

## 2.4. Dobór mocy znamionowej silnika według kryterium dopuszczalnego nagrzewania się

### 2.4.1 Dobór mocy silnika dla pracy ciągłej

Jeżeli obciążenie silnika w czasie jest stałe i wynosi  $M_o$  oraz sprzężenie wału silnika z wałem maszyny roboczej jest bezpośrednie, moc silnika wyznacza się z zależności:

$$P_N = M_o \omega_N \quad (1)$$

Jeżeli w układzie istnieje przekładnia mechaniczna, należy dodatkowo uwzględnić wytwarzanie w niej straty energii i moc silnika wyznacza się z zależności:

$$P_N = \frac{\omega_N M_o}{i \eta} \quad (2)$$

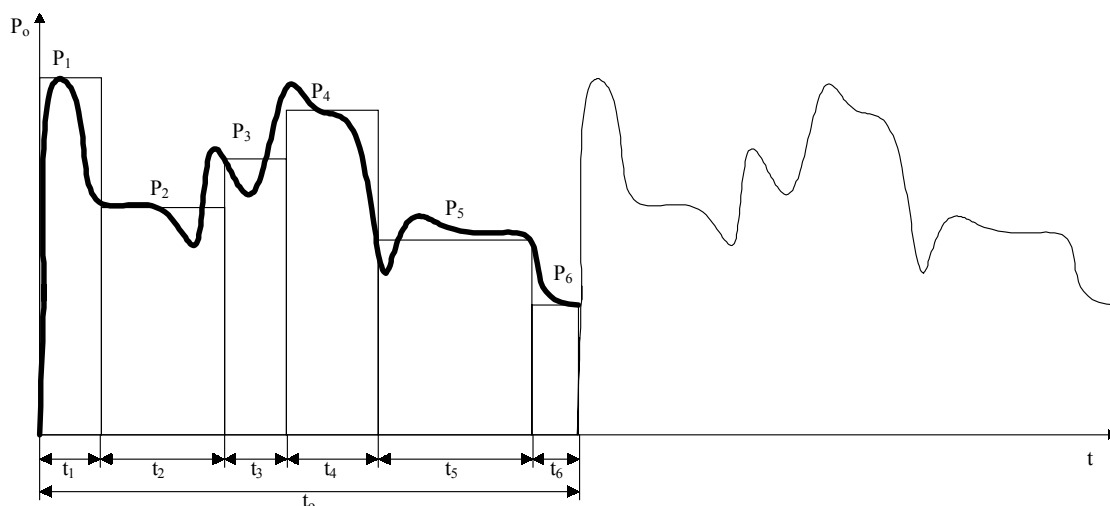
gdzie:  $i$  – przełożenie przekładni,  
 $\eta$  – sprawność przekładni.

Z katalogu silników dobiera się silnik o najbliższej wartości mocy  $P_N$  spełniającej warunek (1) lub (2). Następnie należy sprawdzić pozostałe warunki (na  $M_{\max}$  i  $M_r$ ).

### 2.4.2 Dobór mocy silnika dla pracy ciągłej i obciążenia okresowo-zmiennego

W rzeczywistych warunkach pracy najczęściej obciążenie jest zmienne w czasie (rys.2.4.1). Z wykresu obciążenia wybiera się odcinek najbardziej charakterystyczny i przyjmuje jako czas trwania okresu  $t_o$ . Po dokonaniu uproszczenia przebiegu (krzywa schodkowa) i określeniu czasów trwania poszczególnych wartości obciążeń  $P_1, P_2, \dots, P_i$ , moc wyznacza się z następujących metod:

- *strat średnich (zastępczych),*
- *prądu zastępczego,*
- *momentu zastępczego,*
- *mocy zastępczej.*



Rys.2.4.1 Wykres obciążenia silnika (linia ciągła - przebieg rzeczywisty, linia przerywana - uproszczony przebieg do obliczeń).

Wszystkie metody wynikają z kryterium dopuszczalnego nagrzewania się maszyny. Najdokładniejsza jest *metoda średnich strat*. Każdej wartości obciążenia  $P_i$  odpowiadają straty  $\Delta P_i$ , prąd  $I_i$  oraz ilość wydzielanego ciepła w maszynie  $Q_i$ .

