

Instrukcja ćwiczenia nr 16

Temat: Okrętowe regulatory prędkości obrotowej 'WOODWARD'

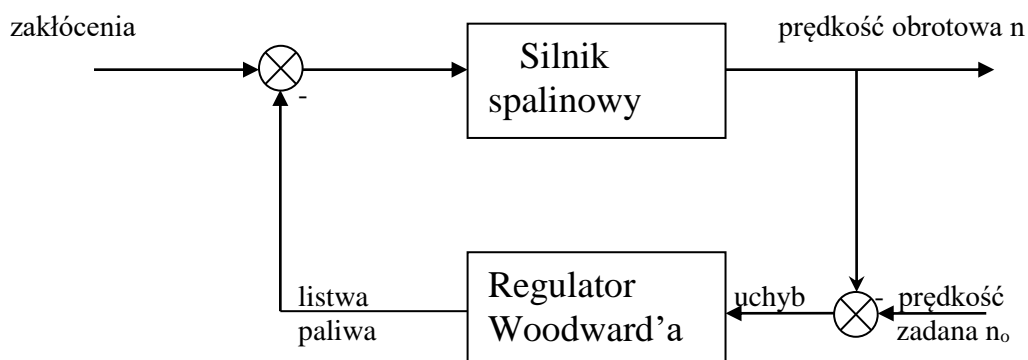
Budowa, działanie i charakterystyki.

1. Cel ćwiczenia:

Celem ćwiczenia jest poznanie budowy regulatorów prędkości obrotowej okrętowych silników spalinowych firmy 'Woodward', punktami regulacji tych regulatorów oraz poznanie charakterystyk regulatorowych okrętowych silników spalinowych.

2. Wprowadzenie:

Ogólny schemat układu regulacji przedstawia rys. 1.

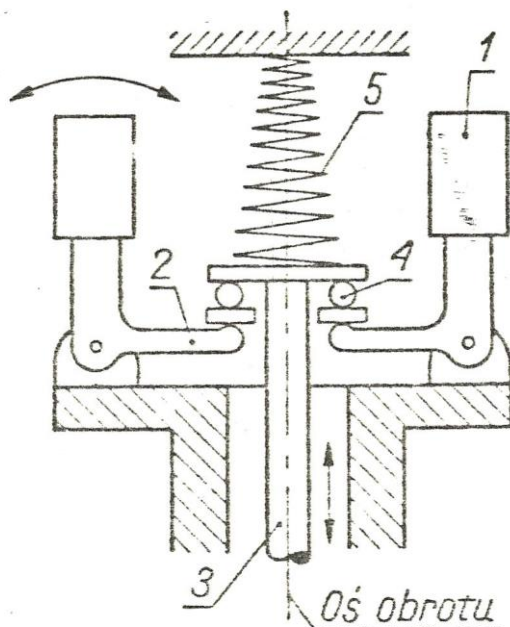


Rys. 1. Schemat układu regulacji prędkości obrotowej okrętowego silnika spalinowego.

Regulatory Woodward'a noszą nazwę od ich producenta i twórcy. Jest to charakterystyczny układ regulacji przystosowany do sterowania dużymi silnikami spalinowymi statków pełnomorskich. Podstawowy układ regulacji zawiera przetwornik sygnału, regulator i człon wykonawczy. Natomiast regulator Woodward'a zawiera wszystkie te człony w swojej konstrukcji i nie używa sygnału standardowego. Sygnałem wejściowym do regulatora jest prędkość obrotowa na wałku wyprowadzonym z przekładni silnika, a sygnałem wyjściowym jest położenie siłownika sprzęgniętego z listwą paliwową silnika spalinowego. Specjalizacja regulatora Woodward'a jest głębsza i zabezpiecza on pracę silnika spalinowego

w różnych sytuacjach eksploatacyjnych i awaryjnych. Firma Woodward ma specjalizację w budowie regulatorów mechaniczno-hydraulicznych prędkości obrotowej. Obecne układy regulacji prędkości obrotowej często buduje się w wersji elektronicznej różnych producentów. Zasady funkcjonowania tych układów nie zmieniają się, zmieniają się elementy konstrukcyjne.

Podstawowymi elementami tych regulatorów są: człon pomiaru prędkości obrotowej oraz urządzenie wykonawcze. Do pomiaru prędkości obrotowej stosowany jest mechaniczny bezwładnikowy czujnik prędkości obrotowej. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego takiego czujnika przedstawia rys. 2.



Rys.2 Konstrukcja czujnika prędkości obrotowej, 1 – bezwładniki, 2- promień bezwładników, 3 – trzpień suwaka sterującego, 4 – łożysko oporowe, 5 sprężyna nastawy obrotów.

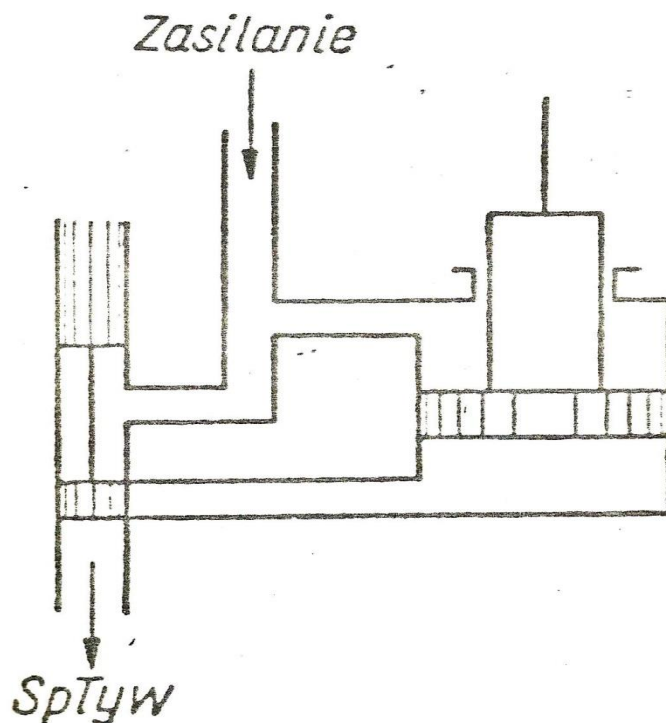
Siła bezwładności pochodząca od bezwładników zmienia się według równania:

$$F = mr\omega^2$$

gdzie: F – siła bezwładności,
 m – masa bezwładników,
 r – promień wirowania mas,
 ω – prędkość kątowna mas wirujących.

