

Fig. 1. Transition diagram for pump 1 in mutual reserve mode

Trzeci tryb pracy pomp obejmuje pracę równoległą, która zakłada pracę jednej pompy lub dwóch pomp jednocześnie w zależności od zapotrzebowania. Znajduje on zastosowanie w sytuacji, gdy praca pomp jest zależna od wartości ciśnienia wymaganej na odbiorniku, natomiast zasilanie układu w medium nie musi być ciągłe. Liczba pracujących pomp związana jest z wartością ciśnienia, a kolejność ich uruchamiania zależy od tego, która z pomp pracowała jako ostatnia.



Rys. 2. Graf przejść układu dla pompy 2 w trybie rezerwowania wzajemnego

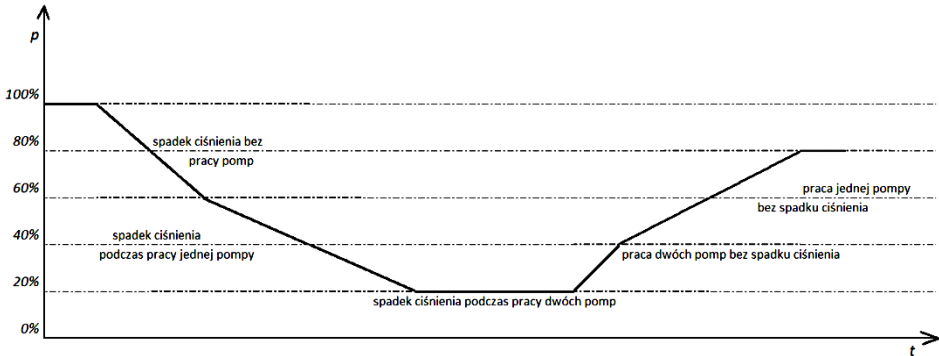
Fig. 2. Transition diagram for pump 2 in mutual reserve mode

Pompa pierwsza w kolejności (ta, która dłużej nie pracowała) uruchamia się w momencie spadku ciśnienia poniżej 60% – przypadek wystąpienia awarii niskiego ciśnienia. Kiedy ciśnienie zostanie nadbudowane do wartości większej lub równej 80%, pompa wyłącza się. W momencie, gdy pomimo pracy pompy wartość ciśnienia będzie nadal spadać, to po spadku poniżej progu 20% – awaria bardzo niskiego ciśnienia, uruchomi się pompa druga w celu wspomaganie pierwszej (rys. 3). W momencie pierwszego uruchomienia układu, gdy ciśnienie wynosi 0%, uruchamia się pompa pierwsza w kolejności, a po pewnym, krótkim opóźnieniu pompa druga w kolejności. Po nadbudowaniu ciśnienia do wartości większej bądź równej 40% – niskie ciśnienie, pompa pierwsza w kolejności zostaje odstawiona, natomiast pompa druga w kolejności wyłącza się w momencie osiągnięcia wartości ciśnienia większej lub równej 80% – ciśnienie normalne. Praca pomp jest rotacyjna – jako pierwsza wyłącza się ta, która pracuje dłużej. Jeżeli obie pompy są zatrzymane, to pierwsza uruchamia się ta, która dłużej nie pracowała. Taka strategia na celu efektywne i ekonomiczne wykorzystanie obydwu urządzeń.

Funkcje realizowane przez układ obejmują:

- uruchamianie pomp w zależności od ciśnienia odbiornika w przypadku symulacji awarii krytycznej pompy 1 i pompy 2;
- sygnalizację procentowej wartości ciśnienia;
- symulację zachowania się układu w przypadku spadku ciśnienia oraz przekroczenia progu niskiego i bardzo niskiego ciśnienia za pomocą przycisku na panelu HMI symulującego spadek wartości ciśnienia;

