

STEROWANIE LINIOWE KOMUTATOROWYCH SILNIKÓW PRĄDU STAŁEGO (DC)

Sterowniki liniowe mocy do sterowania silników prądu stałego odpowiadają funkcjonalnie zastosowaniu zasilaczy regulowanych.

Spełniają wszystkie wymagania stawiane im w układach zarówno sterowania prędkością jak i serwomechanizmach. Zaletą jest precyzja sterowania, szybkość regulacji zaś wadą mała sprawność.

Pytanie: Jaka jest sprawność wzmacniaczy klasy A, B i AB. Jakie znasz inne klasy wzmacniaczy?

Ze względu na małą sprawność energetyczną znajdują zastosowanie do sterowania silników małej mocy.

W układach regulacji liniowej silników stosowane są rozwiązania:

- stabilizatory napięcia zasilania silnika,
- z zamkniętą pętlą sprzężenia prędkościowego (z sensorem prędkości),
- z zamkniętą pętlą sprzężenia pozycyjnego (serwomechanizmy położenia),
- stabilizatory momentu silnika (stabilizacja prądu),
- z otwartą pętlą regulacji i dodatnim sprzężeniem zwrotnym (np. stabilizatory obrotów),

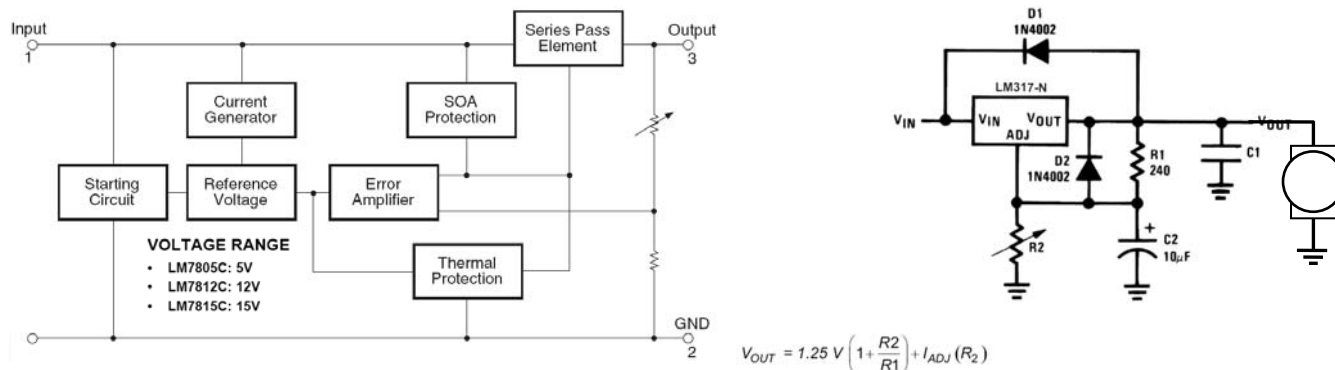
W sterowaniu liniowym używamy wzmacniaczy mocy. Produkuje się wiele typów wzmacniaczy monolitycznych do tego celu, zarówno uniwersalnych jak i specjalizowanych.

Od wzmacniaczy operacyjnych różnią się (oprócz mocy wyjściowej) posiadaniem wielu zabezpieczeń (prądowe, zwarciovowe, mocy i inne). Mniejszą rolę odgrywają w nich parametry precyzji wzmacniacza.

Różnią się zasadniczo od wzmacniaczy monolitycznych mocy tzw. głośnikowych. Sterowniki liniowe pracują ze stałą napięciem wyjściowego, gdy w wzmacniaczach głośnikowych stałą tłumią się z założenia.

Zasilanie stabilnym napięciem.

Najprostszą metodą stabilizacji obrotów silnika DC jest stabilne napięcie zasilające, jednak może mieć zastosowanie jedynie do pracy silnika ze stałym obciążeniem. Mogą tu znaleźć zastosowanie typowe rozwiązania monolitycznych stabilizatorów napięcia pokazane na rys.1.

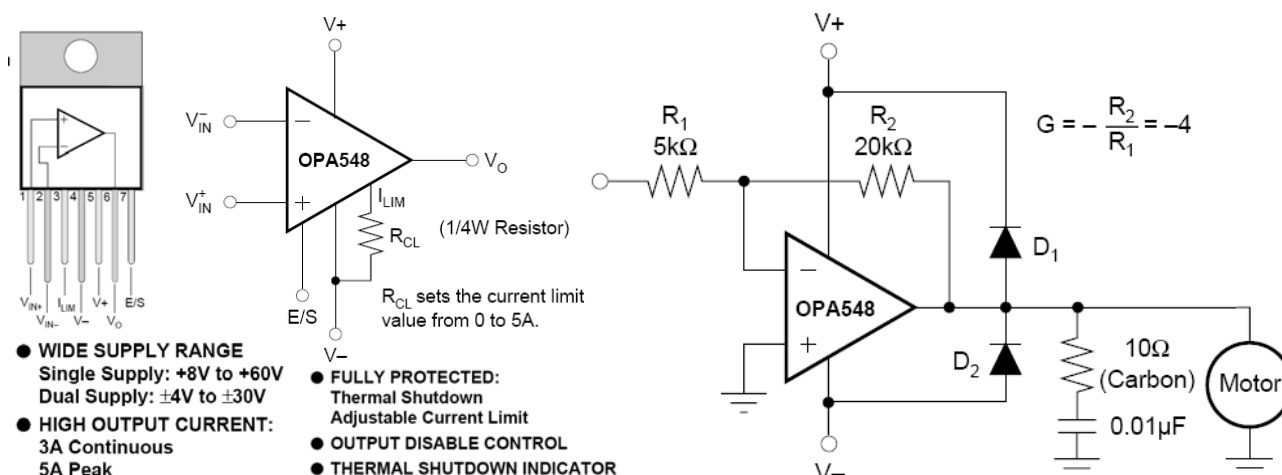


Rys.1. Monolityczne stabilizatory napięcia w zasilaniu silników DC.

Pytanie: Czym różni się silnik od typowego obciążenie i jakie to ma skutki?

Sterowanie przez zmianę napięcia zasilającego.

Zmianę obrotów silnika uzyskujemy przez zmianę zadanego napięcia stałego. Wykorzystywane w tym celu wzmacniacze (np. wzmacniacze operacyjne mocy) mają dodatkowo wbudowane zabezpieczenia nadprądowe i termiczne.



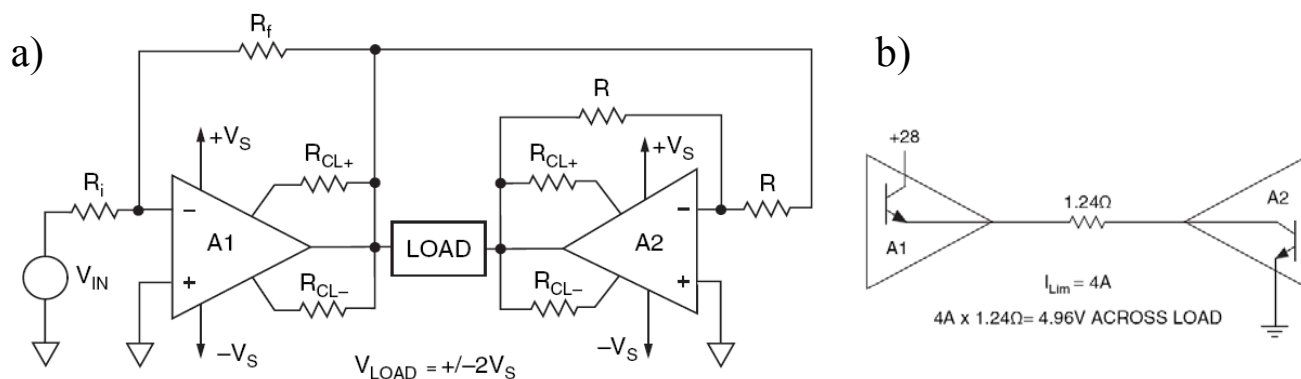
Rys.2. Zastosowanie wzmacniacza operacyjnego mocy do sterowania silnika.

Pytanie: Jaka jest rola diod D_1 i D_2 na schemacie z rys.2.

Sterowanie w układach liniowych mostkowych

Praca dwukierunkowa silnika w układach a pojedynczym wzmacniaczem operacyjnym wymaga podwójnego napięcia zasilania. Układ mostkowy dwóch wzmacniaczy pokazany na rys.3. pozwala na dwukierunkowe sterowanie silnika z pojedynczego napięcia zasilania. Zmiany napięcia na silniku są prawie dwukrotnością napięcia zasilania. Ta cecha jest cenna przy małych napięciach zasilania.

Schemat typowego połączenia mostkowego pokazano na rys 3. Wzmacniacz główny (A_1) wzmacnia sygnał wejściowy sterujący i zapewnia wzmocnienie właściwe do pełnegoysterowania obciążenia (wzmocnienie $K=A_1$). Zakres napięć na silniku to $\pm 2V_s$. Wzmacniacz podrzędny (A_2) o wzmocnieniu $A_2 = -1$ odwraca napięcie na drugim zacisku silnika. Całkowite wzmocnienie (wejście – zaciski silnika) jest dwa razy większe ($2K$). Zalety układu liniowego mostka wzmacniacza wykorzystywane są w konfiguracji odwracającej, wzmacniacza różnicowego, sterowane źródła prądowego (układ Howlanda).



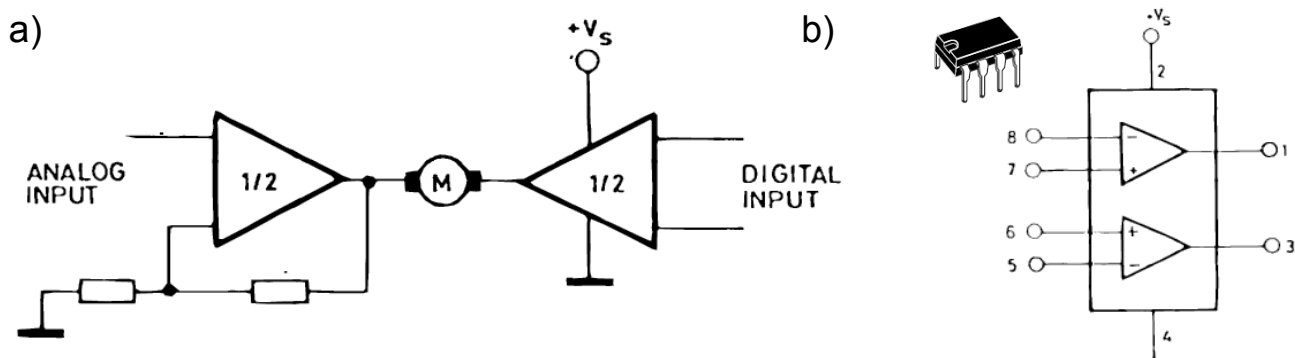
Rys.3. Układ liniowego wzmacniacza mostkowego.

Na rys.3 pokazano wzmacniacz z zewnętrznymi elementami ustawiającymi ograniczenie prądowe obu wzmacniaczy (R_{CL}). Dla poprawnej pracy układy zabezpieczeń prądowych poziom

zabezpieczenia pradowego wzmacniacza A1 musi być niższe niż A2.

Pytanie: Wyjaśnij powody powyższego warunku wychodząc z sytuacji przeciążenia (np. zwarcia, zablokowany silnik) obciążenia.

Uproszczoną wersję układu mostkowego pokazano na rys.4.. Jeden wzmacniacz pracuje jako wzmacniacz liniowy. Drugi jako przełącznik napięcia zasilania końcówki silnika.



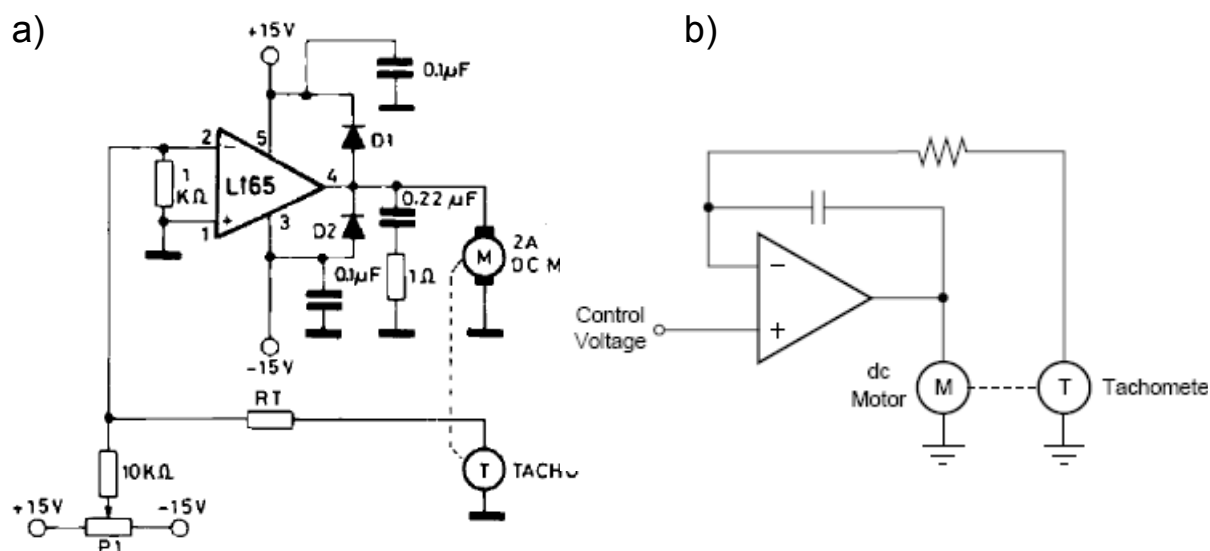
Rys.4. Sterowanie liniowe przez zmianę napięcia zasilania przez wzmacniacz mocy i przełącznik drugiego końca obciążenia.

Pytanie: Narysuj charakterystykę (napięcie wejściowe – napięcie na silniku) dla obu stanów wyjścia wzmacniacza A2

Sterowanie z prędkościowym sprzężeniem zwrotnym.

Uzyskanie stabilizacji obrotów silnika niezależnie od obciążenia mechanicznego wymaga pomiaru obrotów. Porównania z wartością zadaną, wzmocnienia sygnału błędu i odpowiedniegoysterowania wzmacniacza mocy.

Jako sensor obrotów możemy wykorzystać prądnice tachometryczną dającą napięcie proporcjonalne od obrotów. Taki układ pokazano na rys. 5.



Rys.5. Regulacja obrotów z wykorzystaniem prądnic tachometrycznej.

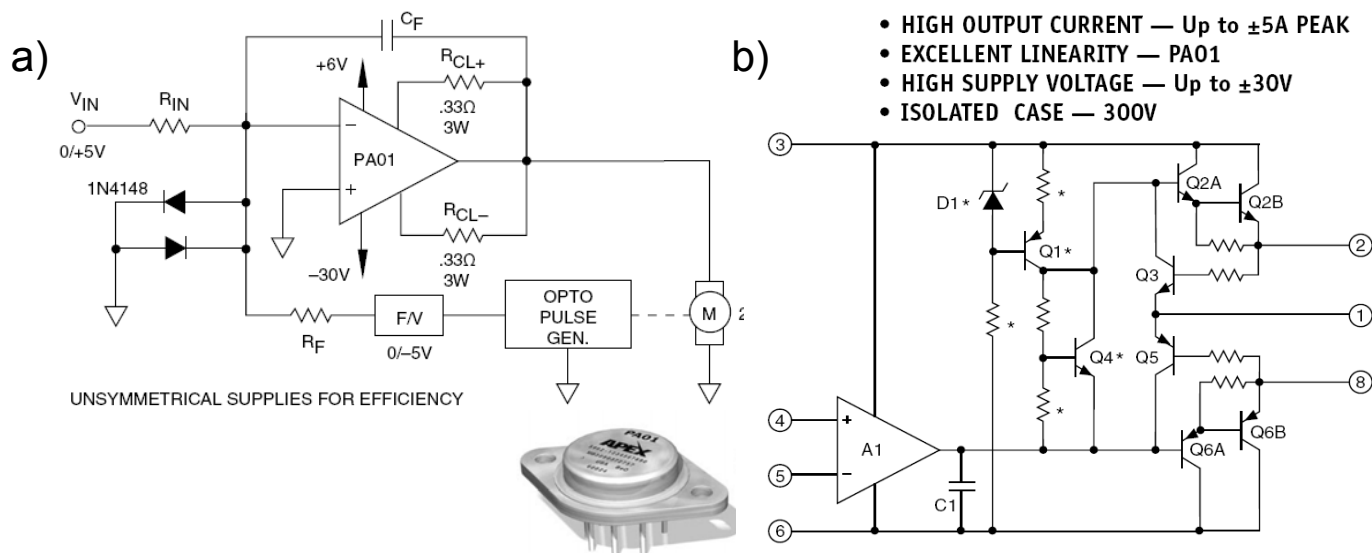
Pytanie: Jaki typ regulatora zastosowano na rys.5.b.

Pytanie: Rola elementów zabezpieczających (dwójnik RC, kondensatory blokujące, diody

wyjściowe).

Częstym sensorem prędkości obrotowej jest przetwornik obrotowo impulsowy. Uzyskany sygnał częstotliwościowy proporcjonalny do obrotów należy zamienić na sygnał napięciowy w przetworniku częstotliwość- napięcie [f/U], by użyć go do regulacji.

Układ taki pokazano na rys.6.a. Na rys.6.b pokazano schemat budowy układu scalonego PA01 ze szczególnym uwzględnieniem podukładu zabezpieczenia prądowego.



Rys.6.a) Pętla sprzężenia zwrotnego regulacji obrotów silnika z wykorzystaniem optycznego przetwornika obrotowo impulsowego, b) schemat budowy układu scalonego PA01 ze szczególnym uwzględnieniem podukładu zabezpieczenia prądowego.

Pytanie: Jaka jest rola diod w schemacie z rys. 6.a.?

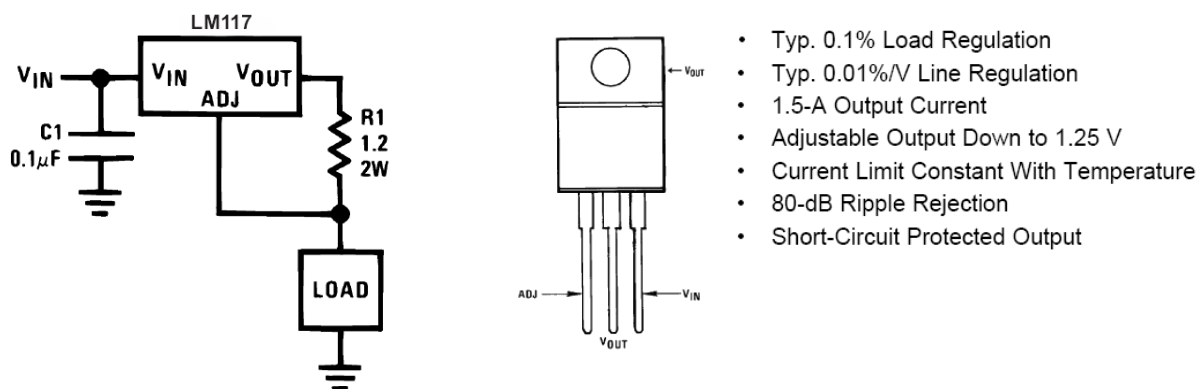
Silnik jako prądnicza tachometryczna.

Spotyka się rozwiązania wykorzystujące silnik jako prądnicę tachometryczną. Mierzac napięcie na zaciskach silnika po odłączeniu zasilania uzyskujemy napięcie proporcjonalne do obrotów. Wymaga to jednak rozwiązań układowych z podziałem czasu. Przez ułamek okresu powtarzania od silnika odłączane jest zasilanie i wówczas dokonujemy pomiaru obrotów. Wynik ten pamiętany przez resztę okresu służy dla regulatora obrotów.

Sterowanie ze stałym prądem – układy stałego momentu.

Moment silnika jest proporcjonalny do prądu przez niego płynącego. Pozwala to na uproszczoną regulację momentu prze regulację prądu silnika. Jeśli wymagany jest napęd o momencie niezależnym od obrotów to można użyć układów mających właściwości źródeł prądowych.

Przy wymaganiu stałego prądu można wykorzystać typowe układy źródeł prądowych. Może być wykorzystany popularny układ LM317 (wytwarzany przez wielu producentów) w konfiguracji źródła prądowego (rys.7.).



Rys. 7. Źródło stałego prądu jako stabilizator momentu silnika DC.

Sterowanie ze regulowanym źródłem prądowym.

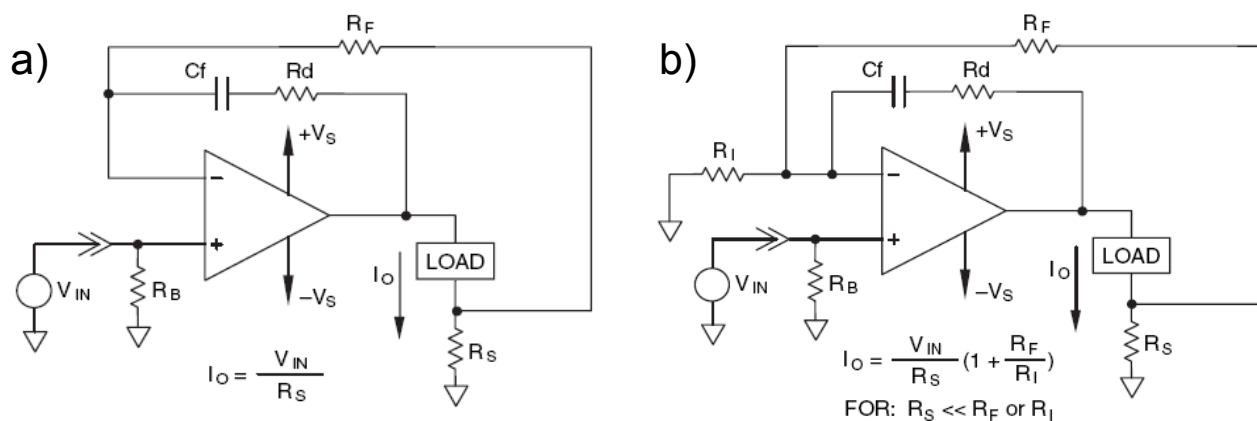
Przy potrzebie regulowania momentu silnika pomocne są układy sterowanych źródeł prądowych.

Zastosowanie układów sterowanych źródeł prądowych upraszcza uzyskanie stabilności pętli regulacji (prędkościowej lub położenia) przez zmniejszenie opóźnień fazowych wynikających z indukcyjności silnika.

W zależności czy silnik wymaga przyłączenia jednego z zacisków do masy (uziemia) czy mogą to być rozwiązania z tzw. „pływającym” obciążeniem - to stosujemy dwie grupy układów.

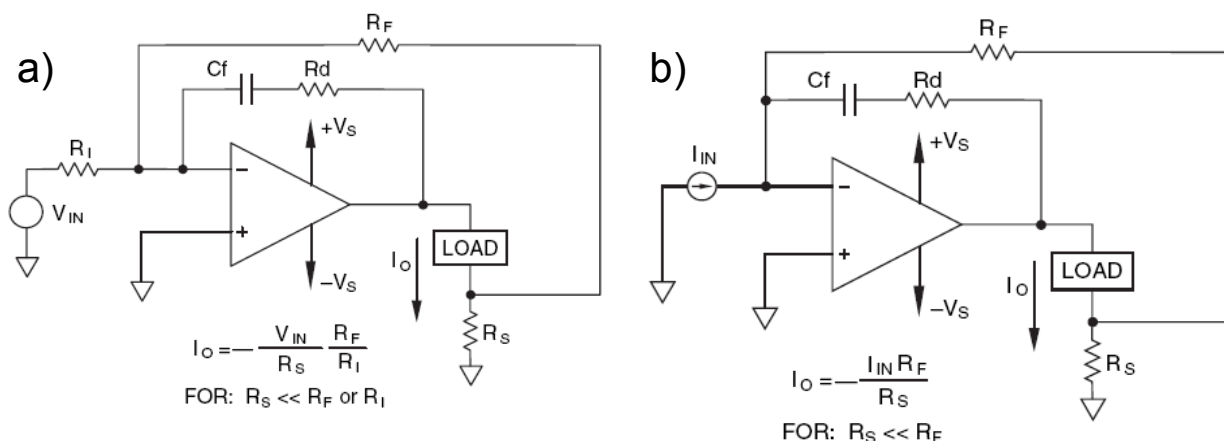
Na rys.8.a pokazano układ źródła prądowego na bazie wtórnika. Należy zwrócić uwagę na zastosowanie rezystora R_B . Rezystor R_B jest niezbędny dla zabezpieczenia układu w czasie włączania zasilania lub bardziej odłączeniu napięcia wejściowego. Dodatkowe elementy C_f i R_d zapewniają stabilność układu ograniczając jego wzmocnienie dla wyższych częstotliwości. Nie wpływają na działanie stałoprądowe pętli regulacji.

Pytanie: Co się dzieje gdy odłączymy napięcie wejściowe w układzie z rys. 8. bez rezystora R_B ?



Rys.8. Źródło prądowe a) na bazie wtórnika, b) na bazie wzmacniacza nieodwracającego.

Podstawowe układy mają swoje wersje na bazie wzmacniacza odwracającego pokazaną na rys.9.a. Gdy mamy jako sygnał wejściowy źródło prądowe (np. przetwornik cyfrowo-analogowy z wyjściem prądowym), to możemy zastosować modyfikację układu pokazaną na rys.9.b.

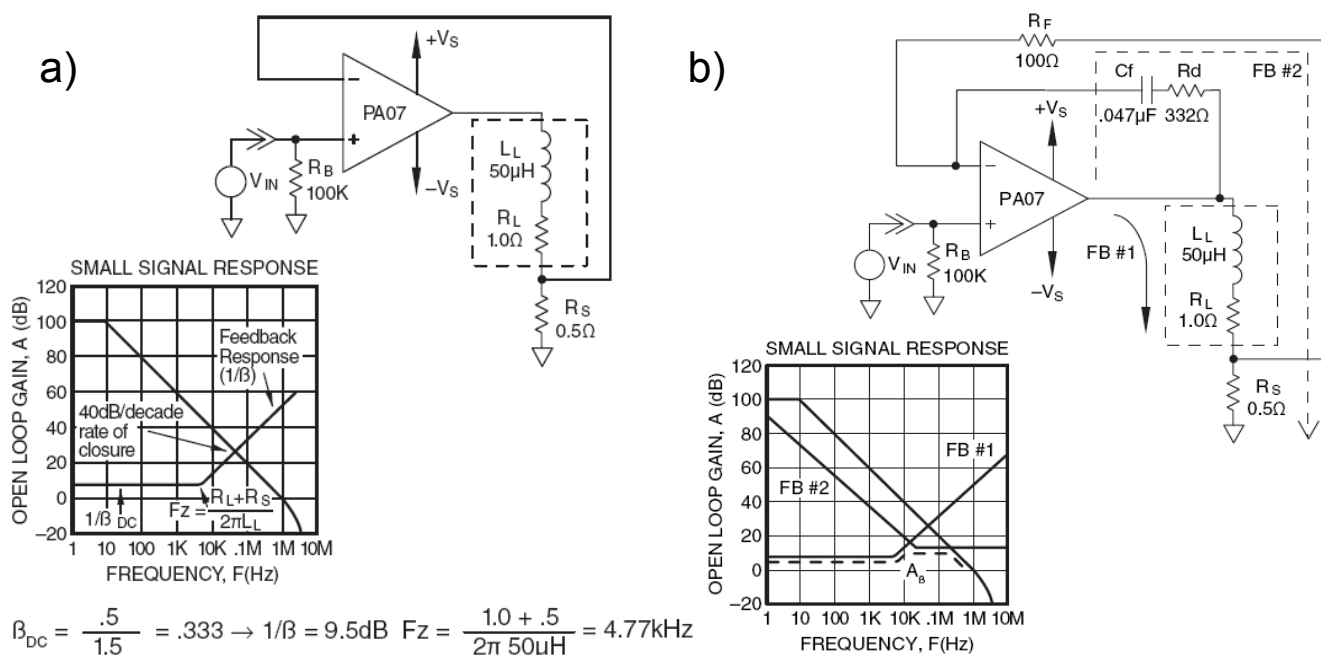


Rys.9. Źródło prądowe a) na bazie wzmacniacza odwracającego, b) ze źródłem prądowym na wejściu.

Ze względu na charakter obciążenia (silnik: R,L,E) umieszczonego w pętli sprzężenia zwrotnego potrzebne jest rozważenie tematu stabilności. Gdyby obciążenie miało charakter czysto rezystancyjny problemy ze stabilnością by nie występowały.

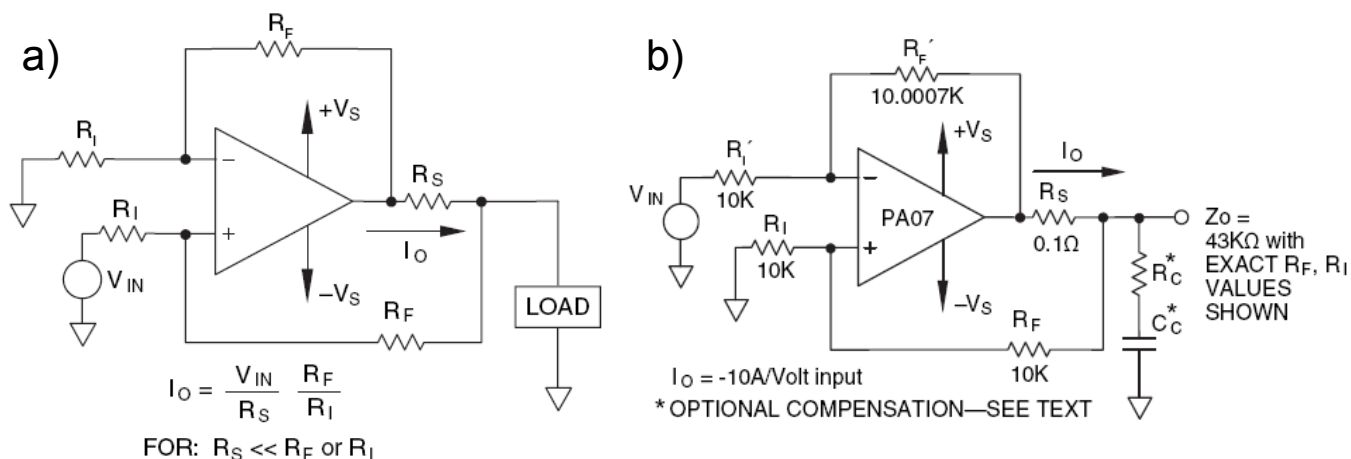
Korzystając z charakterystyk wzmacniacza w otwartej pętli podawanych przez producentów w kartach katalogowych układów, charakterystyki pętli sprzężenia zwrotnego możemy korzystając z metod granicznych określić kryteria stabilności i tym samym ograniczenia na wartości elementów C_f i R_d (dla uzyskania stabilności).

Model zastępczy obciążenia i odpowiadające mu rozwiązania z metody graficznej pokazano na rys.10.



Rys.10. Metody graficzne analizy stabilności w układach sterowanych źródeł prądowych.

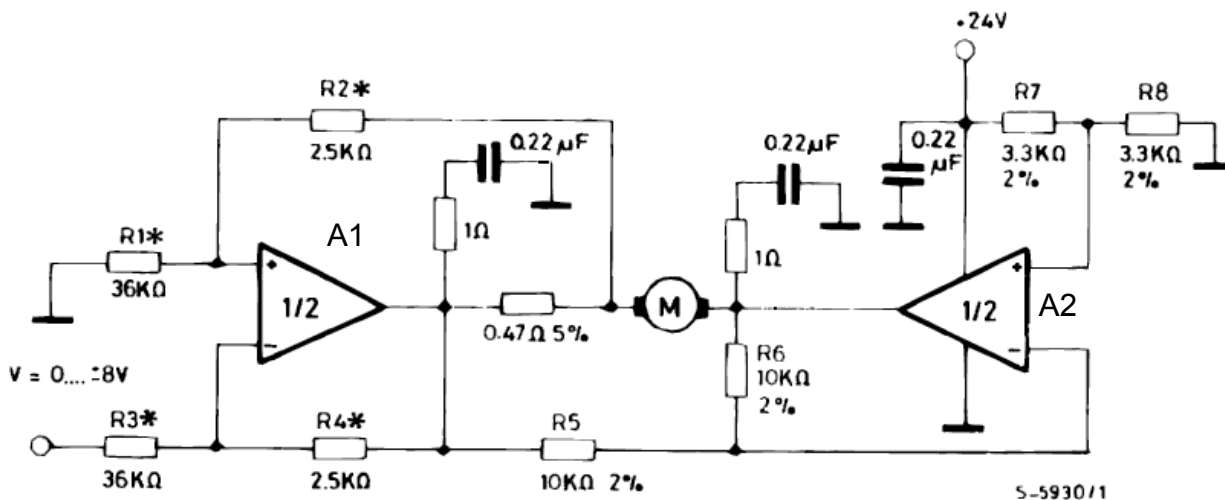
Potrzeba uziemienia (połączenia z masą) jednej z końcówek silnika powoduje konieczność stosowania jako źródła prądowego zmodyfikowanego układu Howlanda pokazanego na rys.11. Układ ma tę niedogodność, że niewielka różnica względna rezystorów wejściowych R_1 i sprzężenia zwrotnego R_F pogarsza parametry przenoszenia i impedancję wyjściową.



Rys.11. a) Układ Howlanda b) przykładowe wartości elementów.

Przykładowe wartości elementów pokazano na rys.11.b.

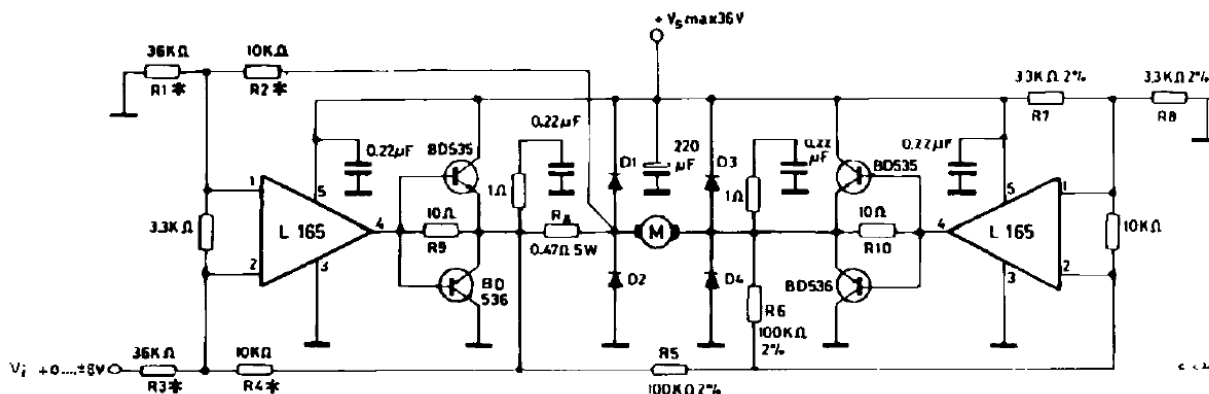
Układ ten ma swoje odpowiedniki w rozwiązaniach mostkowych. Jedno z takich rozwiązań zasilanych z pojedynczego napięcia zasilania pokazano na rys.12. Wzmacniacz wejściowy (A1) jest typowym zmodyfikowanym układem Howlanda. Wzmacniacz wyjściowy (A2) zapewnia symetrię wyjść względem połowy napięcia zasilania.



Rys. 12. Układ źródła prądowego (zmodyfikowany układ Howlanda) w konfiguracji mostkowej zasilany z jednego napięcia.

Zadanie: Wyprowadź zależność na prąd wyjściowy układu mostkowego z rys.12 w zależności od napięcia wejściowego.

Układ z dodatkowymi tranzystorami mocy zwiększającymi wydajność prądową pokazano na rys.13.



Rys.13. Zmodyfikowany układ Howlanda w konfiguracji mostkowej.

Układy z dodatnim prądowym sprzężeniem zwrotnym.

Przy zasilaniu silnika ze źródła napięcia stałego, zmiany obciążenia mechanicznego wywołane różnymi czynnikami powodują zmiany prędkości obrotowej (patrz: model elektromechaniczny). Prędkość obrotowa maleje ze wzrostem obciążenia, maleje też siła elektromotoryczna i wzrasta prąd płynący przez uzwojenia silnika. Warunkiem uzyskania stabilizacji prędkości silnika jest zastosowanie takiego układu, w którym napięcie zasilające wzrasta proporcjonalnie przy wzroście prądu pobieranego przez silnik (proporcjonalne do momentu). Jest to zasilacz z dynamicznym dodatnim sprzężeniem zwrotnym.

Równanie elektryczne silnika $U_i = E_g + R_m I_m$ gdzie

E_g - siła elektromotoryczna zależna od prędkości obrotowej,

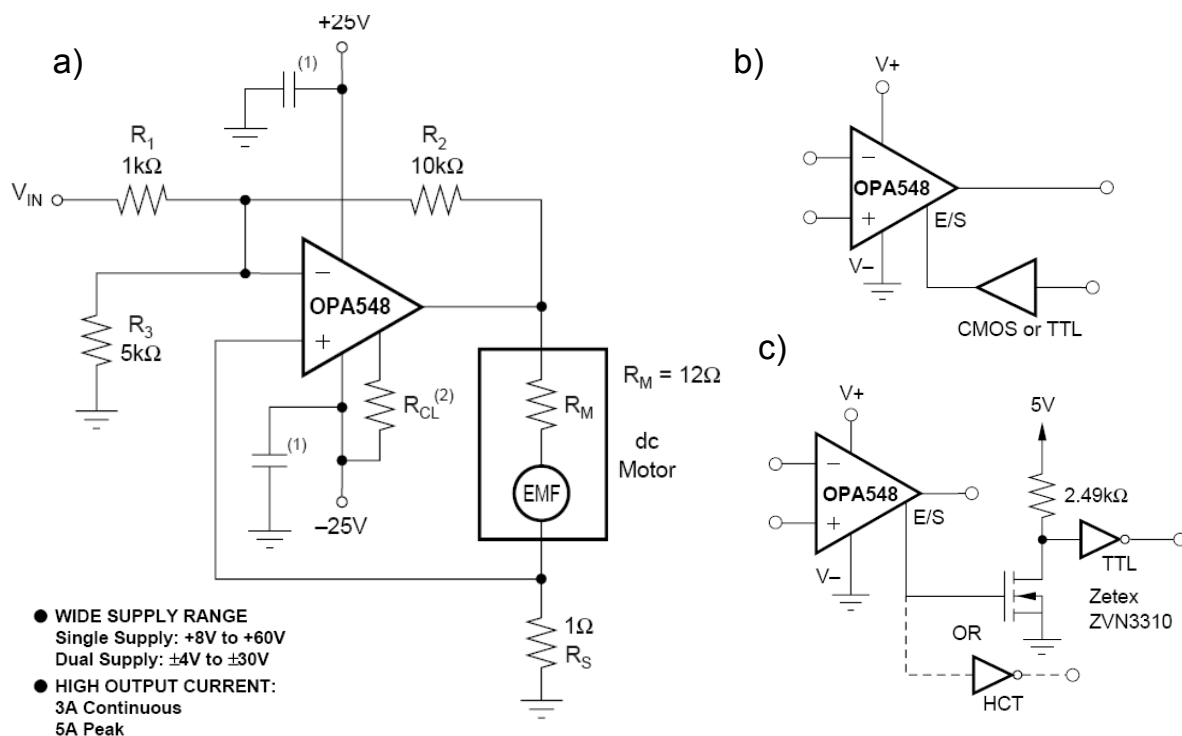
R_m - rezystancja wewnętrzna silnika, I_m - prąd silnika zależny od momentu obciążenia.

Warunkiem stałości prędkości obrotowej jest zasilanie silnika ze źródła napięciowego o ujemnej dynamicznej rezystancji wyjściowej $R_o = -R_m$

Czyli napięcie zasilacza $U_i = E_g + R_o I_m$

Warunkiem stabilności układu jest by rezystancja silnika (przynajmniej nieznacznie) była wyższa od ujemnej rezystancji dynamicznej źródła zasilania.

Przykład takiego rozwiązania zamieszczono na rys.14.



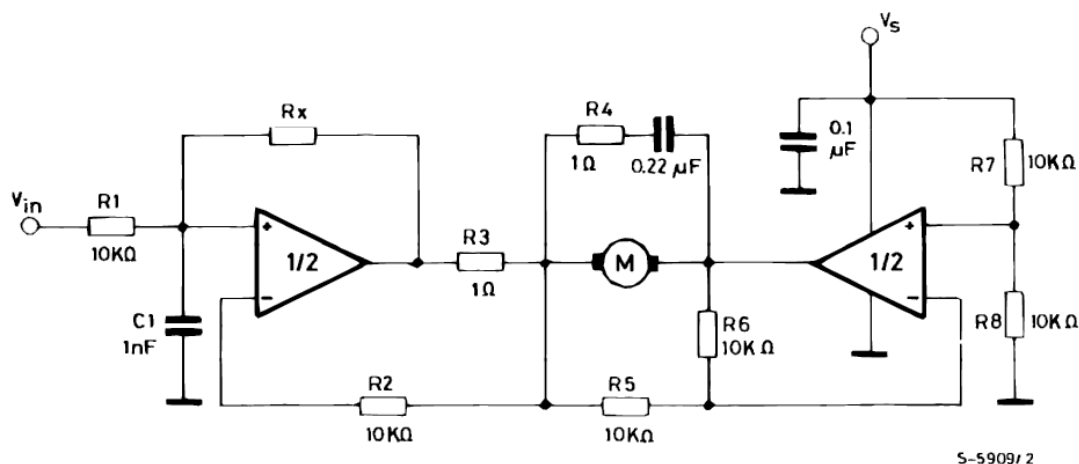
Rys.14.a) Układ z kompensacją zmian obciążenia zmianą napięcia zasilania, b) zdalne odłączenie układu, c) sygnalizacja przeciążenia termicznego.

Wraz ze wzrostem prądu płynącego przez silnik (obciążenie) zwiększa się podawane na dodatnie wejście wzmacniacza składowa proporcjonalna do prądu wyjściowego. Sumowana jest z zadanym wejściowym napięciem sterującym.

Ustawiając wartość elementów dzielnika wejściowego (R_3) i rezystora kompensacji (R_2) regulujemy zarówno wzmacnienie, jak i stopień kompensacji. Przekompensowanie powoduje gwałtowny wzrost prędkości silnika. Pamiętać należy o wzroście wartości rezystancji silnika wraz z temperaturą pracy, by dobrać kompensację w temperaturze roboczej silnika. Przy swojej prostocie układ zapewnia relatywnie dobrą stabilizację prędkości silnika.

Pytanie: Opierając się na podanych wartościach rezystancji uzwojeń silnika, napięcia wejściowego i wyjściowego z rys.14 pokaż procedurę obliczania tego układu.

Układ z dodatnim sprzężeniem zwrotnym w wersji mostkowej pokazano na rys. 15.



Rys.15. Mostkowy układ z dodatnim prądowym sprzężeniem zwrotnym stabilizacji obrotów silnika.

Pytanie: Wyprowadź zależność na prąd silnika w zależności od napięcia wejściowego dla układu z rys.15.

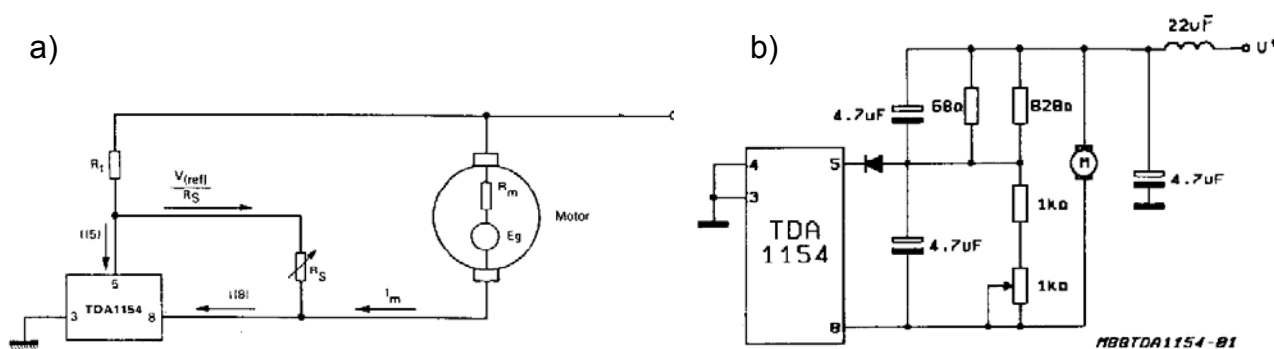
Pytanie: Wykaż że warunek stabilności układu z rys.15 to:

$$R_x > \frac{2R_3 \cdot R_1}{R_M} \quad \text{gdzie } R_M - \text{wewnętrzna rezystancja silnika}$$

Jakie jest dostępne napięcie dostępne na zaciskach silnika?

Oparte na tej zasadzie były też specjalizowane układy scalone przeznaczone do popularnego sprzętu powszechnego użytku. Istotna była stabilizacja obrotów silnika na określonej wartości przy wahanach obciążenia (momentu). Przykładowe zastosowania to np. magnetofony kasetowe itp.

Przykładem takiego rozwiązania jest układ scalony TDA1154 pokazany na rys. 16.



Rys.16. Układ TDA1154, a) zasada działania b) typowa aplikacja.

Układ utrzymuje stałe napięcie pomiędzy wyprowadzeniami 5 i 8 ($U_{5-8} = U_{ref} = 1,2 \text{ V}$). Prąd płynący przez końcówkę 5 składa się ze: składowej stałej $I_5(0) = 1,7 \text{ mA}$

i proporcjonalnej do prądu w wyprowadzeniu 8; I_8 / K ($K=20$)

czyli a) $I_5 = I_5(0) + I_8 / K$ gdzie $I_5(0) = 1,7 \text{ mA}$, $K=20$

Wyprowadzając z układu równania

$$b) \quad E_g + R_m \cdot I_m = R_t [I_5 + U_{ref} / R_s] + U_{ref}$$

$$c) \quad I_8 = I_m + U_{ref} / R_s$$

Po podstawieniach do równania b) otrzymujemy:

$$E_g = I_m \left[\frac{R_t}{K} - R_m \right] + U_{ref} \left[\frac{R_t}{R_s} \left(1 + \frac{1}{K} \right) + 1 \right] + R_t I_{5(0)}$$

Aby prędkość obrotowa była niezależna od momentu hamującego E_g powinno być niezależne od

I_m , czyli składowa (1) równania powinna być równa zero

$$R_t = K * R_m \quad (K=20)$$

Przy $R_t > K * R_m$ układ jest niestabilny z powodu przekompensowania. Wartość R_s określa E_g z czym związana jest zadana prędkość obrotowa.

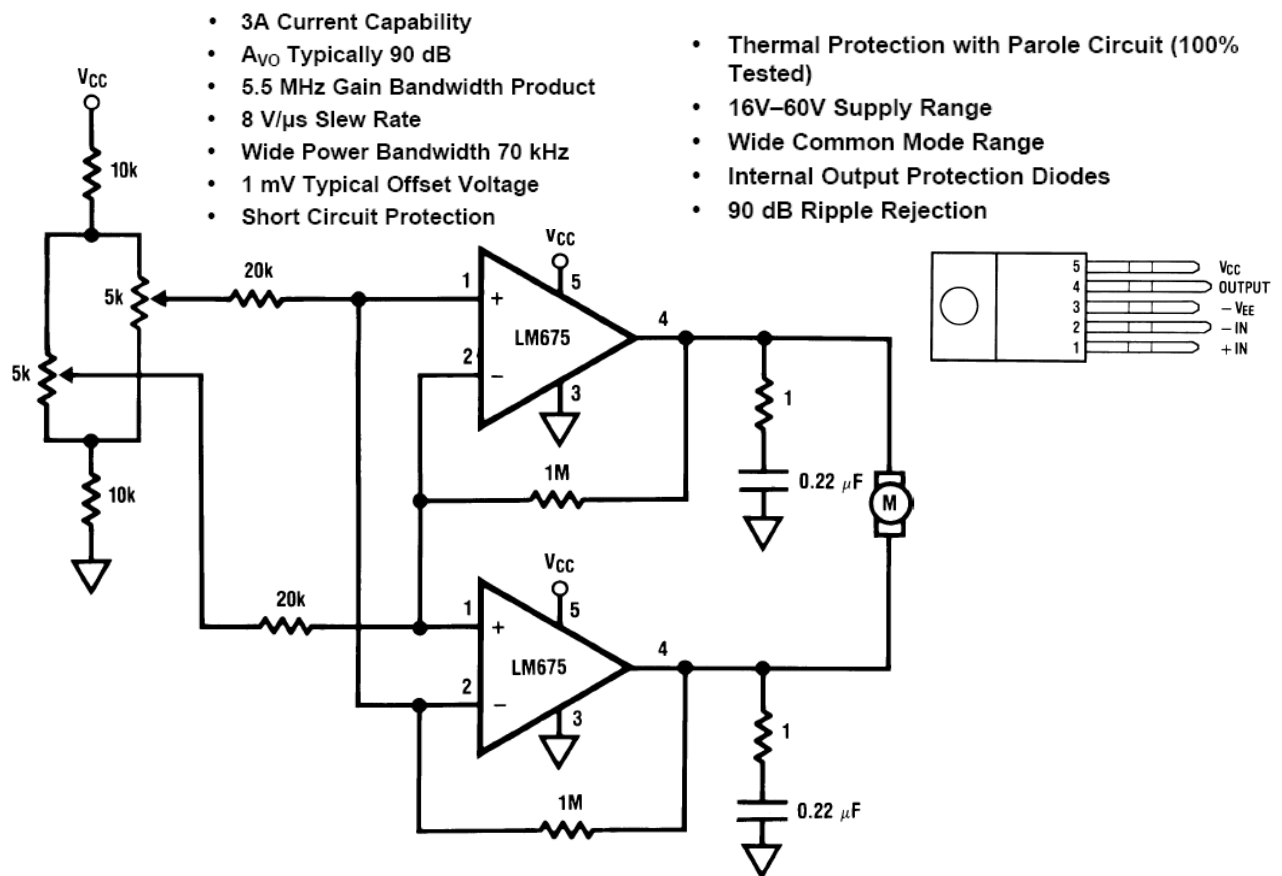
$$R_s = R_t \frac{U_{ref} \left(1 + \frac{1}{K}\right)}{E_g - U_{ref} - R_t I_s(0)} \quad \text{gdzie } U_{ref} = 1,2 \text{ V}, \quad I_s(0) = 1,7 \text{ mA}$$

Sterowanie z pozycyjnym sprzężeniem zwrotnym (serwomotory).

Przykład układu z pozycyjnym sprzężeniem zwrotnym pokazano na rys.17.

Wartość zadana pozycji (P1) porównywana jest z reakcją napędzanego przez silnik mechanizmu i pozycja widoczna jest widoczna na potencjometrze oddającym położenie (P2).

Układ mostkowy umożliwia pracę z pojedynczym napięciem zasilania.



Rys. 17. Serwonapęd z potencjometrycznym zadawaniem pozycji i potencjometrycznym czujnikiem położenia.

Pytanie: Przeanalizuj pracę układu z dużymi i małymi różnicami położenia (potencjometry P1 i P2).

Pytanie: Narysuj wersję układu z pojedynczym układem i symetrycznym podwójnym napięciem zasilania.