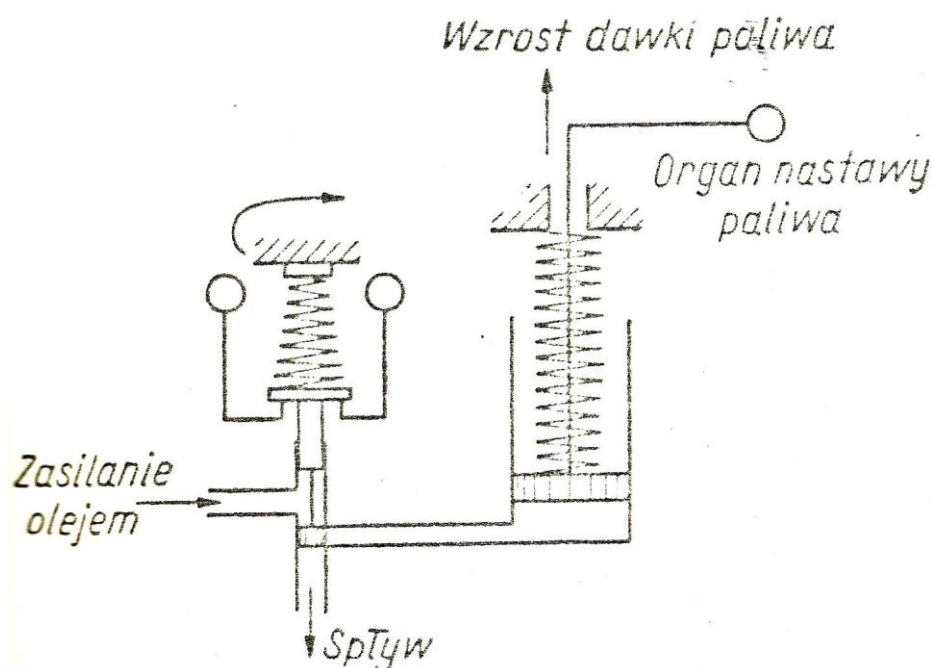
Dla uzyskania liniowej charakterystyki członu stosuje się sprężyny stożkowe o specjalnie dobranej charakterystyce nieliniowej. Charakterystyka wypadkowa takiego czujnika ostatecznie jest liniowa w całym zakresie zmian prędkości obrotowej

Okrętowe regulatory Woodward'a są to regulatory mechaniczno-hydrauliczne o działaniu pośrednim, który do sterowania wykorzystuje energię zewnętrzną. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem organu wykonawczego tego regulatora jest wzmacniacz hydrauliczny z siłownikiem. Układ hydrauliczny zasila pompa olejowa napędzana przez sam regulator. Specjalna konstrukcja bloku zasilającego uniezależnia proces zasilania od kierunku obrotów i wielkości prędkości obrotowej. Siłowniki hydrauliczne mogą być jednostronnego działania o ruchu powrotnym wymuszonym sprężyną lub siłowniki różnicowe, rys. 3.



Rys.3 Wzmacniacz hydrauliczny z siłownikiem różnicowym.

Prostą strukturę regulatora prędkości obrotowej złożonego z czujnika obrotów i siłownika przedstawia rys. 4.

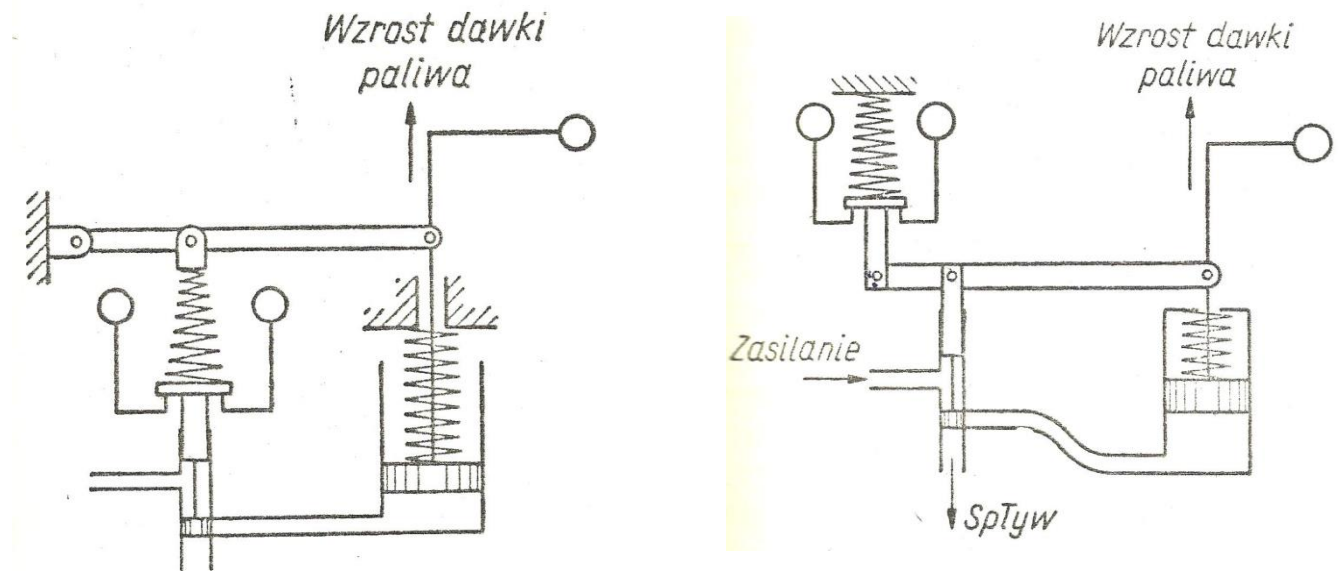


Rys. 4 Prosty układ regulatora mechaniczno – hydraulicznego prędkości obrotowej.

Taka konstrukcja regulatora zapewnia tylko jeden punkt równowagi, w którym suwak sterujący zasłania otwór w tulei i nie pozwala na dopływ ani odpływ oleju z siłownika. Dla określonego napięcia