W czasie  $t_o$  wydzielili się ciepło:

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_i \quad \text{lub}$$

$$\Delta P_z t_o = \Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_i t_i \quad (3)$$

Stąd straty zastępcze  $\Delta P_z$  wynoszą:

$$\Delta P_z = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{\sum \Delta P_i t_i}{t_o} \quad (4)$$

Dla każdego obciążenia  $P_i$  odpowiednie straty wyznacza się według wzoru:

$$\Delta P_i = P_i \frac{1 - \eta_i}{\eta_i} \quad (5),$$

gdzie:  $\eta_i$  – sprawność silnika przy obciążeniu  $P_i$ , wyznaczana z *charakterystyki eksploatacyjnej silnika*  $\eta=f(P)$ .

Moc znamionową  $P_N$  silnika dobiera się z katalogu tak, aby spełniony był warunek:

$$\Delta P_N = P_N \frac{1 - \eta_N}{\eta_N} \geq \Delta P_z \quad (6)$$

Zachowanie warunku (6) oznacza, że straty, a więc ciepło wydzielane w silniku podczas rzeczywistego okresowego obciążenia nie są większe niż ciepło, które zostałyby wydzielone w silniku podczas ciągłego znamionowego obciążenia.

W praktyce moc silnika wyznacza się metodą kolejnych przybliżeń. Najpierw na podstawie wykresu obciążenia na wale silnika  $P = f(t)$  wyznacza się moc silnika orientacyjnie, np. przyjmuje się, że:

$$P = (1,1 \div 1,3) P_{sr} = (1,1 \div 1,3) \frac{\sum P_i t_i}{t_o}$$

Następnie na podstawie wykresu  $\eta=f(P)$  danego silnika wyznacza się straty dla kolejnych  $t_i$  według zależności (5) oraz straty średnie według (4). Jeżeli warunek (6) jest zachowany, to silnik jest dobrany prawidłowo.

W przeciwnym wypadku dobiera się z katalogu następną wielkość silnika i obliczenia powtarza dopóty, dopóki nie zostanie osiągnięty właściwy wynik.

Jeżeli okres  $t_o$  zawiera okresy postoju  $t_s$  (straty  $\Delta P_s=0$ ) lub okresy rozruchu  $t_r$  (straty  $\Delta P_r$ ) i hamowania  $t_h$  (straty  $\Delta P_h$ ), to przy przewietrzaniu własnym silnika, warunki chłodzenia w tych okresach pogarszają się i straty średnie wyznacza się z zależności:

$$\Delta P_z = \frac{\Delta P_r t_r + \sum \Delta P_i t_i + \Delta P_h t_h}{\alpha (t_r + t_h) + \sum t_i + \beta t_s}$$

Współczynnik  $\beta$ , uwzględniający pogorszenie się warunków chłodzenia w czasie postoju silnika, wyznacza się ze stosunku cieplnych stałych czasowych podczas nagrzewania  $T_c$  i stygnięcia  $T_s$  silnika :

$$\beta = \frac{T_c}{T_s} \quad (8)$$

Zazwyczaj przyjmuje się:

- dla silników zamkniętych bez przewietrzania:  $\beta = 0,9 - 0,95$
- dla silników zamkniętych z przewietrzaniem:  $\beta = 0,4 - 0,6$
- dla silników półotwartych z przewietrzaniem:  $\beta = 0,25 - 0,35$

Współczynnik  $\alpha$  jest średnią arytmetyczną liczby 1, odpowiadającej całkowitej prędkości wirowania i najlepszym warunkom chłodzenia i liczby  $\beta$ , czyli:

$$\alpha = \frac{1 + \beta}{2} \quad (9)$$

Przy przewietrzaniu obcym  $\alpha = \beta = 1$ .

Metoda strat średnich, jak każda metoda kolejnych przybliżeń jest nieco kłopotliwa w zastosowaniu.

Dlatego częściej stosuje się *metody prądu zastępczego, momentu zastępczego lub mocy zastępczej*. Metody te są mniej dokładne ale znacznie wygodniejsze w użyciu.

**Metoda prądu zastępczego** polega na wyznaczeniu prądu  $I_z$ , który płynąc przez uzwojenie główne silnika, wytworzyłby w nim taką samą ilość ciepła jak zmienny w czasie prąd rzeczywisty.

Metodę tę stosuje się, gdy okresowo zmienne obciążenie silnika dane jest w postaci przebiegu  $I=f(t)$ .

Jeżeli w czasie pracy silnika rozruchy, hamowania i postoje mają istotny wpływ na warunki cieplne silnika to należy je uwzględnić w rzeczywistym okresie pracy silnika oraz wprowadzić współczynniki tolerancyjne  $\alpha$  i  $\beta$ .

