

REZERWOWANIE W SYSTEMACH DYNAMICZNEGO POZYCJONOWANIA STATKÓW WSPIERAJĄCYCH EKSPLOACJĘ DNA MORSKIEGO

Leszek CHYBOWSKI, Grzegorz NICEWICZ

*Przedsiębiorstwo Armatorskie „Peter Döhle”, Hamburg, Niemcy
Instytut Nauk Podstawowych Technicznych, Akademia Morska, Szczecin*

Streszczenie: Przedstawiono podstawowe różnice i wymagania stawiane systemom pozycjonowania dynamicznego jednostek górnictwa morskiego i oceanotechnicznych, ze szczególnym uwzględnieniem rezerwowania w tych systemach. Zamodelowano w sposób uogólniony hierarchiczną budowę systemów dynamicznego pozycjonowania oraz zaproponowano odmienny od stosowanych dotychczas sposób opisu rezerwowania w systemach technicznych z wykorzystaniem płaszczyzny zespolonej.

1. WPROWADZENIE

Pośród wielu typów statków morskich wyróżnić można grupę statków wspierających operacje wydobywania ropy i gazu ziemnego. Statki te wyposażone są w systemy dynamicznego pozycjonowania *DP*, które służą automatycznemu utrzymaniu jednostki na określonej pozycji i azymucie. Dla zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa oraz niezawodności pracy większość podsystemów *DP* podlega rezerwowaniu [1].

System *DP* charakteryzuje się wszystkimi rodzajami rezerwowania, wobec czego można sklasyfikować go jako system z rezerwą mieszaną [2]. Dla przykładu zespoły prądotwórcze elektrowni wykazują rezerwowanie rozdzielcze, natomiast siłownie rezerwowane są całościowo, i mamy do czynienia z rezerwowaniem ogólnym. Ponadto zespoły prądotwórcze w pewnych stanach eksploatacyjnych pracują w układzie z większą ilością elementów podstawowych niż rezerwowych, przy czym każdy rezerwowy zespół prądotwórczy może zastąpić każdy z zespołów podstawowych (rezerwa przesuwająca się). Pod kątem obciążenia dominuje w systemach rezerwa gorąca (rezerwowanie pędników strumieniowych) lub ciepła (elektrownie) dla zapewnienia maksymalnego szybkiego przełączania w przypadku uszkodzenia elementów podstawowych [3].

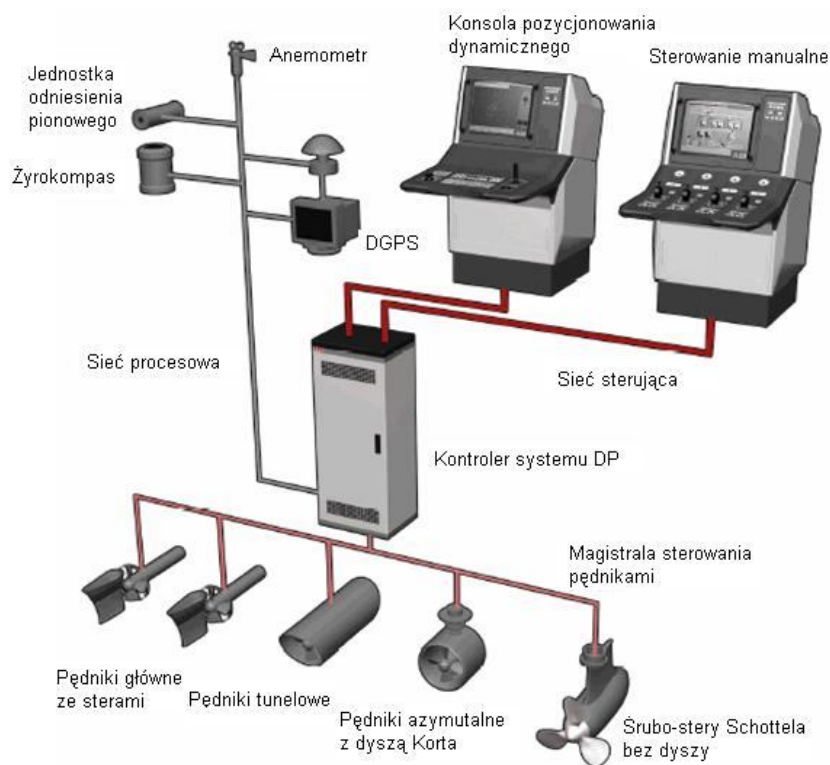
Statki dynamicznie pozycjonowane dzielone są pod względem wyposażenia na tzw. Klasy konsekwencji *DP*. Przepisy Międzynarodowej Organizacji Morskiej *IMO* dotyczą statków zbudowanych po 01.06.1994 i klasyfikują statki z automatycznym pozycjonowaniem w trzech klasach. Klasyfikacja *IMO* dzieli statki na trzy klasy o rosnącym rezerwowaniu w poszczególnych podsystemach. Nie dotyczy ona statków z ręcznym lub półautomatycznym sterowaniem pozycją (rys. 1). Jednostki z półautomatycznym systemem *DP*, traktowane są jako najniższa (zerowa) klasa wyposażenia *DP*, według towarzystw klasyfikacyjnych (*DPS-0*).