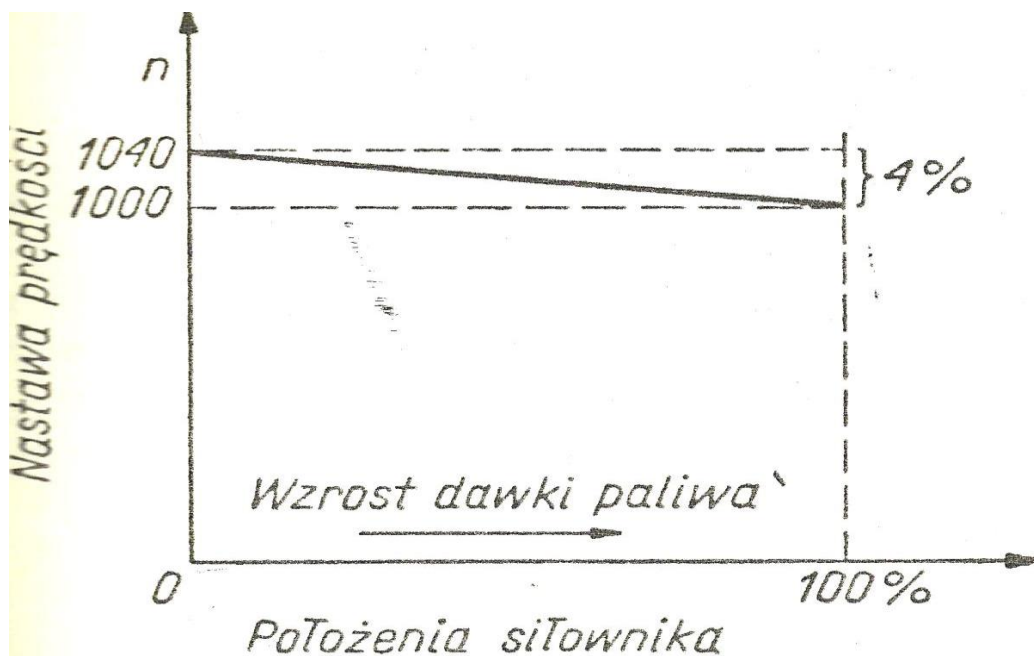
sprężyny suwak sterujący i związane z nim bezwładniki mogą zająć taką pozycję tylko dla jednej prędkości obrotowej. Układ taki ma własności astatyczne i jest niestabilny. Dla zapewnienia stabilności przedstawionego rozwiązania konieczne jest wprowadzenie sprzężenia zwrotnego.

Najprostszym rozwiązaniem sprzężenia zwrotnego jest tak zwane sztywne sprzężenie zwrotne realizowane przez wprowadzenie dźwigni mechanicznej sprzęgającej położenie elementu wykonawczego – siłownika z suwakiem sterującym lub ze sprężyną nastawy obrotów. Przykłady takich rozwiązań przedstawia rys. 5. Regulatory z tak realizowanym sprzężeniem zwrotnym mają własności dynamiczne regulatora proporcjonalnego P.



Rys. 5 Regulatory o działaniu proporcjonalnym P prędkości obrotowej.

Przedstawione regulatory prędkości obrotowej są stabilne i posiadają własność statyzmu – wraz ze wzrostem dawki paliwa spada liniowo prędkość obrotowa o określoną wielkość. Jego charakterystykę przedstawia rys. 6.



Rys. 6 Charakterystyka statyczna regulatora proporcjonalnego P prędkości obrotowej.

Zależność kolejnych stanów równowagi między nastawioną prędkością obrotową i położeniem siłownika przedstawia linia prosta opadająca w kierunku zwiększonej dawki paliwa. W przedstawionym przykładzie nachylenie charakterystyki dla nastawy prędkości obrotowej $n=1000\text{obr/min}$ wynosi 4%. Wielkość tą nazywamy trwałym statyzmem regulatora:

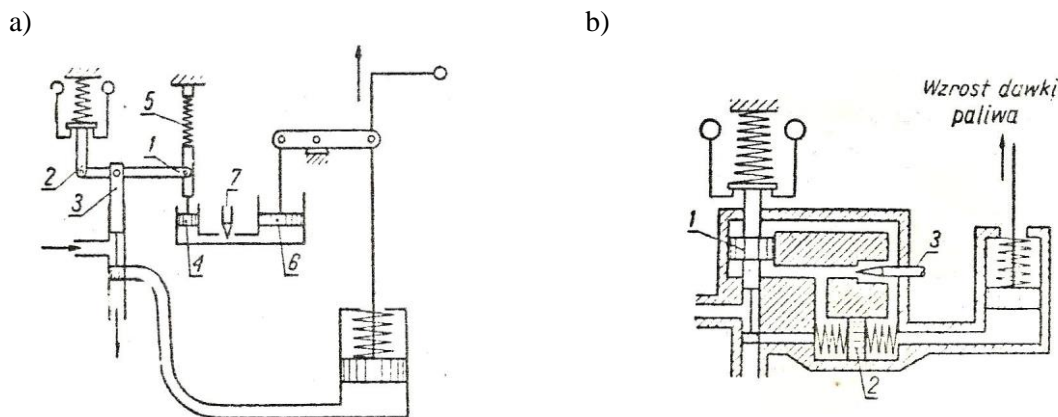
$$\sigma = \frac{n_0 - n_n}{n_n} \cdot 100\%$$

gdzie: σ – wartość statyzmu,

n_0 – prędkość obrotowa dla minimalnej dawki paliwa,

n_n – prędkość obrotowa dla maksymalnej dawki paliwa, nominalna.

Poprzez zastosowanie takiego sprzężenia zwrotnego uzyskujemy poprawę stabilności kosztem niewielkiego trwałego odchylenia prędkości obrotowej od wartości zadanej. Jeżeli w miejsce sztywnego sprzężenia zwrotnego wprowadzimy tak zwane podatne sprzężenie zwrotne uzyskamy regulator o działaniu całkującym I lub proporcjonalno-całkujący PI. Działanie całkujące tego typu regulatorów całkowicie likwiduje ich statyzm po czasie zależnym od stałej całkowania T_i i to niezależnie od stopnia wzmocnienia k_p . Charakterystyka statyczna tych regulatorów będzie równoległa do osi odciętych (obciążenia) dla całego zakresu obciążeń, tzw. charakterystyka astatyczna. W omawianym regulatorze podatne sprzężenie zwrotne realizuje się przez wprowadzenie w jego tor hydrauliczny element różniczkujący. Przykłady rozwiązań takich regulatorów przedstawia rys. 7.

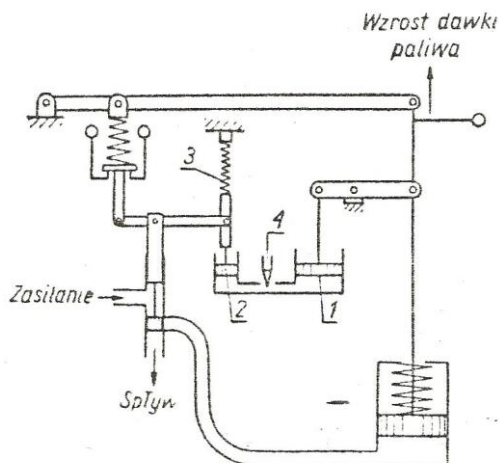


Rys. 7 Regulatory proporcjonalno-całkujące PI z podatnym sprzężeniem zwrotnym.

- realizacja podatnego sprzężenia zwrotnego poprzez element różniczkujący, 1-dźwignia pływająca, 2-trzpień bezładników, 3-suwak sterujący, 4-tłok bierny sprzężenia zwrotnego, 5-sprężyna środkująca tłoka biernego, 6-tłok czynny sprzężenia zwrotnego, 7-zawór iglicowy regulacyjny
- realizacja podatnego sprzężenia zwrotnego przy bezpośrednim działaniu na suwak sterujący, 1-tłok kompensacyjny suwaka sterującego, 2-tłok buforowy, 3-zawór iglicowy regulacyjny.

