

# Analiza obciążeń dynamicznych w cyklach roboczych dźwignic sterowanych numerycznie

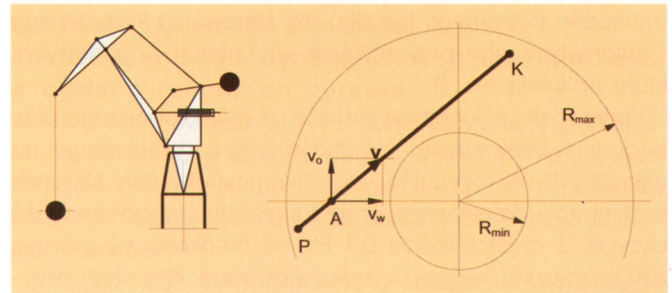
Jerzy Tomczyk, Sławomir Bednarski, Andrzej Kosucki

W artykule przedstawiono analizę obciążeń dynamicznych podstawowych układów napędowych i konstrukcyjnych dźwignic pracujących w zautomatyzowanych cyklach roboczych. Porównano obciążenia dynamiczne napędów mechanizmów obrotu i wypadu żurawia wypadowego, występujące przy sterowaniu klasycznym, opartym na stałych wartościach przyspieszeń, z układami sterowanymi numerycznie przy zastosowaniu automatycznego kojarzenia ruchów roboczych tych mechanizmów i opracowanej technologii transportu. Wprowadzenie automatycznego sterowania, a w szczególności układu kompensacji działania wiatru, pozwala na znaczne ograniczenie wahań ładunku transportowanego w różnych warunkach pogodowych oraz złagodzenie dynamiki przebiegów sił w mechanizmach. Układy automatycznego sterowania zmniejszają także nieznacznie wielkości maksymalnych obciążeń dynamicznych tych mechanizmów.

Zakład Maszyn Roboczych i Napędów Hydraulicznych Instytutu Konstrukcji Maszyn Politechniki Łódzkiej prowadzi prace badawcze w dziedzinie automatyzacji pracy dźwignic. W rezultacie tych prac opracowano technologię transportu wiotko podwieszonych ładunków dla dźwignic sterowanych numerycznie. Prace nad technologią pozwoliły na rozwiązanie zasadniczych problemów eksploatacyjnych dźwignic. Rozwiązano problemy automatycznego prowadzenia ładunku według zaplanowanej trasy, stabilizacji ruchu ładunku przez eliminację jego wahań po okresach rozruchu i hamowania z jednoczesnym jego pozycjonowaniem w przestrzeni transportowej oraz problem ograniczenia tarcia obrzeży kół jezdnych suwnic o dużych rozpiętościach mostów. Ostatnio prowadzone są prace nad systemem automatycznej kompensacji zakłóceń wywołanych działaniem wiatru dla maszyn dźwigowych, pracujących na wolnym powietrzu, w szczególności na nabrzeżach portów morskich. Wiatr jest bowiem istotnym problemem eksploatacyjnym maszyn dźwigowych obsługujących przede wszystkim transport kontenerowy.

Opracowane i zbudowane układy numerycznego sterowania i regulacji prędkości i położenia, zastosowane dla mechanizmów realizujących transport poziomy ładunków i mechanizmów podnoszenia, wyposażonych dodatkowo w regulację stałej mocy oraz odpowiedni sposób sterowania rozruchem i hamowaniem tych mechanizmów, nie powoduje zwiększenia obciążeń dynamicznych, występujących przy ruchach niustalonych maszyn dźwigowych.

Istotnym elementem wdrażania systemu jest możliwość porównania przeciążeń dynamicznych mechanizmów pracujących według proponowanej technologii transportu z przeciążeniami, które występowałyby przy sterowaniu klasycznym ze stałym przyspieszeniem w ruchach niustalonych.



Rys. 1 Transport poziomy ładunku wzdłuż linii prostej za pomocą skojarzonych ruchów obrotu i wypadu żurawia portowego

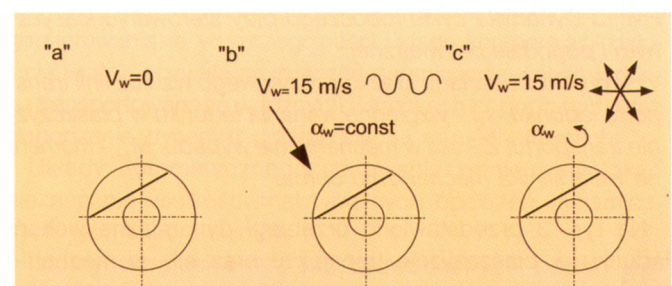
Jako przedmiot badań wybrano żuraw portowy, zbudowany przez firmę „Famak” i zainstalowany na nabrzeżu szwedzkim w porcie Gdynia. W żurawiu tym zainstalowane zostały napędy zasilane z przetwornic częstotliwości (falowników), umożliwiające płynne sterowanie prędkością mechanizmów obrotu i wypadu.