W dalszej części artykułu przedstawiono uogólniony model struktury systemu dynamicznego pozycjonowania oraz propozycję wykorzystania płaszczyzny liczb zespolonych do opisu rezerwowania w tych systemach.

2. WYPOSAŻENIE W SYSTEMIE DYNAMICZNEGO POZYCJONOWANIA

Wymagania stawiane wyposażeniu statków pozycjonowanych dynamicznie wynikają z operacji, do jakich ma być wykorzystywana dana jednostka. Odbiegają one, od wymagań stawianych wyposażeniu statków o przeznaczeniu transportowym – podstawową różnicą jest wysoki poziom rezerwowania większości struktur związanych pośrednio i bezpośrednio z działaniem systemu dynamicznego pozycjonowania. W tabeli 1 zaprezentowano wymagania określonej klasy wyposażenia statków *DP* w zależności od założonych zadań, jakie ma wykonywać. Zawsze do określonych zadań może być wykorzystana jednostka o wyższej klasie konsekwencji. Nie wyklucza się też możliwości zastosowania pozycjonowania ręcznego w pewnych rodzajach operacji oceanotechnicznych. W dalszej części z uwagi na ograniczenia publikacji, rozpatrzone zostanie rezerwowanie w podsystemach *DP* statków z zerową (najniższą) oraz trzecią (najwyższą klasą konsekwencji).

Opisane poziomy rezerwowania są zdefiniowane w okólniku *IMO* [4] oraz później wydane zalecenia szczegółowe Międzynarodowego Stowarzyszenia Kontraktorów Morskich *IMCA* [5].

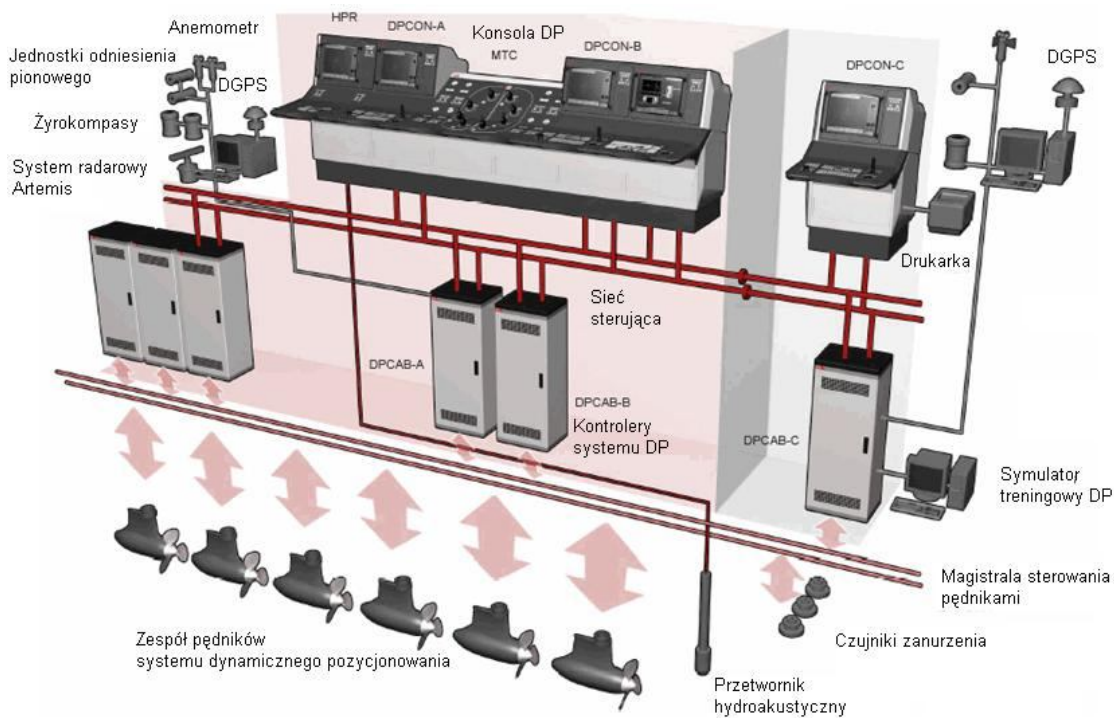


Rys. 1. Uproszczona budowa systemu manualnego pozycjonowania statku (*DPS-0*)

Tabela 1. Dobór klasy wyposażenia statku *DP* w zależności od typu operacji oceanotechnicznej jaką jednostka ma wykonywać.