Stała czasowa członu całkującego nastawiana jest zaworem iglicowym. Całkowite zamknięcie zaworu iglicowego powoduje, że regulator staje się proporcjonalnym z trwałym statyzmem. Po zakończeniu procesu przejściowego uzyskujemy w tych regulatorach tę samą prędkość obrotową przy zmienionym położeniu siłownik, a zatem zmienionej nastawie dawki paliwa i mocy obiektu sterowanego.

Jeżeli w regulatorze zastosujemy sztywne i podane sprzężenie zwrotne (rys.8), w wyniku uzyskamy regulator proporcjonalno-całkujący PI o statyzmie trwałym zależnym od współczynnika wzmocnienia sztywnego toru sprzężenia zwrotnego. Rozwiązania takie są szczególnie przydatne w zastosowaniach z pracą równoległą silników, gdzie wymagany jest dokładny rozdział mocy czynnych. W tym przypadku statyzm jest celowo wprowadzany do regulatora, aby uzyskać chyb regulacji prędkości obrotowej, tzw. speed drop. Jest to parametr regulacyjny regulatora, konieczny do pracy napędu układów równoległych.



Rys. 8. Schemat regulatora z podatnym sprzężeniem zwrotnym i trwałym statyzmem: 1 - tłok czynny sprzężenia podatnego, 2 - tłok bierny sprzężenia podatnego, 3 - sprężyna tłoka biernego, 4 - iglicowy zawór regulacyjny

Ze względów praktycznych najczęściej w układach regulacji prędkości obrotowej silników spalinowych stosuje się regulatory P oraz PI o trwałym lub przejściowym statyzmie. Regulatory typu PID w zastosowaniu do silników spalinowych nie znalazły większego zastosowania ze względu na niewielką poprawę procesów przejściowych przy znacznej komplikacji konstrukcji regulatora.

Budowa i działanie wybranych regulatorów okrętowych firmy Woodward

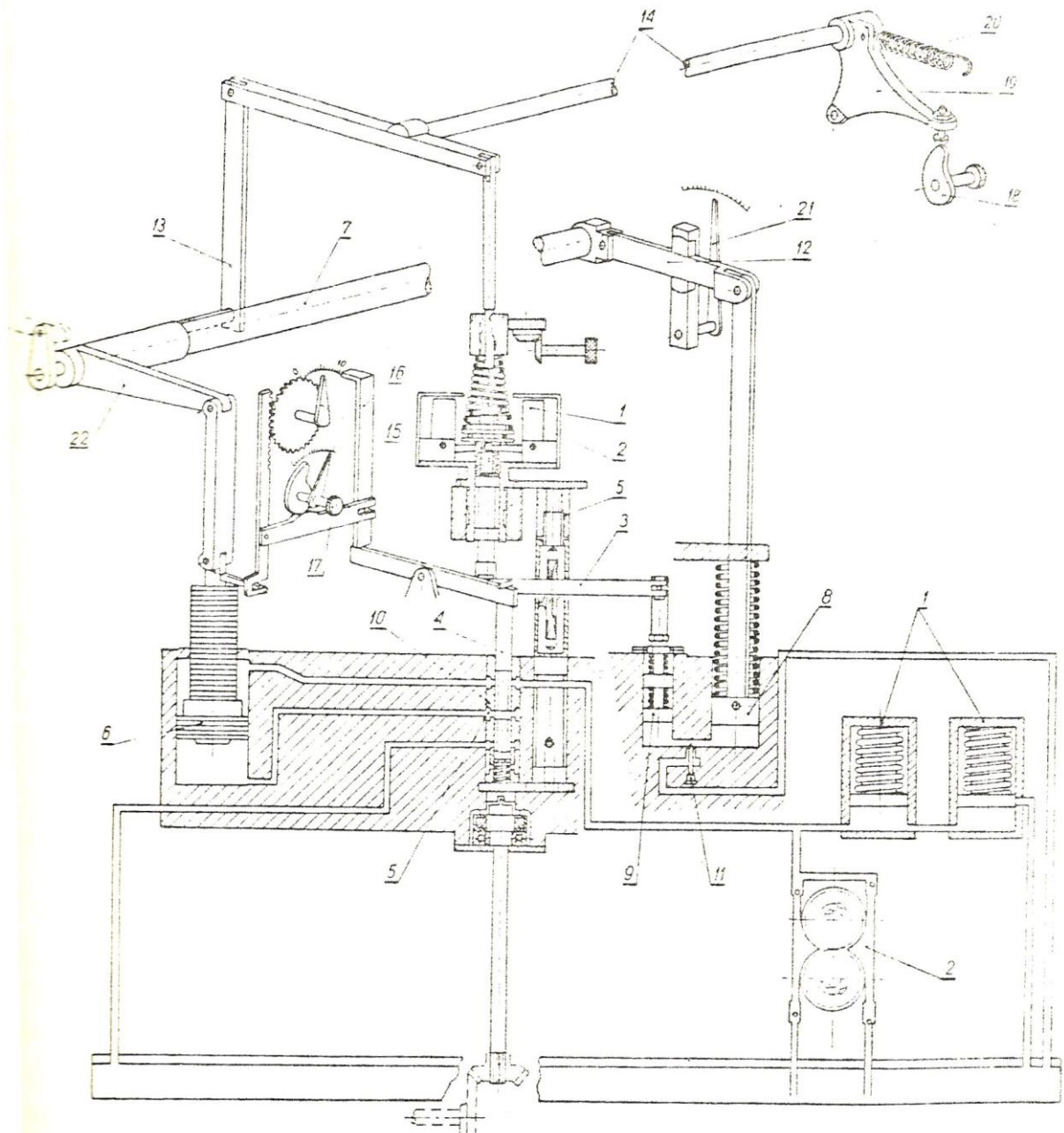
Na statkach dominują dwa typy regulatorów : UG – Universal governor i PG – pressure governor. W systemie oznakowania wielkości regulatorów firmy Woodward liczba w oznakowaniu UG8 i podobnie w oznaczeniach UG40, PGA22, PGA58, PGA78 jest zapasem energii w akumulatorach zainstalowanych w regulatorze, podany jako iloczyn siły w funtach i drogi w stopach.

Na przykład zapas energii w regulatorze UG8 wynosi:

$$E = 8 \cdot \text{funt} \cdot \text{stopa} = 8 \cdot 0,454 \cdot 0,305 = 1,11 \text{ kG} \cdot \text{m} = 11,3 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

Regulator UG40

Schemat regulatora UG 40 przedstawiono na rys.9. Struktura jego jest porównywalna z regulatorem na rys.8. Jest to zatem regulator proporcjonalno-całkujący z możliwością nastawy zakresu statyzmu trwałego oraz stałej całkowania T_i zwanej również czasem zdwojenia.