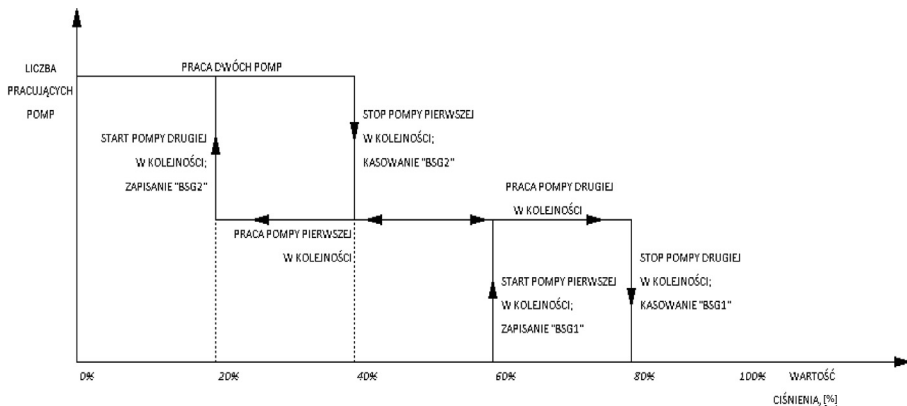
- symulacje awarii krytycznej pompy 1 i pompy 2;
- alarmowanie w przypadku wystąpienia awarii krytycznej pompy 1 i/lub pompy 2 oraz przekroczenia progu niskiego i bardzo niskiego ciśnienia.



Rys. 3. Przebieg ideowy spadku ciśnienia w zależności od liczby pracujących pomp przy założeniu stałego maksymalnego poboru medium

Fig. 3. Ideological diagram of pressure decline depending on the number of operating pumps assuming steady maximum medium intake

Algorytm sterowania zakłada uzależnienie liczby pracujących pomp od wartości ciśnienia cieczy, natomiast kolejność uruchamiania pomp wiąże się z informacją, która z pomp pracowała jako ostatnia. Programowo realizację tej koncepcji oparto na bitach pamięci pomocniczej. Liczbę pracujących pomp uzależniono od dwóch bitów stanu gotowości (BSG1, BSG2), które stanowią sygnały załączenia pomp do pracy w przypadku spadku ciśnienia oraz odstawienia pomp w wypadku odbudowania ciśnienia. Bity stanu gotowości nie są przyporządkowane do konkretnych pomp, lecz do progów alarmowych ciśnienia (rys. 4).

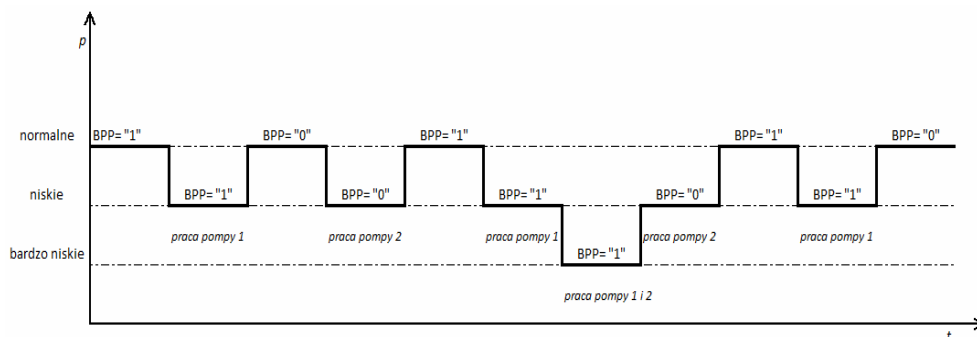


Rys. 4. Wykres pracujących pomp w zależności od wartości ciśnienia i bitów BSG1, BSG2

Fig. 4. Diagram of operating pumps depending on pressure value and BSG1, BSG2 bits value