Wyrażenie na zastępczy prąd  $I_z$  ma postać:

$$I_z = \sqrt{\frac{1}{t'_o} \int_0^{t'_o} I^2 dt} = \sqrt{\frac{I_r^2 t_r + I_1^2 t_1 + \dots + I_i^2 t_i + I_h^2 t_h}{t'_o}} \quad (10),$$

gdzie:  $t'_o$  – zredukowany okres pracy wyrażony następująco:

$$t'_o = \alpha (t_r + t_h) + t_1 + t_2 + \dots + t_i + \beta t_s \quad (11),$$

$I_r, I_h$  – odpowiednio prąd rozruchu i hamowania silnika (wartości średnie).

Silnik dobrany z katalogu powinien spełniać warunek:

$$I_N \geq I_z \quad (12)$$

Zgodnie z ogólnymi zasadami doboru silnika należy dodatkowo sprawdzić czy silnik może rozwinąć moment rozruchowy potrzebny do uruchomienia maszyny roboczej oraz czy silnik spełnia warunek przeciążalności prądowej, tzn. czy spełniona jest nierówność:

$$\frac{I_{\max}}{I_N} \leq p_i \quad (13),$$

gdzie:  $p_i$  – przeciążalność prądowa silnika (parametr podawany w katalogu),

$I_{\max}$  – maksymalna wartość prądu na wykresie obciążenia.

Jeżeli zależność (13) nie jest spełniona, należy przyjąć z katalogu silnik o większej wartości prądu  $J_N$ . W tym przypadku o doborze wartości będą decydowały nie warunki dopuszczalnego nagrzewania się, lecz wymagania dotyczące przeciążalności prądowej.

**Metoda momentu zastępczego** jest stosowana najczęściej, gdyż w praktyce zwykle dysponuje się wykresem obciążenia w postaci zależności  $M_o=f(t)$ .

Zastosowanie tej metody jest uzasadnione wówczas, gdy moment obrotowy silnika jest linową funkcją prądu.

Jest to słuszne w przypadku silników obcowzbudnych i bocznikowych prądu stałego pracujących przy stałym strumieniu magnetycznym, oraz w silnikach indukcyjnych – ale przy pracy na roboczej części charakterystyki mechanicznej, tzn. kiedy nie obejmuje ona okresów rozruchu i hamowania. Jeżeli jednak częstość rozruchów jest mała i mają one lekki charakter, to można pominąć wpływ nagrzewania się silnika od strat przy rozruchu oraz hamowaniu i stosować metodę momentu zastępczego również do silników indukcyjnych.

Wzór na moment zastępczy ma postać:

$$M_z = \sqrt{\frac{1}{t'_o} \int_0^{t'_o} M^2 dt} = \sqrt{\frac{M_r^2 t_r + M_1^2 t_1 + \dots + M_i^2 t_i + M_h^2 t_h}{t'_o}} \quad (14),$$

gdzie:  $t'_o$  – zredukowany okres pracy wyrażony następująco:

$$t'_o = \alpha(t_r + t_h) + t_1 + t_2 + \dots + t_i + \beta t_s,$$

$M_r, M_h$  – średnie wartości momentu podczas rozruchu i hamowania silnika.

Po wyznaczeniu  $M_z$  dobiera się z katalogu silnik, którego moment znamionowy spełnia warunek:

$$M_N \geq M_Z \quad (15)$$

Dodatkowo należy sprawdzić czy silnik spełnia warunek rozruchu i przeciążalności momentem tzn.:

$$\frac{M_{\max}}{M_N} \leq p_m \quad (16),$$

gdzie:  $M_{\max}$  - największa wartość momentu odczytana z wykresu obciążenia  $M_o=f(t)$ .

$p_m$  - przeciążalność momentem silnika podana w katalogu.

**Metoda mocy zastępczej** jest stosowana wówczas, gdy wykres obciążenia jest dany w postaci zależności  $P = f(t)$  oraz gdy zachodzi proporcjonalność między prądem pobieranym przez silnik z sieci a mocą  $P$  oddawaną na wale.

Warunek ten spełniają silniki obcowzbudne prądu stałego przy stałym strumieniu magnetycznym oraz w przybliżeniu silniki indukcyjne pracujące wyłącznie na roboczej części charakterystyki mechanicznej przy założeniu stałej prędkości obrotowej. Metoda ta nie może być stosowana wówczas, gdy w okresie pracy występują rozruchy i hamowania.