Rys.9 Regulator UG40; 1-bezwładniki, 2-sprężyna nastawy prędkości obrotowej, 3-dźwignia pływająca, 4-suwak zaworu sterującego, 5-przewód sterujący, 6-tłok siłownika, 7-wałek wyjściowy, 8-czynny tłok sprzężenia zwrotnego, 9-bierny tłok sprzężenia zwrotnego, 10-kołnierz suwaka sterującego, 11-iglicowy zawór regulacyjny, 12-ciężło regulacji sprzężenia zwrotnego, 13-ciężło statyzmu, 14-oś regulacji statyzmu, 15-wskaźnik obciążenia, 16-listwa wyłączająca, 17-pokrętło ogranicznika obciążenia, 18-krzywka nastawy statyzmu, 19-dźwignia nastawy statyzmu, 20-sprężyna, 21-wskaźnik sprzężenia zwrotnego, 22-dźwignia siłownika.

Rozwiązanie z rys.9 wyposażono dodatkowo w ogranicznik obciążenia. Regulator działa w następujący sposób: dwa akumulatory sprężynowe zabezpieczają dodatkową objętość oleju pod ciśnieniem, wspomagając w razie potrzeby wydatek własnej pompy olejowej. Wysokość ciśnienia narzucona jest usytuowaniem otworów przelewowych w akumulatorach. Układ zaworów kierunkowych pozwala na pracę pompy w obu kierunkach, co jest szczególnie istotne dla silników nawrotnych. Nad różnicowym tłokiem siłownika znajduje się przez cały czas pracy olej pod ciśnieniem akumulatorowym, bez względu na położenie zaworu sterującego. Olej ten powoduje ruch siłownika ku dołowi i obrót wałka wyjściowego

zmniejszającego dawkę paliwa - jeśli w dolnej komorze siłownika nie ma ciśnienia. Wychylenie suwaka sterującego ku dołowi, w stosunku do położenia środkowego, kieruje olej pod ciśnieniem do dolnej komory siłownika. Dzięki różnicy powierzchni obu stron tłoka, większa siła na dole spowoduje ruch tłoka ku górze i obrót wałka wyjściowego w kierunku zwiększenia dawki paliwa.

Gdy suwak sterujący jest podniesiony do góry w stosunku do położenia środkowego, dolna komora siłownika połączona jest z przelewem. W wyniku stałej siły, działającej na górną powierzchnię tłoka, będzie on przemieszczał się ku dołowi zmniejszając dawkę paliwa.

Wałek napędowy regulatora wiruje wspólnie z pompą zębatą, tuleją zaworu sterującego oraz z głowicą bezwładników. Sprzęgło podatne na drodze napędu bezwładników eliminuje drgania.

Sprężyna pod suwakiem zaworu sterującego równoważy ciężar suwaka i dźwigni pływającej, zaś sprężyna nad czynnym tłokiem podatnego sprzężenia zwrotnego kasuje jedynie luzy w układzie ciężkiej, nie biorąc udziału w normalnej pracy regulatora.

Załóżmy, że wzrosło obciążenie silnika, co w wyniku spowodowało spadek prędkości obrotowej. Bezwładniki 1 zbliżają się do osi obrotu pod wpływem siły sprężyny nastawy prędkości 2. Ku dołowi przesuwają się łącznik bezwładników i wewnętrzne ramię dźwigni pływającej 3, wychylając suwak zaworu sterującego 4 z położenia środkowego. Otwartym dzięki temu przewodem 5 olej pod ciśnieniem dostaje się do dolnej komory siłownika, powodując ruch jego tłoka 6 ku górze i przez to zwiększenie dawki paliwa.

Gdy tłok siłownika przesuwają się do góry obracając wałek wyjściowy 7, czynny tłok sprzężenia zwrotnego 8 porusza się ku dołowi, wywołując przesunięcie tłoka biernego 9 i podniesienie zewnętrznego ramienia dźwigni pływającej. Ten ruch dźwigni przesuwają ku górze suwak zaworu sterującego. Omówiony wzajemny ruch elementów regulatora trwa tak długo, dopóki kołnierz suwaka sterującego 10 nie zakryje otworu olejowego 5. Wówczas tłok siłownika i wałek wyjściowy zatrzymują się w położeniu odpowiadającym zwiększonej dawce paliwa, potrzebnej dla pracy silnika, przy poprzedniej prędkości obrotowej i nowej wartości obciążenia.

Gdy aktualna prędkość obrotowa wraca do wartości nastawionej bezwładniki i ich łącznik ustawiają się w pozycji środkowej. Bierny tłok sprzężenia zwrotnego przesuwany jest siłą własnej sprężyny do położenia równowagi z tą samą szybkością co bezwładniki, dzięki czemu suwak sterujący w dalszym ciągu zamyka drogę oleju, nie pozwalając na dalsze ruchy tłoka siłownika. Szybkość powrotnego przesunięcia tłoka biernego regulowana jest zaworem iglicowym 11.

Po zakończeniu cyklu regulacyjnego, bezwładniki, suwak zaworu sterującego oraz bierny tłok sprzężenia zwrotnego znajdują się w swoich środkowych położeniach; tłok siłownika oraz wałek wyjściowy regulatora zajmują nowe położenia, odpowiadające zwiększonemu obciążeniu.

Rozpatrzmy teraz zanik obciążenia, powodujący wzrost prędkości obrotowej silnika. Wzrastająca siła odśrodkowa rozchyła bezwładniki i unosi wewnętrzne ramię dźwigni pływającej. Uniesiony dzięki temu suwak zaworu sterującego odkrywa wylot oleju spod tłoka siłownika. Ruch tłoka ku dołowi, pod wpływem działającego po przeciwnej stronie ciśnienia, obraca wałek wyjściowy w kierunku zmniejszenia dawki paliwa. Obracający się wałek wyjściowy powoduje przesunięcie ku górze czynnego tłoka sprzężenia zwrotnego, co z kolei pociąga za sobą wychylenie z położenia równowagi tłoka biernego. Razem z nim obniża się zewnętrzne ramię dźwigni pływającej i połączony z dźwignią suwak sterujący. Wzajemny ruch elementów regulatora trwa do chwili, gdy suwak sterujący zamknie odpływ oleju spod tłoka siłownika. Tłok i wałek wyjściowy zatrzymuje się w nowym położeniu, odpowiadającym mniejszemu zapotrzebowaniu paliwa.