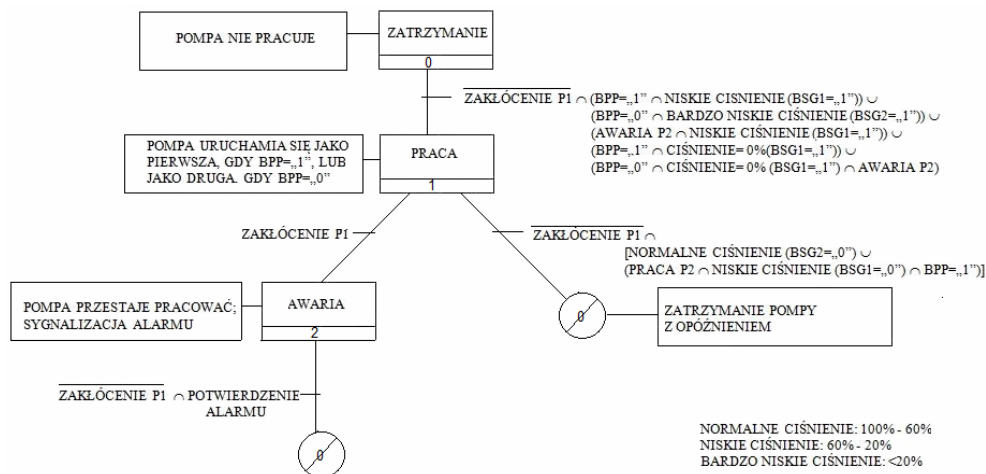
Fig. 4. Diagram of operating pumps depending on pressure value and BSG1, BSG2 bits value

Kolejność uruchamiania pomp wyznaczana jest za pomocą bitu przejęcia pracy (BPP), który przyjmuje wartość jedynki logicznej, gdy dłużej nie pracowała pompa nr 1 lub zera logicznego, gdy w stanie zatrzymania dłużej znajdowała się pompa nr 2 (rys. 5).

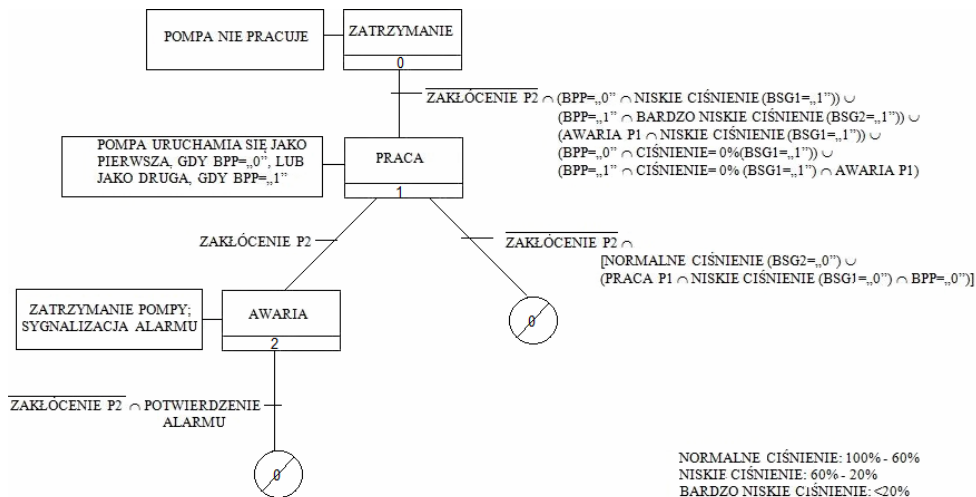


Rys. 5. Przebieg pracy pomp w zależności od wartości ciśnienia oraz bitu BPP
Fig. 5. Diagram of operating pumps depending on pressure value and BPP bit value

Algorytm sterowania został przedstawiony w postaci grafów przejść na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Graf przejść układu dla pompy 1 w trybie pracy równoległej
Fig. 6. Transition diagram for pump 1 in parallel operating mode



Rys. 7. Graf przejść układu dla pompy 2 w trybie pracy równoległej
Fig. 7. Transition diagram for pump 2 in parallel operating mode