Moc zastępczą silnika wyznacza się z zależności:

$$P_z = \sqrt{\frac{\int_0^{t_o} P^2 dt}{t_o}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_i^2 t_i}{t_1 + t_2 + \dots + t_i}} \quad (17)$$

Moc znamionową silnika dobiera się z katalogu na podstawie warunku:

$$P_N \geq P_Z \quad (18)$$

przy jednoczesnym sprawdzeniu czy spełnione są warunki rozruchu i przeciążalności mocą

$$\frac{P_{\max}}{P_N} \leq p_p \quad (19)$$

gdzie:  $P_{\max}$  - największa wartość mocy odczytana z wykresu  $P_o = f(t)$   
 $p_p$  - przeciążalność mocą silnika.

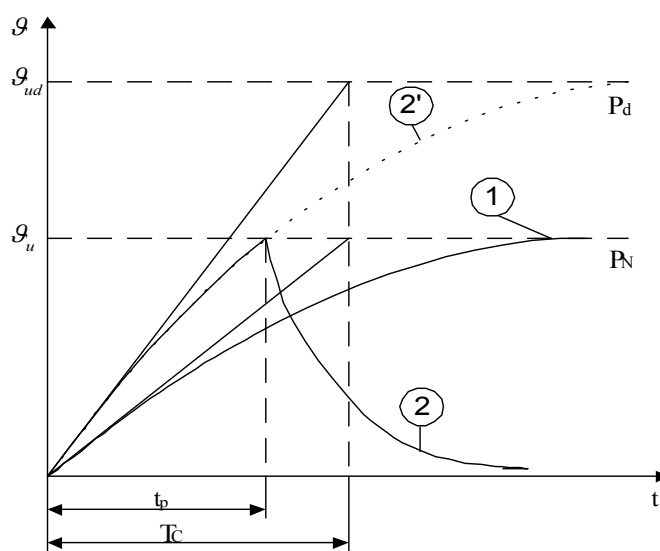
### 2.4.3. Dobór mocy silnika przy pracy dorywczej

Jeżeli jest znany przebieg w funkcji czasu mocy lub momentu wymaganego przez maszynę roboczą oraz gdy czas jej pracy jest równy znamionowemu czasowi pracy dorywczej  $t_p$  (patrz praca S2), to można dokonać wyboru silnika bezpośrednio z katalogu maszyn przeznaczonych do pracy dorywczej. Silnik ten musi spełniać warunek

$P_N \geq P$  lub, gdy obciążenie  $P$  zmienia się w czasie  $t_p$ , należy wyznaczyć moc zastępczą  $P_Z$  i dobrać silnik z warunku  $P_N \geq P_Z$ .

Jednak często przy doborze silnika do pracy dorywczej korzysta się z silników przeznaczonych do pracy ciągłej S1. Silnik przeznaczony do pracy ciągłej o mocy znamionowej  $P_N$  może być przy pracy dorywczej obciążony mocą  $P_d > P_N$ .

Moc  $P_d$  może być tym większa im krótszy będzie czas pracy dorywczej  $t_p$  silnika. Na rys.2. zilustrowano ten fakt za pomocą krzywych nagrzewania.



Rys.2.4.1. Przebiegi przyrostu temperatury dla pracy ciągłej silnika obciążonego mocą  $P_N$  (1) i mocą  $P_d$  (2') oraz dla obciążenia dorywczego (2)

Krzywa nagrzewania 1 odpowiada silnikowi obciążonemu mocą  $P_N$  przy pracy ciągłej i po czasie  $t \rightarrow \infty$  osiąga  $\theta_u$ . Jeżeli ten sam silnik obciążony się mocą  $P_d > P_N$  to przyrost temperatury osiągnie stan ustalony przy  $\theta_{ud}$ , który jest większy niż  $\theta_{dopusz}$  (krzywa nagrzewania 2'). Jednocześnie do czasu  $t_p$  można bezpiecznie pracować nie przegrzewając izolacji uzwojeń.

Narastanie temperatury przy obciążeniu  $P_N$  można przedstawić zależnością:

$$\theta = \theta_u \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_c}} \right), \quad (20)$$

natomiast przy obciążeniu mocą  $P_d > P_N$ :

$$\mathcal{G} = \mathcal{G}_{ud} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_C}} \right) \quad (21)$$

Ponieważ stosunek ustalonych przyrostów temperatury  $\mathcal{G}_{ud}/\mathcal{G}_u$ , jest równy, zgodnie stosunkowi całkowitych strat, a więc i stosunkowi kwadratów mocy

$$\Delta \mathcal{G}_u = \frac{\Delta P}{aS}$$

$$\frac{\mathcal{G}_{ud}}{\mathcal{G}_u} = \frac{\Delta P_d}{\Delta P_N} = \left( \frac{P_d}{P_N} \right)^2 \quad (22)$$

Po uwzględnieniu (22) w (21) otrzymuje się:

$$\mathcal{G} = \mathcal{G}_u \left( \frac{P_d}{P_N} \right)^2 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_C}} \right) \quad (23)$$

Ponieważ przy pracy dorywczej, po czasie  $t_p$ , temperatura silnika nie może przekroczyć dopuszczalnej  $\mathcal{G}_u$ , zatem po podstawieniu do (23)  $\mathcal{G}=\mathcal{G}_u$ ,  $t=t_p$ , otrzymuje się:

$$P_d = \frac{P_N}{\sqrt{1 - e^{-\frac{t_p}{T_C}}}} \quad (24)$$

Na podstawie zależności (24) można więc obliczyć moc silnika przy pracy dorywczej  $P_d$ , jeżeli znana jest jego moc znamionowa  $P_N$  przy pracy ciągłej oraz stała czasowa nagrzewania  $T_C$ .

Z wzoru (24) można również wyznaczyć wyrażenie na czas  $t_p$ , w ciągu którego silnik może pracować obciążony mocą  $P_d$

$$t_p = T_C \ln \frac{P_d^2}{P_d^2 - P_N^2} \quad (25)$$

Ponadto należy również sprawdzić czy spełniony jest warunek przeciążalności mocą tzn.:

$$P_d \leq p_p P_N \quad (26)$$

oraz czy przy tym obciążeniu silnik ruszy.

Na ogół silniki dla pracy dorywczej są specjalnie konstruowane, z możliwie dużą stałą czasową nagrzewania  $T_C$ , co umożliwi lepsze wykorzystanie maszyny.



#### 2.4.4. Dobór mocy silnika dla pracy okresowej przerywanej

Przy doborze silników do pracy okresowej przerywanej najczęściej korzysta się z katalogów specjalnych silników budowanych do tego rodzaju pracy i konstruowanych na zwiększoną przeciążalność oraz zwiększony moment rozruchowy. Często te silniki nazywane są silnikami dźwignicowymi ze względu na typowe zastosowanie w napędach dźwigowych.

W katalogach podawana jest dla każdej określonej wielkości silnika jego moc znamionowa przy znamionowych *względnych czasach trwania obciążenia*  $\varepsilon_N$ : 15,25,40,60 %.

Na ogół jednak rzeczywisty względny czas trwania obciążenia konkretnego urządzenia (rys.2.4.2a) różni się od czasu katalogowego. Zachodzi więc konieczność przybliżenia mocy silnika do **znamionowego względnego czasu trwania obciążenia**. Dokonuje się tego przy założeniu, że przy przechodzeniu od jednej wartości względnego czasu obciążenia do drugiego **moc zastępcza silnika nie może ulegać zmianie**, czyli:

$$\sqrt{\frac{P^2 t_p}{t_p + t_s}} = \sqrt{\frac{P_N^2 t_{pN}}{t_{pN} + t_{sN}}} \quad (27)$$

przy czym:

$P$ ,  $t_p$ ,  $t_s$  - rzeczywiste wartości mocy oraz czasy trwania obciążenia i postoju silnika w okresie pracy;

$P_N$ ,  $t_{pN}$ ,  $t_{sN}$  - znamionowe wartości mocy oraz czasy trwania obciążenia i postoju silnika w okresie pracy.

Wprowadzając oznaczenia:

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_s}, \quad \varepsilon = \frac{t_{pN}}{t_{pN} + t_{sN}}, \quad (28)$$

Uzyskuje się zależność na moc silnika  $P_N$  przy znamionowym względnym czasie trwania obciążenia  $\varepsilon_N$

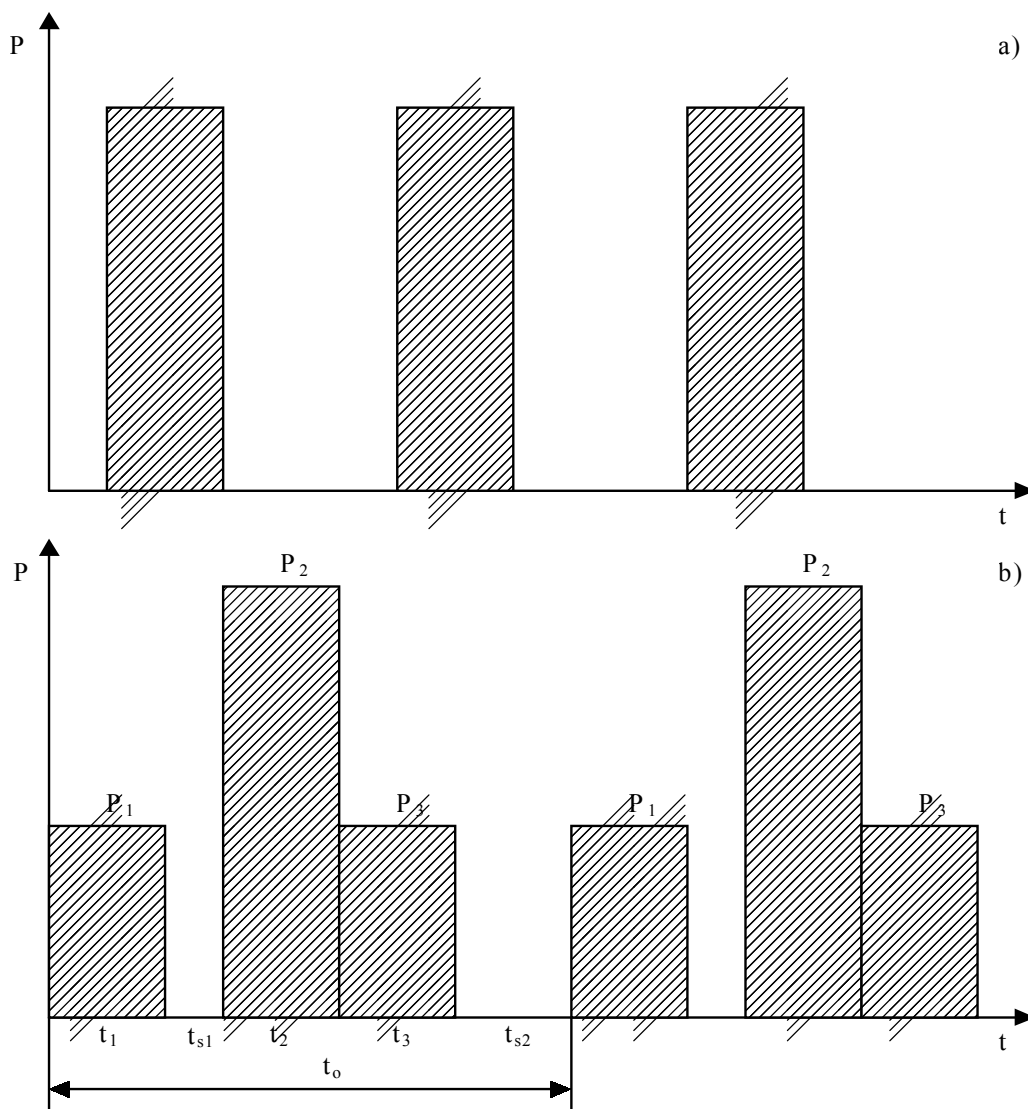
$$P_N \geq P \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_N}} \quad (29)$$

Wzór (29) może być stosowany przy różnicy względnych czasów trwania obciążenia nie przekraczającej **10%**. Po obliczeniu mocy znamionowej należy sprawdzić, czy dobrany silnik ma odpowiednią przeciążalność i moment rozruchowy.

Jeżeli obciążenie dla pracy okresowej przerywanej ma charakter zmienny (rys.2.4.2b) to po określeniu czasu trwania okresu  $t_o$ , dla tego odcinka czasu należy wyznaczyć moc

zastępczą  $P_Z$  na podstawie wyrażenia (17) oraz względny czas trwania obciążenia dla okresu  $t_0$ . Następnie na podstawie wzoru (29) ustala się moc znamionową silnika.

Nie jest wskazane przeliczanie obciążalności silnika zbudowanego dla pracy ciągłej na pracę okresową przerywaną ze względu na inne kryteria konstrukcyjne. Silniki dla pracy przerywanej mają w tych samych gabarytach większe momenty maksymalne niż silniki dla pracy ciągłej.



Rys.2.4.2. Przykład obciążenia okresowego przerywanego:

- a) stałego w czasie,
- b) zmiennego w czasie.