Operacja	Klasa wyposażenia	Uwagi
Wiercenia	3	Zastosowanie do wszystkich odwiertów w obrębie projektów
Produkcja węglowodorów	3	
Eksploracja szybów wydobywczych	3	Wydobycie węglowodorów i składowanie ich na jednostce
Operacje łączenia z podmorskimi szybami wiertniczymi	2, 3	Z podwodnym smarowaniem
Stymulacja szybu wiertniczego	2, 3	
Załogowe operacje podwodne	3	Nurkowanie wewnątrz struktur itp.
Załogowe operacje podwodne	2, 3	Nurkowanie w otwartej wodzie
Wspomaganie prac nurkowych z małej jednostki pomocniczej	2, 3	Gdy jednostka pomocnicza jest połączona do głównego statku dla prac nurkowych
Bezzałogowa interwencja podwodna z wykorzystaniem pojazdów <i>ROV</i>	2, 3	
Jednostka hotelowa połączona trapem z instalacją oceanotechniczną	3	
Jednostka hotelowa poza strefą bezpieczeństwa 500 m	2, 3	
Stymulacja szybu naftowego, szyby platform	2, 3	
Ogólne prace konstrukcyjne w strefie bezpieczeństwa 500 m	2, 3	
Ogólne prace konstrukcyjne poza strefą bezpieczeństwa 500m	1, 2, 3	Dla pewnych mniej złożonych prac dopuszcza się zastosowanie statków klasy 0

Klasa 3 (*DPS-3*) odpowiada systemowi, w którym utrata pozycji (zejście statku z zadanej pozycji i lub azymutu w wyniku awarii systemu *DP*) nie powinna powstać w wyniku jakiegokolwiek pojedynczego uszkodzenia włączając kompletne spalanie w wyniku pożaru określonego podsystemu (np. jednej z siłowni) lub całkowite zatopienie jednego z głównych wodoszczelnych przedziałów maszynowych. Do pojedynczych uszkodzeń włącza się również pojedyncze nieumyślne działanie jakiegokolwiek osoby na pokładzie jednostki. Przykład takiego systemu przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Uproszczona budowa systemu dynamicznego pozycjonowania klasy 3 (DPS-3)

3. BUDOWA SYSTEMU DYNAMICZNEGO POZYCJONOWANIA

System dynamicznego pozycjonowania tworzą: E_{S1} – automatyczny system nadzoru dynamicznego pozycjonowania, E_{S2} – system elektrowni okrętowej, E_{S3} – system napędowy statku, E_{S4} – system awaryjnego zasilania w energię elektryczną, E_{S5} – system czujników odniesienia, E_{S6} – pozostałe podsystemy systemu DP:

$$S = \{E_{S1}, E_{S2}, E_{S3}, E_{S4}, E_{S5}, E_{S6}\} \quad (1)$$

Automatyczny system nadzoru dynamicznego pozycjonowania E_{S1} składa się z: E_{S1-1} – jednostki sterującej DP, E_{S1-2} – stacji kontroli DP, E_{S1-3} – systemu sterowania manualnego oraz E_{S1-4} – pozostałych podsystemów związanych z nadzorem operacji pozycjonowania:

$$E_{S1} = \{E_{S1-1}, E_{S1-2}, E_{S1-3}, E_{S1-4}\} \quad (2)$$

Z kolei system elektrowni okrętowej E_{S2} tworzą: E_{S2-1} – zespoły prądowców siłowni głównej, E_{S2-2} – główna tablica rozdzielcza GTR oraz system zarządzania rozdziałem mocy, E_{S2-3} – pomocnicze maszyny siłowni głównej, E_{S2-4} – łączniki magistral GTR i E_{S2-5} – pozostałe podsystemy związane z wytwarzaniem i rozdziałem energii elektrycznej:

$$E_{S2} = \{E_{S2-1}, E_{S2-2}, E_{S2-3}, E_{S2-4}, E_{S2-5}\} \quad (3)$$

System napędowy statku E_{S3} składa się z: E_{S3-1} – głównego zespołu napędowego statku wraz z pędnikiem, E_{S3-2} – pletwy steru głównego pędnika z systemem napędu i sterowania, E_{S3-3} – tunelowych pędników strumieniowych wraz z napędem, E_{S3-4} – azymutalnych pędników strumieniowych wraz z napędem oraz E_{S3-5} – pozostałych podsystemów związanych z systemem pędników:

$$E_{S3} = \{E_{S3-1}, E_{S3-2}, E_{S3-3}, E_{S3-4}, E_{S3-5}\} \quad (4)$$

W skład systemu awaryjnego zasilania w energię elektryczną E_{S4} wchodzi: E_{S4-1} – zasilacz awaryjny UPS, E_{S4-2} – bateria akumulatorów, E_{S4-3} – elektrownia awaryjna oraz E_{S4-4} – pozostałe podsystemy związane z awaryjnym zasilaniem w energię elektryczną:

$$E_{S4} = \{E_{S4-1}, E_{S4-2}, E_{S4-3}, E_{S4-4}\} \quad (5)$$

Natomiast system czujników odniesienia E_{S5} składa się z: E_{S5-1} – żyrokompasu (pomiar azymutu), E_{S5-2} – anemometru (pomiar kierunku i prędkości wiatru), E_{S5-3} – jednostki odniesienia pozycji statku (różnicowy system globalnego pozycjonowania DGPS, systemy hydroakustyczne, radarowe i laserowe, pomiary w dwóch

prostopadłych płaszczyznach pionowych kątów odchylenia od osi pionowej naciągniętej linki z obciążnikiem opuszczonym na dno morskie), E_{SS-4} – jednostki odniesienia pionowego VRU (pomiaru kołysań poprzecznych, wzdłużnych oraz nurzenia statku) i E_{SS-5} – pozostałych podsystemów czujników DP :

$$E_{SS} = \{E_{SS-1}, E_{SS-2}, E_{SS-3}, E_{SS-4}, E_{SS-5}\} \quad (6)$$

4. PROPOZYCJA OPISU REZERWOWANIA W SYSTEMACH DP

Dla zamodelowania rezerwowania w systemie X wprowadzono przekształcenie $F(X, t)$. Wynikiem tego przekształcenia jest para liczb, które odpowiednio są równe ilości elementów podstawowych w systemie X w chwili t , oraz ilości elementów rezerwowych w systemie X w chwili t .

$$F(X, t) = \xi(\varphi(X, t)) = (P(X, t), R(X, t)) \quad (7)$$

gdzie:

$\varphi(X, t)$ – funkcja struktury systemu X w chwili t .

Elementy pary liczbowej zwracanej w wyniku powyższego przekształcenia w złożonych systemach technicznych są zwykle funkcją czasu, co wynika z:

- zmiany struktury funkcjonalnej w związku ze zmianą stanu eksploatacyjnego (warunkuje to inna wymagana do pracy minimalną ilość elementów podstawowych),
- mniejsza liczba wymaganych elementów podstawowych zwiększa automatycznie liczebność elementów rezerwowych,
- elementy systemu mogą w czasie eksploatacji systemu technicznego przechodzić w stan niezdatności, co powoduje zmniejszenie się ilości pozostałych, gotowych do pracy elementów.

Dla określonej chwili czasu $t \geq 0$ całkowita ilość elementów $\mathfrak{Z}(X, t)$ w systemie X jest równa:

$$\mathfrak{Z}(X, t) = P(X, t) + R(X, t) = \mathfrak{Z}(X, 0) - \mathfrak{Z}_{REST}(X, t) \quad (8)$$

gdzie:

$\mathfrak{Z}(X, 0)$ – liczebność systemu X przy założonej początkowej pełnej gotowości systemu w chwili $t=0$:

$$\mathfrak{Z}(X, 0) = \underset{t=0}{card}(X) = P(X, 0) + R(X, 0) \quad (9)$$

gdzie:

\mathfrak{Z}_{REST} – ilość elementów systemu X , które uległy uszkodzeniu do chwili t .

Porównanie poziomu rezerwowania w systemach DP na statkach należących do klas wyposażenia, jest możliwe m.in. poprzez wprowadzenie współczynnika \mathfrak{Z}_{real} , który jest równy maksymalnej obserwowalnej w czasie eksploatacji liczbie elementów systemu będących w stanie zdatności:

$$\mathfrak{Z}_{real}(X) = \max_{t \rightarrow \infty} \underset{t}{card}(X) \quad (10)$$

Zalecenia towarzystw klasyfikacyjnych dotyczą wymaganej minimalnej ilości określonych elementów \mathfrak{Z}_{kr} , tzn. w czasie eksploatacji w systemie DP w chwili jego pełnej zdatności rzeczywista liczebność \mathfrak{Z}_{real} określonego podzespołu w systemie X nie może być mniejsza niż \mathfrak{Z}_{kr} co możemy zapisać jako:

$$\mathfrak{Z}_{real}(X) \geq \mathfrak{Z}_{kr}(X) \quad (11)$$

Wartość współczynnika \mathfrak{Z}_{kr} dla określonego systemu może posłużyć do opisu rezerwowania w określonym podsystemie na statku o danej klasie wyposażenia. Odnosząc to do wymaganej ilości elementów podstawowych $P(X, t)$, liczebność elementów rezerwowych $R(X, t)$ w określonym systemie X , w dowolnej chwili t nie może być mniejsza niż wartość:

$$R(X, t) = \mathfrak{Z}_{kr}(X) - P(X, t) \quad (12)$$

Funkcja $F(X, t)$ może być przedstawiona na płaszczyźnie zespolonej jako:

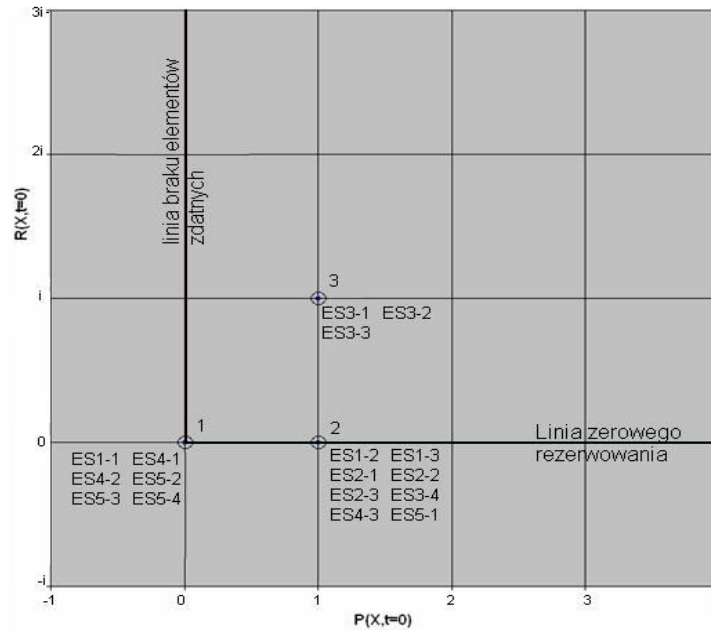
$$F(X, t) = P(X, t) + i \cdot R(X, t) \quad (13)$$

gdzie:

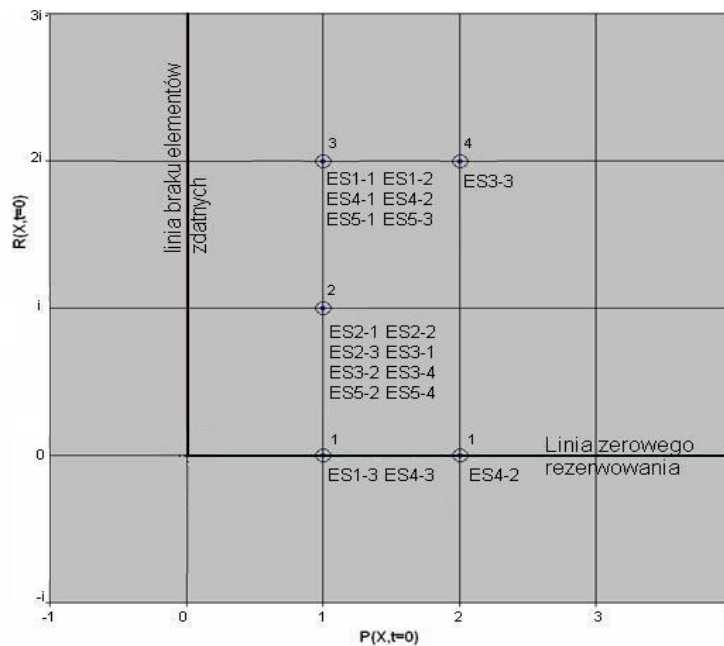
$$i = \sqrt{-1}$$

Po podstawieniu zależności (12) uzyskujemy formułę powiązaną z normatywnym wskaźnikiem \mathfrak{S}_{kr} w postaci:

$$F(X,t) = P(X, t) + i \cdot [\mathfrak{S}_{kr}(X) - P(X, t)] \quad (14)$$



Rys. 3. Wymagane wartości $F(X,t=0)$ dla poszczególnych elementów w klasie $DPS-0$: 1 – brak konieczności elementów danego typu w systemie, 2 – elementy bez rezerwowania, 3 – elementy z krotnością rezerwowania $\kappa=1$



Rys. 4. Wymagane wartości $F(X,t=0)$ dla poszczególnych elementów w klasie $DPS-3$: 1 – elementy niewymagające rezerwowania wg zaleceń klasyfikacyjnych; 2 – wymagany jeden element podstawowy, krotność rezerwowania $\kappa=1$; 3 – wymagany jeden element podstawowy, krotność rezerwowania $\kappa=2$; 4 – wymagane dwa elementy podstawowe, krotność rezerwowania $\kappa=1$

Wymagania minimalnej liczebności poszczególnych systemów $F(X,t)$ prezentują się dla przedstawionych modeli struktury w odniesieniu do różnych klas wyposażenia DP . Z uwagi na ściśle określone całkowite i zawarte w określonych zakresach wartości dla powyższych danych w każdej klasie DP można zlokalizować modele rezerwowania poszczególnych struktur systemu DP w określonych pozycjach na płaszczyźnie zespolonej. Poszczególne struktury podsystemów DP przyporządkowano określonym punktom płaszczyzny

zespolonej zgodnie z zależnością (14). Dla statków *DP* klas *DPS-0* i *DPS-3* położenie poszczególnych punktów przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Współrzędne poszczególnych punktów odpowiadają wartościom:

$$P(X, t=0) = \operatorname{re} [F(X, t=0)] = \operatorname{re} [\xi(E_0(\varphi(X, 0)))] \quad (16)$$

$$R(X, t=0) = \operatorname{im} [F(X, t=0)] = \operatorname{im} [\xi(\varphi(X, 0))] \quad (17)$$

Współczynnik krotności rezerwowania definiowany jako stosunek ilości elementów rezerwowych do ilości elementów podstawowych opisany jest zależnością:

$$\kappa = \frac{R(X, t)}{P(X, t)} \quad (18)$$

Wszystkie liczby w zaprezentowanych modelach mają argumenty należące do pierwszej ćwiartki układu współrzędnych, czyli:

$$\{\psi = \arg F(X, t)\} \in \langle 0, 90^\circ \rangle \quad (19)$$

Dla przedstawionego modelu można przedstawić szereg zależności. Założono, że istnieje przynajmniej jeden element w systemie:

$$P(X, t) > 0 \Rightarrow F(X, t) \neq 0 \quad (20)$$

Dla braku rezerwowania w systemie, czyli:

$$R(X, t) = [\mathfrak{I}_{kr}(X) - P(X, t)] = 0 \quad (21)$$

zachodzą zależności:

$$F(X, t) = P(X, t) \Rightarrow \overline{F(X, t)} = \overline{P(X, t)} \quad (22)$$

oraz po uwzględnieniu (19):

$$\psi = \arg F(X, t) = 0 \quad (23)$$

Dla dwóch systemów o tej samej krotności rezerwowania otrzymuje się:

$$\kappa_1 = \kappa_2 \Leftrightarrow \frac{R(X_1, u)}{P(X_1, u)} = \frac{R(X_2, v)}{P(X_2, v)} \Leftrightarrow \sin \psi_1 = \sin \psi_2 \quad (24)$$

czyli zachodzi:

$$\arg F(X_1, u) = \arg F(X_2, v) \quad (25)$$

Dla uszkodzenia dowolnego elementu podstawowego w systemie przy działających elementach rezerwowych przyjęto, że system w przedziale czasu $(t, t+\Delta t)$ nie zmienia swojego stanu eksploatacyjnego, czyli:

$$P(X, t) = \text{constans} \quad (26)$$

oraz składa się z co najmniej jednego elementu rezerwowego:

$$R(X, t) \geq 1 \quad (27)$$

Ponadto założono, że w jednej chwili czasowej $\Delta t \rightarrow 0$, uszkodzić się może tylko jeden element podstawowy, oraz zakłada się, że elementy rezerwowe są w tym czasie zdadne i załączają się do pracy (przejmują obciążenie w pomijalnie małym czasie). Wówczas uszkodzenie któregośkolwiek z elementów podstawowych w systemie X wywoła przejście stanu:

$$F(X, t) \xrightarrow[\lambda]{t} F(X, t + \Delta t) \quad (28)$$

gdzie:

λ – intensywność uszkodzeń systemu

Nowy stan systemu można wówczas opisać formułą:

$$F(X, t + \Delta t) = F(X, t) - i \quad (29)$$

Dla naprawy dowolnego elementu rezerwowego w systemie przy stanie zdadności systemu, przyjęto, że system w przedziale czasu $(t, t+\Delta t)$ nie zmienia swojego stanu eksploatacyjnego (26) i jest w stanie zdadności

oraz założono, że w jednej chwili czasowej $\Delta t \rightarrow 0$, naprawie może podlegać tylko jeden element oraz że zdadne elementy systemu w trakcie naprawy nie uszkadzają się.

$$F(X, t) \xrightarrow[r]{t} F(X, t + \Delta t) \quad (30)$$

gdzie:

r – intensywność napraw systemu

Nowy stan systemu można wówczas opisać formułą:

$$F(X, t + \Delta t) = F(X, t) + i \quad (31)$$

Dla uszkodzenia dowolnego elementu podstawowego w systemie przy uszkodzonych wszystkich elementach rezerwowych, przyjęto, że system w przedziale czasu $(t, t + \Delta t)$ nie zmienia swojego stanu eksploatacyjnego (26). oraz uszkodzone są wszystkie elementy rezerwowe.

$$R(X, t) = 0 \quad (32)$$

Założono również, że w jednej chwili czasowej $\Delta t \rightarrow 0$, uszkodzić się może tylko jeden dowolny element podstawowy, wówczas uszkodzenie wywoła przejście systemu ze stanu zdadności do stanu niezdadności:

$$F(X, t) \xrightarrow[\lambda]{t=t_{kr1}} F(X, t + \Delta t) \quad (33)$$

Nowy stan systemu można wówczas opisać formułą:

$$F(X, t + \Delta t) = F(X, t) - 1 \quad (34)$$

Dla naprawy dowolnego elementu w systemie, w stanie niezdadności, przyjęto, że system w przedziale czasu $(t, t + \Delta t)$ nie zmienia swojego stanu eksploatacyjnego (26). Ponadto stan niezdadności wynika z uszkodzenia tylko jednego elementu krytycznego dla systemu, tzn. uszkodzenie które wywołało awarie systemu powstało w wyniku procesu (34). Założono, że w jednej chwili czasowej $\Delta t \rightarrow 0$, naprawie może podlegać tylko jeden element oraz że elementy zdadne w trakcie naprawy nie uszkadzają się. Wówczas naprawa uszkodzonego elementu krytycznego wywoła przejście systemu ze stanu niezdadności do stanu zdadności:

$$F(X, t) \xrightarrow[r]{t=t_{kr2}} F(X, t + \Delta t) \quad (35)$$

Nowy stan systemu można wówczas opisać formułą:

$$F(X, t + \Delta t) = F(X, t) + 1 \quad (36)$$

Dla przejścia w stan niezdadności systemu przy wyjściowym stanie zdadności systemu i wszystkich elementach rezerwowych, przyjęto, że dla całego procesu przejścia do stanu niezdadności system nie zmienia swojego stanu eksploatacyjnego (26) oraz zakłada się że nie przeprowadza się napraw w systemie do chwili przejścia w stan niezdadności. Założono, że w jednej chwili czasowej $\Delta t \rightarrow 0$, uszkodzić się może tylko jeden element podstawowy, oraz zakłada się, że elementy rezerwowe jeśli są jeszcze zdadne załączają się do pracy (przejmują obciążenie w pomijalnie małym czasie). Wówczas uszkodzenie któregokolwiek z elementów podstawowych w systemie X wywoła przejście stanu (33). Zmiana stanu systemu z pełnej zdadności z zachowaniem opisanych założeń do stanu niezdadności, wymaga zajścia kolejno $(n+1) = (R(X, t) + 1)$ przejść stanów systemu. Z czego $R(X, t)$ przejść opisanych jest zależnością (29) co związane jest z wyczerpaniem zasobów w postaci elementów rezerwowych w systemie, natomiast składnik 1 opisany jest przejściem (34) i związany jest bezpośrednio z uszkodzeniem systemu. Szereg procesów przejść od stanu wyjściowego do uszkodzenia systemu można opisać jako:

$$\underbrace{\{F(X, t_0) \xrightarrow[\lambda]{t_0} F(X, t_0 + \Delta t), F(X, t_1) \xrightarrow[\lambda]{t_1} F(X, t_1 + \Delta t), \dots, F(X, t_{n-1}) \xrightarrow[\lambda]{t_{n-1}} F(X, t_{n-1} + \Delta t)\}}_{\times R(X, t_0)} \quad (37)$$

$$F(X, t_n) \xrightarrow[\lambda]{t_n} F(X, t_n + \Delta t)$$

Dla przejścia w stan pełnej zdadności systemu i wszystkich elementach rezerwowych przy wyjściowym stanie niezdadności systemu, przyjęto, że dla całego procesu przejścia do stanu pełnej zdadności systemu i

wszystkich elementów rezerwowych, system nie zmienia swojego stanu eksploatacyjnego (26). Ponadto stan niezdatności wynika z uszkodzenia tylko jednego elementu krytycznego dla systemu, tzn. uszkodzenie które wywołało awarie systemu powstało w wyniku procesu (34). Założono, że w jednej chwili czasowej $\Delta t \rightarrow 0$, naprawie może podlegać tylko jeden element oraz że elementy zdadne w czasie trwania procesu naprawy nie uszkodzają się. Naprawa uszkodzonego elementu krytycznego (pierwszego) wywołuje przejście systemu ze stanu niezdatności do stanu zdadności. Przyjęto, że system w kolejnych (po odnowie) chwilach czasu $(t, t+\Delta t)$ jest w stanie zdadności oraz założono, że w jednej chwili czasowej $\Delta t \rightarrow 0$, naprawie może podlegać tylko jeden element oraz że zdadne elementy systemu w trakcie naprawy nie uszkodzają się. Przejście systemu ze stanu niezdatności z zachowaniem opisanych założeń do stanu pełnej zdadności systemu i wszystkich n elementów rezerwowych wymaga zajścia kolejno: jednego przejścia (34) związanego z przywróceniem gotowości systemu oraz $(R(X, t_n))$ przejść opisanych jest zależnością (31) związanych z naprawą wszystkich elementów rezerwowych w systemie. Szereg procesów przejść od stanu wyjściowego do pełnej zdadności systemu i wszystkich elementów rezerwowych systemu można opisać jako:

$$\begin{aligned} & \{F(X, t_n) \xrightarrow[r]{t_n} F(X, t_n + \Delta t), \\ & \underbrace{[F(X, t_{n-1}) \xrightarrow[r]{t_{n-1}} F(X, t_{n-1} + \Delta t), F(X, t_{n-2}) \xrightarrow[r]{t_{n-2}} F(X, t_{n-2} + \Delta t), \dots, F(X, t_0) \xrightarrow[\lambda]{t_0} F(X, t_0 + \Delta t)]}_{\times(n=imF(X, t_n))} \end{aligned} \quad (38)$$

5. UWAGI KOŃCOWE

W artykule zaproponowano nowy sposób opisu rezerwowania dla złożonych systemów technicznych o zmiennej strukturze funkcjonalnej. Zaproponowana notacja w postaci pary liczb całkowitych pozwala na dokonanie szeregu przekształceń na płaszczyźnie zespolonej. Pozwalają one na sprawdzenie szeregu zależności pomiędzy podsystemami w systemach z rezerwowaniem. Zależności te mogą mieć zastosowanie dla modelowania i analiz numerycznych złożonych systemów technicznych o zmiennej strukturze funkcjonalnej i niezawodnościowej. Między innymi dla jednakowych elementów danego systemu możliwe jest sumowanie wskaźników $F(X, t)$, co interpretować można jako rozbudowę systemu o określoną ilość elementów podstawowych i rezerwowych (połączenie szeregowo dwóch systemów reprezentowanych przez odpowiednie wskaźniki) oraz odejmowanie tych wskaźników, co interpretuje się jako porównanie struktury (różnica w ilości wymaganych elementów podstawowych) i rezerwowania (różnica w ilości wymaganych elementów rezerwowych).

PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] Chybowski L., Matuszak Z., *Simulation of unavailability of the offshore unit's power plant system with use of selected algorithms*. Problems of Applied Mechanics. International Scientific Journal no 2 (15)/2004. IFToMM of Georgia. Tbilisi 2004, s. 33.
- [2] Chybowski L., *System energetyczno-napędowy jako podstruktura systemu dynamicznego pozycjonowania jednostki oceanotechnicznej*. Materiały XXIII Sympozjum Siłowni Okrętowych, Akademia Morska, Gdynia, 2002, s. 39.
- [3] Nicewicz G., Grzebieniak R., *Rezerwowanie w systemie energetyczno-napędowym siłowni statku wiertniczego i statku transportowego*. Materiały 22 MSN, Zielona Góra, Maj 2001. Tom Mechanika, s. 13.
- [4] *Guidelines for Vessels with Dynamic Positioning Systems*. IMO MSC Circ. 645. 6 June 1994.
- [5] *Guidelines for the Design & Operation of Dynamically Positioned Vessels*. IMCA M 103. February 1999.

REDUNDANCY IN DYNAMIC POSITIONING SYSTEMS OF SEABED EXPLORING SUPPORT OFFSHORE VESSELS

Summary: Major differences and requirements for structural redundancy in dynamic positioning systems of offshore oil and gas industry support vessels has been presented. Generic hierarchical structure model of dynamic positioning systems has been shown. Application of complex numbers plane for description of redundancy in dynamic positioning systems has been proposed.