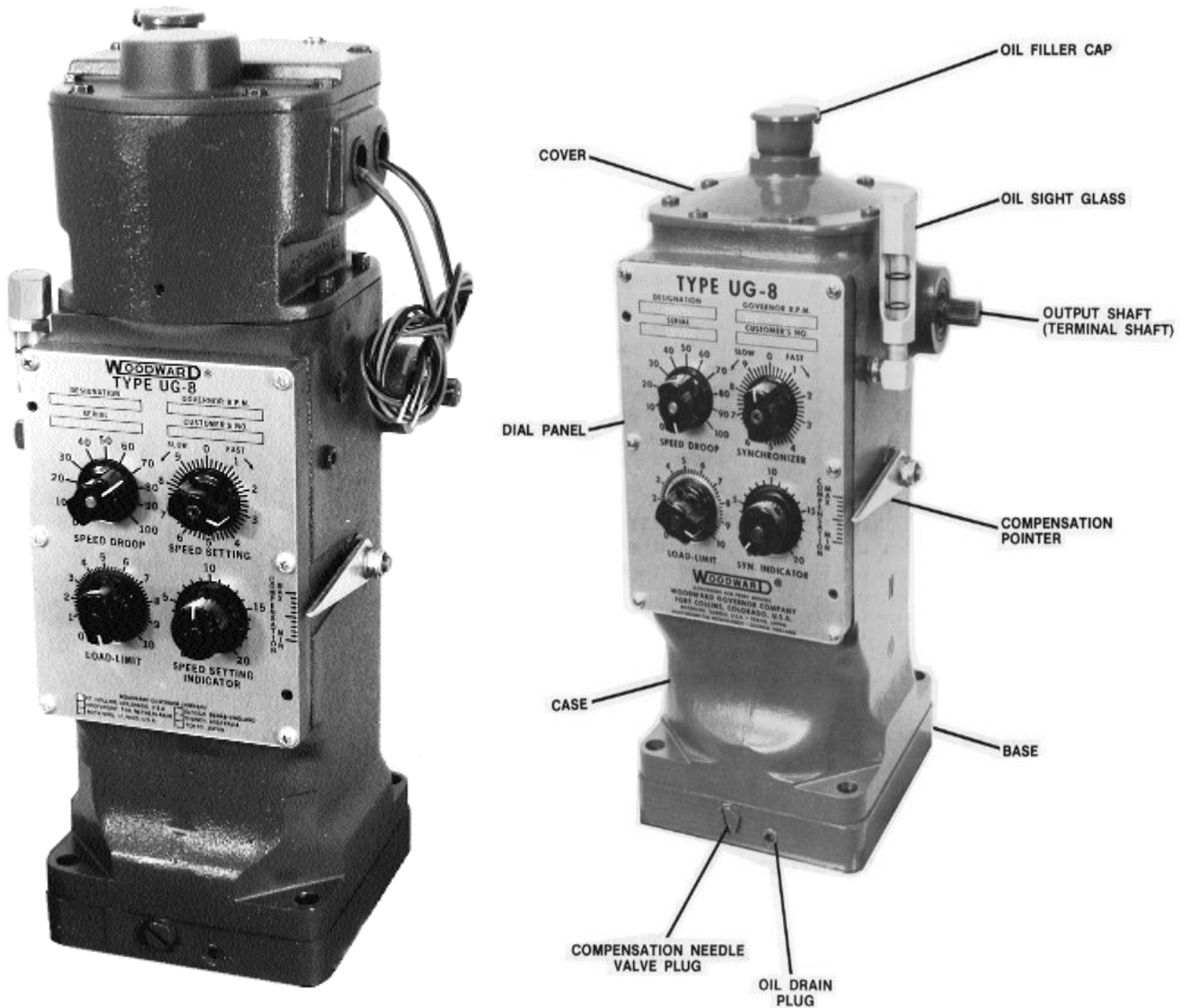
Tak jak poprzednio powrotny ruch biernego tłoka sprzężenia zwrotnego połączony z szybkością powrotu bezwładników do położenia równowagi, nie pozwala na dalsze wychylenia suwaka sterującego, a więc i oscylacje siłownika.

Po zakończeniu cyklu, bezwładniki, suwak sterujący oraz tłok sprzężenia zwrotnego znajdują się w swych środkowych położeniach; tłok siłownika oraz wałek wyjściowy zajmują nową pozycję związaną z mniejszym obciążeniem. Wszystkie wymieniane po kolei zjawiska w rzeczywistej pracy zachodzą prawie jednocześnie. Trudno jest również tak wyregulować zawór iglicowy, aby uzyskać aperiodyczny i jednocześnie szybki powrót prędkości do wartości ustalonej.

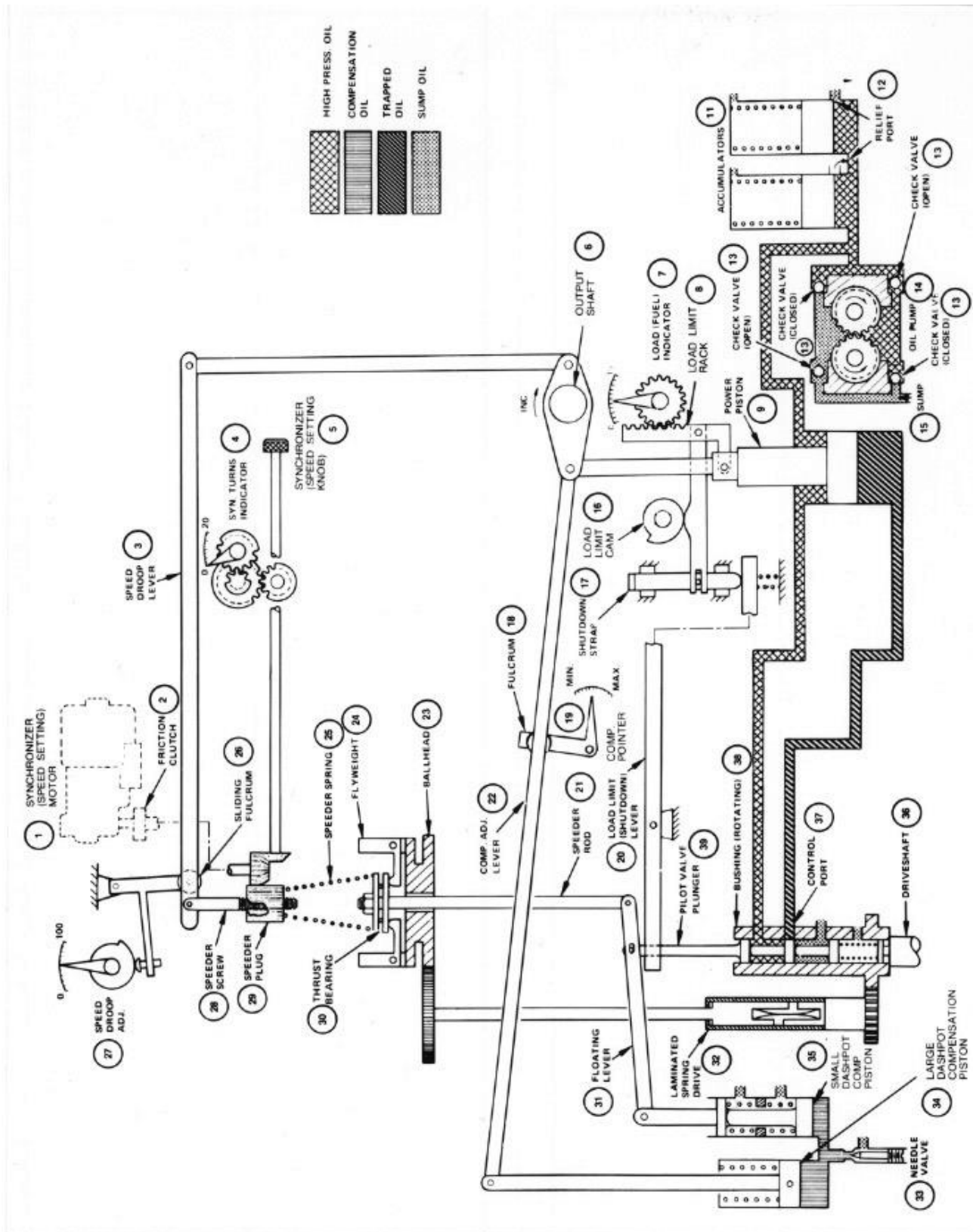
Opis działania regulatora bazowany był na zmianach obciążenia. Takie same zjawiska zachodzić będą w regulatorze, jeżeli różnica między nastawioną i rzeczywistą prędkością obrotową spowodowana zostanie zmianą nastawy prędkości. Nastawa prędkości obrotowej w odmianie morskiej regulatora UG40 odbywa się przez obrót wałka nastawczego, działającego bezpośrednio na napięcie sprężyny regulatora.

Regulator UG8

Wizualnie regulatory UG8 są pokazane na rys. 10. Schemat regulatora UG 8 przedstawia rys.11.



Rys. 10 Wygląd zewnętrzny regulatorów UG8.

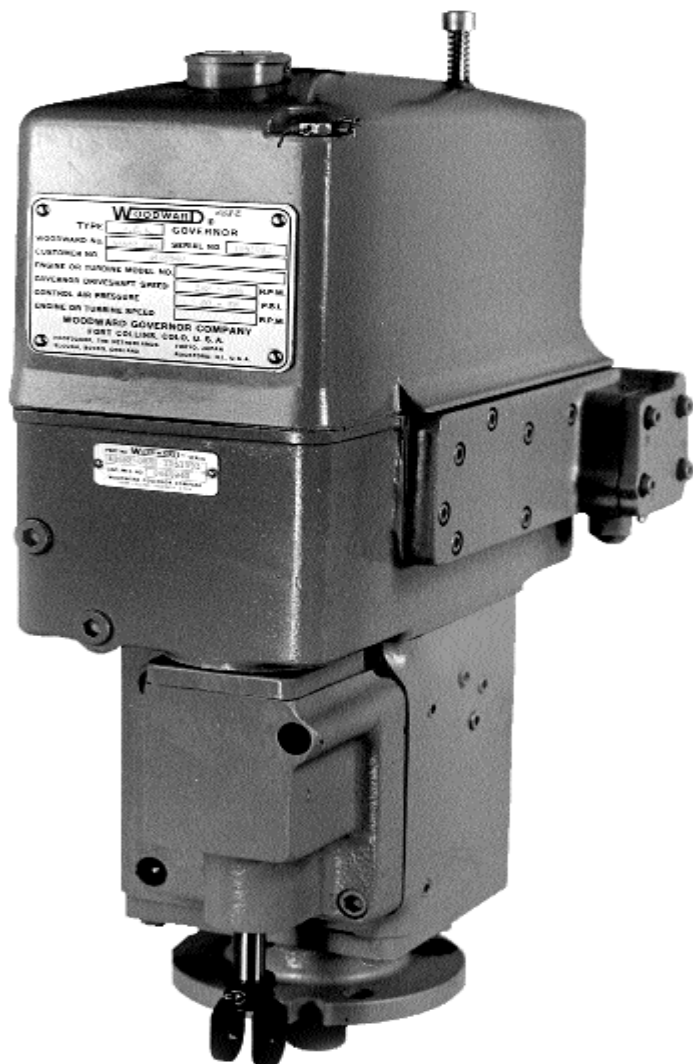


Rys.11 Schemat regulatora UG8

Jest to rodzina regulatorów UG i jego budowa i zasada działania odpowiada opisanemu regulatorowi UG40.

Regulator PGA

Wizualnie regulator PGA jest pokazany na rys. 12. Schemat regulatora PGA przedstawia rys.13