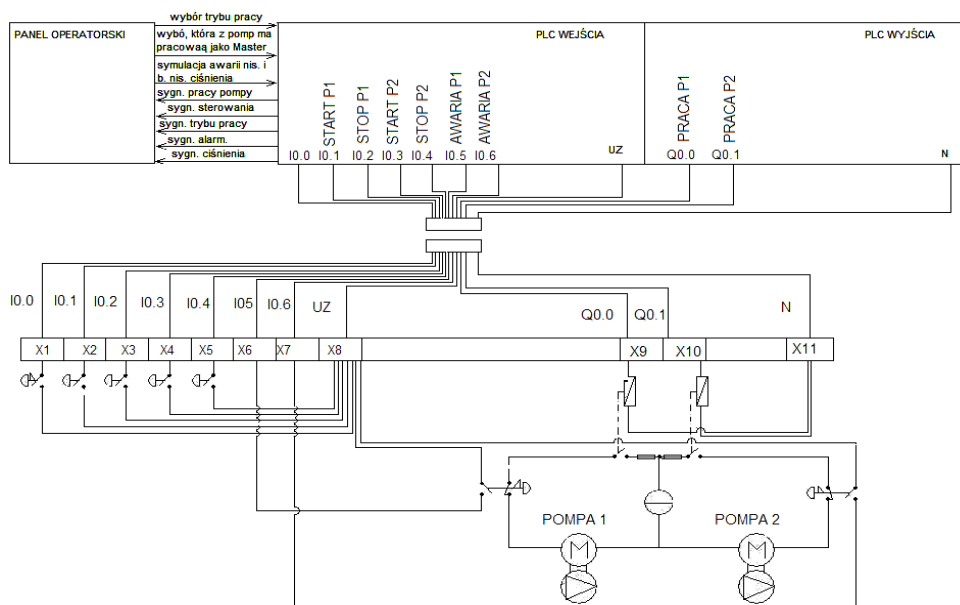
Proponowana koncepcja sterowania uwzględnia reakcję układu w sytuacji zaniku zasilania. W takim wypadku, po przywróceniu zasilania, układ automatycznie powraca do trybu pracy, w którym się znajdował. Programowo zrealizowano tę funkcjonalność przez ustawienie zmiennych jako pamięci retencyjnych w sterowniku PLC.

3. WERYFIKACJA PRZYJĘTYCH STRATEGII STEROWANIA

W celu sprawdzenia przyjętych koncepcji sterowania stworzono model fizyczny, symulujący pracę dwóch pomp wraz z połączeniami elektrycznymi (rys. 8).

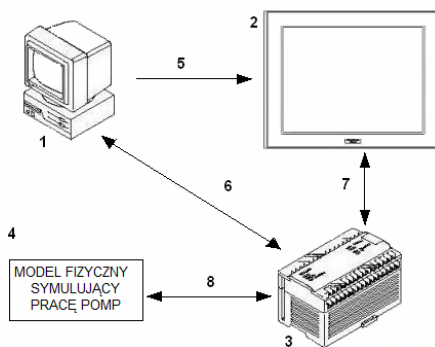
Program zrealizowano na sterowniku programowalnym SIMATIC S7-200, model CPU 222, natomiast wizualizację, symulację, pośredniczenie między operatorem a systemem sterowania, wybór trybu pracy oraz wybór pompy wiodącej i rezerwowej zaprojektowano na panelu operatorskim HMI Pro-face GP2600.

Całość została skomunikowana ze sobą za pomocą przewodów łączeniowych w układzie przedstawionym na rysunku 9.



