ISSN 1733-8670

ZESZYTY NAUKOWE NR 10(82)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE

IV MIĘDZYNARODOWA KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA
EXPLO-SHIP 2006

Monika Bortnowska

Wyznaczenie mocy systemu sterowania ruchem dla statku wydobywczego

Słowa kluczowe: statek wydobywczy, instalacja wydobywcza, projektowanie wstępne, oddziaływanie środowiska morskiego, moc systemu sterowania ruchem

Dla statku wydobywczego jednym z ważniejszych systemów jest system sterowania ruchem, którego moc zależy od parametrów pogodowych w rejonie eksploatacyjnym i od wymiarów statku. Moc tego systemu będzie bardzo duża, stąd na wymiary statku będzie miał wpływ ciężar i wymiary siłowni okrętowej (elektrowni). W artykule przedstawiono koncepcję wymiarowo-przestrzenną statku wydobywczego oraz określenie dla niej maksymalnej, zapotrzebowanej mocy systemu sterowania ruchem. Artykuł stanowi kontynuację zagadnienia przedstawionego w [2].

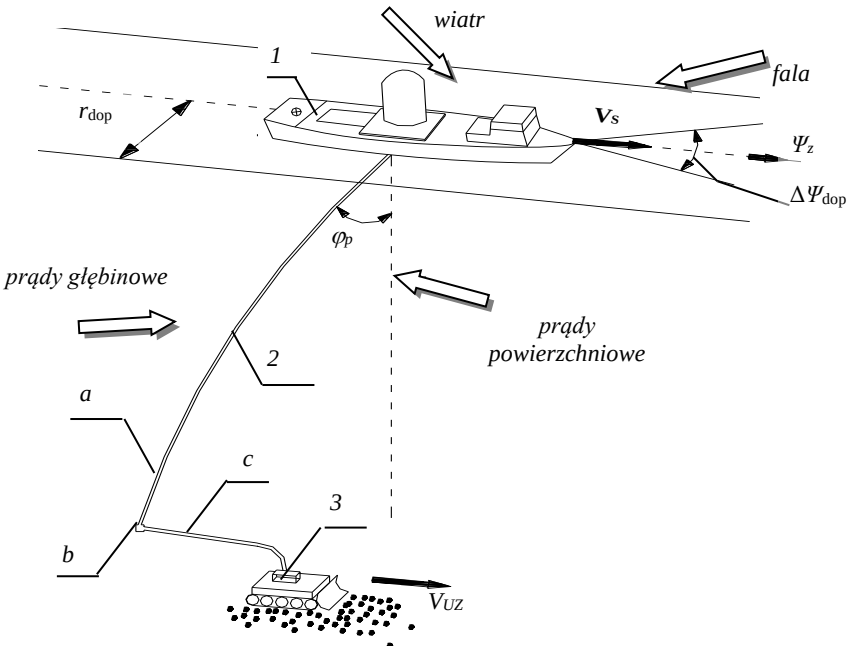
The Determination of Power Output of the Tracking Control System of a Mining Ship

Key words: mining ship, mining system, preliminary design, marine environment influence, power of tracking control system

In a mining ship, the tracking control system is one of its most significant systems. Its power output depends on weather parameters in the mining area and on dimensions of the ship. The tracking control system power is very high, thus the dimensions of the ship are considerably influenced by the weight and dimensions of the ship power plant. The article presents a spatial conception of a mining ship and the determined maximum power demand of the tracking control system. This article is a continuation of the problem described in [2].

Wprowadzenie

Spośród wielu systemów specjalnych na statku wydobywczym, jednym z najważniejszych i niezbędnych podczas prowadzenia prac eksploatacyjnych, umożliwiającym ciągłe i precyzyjne poruszanie się statkiem wydobywczym z regulowaną prędkością, po zadanym torze, jest **system sterowania ruchem (*SSR*).** System taki zapewnia utrzymywanie pozycji i prędkości względem pojazdu zbierającego konkrecje z dna morskiego z prędkością statku V_s, mimo działania na statek sił spychających pochodzących od środowiska morskiego (wiatr, falowanie, prądy morskie – powierzchniowe i głębinowe), rys. 1.



Rys. 1. Sterowanie statkiem wydobywczym w korytarzu po zadanej trajektorii: *1* – statek wydobywczy; *2* – rurowa instalacja wydobywcza: *a* – rura pionowa, *b* – bufor, *c* – poziomy rurociąg elastyczny o zerowej pływalności (służy do kompensacji zmian położenia bufora względem pojazdu zbierającego); *3* – denny pojazd zbierający; V_s – prędkość przesuwania się statku podczas prac eksploatacyjnych; r_{dop} – dopuszczalne przesunięcie statku od zadanej pozycji; Ψ_z – zadany kurs; $\Delta\Psi_{dop}$ – dopuszczalne odchylenie od zadanego kursu; φ_p – chwilowe, zmienne odchylenie instalacji wydobywczej od pionu względem pojazdu zbierającego; V_{UZ} – prędkość pojazdu zbierającego

Fig. 1. The outline of tracking control system for a given trajectory

Moc doprowadzona do pędników użytych w *SSR* powinna być taka, aby otrzymany wypadkowy napór równoważył w każdych warunkach pogodowych,

w których będzie pracował statek wydobywczy, wypadkową siłę od strony środowiska morskiego z uwzględnieniem oporów statku wydobywczego wraz z oporami wynikającymi z opuszczonej rurowej instalacji wydobywczej.

System sterowania ruchem (*SSR*) jest ważnym systemem na statku wydobywczym ze względu na zapotrzebowanie bardzo dużych mocy, których wartości mają decydujący wpływ na koszty eksploatacyjne i koszty budowy statku. Projektowanie tego typu statku wyposażonego m.in. w system sterowania jest zadaniem trudnym ponieważ:

- moc *SSR* będzie duża w stosunku do mocy całej siłowni, a stąd siłownia (elektrownia okrętowa) będzie zajmować dużą część objętości i wyporności statku wydobywczego;
- moc *SSR* zależy nie tylko od parametrów pogodowych, ale także od wymiarów statku, w tym od wymiarów siłowni (elektrowni okrętowej);
- brak jest zbudowanych statków do przemysłowego wydobywania konkrecji, co znacznie utrudnia ich projektowanie.

Wielkość zapotrzebowanej mocy dla systemu sterowania ruchem zależy bezpośrednio od:

- sił wymuszających od środowiska morskiego,
- powierzchni statku (nawodnej i podwodnej) i rury instalacji wydobywczej,
- założonych prędkości ruchu statku i dokładności utrzymywanej pozycji i kursu,
- parametrów hydrometeorologicznych w rejonie prac wydobywczych.

W celu określenia wielkości statku wydobywczego i jego powierzchni wykorzystano opracowane zależności funkcyjne głównych charakterystyk geometrycznych statku z parametrami projektowymi i parametrami pogodowymi na przykładzie statków wiertniczych (jako statków geometrycznie i funkcjonalnie podobnych). Takie zależności i analizy statystyczne zostały przedstawione w [2].

2. Opracowanie serii uproszczonych wariantów statków wydobywczych

Wykorzystując dane ze statków wiertniczych [2] oraz uwzględniając różnice między dwoma typami statków, dotyczące m.in.:

- głównych założeń projektowych,
- rozplanowania funkcjonalno-przestrzennego,
- zaprojektowania odpowiedniej przestrzeni ładunkowej do przechowywania konkrecji w ładowniach,

- zaprojektowania odpowiednio dużej elektrowni okrętowej,
- rodzaju zainstalowanych systemów specjalnych i urządzeń, niezbędnych w prowadzeniu prac wydobywczych oraz wyposażenia specjalistycznego itd.

opracowano koncepcję trzech wariantów statków wydobywczych.

Dla statku wydobywczego parametrami wejściowymi (założeniami projektowymi) będą: roczna wydajność urządzeń wydobywczych Q_s, prędkość przemieszczania się statku nad złożem V_s oraz okres przechowywania konkrecji w ładowniach T_{sk}, z którego wynika ładowność statku $P_Ł$.

Na podstawie przeprowadzonych analiz i informacji z opracowania [8] o rocznych wartościach wydobywania suchych konkrecji z dna oceanicznego, przyjęto przedział tych wartości, a mianowicie:

a) roczną wydajność wydobywanych konkrecji dla trzech wariantów statków:

wydajność suchych konkrecji Q_{SK} [t/rok]	1.000.000	1.250.000	1.500.000
wydajność mokrych konkrecji Q_{MK} [t/rok]	1.400.000	1.750.000	2.100.000

Okres efektywnej eksploatacji T_e = 292 [doby]. Według [8] 20% czasu w skali roku przeznaczono na czas przestojów z przyczyn technologicznych oraz z powodu złych warunków pogodowych.

b) okres przechowywania konkrecji w ładowniach statku $T_{sk,}$ z którego wynika ładowność statku; przyjęto, że konkrecje (przy ich średniej mokrej masie ρ_{mk} = 2 t/m^3), będą magazynowane w ładowniach statku przez 10 dób (przy założeniu 96% zapełnienia ładowni).

W celu wyznaczenia całkowitej nośności statku wydobywczego P_N określono dodatkowe zapasy jak: paliwo, woda, wyposażenie do prowadzenia procesu wydobywczego itp., wykorzystując dane ze statków wiertniczych wg [2].

Brak informacji o ilości, ciężarach i gabarytach specjalnego wyposażenia oraz danych o ciężarach poszczególnych klas konstrukcyjno-technologicznych, przyczyniły się do tego, że wielkość statku (szczególnie jego długość) została określona z uwagi na:

- zapotrzebowaną objętość ładowni do okresowego składowania konkrecji;
- wielkość przedziału siłowni okrętowej, która została określona na podstawie sporządzonej zależności $LB_{sił.} = f(\Delta)$ wg danych z [3];
- wielkość powierzchni nadbudówki, która została określona na podstawie sporządzonej zależności $LB_{nadb.} = f(n_z)$ i $L_{nad} = f(n_z)$ wg danych z [3];

- wymiary szybu wydobywczego (uzależnione od wymiarów pojazdu zbierającego);
- powierzchnię do składowania rur (uzależniona od głębokości wydobywania);
- objętość przedziału do wstępnego oczyszczania konkrecji (wynikająca z wydajności wydobywania urządzeń wydobywczych).

Na potrzeby przybliżonej weryfikacji określonych parametrów statku wydobywczego wykorzystano dane ze statków wydobywczych (przebudowanych) z lat siedemdziesiątych [1, 9], dotyczące przedziałów zmienności współczynników wykorzystania wyporności względem nośności η_N i ładowności η_L oraz współczynników modułów objętościowych *LBH*, *LBT*, powierzchni *LB* w zależności od wyporności Δ i nośności statku P_N.

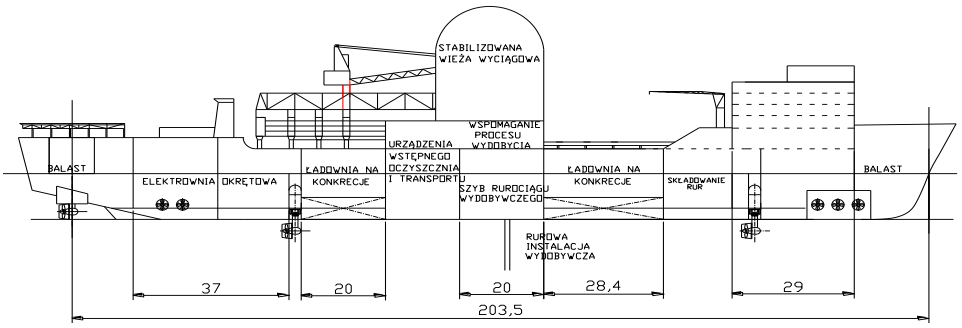
Ostateczne zestawienie głównych parametrów i wymiarów statków wydobywczych po naniesionej korekcie przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Zestawienie głównych parametrów statków wydobywczych (dla T_{sk} = 10 dób)
The main parameters of a mining ship (for T_{sk} = 10 days)

Wariant statku wydobywczego	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
Wydajność wydobywcza mokrych konkrecji Q_{MK} [t/rok]	1.400.000	1.750.000	2.100.000
Okres eksploatacyjny [doby/rok]	292	292	292
Średnia masa właściwa konkrecji [t/m^3]	2	2	2
Okres przechowywania konkrecji T_{sk} [doby]	10	10	10
Ładowność $P_Ł$ [t]	48904	61130	73356
Nośność P_N [t]	61130	75469	89458
Długość między pionami L_{pp} [m]	203,5	215,6	230,1
Szerokość *B* [m]	39,05	40,68	42,02
Wysokość boczna *H* [m]	18,9	19,37	19,74
Zanurzenie *T* [m]	12,23	12,83	13,36
Wyporność Δ [t]	83100	96250	110500
Boczna nawodna powierzchnia statku S_y [m^2]	3680	3850	4100
Boczna podwodna powierzchnia statku F_y [m^2]	2735	2980	3203
Czołowa podwodna powierzchnia statku F_x [m^2]	468	512	552
Liczba załogi n_z [osoby]	190	195	200
Zapasy wody i prowiantu M_{wp} [t]	2713	2790	2856
Masa zapasów paliwa M_{pal} [t]	9403	10439	12136
Zapasy różne M_{inne} [t] wg [9]	110	110	110

Plan rozplanowania przestrzennego statku wydobywczego sporządzono w oparciu o pracę badawczą [9]. Na rysunku 2 przedstawiono przykład jednego z trzech wariantów statków wydobywczych



Rys. 2. Koncepcja podziału przestrzennego statku wydobywczego
Fig. 2. Spatial conception of a mining ship

3. Obliczenie maksymalnych sił środowiskowych oddziałujących na statek wydobywczy

Główne siły środowiskowe działające na statek wydobywczy podczas prac eksploatacyjnych pochodzą od: sił naporu wiatru, sił od fali, prądów powierzchniowych, oporów wody i prądów głębinowych działających na podwieszoną rurę przewodu wydobywczego.

Do obliczenia sił od środowiska morskiego działających na statek wydobywczy wykorzystano wzory (2.1), (2.6) i (2.7) ÷ (2.14) – według [3] oraz przyjęto:

- maksymalne parametry pogodowe dla obszaru Clarion-Clipperton według [5, 6];
- kierunki działania wiatru, fali i prądu morskiego względem statku – według [3, rys. 13], tzn. $\beta_{Ay} = \beta_{Wy} = 90°$, $\beta c_x = 180°$;
- dokładnie określone powierzchnie statków S_y, F_y i F_x, odczytane z planów ogólnych statków wydobywczych;
- wartości współczynników $C_{yA} = 0{,}96$ i $C_{xC} = 0{,}85$ według [7].

Współczynniki falowej siły dryfu C_{yW} dla zamodelowanego kształtu podwodnej części statku zostały obliczone przy użyciu programu Wares. Do obliczenia falowej siły dryfu dla fali nieregularnej wykorzystano standardową funkcję widmową energii falowania $S_{\zeta\zeta}(\omega)$. Wyniki obliczeń sił zewnętrznych naporu wiatru R_{Ay}, fali R_{Wy} i prądu morskiego (powierzchniowego) R_{Cx}, działających na statek wydobywczy, przedstawiono w tabeli 2.

Obliczenie oporu wody i prądów głębinowych działających na rurę instalacji wydobywczej przeprowadzono dla następujących danych i założeń:

- średnica zewnętrzna rury: $Dr_{z1} = 0{,}5$ m – według [4];
- długości rurociągu wydobywczego: $l_r = h_w = 4600$ m;
- zakres prędkości przemieszczania się kompleksu wydobywczego: $V_1 = 0{,}257$, $V_2 = 0{,}514$, $V_3 = 0{,}771$, $V_4 = 1{,}028$, $V_5 = 1{,}285$ [m/s];
- współczynnik oporu $C_D = f(h_w)$ według [4], $C_D = 1{,}05$;
- prędkość prądu głębinowego $V_{Cg} = 0{,}475$ [m/s] – według [6]. Do obliczeń przyjęto: $\beta_{Cg} = 180°$ – kierunek przeciwny do ruchu statku i $\beta_{Cg} = 90°$.

Wyniki obliczeń oporu rury instalacji wydobywczej R_R w zależności od względnej prędkości statku, kierunków działania prądów głębinowych przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 2

Siły od środowiska morskiego: wiatr, fala i prąd morski, działające na statek wydobywczy
The forces of the the marine environment (wind, wave, current), acting on the mining ship

	Wariant 1			Wariant 2			Wariant 3		
Prędkość statku V_s [m/s]	R_{Ay} [kN]	R_{Wy} [kN]	R_{Cx} [kN]	R_{Ay} [kN]	R_{Wy} [kN]	R_{Cx} [kN]	R_{Ay} [kN]	R_{Wy} [kN]	R_{Cx} [kN]
0,257	902,1	812	186,7	943,8	856	204,3	1005,1	900	220,2
0,514	902,6	813	300,5	944,2	857	328,7	1005,6	901	354,4
0,771	903,3	815	441,1	945,0	859	482,6	1006,4	902	520,3
1,028	904,3	816	608,7	946,1	860	666,0	1007,5	903	718,0
1,283	905,7	817	803,3	947,5	861	878,8	1009,0	904	947,5

Tabela 3

Opór wody i prądów głębinowych na rurową instalację wydobywczą, obliczone wg wzorów (2.11), (2.14) – wg [3]
The resistance of water and deep ocean currents affecting the lifting pipe, calculated according to (2.11), (2.14) – [3]

Głębokość wody h_w [m]	Prędkość statku V_s [m/s]	Opór rury instalacj9 wydobywczej R_r [kN]	
		$\beta_{Cg} = 90°$	$\beta_{Cg} = 180°$
$h_w = 4600$	0,257	306,8	578,5
	0,514	553,2	1096,6
	0,771	963,9	1779,0
	1,028	1539	2626,0
	1,283	2278,3	3637,2

Na tym etapie przyjęto pomijalny wpływ układu statek wydobywczy – instalacja wydobywcza – pojazd zbierający, zgodnie z działaniem kompensacyjnym poziomego, elastycznego rurociągu między buforem a pojazdem zbierającym na rysunku 1.

4. Określenie mocy systemu sterowania ruchem statku wydobywczego z instalacją wydobywczą

Na całkowitą moc systemu sterowania ruchem statku wydobywczego składa się:

$$N_{SS} = N_B + N_R + N_S \tag{1}$$

$$N_B = \frac{1{,}05(R_{Ay} + R_{Wy} + R_{Cx})}{C_p} + \frac{R_r}{C_p} + \frac{R_T V_s}{\eta} \tag{2}$$

gdzie:

- N_B – moc potrzebna do wytworzenia naporu pędników w celu zrównoważenia sił od środowiska morskiego (do jej obliczenia wykorzystano wzory (2.15), (2.17) ÷ (2.19) według [3], przy zastosowaniu średniego współczynnika wykorzystania mocy na napór (C_p = 0,147 [kN/kW]);
- N_S – moc napędu (obliczona przy użyciu metody Holtropa i Mennena);
- N_R – moc holowania rurowej instalacji wydobywczej N_R (obliczona przy wykorzystaniu wzorów (2.11) i (2.14) według [3];
- R_T – całkowity opór kadłuba [kN];
- η – sprawność napędowa;
- 1,05 – dodatek mocy na zrównoważenie naporu pędników, chwilowych sił inercyjnych i sił tłumienia.

Wyniki obliczeń poszczególnych składowych mocy *SSR* statku wydobywczego z instalacją wydobywczą zamieszczono w tabeli 4.

Tabela 4

Wartości mocy systemu sterowania ruchem N_{ss} dla trzech wariantów statków
Values of the power output of the tracking control system for three variants of a mining ship

Wariant statku	Składowe mocy (*SSR*)	Prędkość statku V_s [m/s]				
		0,257	0,514	0,771	1,028	1,283
Wariant 1	N_B [kW]	13576	14389	15394	16592	17981
	N_R [kW]	3962	7511	12185	17985	24910
	N_s [kW]	4,0	24,0	72,0	168,0	320,0
	$\sum = N_{ss}$ [kW]	17542	21924	27651	34745	43211
Wariant 2	N_B [kW]	14341	15236	16343	17662	19192
	N_R [kW]	3962	7511	12185	17985	24910
	N_s [kW]	4,0	24,0	84,0	196,0	372,0
	$\sum = N_{ss}$ [kW]	18307	22771	28612	35843	44474
Wariant 3	N_B [kW]	15198	16163	17357	18778	20429
	N_R [kW]	3962	7511	12185	17985	24910
	N_s [kW]	4,0	28,0	92,0	212,0	408,0
	$\sum = N_{ss}$ [kW]	19164	23702	29634	36975	45747

Wnioski

Przy wykorzystaniu zależności funkcyjnych na podstawie statków wiertniczych (z I części artykułu [2]) oraz przyjęciu założeń projektowych, tj.: rocznej wydajności wydobywania Q_{MK}, czasu przechowywania konkrecji w ładowniach T_{sk}, ładowności statku, $P_Ł = f\,(Q_{MK,}T_{SK})$, głębokości wody h_w i prędkości statku V_s, opracowano wstępną koncepcję wymiarowo-przestrzenną statku wydobywczego. Dla wyznaczonych w ten sposób trzech wariantów statków przeprowadzono analizę niezbędnej, maksymalnej mocy dla systemu sterowania ruchem.

W wyniku obliczeń analitycznych wykazano, że największy udział w mocy *SSR* ma moc N_B (do zrównoważenia sił naporu wiatru i fali). Wzrost prądów powierzchniowych w zakresie badanych prędkości wyniósł 330%, natomiast wzrost oporów wody i prądów głębinowych dla β_{Cg} = 180° wyniósł ponad 500%. Niewielki udział ma natomiast moc napędowa statku, która osiągnęła wartość zaledwie 410 kW, czego powodem są bardzo małe prędkości przemieszczania się statku.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, iż udział mocy *SSR* w całym bilansie energetycznym będzie bardzo duży, a zapewnienie dużych mocy N_R będzie jednym z głównych problemów eksploatacyjnych.

Literatura

1. Bakurov G. I., *Suda dlja glubokovodnyh gornotechnologičeskih issledovannij*, Sudostroenie, № 3, 1988.
2. Bortnowska M., Szelangiewicz T., *Approximate method of determining power output of dynamic positionig system of drilling ships useful at preliminary design*, Polish Academy of Sciences, Marine Technology Transactions, Vol. 16, 2005.
3. Bortnowska M., *Metoda wyznaczenia mocy systemu sterowania ruchem jednostki pływającej podczas wydobywania konkrecji Fe-Mn przydatna w projektowaniu wstępnym*, Praca doktorska, Politechnika Szczecińska 2006.
4. Cheng B., Chung J. S., *Application of Thrusts to Elastic Joints on Long Vertical Pipe in 3-D Nonlinear Motions – Part II: Numerical Examples by MSE an FEM Results*, International Offshore and Polar Engineerin Conference Montreal, Canada, May 24 – 29, 1998.
5. Hagben N., Lumb F. E., *Ocean Wave Statistics*, National Physical Laboratory, London 1967.
6. *Inženernaja geologija rudnoj provincii Klarion-Klipperton v tihom okeane*, Trudy, Tom 197, Nauka, Sankt-Peterburg, 2004.
7. Manoeuvring Technical Manual, Prepared by a group of experts edited by Capt.
8. Sobota J., *Oszacowanie zapotrzebowania mocy energii dla systemów podnoszenia konkrecji z dna oceanu*, Wspólna Organizacja Interoceanmetal, Marzec, Szczecin 2003.
9. Szelangiewicz T., *Projekt koncepcyjny statku do wydobywania konkrecji żelazowo-manganowych*, Temat D5, Biuro Projektowo-Konstrukcyjne, Stocznia Szczecińska, Szczecin 1978.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2006 r.

Recenzent

prof. dr hab. inż. dr n. hum. Jan Gronowicz

Adres Autorki

mgr inż. Monika Bortnowska
Politechnika Szczecińska, Wydział Techniki Morskiej
71-065 Szczecin, Al. Piastów 41
tel. (091) 449 41 26
e-mail: mwojciechowska@ps.pl