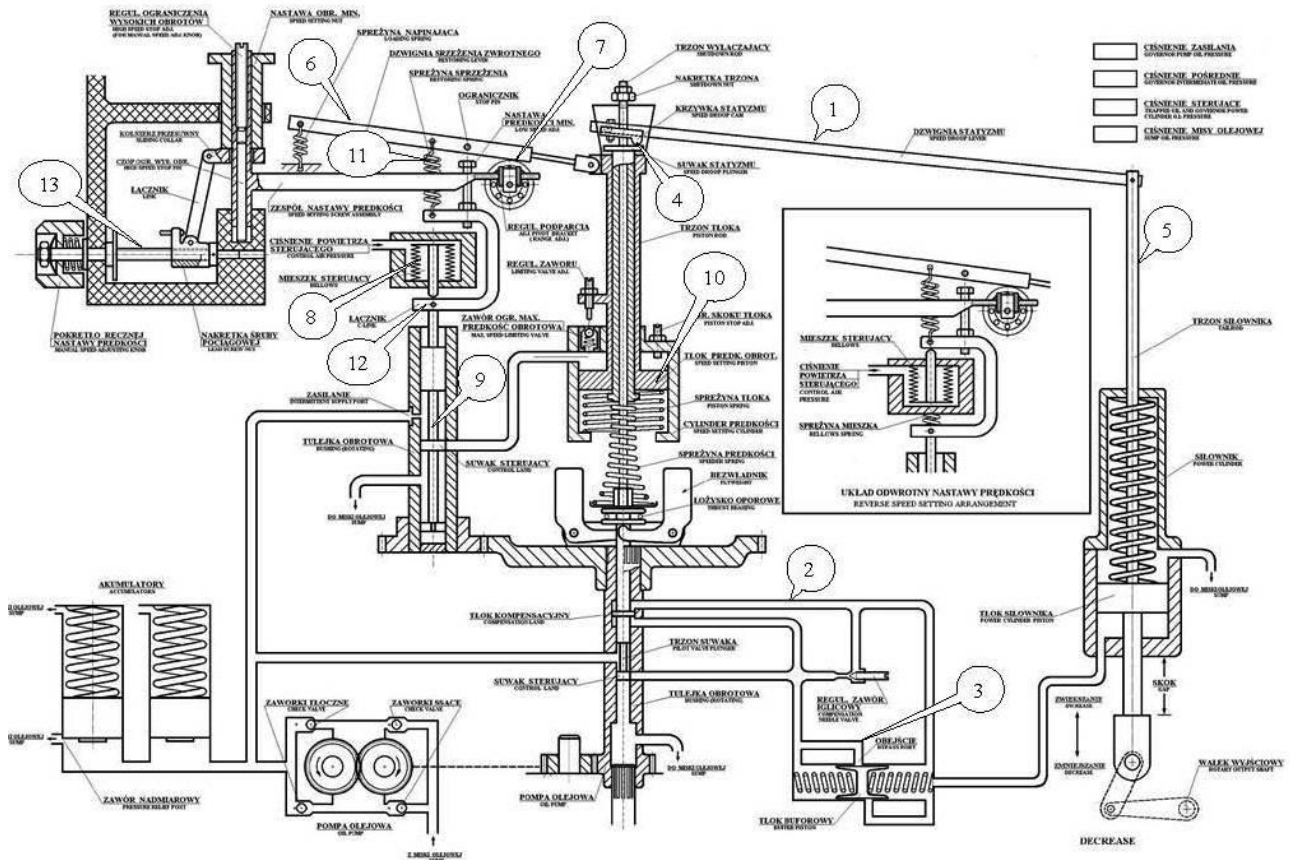


Rys. 12 Wygląd zewnętrzny regulatorów PGA.

Jest to regulator typu PI o trwałym, nastawialnym statyzmie o wartości regulowanej położeniem punktu podparcia 4 dźwigni sztywnego sprzężenia zwrotnego 1 wprowadzającego niewielkie zmiany nastawy prędkości obrotowej dla różnych nastaw paliwowych - położen trzonu siłownika wyjściowego 5. Podatne sprzężenie zwrotne 2 rozwiązane jest tu identycznie jak w regulatorze przedstawionym na rys. 7b. stosując dodatkowy, odsłaniany w końcowym położeniu tłoka kompensacyjnego, kanał 3 dla przyspieszenia reakcji siłownika przy dużych wartościach uchybu.

Regulator ten jest przystosowany do zdalnego, pneumatycznego sterowania nastawą prędkości obrotowej z możliwością dopasowania do różnych: zakresów pneumatycznych przez zmianę punktu podparcia 7 dźwigni pływającej 6. Nastawa realizowana jest przez nadążający za zmianami położen mieszek pneumatyczny 8 i serwomechanizm hydrauliczny, złożony z rozdzielacza 9 i siłownika 10 działającego na sprzężnię nastawy obrotów. Serwomechanizm posiada sprzężenie zwrotne zamknięte przez dźwignię 6 sprzężnię 11 i jarzmo 12. Urządzenie 13 pozwala na ręczną nastawę obrotów w przypadku zaniku ciśnienia powietrza sterującego.

SCHEMAT REGULATORA PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ SILNIKA SPALINOWEGO TYPU P G A F-MY WOODWARD



Rys.13 Schemat regulatora PGA.

3. Stanowisko ćwiczeniowe

Silnik spalinowy z napędem śruby nastawnej jako obiekt regulacji zbudowany jest jako symulacja w układzie elektrycznym. Do regulacji zastosowano rzeczywisty regulator firmy Woodward typu PGA, rys. 14. Regulator jest sprzęgnięty z silnikiem elektrycznym prądu stałego bocznikowy. Silnik taki ma płynną regulację obrotów za pomocą zmiany napięcia zasilania uzwojenia wzbudzenia. Umożliwia to proste sterowanie prędkością obrotową regulatora. Jednocześnie sam regulator zmienia sygnał dawki paliwa, która jest zamieniana potencjometrem na sygnał napięciowy i wchodzi do układu jako sygnał odpowiedzi. Jako sygnały wejściowe do symulatora części elektrycznej wykonuje się manetką nastawy śruby nastawnej oraz obciążeniem prądnicy wałowej. Układ pozwala na wykonanie charakterystyk regulacyjnych prędkości obrotowej oraz obciążenia przy różnych nastawach akcji całkowitej za pomocą zaworu iglicowego regulatora. W układzie rejestruje się dwa podstawowe sygnały: prędkości obrotowej zespołu i dawkę paliwa wskazaną przez regulator.



Rys. 14. Stanowisko laboratoryjne do symulacji układu regulacji prędkości obrotowej z regulatorem woodward'a PGA.

4. Przebieg ćwiczenia

Stanowisko laboratoryjne regulatora Woodward'a łączy prowadzący.

Według wskazówek prowadzącego należy zapoznać się z:

- punktami pomiarowymi układu regulacji,
- punktami nastawnymi regulatora.

Według wskazówek prowadzącego należy wykonać:

- załączenie symulatora,
- zdjęcie charakterystyki skokowej regulatora dla różnych nastaw zaworu iglicowego,
- odczyt stałej całkowania i wzmocnienia regulatora,
- zdjęcie charakterystyki regulacyjnej układu napędowego dla różnych nastaw zaworu iglicowego,
- ocenę jakości regulacji,
- próbę pracy przystawki przeciwdymieniowej oraz bezpiecznika przed brakiem smarowania silnika.

5. Sprawozdanie z ćwiczenia

W sprawozdaniu należy podać :

- opis ćwiczenia,
- schemat układu regulacji z oznaczeniem elementów i sygnałów używanych w ćwiczeniu,
- wyznaczenie nastaw regulatora i związek z pozycją zaworu iglicowego regulatora,
- wyznaczenie parametrów jakości regulacji i związek z pozycją zaworu iglicowego regulatora,
- wskazanie optymalnych nastaw regulatora w danym układzie regulacji.

6. Pytania kontrolne

Budowa podzespołów regulatora Woodward'a UG i PGA.

Wielkości nastawialne regulatora Woodward'a UG i PGA.

Przedstawić sygnały wejściowe dla regulatora w układzie regulacji.

Przedstawić sygnał wyjściowy dla regulatora w układzie regulacji.

Przedstawić sygnał zakłócenia dla regulatora w układzie regulacji.

Przedstawić pojęcie statyzmu (speed drop) regulatora prędkości obrotowej.

Literatura

1. Z. Kowalski, S. Tittenbrun: Regulacja prędkości obrotowej okrętowych silników spalinowych.
2. M. Żelazny: Podstawy Automatyki. WNT, Warszawa 1976.
3. Instrukcja regulatora UG WOODWARD.
4. Instrukcja regulatora PGA WOODWARD.
5. Materiały internetowe.