Rys. 8. Schemat połączeń elektrycznych

Fig. 8. Electrical wiring diagram



Rys. 9. Schemat blokowy struktury całego układu: 1 – komputer do programowania sterownika i panelu HMI, z zainstalowanym oprogramowaniem, 2 – panel operatorski HMI Pro-face GP2600, 3 – sterownik programowalny Siemens S7-200 CPU 222, 4 – model fizyczny symulujący pracę pomp, 5 – przewód służący do programowania panelu HMI, 6 – przewód łączeniowy PPI między komputerem a sterownikiem, 7 – przewód łączący sterownik z panelem, 8 – przewód równoległy LPT do podłączenia modelu pomp ze sterownikiem

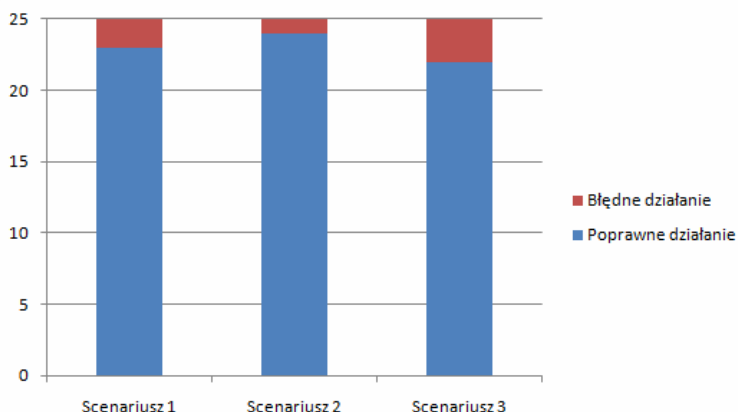
Fig. 9. Block diagram of the whole system structure: 1 – computer with installed software used for programming the PLC controller and HMI panel, 2 – HMI Pro-face GP2600 panel, 3 – PLC controller Siemens S7-200 CPU 222, 4 – physical model of pumps, 5 – wire used for programming HMI panel, 6 – PPI connection wire between the computer and the PLC controller, 7 – wire connecting the PLC controller with HMI panel, 8 – parallel LPT wire for connecting pumps model with the PLC controller

4. WYNIKI SYMULACJI

Rozważane strategie sterowania redundantnymi pompami zostały zasymulowane oraz sprawdzone na zasadzie testów akceptacji. Zaplanowany scenariusz zdarzenia przetestowano kilkakrotnie w różnych konfiguracjach pracy. Układ sprawdzono i przetestowano pod kątem:

- poprawności działania we wszystkich trybach pracy;
- możliwości zmian trybu pracy w różnych sytuacjach;
- zmiany pompy wiodącej z pompy 1 na pompę 2 i odwrotnie w trybie rezerwowania wzajemnego;
- reakcji układu na wystąpienie awarii krytycznej zarówno pompy 1, jak i pompy 2 w każdym trybie pracy,
- odpowiedzi układu na awarię niskiego ciśnienia i bardzo niskiego ciśnienia oraz reakcji sterowania po odbudowaniu ciśnienia do wartości normalnego ciśnienia podczas pracy równoległej;
- zachowania się układu przy zaniku, a następnie przywróceniu zasilania.

Przykładowe konfiguracje pracy pomp przetestowano w trzech scenariuszach, z których każdy został poddany 25 próbom (rys. 10).



Rys. 10. Wyniki symulacji trzech scenariuszy testowych w 25 próbach

Fig. 10. Simulation results of three conceptions conducted in 25 trials

Scenariusz nr 1:

- wybór trybu pracy – rezerwowanie wzajemne;
- wybór pompy wiodącej – pompa nr 1;
- zmiana pompy wiodącej z pompy nr 1 na pompę nr 2;
- awaria krytyczna pompy nr 2;
- wyłączenie i włączenie zasilania układu;
- zmiana trybu pracy na pracę równoległą.

Scenariusz nr 2:

- a) wybór trybu pracy – rezerwowanie wzajemne;
- b) wybór pompy wiodącej – pompa nr 2;
- c) zmiana pompy wiodącej z pompy nr 2 na pompę nr 1;
- d) awaria krytyczna pompy nr 1;
- e) wyłączenie i włączenie zasilania układu;
- f) zmiana trybu pracy na pracę równoległą.