## Badania obciążeń dynamicznych żurawia

Modele dynamiczne żurawia i ich opis matematyczny wykorzystane w przeprowadzeniu analizy obciążeń dynamicznych zostały przedstawione w pracach [5], [7]. Układy automatycznego sterowania mechanizmami żurawia oraz system automatycznej kompensacji zakłóceń wywołanych działaniem wiatru opisane są we wcześniejszych publikacjach, [2], [3], [6]. Poniżej przedstawiono wyniki symulacyjnych badań dynamiki żurawia portowego o następujących parametrach: masa udźwigu  $Q=16$  t, maksymalny zasięg żurawia  $R_{max}=36$  m, minimalny zasięg żurawia  $R_{min}=11$  m.

Badane były cykle robocze umożliwiające poziomy transport ładunku wzdłuż linii prostej PK za pomocą skojarzonych ruchów mechanizmu obrotu i wypadu, jak pokazano to na rys.1.

Należy podkreślić, że dla badanego żurawia styczna do koła określonego minimalnym promieniem wypadu wynosi



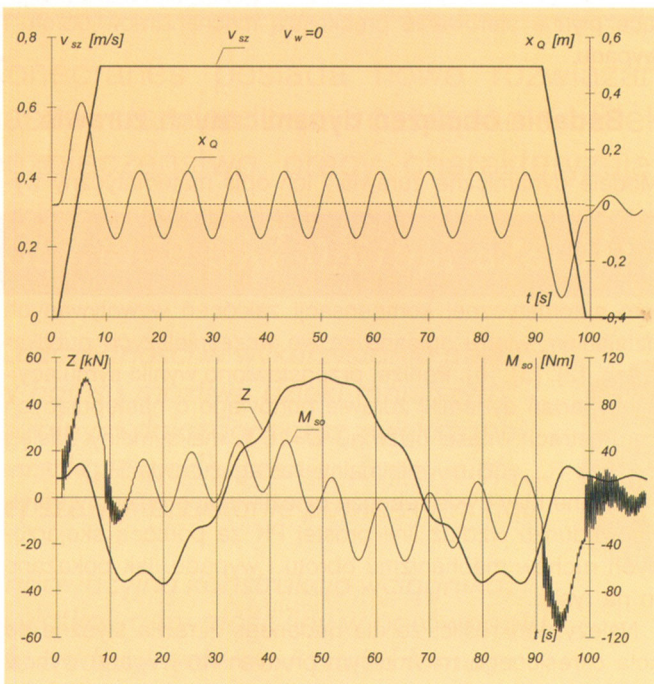
Rys. 2 Badane stany pracy cyklu roboczego żurawia dla transportu poziomego ładunku

95% średnicy koła maksymalnego zasięgu ( $L_{\max} = 0,95 D_{\max}$ ). Można przyjąć zatem, że w większości przypadków transportu ładunków żuraw może być tak ustawiony na torze, aby transport ładunków mógł być wykonany najkrótszą drogą po liniach prostych. Przyjęto również jako możliwe wykonanie transportu po dwóch liniach prostych w sporadycznych przypadkach szczególnych, w których zajdzie konieczność wykorzystania maksymalnego zasięgu żurawia.

Analiza obciążeń dynamicznych została przeprowadzona na podstawie badań symulacyjnych cyklu roboczego transportu poziomego ładunku dla sterowania klasycznego i automatycznego przy różnych warunkach pogodowych, które objaśnia rys. 2.

Przypadek „a” obejmował badania cyklu roboczego przy pogodzie bezwietrznej, prędkość wiatru działającego na układ  $v_w=0$ . W przypadku „b” wiatr posiada stały kierunek prostopadły do założonej drogi transportu, a jego prędkość oscyluje z częstotliwością 0.1 Hz od prędkości  $v_{w\min}=5$  m/s do prędkości  $v_{w\max}=15$  m/s. Zbadano również przypadek określony jako „c”, w którym wiatr o stałej prędkości  $v_w=15$  m/s zmienia swój kierunek z częstotliwością 0.1 Hz. Wyniki badań symulacyjnych dynamiki cykli roboczych żurawia

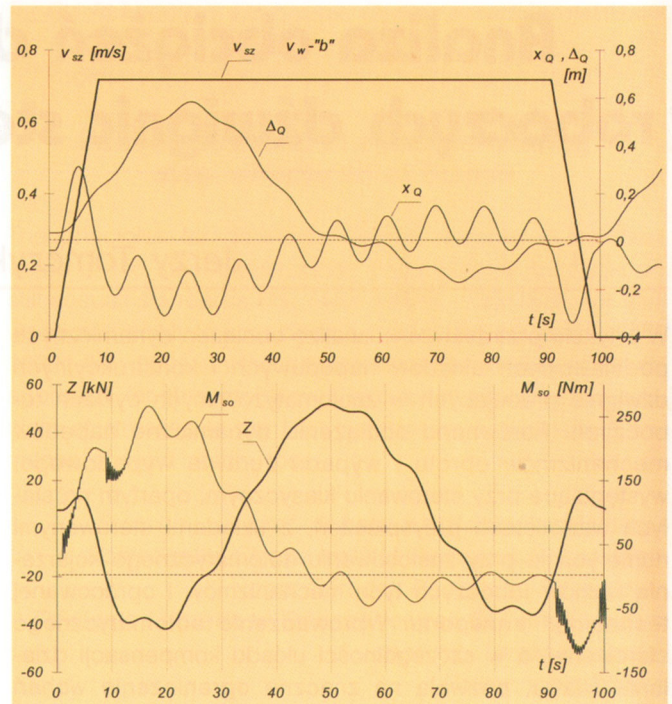
Na rysunkach 3–5 przedstawiono przykładowe wyniki badań symulacyjnych, przeprowadzonych dla analizy obciążeń dynamicznych.



Rys. 3 Dynamika cyklu roboczego przy sterowaniu klasycznym i pogodzie bezwietrznej:

$v_{sz}$  – prędkość zadana krążka szczytowego wzdłuż linii transportu ładunku,  $x_Q$  – względne wahanía ładunku w płaszczyźnie transportu,  $Z$  – siła w mechanizmie wypadu,  $M_{so}$  – moment na wale silnika mechanizmu obrotu

Na rys. 3 przedstawiono przebiegi dynamiczne wahań ładunku w płaszczyźnie transportu oraz siły w mechanizmach wypadu i obrotu w warunkach pogody bezwietrznej i przy klasycznym sterowaniu napędami ze stałym przyspieszeniem i opóźnieniem w fazach rozruchu i hamowania.

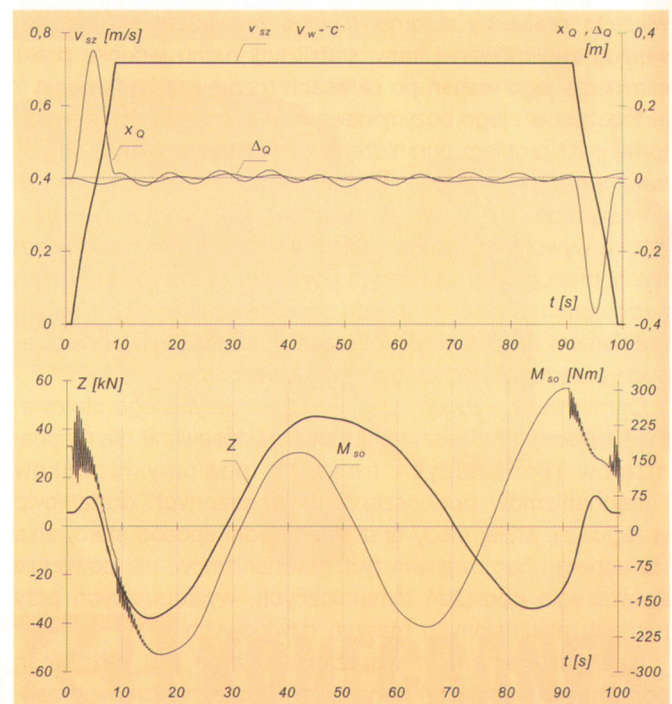


Rys. 4 Dynamika cyklu roboczego przy sterowaniu klasycznym i wietrze zmieniającym prędkość:

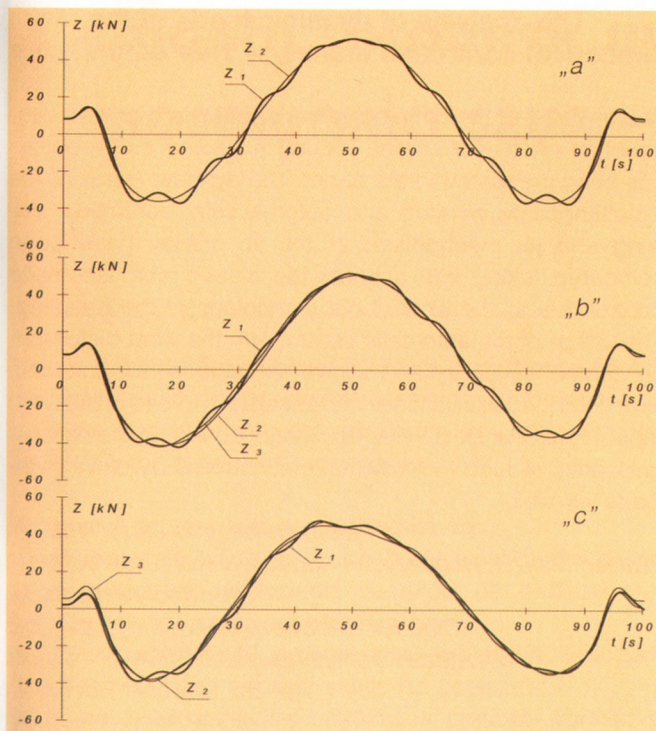
$\Delta_Q$  – odchylenie ładunku od prostej transportu w kierunku do niej prostopadłym.

Widoczne są duże wahanía ładunku, rzutujące na przebiegi sił w mechanizmach.

Rys. 4 obrazuje dynamikę układu sterowanego klasycznie, poddanego działaniu wiatru wiejącego ze stałego kierunku i zmieniającego oscylacyjnie swoją prędkość (przypadek „b” wg rys. 2). Widoczne są duże wahanía ładunku zarówno w płaszczyźnie transportu  $x_Q$ , jak i w płaszczyźnie



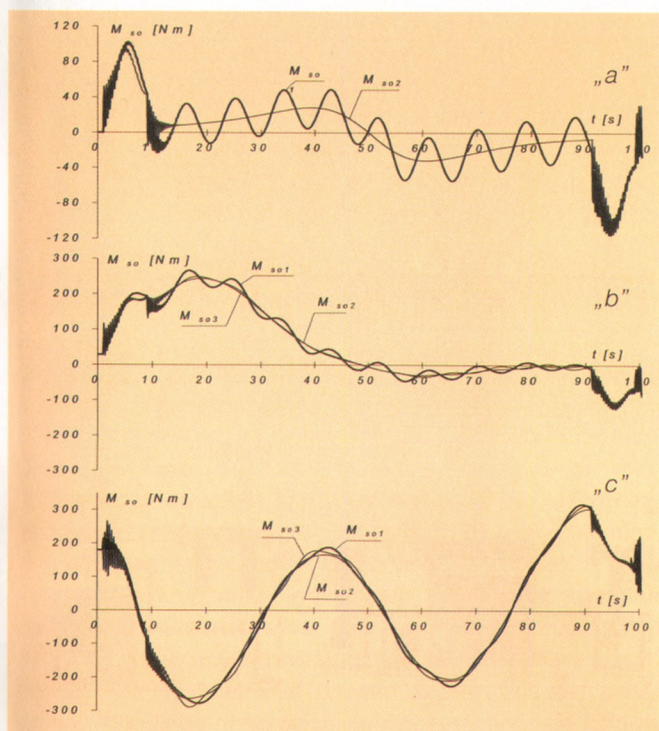
Rys. 5 Dynamika cyklu roboczego przy sterowaniu automatycznym z układem kompensacji działania wiatru wiejącego ze stałą prędkością i zmieniającego swój kierunek



Rys. 6 Porównanie sił dynamicznych w mechanizmie wypadu dla różnych sposobów sterowania i różnych warunków pogodowych („a”, „b”, „c”)

prostopadłej do tej drogi  $\Delta_Q$  i ich wpływ na przebiegi sił w mechanizmach.

Wprowadzenie automatycznego sterowania wraz z systemem kompensacji zakłóceń wywoływanych działaniem wiatru zmienia radykalnie dynamikę układu w zakresie prowadzenia ładunku, co widoczne jest na rys. 5. Wychylenia



Rys. 7 Porównanie momentów dynamicznych w mechanizmie obrotu dla różnych sposobów sterowania i różnych warunków pogodowych („a”, „b”, „c”)

ładunku w płaszczyźnie prostopadłej do drogi transportu są minimalne, a wychylenia ładunku w płaszczyźnie drogi transportu występują jedynie w okresach rozruchu i hamowania, co jest konieczne dla realizacji stanów nieustalonych dla ładunku podwieszono na linach. Obciążenia dynamiczne silnika mechanizmu obrotu, o dużej częstotliwości, widoczne na rys. 5 są wynikiem silnego sprzężenia zwrotnego, występującego w falowniku tego mechanizmu i wprowadzonego przez jego producenta. Eliminacja oscylacji tego momentu obrotowego wymaga badań samego falownika dla polepszenia jego układu regulacji.

### Analiza obciążeń dynamicznych mechanizmów w cyklach roboczych żurawia

Wyniki badań symulacyjnych, których przykłady przedstawiono powyżej, posłużyły do analizy sił dynamicznych obciążających mechanizmy wypadu i obrotu żurawia we wszystkich objętych programem badań (rys. 2) przypadkach pracy żurawia.

Na rysunkach 6 i 7 porównano obciążenia dynamiczne mechanizmów, występujące przy sterowaniu klasycznym (wielkości oznaczone indeksem 1), z obciążeniami występującymi przy sterowaniu automatycznym, ale nie wyposażonym w układ kompensacji działania wiatru (indeks 2), oraz z obciążeniami występującymi przy zastosowaniu układu automatycznego z systemem kompensacyjnym (indeks 3). Na rysunkach tych widoczne jest znaczne zmniejszenie oscylacji obciążeń, w szczególności dla przypadku widocznego na rys. 7 „a”, a także nieznaczne zmniejszenie wartości maksymalnych obciążeń.

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że wprowadzenie układu automatycznego sterowania dźwignic z automatycznym rozruchem i hamowaniem także cyklu roboczego oraz zastosowanie układu automatycznej kompensacji zakłóceń wywoływanych działaniem wiatru ma zasadniczy wpływ przede wszystkim na technologię prowadzenia prac przeładunkowych. Wprowadzone układy automatyki nie powodują istotnych zmian obciążeń dynamicznych mechanizmów w porównaniu do sterowania klasycznego, nieznacznie łagodząc dynamikę przebiegów tych obciążeń.

### Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzona analiza obciążeń dynamicznych mechanizmów obrotu i wypadu żurawia portowego umożliwiła ocenę porównawczą dynamiki pracy układów sterowanych klasycznie oraz automatycznie z wprowadzonym dodatkowo systemem automatycznej kompensacji zakłóceń wywoływanych działaniem wiatru.

Ogólnie można stwierdzić, że wprowadzenie automatycznego sterowania, a w szczególności układu kompensacji działania wiatru, pozwala na znaczne ograniczenie wahań ładunku transportowanego w różnych warunkach pogodowych oraz złagodzenie dynamiki przebiegów sił w mechanizmach.

Układy automatycznego sterowania zmniejszają także nieznacznie wielkości maksymalnych obciążeń dynamicznych tych mechanizmów.

Istotnym wnioskiem z przeprowadzonych badań jest konieczność przeprowadzenia badań układu regulacji falownika w celu poprawienia jego dynamiki do zastosowań przydatnych w napędach maszyn dźwigowych. ■

Literatura

- [1] Tomczyk J. i in: *Automatyzacja sterowania suwnicy do przeładunku kontenerów. Prace dla Komitetu Badań Naukowych. Bytom 1994.*
- [2] Bednarski S., Cink J., Tomczyk J.: *Pozycjonowanie ładunku w ruchu roboczym żurawia portowego. Materiały X Konferencji „Problemy rozwoju maszyn roboczych”. Zakopane 1997.*
- [3] Bednarski S., Cink J., Tomczyk J.: *Wpływ parcia wiatru na prowadzenie ładunku w ruchu roboczym żurawia portowego. Materiały III Konferencji „Okrętownictwo i oceanotechnika”. Międzyzdroje 1997.*
- [4] Tomczyk J., Cink J.: *Rozwiązanie podstawowych problemów transportu wiotko podwieszonych ładunków suwnicami sterowanymi numerycznie. Materiały II Konferencji „Napędy maszyn transportowych”. Ustroń 1998.*
- [5] Tomczyk J. i inni: *Eliminacja wahań ładunku i pozycjonowanie dźwignic o ruchach obrotowych i wypadowych sterowanych za pomocą mikroprocesorów. Praca nr 7 T07C 001 15 dla Komitetu Badań Naukowych. Łódź 1999.*
- [6] Cink J., Tomczyk J.: *Zakłócenia działaniem wiatru w automatycznym sterowaniu maszyn roboczych. Materiały XIII Konferencji „Problemy rozwoju maszyn roboczych”. Zakopane 2000.*
- [7] Cink J., Tomczyk J.: *Kompensacja zakłóceń działaniem wiatru w ruchu roboczym żurawia portowego. Materiały V Konferencji „Okrętownictwo i oceanotechnika”. Międzyzdroje 2000.*

**The analysis of dynamic loads of the Numerical controlled cranes in their duty cycles**

The analysis of the dynamic loads of basic drives and construction systems of cranes working in automatic duty cycles has been presented in the paper. The dynamic loads of the simultaneously working and automatically controlled slewing and jib mechanisms of the jib cranes have been compared taking into account the classic and automatic control due to the worked out technology of the handling. The usage of the automatic control with the wind disturbance compensation system allows for different air condition to limit the load oscillation and to absorb the forces of dynamic runs in mechanisms. The automatic control systems insignificantly reduce the maximal mechanisms dynamic overloads as well.

prof. dr hab. inż. Jerzy Tomczyk  
Zakład Maszyn Roboczych i Napędów Hydraulicznych IKM  
Politechnika Łódzka  
Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Dźwignic  
i Urządzeń Transportowych DETRANS – Bytom  
dr inż. Sławomir Bednarski  
dr inż. Andrzej Kosucki  
Zakład Maszyn Roboczych i Napędów Hydraulicznych IKM  
Politechnika Łódzka  
Recenzował  
prof. dr hab. inż. Jan Szlagowski  
Politechnika Warszawska

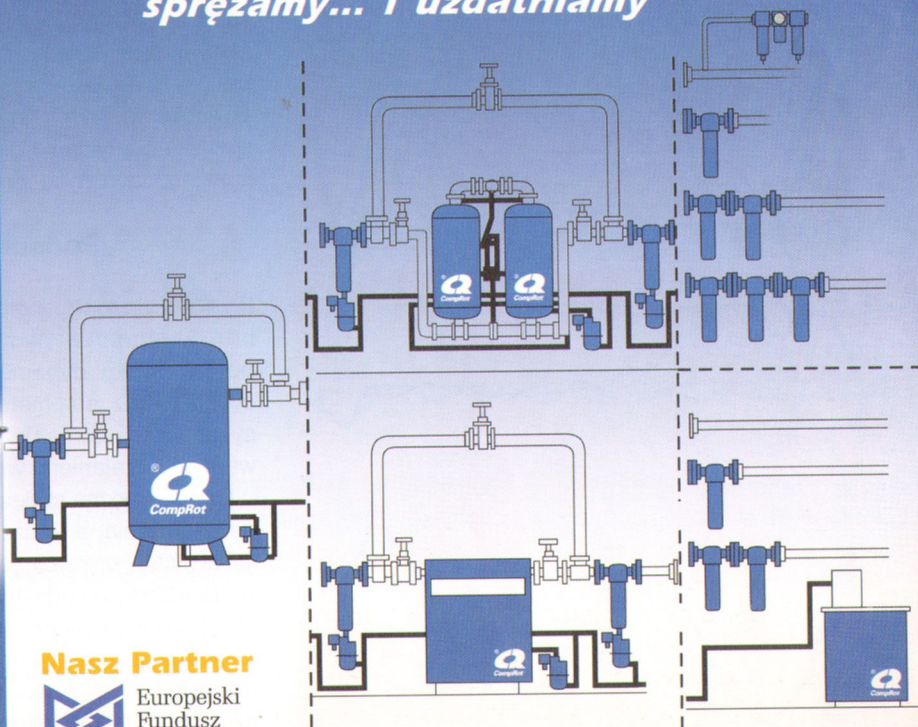


WILKERSON  
FLAIR  
YOKOTA



CompRot Sp. z o.o.  
53-608 Wrocław  
ul. Robotnicza 72  
tel./fax (071) 373 59 00  
e-mail: comprot@comprot.com.pl  
www.comprot.com.pl

**Jedyny polski producent  
sprężarek o mocy 4–400 kW  
sprężamy... i uzdatniamy**



Nasz Partner



**Oferujemy wieloletnie doświadczenie  
i wszystkie elementy do Twojej instalacji**