Scenariusz nr 3:

- a) wybór trybu pracy – praca równoległa;
- b) zadanie wartości ciśnienia równej 0%;
- c) symulacja awarii niskiego ciśnienia;
- d) symulacja awarii bardzo niskiego ciśnienia;
- e) awaria krytyczna pompy nr 1;
- f) wyłączenie i włączenie zasilania układu;
- g) zmiana trybu pracy na rezerwowanie wzajemne.

Wyniki symulacji były zgodne z założeniami teoretycznymi. Układ działał poprawnie w każdym trybie pracy, a także możliwa była zmiana wybranego trybu na inny. Istniała również możliwość wyboru oraz zmiany pompy wiodącej i rezerwowej przy rezerwowaniu wzajemnym. Wystąpienie awarii krytycznej którejkolwiek z pomp w każdym z trybów pracy powodowało sygnalizację alarmu oraz automatyczne przejście pracy przez drugą pompę. Podczas pracy równoległej, w sytuacji awarii niskiego ciśnienia, uruchamiała się pompa, która dłużej nie pracowała, a w momencie wystąpienia awarii bardzo niskiego ciśnienia pracę podejmowała druga pompa w celu wspomagania pierwszej. Natomiast po odbudowaniu ciśnienia pierwsza zatrzymywała się pompa, która dłużej pracowała. Dzięki temu pompy pracowały rotacyjnie. Ponadto w momencie przywrócenia zasilania po jego zaniku układ wracał do trybu pracy, w którym się znajdował. Błędne działanie układu podczas symulacji polegało na zawieszaniu się układu. Było to spowodowane zbyt szybkimi zmianami poleceń. Sterownik posiadający pewną inercję nie był w stanie zareagować prawidłowo na zmianę tak szybko.

5. PODSUMOWANIE

Zamysłem artykułu było przedstawienie i sprawdzenie wybranych strategii sterowania redundantnymi urządzeniami okrętowymi w celu ich optymalnego oraz efektywnego wykorzystania. Rozważane rozwiązania uzupełniają się wzajemnie i mogą zostać zaimplementowane w jednym programie, co daje możliwość wyboru trybu pracy w zależności od aktualnej sytuacji i zapotrzebowania. Dzięki temu urządzenia redundantne mogą być wykorzystane do różnych strategii sterowania, a ich zużywanie jest równomierne i nie doprowadzi do sytuacji, że jedno z urządzeń jest eksploatowane ciągle, a drugie prawie wcale.

LITERATURA

- Chybowski, L., 2002, *Wybrane zagadnienia modelowania redundantnych zespołów pompowych instalacji okrętowych przy użyciu metody drzewa uszkodzeń (FTA)*, Zeszyty „Efektywność Siłowni Okrętowych i Stacjonarnych”, KGTU, Kaliningrad.
- Chybowski, L., 2012, *Qualitative and Quantitative Multi-Criteria Models of the Importance of the Components in Reliability Structure of a Complex Technical System*, Journal of KONBIN, vol. 4(24), s. 108–113.
- Chybowski, L., Matuszak Z., 2010, *Reliability Importance Analysis of Marine Technical Systems Elements*, Autobusy, nr 6.
- COMSOL Multiphysics® Modeling Software, <http://www.comsol.com>.
- Kamiński, K., 2006, *Programowanie w STEP7 MicroWin*, Gryf, Gliwice.
- Kamiński, K., 2007, *Programowanie paneli operatorskich*, Gdynia.
- Liberacki, R., 2010, *Selected Aspects of Determining the Reliability of the Pump Subsystems with Redundancy, Used in Main Engine Auxiliary Systems*, Journal of POLISH CIMAC, vol. 5, no. 2, s. 108–113.
- Łobos, E., Momot, M., 2002, *Reliability Design of Complex Systems by Minimalizing the Lifetime Variance*, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science.
- Siemens, *Simatic S7-200*, dokumentacja techniczna, 2008.
- Śmierczalski, R., 2005, *Automatyzacja systemów elektromagnetycznych statku*, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia.