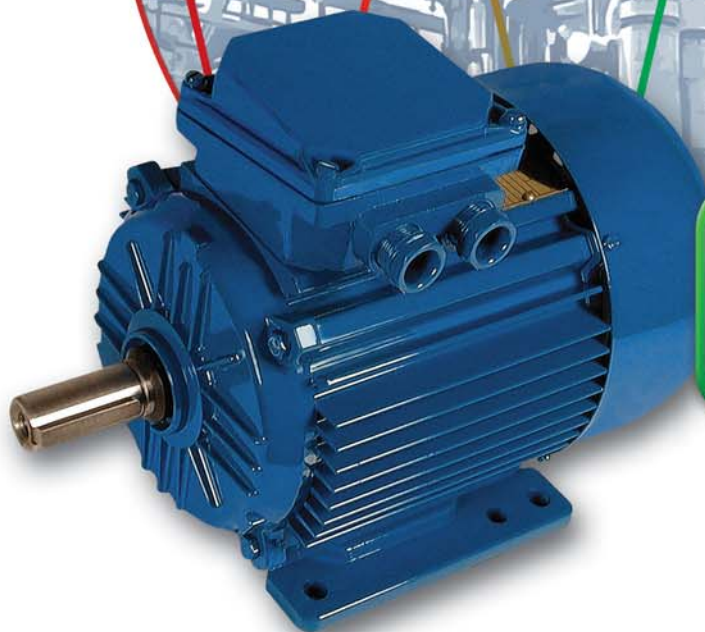


# Polski program efektywnego wykorzystania energii w napędach elektrycznych

[www.pemp.pl](http://www.pemp.pl)



## Instytucje finansujące i realizujące projekt PEMP



### Globalny fundusz środowiska GEF

(Global Environment Facility - GEF) powstał w 1991 roku jako mechanizm finansowy początkowo zarządzany przez 3 agendy ONZ: Bank Światowy, UNEP oraz UNDP. Dołączyły do nich UNIDO, FAO oraz regionalne banki rozwoju. Celem Funduszu jest osiągnięcie poprawy stanu środowiska naturalnego w tak kluczowych dziedzinach jak: ochrona bioróżnorodności, ochrona wód międzynarodowych czy zapobieganie zmianom klimatycznym. Od 1992 roku Polska otrzymała pomoc finansowaną z funduszu o wartości ponad 70 mln USD w ramach małych, średnich i dużych projektów. Jednocześnie do tych projektów zmobilizowano wielokrotnie więcej funduszy z finansowania równoległego. Projekt Polski program efektywnego wykorzystania energii w napędach elektrycznych jest finansowany przez GEF w wysokości 4,5 mln USD.

[www.gefweb.org](http://www.gefweb.org)



### Program Narodów Zjednoczonych ds. Rozwoju UNDP

UNDP tworzy w ramach Organizacji Narodów Zjednoczonych globalną sieć na rzecz rozwoju, promując zmiany na lepsze i umożliwiając krajom wymianę doświadczeń, wiedzy i zasobów, które mają pomóc mieszkańcom globu w tworzeniu lepszego świata. W Polsce UNDP wspiera m.in. rozwój gospodarczo-ekonomiczny i społeczny. UNDP obecne jest w 166 krajach, współpracuje z ich przedstawicielami nad rozwiązaniem problemów rozwojowych tak na narodowym jak i globalnym poziomie. Przedstawicielstwo UNDP w Polsce zostało otwarte 1 sierpnia 1990 r. w Warszawie. Na jego czele stoi Stały Przedstawiciel UNDP, pełniący jednocześnie funkcję Stałego Koordynatora Systemu ONZ w Polsce. UNDP zarządza przekazanym przez GEF finansowaniem.

[www.undp.org.pl](http://www.undp.org.pl)



### Krajowa Agencja Poszanowania Energii KAPE S.A.

powstała w 1994 r. w wyniku Decyzji Rządu RP nr 21/92 w sprawie utworzenia agencji poszanowania energii. W swojej działalności o charakterze użyteczności publicznej nie nastawioną na maksymalizację zysku. W swojej działalności koncentruje się na zadaniach związanych z efektywnością energetyczną, wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii i ochroną środowiska. KAPE S.A., w ramach wdrażania na poziomie narodowym zasad zrównoważonej polityki energetycznej, prowadzi działalność edukacyjną, doradczą, ekspercką i szkoleniową związaną z racjonalizacją gospodarki energetycznej przy zachowaniu zasad ochrony środowiska. Inicjuje przedsięwzięcia proekologiczne związane z wytwarzaniem, przesyłaniem i użyciem energii. W znaczącej części swoją działalność opiera na realizacji programów międzynarodowych, w tym głównie Unii Europejskiej. W projekcie PEMP pełni rolę Agencji Wykonującej i Wdrażającej program.

[www.kape.gov.pl](http://www.kape.gov.pl)



### Fundacja na rzecz Efektywnego Wykorzystania Energii FEWE

powstała w 1990 roku jako organizacja niezależna, pozarządowa i nie tworząca zysku. Fundacja podjęła misję promowania racjonalnego wykorzystania energii oraz przyjaznego środowiska jej wytwarzania, a od 1999 roku również misję tworzenia nowych miejsc pracy. FEWE jest uznaną w kraju i za granicą organizacją prowadzącą działalność w zakresie szeroko rozumianej gospodarki energetycznej. Tworzy i doprowadza do praktycznego stosowania nowoczesne rozwiązania techniczne, ekonomiczne, finansowe i organizacyjne, stąd swoje działania i pomoc kieruje zarówno do decydentów politycznych, działaczy społecznych, jak i producentów, dostawców i konsumentów energii. W celu zapewnienia sobie stałości finansowania Fundacja podejmuje również działalność gospodarczą. W projekcie PEMP występuje jako Agencja Wdrażająca program.

[www.fewe.pl](http://www.fewe.pl)

## **POLSKI PROGRAM EFEKTYWNEGO WYKORZYSTANIA ENERGII W NAPĘDACH ELEKTRYCZNYCH PEMP**



*Publikację sfinansowano ze środków Globalnego Funduszu Środowiska GEF i Programu Narodów Zjednoczonych ds. Rozwoju UNDP*

Autorzy:

**Prof. dr hab. inż. Marian P. Kaźmierkowski**

*Nowoczesne energooszczędne układy sterowania i regulacji napędów z silnikami indukcyjnymi klatkowymi.*

**Dr inż. Marian Kalus**

*Dobór silników elektrycznych*

**Mgr inż. R. Zwierchanowski**

*Opis projektu, wybrane fragmenty Dokumentu Projektu PEMP*

*W książce omówiono główne zasady i kierunki działań podejmowanych w ramach projektu pt. Polski program efektywnego wykorzystania energii w napędach elektrycznych. Przedstawiono podstawowe metody sterowania i regulacji energooszczędnych napędów z silnikami indukcyjnymi klatkowymi zasilanych z falowników napięcia PWM oraz problematykę doboru silników elektrycznych do konkretnych urządzeń mechanicznych.*

© Copyright by Krajowa Agencja Poszanowania Energii S.A.

Wydawca: Krajowa Agencja Poszanowania Energii S A,

ul. Mokotowska 35, 00-560 Warszawa

[www.kape.gov.pl](http://www.kape.gov.pl)

Wydanie I, Warszawa, 2004



Projekt graficzny wydawnictwa: **Janusz Pilecki**

Druk i oprawa: **GRAF, EFEKT**

ISBN 83-911287-0-9

<b>Streszczenie</b>	<b>5</b>
<b>I. Wprowadzenie</b>	<b>7</b>
1. Tło projektu	7
2. Założenia polskiej polityki energetycznej	9
3. Bariery wzrostu efektywności energetycznej w elektrycznych układach napędowych	10
4. Opis projektu	12
a) Cele projektu	12
b) Wdrożenie strategii i wybór instrumentów	13
c) Działania w ramach projektu i oczekiwane wyniki	14
d. Opracowanie Polityki Efektywności Energetycznej w Przemysle dla Energooszczędnych Napędów	19
<b>II. Nowoczesne energooszczędne układy sterowania i regulacji napędówz silnikami indukcyjnymi klatkowymi</b>	<b>22</b>
1. Wprowadzenie	22
2. Opis silnika indukcyjnego klatkowego przy zastosowaniu wektorów przestrzennych [1,7]	22
3. Podział metod sterowania częstotliwościowego silników klatkowych	25
3.1. Sterowanie skalarne	25
3.2. Sterowanie wektorowe	28
3.2.1. Sterowanie polowo zorientowane (FOC)	28
3.2.1.1. Podstawy fizyczne	28
3.2.1.2. Podstawy matematyczne	29
3.2.2. Bezpośrednie sterowanie momentu (DTC)	31
3.2.2.1. Podstawy fizyczne	31
3.2.2.2. Podstawy matematyczne	32
4. Schematy blokowe układów sterowania polowo zorientowanego (FOC)	36
4.1. Transformacje i układy estymacji momentu i strumienia stosowane w systemach sterowania polowo zorientowanego	36
4.1.1. Zmiana liczby faz ABC/ $\alpha$ - $\beta$ oraz $\alpha$ - $\beta$ /ABC	36
4.1.2. Transformacje współrzędnych kartezjańskich: $\alpha$ - $\beta$ / $x$ - $y$ oraz $x$ - $y$ / $\alpha$ - $\beta$	37
4.1.3. Układy estymacji wektora strumienia	38
4.1.4. Układy estymacji momentu elektromagnetycznego	41
4.2. Sterowanie bezpośrednie FOC	41
4.2.1. Bezpośrednie sterowanie FOC z histerezową regulacją prądów	41
4.2.2. Bezpośrednie sterowanie FOC z liniowymi regulatorami prądów (PI) pracujących w synchronicznym układzie współrzędnych	42
5. Schematy blokowe układów bezpośredniego sterowania momentu (DTC)	43
5.1. Układ bezpośredniego sterowania momentu (DTC) z kołowym kształtem trajektorii wektora strumienia	43
5.2. Układ bezpośredniego sterowania momentu (DTC) z sześciokątnym kształtem trajektorii wektora strumienia	45
6. Właściwości dynamiczne	46
7. Zakończenie i wnioski	47
8. Literatura	48
<b>III. Dobór silników elektrycznych</b>	<b>49</b>
1. Wprowadzenie	49
2. Dobór silnika pod względem parametrów elektrycznych i mechanicznych w zależności od parametrów sieci zasilającej i wymagań urządzeń napędzanych – wytyczne (załączniki 1–4)	50
2.1. Napięcie i częstotliwość znamionowa silnika	50
2.2. Rodzaj prądu	50
2.3. Prędkość obrotowa	50
2.4. Silniki z regulacją prędkości obrotowej	50
2.5. Moc silnika	51
2.5.1. Postanowienia ogólne	51

2.5.2. Moc silnika przy pracy ciągłej (S1)	52
2.5.3. Moc silnika przy pracy dorywczej (S2)	52
2.5.4. Moc silnika przy pracy okresowej przerywanej (S3, S4, S5)	53
2.5.5. Moc silnika przy pracy okresowej długotrwałej (S6, S7, S8)	53
2.5.6. Moc silnika przy pracy nieokresowej (S9)	54
2.5.7. Moc silnika z regulacją prędkości obrotowej	54
2.6. Moment obrotowy	54
2.7. Wytrzymałość mechaniczna	54
3. Dobór wyposażenia do silników elektrycznych – wytyczne (załącznik 3)	55
3.1. Urządzenia rozruchowe	55
3.1.1. Dobór urządzeń rozruchowych	55
3.1.2. Prąd rozruchu silników	55
3.1.3. Spadek napięcia	55
3.2. Urządzenia sterujące	56
3.2.1. Dobór urządzeń sterujących	56
3.2.2. Wyłączanie przy sterowaniu zdalnym	56
3.2.3. Blokady	56
3.3. Przyrządy pomiarowe	56
3.4. Urządzenia sygnalizacyjne	56
4. Dobór zabezpieczeń do silników elektrycznych – wytyczne	57
4.1. Zabezpieczenia silników o napięciu znamionowym nieprzekraczającym wartości 1000 V	57
4.1.1. Zabezpieczenia zwarciowe	57
4.1.2. Zabezpieczenia przeciążeniowe	57
4.1.3. Zabezpieczenia zanikowe	58
4.1.4. Zabezpieczenia przed nadmiernym podwyższeniem prędkości obrotowej	58
4.1.5. Zabezpieczenie silników synchronicznych przed wypadnięciem z synchronizmu	58
4.1.6. Inne zabezpieczenia	59
4.2. Zabezpieczenia silników o napięciu znamionowym powyżej 1000 V	59
4.2.1. Postanowienia ogólne	59
4.2.2. Zabezpieczenie od skutków zwarć międzyfazowych	59
4.2.3. Zabezpieczenie od skutków zwarć doziemnych	59
4.2.4. Zabezpieczenie przeciążeniowe	59
4.2.5. Zabezpieczenie zanikowe	60
5. Dobór przewodów zasilających – wytyczne	60
5.1. Dobór przekroju przewodów	60
5.1.1. Przekrój przewodów zasilających silnik	60
5.1.2. Przekrój przewodów w obwodzie wirnika silnika indukcyjnego pierścieniowego	60
5.1.3. Przekrój przewodów w obwodach wzbudzenia	60
5.2. Przyłączanie przewodów	61
5.2.1. Wymagania ogólne	61
5.2.2. Doprowadzenie przewodów do zacisków silnika i jego wyposażenia	61
5.2.3. Łączenie żył przewodów z zaciskami silnika lub przyrządu	61
6. Ustawienie silników – wytyczne	61
6.1. Wymagania ogólne	61
6.2. Wyrównywanie osi i płaszczyzn	61
6.3. Umocowanie silników na fundamencie	62
7. Realizacja odbioru technicznego – wytyczne	62
7.1. Przygotowanie do odbioru	62
7.2. Uruchomienie bez obciążenia	62
7.3. Praca próbna pod obciążeniem	63
7.4. Ocena wyników badań	63
7.5. Protokół z badań	63
8. Krótkie podsumowanie	63
<b>ZAŁĄCZNIK 1</b>	64
Model cieplny silnika	64
Podstawowe zależności termiczne [1, 2]	64
Praca dorywcza	67
Przykład Z1-1	71
Przykład Z1-2	72
Przykład Z1-3	73

Praca przerywana	75
ZAŁĄCZNIK 2	79
Metody wyznaczania mocy silnika przy różnych obciążeniach	79
Wyznaczanie wartości zastępczych prądu, momentu i mocy	80
Przykład Z2-1	84
Przykład Z2-2	85
Przykład Z2-3	86
Przykład Z2-4	90
Metoda strat zastępczych	91
Przykład Z2-5	94
Metoda przyrostów temperaturowych	98
Obliczanie mocy silników przy temperaturze otoczenia różniącej się od znormalizowanej temperatury maksymalnej	100
Przykład Z2-6	102
Dobór silników z uwzględnieniem ekonomicznego kryterium trwałości	102
ZAŁĄCZNIK 3	106
Parametry charakteryzujące maszyny elektryczne prądu przemiennego i stałego	106
Nazwy i określenia	106
Rodzaje pracy	108
Dane znamionowe	119
Warunki w miejscu pracy	119
Zasilanie elektryczne silników prądu przemiennego	119
Silniki prądu stałego zasilane z przekształtników	120
Graniczne wartości przyrostów temperatury	121
Inne charakterystyki i badania	123
ZAŁĄCZNIK 4	127
Wskazówki dotyczące stosowania rodzaju pracy S10 oraz ustalenia wartości względnej przewidywanej trwałości cieplnej TL	127
Literatura	128

# 1

## Streszczenie

Zastosowanie układów napędowych z wysoko sprawnymi silnikami elektrycznymi (klasy eff1) w miejsce standardowych (klasy eff2 i eff3) może przynieść oszczędności w zużyciu energii elektrycznej w poszerzonej Unii Europejskiej rzędu 200 mld kWh rocznie. W ciągu najbliższych 20 lat oszczędności w zużyciu energii elektrycznej mogą spowodować redukcję zapotrzebowania na moc zainstalowaną nowych elektrowni o 45 GW, co z kolei odpowiada pomniejszeniu kosztów operacyjnych w przemyśle, wynikających z redukcji kosztów obsługi i usprawnień produkcji o około 10 mld euro rocznie. Dodatkowo powstają oszczędności w wysokości 6 mld euro rocznie z tytułu zmniejszenia kosztów związanych z ochroną środowiska. Ale najistotniejszym zjawiskiem jest możliwość redukcji emisji CO<sub>2</sub> o co najmniej 100 mln ton w skali roku .

W Polsce istnieje znaczny potencjał energii elektrycznej w układach napędowych. Jego efektywne wykorzystanie mogłoby wydatnie przyczynić się do zredukowania emisji gazów cieplarnianych. Mimo że racjonalne wykorzystanie energii stanowi obszar priorytetowy polskiej polityki energetycznej i ochrony klimatu Ziemi, z powodu istnienia licznych barier udział energooszczędnych silników elektrycznych w rynku sprzedaży jest obecnie bardzo mały.

Celem „Polskiego programu efektywnego wykorzystania energii w napędach elektrycznych” (PEMP) jest pokonanie istniejących barier oraz upowszechnienie stosowania energooszczędnych silników elektrycznych. Działania związane z realizacją projektu PEMP będą dotyczyć kluczowych technologii i sektorów wymienionych w „Założeniach polityki energetycznej polski do roku 2025” ze szczególnym uwzględnieniem, z uwagi na swoją energochłonność, przemysłu wytwórczego, sektora energetycznego (energia cieplna), gospodarki komunalnej (zaopatrzenie w wodę oraz odprowadzanie i oczyszczanie ścieków), a także górnictwa i kopalnictwa.

W ramach projektu PEMP podjęte zostaną działania zmierzające do pokonania istniejących barier informacyjnych, finansowych i instytucjonalnych. Przyczyni się to do skutecznej realizacji projektów energooszczędnych w wielu newralgicznych sektorach gospodarki.

Działania te doprowadzą do realizacji czterech głównych zadań projektu:

- rozbudowa potencjału poprzez dostarczanie informacji i usług związanych z energooszczędnymi napędami elektrycznymi,
- wdrożenie czterech projektów demonstracyjnych z zakresu efektywnego wykorzystania energii w napędach elektrycznych w kilku kluczowych sektorach gospodarki,

- transformacja rynku silników elektrycznych poprzez zastosowanie systemu bodźców finansowych dla producentów silników i napędów, jak również rozwijanie świadomości dotyczącej efektywności energetycznej w napędach elektrycznych, a także,
- upowszechnienie i wzmocnienie polityki wzrostu efektywności energetycznej, w szczególności w zakresie energooszczędnych układów napędowych.



# Wprowadzenie

## 1. Tło projektu<sup>1</sup>

W okresie ostatnich trzynastu lat Polska przeprowadziła fundamentalne i skuteczne reformy społeczno-gospodarcze prowadzące do transformacji z gospodarki centralnie planowanej do gospodarki rynkowej. Po społeczno-gospodarczej terapii szokowej z początku lat dziewięćdziesiątych, Polska wykazuje coroczny stabilny, trwały wzrost gospodarczy średnio prawie 6% PKB. W latach 1991-2003 PKB w Polsce wzrósł łącznie 64,7% (licząc w cenach stałych z 2003 roku).

Produktywność zużytej energii pierwotnej w tym okresie znacząco wzrosła ze 118,3 PLN/GJ w roku 1991 do 203,4 PLN/GJ w 2002 roku. Pomimo wzrostu PKB zużycie energii elektrycznej w Polsce w ostatnich ośmiu latach praktycznie pozostało na niezmiennym poziomie. Niemniej jednak Polska jest nadal krajem o dużej elektrochłonności w porównaniu do innych krajów OECD. Na przykład elektrochłonność w roku 1998 w Polsce była około cztery razy wyższa niż w takich krajach jak Niemcy, Szwajcaria, Dania czy Holandia i wynosiła 0,79 MWh/1000 USD.

Produkcja energii w Polsce oparta jest głównie na wykorzystaniu węgla kamiennego i brunatnego. W elektrowniach i elektrociepłowniach opalanych węglem wytwarzane jest 95% energii elektrycznej. Skutkiem tego, procentowy udział dwutlenku węgla emitowanego przy wytwarzaniu energii elektrycznej w łącznej krajowej emisji stanowi 38%, z czego 50% przypada na elektryczne układy napędowe (tzn. 64 mln ton CO<sub>2</sub> rocznie). W 2001 roku roczna emisja CO<sub>2</sub> w Polsce wyniosła 318 mln ton.

Elektryczne układy napędowe składające się głównie z silników elektrycznych, układów zasilających, regulacyjnych oraz obciążających, takich jak np. pompy czy wentylatory, zużywają 40 do 50% energii elektrycznej wyprodukowanej na potrzeby polskiego przemysłu. Udział ten rozkłada się różnie w poszczególnych sektorach gospodarki: 40-90% w sektorze produkcyjnym i w przedziale 20-40% w sektorze gospodarstw domowych i gospodarki komunalnej. Największe udziały w zużyciu energii elektrycznej w Polsce, który wynosił ponad 120 TWh rocznie mają: działalność wy-

---

<sup>1</sup> W oparciu o dane dostępne w 2004 roku.

twórcza (35%), zaopatrzenie w energię, gaz, ciepło i wodę (17%) oraz gospodarstwa domowe (17%).

Najbardziej znaczącym zastosowaniem elektrycznych układów napędowych (60% zużycia energii elektrycznej) jest ich wykorzystanie do podnoszenia ciśnienia (sprężania), tłoczenia i przesyłu cieczy i gazów przy użyciu pomp, wentylatorów, kompresorów itp., w trzech sektorach przemysłu: sektorze wytwórczym, energetycznym (zaopatrzenie w energię, gaz, ciepło i wodę) oraz w górnictwie i kopalnictwie. Ocenia się, iż potencjał techniczny<sup>2</sup> oszczędności energii elektrycznej w elektrycznych układach napędowych, w ich zastosowaniach we wspomnianych sektorach, wynosi 3,9 TWh/rok. Pozostałe 40% zużycia energii elektrycznej przez elektryczne układy napędowe następuje w transporcie pasażerskim i towarowym oraz przy przetwarzaniu surowców. Łączny potencjał techniczny oszczędności jest szacowany na 6,3 TWh/rok (stanowi to 5,1% całkowitego zużycia energii elektrycznej w Polsce)<sup>3</sup>.

Potencjał ekonomiczny oszczędności energii w elektrycznych układach napędowych wynosi 5,6 TWh/rok, biorąc pod uwagę tylko projekty o wskaźniku okresu zwrotu mniejszym niż 10 lat lub 3,1 TWh/rok dla wskaźnika poniżej 6 lat. Wskaźnik okresu zwrotu w ocenie potencjału ekonomicznego jest miernikiem bardzo konserwatywnym, który uwzględnia jedynie wartość oszczędności kosztów energii elektrycznej. Nie uwzględnia innych kosztów i dodatkowych korzyści, takich jak zmniejszenie zużycia wody, zmniejszenie strat powietrza i gazów czy też automatyzacja oraz zarządzanie procesami. Oszczędność energii elektrycznej rzędu 6,3 TWh/rok, lub wykorzystanie całego potencjału technicznego, przełożyłby się na zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych w Polsce o 6,8 mln ton CO<sub>2</sub> rocznie. Ta wielkość odpowiada 2,1% całkowitej emisji gazów cieplarnianych w Polsce w 2001 roku.

Wnioski z powyższej analizy są następujące:

- potencjał techniczny dla poprawy efektywności energetycznej w elektrycznych układach napędowych w Polsce jest duży, zarówno w wartościach bezwzględnych jak i względnych;
- istnieje duży potencjał ekonomiczny dla wzrostu sprawności energetycznej z krótkimi okresami zwrotu, które spełniają przeciętne warunki inwestycyjne;
- znaczny potencjał ekonomiczny istnieje również przy dłuższych okresach zwrotu z inwestycji, który może być wykorzystany przy zastosowaniu bodźców i zachęt finansowych skracających okres zwrotu;
- przemysł wytwórczy, sektor energetyczny i dostaw wody oraz górnictwo – pełniąc istotne funkcje z punktu widzenia potrzeb gospodarczych – stanowią ważny przed-

---

<sup>2</sup> Potencjał dostępny – przy założeniu zastosowania najlepszych technologii dostępnych na światowych rynkach, do tych przypadków, w których czas pracy przekracza ogółem 2,000 godzin/rok przy stałym obciążeniu wysokosprawnych silników elektrycznych i przy co najmniej 30% zmian w obciążeniu dla układów zmiennej regulacji prędkości obrotowej – VSD.

<sup>3</sup> Źródło: FEWE, 2000..

miot działań prowadzących do racjonalnego zużycia energii, wykazując się największym potencjałem technicznym i ekonomicznym, prowadzącym do wzrostu sprawności w zakresie użytkowania napędów elektrycznych;

- wzrost sprawności energetycznej może znacznie zredukować poziom krajowej emisji gazów cieplarnianych w Polsce, a tym samym wspierać działalność Polski jako strony „Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu” – UNFCCC (*UN Framework Convention on Climate Change*).

## 2. Założenia polskiej polityki energetycznej

Głównymi punktami rządowej *Długookresowej strategii trwałego i zrównoważonego rozwoju* (Rada Ministrów, czerwiec 2000) są: racjonalne wykorzystanie zasobów naturalnych, promocja zaawansowanych i czystych technologii oraz dostęp do edukacji i informacji.

II Polityka Ekologiczna Państwa (przyjęta przez Radę Ministrów Rzeczypospolitej Polski w czerwcu 2000 roku) określa m.in. następujące priorytety polityki ochrony powietrza i klimatu.

- **Cele średniookresowe (do 2010 r.):**
  - zredukować emisję zanieczyszczających powietrze pyłów o 75%, SO<sub>2</sub> o 56%, NO<sub>x</sub> o 31% w stosunku do poziomu emisji z roku 1990;
  - wypełnić wymogi Protokołu z Kioto związane z redukcją emisji gazów cieplarnianych przy wykorzystaniu najnowocześniejszych, energooszczędnych technologii i odnawialnych źródeł energii.
- **Cele długookresowe (do 2025 r.):**
  - przeprowadzić głęboką restrukturyzację wzorców produkcji i konsumpcji poprzez wzrost efektywności zużycia energii i surowców (zasobów) oraz rozszerzenie wykorzystania odnawialnych źródeł energii.

W podstawowym dokumencie dotyczącym polityki energetycznej Polski. *Założenia Polityki Energetycznej Polski do 2020 roku* – przyjęty przez Radę Ministrów RP w lutym 2000 r. sformułowane są dwa główne cele:

- integracja zarządzania energią i środowiskiem,
- obniżenie poziomu energochłonności.

W *Założeniach Polityki Energetycznej Polski do 2020 roku* zawarto konkretne zalecenia dotyczące obniżenia energochłonności gospodarki narodowej, zarówno w obszarze wykorzystania energii pierwotnej, jak też zużycia energii elektrycznej.

*Założenia Polityki Energetycznej Polski do 2020 roku* poruszają kwestie polityki efektywności energetycznej w rozdziale „Strategia na rzecz zwiększenia efektywności energetycznej”. W dokumencie określono także podstawowe zalecane technologie energooszczędne takie jak, np. skojarzona produkcja ciepła i energii elektrycznej, napędy elektryczne o zmiennej regulowanej prędkości obrotowej oraz urządzenia i sprzęt efektywne energetycznie. Rozdział 6 „Plany działania państwa” w punkcie

6.6 „Polityka na rzecz efektywności energetycznej” nadmienia o potrzebie rozwoju stosownych mechanizmów rynkowych. W tekście zawarto stwierdzenie, iż polityka racjonalizacji zużycia energii wymagać będzie zastosowania konkretnych środków w postaci:

- regulacji bezpośredniej (standardy),
- stymulacji rynku (ekonomiczna i podatkowa),
- użycia narzędzi wspierających (informacja, edukacja, prace badawczo-rozwojowe).

Minister gospodarki i pracy odpowiedzialny za wdrożenie polityki energetycznej ma przygotować odpowiednie zintegrowane programy rządowe, których celem będzie m.in. wprowadzenie energooszczędnych produktów na polski rynek, w tym energooszczędnych układów napędowych. Programy te mają także za zadanie wprowadzić odpowiednie mechanizmy rynkowe.

Polska jest sygnatariuszem UNFCCC i zobowiązała się osiągnąć cel w postaci 8% redukcji gazów cieplarnianych określony w Protokole z Kioto. Dokument znany pod nazwą *The Second National Communication of Poland to the UNFCCC (1998) (Drugie Narodowe Sprawozdanie Polski dla UNFCCC)* wymienia wzrost efektywności energetycznej w przemyśle i gospodarce komunalnej jako jeden z podstawowych środków prowadzących do redukcji krajowej emisji gazów.

W Unii Europejskiej prowadzonych jest obecnie wiele przedsięwzięć zmierzających do zwiększenia efektywności energetycznej napędów elektrycznych, wykorzystujących m.in. wnioski z opracowania *Europejskiej bazy danych silników energooszczędnych* (EuroDEEM) oraz ustaleń – w ramach dobrowolnego porozumienia – *Europejskiego stowarzyszenia producentów silników* CEMEP. W wyniku tych działań w ciągu kilku najbliższych lat nastąpi m.in. przesunięcie na rynku silników z klasy 3 do klasy 2 i 1<sup>4</sup>. Dzięki realizacji projektu PEMP Polska będzie mogła aktywnie współuczestniczyć w aktualnych i przyszłych zamierzeniach UE 25 związanych z racjonalnym użytkowaniem energii.

### **3. Bariery wzrostu efektywności energetycznej w elektrycznych układach napędowych**

Jak wynika z przeprowadzonych analiz rynkowych olbrzymia większość użytkowników-inwestorów (ok. 75%) jest gotowa zainwestować w energooszczędne układy napędowe, o ile prosty okres zwrotu z inwestycji będzie mniejszy niż 2-3 lata (patrz Tabela 1).

---

<sup>4</sup> Klasy (sprawności) silników są wyznaczone poprzez kombinację prędkości obrotowej oraz mocy zależnej od wielkości silnika i są opisane w tabelach referencyjnych wykorzystywanych przez Komisję Europejską. Do klasy 1 należą silniki o najwyższej sprawności. Tabele te dostępne są na żądanie.

Tabela 1. Skłonność do inwestowania w energooszczędne układy napędowe

Prosty okres zwrotu	Skłonność respondentów do inwestowania
mniej niż 1 rok	95%
mniej niż 3 lata	63%
mniej niż 6 lat	6%
mniej niż 10 lat	3%

W oparciu o powyższe dane, określono dwie kategorie barier:

*Bariery dla inwestycji rentownych.* Potencjał ekonomiczny inwestycji z prostym okresem zwrotu mniejszym niż 2–3 lata, które to kryterium stosowane jest przez większość inwestorów, nie jest obecnie wykorzystany. Większość końcowych odbiorców energii (potencjalnych inwestorów):

- nie wie o możliwościach redukcji kosztów energii elektrycznej poprzez w/w inwestycje i nie dysponuje informacjami na w/w temat;
- nie jest przekonanych, iż inwestycje w nowe efektywne technologie opłacają się dzięki redukcji kosztów;
- nie ma świadomości o istniejących technicznych i finansowych możliwościach wdrożenia efektywnych energetycznie urządzeń;
- nie posiada możliwości technicznych i finansowych przygotowania projektu inwestycyjnego.

*Bariery dla inwestycji o niższej stopie zysku.* Jeszcze większy potencjał istnieje dla inwestycji z okresem zwrotu nieprzekraczającym 6 lat. Jednak projekty tego typu nie są wdrażane, gdyż potencjalni inwestorzy postrzegają je jako zbyt mało rentowne. Poprawa efektywności pracy elektrycznych układów napędowych, często oprócz zmniejszenia zużycia energii elektrycznej, przynosi także dodatkowo znaczące korzyści w postaci m.in.: obniżenia kosztów eksploatacyjnych i serwisowych, niższych kosztów ochrony przed hałasem. Przy uwzględnieniu tych korzyści wzrasta rentowność inwestycji.

### **Charakterystyka barier rynkowych**

#### a) Bariery informacyjne i braku świadomości.

- Brak świadomości wśród pracowników zakładów przemysłowych oraz społeczności lokalnych w zakresie dostępnych technologii i towarzyszących im korzyści ekonomicznych i środowiskowych, wynikających z redukcji zużycia energii elektrycznej przez elektryczne układy napędowe. W przedsiębiorstwach przeważają tendencje do przewijania starych silników pomimo tego, iż nie jest to opłacalne w dłuższym okresie.
- Brak informacji i wiedzy na poziomie przedsiębiorstw dotyczącej technicznego oraz ekonomicznego potencjału oszczędności energii elektrycznej przy wymianie

starych silników na nowe, właściwie dobrane, efektywne energetycznie, z układami VSD – zmiennej regulacji prędkości obrotowej (w uzasadnionych przypadkach).

- Brak informacji na temat jakości i sprawności energetycznej silników (brak standaryzacji oraz systemu etykietowania).
- Zmniejszenie zużycia energii elektrycznej ma często znaczenie drugorzędne dla przedsiębiorstw i nie jest uważane za istotny czynnik w planach inwestycyjnych. Kładzie się zbyt wielki nacisk na koszty inwestycyjne w stosunku do kosztów operacyjnych.

#### **b) Bariery finansowe**

- Brak środków finansowych i dostępnych mechanizmów finansowych wspierających inwestycje.
- Inwestorzy traktują inwestycje w energooszczędne układy napędowe jak inwestycje wysokiego ryzyka.
- Koszty transakcyjne mniejszych i średnich inwestycji są wysokie.

#### **c) Bariery instytucjonalne**

- Brak narodowej polityki energetycznej i programów na rzecz wzrostu efektywności energetycznej w przemyśle.
- Brak utrwalonej wiedzy fachowej, która dostępna byłaby dla wszystkich zainteresowanych.
- Nie ma silnego promotora lub rzeczownika efektywności energetycznej w układach napędowych. W Polsce nie istnieje żadna zawodowa organizacja producentów silników.
- Zbyt powoli rozwija się działalność w obszarach nowych zawodów, świadczących wyspecjalizowane wysokiej jakości usługi energetyczne, jak na przykład przedsiębiorstwa usług energetycznych – ESCO (*energy services companies*).

#### **d) Typowe trudności przygotowania projektu**

- Brak odpowiednio przygotowanej kadry techniczno-ekonomicznej potrafiącej przygotować w odpowiedni sposób projekt inwestycyjny w zakresie energooszczędnych układów napędowych.
- Brak warunków do zastosowania nowych technologii z uwagi na techniczno-ekonomiczną sytuację przedsiębiorstwa.

## **4. Opis projektu**

### **a) Cele projektu**

Głównym celem projektu PEMP jest redukcja krajowej emisji gazów cieplarnianych poprzez pokonanie istniejących barier, upowszechnienie na rynku wysoko sprawnych silników elektrycznych oraz związany z tym wzrost efektywności energetycznej

napędów elektrycznych (obejmujących układy o regulowanej prędkości obrotowej).

W projekcie zostały określone następujące cele pośrednie<sup>5</sup>:

- zwiększenie sprzedaży energooszczędnych silników do około 15% całego polskiego rynku silników elektrycznych, jako bezpośredni wynik projektu w okresie jego realizacji (pięć lat);
- zwiększenie efektywności energetycznej napędów elektrycznych poprzez upowszechnienie VSD – układów regulowanej prędkości obrotowej (włącznie z silnikami energooszczędnymi);
- osiągnięcie celu średniookresowego, tj. udziału w sprzedaży silników energooszczędnych do 30% rynku w 2013 r.;
- oszczędność energii elektrycznej – poprzez promowanie optymalizacji napędów elektrycznych, włączając w to zastosowanie energooszczędnych silników oraz układów o zmiennej regulacji prędkości obrotowej – na poziomie 55,7 GWh w roku 2007 oraz 231,6 GWh w roku 2013;
- obniżenie krajowej emisji CO<sub>2</sub> o 832 tony do 2008 roku (bezpośrednio w wyniku realizacji projektu PEMP) i o 3,7 Mton CO<sub>2</sub> do 2013 roku, wliczając w to wpływ średniookresowy (łącznie w okresie trwania przewidzianych projektem inwestycji).

## **b) Wdrożenie strategii i wybór instrumentów**

Dokonując wyboru instrumentów do realizacji projektu PEMP zwracano uwagę, aby były adekwatne do skali trudności w pokonywaniu najważniejszych wyżej wymienionych barier oraz gwarantowały optymalną realizację założeń polskiej polityki energetycznej i były zgodne ze strategią wzrostu efektywności energetycznej.

### **1. Przygotowanie optymalnych warunków do realizacji programu dla twórców projektów, pośredników, inwestorów oraz tzw. użytkowników końcowych**

Wszechstronna pomoc (merytoryczna, techniczna i finansowa) dla tworzonych projektów m.in. poprzez organizowanie szkoleń nt. technologii, przygotowywania projektów oraz możliwości finansowania.

### **2. Instrumenty instytucjonalne**

- Kreowanie i wspieranie polityki efektywności energetycznej w przemyśle.
- Wzmacnianie możliwości trwałych mechanizmów instytucjonalnych oraz punktów ogniskujących i koordynujących; zapewnienie informacji, wiedzy i usług związanych z energooszczędnymi napędami elektrycznymi.
- Ustanowienie Centrum Doradztwa i Promocji w zakresie efektywnych układów napędowych.

---

<sup>5</sup> Z uwagi na znaczny odstęp czasowy pomiędzy fazą przygotowania projektu i podpisaniem kontraktu po rozpoczęciu realizacji projektu, postawione cele zostaną zweryfikowane przez ocenę stanu bazowego.

### **3. Instrumenty finansowe**

- Zapewnienie dotacji inwestycyjnych dla projektów demonstracyjnych.
- Stworzenie bodźcowego systemu finansowego dla producentów energooszczędnych silników, jak również producentów zespołów napędowych z wykorzystaniem tego typu silników.
- Rozwój nowych instrumentów finansowych (np. poprzez firmy typu ESCO).

### **4. Instrumenty informacyjne oraz wzrost świadomości**

- Upowszechnienie informacji i wiedzy o energooszczędnych napędach elektrycznych.
- Podniesienie stanu wiedzy na temat dostępnych technologii i wynikających z nich korzyści poprzez projekty demonstracyjne.
- Przygotowanie systemu etykietowania silników elektrycznych.
- Wzrost stanu świadomości w w/w dziedzinach, poprzez podjęcie działań marketingowych i promocyjnych skierowanych do użytkowników końcowych.
- Zbieranie i analiza danych rynkowych.

#### **c) Działania w ramach projektu i oczekiwane wyniki**

W ramach projektu PEMP realizowane są cztery główne działania koordynowane poprzez Jednostkę Zarządzającą Programem – PMU, zlokalizowaną w Krajowej Agencji Poszanowania Energii S.A. (KAPE S.A).

#### **1. Dostarczanie informacji i usług związanych z energooszczędnymi elektrycznymi układami napędowymi**

Pierwsze podstawowe działanie koncentruje się w obszarze budowania potencjału i pobudzenia świadomości, poprzez dostarczanie informacji i usług związanych z energooszczędnymi elektrycznymi układami napędowymi. Ta działalność będzie realizowana poprzez Centrum Wdrożeniowe PEMP z siedzibą przy Fundacji na Rzecz Efektywnego Wykorzystania Energii (FEWE) w Katowicach.

Działania te polegać będą na:

- ustanowieniu stałego, trwałego, instytucjonalnego mechanizmu dostarczania informacji i usług na rzecz rynku silników/napędów energooszczędnych;
- zbieraniu i dostarczaniu informacji na temat rynku silników energooszczędnych w Polsce. Analizy rynkowe oraz badania rynku związane z rynkiem energooszczędnych napędów w Polsce będą przygotowywane dla potencjalnych nabywców. Pierwszym etapem będzie wykonanie przeglądu aktualnej ilości i stanu napędów na rynku. Informacja ta pozwoli stworzyć wstępny obraz rynku energooszczędnych napędów, który zostanie wykorzystany w celu dokonania oceny wyników projektu w zakresie transformacji tego rynku. Z racji, że projekt zakłada osiągnięcie transformacji rynku, informacja ta będzie miała kluczowe znaczenie przy określeniu powodzenia przedsięwzięcia i posłuży jako element działań oceniających. Dodatkowo informacje o energooszczędnych silnikach i napędach będą opracowywane i rozpowszechniane wśród potencjalnych użytkowników końcowych oraz będą podstawą



świadczonych usług na rzecz tego rynku;

- dokumentowaniu i opracowywaniu informacji o zaletach stosowania silników energooszczędnych;
- dostarczaniu usług wsparcia technicznego i doradztwa biznesowego dla projektów pilotażowych. Realizacja tego zadania zapewni pomoc techniczną i wiedzę finansową niezbędną w przygotowaniu małych i średnich projektów, dotyczących zastosowania silników energooszczędnych. Techniczna wykonalność, analizy finansowe, dobór technologii, ocena i redukcja ryzyka – te właśnie działania będą wspierane. Przygotowanie projektów biznesowych będzie wspomagane w taki sposób, by posiadały one zdolność kredytową lub/i w zakresie opracowania aplikacji dla projektów. Opracowany zostanie schemat audytów energetycznych dla elektrycznych układów napędowych z uwzględnieniem zwłaszcza małych i średnich przedsiębiorstw;
- szkoleniu projektantów, wzmocnieniu organizacji przemysłowych i finansowych w zakresie audytów energetycznych, studiów wykonalności i możliwości korzystania z dofinansowania itp. Centrum Wdrożeniowe PEMP przygotowuje i uruchomi system doradczy dla twórców projektów (tj. projektantów i inwestorów) oraz organizacji finansowych. Warsztaty i seminaria będą organizowane dla zainteresowanych, tj. przedstawicieli przemysłu, samorządu gospodarczego, izb przemysłowych, handlowych, przedsiębiorstw, banków. Opracowany zostanie program informacyjny o możliwościach finansowania audytów energetycznych oraz badań oceniających. W ramach systemu zostanie zaproponowany schemat (moduły i opcje) kredytowania i aplikacji dla innych źródeł finansowania. Dodatkowo system ten upowszechni wiedzę wynikającą z projektów demonstracyjnych.

Centrum Wdrożeniowe PEMP wykorzysta istniejącą wiedzę, znajomość problematyki efektywności energetycznej oraz znajomość, poprzez FEWE, instytucjonalnych uwarunkowań międzynarodowych i lokalnych. FEWE zasili projekt poprzez wkład rzeczowy, włączając w to oprogramowanie „(EFEmotor)”. Centrum Wdrożeniowe PEMP zaprojektowane jest jako organizacja generująca przychody, dzięki temu przed końcem projektu będzie finansowo niezależne.

## **2. Projekty demonstracyjne energooszczędnych silników w warunkach rynkowych**

Drugim głównym działaniem jest wdrożenie czterech projektów demonstracyjnych, mających na celu prezentację korzyści technicznych i ekonomicznych wynikających z zastosowania energoefektywnych napędów elektrycznych w niżej wymienionych sektorach gospodarczych:

- zaopatrzenia w wodę i oczyszczania ścieków;
- wytwarzania i zaopatrzenia w parę oraz ciepłą wodę;
- wytwarzania i dystrybucji energii elektrycznej;
- kopalnictwa/górnictwa;
- sektorach wytwórczych, obejmujących branże chemiczną i wyrobów chemicznych, produkcję żywności i napojów oraz produkcję celulozy i papieru.

Główną barierą związaną z realizacją projektów demonstracyjnych w projekcie PEMP jest brak wśród użytkowników końcowych informacji oraz niska świadomość zalet wynikających z użytkowania energooszczędnych układów napędowych. Informacja dotycząca potencjału technicznego i ekonomicznego napędów energooszczędnych będzie gromadzona i dostarczana potencjalnym użytkownikom końcowym. Zakłada się, że rezultaty wynikające z projektów demonstracyjnych pomogą precyzyjnie określić komponenty niezbędne przy szczegółowym opracowywaniu zadań dla jednostek wdrażających projekt PEMP.

Celem projektów demonstracyjnych jest usunięcie w/w barier i realizacja następujących zadań szczegółowych:

- zademonstrowanie potencjału ekonomicznego oraz możliwości technicznych napędów energooszczędnych;
- zapewnienie solidnych podstaw dla uzyskania powtarzalności projektów demonstracyjnych;
- przekazywanie informacji uzyskanej przy realizacji projektów demonstracyjnych w celu budowania potencjału i wiedzy dotyczącej energoefektywnych systemów napędowych.

Dla wszystkich projektów demonstracyjnych zostanie przygotowany i wdrożony system monitoringu oraz metodologia zapewniająca wykorzystanie zdobytej w trakcie realizacji projektu informacji i doświadczeń, które będą ponownie wykorzystane w przygotowaniach kolejnych projektów o podobnym profilu w różnych sektorach gospodarczych. Strategia rozwoju projektów demonstracyjnych będzie przygotowana i wdrażana w ramach działań Centrum Wdrożeniowego PEMP.

W oparciu o umowy z przedsiębiorstwami, gdzie realizowane będą projekty demonstracyjne, część finansowana w ramach projektu PEMP (łącznie 400 000 USD), po pozytywnym zakończeniu projektu demonstracyjnego, będzie zwracana z uzyskiwanych oszczędności energetycznych. Środki te zostaną zdeponowane w utworzonym na ten cel Funduszu, z którego w dalszej kolejności będą podejmowane działania na rzecz oszczędności energii w przemyśle, zgodne z działaniami realizowanymi w ramach Projektu PEMP.

### **3. Transformacja rynku i wzrost świadomości poprzez wykorzystanie mechanizmu bodźców finansowych**

Trzecie główne działanie ma na celu stymulację transformacji rynku silników elektrycznych poprzez wykorzystanie mechanizmu bodźców finansowych zwiększających potencjał produkcyjny energooszczędnych układów napędowych i silników.

- Transformacja rynku silników elektrycznych polegać ma na stymulacji producentów do produkcji wyłącznie energooszczędnych urządzeń. Celem tego działania jest usunięcie barier po to, aby rynek silników elektrycznych samodzielnie i w sposób konkurencyjny dostarczał określone produkty, a także spowodował trwałe, strukturalne oraz zachowawcze zmiany skutkujące zwiększonym stosowaniem energooszczędnych technologii. Prosty system rabatowy jest skuteczny dla zwiększenia sprzedaży, ale w krótkim czasie. Ocenia się, iż łączne koszty są – ogólnie biorąc – o wiele niższe, niż w przypadku korzystania z subsydiowania. Zasadniczym

aspektem transformacji rynku jest pokonanie barier rynkowych wpływających na ograniczenie produkcji i co za tym idzie na wielkość zakupu energooszczędnych produktów.

Zakłada się, że pozytywnie na transformację rynku energooszczędnych silników elektrycznych wpłynie:

- Utworzenie powszechnego systemu etykietowania silników, opracowanego na podstawie jednolitego schematu danych technicznych podkreślających efektywność danego wyrobu, stanowić będzie ważny jakościowy wyróżnik dla producentów, przypominający o znaczeniu efektywności w tego typu wyrobach, a dla nabywców będzie istotnym miernikiem określającym poziom energooszczędności uzyskanej w wyniku zastosowania określonego wyrobu.
- Bodźcowy system finansowy, skierowany do producentów, mający na celu pokonanie rynkowej inercji w wytwarzaniu energooszczędnych wyrobów, pomoże zapoczątkować intensywną sprzedaż energooszczędnych produktów. Bodźce finansowe zachęcą producentów silników do odbudowania zdolności produkcji energooszczędnych silników i zaoferowania nowych produktów.
- Zwiększony popyt na silniki energoefektywne, będący rezultatem wzrostu świadomości i wiedzy konsumentów, przyczyni się do zwiększenia wolumenu produkcji oraz obniżenia cen. W okresie późniejszym zachęty finansowe nie będą już oferowane, konsumenci świadomi, co do zalet tej technologii, a wyroby będą produkowane po kosztach konkurencyjnych w stosunku do tradycyjnego sprzętu.

#### **4. Etykietowanie silników energooszczędnych**

W ramach projektu PEMP zostanie przygotowane logo, które będzie wykorzystywane w sprzedaży i marketingu silników energooszczędnych.

Minimalna specyfikacja podlegających programowi silników zawierać będzie, co następuje:

1. bezpieczeństwo. Silniki energooszczędne muszą spełniać wszelkie polskie normy i standardy dotyczące bezpieczeństwa dla produktów elektronicznych/elektrycznych. Etykietowanie silników ogólnego zastosowania będzie dotyczyło jedynie silników klasy 1 i 2;
2. sprawność silnika. Elektryczna sprawność silnika winna być określona wg metod obliczeniowych zgodnych z IEC-34;
3. średni nominalny/znamionowy czas życia. Minimalny średni nominalny/znamionowy czas życia silnika nie może być krótszy niż 12 lat. Producenci muszą oferować co najmniej roczną gwarancję obejmującą wymianę produktu.

#### **5. Program bodźców finansowych dla producentów silników energooszczędnych**

Mechanizm bodźców finansowych skierowany jest głównie do tych producentów silników energooszczędnych i napędów, którzy spełniają techniczne wymagania określone w ramach projektu PEMP. Wytwórcy będą konkurowali między sobą o prawo otrzymania dofinansowania. Prawo otrzymania dofinansowania będzie przyznane tym producentom, którzy będą w stanie, przy najniższych kosztach całkowitych, zapewnić maksymalne oszczędności wynikające ze zmniejszenia zużycia energii.

Producenci sami będą decydować o wyborze typowielkości silnika spełniającego wymogi techniczne określone w projekcie. Intencją jest wykorzystanie wiedzy producentów o rynku silników energooszczędnych w celu maksymalizacji oszczędzonej energii w przeliczeniu na dolara dofinansowania. To pozwala producentom silników spełnić ogólne cele ochrony środowiska, przy równoczesnym dążeniu każdego z wytwórców do zrealizowania swoich własnych niezależnych celów gospodarczych. Producenci korzystając z dofinansowania będą mogli w dowolny sposób wykorzystać te środki, po to, aby maksymalnie zwiększyć sprzedaż silników energooszczędnych z korzyścią zarówno dla polskiego konsumenta, jak i dla redukcji szkód wyrządzanych globalnemu środowisku Ziemi.

Poniżej przedstawione są założenia liczbowe dotyczące ilości silników energooszczędnych, które zostaną sprzedane w ramach programu PEMP. Z uwagi na to, że użytkiwane oszczędności, jak i koszty inkrementalne dla silników energooszczędnych są wyższe dla mniejszych typowymiarów, do założeń przyjęto trzy klasy silników. Dane liczbowe określono przy założeniu, iż w okresie 10 lat przeciętny udział silników energooszczędnych w sprzedaży powinien osiągnąć poziom 30%. Zakładając stopniowy wzrost, przyjmujemy, iż w pierwszych 4 latach, w których program PEMP przyczyni się do transformacji rynku, sprzedaż powinna kształtować się na poziomie 15%.

*Tabela 2. Docelowy poziom sprzedaży silników energooszczędnych w Polsce <sup>6</sup>*

Klasa silnika	Moc znamionowa (kW)	Ilość jednostek sprzedanych w ramach programu (sztuki)			
		2005	2006	2007	2008
Grupa 1	0,55 – 7,5	2600	5304	10820	20694
Grupa 2	11 – 37	180	367	749	1433
Grupa 3	45 – 250	30	61	125	239
Razem		2810	5732	11694	22365
Razem w czasie 4 lat					42601
Udział w sprzedaży wszystkich silników		2,0 %	4,0 %	8,0 %	15,0 %

W celu uzyskania dofinansowania producenci będą zobligowani do przedłożenia Agencji wykonawczej oferty na swoje wyroby oraz po udanym okresie sprzedaży, dokumentację „Dowodu wykonania”. Dokumentacja „Dowodu wykonania” będzie obejmowała faktury oraz dokumenty towarzyszące sprzedaży promowanych silników przez producenta oraz jego dystrybutorów.

Dla pewności, iż PEMP obejmuje silniki energooszczędne wysokiej jakości, producenci będą zobowiązani spełnić minimalne warunki techniczne wyszczególnione w szkicu pt. „PEMP – Specyfikacja minimalnych wymogów jakościowych dla silników wysokosprawnych” kwalifikowanych do programu. Oferta zostanie oceniona

przez utworzony Komitet ds. Alokacji, który poczyni wstępne przydziały uprawnień do dofinansowania w oparciu o własną ocenę. Producenci, którzy przedłożą najatrakcyjniejsze oferty otrzymają stosunkowo największy udział w uprawnieniach do dofinansowania. Warunki o dofinansowanie zostaną określone w „Umowie producenta”, która zostanie podpisana z Agencją Wdrażającą I. Producenci otrzymają dofinansowanie wyłącznie po wyprodukowaniu, sprzedaniu asortymentu i wypełnieniu wszystkich warunków „Umowy producenta”.

W ramach realizacji warunków „Umowy producenta” wytwórcy będą przedstawiać opis działań marketingowych i planów dystrybucji, informację o dotychczasowej sprzedaży, prowadzonych kampaniach reklamowych oraz strategię promocyjną. Plan marketingowy powinien zawierać opis, w jaki sposób producent będzie promować wyroby objęte projektem PEMP, z jakimi strukturami detalicznymi i dystrybucyjnymi ma zamiar współpracować, w jaki sposób zamierza osiągnąć cele sprzedaży określone w jego wniosku.

Producenci będą mieli określony, uzgodniony w „Umowie producenta” czas na sprzedaż. Jeśli nie będzie w stanie sprzedać zadeklarowanej ilości silników, jego uprawnienia do refundacji zostaną realokowane na konkurenta osiągającego lepsze wyniki. W ten sposób program PEMP będzie kreował i umacniał siły konkurencji na rynku, co niewątpliwie przyczyni się do osiągnięcia celów programu.

W celu wykreowania zainteresowania programem bodźców finansowych zostanie zorganizowana wspólnie z producentami silników i napędów energooszczędnych ogólnopolska kampania reklamowa.

## **6. Analiza rynku na podstawie opinii klientów w celu rozwoju świadomości i akceptacji silników energooszczędnych**

Dla przeprowadzenia analizy rynkowej na temat stanu wiedzy konsumentów dotyczącej energoefektywnych systemów napędowych oraz dostępnej na rynku informacji z tej dziedziny, producenci przygotowują „Karty informacyjne konsumenta”. „Karty” będą wykorzystane do monitorowania programu oraz oceny jego realizacji. Kampania marketingowa, koordynowana przez Jednostkę Zarządzającą Programem – PMU, w połączeniu z działaniami na rzecz świadomości i rozpowszechnienia doświadczeń zdobytych w ramach programów demonstracyjnych, koncentrować się będzie na zwiększeniu wiedzy na temat znaczenia silników energooszczędnych i możliwych korzyści wynikających z ich zastosowania.

### **d. Opracowanie Polityki Efektywności Energetycznej w Przemysle dla Energooszczędnych Napędów**

Czwarty, polityczny element obejmuje zarówno instrumenty instytucjonalne, jak i informacyjne. Został on wyodrębniony z uwagi na jego specyficzny charakter oraz

---

<sup>6</sup> Docelowe poziomy sprzedaży były potwierdzone informacjami dostarczonymi przez producentów i importerów w 2000 r. Na wstępie fazy implementacyjnej projektu w 2003 r. studium wykonalności zweryfikuje postawione cele.

konieczność komunikacji merytorycznej, m.in. z docelową grupą decydentów, ekspertów i doradców na szczeblu rządowym.

Wzrost efektywności energetycznej w polskim przemyśle przyczyni się do wzrostu konkurencyjności polskiego przemysłu oraz realizacji celów ochrony środowiska zwłaszcza w walce ze zmianami klimatu Ziemi. Dobre zasady zostały przyjęte, ale nie powstały stosowne instrumenty operacyjne. Istnieje zatem pilna potrzeba wdrożenia środków i działań wzmacniających, rozszerzających i rozwijających nową politykę efektywności energetycznej i narzędzia jej realizacji.

KAPE S.A., przy pomocy Centrum PEMP, będzie odgrywać wiodącą rolę przy wspieraniu zainteresowanych szerokim uczestnictwem w programie. W tym celu potrzebne jest przygotowanie nowych mechanizmów promujących energooszczędne napędy (m.in. nowe regulacje, przepisy, dobrowolne zobowiązania itp.). Dane technologiczne i rynkowe zostaną opracowane i przedstawione na forum politycznym. Działania związane z realizacją programu związanego z silnikami energooszczędnymi będą jednocześnie skoordynowane z innymi programami na rzecz wzrostu efektywności energetycznej w przemyśle. Plany etykietowania i standaryzacji zostaną przygotowane i wdrażane wspólnie z producentami. W tym celu planowane jest wykorzystanie doświadczeń i rezultatów podobnych inicjatyw z Europy Zachodniej oraz Europy Środkowej i Wschodniej, dotyczących etykietowania energooszczędnych urządzeń.

Działalność w ramach tej części programu PEMP zapewni to, iż instrumenty przygotowane i wdrażane będą zintegrowane z oficjalną polityką państwa. Celem jest wsparcie i opracowanie polityki efektywności energetycznej dla przemysłu, koncentrującej się na poprawie efektywności energetycznej w napędach elektrycznych. Zostanie to uzyskane przez wsparcie opracowania rządowego programu promocji energooszczędnych napędów, będącego jednym z zadań ujętych w *Założeniach Polityki Energetycznej Polski*, oraz przez wspieranie opracowania polityki efektywności energetycznej i wdrożenia jej w przemyśle.

KAPE S.A. w celu wsparcia Ministerstwa Gospodarki i Pracy w przygotowaniu polityki efektywności energetycznej, w ramach programu PEMP wykona następujące cztery zadania:

### **1. Promocja przemysłowej polityki efektywności energetycznej**

- Dostarczenie decydentom politycznym informacji o instrumentach promocji efektywności energetycznej w przemyśle, włączając w to doświadczenia krajów OECD, które koncentrują się na napędach elektrycznych.
- Zorganizowanie seminariów o Umowach typu LTA i instrumentach finansowych, etykietowaniu, minimalnych standardach efektywności energetycznej, wspólnych zasadach dotyczących specyfikacji i warunków odbioru technicznego, działaniach BPI, taryfach recyklingowych i ich wpływie na napędy elektryczne. Seminaria te będą adresowane do decydentów, producentów silników oraz prowadzących prace badawczo-rozwojowe w Polsce.
- Zaprezentowanie wyników PEMP decydentom politycznym szczebla krajowego.

## **2. Opracowanie przemysłowej polityki efektywności energetycznej**

- Wsparcie opracowania narodowego planu działań na rzecz przemysłowej efektywności energetycznej z naciskiem na napędy energooszczędne.
- Wsparcie przygotowania instrumentów politycznych, oddziałujących na rzecz efektywności energetycznej w przemyśle i optymalizacja efektywności energetycznej w napędach elektrycznych.
- Przygotowanie propozycji planu działań i planów wdrożenia, ze szczególnym uwzględnieniem napędów elektrycznych.

## **3. Przygotowanie planów wdrożenia etykietowania, umów długookresowych (Long Term Agreements – LTA) i promocji najlepszych wzorów (Best Practice Initiatives – BPI) dla napędów elektrycznych**

- Przygotowanie planów etykietowania, wprowadzenia i wykorzystania w Polsce umów typu LTA oraz wzorców BPI.
- Doradzanie rządowi w sprawach wdrożenia systemów etykietowania, umów LTA oraz wzorców BPI.

## **4. Powiązanie i koordynacja z innymi programami zwiększenia efektywności energetycznej realizowanymi w Polsce**

KAPE będzie odpowiadało za powiązanie projektu PEMP z obecnymi i przyszłymi międzynarodowymi i bilateralnymi programami na rzecz poprawy efektywności energetycznej realizowanymi w Polsce, włączając w to:

- Polsko-Japońskie Centrum Poszanowania Energii – (*Poland-Japan Energy Conservation Technology Center*) – program JICA japońskiego rządu, który jest zarządzany przez Centrum Poszanowania Energii w Japonii - Energy Conservation Centre, Japan) oraz
- Izbę Clearingową Łańcucha Bałtyckiego – (*Baltic Chain-Clearing House*) duński rządowy Program Rejonu Morza Bałtyckiego (*The Danish Government Baltic Sea Region Programme*), który zarządzany jest przez Duńską Agencję Energii (*Danish Energy Agency*).
- Miejską Sieć na rzecz Efektywności Energetycznej (*The Municipal Network for Energy Efficiency* MUNEE, zarządzany przez *Alliance to Save Energy*).

Koordynacja wszystkich programów przyczyni się do przyspieszenia wdrożenia w Polsce polityki poprawy efektywności energetycznej, a zwłaszcza energooszczędnych napędów elektrycznych. Wszystkie z wyżej wymienionych programów efektywności energetycznej są koordynowane przez KAPE S.A.

# 2

## Nowoczesne energooszczędne układy sterowania i regulacji napędów z silnikami indukcyjnymi klatkowymi

### 1. Wprowadzenie

Najbardziej ekonomiczne sterowanie prędkości silników prądu przemiennego realizowane jest metodą zmiany częstotliwości zasilania. Do tego celu stosowane są powszechnie pośródnie przemienniki częstotliwości składające się z prostownika sieciowego, obwodu prądu/napięcia stałego i falownika prądu/napięcia. Dzięki stałemu postępowi w dziedzinie budowy półprzewodnikowych elementów mocy ( tranzystory MOSFET, IGBT) w rankingu topologii zwyciężył zdecydowanie falownik napięcia o modulowanej szerokości impulsów PWM (*ang.* Pulse Width Modulation). Dzięki stosowaniu wysokich częstotliwości łączeń (5–50 kHz), charakteryzuje się on zbliżonym do sinusoidalnego kształtem prądu, małymi stratami oraz wysokimi wartościami gęstości upakowania (*ang.* power density). Powyższe cechy zdecydowały iż aktualnie nawet w zakresie wielkich mocy stosowane są falowniki PWM budowane na tranzystorach IGBT. W zakresie mocy do ca 150 kW oferowane są tzw. moduły IPM (*ang.* Intelligent Power Module), które zawierają wewnątrz: izolowane sterowniki, czujniki prądu i temperatury, zabezpieczenia zwarciove i przepięciowe etc. Czyni to budowę falownika prostą i niezawodną a nade wszystko ułatwia standaryzację. Osobny problem – który nie doczekał się jednolitego rozwiązania – stanowią układy sterowania. Mimo iż na rynku mikroelektroniki oferowane są coraz szybsze mikroprocesory i procesory sygnałowe DSP, to jednak nie ma jednej standardowej metody sterowania, ani specjalizowanych układów scalonych typu ASIC, które obejmowałyby uniwersalne struktury regulacji łącznie z generacją sygnałów PWM. Dlatego w tym zakresie producenci zdani są na własne inicjatywy.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono podstawowe metody regulacji stosowane w realizacji energooszczędnych napędów indukcyjnych klatkowych zasilanych z falowników napięcia PWM.

### 2. Opis silnika indukcyjnego klatkowego przy zastosowaniu wektorów przestrzennych [1,7]

Do opisu stanów dynamicznych silników klatkowych stosowana jest powszechnie metoda zespolonych wektorów przestrzennych. Stosując opis wektorowy, gdzie wektory przestrzenne reprezentowane są w układzie współrzędnych  $K$  wirujących



z prędkością kątową  $\dot{\omega}_K$ , równania silnika indukcyjnego klatkowego wyrażone w jednostkach względnych (ang. p.u. system) można przedstawić następująco:

$$\mathbf{u}_{sK} = r_s \mathbf{i}_{sK} + T_N \frac{d\psi_{sK}}{dt} + j\omega_K \psi_{sK}, \quad (2.1)$$

$$0 = r_r \mathbf{i}_{rK} + T_N \frac{d\psi_{rK}}{dt} + j(\omega_K - \omega_m) \psi_{rK}, \quad (2.2)$$

$$\psi_{sK} = x_s \mathbf{i}_{sK} + x_M \mathbf{i}_{rK}, \quad (2.3)$$

$$\psi_{rK} = x_r \mathbf{i}_{rK} + x_M \mathbf{i}_{sK}, \quad (2.4)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{T_M} [m - m_L] \quad (2.5)$$

$$m = \text{Im}(\psi_{sK} i_{sK}^*) \quad (2.6)$$

gdzie  $\mathbf{u}_s$ ,  $\mathbf{i}_s$ ,  $\mathbf{i}_r$ ,  $\Psi_s$ , oraz  $\Psi_r$  są odpowiednio wektorami przestrzennymi napięcia stojana, prądu stojana, prądu wirnika, strumienia skojarzonego stojana i wirnika;  $\omega_m$  jest prędkością kątową wału;  $m$  – moment elektromagnetyczny rozwijany przez silnik,  $m_L$  – moment zewnętrzny;  $x_s$ ,  $x_r$  oraz  $x_M$  są reaktancjami stojana, wirnika i magnesująca określne w dla częstotliwości znaminowej 50 Hz;  $T_N = 1/2\pi 50\text{Hz}$ ;  $T_M$  – mechaniczna stała czasowa.

**U w a g a .**

- Wielkości występujące w równaniach (2.1)–(5.4) są zespolonymi wektorami przestrzennymi reprezentowanymi we wspólnym układzie współrzędnych wirujących z prędkością kątową  $\omega_K$  (stąd indeks K); są one powiązane z wielkościami fazowymi stojana i wirnika silnika indukcyjnego (np. prądy) jak w równaniach (2.7):

$$\mathbf{i}_{sK} = \frac{2}{3} [\mathbf{1}i_A(t) + \mathbf{a}i_B(t) + \mathbf{a}^2i_C(t)] \cdot e^{-j\omega_K t} \quad (2.7a)$$

$$\mathbf{i}_{rK} = \frac{2}{3} [\mathbf{1}i_A(t) + \mathbf{a}i_B(t) + \mathbf{a}^2i_C(t)] \cdot e^{-j(\omega_K - \omega_m)t} \quad (2.7b)$$

gdzie  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$  są chwilowymi wartościami (w jednostkach względnych) prądów uzwojeń fazowych stojana oraz  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$  chwilowe wartości prądów fazowych wir-

nika odniesionych do obwodu stojana. Podobne zasady dotyczą napięć  $\mathbf{u}_{sK}$  i  $\mathbf{u}_{rK}$  oraz strumieni skojarzonych  $\Psi_{sK}$ ,  $\Psi_{rK}$ ;  $\mathbf{1}$ ,  $\mathbf{a}$ , oraz  $\mathbf{a}^2$  są wersorami jednostkowymi na płaszczyźnie zespolonej.

- Równanie ruchu (2.5) jest równaniem rzeczywistym (niezespolonym).
- Wprowadzenie jednostek względnych powoduje:
  - W równaniach napięciowych przy pochodnych strumieni pojawia się współczynnik  $T_N = 1/\Omega_{SN}$ , który wynika z przyjętego opisu w czasie rzeczywistym (nie-normowanym).
  - Z uwagi na równoważność  $l = x$  w równaniach strumieniowo-prądowych stosowano reactancje.
  - W równaniu na moment elektromagnetyczny znosi się współczynnik 3/2 oraz liczba par biegunów  $p_b$ ; podobnie prędkość wału silnika w jednostkach względnych  $\omega_m$  nie zależy od  $p_b$ .

- W równaniu ruchu występuje mechaniczna stała czasowa  $T_M = \frac{J\Omega_{mN}}{M_N}$ .

- Dzięki transformacji do wspólnego wirującego układu współrzędnych parametry indukcyjne silnika nie zależą od kąta położenia wału.
- Równanie momentu elektromagnetycznego (2.6) nie zależy od wyboru układu współrzędnych w jakim reprezentowane są wektory przestrzenne. Wynika to z tego, że dla dowolnego układu współrzędnych mamy

$$\Psi_{sK} = \Psi_s e^{-j\omega_K t}, \quad \mathbf{i}_{sK} = \mathbf{i}_s e^{-j\omega_K t} \quad (2.8)$$

Podstawiając równanie (5.8) do wzoru (5.6) otrzymuje się:

$$m = \text{Im}(\Psi_{sK}^* i_{sK}) = \text{Im}(\Psi_s^* e^{j\omega_K t} \cdot \mathbf{i}_s e^{-j\omega_K t}) = \text{Im}(\Psi_s^* \mathbf{i}_s) \quad (2.9)$$

- W przypadku szczególnym zasilania sinusoidalnego o stałej częstotliwości, wektory przestrzenne wirują na płaszczyźnie ze stałą prędkością kątową  $\omega_K$ , równą pulsacji prądów płynących w stojanie silnika  $\omega = 2\pi f$ , a jego amplituda  $i_s$  jest równa amplitudzie prądów fazowych  $i_A, i_B, i_C$ . Jednakże opis za pomocą wektorów przestrzennych może być również stosowany w przypadku przebiegów odkształconych. Wówczas hogoграфы zakreślane przez końce wektorów przestrzennych nie są okręgiem.

Reasumując stwierdzamy, że podstawowe zalety metody wektorów przestrzennych to:

- reprezentacja trzech zmiennych fazowych za pomocą jednego wektora, a więc redukcja równań opisujących dynamikę silnika klatkowego,
- możliwość analizy przy zasilaniu dowolnym przebiegiem odkształconym (bez składowych zerowych),

- możliwość transformacji (przeliczania) do dowolnych wirujących lub stacjonarnych układów współrzędnych, łatwa interpretacja fizyczna i możliwość obserwacji na ekranie komputera lub oscyloskopu w laboratorium,
- przy stosowaniu zapisu zespolonego istnieje łatwy pomost pozwalający na przejście do stanów ustalonych i konwencjonalnej teorii obowiązującej przy zasilaniu z sieci napięciem sinusoidalnym 50 Hz.

### 3. Podział metod sterowania częstotliwościowego silników klatkowych

Metody sterowania częstotliwościowego w sposób najbardziej ogólny dzieli się na: skalarne i wektorowe (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Podział metod sterowania częstotliwościowego silników klatkowych

#### 3.1. Sterowanie skalarne

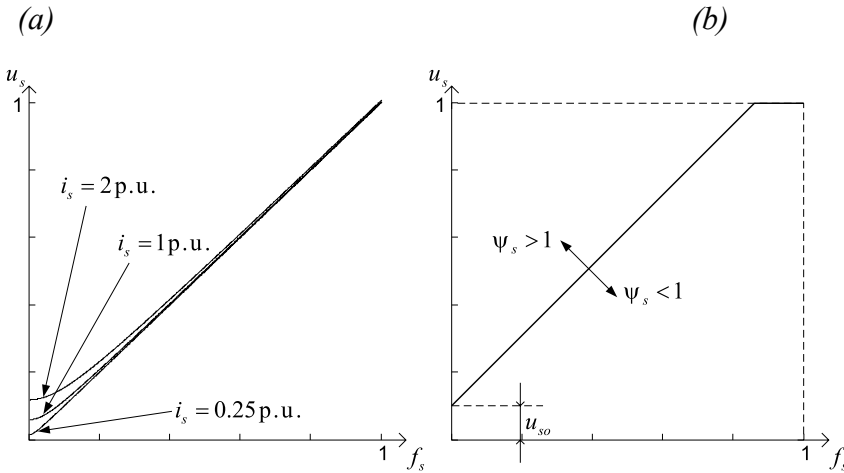
**Sterowanie skalarne** charakteryzuje się tym, że – na podstawie zależności obowiązujących dla stanów ustalonych – **nastawiane są tylko amplitudy i prędkości kątowe (częstotliwości) wektorów przestrzennych** napięć, prądów i strumieni skojarzonych silnika klatkowego. Układ sterowania nie oddziałuje na wzajemne położenie wektorów (orientację). Najbardziej rozpowszechnione są układy sterowania skalarnego, w których stabilizacja strumienia uzyskiwana jest na podstawie charakterystyk statycznych  $u/f = \text{const}$ . (rys. 3.2). Z równania (2.1), dla  $\omega_K = \omega_s$ , uzyskuje się:

$$\mathbf{u}_s = r_s \mathbf{i}_s + j\omega_s \boldsymbol{\psi}_s \quad (3.1)$$

z którego unormowana wartość amplitudy napięcia stojana wynosi

$$u_s = \sqrt{(r_s i_s)^2 + (f_s \psi_s)^2} \quad (3.2)$$

Dla stałej amplitudy strumienia stojana  $\psi_s = 1$ , napięcie  $u_s$  w funkcji znormalizowanej częstotliwości pokazano na rys. 3.2a.



Rys. 3.2. Napięcie stojana w funkcji częstotliwości stojana dla stałej wartości strumienia stojana,  $\psi_s = 1$ , dla silnika 4kW o rezystancji  $r_s = 0,059$ , (a) charakterystyki teoretyczne obliczone z równania (3.2); (b) charakterystyki stosowane w praktyce

Dla  $r_s = 0$ , zależność między wielkością napięcia stojana i częstotliwością staje się liniowa, a równanie (3.2) przyjmuje postać

$$\frac{u_s}{f_s} = 1 \quad (3.3)$$

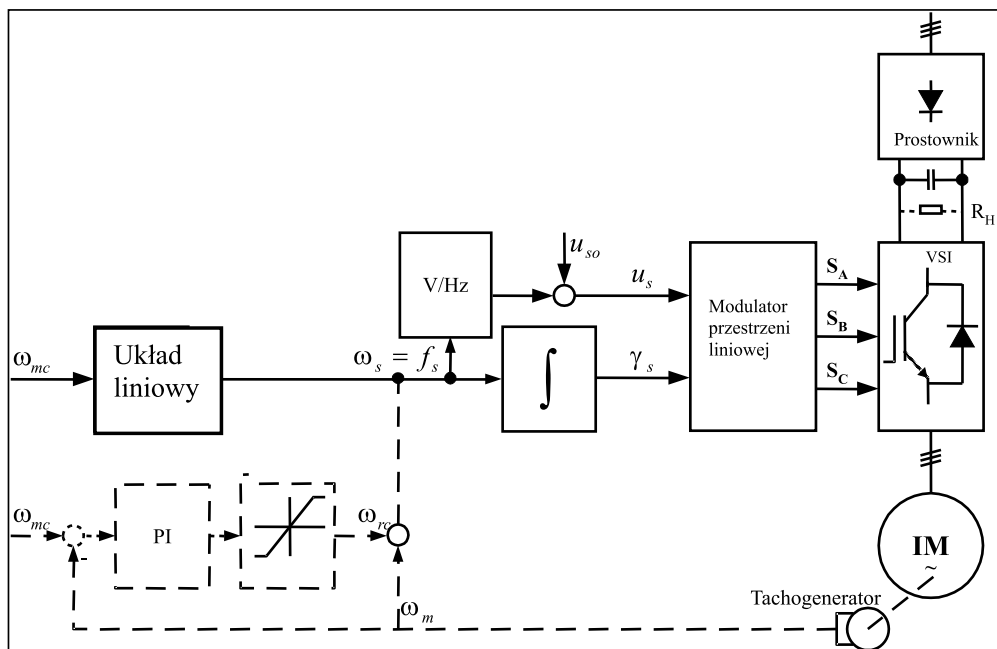
dając podstawę do nazwy metody: *sterowanie  $u/f = const.$*

Dla zastosowań praktycznych równanie (3.3) może być wyrażone:

$$u_s = u_{s0} + f_s \quad (3.4)$$

gdzie:  $u_{s0} = i_s r_s$  – napięcie kompensujące spadek na rezystancji stojana.

Schemat blokowy takiego sterowania – zrealizowano wg równania (3.3) pokazano na rys. 3.3. Algorytm sterowania oblicza amplitudę napięcia proporcjonalnie do zadanej wartości prędkości  $\omega_{mc}$ , a potrzebny do generacji sekwencji impulsów PWM kąt  $\gamma_s$  uzyskuje się przez scałkowanie prędkości. Wektor napięcia stojana reprezentowany we współrzędnych połowych stanowi wielkość wejściową do modulatora PWM, który generuje sygnały sterujące pracą tranzystorów IGBT falownika napięcia. Sygnał zadany prędkości  $\omega_{mc}$  określa częstotliwość pracy falownika  $f_s = \omega_s$  która definiuje zadany wektor napięcia stojana wg zasady  $u/f = const.$



Rys. 3.3. Sterowanie skalarne typu  $u/f = \text{const.}$  silnika klatkowego zasilanego z falownika napięcia (linią przerywaną zaznaczono wariant z obwodem stabilizacji prędkości kątowej)

Jednakże prędkość mechaniczna  $\omega_m$  oraz częstotliwość poślizgu  $\omega_r = \omega_s - \omega_m$  nie są kontrolowane precyzyjnie. Może to spowodować przeciążenia silnika i falownika. Aby ograniczyć duże wartości częstotliwości poślizgu w stanach dynamicznych, w torze regulacji częstotliwości stojana wstawiany jest integrator, którego czas narastania dobierany jest odpowiednio do mechanicznej stałej czasowej napędu. Zapobiega on skokowej zmianie częstotliwości stojana, a więc i poślizgu. W przypadkach gdy wymagana jest stabilizacja prędkości wału silnika wprowadza się regulator prędkości (linia przerywana na rys. 3.3). Zadana wartość częstotliwości poślizgu  $\omega_{rc}$  generowana jest przez regulator prędkości typu PI. Sygnał ten po zsumowaniu z sygnałem z prądnicy tachometrycznej określa częstotliwość stojana  $\omega_s$ . W wyniku utrzymania warunku  $u/f = \text{const.}$ , strumień stojana pozostaje stały, co gwarantuje proporcjonalność między momentem elektromagnetycznym a częstotliwością poślizgu. Dzięki ograniczeniu na wyjściu regulatora prędkości zadanej wartości częstotliwości poślizgu  $\omega_{rc}$ , silnik nie utknie zarówno przy skokowych zmianach wartości zadanej prędkości jak też momentu zewnętrznego. Nagła redukcja prędkości zadanej powoduje generowanie przez regulator prędkości ujemnego poślizgu w wyniku czego silnik przechodzi w zakres hamowania generatorowego. Energia hamowania musi być zwrócona do sieci przez przekształtnik hamujący lub rozproszona w rezystorze hamującym  $R_H$  obwodu pośredniczącego.

Układ sterowania  $u/f = \text{const.}$  jest niezwykle prosty. Jednakże zaleta prostoty okupiona jest następującymi wadami:

- brak kontroli momentu rozwijanego przez silnik w stanach przejściowych,
- brak odsprężenia dynamicznego między sterowaniem momentu i strumienia,
- długie i niekontrolowane stany przejściowe oraz skłonność do słabo tłumionych oscylacji momentu i prędkości,
- brak sprzężeń zwrotnych i w wyniku brak zabezpieczenia przed przeciążeniami,
- możliwości dynamiczne silnika i falownika nie są w pełni wykorzystane.

### 3.2. Sterowanie wektorowe

**Sterowanie wektorowe** charakteryzuje się tym, że – na podstawie zależności obowiązujących dla stanów nieustalonych – **nastawiane są nie tylko amplitudy i prędkości kątowe (częstotliwości), ale również fazy wektorów przestrzennych** napięć, prądów i strumieni skojarzonych silnika klatkowego. Układ sterowania oddziałuje więc na wzajemne położenie wektorów, zapewniając ich prawidłową orientację.

Stosowane są dwie zasadnicze filozofie sterowania wektorowego:

- sterowanie polowo zorientowane (ang. *Field Oriented Control – FOC*),
- bezpośrednie sterowanie momentu (ang. *Direct Torque Control – DTC*).

#### 3.2.1. Sterowanie polowo zorientowane (*FOC*)

##### 3.2.1.1. Podstawy fizyczne

Metoda sterowania polowo zorientowanego *FOC* bazuje na analogii do obcowzbudnego silnika prądu stałego. Właściwości regulacyjne silnika prądu stałego można podsumować następująco:

- silnik prądu stałego ma dwa wejścia sterujące: uzwojenia wzbudzenia i twornika,
- oba wejścia są odsprężone elektrycznie i magnetycznie,
- dlatego strumień wzbudzenia  $\psi$  i wytwarzający moment elektromagnetyczny prąd twornika mogą być niezależnie regulowane,
- wektory wypadkowego strumienia  $\psi$  oraz prądu twornika  $i_t$  są, dzięki oddziaływaniu komutatora, nieruchome w przestrzeni i zawsze wzajemnie ortogonalne. Zapewnia to maksymalny moment rozwijany przez silnik.
- stosując przekształtniki z obwodami regulacji prądu twornika i wzbudzenia, można wymuszać strumień i moment silnika z niewielką inercją odpowiadającą czasowi regulacji prądu.

Natomiast podstawowe właściwości regulacyjne silnika indukcyjnego klatkowego można określić następująco:

- silnik klatkowy ma jedno wejście sterujące, które stanowi trójfazowe uzwojenie stojana,
- obwód wirnika jest dla celów sterowania bezpośrednio niedostępny, a prąd w wirniku może być wyłącznie indukowany,
- moment i strumień określone są przez prąd stojana i nie mogą być nastawiane w sposób niezależny.

Podobne warunki sterowania jak w silniku prądu stałego otrzymuje się analizując silnik klatkowy we współrzędnych polowych  $x$ - $y$ .

### 3.2.1.2. Podstawy matematyczne

W przypadku sterowania zorientowanego połowo wygodnie jest przyjąć prędkość kątową układu współrzędnych  $\omega_K$  równą prędkości synchronicznej  $\omega_s$ . Przy tych założeniach podstawiając prąd wirnika z równania (2.2) do (2.3), otrzymuje się równanie na strumień wirnika w następującej postaci:

$$(d\psi_r/dt) = -(\psi_r/T_r) - j(\omega_s - \omega_m)(\psi_r/T_N) + (x_M/T_r) \mathbf{i}_s \quad (3.5)$$

gdzie  $T_r$  jest stałą czasową wirnika, którą można wyrazić jako:

$$T_r = (x_r/r_r) T_N$$

Dla współrzędnych zorientowanych połowo  $x$ - $y$  mamy:

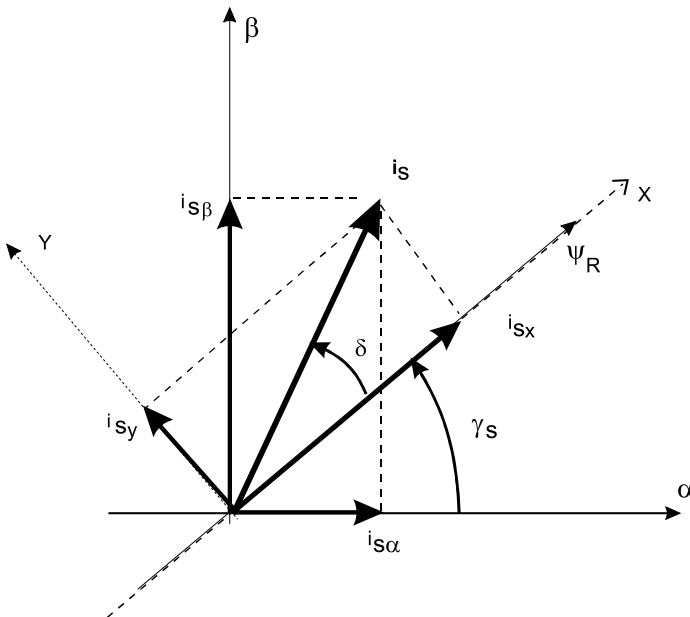
$$\psi_{rx} = \psi_r \quad (3.6a)$$

$$\psi_{ry} = 0 \quad (3.6b)$$

a równanie (3.5) może być przepisane w następującej postaci:

$$dr/dt = -(\psi_r/T_r) + (x_M/T_r) i_{sx} \quad (3.7a)$$

$$0 = -(\omega_s - \omega_m)(\psi_r/T_N) + (x_M/T_r) i_{sy} \quad (3.7b)$$

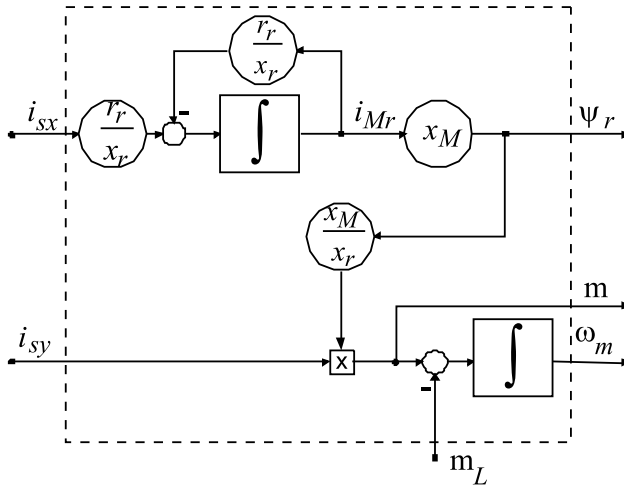


Rys. 3.4. Wykres wektorowy silnika klatkowego,  $\alpha$ - $\beta$  współrzędne nieruchome związane ze stojanem,  $x$ - $y$  współrzędne połowe

Równanie (3.7a) opisuje wpływ składowej prądu stojana  $i_{sx}$  na strumień wirnika. Moment elektromagnetyczny silnika zgodnie z równaniem (2.5) można wyrazić w następujący sposób:

$$m = (x_M/x_r) i_{sy} \psi_r \quad (3.8)$$

Równania (3.7a), (3.7b) oraz (2.5), (2.6) wyznaczają schemat blokowy silnika indukcyjnego we współrzędnych polowych  $x$ - $y$  (rys. 3.4).



Rys. 3.4. Schemat blokowy silnika indukcyjnego we współrzędnych polowych  $x$ - $y$

Składowa wektora prądu stojana  $i_{sx}$  jest proporcjonalna do strumienia, a  $i_{sy}$  do momentu rozwijanego przez silnik. Odpowiadają one odpowiednio prądowi wzbudzenia i twornika silnika prądu stałego. Jak wynika z powyższych rozważań podstawą metody sterowania polowo zorientowanego jest transformacja współrzędnych, która pozwala przeliczyć odsprężone składowe polowo zorientowane  $i_{sx}$ ,  $i_{sy}$  wektora prądu stojana do nieruchomego układu współrzędnych  $i_{s\alpha}$ ,  $i_{s\beta}$ :

$$i_{s\alpha} = i_{sx} \cos\gamma_s - i_{sy} \sin\gamma_s \quad (3.9a)$$

$$i_{s\beta} = i_{sx} \sin\gamma_s + i_{sy} \cos\gamma_s \quad (3.9b)$$

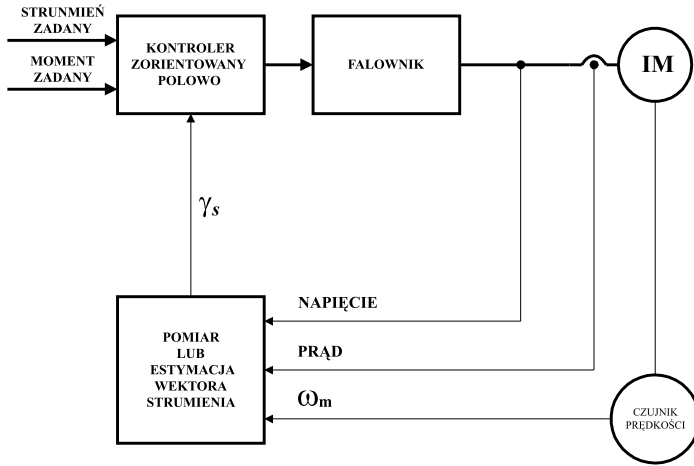
Zależnie od sposobu wyznaczania kąta położenia wektora pola  $\gamma_s$  rozróżnia się dwa sposoby sterowania polowo zorientowanego: *bezpośredni* oraz *pośredni* (rys. 3.5 i 3.6).

W układzie sterowania FOC bezpośredniego (rys. 3.5), niezbędny do transformacji współrzędnych (3.5 a,b) kąt położenia wektora pola  $\gamma_s$  wyznaczany jest na podstawie bezpośredniego pomiaru (czujniki Halla, dodatkowe uzwojenia pomiarowe) lub estymacji wektora strumienia z wielkości mierzonych napięć i/lub prądów stojana.

Natomiast w sterowaniu FOC pośrednim (rys. 3.6) kąt  $\gamma_s$  estymowany jest na podstawie wartości zadanych momentu i strumienia (model pulsacji poślizgu  $\omega_r$ ) oraz prędkości kątowej wału  $\omega_m$ .

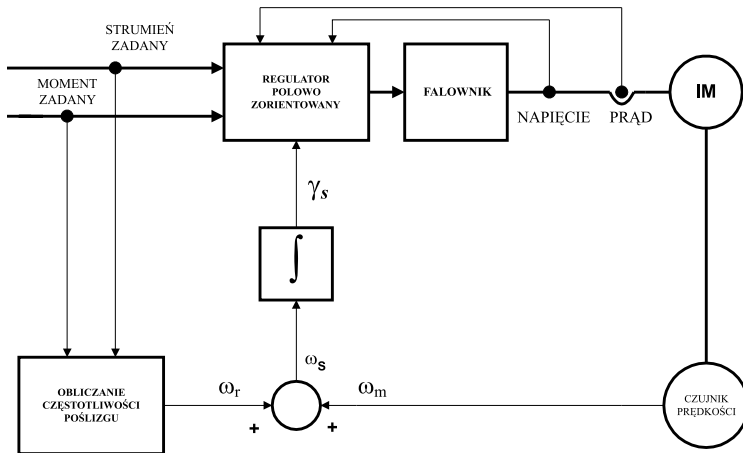


### BEZPOŚREDNIE STEROWANIE POŁOWO ZORIENTOWANE



Rys. 3.5. Struktura bezpośredniego sterowania połowo zorientowanego

### POŚREDNIE STEROWANIE POŁOWO ZORIENTOWANE



Rys. 3.6. Struktura pośredniego sterowania połowo zorientowanego

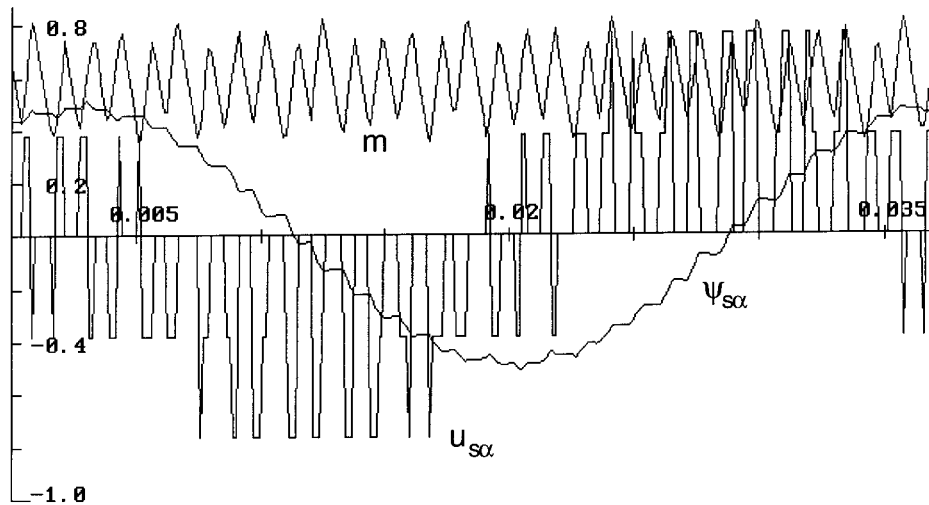
## 3.2.2. Bezpośrednie sterowanie momentu (DTC)

### 3.2.2.1. Podstawy fizyczne

Metoda bezpośredniego sterowania momentu DTC bazuje na analizie właściwości silnika klatkowego zasilanego z falownika napięcia [1]. Obserwując przebiegi czasowe napięcia fazowego –  $u_{sa}$ , strumienia skojarzonego stojana –  $\psi_{sa}$  oraz momentu –  $m$ , silnika klatkowego przy zasilaniu z falownika o sinusoidalnej modulacji szerokości impulsów (rys. 3.7), można zauważyć następującą prawidłowość:

- pod wpływem niezerowego napięcia strumień porusza się do przodu, a moment elektromagnetyczny wzrasta,
- przy napięciu zerowym strumień pozostaje stały, a moment elektromagnetyczny maleje.

Tak więc istnieje naturalne odsprężenie w sterowaniu momentu i strumienia silnika.



Rys. 3.7. Przebiegi w silniku klatkowym zasilanym z falownika napięcia o modulacji sinusoidalnej;  $u_{s\alpha}$  – napięcie fazowe,  $\psi_{s\alpha}$  – strumień skojarzony stojana,  $m$  – moment elektromagnetyczny

O czasie trwania stanów zerowych falownika decydują tylko dopuszczalne pulsacje momentu, a napięcie niezerowych zarówno moment, jak i wartość strumienia. To przyporządkowanie sekwencji i czasów trwania napięć zerowych i niezerowych przebiegom czasowym momentu i strumienia stojana stanowi podstawę realizacji „samomodulatora” silnika klatkowego – jaką jest w istocie metoda DTC.

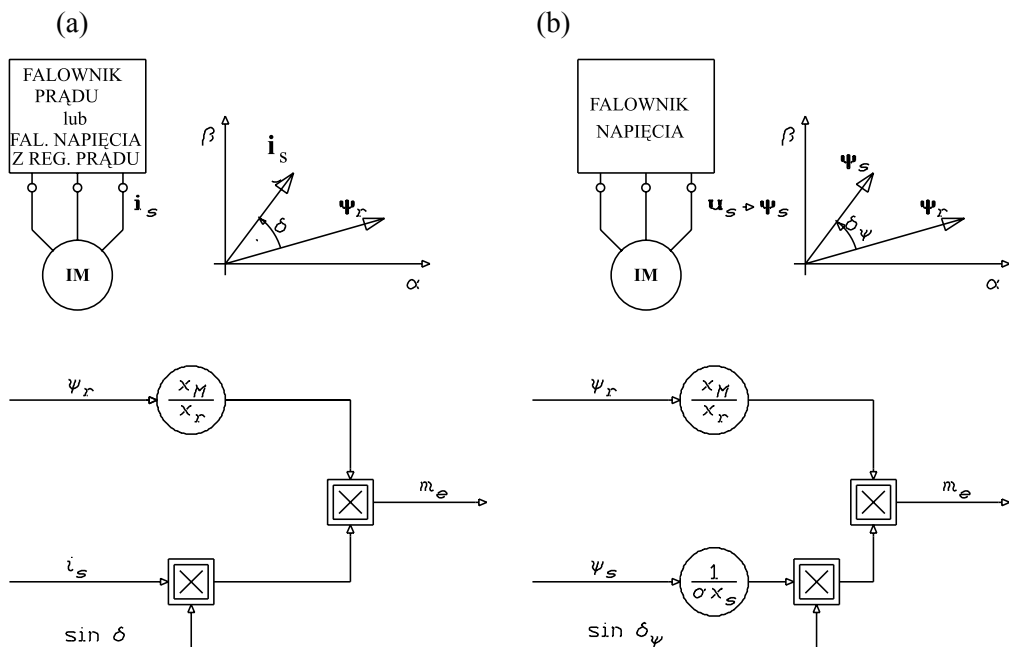
### 3.2.2.2. Podstawy matematyczne

W napędzie ze sterowaniem FOC wielkością sterującą jest składowa poprzeczna  $i_{sy}$  wektora prądu stojana, która dla stałej wartości amplitudy strumienia wirnika  $\psi_r$  nastawia moment elektromagnetyczny silnika indukcyjnego:

$$m = (x_M/x_r)\psi_r i_{sy} = (x_M/x_r)\psi_r i_s \sin\delta \quad (3.10)$$

To powoduje, że falownik prądu lub falownik napięcia z obwodami regulacji prądu stojana doskonale nadaje się do realizacji tej metody sterowania (rys. 3.8a). Jednakże w przypadku napędów zasilanych z falowników napięcia z modulacją szerokości impulsów (MSI), jako wielkość sterująca momentem silnika oprócz prądu może być rozważany również strumień stojana  $\psi_s$  (rys. 3.8b):

$$m = (x_M/x_r)\psi_r (1/x_\sigma)\psi_s \sin\delta_\psi \quad (3.11)$$



Rys. 3.8. Generacja momentu elektromagnetycznego silnika klatkowego: a) metoda sterowania polowo zorientowanego, b) metoda bezpośredniej regulacji momentu

Strumień stojana z kolei jest zmienną stanu, która może być sterowana przez napięcie stojana. Z równania napięciowego stojana, dla  $r_s = 0$ , można napisać:

$$T_N (d\psi_s/dt) = \mathbf{u}_s = \mathbf{u}_v, \quad (3.12)$$

gdzie  $\mathbf{u}_v$  jest wektorem przestrzennym napięcia stojana (rys. 3.9)

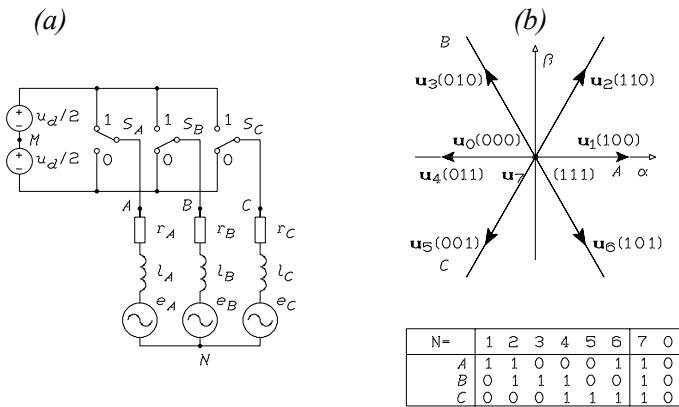
$$\mathbf{u}_v = \begin{cases} (2/3) u_d e^{j(k-1)\pi/3} & \text{dla } k = 1, \dots, 6 \\ 0 & \text{dla } k = 0, 7 \end{cases} \quad (3.13)$$

które przyjmuje sześć wartości niezerowych (wektory aktywne) oraz dwie wartości zerowe (wektory lub stany zerowe).

Z równania (3.12) wynika, że

$$\psi_s = (1/T_N) \int \mathbf{u}_v dt \quad (3.14)$$

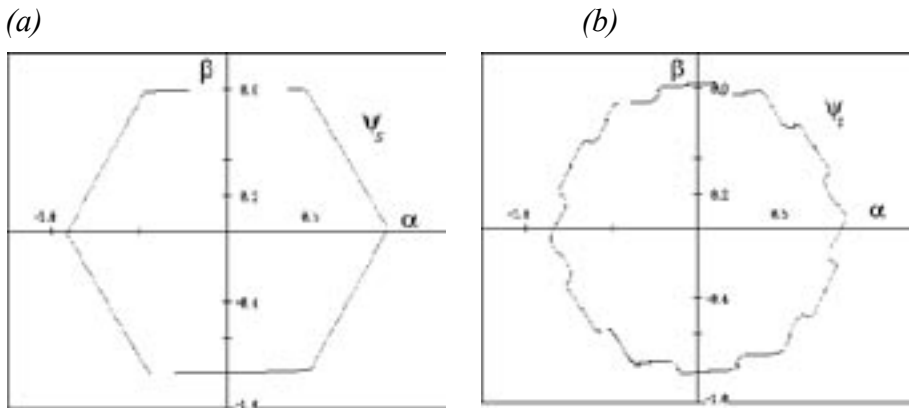
Dla pracy blokowej (bez modulacji) napięcie wyjściowe falownika jest symetryczną sekwencją wektorów aktywnych tak że zgodnie z równaniem 3.13 strumień stojana porusza się po trajektorii



Rys. 3.9. Wektorowa reprezentacja napięcia wyjściowego falownika: a) uproszczony schemat zastępczy falownika, b) położenie wektorów napięcia i stany zaworów falownika

w kształcie sześciokąta (rys. 3.10a). Wybieranie wektorów zerowych powoduje zatrzymanie wektora strumienia (*ang. stop pulses*), lecz nie zmienia kształtu jego trajektorii. Natomiast przy zastosowaniu modulacji sinusoidalnej, która stanowi odpowiednią sekwencję wektorów aktywnych i zerowych, wektor strumienia stojana porusza się po trajektorii zbliżonej do okręgu (rys. 3.10b). Jednocześnie wektor strumienia wirnika porusza się ze stałą prędkością synchroniczną po trajektorii w kształcie okręgu, gdyż jego składowe stanowią praktycznie idealne sinusoidy. Wektory strumienia stojana i wirnika związane są ze sobą zależnością:

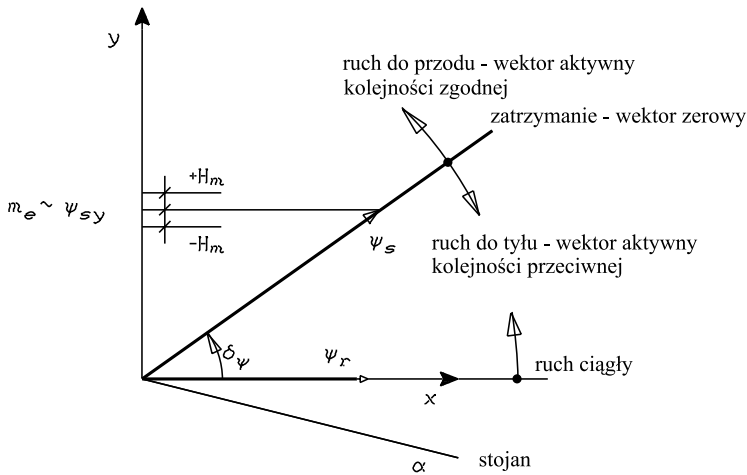
$$\psi_s = (x_M/x_r)\psi_r + x_\sigma \mathbf{i}_s \quad (3.15)$$



Rys. 3.10. Trajektoria wektora strumienia skojarzonego stojana  $\psi_s$  w nieruchomym układzie współrzędnych  $\alpha$ - $\beta$  przy pracy falownika: a) blokowej, b) z modulacją sinusoidalną

Z punktu widzenia wytwarzania momentu silnika istotne jest wzajemne położenie wektorów strumienia stojana i strumienia, które tworzą kąt  $\delta_\psi$  określający chwilowy moment elektromagnetyczny.

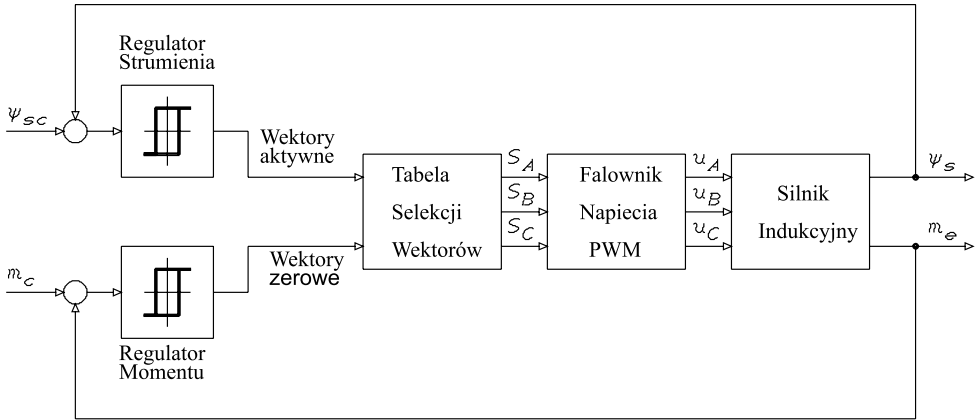
Załóżmy, że strumień wirnika  $\psi_r$  porusza się bardzo wolno (rys. 3.11). W takim przypadku włączenie wektora aktywnego kolejności zerowej powoduje szybkie oddalanie się wektora  $\psi_s$  od  $\psi_r$  i tym samym wzrost momentu, ponieważ kąt obciążenia momentu  $\delta_\psi$  wzrasta. Z drugiej strony, jeśli wybrany zostanie wektor zerowy napięcia, wektor strumienia stojana zostanie zatrzymany, co – wobec ciągłego ruchu wektora strumienia wirnika do przodu – powoduje zmniejszenie zarówno kąta obciążenia, jak i momentu silnika. Jeśli czas trwania stanu zerowego będzie odpowiednio długi, wówczas  $\psi_r$  wyprzedzi  $\psi_s$  w wyniku czego kąt  $\delta_\psi$  oraz moment silnika  $m$  zmienią swój znak. Stąd istotny wniosek, że istnieje bezpośrednia zależność między wahaniami (harmonicznymi) momentu a czasem trwania stanów zerowych falownika  $T_0$ . Dlatego dla założonej szerokości wahań momentu  $\pm H_m$  możliwe jest, obserwując moment chwilowy silnika, określenie czasu trwania stanów zerowych falownika  $T_0$ .



Rys. 3.11. Ruch wektora strumienia stojana względem strumienia wirnika pod wpływem wektorów aktywnych i zerowych napięcia falownika

Załączając cyklicznie odpowiednie wektory aktywne i zerowe napięcia falownika, uzyskuje się regulację momentu elektromagnetycznego oraz strumienia stojana silnika (rys. 3.12). W zakresie małych prędkości obrotowych ( $<0,2 \omega_{mN}$ ), ruch wektora wirnika jest za wolny, aby uzyskać szybką redukcję momentu. W takich przypadkach zamiast wektora zerowego jest wybierany wektor aktywny kolejności przeciwnej (rys. 3.11). W zakresie osłabienia strumienia wektory zerowe falownika nie mogą być realizowane, gdyż generuje on napięcie o kształcie blokowym (nie ma modulacji). Dlatego regulację momentu w tym zakresie można uzyskać przez szybkie zmianę kąta obciążenia  $\delta_\psi$ , co realizuje się przez przyśpieszenie (wzrost momentu) lub opóźnienie (zmniejszenie momentu) fazy strumienia stojana względem strumienia wirnika [1].

Podstawowy schemat blokowy ilustrujący zasadę metody DTC pokazano na rys. 3.12.



Rys 3.12. Schemat blokowy ilustrujący zasadę metody bezpośredniego sterowania momentu i strumienia silnika klatkowego DTC

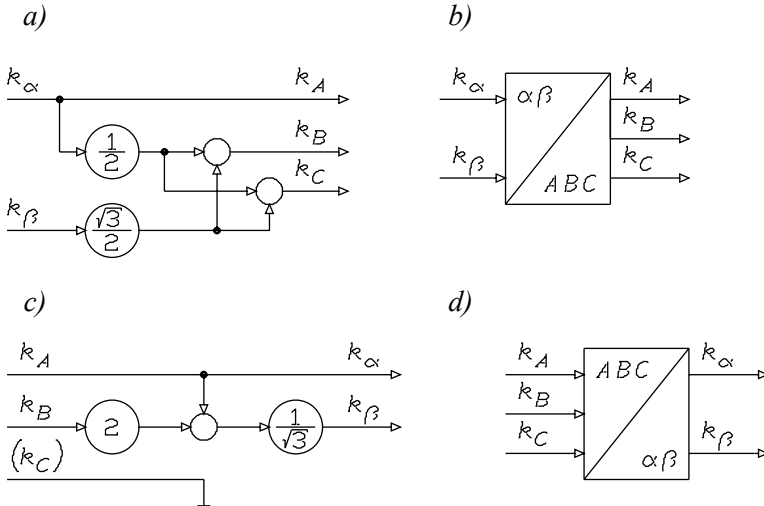
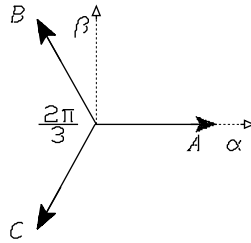
## 4. Schematy blokowe układów sterowania połowo zorientowanego (FOC)

### 4.1. Transformacje i układy estymacji momentu i strumienia stosowane w systemach sterowania połowo zorientowanego

W układach sterowania połowo zorientowanego stosowane są transformacje współrzędnych oraz układy estymacji momentu i strumienia silnika klatkowego. Stanowią one podstawowe elementy składowe systemów sterowania FOC. Dlatego poniżej zostaną przedstawione wybrane układy oraz ich symbole blokowe używane w badanych systemach FOC.

#### 4.1.1. Zmiana liczby faz ABC/ $\alpha$ - $\beta$ oraz $\alpha$ - $\beta$ /ABC

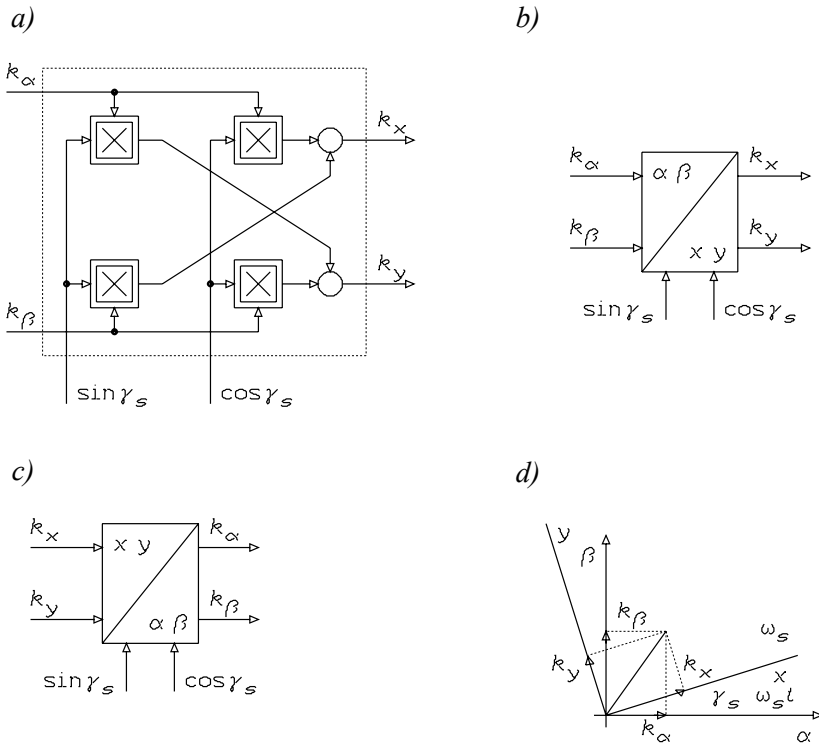
Na rys. 4.2 pokazano schematy blokowe obliczeń oraz symbole układów realizujących zmianę liczby faz naturalnych ABC na równoważny układ dwufazowy współrzędnych prostokątnych  $\alpha$ - $\beta$ .



Rys. 4.1. Zmiana liczby faz: a) schemat przeliczenia składowych dwufazowych  $\alpha\text{-}\beta$  do równoważnego układu trójfazowego  $ABC$ , b) symbol graficzny, c) schemat przeliczenia składowych trójfazowych  $ABC$  do równoważnego układu trójfazowego  $\alpha\text{-}\beta$ , d) symbol graficzny

#### 4.1.2. Transformacje współrzędnych kartezjańskich: $\alpha\text{-}\beta/x\text{-}y$ oraz $x\text{-}y/\alpha\text{-}\beta$

Podstawowe transformacje współrzędnych pokazano na rys. 4.2, gdzie  $\alpha\text{-}\beta$  jest nieruchomym układem współrzędnych kartezjańskich związanych ze stojanem silnika klatkowego, natomiast  $x\text{-}y$  jest układem współrzędnych kartezjańskich wirujących z prędkością synchroniczną (współrzędne polowe).

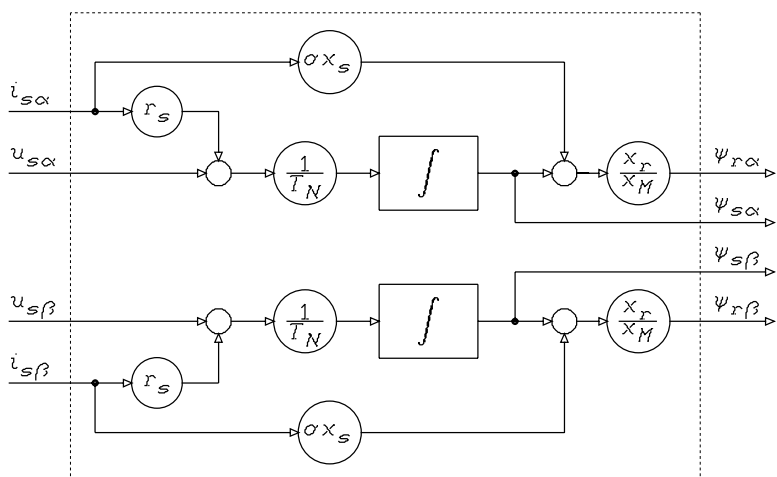


Rys. 4.2. Transformacje współrzędnych kartezjańskich: a) schemat obliczeń transformacji  $\alpha$ - $\beta$ / $x$ - $y$ , b) symbol graficzny transformacji  $\alpha$ - $\beta$ / $x$ - $y$ , c) symbol graficzny transformacji  $x$ - $y$ / $\alpha$ - $\beta$ , d) wykres wektorowy ilustrujący zasadę transformacji współrzędnych

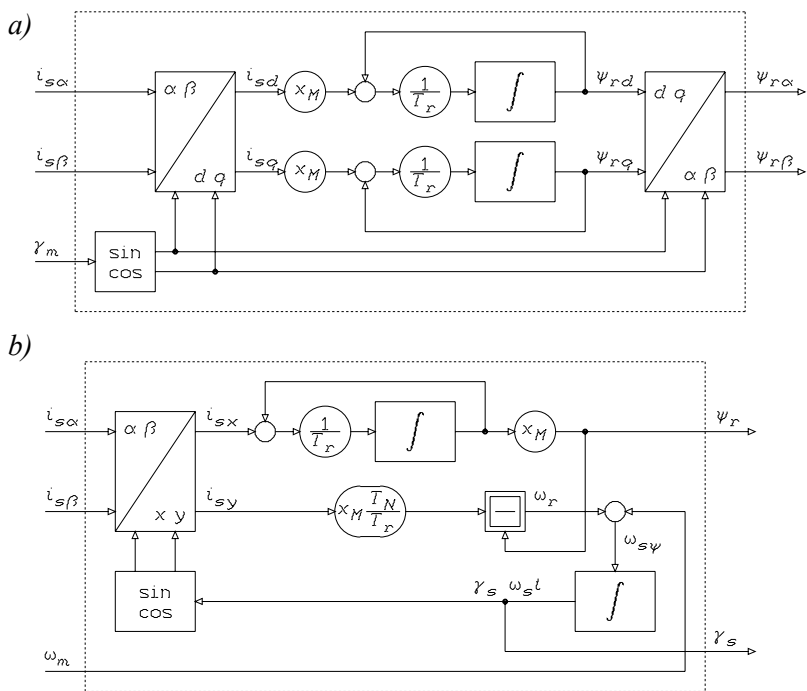
#### 4.1.3. Układy estymacji wektora strumienia

Dokładne wyznaczenie wartości chwilowych wektora strumienia jest podstawowym problemem w realizacji metod sterowania połowo zorientowanego metodą bezpośrednią. Istnieje wiele metod estymacji wartości chwilowej wektora strumienia silnika klatkowego: obserwatory otwarte (symulatory, modele), obserwatory zamknięte, filtr Kalmana, identyfikacja z modelem przestrzajonym etc [1]. Poniżej ograniczono się do podania podstawowych układów wynikających z modeli matematycznych silnika klatkowego.

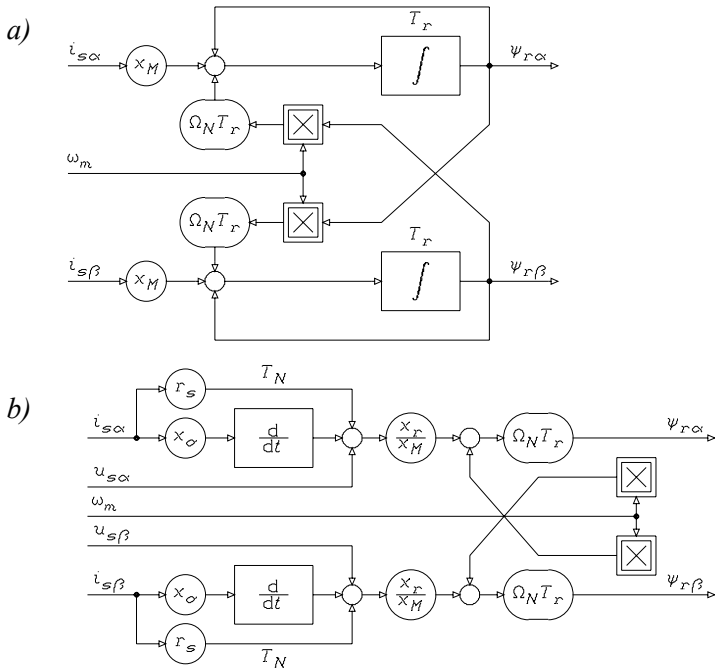




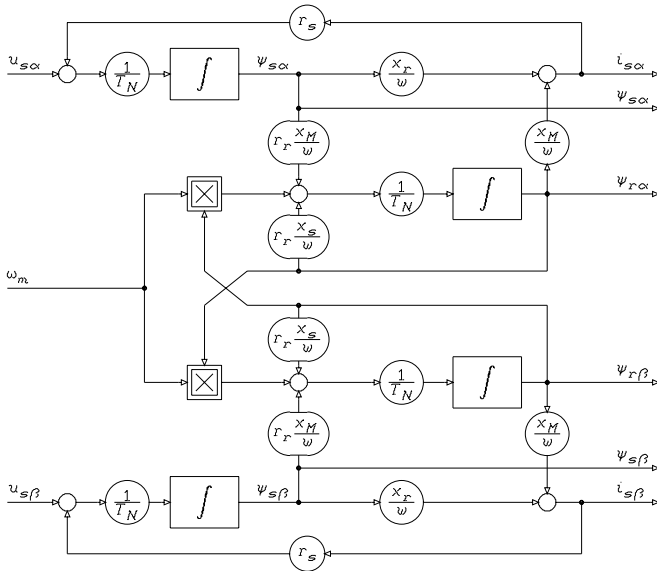
Rys. 4.3. Układ estymacji wektora strumienia na podstawie pomiaru wektorów napięcia i prądu stojana w składowych nieruchomych  $\alpha$ - $\beta$  (tzw. model napięciowy)



Rys. 4.4. Układy estymacji wektora strumienia na podstawie pomiaru: a) wektora prądu stojana we współrzędnych  $\alpha$ - $\beta$  oraz kąta położenia wału silnika  $\gamma_m$ , b) wektora prądu stojana we współrzędnych  $\alpha$ - $\beta$  oraz prędkości wału silnika  $\omega_m$  (tzw. model prądowy we współrzędnych biegunowych  $[\psi_r, \gamma_r]$ )



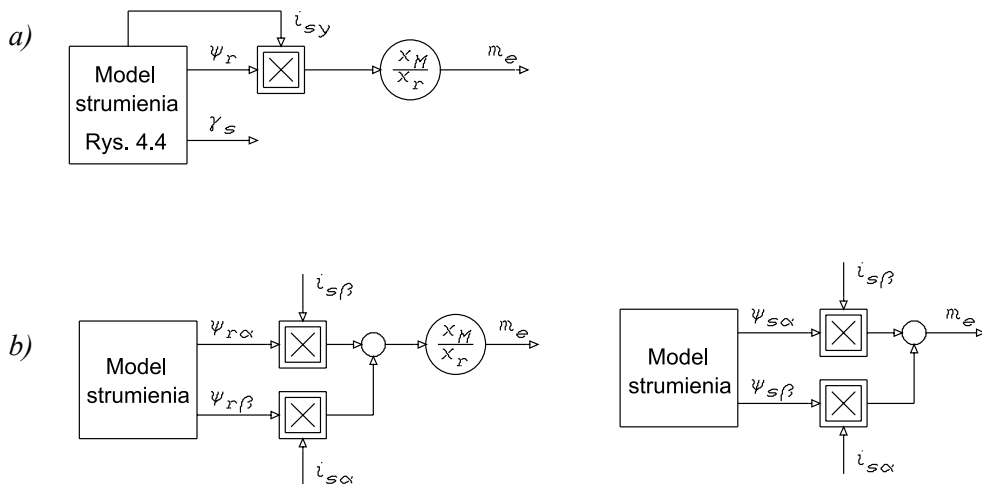
Rys. 4.5. a) Model prądowy we współrzędnych stojana [ $\psi_{r\alpha}$ ,  $\psi_{r\beta}$ ], b) model napięciowy z rys. 4.3 uzupełnony sygnałem prędkości kątowej wału silnika  $\omega_m$ .



Rys. 4.6. Układ estymacji wektora strumienia na podstawie pomiaru wektora napięcia stojana we współrzędnych  $\alpha$ - $\beta$  oraz prędkości kątowej wału silnika  $\omega_m$

#### 4.1.4. Układy estymacji momentu elektromagnetycznego

Możliwe są różne sposoby obliczania momentu elektromagnetycznego silnika klatkowego. Zależy to od sposobu reprezentacji wektora strumienia. Na rys. 4.7 pokazano wybrane przykłady.



Rys. 4.7. Estymacja momentu elektromagnetycznego: a) na podstawie składowych biegunowych strumienia wirnika, b) na podstawie składowych kartezjańskich strumienia wirnika, c) na podstawie składowych kartezjańskich strumienia stojana

## 4.2. Sterowanie bezpośrednio FOC

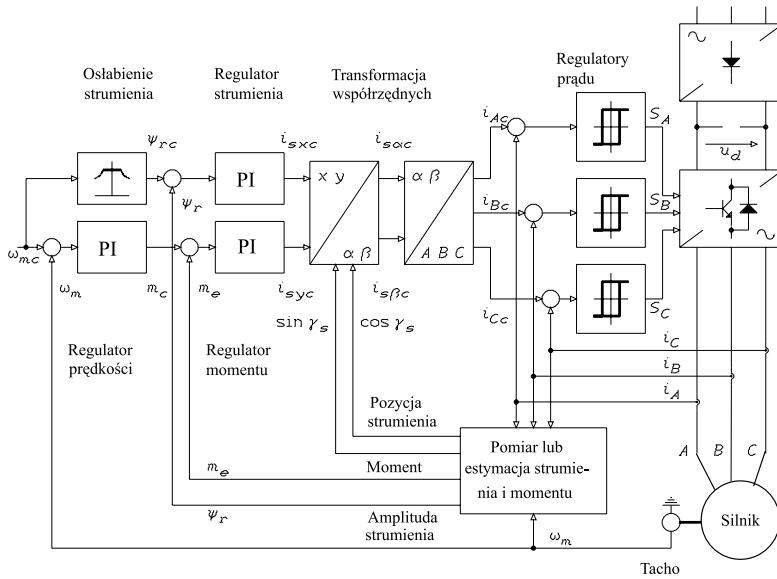
Zgodnie z ogólną definicją bezpośredniego sterowania polowo zorientowanego FOC (rys. 3.5) potrzebny do transformacji współrzędnych (3.3 a,b) kąt  $\gamma_s$ , uzyskiwany jest drogą estymacji na podstawie pomiaru napięć i prądów stojana oraz ew. prędkości kątowej wału silnika (rys. 4.3-6). Dlatego poszczególne realizacje systemów bezpośredniego sterowania FOC różnią się przede wszystkim: metodą estymacji wektora strumienia i momentu oraz metodą regulacji prądu falownika PWM.

Metody estymacji strumienia i momentu zostały krótko przedstawione w rozdziale 4.1 niniejszej dokumentacji. Natomiast podstawowe struktury sterowania FOC zawierające częściej stosowane metody regulacji prądu falownika PWM wraz z wynikami wybranych badań symulacyjnych przedstawiono w poniższych rozdziałach.

### 4.2.1. Bezpośrednie sterowanie FOC z histerezową regulacją prądów

Schemat blokowy pokazano na rys. 4.8 [2,3]. Działanie układu jest następujące: regulator prędkości na podstawie różnicy między wartością zadaną  $\omega_{mc}$  i mierzoną  $\omega_m$  prędkości kątowej silnika generuje moment zadany  $m_c$  jaki ma rozwinąć silnik. Podobnie regulatory strumienia i momentu generują wartości zadane polowo zorientowanych składowych odpowiednio strumienia  $i_{sx}$  oraz momentu  $i_{sy}$ , które po transformacji x-y/ $\alpha$ - $\beta$  do nieruchomego układu współrzędnych związanych ze stojanem  $\alpha$ - $\beta$  oraz zmianie liczby faz  $\alpha$ - $\beta$ /ABC, stanowią wartości zadane  $i_{A_c}$ ,  $i_{B_c}$ ,  $i_{C_c}$ , dla histerezo-

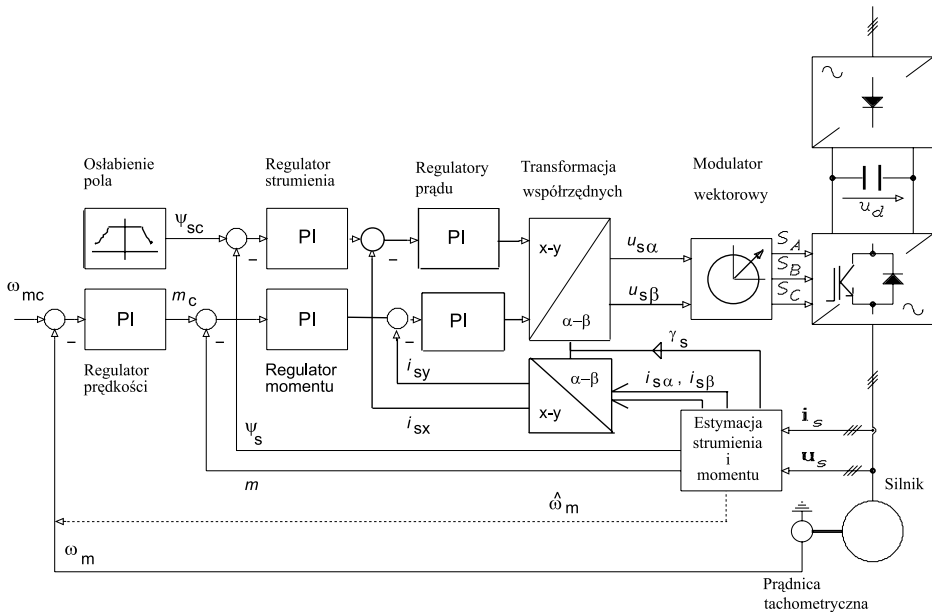
wych regulatorów prądów stojana. Regulatory histerezy generują sygnały stanów załączeń  $S_A, S_B, S_C$ , tranzystorowego falownika PWM.



Rys. 4.8. Dwustrefowa regulacja silnika klatkowego z estymacją momentu i strumienia (bezpośrednie FOC) – histerezyowe regulatory prądów falownika PWM

#### 4.2.2. Bezpośrednie sterowanie FOC z liniowymi regulatorami prądów (PI) pracujących w synchronicznym układzie współrzędnych

Jednym z częściej stosowanych rozwiązań jest układ bezpośredniego sterowania FOC z liniową regulacją prądów falownika w synchronicznym układzie współrzędnych x-y. Cechą charakterystyczną tego układu jest to, że mierzone trójfazowe prądy stojana są przeliczane do równoważnego układu dwufazowego  $\alpha$ - $\beta$ , a następnie transformowane (odwirowanie) do wirującego układu współrzędnych połowych w bloku  $\alpha$ - $\beta$ /x-y. Dlatego regulatory prądu typu PI pracują z sygnałami napięcia stałego, co zapewnia eliminację uchybów w stanach ustalonych. Generowane przez regulatory PI prądów wartości zadane napięć po transformacji współrzędnych w bloku x-y/ $\alpha$ - $\beta$  jako składowe stojanowe  $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$  doprowadzane są do modulatora wektorowego, który generuje sygnały załączeń  $S_A, S_B, S_C$ , tranzystorów falownika PWM.



Rys. 4.9. Regulacja silnika klatkowego z estymacją momentu i strumienia (bezpośrednie FOC) – liniowe regulatory (PI) prądów falownika PWM

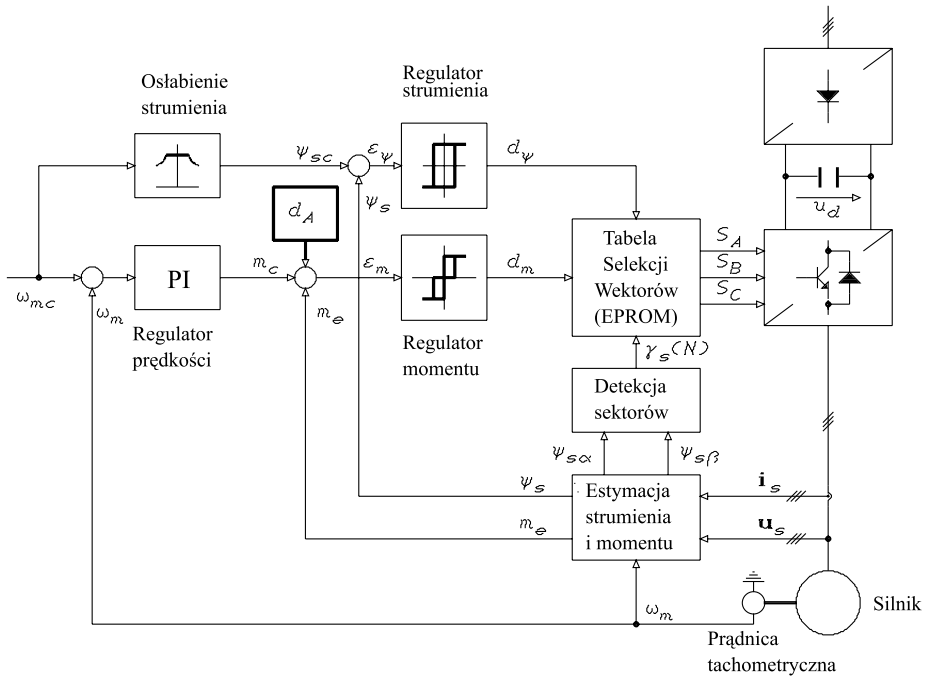
Właściwości układów z modulatorami wektorowymi oraz modulatorami sinusoidalnymi są zbliżone, a powszechne użycie tych pierwszych wynika tylko z tego, iż ich zasada podana została w formie algorytmu i może być łatwo realizowana w systemach mikroprocesorowych [1,7].

Uwaga: Nie należy mylić pojęć *modulatora wektorowego* ze *sterowaniem wektorowym silnika klatkowego!* Modulacja (modulator) wektorowa jest sposobem formowania napięcia wyjściowego falownika PWM i w tym sensie jest podobną techniką jak modulacja sinusoidalna, modulacja typu „regular sampling”, optymalna, etc. Natomiast termin „sterowanie wektorowe silnika klatkowego” odnosi się do metody regulacji częstotliwościowej, która zapewnia odsprężone sterowanie momentu i strumienia silnika, zarówno w stanach ustalonych jak i dynamicznych.

## 5. Schematy blokowe układów bezpośredniego sterowania momentu (DTC)

### 5.1. Układ bezpośredniego sterowania momentu (DTC) z kołowym kształtem trajektorii wektora strumienia

Schemat blokowy układu DTC z kołowym kształtem trajektorii wektora strumienia skojarzonego stojana pokazano na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Układ bezpośredniego sterowania momentu (DTC) z kołowym kształtem trajektorii wektora strumienia (metoda Takahashi & Nogouchi)

Wartości zadane amplitudy strumienia –  $\psi_{sc}$  oraz (doprowadzona z wyjścia regulatora prędkości PI) momentu –  $m_c$  są porównywane z wartościami mierzonymi –  $\psi_s$  oraz –  $m_e$  odpowiednio w regulatorach strumienia i momentu. Regulatorem amplitudy strumienia jest komparator dwustanowy, podczas gdy regulator momentu stanowi komparator trójstanowy. Zdyskretyzowane sygnały wyjściowe regulatora strumienia zdefiniowane są następująco:

$$d_\psi = 1 \quad \text{dla} \quad \psi_s < \psi_{sc} - H_\psi \quad (5.1a)$$

$$d_\psi = 0 \quad \text{dla} \quad \psi_s > \psi_{sc} + H_\psi \quad (5.1b)$$

oraz dla regulatora momentu:

$$d_m = 1 \quad \text{dla} \quad m < m_c - H_m \quad (5.2a)$$

$$d_m = 0 \quad \text{dla} \quad m = m_c \quad (5.2b)$$

$$d_m = -1 \quad \text{dla} \quad m > m_c + H_m \quad (5.2c)$$

Zmienne cyfrowe  $d_\psi$ ,  $d_m$  oraz położenie wektora strumienia  $\gamma_{s\psi}(N) = \arctg(\psi_{s\beta}/\psi_{s\alpha})$  tworzą słowo bitowe, które doprowadzone do adresu pamięci EPROM generuje odpowiedni wektor napięcia falownika wg tabeli 1.

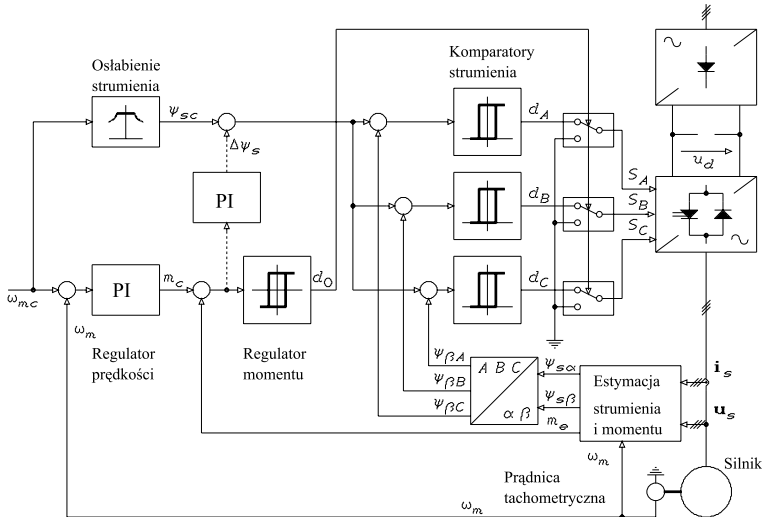
Tabela 1.

$\gamma_{s\psi}^{(N)}$		$d_\psi d_m$					
		N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6
$d_\psi=1$	$d_m=1$	$u_2(110)$	$u_3(010)$	$u_4(011)$	$u_5(001)$	$u_6(101)$	$u_1(100)$
	$d_m=0$	$u_7(111)$	$u_0(000)$	$u_7(111)$	$u_0(000)$	$u_7(111)$	$u_0(000)$
	$d_m=-1$	$u_6(101)$	$u_1(100)$	$u_2(110)$	$u_3(010)$	$u_4(011)$	$u_5(001)$
$d_\psi=0$	$d_m=1$	$u_3(010)$	$u_4(011)$	$u_5(001)$	$u_6(101)$	$u_1(100)$	$u_2(110)$
	$d_m=0$	$u_0(000)$	$u_7(111)$	$u_0(000)$	$u_7(111)$	$u_0(000)$	$u_7(111)$
	$d_m=-1$	$u_5(001)$	$u_6(101)$	$u_1(100)$	$u_2(110)$	$u_3(010)$	$u_4(011)$

Powyższa tabela wynika z analizy podanej w rozdz. 3.2.2 (rys. 3.11) i dobrana została w ten sposób aby w każdej chwili wybierać wektor napięcia falownika, który minimalizuje uchyb momentu i strumienia. Widoczny na rys. 5.1. blok  $d_A$  przedstawia dodatkowy generator fali nośnej (piłokształtna lub prostokątna), który poprawia warunki startu i pracy wokół zera prędkości kątownej (0-3 Hz), a dla wyższych częstotliwości jest odłączany [4,5].

## 5.2. Układ bezpośredniego sterowania momentu (DTC) z sześciokątnym kształtem trajektorii wektora strumienia

Schemat blokowy układu DTC z sześciokątnym kształtem trajektorii wektora strumienia skojarzonego stojana pokazano na rys. 5.2.



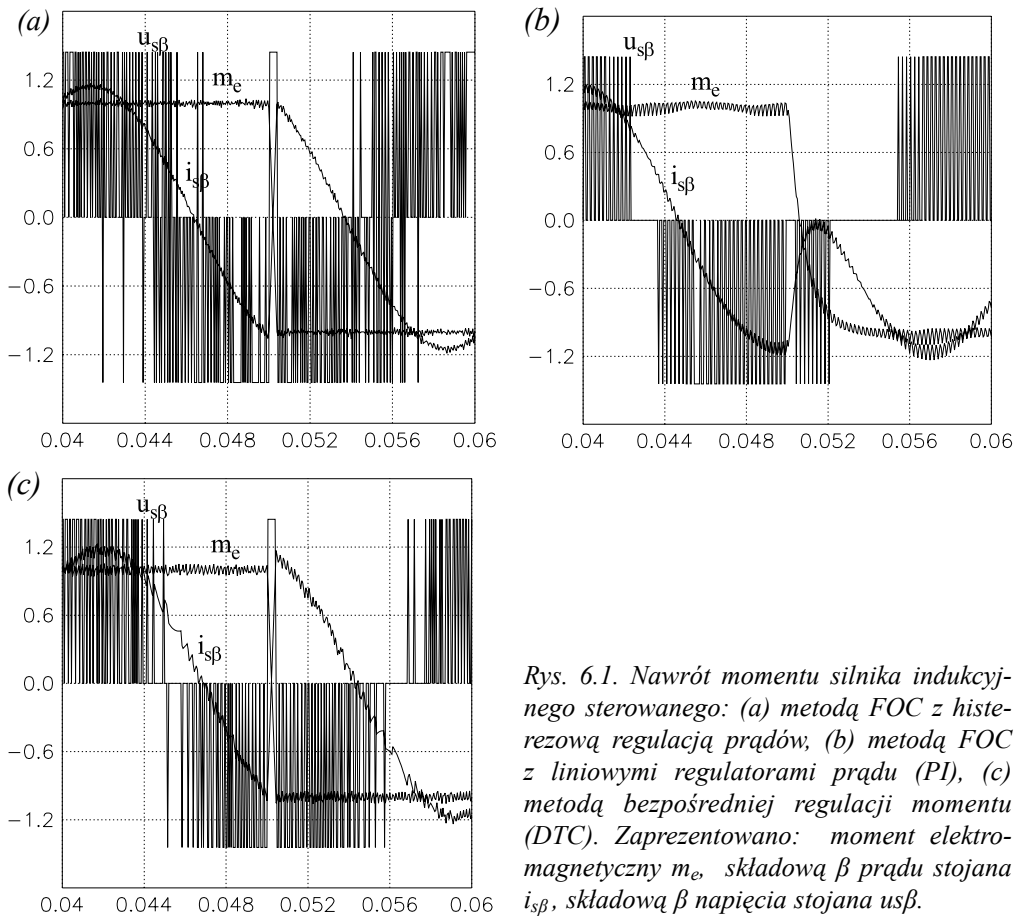
Rys. 5.2. Układ bezpośredniego sterowania momentu (DTC) z sześciokątnym kształtem trajektorii wektora strumienia (metoda Depenbrocka)

Powyższa metoda różni się od metody przedstawionej na rys. 5.1 tym, że zastosowano tu nie jeden, lecz trzy dwustanowe komparatory strumienia, które określają

zarówno uchyb amplitudy jak i położenie (sektor) wektora strumienia. Dlatego tabela selekcji wektorów napięcia jest zbyt duża, gdyż sygnały wyjściowe komparatorów strumienia określają jednoznacznie sektor w którym znajduje się strumień, a tym samym który wektor napięcia powinien być załączony. W danym sektorze (rys. 3.9) wybierany jest zawsze jeden wektor aktywny, który posuwa wektor strumienia do przodu (lub do tyłu – przy pracy generatorowej) albo wektor zerowy. W efekcie trajektoria wektora strumienia stojana ma kształt sześciokątny jak przy zasilaniu z falownika o napięciu blokowym (rys. 3.10b). Mimo PWM prąd ma kształt niesinusoidalny.

## 6. Właściwości dynamiczne

Właściwości dynamiczne podczas skokowej zmiany wartości zadanej momentu elektromagnetycznego silnika dla dwóch strategii sterowania wektorowego pokazano na rys. 6.



Rys. 6.1. Nawrót momentu silnika indukcyjnego sterowanego: (a) metodą FOC z histerezową regulacją prądów, (b) metodą FOC z liniowymi regulatorami prądu (PI), (c) metodą bezpośredniej regulacji momentu (DTC). Zaprezentowano: moment elektromagnetyczny  $m_e$ , składową  $\beta$  prądu stojana  $i_{s\beta}$ , składową  $\beta$  napięcia stojana  $u_{s\beta}$ .



Porównując oscylogramy dla poszczególnych metod można zauważyć, że wersje z regulacją histerezową (rys. 6.1a) i (rys. 6.1c) są szybsze od wersji typu: regulator liniowy (PI) + modulator PWM (rys. 61.b). Taki wynik nie zaskakuje, gdyż regulator histerezowy jest zawsze szybszy od liniowego PI. Jednakże zaleta wysokiej dynamiki układów histerezowych jest okupiona zmienną częstotliwością łączeń falownika, co daje nieprzyjemny hałas, szczególnie przy pracy silnika w zakresie dolnych prędkości kątowych. Jest to spowodowane brakiem oddzielnego bloku modulatora, który zapewnia stałą częstotliwość łączeń oraz dobrze zdefiniowane spektrum harmoniczných napięcia wyjściowego falownika.

## 7. Zakończenie i wnioski

Podstawowe właściwości metod sterowania wektorowego przedstawiono w tabeli 2. Jak wynika z przedstawionych rozważań zarówno metoda sterowania połowo zorientowanego FOC jak i bezpośredniej regulacji momentu DTC mogą zapewnić identyczne właściwości dynamiczne. Jest to zrozumiałe, gdyż mimo różnych strategii i struktur sterowania zjawiska fizyczne limitujące dynamikę zmian momentu silnika klatkowego są identyczne. W kręgach fachowców istnieje pogląd, że metoda FOC, dzięki strukturze kaskadowej z podporządkowanymi regulatorami prądów, jest łatwiejsza do uruchamiania i zabezpieczenia zarówno falownika jak i silnika.

Tabela 2.

Lp.	Parametr	Sterowanie połowo zorientowane (FOC)	Bezpośrednia regulacja momentu (DTC)
1.	Praca czterokwadrantowa	tak	tak
2.	blok modulatora PWM	tak	brak
3.	Częstotliwość łączeń	stała	zmienna
4.	Obwody regulacji prądu	tak	brak
5.	Struktura regulacji	kaskadowa	bezpośrednia
6.	Odsprężenie dynamiczne regulacji momentu	tylko dla $\psi_r = \text{const.}$	tak
7.	Transformacje współrzędnych	tak	brak
8.	Kształt prądu	sinusoidalny	odkształcony
9.	Możliwość pracy bez czujnika prędkości/położenia	tak	tak

## Literatura

1. M. P. Kaźmierkowski and H. Tunia: „Automatic Control of Converter-Fed Drives”, ELSEVIER Amsterdam-London-New York-Tokyo, **1994**.
2. M. P. Kaźmierkowski, W. Sulkowski: „Napęd z silnikiem klatkowym sterowanym metodą polowo zorientowaną”, *Przegląd Elektrotechniczny*, **1987**, nr 6, str. 153–158.
3. M. P. Kaźmierkowski, P. Fabijański, W. Sulkowski: „Serwonapęd tranzystorowy z silnikiem indukcyjnym klatkowym dla robotów przemysłowych i obrabiarek”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1991, nr 5, str. 97–100.
4. A. Kasprowicz: „Bezpośrednie sterowanie momentu i strumienia stojana silnika klatkowego zasilanego z falownika napięcia”, Praca doktorska, Politechnika Warszawska, 1993.
5. M. P. Kaźmierkowski, A. B. Kasprowicz: „Regulacja bezpośrednia momentu i strumienia silnika klatkowego zasilanego z falownika napięcia”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1994, nr 2, str. 30–33.
6. J. Mielczarek: „Bezpośrednie sterowanie momentem. Następna generacja metod sterowania silnikiem”, *Przegląd Elektrotechn.*, 1995, nr 5, str. 125–129.
7. H. Tunia, M. P. Kaźmierkowski: „Automatyka napędu elektrycznego”, Warszawa 1987, PWN.

# 3

## Dobór silników elektrycznych

### 1. Wprowadzenie

Problematyka doboru silnika elektrycznego do konkretnego urządzenia mechanicznego, jest zagadnieniem wielopłaszczyznowym. W sensie realizacji projektowej i technicznej można ją zasadniczo podzielić na grupy:

1. Dobór silnika pod względem parametrów elektrycznych i mechanicznych w zależności od parametrów sieci zasilającej i wymagań urządzeń napędzanych;
2. Dobór wyposażenia do silnika elektrycznego (silników);
3. Dobór zabezpieczeń do silnika elektrycznego (silników);
4. Dobór przewodów zasilających;
5. Ustawienie silników;
6. Realizacja odbioru technicznego.

Przed przystąpieniem do realizacji projektowej i technicznej napędu elektrycznego, przyszły użytkownik (inwestor) powinien udostępnić (projektantowi napędu) następujące dane o napędzie:

- Charakterystyki mechaniczne urządzenia napędzanego (moment w funkcji prędkości kątowej (obrotowej), moment bezwładności, sprężystość, luzy);
  - Wymagany zakres prędkości kątowej (obrotowej);
  - Napięcie źródła zasilania z tolerancjami (napięcie/częstotliwość);
  - Dostępna moc ciągła źródła zasilania i jego moc zwarciowa;
  - Warunki pracy napędu (praca ciągła, przejściowa, cykliczna);
  - Warunki dynamiczne napędu (gradient wzrostu prędkości obrotowej, gradient opadania prędkości obrotowej, odpowiedź napędu na wymuszenie w postaci skoku jednostkowego itp.);
  - Warunki w miejscu zainstalowania napędu (wymagany stopień ochrony, wartość wilgotności i temperatury, wysokość zainstalowania nad poziomem morza, właściwości środowiska, rodzaj czynnika chłodzącego i sposób jego przepływu);
  - Harmoniczne przemiennego napięcia zasilania, załamania komutacyjne, przepięcia.
- Przy doborze silników elektrycznych należy również uwzględnić:
- Przeznaczenie i charakter technologiczny urządzeń napędzanych;
  - Stopień zautomatyzowania napędu;
  - Koszty instalacji i eksploatacji.

Należy również o tym pamiętać, iż silniki elektryczne mogą być wykorzystane do pracy w warunkach innych niż znamionowe tylko wówczas, gdy nie zostaną przekroczone dopuszczalne wartości przyrostów temperatury poszczególnych części, z uwzględnieniem maksymalnej temperatury czynnika chłodzącego i wysokości zainstalowania nad poziomem morza. Zaleca się stosować w miarę możliwości silniki chłodzone powietrzem, zasysanym bezpośrednio z otoczenia.

## **2. Dobór silnika pod względem parametrów elektrycznych i mechanicznych w zależności od parametrów sieci zasilającej i wymagań urządzeń napędzanych – wytyczne (załączniki 1–4)**

### **2.1. Napięcie i częstotliwość znamionowa silnika**

Wartość napięcia i częstotliwości silnika powinna być równa wartości napięcia i częstotliwości sieci zasilającej, do której silnik ma być podłączony.

### **2.2. Rodzaj prądu**

Do napędów o stałej prędkości obrotowej należy stosować przede wszystkim silniki prądu przemiennego, a zwłaszcza indukcyjne.

### **2.3. Prędkość obrotowa**

Znamionową prędkość obrotową należy dobrać do prędkości wymaganej przez urządzenie napędzane. Przy wymaganych prędkościach urządzeń odbiegających znacznie od prędkości znamionowych silników należy rozważyć zastosowanie:

- silników wielobiegowych;
- motoreduktorów;
- przekładni;
- przetwornic częstotliwości.

Przy pracy przerywanej i częstych rozruchach, należy dobrać silnik o takiej prędkości obrotowej lub takim momencie bezwładności, aby straty energii w obwodzie wirnika w czasie rozruchu i hamowania były jak najmniejsze;

### **2.4. Silniki z regulacją prędkości obrotowej**

Przy doborze rodzaju silnika do napędu urządzenia wymagającego regulacji prędkości obrotowej należy uwzględnić co następuje:

- zakres regulacji;
- kierunek regulacji (w górę lub w dół);
- płynność regulacji;
- stabilność pracy przy danej prędkości;

- Dopuszczalne obciążenie w danym zakresie regulacji;
- Metodę regulacji (np. przy stałym momencie i przy stałej mocy).

W celu spełnienia powyższych wymagań, zaleca się stosować niżej omówione silniki i układy regulacji:

1. Silnik indukcyjny klatkowy z przełączalną liczbą biegunów lub z kilkoma przełączalnymi uzwojeniami, gdy urządzenie napędzane dopuszcza skokową zmianę obrotów;
2. Energoelektroniczne układy regulacji prędkości obrotowej poprzez zmianę częstotliwości napięcia zasilania – dla silników indukcyjnych klatkowych;
3. Energoelektroniczne układy regulacji prędkości obrotowej poprzez zmianę rezystancji (napięcia) w wirniku – dla silników indukcyjnych pierścieniowych;
4. Silnik indukcyjny pierścieniowy ze zmianą rezystancji w obwodzie wirnika, gdy urządzenie napędzane wymaga regulacji prędkości obrotowej w sposób ciągły, w dół od prędkości znamionowej. Na rezystorze regulacyjnym dopuszczalna jest wówczas regulacja przy pracy ciągłej, nie więcej niż o 20% w dół od prędkości znamionowej, przy stałym momencie obrotowym. Przy obciążeniu dorywczym lub momencie obciążenia malejącym z prędkością obrotową, dopuszcza się regulację o 40% w dół od prędkości znamionowej. Przy zastosowaniu tego rodzaju regulacji prędkości obrotowej, należy przeprowadzić analizę techniczno-ekonomiczną uwzględniającą możliwość zastosowania układów regulacyjnych wg punktów 2.4./2. i 2.4./3., mając na uwadze oszczędność energii elektrycznej w czasie całego okresu eksploatacji silników;
5. Silnik prądu stałego, gdy nie można zastosować silników indukcyjnych wg punktów 2.4./1. i 2.4./4. Ze względu na wymagany szerszy zakres regulacji lub kierunek regulacji (np. wymagana jest ciągła regulacja obrotów w dół i w górę od prędkości znamionowej);
6. Silnik komutatorowy prądu przemiennego, gdy wymagana moc silnika nie przekracza wartości 40 kW oraz gdy nie może być zastosowany silnik z regulowaną prędkością obrotową wg punktów 2.4./1. – 2.4./5.;
7. Jeżeli w/w silniki nie spełnią wymagań należy rozważyć możliwość zastosowania specjalnych układów regulacyjnych wielomaszynowych, np. układy kaskadowe.

## **2.5. Moc silnika**

### **2.5.1. Postanowienia ogólne**

Przy doborze mocy silnika, w zależności od rodzaju pracy określonego przez użytkownika, powinny być spełnione niżej podane warunki:

1. Moc silnika powinna być dobrana do potrzeb pracy urządzenia napędzanego. Zaleca się, aby silnik był obciążony mocą od 0,75 do 1,0  $P_n$  (nie dotyczy to silników synchronicznych, jeśli mają służyć do poprawy współczynnika mocy);
2. Przeciążalność powinna być dostosowana do wartości szczytowego obciążenia występującego w napędzanym urządzeniu;

3. Przyrosty temperatury części silnika, moment i prąd rozruchowy w czasie pracy nie powinny przekraczać wartości dopuszczalnych;
4. Odpowiedzialność za określenie rodzaju pracy ciąży na zamawiającym. W przypadkach, gdy obciążenie nie zmienia się lub gdy zmienia się w sposób znany, przebieg pracy można określić liczbowo lub za pomocą wykresu, przedstawiającego przebieg wielkości zmiennych w funkcji czasu. Jeżeli kolejność występowania poszczególnych obciążeń może być określona, to należy wybrać równoważny przebieg (rodzaje pracy S2 – S8) i co najmniej takie samo narażenie (np. termiczne, mechaniczne) jak w przypadku przebiegu rzeczywistego lub należy przyjąć rodzaj pracy S9. Jeżeli nie określono przebiegu pracy, to obowiązuje rodzaj pracy S1 (praca ciągła);
5. W przypadku silników prądu przemiennego zaleca się, aby moc znamionowa, w zależności od napięcia znamionowego, miała wartości większe od wartości podanych.

### 2.5.2. Moc silnika przy pracy ciągłej (S1)

Moc znamionowa silnika powinna być przynajmniej równa mocy wymaganej przez urządzenie napędzane.

### 2.5.3. Moc silnika przy pracy dorywczej (S2)

Dobry silnik powinien mieć moc znamionową określoną dla pracy dorywczej, co najmniej równą mocy wymaganej przez urządzenie napędzane. Jeżeli przebieg obciążenia w czasie i czas pracy różni się znacznie od danych charakterystycznych dla rodzaju pracy S2, należy dobrać moc znamionową silnika metodą technicznie uzasadnioną, np. metodą podaną poniżej.

Przy zadanych wartościach obciążenia dorywczego  $P_x$  i czasu jego trwania  $t_x$ , należy założyć moc znamionową silnika  $P_n$ , przy czym:

$$P_n = \alpha \cdot P_x \quad (1)$$

gdzie:  $\alpha < 1$

Na podstawie przebiegu funkcji sprawności, w zależności od mocy  $\eta = f(P)$ , należy obliczyć straty  $\Delta P_n$  przy obciążeniu znamionowym i  $\Delta P_x$  przy obciążeniu dorywczym, dla których wyznacza się współczynnik przeciążalności cieplnej:

$$\gamma = \frac{P_x}{P_n} \quad (2)$$

Jeżeli znana jest cieplna stała czasowa  $T_c$ , to należy obliczyć czas  $t_x$ :

$$t_x = T_c \cdot \ln \frac{\gamma}{\gamma - 1} \quad (3)$$

i porównać z czasem zadany.

#### 2.5.4. Moc silnika przy pracy okresowej przerywanej (S3, S4, S5)

Dobry silnik powinien mieć moc znamionową określoną dla pracy przerywanej co najmniej równą mocy wymaganej przez urządzenie napędzane. Jeżeli wymagany względny czas pracy przerywanej różni się znacznie od czasów charakterystycznych dla S3 – S5 lub czas trwania cyklu jest krótszy niż 5 minut, należy dobrać moc znamionową silnika metodą technicznie uzasadnioną, np. metodą średnich strat opierając się na warunku, że straty średnie odpowiadają wydzieleniu w czasie cyklu tej samej ilości energii, jaka jest zamieniona w silniku na ciepło przy rzeczywistym cyklu obciążenia. Moc znamionową silnika  $P_n$  należy dobrać, posługując się metodą średnich strat tak, aby spełniony był warunek:

$$\frac{P_n}{\eta_n} - P_n \geq P_{sr} \quad (4)$$

#### 2.5.5. Moc silnika przy pracy okresowej długotrwałej (S6, S7, S8)

Jeżeli wymagany przez urządzenie napędzane przebieg obciążenia w czasie nie odpowiada ani pracy ciągłej, ani pracy okresowej przerywanej o czasie trwania cyklu równym lub mniejszym niż 10 minut, to moc znamionową silnika należy dobrać metodą technicznie uzasadnioną, z zachowaniem wymagań podanych w punktach: 2.5.1. i 2.5.7. Jeżeli nie dotyczy to napędów, dla których są produkowane specjalne silniki (np. napęd wirówek cukrowniczych), to przy doborze należy posłużyć się metodą kolejnych przybliżeń, np. metodą średnich strat.

W uzasadnionych przypadkach dopuszcza się dobór mocy silnika jedną z metod uproszczonych:

1. *Metoda prądu zastępczego* – oparta na założeniu, że wyznaczony prąd zastępczy  $I_z$  o stałej wartości wydzieli w silniku taką samą ilość ciepła co prąd rzeczywisty o natężeniu zmiennym. Dobór silnika powinien uwzględniać warunek:

$$I_n \geq I_z \quad (5)$$

2. *Metoda momentu zastępczego* – oparta na założeniu, że moment obrotowy silnika jest proporcjonalny do jego prądu. Warunek ten jest zachowany, np. w silnikach komutatorowych prądu przemiennego, w silnikach indukcyjnych na roboczej części charakterystyki mechanicznej. Dobór silnika powinien uwzględniać warunek:

$$M_n \geq M_z \quad (6)$$

3. *Metoda mocy zastępczej* – oparta jest na założeniu, że moc oddawana przez silnik jest proporcjonalna do prądu. Warunek ten jest zachowany w silnikach bocznikowych i obcowzbudnych prądu stałego. Warunek ten jest również zachowany w silnikach indukcyjnych z zastrzeżeniem, że praca odbywa się wyłącznie na części roboczej charakterystyki mechanicznej. Nie zaleca się stosować tej metody do

silników indukcyjnych przy pracy z dużą liczbą rozruchów i hamowania. Dobór silnika powinien uwzględniać warunek:

$$P_n \geq P_z \quad (7)$$

### **2.5.6. Moc silnika przy pracy nieokresowej (S9)**

Jeżeli wymagany przez urządzenie napędzane przebieg obciążenia w czasie nie odpowiada ani pracy ciągłej ani pracy okresowej przerywanej, ani pracy okresowej długotrwałej, to moc znamionową silnika należy dobrać metodą technicznie uzasadnioną, z zachowaniem wymagań podanych w punktach 2.5.1. i 2.5.2. Zaleca się stosować metody doboru jak w punktach 2.5.2. – 2.5.5.

### **2.5.7. Moc silnika z regulacją prędkości obrotowej**

Moc silnika należy dobrać na podstawie porównania mocy wymaganej przez urządzenie napędzane na najbardziej charakterystycznych stopniach prędkości z mocą silnika odpowiadającą tym stopniom prędkości. Należy przy tym uwzględnić rodzaj pracy (ciągła, dorywcza, okresowa przerywana, okresowa długotrwała, nieokresowa) oraz wymagania według punktu 2.5.1.

Przy doborze mocy silnika należy uwzględnić rodzaj przewietrzania silnika (wentylator na wale silnika lub przewietrzanie z wentylatora napędzanego oddzielnym silnikiem, niezależnym od zmiany prędkości obrotowej silnika regulowanego). Nie zaleca się stosowania silników o przewietrzaniu własnym do głębokiej regulacji obrotów.

## **2.6. Moment obrotowy**

Przy dobieraniu silnika należy sprawdzić, czy przy dopuszczalnym spadku napięcia w sieci zasilającej, różnica między minimalnym momentem rozruchowym silnika a momentem oporowym napędzanego urządzenia jest wystarczająca do nadania w wymaganym czasie odpowiedniej prędkości obrotowej, a ponadto, czy moment obrotowy silnika jest wystarczający do pokonania krótkotrwałych oporów występujących w zwykłych warunkach pracy. Jeżeli warunki te nie są spełnione, należy wybrać inny rodzaj silnika, np. z powiększonym momentem rozruchowym lub dobrać silnik o większej mocy.

## **2.7. Wytrzymałość mechaniczna**

Budowa silnika powinna być dostosowana do następujących sił zewnętrznych:

1. Działających wzdłuż osi wału silnika;
2. Działających prostopadle do osi silnika, np. naciąg pasa;
3. Działających na silnik przeznaczony do przybudowania lub wbudowania do urządzenia napędzanego.



### 3. Dobór wyposażenia do silników elektrycznych – wytyczne (załącznik 3)

#### 3.1. Urządzenia rozruchowe

##### 3.1.1. Dobór urządzeń rozruchowych

Dobór urządzeń rozruchowych powinien uwzględniać:

1. Rodzaj silnika i jego dane znamionowe;
2. Rodzaj urządzenia napędzanego, wartość i przebieg momentu rozruchowego, potrzebnego do jego uruchomienia, przewidywany czas rozruchu i częstość rozruchów (cykl rozruchów);
3. Warunki otoczenia w miejscu zainstalowania silnika i urządzenia rozruchowego;
4. Stopień zautomatyzowania napędu;
5. Rodzaj i parametry sieci zasilającej;
6. Rodzaj i parametry energoelektronicznego układu regulacyjnego, w przypadku jego zainstalowania.

Zaleca się, jeżeli warunki napięciowe, układ sieci zasilającej i wymagania napędzanych urządzeń na to pozwalają, stosować rozruch bezpośredni.

##### 3.1.2. Prąd rozruchu silników

Urządzenie rozruchowe należy dobrać tak, aby stosunek największej wartości prądu rozruchu silnika podczas rozruchu urządzenia napędzanego do prądu znamionowego silnika nie przekraczał wartości podanych w tabeli 1.

Tabela 1.

Moc znamionowa silnika <sup>1)</sup> wyrażona w kW	Do 5	Powyżej 5 i nie więcej niż 100
Stosunek prądu rozruchu do prądu znamionowego silnika	2.5	2.2

<sup>1)</sup> Dla silników o mocy znamionowej powyżej 100 kW stosunku prądów nie normalizuje się

Dopuszcza się inny stosunek prądu rozruchowego do prądu znamionowego podany w tabeli 1., jeżeli prąd rozruchu nie przekracza następujących wartości:

- 60 A – przy napięciu zasilania 380 V, dla silników prądu przemiennego;
- 100 A – przy napięciu zasilania 220 V, dla silników prądu przemiennego;
- 40 A – przy napięciu zasilania 220 V, dla silników prądu stałego.

##### 3.1.3. Spadek napięcia

Dobór sposobu rozruchu i urządzenia rozruchowego, powinien zapewnić takie ograniczenie prądu rozruchowego silnika, aby występujący przy jego uruchomieniu spadek napięcia nie miał ujemnego wpływu na przebieg jego rozruchu ani na pracę innych odbiorników zasilanych z tej samej sieci.

## **3.2. Urządzenia sterujące**

### **3.2.1. Dobór urządzeń sterujących**

Dobór urządzeń sterujących powinien uwzględniać:

1. Stopień zautomatyzowania napędu i niezawodności działania;
2. Nieprawidłowości przebiegu procesu produkcyjnego;
3. Bezpieczeństwo obsługi.

### **3.2.2. Wyłączanie przy sterowaniu zdalnym**

Jeżeli napęd mechanizmu jest sterowany zdalnie, należy przewidzieć możliwość wyłączenia napędu z kilku miejsc (np. przy długich przenośnikach), nie mniej jednak niż z każdego stanowiska obsługi.

Ponadto należy zastosować niezależne przyciski umożliwiające awaryjne wyłączenie całego układu z jednoczesną blokadą, uniemożliwiającą uruchomienie tego układu z dowolnego stanowiska obsługi.

### **3.2.3. Blokady**

Aby wykluczyć możliwość zakłóceń w pracy napędu, spowodowanych niewłaściwym stanem połączeń układu lub błędami obsługi, należy stosować blokady zapewniające wymaganą kolejność przebiegu połączeń (zwłaszcza w procesie rozruchu).

## **3.3. Przyrządy pomiarowe**

Rodzaj, liczbę i jakość (klasę dokładności) przyrządów pomiarowych należy dobrać w zależności od potrzeb, uzasadnionych technicznie. W szczególności zaleca się:

1. Stosować przyrządy mierzące natężenie prądu elektrycznego, gdy obsługa ma obowiązek regulować obciążenie urządzenia napędzanego w zależności od obciążenia silnika lub niedopuszczenia do przekroczenia określonej wartości prądu, podczas rozruchu kontrolowanego;
2. Stosować przyrządy mierzące napięcie, gdy jest wymagana określona wartość napięcia zasilania silnika.

## **3.4. Urządzenia sygnalizacyjne**

Urządzenia sygnalizacyjne należy stosować w przypadku, gdy rozruch urządzeń i ich praca lub zakłócenia w pracy układu napędowego;

1. Zagrożają bezpieczeństwu życia obsługi i otoczenia;
2. Mogą spowodować poważne straty materialne wynikające z zakłóceń procesu technologicznego lub uszkodzenia kosztownych urządzeń.

Zaleca się stosować urządzenia sygnalizacyjne w układach napędowych sterowanych automatycznie lub półautomatycznie, szczególnie gdy uruchomienie procesu następuje centralnie z miejsca odległego od uruchamianych napędów.

## **4. Dobór zabezpieczeń do silników elektrycznych – wytyczne**

### **4.1. Zabezpieczenia silników o napięciu znamionowym nieprzekraczającym wartości 1000 V**

#### **4.1.1. Zabezpieczenia zwarciove**

Zabezpieczenia zwarciove należy stosować:

1. W układach prądu przemiennego – w każdej fazie sieci zasilającej;
2. W układach prądu stałego – w obu biegunach lub w jednym biegunie, jeżeli drugi jest uziemiony.

Każdy silnik powinien mieć zabezpieczenie zwarciove oddzielne lub wspólne dla grupy urządzeń tak dobrane, aby w przypadku zwarcia w dowolnym silniku grupy zadziałało zabezpieczenie zwarciove tej grupy. Silniki wielozwojeniowe (wielobiegiowe) można zabezpieczyć jednym układem zabezpieczeń, działającym w przypadku zwarcia w jakimkolwiek uzwojeniu.

Nie należy stosować zabezpieczeń zwarciowych w obwodach wzbudzenia.

Prąd znamionowy zabezpieczenia zwarciowego powinien być dobrany do maksymalnej wartości początkowego prądu rozruchowego, występującego w normalnych warunkach pracy.

Przy stosowaniu urządzeń energoelektronicznych z własnym zabezpieczeniem, które odpowiada zabezpieczeniu silnika, dopuszcza się niestosowanie innego rodzaju zabezpieczeń.

#### **4.1.2. Zabezpieczenia przeciążeniowe**

W zabezpieczenia przeciążeniowe powinien być wyposażony każdy silnik elektryczny.

Dopuszcza się niestosowanie zabezpieczeń przeciążeniowych do następującej grupy silników:

1. Przeznaczonych do pracy ciągłej o mocy znamionowej nie przekraczającej wartości 10 kW, jeżeli przeciążenie silnika jest mało prawdopodobne, np. napęd pomp odśrodkowych, wentylatorów;
2. O prądzie znamionowym mniejszym od wartości 4 A, jeżeli brak zabezpieczenia nie spowoduje przy przeciążeniu uszkodzenia mechanizmu napędzanego;
3. Przeznaczonych do pracy przerywanej, przy których zabezpieczenie za pomocą wyzwalaczy lub przekaźników nie spełni swej roli, zabezpieczenie zaś czujnikami temperatury nie jest ekonomicznie uzasadnione;
4. Stanowiących zespół z własnym transformatorem, który ma własne zabezpieczenie przeciążeniowe.

W układach trójfazowych bez uziemionego punktu neutralnego (zerowego), należy stosować zabezpieczenia przeciążeniowe co najmniej w dwóch fazach, a w układach z uziemionym punktem neutralnym (zerowym) – w trzech fazach.

W układach jednofazowych i prądu stałego należy stosować zabezpieczenia przeciążeniowe co najmniej w jednej fazie lub biegunie (nie uziemionym).

Dla silników wielouzwojeniowych zabezpieczenia przeciążeniowe należy stosować dla każdego uzwojenia, jeżeli ich prądy znamionowe są różne.

Nie należy stosować zabezpieczeń przeciążeniowych w obwodach wzbudzenia silników.

Przy pracy ciągłej prąd zabezpieczenia przeciążeniowego powinien być nie większy niż 1,1 – krotna wartość prądu znamionowego silnika. Czujniki temperatury powinny być tak dobrane, aby w żadnym miejscu silnika nie została przekroczona temperatura, której wartość nie powinna być wyższa o 5°C od temperatury granicznej.

#### **4.1.3. Zabezpieczenia zanikowe**

Zabezpieczenia zanikowe należy stosować w następujących przypadkach:

1. Gdy obniżenie napięcia zasilania uniemożliwia prawidłową pracę silnika, a zabezpieczenie przeciążeniowe nie jest stosowane;
2. Gdy jest niepożądane samoczynne uruchomienie silnika po powrocie napięcia do wartości znamionowej;
3. Gdy silnik ma urządzenie rozruchowe sterowane ręcznie, a rozruch bez urządzenia rozruchowego jest niedopuszczalny;
4. Gdy proces technologiczny nie dopuszcza stosowania samorozruchu;
5. Gdy jest wskazane odłączenie określonych silników w celu umożliwienia poprawnego samorozruchu silników o wyższej kategorii ważności.

Dopuszcza się stosowanie zabezpieczenia zanikowego wspólnego dla kilku silników zasilanych z jednego źródła zasilania.

Dopuszcza się stosowanie zabezpieczeń zanikowych zwłocznych, jeżeli silniki napędzają mechanizmy o znacznym czasie wybiegu.

#### **4.1.4. Zabezpieczenia przed nadmiernym podwyższeniem prędkości obrotowej**

Zabezpieczenia przed nadmiernym podwyższeniem prędkości obrotowej należy stosować w przypadku, gdy istnieje możliwość uszkodzenia silnika lub napędzanego mechanizmu, np. za pomocą wyłącznika odśrodkowego.

#### **4.1.5. Zabezpieczenie silników synchronicznych przed wypadnięciem z synchronizmu**

Zabezpieczenie silników synchronicznych przed wypadnięciem z synchronizmu należy stosować w przypadkach:

1. Jeżeli jest możliwy samoczynny rozruch silnika – zabezpieczenie powinno spowodować odwzbudzenie silnika poprzez przyłączenie uzwojenia wzbudzenia do gałęzi rezystora gaszącego (tłumiącego), po czym powinien nastąpić samorozruch;
2. Jeżeli samoczynny rozruch silnika nie jest możliwy – zabezpieczenie powinno spowodować odwzbudzenie i odłączenie silnika od sieci zasilającej.

#### **4.1.6. Inne zabezpieczenia**

Inne zabezpieczenia należy stosować w miarę potrzeby, jeżeli jest to celowe ze względu na pewność pracy silnika lub bezpieczeństwo obsługi, np. od porażen prądem elektrycznym.

### **4.2. Zabezpieczenia silników o napięciu znamionowym powyżej 1000 V**

#### **4.2.1. Postanowienia ogólne**

Należy stosować analogiczne zabezpieczenia jak w punkcie 4.1. z uwzględnieniem niżej podanych wymagań.

#### **4.2.2. Zabezpieczenie od skutków zwarć międzyfazowych**

Zabezpieczenie od skutków zwarć międzyfazowych należy wykonać za pomocą bezpieczników w połączeniu z odłącznikami mocy, zainstalowanych w trzech fazach. Jeżeli charakterystyka i wielkość znamionowa bezpieczników nie pozwalają na spełnienie warunków stawianych zabezpieczeniu (wybiorczość mocy zwarciowej), to zabezpieczenie należy wykonać:

1. Dla silników mających wyprowadzone tylko trzy końce uzwojenia – jako zabezpieczenie nadmiarowo-prądowe bezzwłoczne dwufazowe;
2. Dla silników o mocy powyżej 2000 kW i mających 6 wyprowadzonych końcówek uzwojenia – jako zabezpieczenie różnicowo-prądowe.

Zabezpieczenia te przyłączone do przekładników prądowych, zainstalowanych na doprowadzeniach do silnika, powinny spowodować wyłączenie wyłącznika mocy.

#### **4.2.3. Zabezpieczenie od skutków zwarć doziemnych**

Zabezpieczenie od skutków zwarć doziemnych trzeba wykonać za pomocą przekładnika składowej zerowej prądu i przekładnika nadmiarowo-prądowego bezzwłoczno. Zabezpieczenie to powinno działać:

1. Na wyłączenie wyłącznika silnika – przy silnikach przyłączonych do sieci o pojemnościowym prądzie zwarciowym doziemnym przekraczającym 10 A;
2. Na sygnał akustyczny lub optyczny – przy silnikach przyłączonych do sieci o pojemnościowym prądzie zwarciowym doziemnym nieprzekraczającym 10 A.

#### **4.2.4. Zabezpieczenie przeciążeniowe**

Zabezpieczenie przeciążeniowe należy stosować przy silnikach przeznaczonych do pracy ciągłej lub przy obciążeniu długotrwałym, których przeciążenie jest możliwe. Może ono być wykonane, np. za pomocą zabezpieczenia nadmiarowo-prądowego jednofazowego zwłocznego, powodującego:

1. Sygnał;
2. Odciążenie;
3. Wyłączenie silnika;

Odciążenie silnika może być zrealizowane w układzie automatyki zamkniętej.

#### **4.2.5. Zabezpieczenie zanikowe**

Zabezpieczenie zanikowe należy stosować przy silnikach ze zwłoką czasową o stopień większą od czasu własnego, szybko działających zabezpieczeń nadmiarowo-prądowych.

### **5. Dobór przewodów zasilających – wytyczne**

#### **5.1. Dobór przekroju przewodów**

##### **5.1.1. Przekrój przewodów zasilających silnik**

Ze względu na dopuszczalną temperaturę nagrzewania i rozruch, przy doborze przekroju przewodów zasilających silnik, należy przyjąć:

1. Prąd zastępczy równy wartości prądu znamionowego silnika – w przypadku silników przeznaczonych do pracy ciągłej i przy stałym obciążeniu oraz przy doraźnych rozruchach;
2. Prąd zastępczy równy co najmniej 125% wartości prądu znamionowego silnika – w przypadku silników przeznaczonych do pracy ciągłej przy zmiennym obciążeniu i częstych rozruchach.

##### **5.1.2. Przekrój przewodów w obwodzie wirnika silnika indukcyjnego pierścieniowego**

Przy doborze należy przyjąć:

1. W przypadku, gdy silnik ma stałe przylegające szczotki – prąd zastępczy obliczony z prądu znamionowego wirnika wg punktu 5.1.1.;
2. W przypadku, gdy silnik ma podnoszone szczotki oraz gdy jest doraźnie uruchamiany, zaleca się dobierać przekrój przewodów na:
  - 35% wartości prądu znamionowego wirnika, jeżeli silnik w okresie rozruchu jest obciążony momentem nie większym niż 0.5 momentu znamionowego silnika;
  - 50% wartości prądu znamionowego wirnika, jeżeli silnik w okresie rozruchu jest obciążony momentem równym momentowi znamionowemu lub większym.

##### **5.1.3. Przekrój przewodów w obwodach wzbudzenia**

Przekrój przewodów w obwodach wzbudzenia należy dobrać do największego prądu przewidzianego w tym obwodzie.

## **5.2. Przyłączanie przewodów**

### **5.2.1. Wymagania ogólne**

Przewody należy doprowadzić do silnika lub przyrządu z zachowaniem następujących wymagań:

1. Odizolowane części powinny być chronione przed dotykiem;
2. Przewody nie mogą być narażone na uszkodzenia mechaniczne i termiczne;
3. Końce przewodów przyłączone do zacisków, powinny być wystarczająco długie, aby można było w koniecznych przypadkach przesunąć silnik;
4. W przypadku doprowadzenia energii elektrycznej kablem zaleca się, dla silników o mocy powyżej 100 kW, stosować głowice kablowe dobudowane do silnika lub przyrządu.

### **5.2.2. Doprowadzenie przewodów do zacisków silnika i jego wyposażenia**

Doprowadzenie przewodów do zacisków silnika i jego wyposażenia należy wykonać tak, aby był zachowany stopień ochrony odpowiadający budowie silnika i wyposażenia wg PN-88/E-06705 lub wymaganiom stawianym dla określonej przestrzeni (miejsca zainstalowania).

### **5.2.3. Łączenie żył przewodów z zaciskami silnika lub przyrządu**

Łączenie żył przewodów z zaciskami silnika lub przyrządu należy wykonać za pomocą połączeń śrubowych lub innym równoważnym sposobem. Połączenia trzeba zabezpieczyć przed rozluźnieniem. Końce żył przewodów powinny być zaopatrzone w końcówki lub inne równoważne zakończenia.

## **6. Ustawienie silników – wytyczne**

### **6.1. Wymagania ogólne**

Silniki powinny być ustawione na fundamencie spoczywającym w miarę możliwości na gruncie nieruchomym lub na konstrukcji o dostatecznej wytrzymałości mechanicznej. Nie dotyczy to silników, które mogą być umocowane bezpośrednio do podłogi, ściany lub stropu, przybudowane albo wbudowane do napędzanego urządzenia. W pomieszczeniach, w których drgania pochodzące od pracy silników mogą spowodować zakłócenia w pracy innych urządzeń lub zakłócać spokój ludzi przebywających w otoczeniu, należy stosować środki tłumiące tak dobrane, aby energia drgań nie przekraczała dopuszczalnych wartości.

### **6.2. Wyrównywanie osi i płaszczyzn**

Przy ustawianiu silników przeznaczonych do pracy przy poziomym położeniu wału, należy zwrócić uwagę na dokładne ustawienie osi wału silnika w płaszczyź-

nie poziomej, a silników z wałem pionowym – w pionie. Przy napędzie pasowym oraz przy napędzie przez czołowe przekładnie zębate, powinna być zachowana równoległość wału pędzącego i napędzanego, zapewniającego prawidłową pracę łożysk i przekładni. Przy montażu zespołów połączonych sprzęgłami, powinna być zachowana współosiowość obu części zespołu.

### **6.3. Umocowanie silników na fundamencie**

Silniki ustawione na fundamencie mogą być mocowane na stałe lub w sposób przesuwany. Silniki umocowane na stałe, powinny być przykręcone śrubami do płytek fundamentowych wpuszczonych w fundament lub przykręcone do śrub zakotwionych w fundamencie. Silniki przesuwne powinny być ustawione na saniach naciągowych, zakotwionych w fundamencie.

Silniki, których wał oparty jest na oddzielnych stojakach łożyskowych i silniki trójłożyskowe, powinny być ustawione na płytach posadowych, zamocowanych kotwami do fundamentu. Zaleca się, aby na wspólnych płytach posadowych, ustawione były także zespoły złożone z silnika i połączonego z nim za pomocą sprzęgła lub przekładni zębatej napędzanego urządzenia.

## **7. Realizacja odbioru technicznego – wytyczne**

### **7.1. Przygotowanie do odbioru**

Przed przystąpieniem do uruchomienia silników, należy sprawdzić przez oględziny i za pomocą pomiarów, czy urządzenia są zainstalowane zgodnie z dokumentacją techniczną, a w szczególności:

1. Czy uruchomienie urządzeń nie stworzy zagrożenia w zakresie bezpieczeństwa obsługi i otoczenia lub nie spowoduje uszkodzenia urządzeń napędzanych;
2. Czy zostały spełnione wymagania w zakresie ochrony przeciwporażeniowej i stopnia ochrony;
3. Czy wartość rezystancji izolacji jest niemniejsza niż dopuszczalna;
4. Prawidłowość podłączenia do sieci zasilającej;
5. Prawidłowość doboru zabezpieczeń;
6. Prawidłowość doboru parametrów elektrycznych (mocy, napięcia, częstotliwości, prądu).

### **7.2. Uruchomienie bez obciążenia**

Uruchomienia bez obciążenia należy wykonać, jeżeli warunki umożliwiają uruchomienie silnika przy odłączonym mechanizmie napędzanym lub łącznie z nim, lecz bez wykonywania pracy użytecznej. Po włączeniu do sieci zasilającej, należy sprawdzić:

- Właściwy kierunek wirowania;
- Prawidłowe działanie silnika i wszystkich przyrządów pomiarowych oraz wyposażenia.



### **7.3. Praca próbna pod obciążeniem**

Zaleca się, aby podczas próby charakter obciążenia był możliwie zbliżony do rzeczywistych warunków pracy silnika.

Podczas próby należy sprawdzić:

- Prawidłowość działania silnika i wszystkich przyrządów i układów sterowania w czasie rozruchu i przy zatrzymaniu;
- Pobór mocy silnika i pobór prądu.

W przypadku, gdy zmierzona wartość poboru mocy jest znacznie mniejsza od wartości mocy zainstalowanego silnika, należy przeanalizować możliwość zastosowania silnika o mniejszej mocy.

Zaleca się, aby czas pracy próbnej wynosił co najmniej 15 min.

### **7.4. Ocena wyników badań**

Wynik badań podczas odbioru technicznego, należy uznać za dodatni, jeżeli wszystkie sprawdzenia i próby dadzą wynik pozytywny.

W przypadku ujemnego, któregośkolwiek wyniku badania, odbiór nie może być dokonany. Po usunięciu przyczyny ujemnego wyniku badania, urządzenie należy przedstawić do ponownego odbioru.

### **7.5. Protokół z badań**

Wyniki badań, podczas odbioru technicznego powinny być spisane w formie protokołu.

## **8. Krótkie podsumowanie**

Właściwy dobór silnika polega na wytypowaniu takiego silnika, którego moc i prąd znamionowy przy pracy ciągłej, a wreszcie moment znamionowy byłyby większe od obliczonych wartości zastępczych. Dzięki takiemu doborowi silnika można przewidywać, że wartość przyrostu temperatury izolacji silnika po zakończonym cyklu pracy nie przekroczy wartości dopuszczalnej. Jeżeli natomiast przebieg obciążenia obejmuje okresy dłuższych i znaczniejszych przeciążeń, to może zachodzić obawa, że pomimo utrzymania pod koniec pracy przyrostu temperatury w granicach dopuszczalnych, występowały w czasie cyklu pracy chwile przekroczenia temperatury dopuszczalnej. Jeżeli jest to prawdopodobne, to należy wyznaczyć przebieg temperatury w ciągu cyklu pracy.

Dobierając typ silnika, powinniśmy nadto sprawdzić, czy jego przeciążalność momentem wystarcza, aby mógł on pokonać wszystkie szczyty momentów oporowych przy rozruchu i w czasie pracy. Ostrożność nakazuje obranie maksymalnego momentu silnika o 10–25% większego od chwilowych maksymalnych momentów oporowych.

# ZAŁĄCZNIK 1

## Model cieplny silnika

### Podstawowe zależności termiczne [1, 2]

Załóżmy, że pod względem termicznym silnik elektryczny stanowi ciało o jednorodnej strukturze, którego jednostkowa pojemność cieplna wynosi  $c$ .

Przyrost ciepła akumulowanego w silniku można wyrazić następująco:

$$dQ_s = m_s \cdot c \cdot dT \quad (Z1-1)$$

gdzie:

$dQ_s$  – przyrost ciepła akumulowanego w silniku [J];

$m_s$  – masa silnika [kg];

$c$  – pojemność cieplna  $\left[ \frac{J}{kg \cdot deg} \right]$ ;

$dT$  – przyrost temperatury [deg];

Natomiast ilość ciepła oddawanego do otoczenia wyraża następująca zależność:

$$dQ_{odd} = \alpha \cdot F \cdot T \cdot dt \quad (Z1-2)$$

przy czym:

$dQ_{odd}$  – ilość ciepła oddawanego do otoczenia [J];

$\alpha$  – współczynnik oddawania ciepła do otoczenia  $\left[ \frac{J}{m^2 \cdot s \cdot deg} \right]$ ;

$F$  – powierzchnia oddawania ciepła [ $m^2$ ];

$T$  – temperatura [deg];

$dt$  – przyrost czasu [s];

Przyrost ciepła powstałego w silniku na skutek strat

$$dQ_{ss} = \sum \Delta P \cdot dt \quad (Z1-3)$$

przy czym:

$\sum \Delta P$  – całkowite straty mocy w silniku [W];

W stanie ustalonym pod względem termicznym, ilość wytwarzanego ciepła równa jest ilości ciepła oddanego, a więc ilość ciepła akumulowanego równa jest zeru. Wobec tego w stanie ustalonym mamy:

$$dQ_{ss} = dQ_{odd} \quad (Z1-4)$$

względnie

$$\sum \Delta P = \alpha \cdot F \cdot T_u \quad (Z1-5)$$

przy czym:

$T_u$  – ustalona wartość temperatury [deg];

Z równania postaci (Z1-5) można wyznaczyć wartość ustalonego przyrostu temperatury:

$$T_u = \frac{\sum \Delta P}{\alpha \cdot F} \quad (Z1-6)$$

W stanie termicznie nieustalonym, część ciepła wytwarzana akumulowana jest w silniku, część zaś jego oddawana jest do otoczenia. W stanie nieustalonym zatem:

$$dQ_{ss} = dQ_s + dQ_{odd} \quad (Z1-7)$$

lub

$$\sum \Delta P \cdot dt = m_s \cdot c \cdot dT + \alpha \cdot F \cdot T \cdot dt \quad (Z1-8)$$

Z zależności postaci (Z1-8) można wyznaczyć:

$$dt = -\frac{m_s \cdot c}{\alpha \cdot F} \cdot \frac{dT}{T - \frac{\sum \Delta P}{\alpha \cdot F}} \quad (Z1-9)$$

Zakładając, że w rozpatrywanym przedziale czasowym  $\alpha = \text{const}$ , a więc, że warunki chłodzenia są niezmiennie, otrzymamy po scałkowaniu następującą zależność:

$$-\frac{t}{T_T} = \ln(T - T_u) C \quad (Z1-10)$$

w której przez  $T_T = \frac{m_s \cdot c}{\alpha \cdot F}$ , oznaczono termiczną stałą czasową, wyrażoną w [s].

Przy założeniu, że w chwili  $t = 0 \Rightarrow T = 0$ , uzyskano co następuje:

$$T = T_u \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_T}} \right) \quad (Z1-11)$$

Przy poczynionych wyżej założeniach, osiągnięcie temperatury ustalonej  $T_u$ , następuje teoretycznie po nieskończone długim czasie.

Z zależności (Z1-6) wynika, że przy stałym współczynniku oddawania ciepła  $\alpha = const$ , czyli że w niezmiennych się warunkach chłodzenia silnika, ustalony przyrost temperatury  $T_u$  jest funkcją liniową strat w silniku:

$$T_u = \sum \Delta P \cdot const \quad (Z1-12)$$

Ogólnie straty w silniku elektrycznym składają się ze strat w uzwojeniach  $\Delta P_{Cu}$ , strat w obwodzie magnetycznym  $\Delta P_{Fe}$ , strat mechanicznych  $\Delta P_m$ , strat przewodzenia szczotek  $\Delta P_{psz}$  (w przypadku maszyn prądu stałego) oraz strat dodatkowych  $\Delta P_{dod}$ :

$$\sum \Delta P = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m + \Delta P_{psz} + \Delta P_{dod} \quad (Z1-13)$$

Poszczególne straty są zależne od różnych parametrów, toteż można je przedstawić następująco:

$$\Delta P_{Cu} = I^2 \cdot const \quad (Z1-14)$$

$$\Delta P_{Fe} = B^2 \cdot f^{1.3} \cdot const \quad (Z1-15)$$

$$\Delta P_m = \Delta P_{tarcia} + \Delta P_{went} \quad (Z1-16)$$

$$\Delta P_{tarcia} = n \cdot const \quad (Z1-17)$$

$$\Delta P_{went} = n^2 \cdot const \quad (Z1-18)$$

$$\Delta P_{psz} = I \cdot const \quad (Z1-19)$$

Straty dodatkowe  $\Delta P_{dod}$  wg polskich norm wynoszą w maszynach prądu stałego bez kompensacji 1%, z kompensacją 0,5%, a w maszynach asynchronicznych również 0,5% mocy znamionowej maszyny.

Ponieważ przy pracy znamionowej straty w uzwojeniach są na ogół większe od pozostałych strat ( $\Delta P_{Cu} > \Delta P_{Fe} + \Delta P_m + \Delta P_{psz} + \Delta P_{dod}$ ), można więc przyjąć, że straty całkowite w silnikach bocznikowych są proporcjonalne do drugiej potęgi prądu obciążenia:

$$\sum \Delta P \approx \Delta P_{Cu} = I^2 \cdot const \quad (Z1-20)$$

Biorąc pod uwagę tylko straty w obwodzie głównym i zakładając, że moment rozwijany przez silnik jest proporcjonalny do prądu obciążenia ( $M = I \cdot const$ ),

czyli że  $\Phi = const$ , straty w stanie ustalonym możemy przyjąć proporcjonalne do drugiej potęgi momentu obciążeniowego  $\sum \Delta P = M^2 \cdot const$ .

Przy założeniu, że prędkość wirowania silnika nie ulega zmianie w czasie, czyli że  $n = const$ , można napisać, że  $\sum \Delta P \approx P^2 \cdot const$ , przy czym P – moc mechaniczna na wale silnika.

Uwzględniając poczynione wyżej założenia, otrzymujemy co następuje:

$$T_u = \sum \Delta P \cdot const \approx P^2 \cdot const \quad (Z1-21)$$

### Praca dorywcza

Zbadajmy przyrost temperatury silnika obciążonego stałym momentem  $M_m = const$ , pracującego przy stałej prędkości obrotowej  $n_1 = const$ , przez czas nieskończenie długi. Jeśli w chwili  $t = 0$  temperatura silnika była równa temperaturze otoczenia, a temperatura otoczenia pozostaje bez zmiany, to wówczas:

$$T = T_u \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_r}} \right) \quad (Z1-22)$$

przy czym:

$$T_u = P_{S1}^2 \cdot const = (M_m \cdot n_1)^2 \cdot const \quad (Z1-23)$$

Gdyby silnik przy tej samej prędkości obrotowej  $n_1 = const$  obciążyć większym momentem  $M_m > M_m$ , gdy  $M_m = const$ , i w chwili  $t = 0 \Rightarrow T = 0$ , to w tych samych warunkach chłodzenia, przyrost temperatury w czasie byłby określony zależnością:

$$T = T'_u \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_r}} \right) \quad (Z1-24)$$

w której:

$$T'_u = P_{S2}^2 \cdot const = (M'_m \cdot n_1)^2 \cdot const \quad (Z1-25)$$

Z zależności postaci (Z1-22) i (Z1-24) można obliczyć:

$$T'_u = T_u \cdot \left( \frac{P_{S2}}{P_{S1}} \right)^2 \quad (Z1-26)$$

a wprowadzając powyższą zależność do równania postaci (Z1-24) otrzymuje się, co następuje:

$$T = T_u \cdot \left( \frac{P_{S2}}{P_{S1}} \right)^2 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_r}} \right) \quad (Z1-27)$$

Według zależności postaci (Z1-27) odbywać się będzie przyrost temperatury izolacji silnika w ciągu całego kresu pracy dorywczej S2. Z chwilą zakończenia okresu pracy i odłączenia silnika następuje okres stygnięcia silnika.

Jeżeli moc  $P_{S2}$  – dla pracy dorywczej, wybraliśmy większą od mocy  $P_{S1}$  – dla pracy ciągłej, to przyrost temperatury ustalonej  $T_u$ , byłby większy od założonego na początku. Gdy chcemy pracować dorywczo, na przykład w ciągu 30, 60 lub 90 minut, wówczas stawiamy warunek, aby przy końcu pracy przyrost temperatury nie przekroczył dopuszczalnej wartości  $T_u$ . Mając to na uwadze będziemy mogli obliczyć dopuszczalną moc danego silnika, dostosowanego do pracy dorywczej S2.

Wstawiając do równania postaci (Z1-27) współrzędne punktu A (rys. Z1-1) uzyskano, co następuje:

$$T_u = T_u \cdot \left( \frac{P_{S2}}{P_{S1}} \right)^2 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_{S2}}{T_r}} \right) \quad (Z1-28)$$

Stąd:

$$P_{S2} = \frac{P_{S1}}{\sqrt{1 - e^{-\frac{t_{S2}}{T_r}}}} \quad (Z1-29)$$

Za pomocą zależności postaci (Z1-29) możemy obliczyć moc danego silnika przy pracy dorywczej S2, jeśli znane są: moc silnika przy pracy ciągłej S1 i termiczna stała czasowa maszyny  $T_r$ .

Ponadto zależność postaci (Z1-29) pokazuje nam to, że im większa jest termiczna stała czasowa silnika, tym większa też może być wartość mocy, użytej do pracy dorywczej. Wyniki obliczone przy różnych termicznych stałych czasowych zostały podane na rysunku (Z1-2).

Jeżeli poza warunkami cieplnymi weźmiemy pod uwagę poprzednio rozpatrzone okoliczności, ograniczające rozporządzalną moc silnika, a mianowicie przeciążalność momentem  $p_M$ , która w najkorzystniej wykonanych silnikach prądu przemiennego nie przekracza wartości 3, to na wykresie z rysunku Z1-2 otrzymamy nieprzekraczalną górną granicę mocy, oznaczoną prostą  $P_{gr} = \left( \frac{P_{S2}}{P_{S1}} \right)_{gr}$ . Obszar wykresu, którym

możemy się posługiwać znajduje się pod prostą  $P_{gr} = \left( \frac{P_{S2}}{P_{S1}} \right)_{gr}$ . Trzeba poza tym

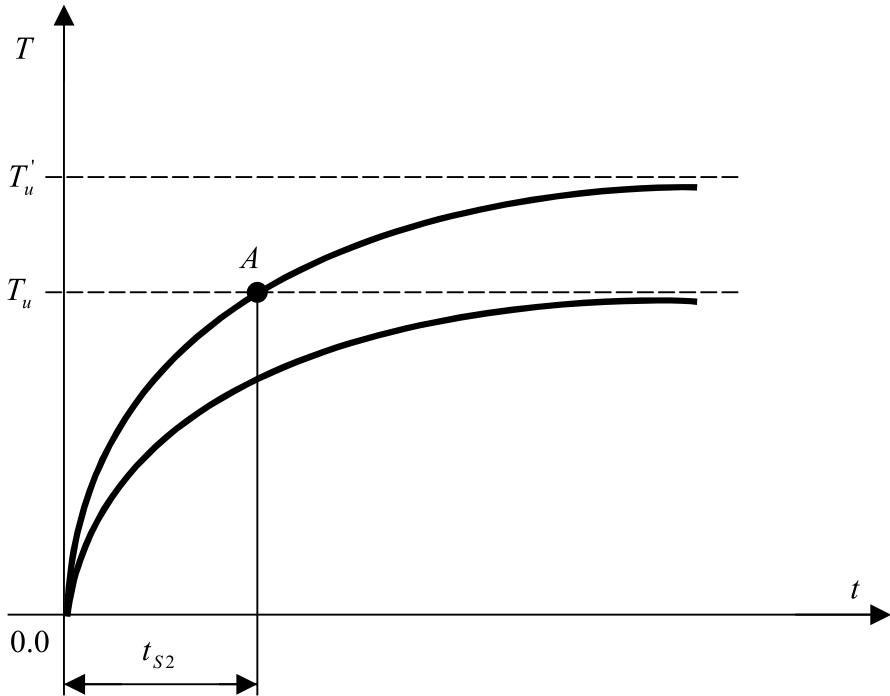
pamiętać, że wyprowadzenie zależności postaci (Z1-29) oparte jest na założeniach teoretycznych, odpowiadających rzeczywistości tylko w przybliżeniu, a wobec tego również wyniki obliczeń według tej zależności mają charakter jedynie orientacyjny. Pozwalają one ocenić wartości mocy przy pracy dorywczej  $S_2$ , które można uzyskać z silnika danej wielkości, o znanej mocy ciągłej. W istocie silniki przeznaczone do pracy dorywczej lub pracy przerywanej mają zwykle odmienne wartości indukcji oraz gęstości prądu, a zatem ich budowa elektryczna jest również odmienna od budowy silników do pracy ciągłej.

Maszyny o budowie zamkniętej mają duże termiczne stałe czasowe i dla rozpiętości między  $P_{S_2}$  i  $P_{S_1}$  są dla tych silników większe aniżeli w maszynach intensywnie przewietrzanych, lekkich i o małej stałej czasowej.

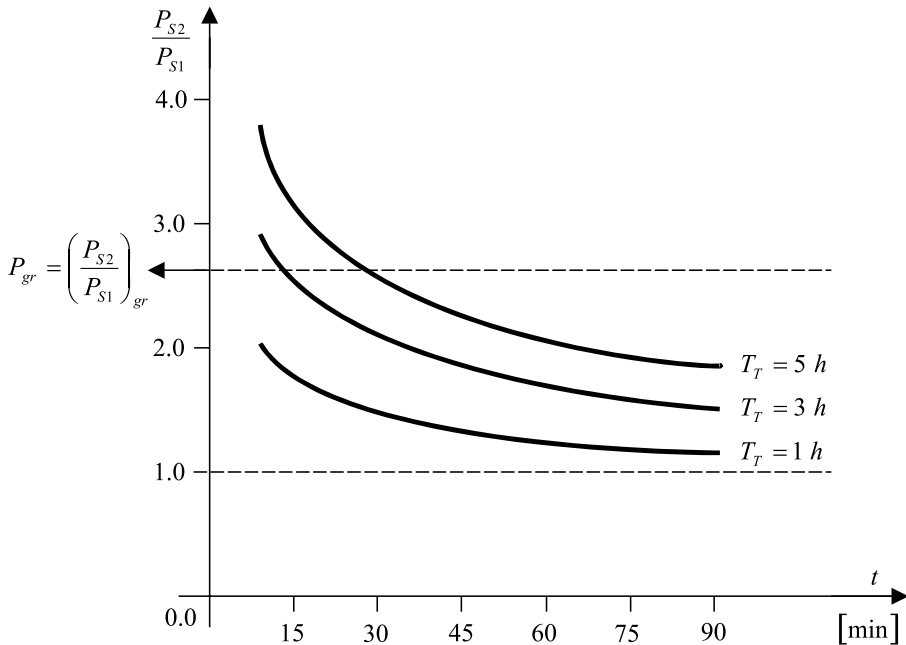
Przebieg przyrostu temperatury przy pracy dorywczej  $S_2$  przedstawiono na rysunku Z1-3. Po procesie obciążenia silnika mocą  $P_{S_2}$  w ciągu czasu  $t_{S_2}$ , silnik powinien pozostawać na biegu jałowym, dopóki jego temperatura nie zejdzie do wartości temperatury otoczenia. Do obliczeń potrzebna jest znajomość termicznej stałej czasowej silnika  $T_T$ . Orientacyjne wartości termicznych stałych czasowych silników indukcyjnych klatkowych podano w tabeli Z1-1.

Tabela Z1-1.

Budowa	Liczba par biegunów	Moc znamionowa silnika w kW	Termiczna stała czasowa $T_T$ w min
Otwarta i chroniowa	2 – 12	do 250	15
Zamknięta	2	do 170	30
	4	do 400	30
	6	do 40	30
	6	40 – 300	50
	8 – 12	do 15	30
	8 – 12	15 – 250	50

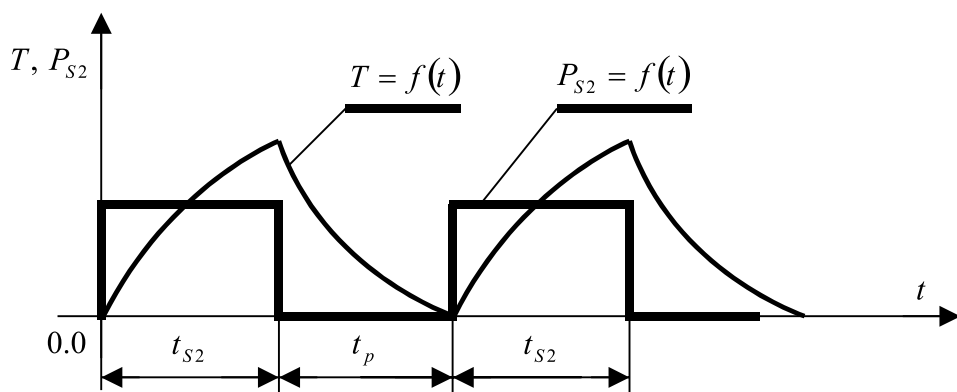


Rysunek Z1-1. Wyznaczenie czasu pracy dorywczej  $t_{S2}$ , silnika obciążonego stałym momentem, przy stałej prędkości obrotowej i niezmiennych się warunkach chłodzenia



Rysunek Z1-2. Zależność stosunku dopuszczalnej mocy dorywczej  $P_{S2}$  do mocy ciągłej  $P_{S1}$  silnika od czasu pracy, przy różnych termicznych stałych czasowych





Rysunek Z1-3. Przebieg przyrostu temperatury o mocy silnika przy pracy dorywczej S2

### Przykład Z1-1

**Jaka powinna być moc znamionowa silnika elektrycznego o prędkości obrotowej  $n = 1000 \text{ l/min} = 16.661 \text{ /s}$ , który obciążono dorywczo momentem  $262 \text{ Nm}$ , w ciągu czasu  $t_{S2} = 8.6 \text{ min}$ .**

**Założono, że straty mocy w silniku są proporcjonalne do kwadratu prądu –  $I^2$ , a ponieważ moment jest wprost proporcjonalny do prądu, więc są one również proporcjonalne do kwadratu momentu –  $M^2$ . Przy stałej prędkości obrotowej silnika, wartość momentu  $M$  jest wprost proporcjonalna do mocy, a wobec tego straty są również proporcjonalne do kwadratu mocy  $P^2$ .**

Moc silnika zatem zostanie obliczona z zależności postaci (Z1-29):

$$P_{S2} = \frac{P_{S1}}{\sqrt{1 - e^{-\frac{t_{S2}}{T_T}}}}$$

w której przyjęto następujące oznaczenia:

- $P_{S1}$  – moc przy pracy ciągłej [W];
- $P_{S2}$  – moc przy pracy dorywczej [W];
- $T_T$  – termiczna stała czasowa silnika [s].

Założono więc, że moc zwykłego silnika katalogowego, tj. silnika przeznaczonego do pracy ciągłej wynosi:

$$P_{S1} = P_{S2} \cdot \sqrt{1 - e^{-\frac{t_{S2}}{T_T}}} \quad (\text{Z1-30})$$

Ponadto założono jeszcze (biorąc pod uwagę wytyczne z tabeli Z1-1), że termiczna stała czasowa przedmiotowego silnika wynosi  $T_T = 30$  min.

Zatem moc silnika dla pracy dorywczej wyniesie:

$$P_{S2} = M_{S2} \cdot \omega = M_{S2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n = 262 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 16.66 = 27425 \text{ W} = 27.425 \text{ kW}$$

Wstawiając dane do zależności postaci (Z1-30), obliczono poszukiwaną wartość mocy dla silnika przeznaczanego do pracy ciągłej:

$$P_{S1} = P_{S2} \cdot \sqrt{1 - e^{-\frac{t_{S2}}{T_T}}} = 27425 \cdot \sqrt{1 - e^{-\frac{8.65}{30}}} = 13700 \text{ W} = 13.7 \text{ kW}$$

Wartość przeciążalności dla przedmiotowego silnika wyniesie:

$$p_M = \frac{P_{S2}}{P_{S1}} = \frac{27.425}{13.7} \approx 2.0$$

Silnik katalogowy (przeznaczony do pracy ciągłej S1) o mocy 13.7 kW powinien mieć, przy obciążeniu dorywczym S2, przeciążalność większą niż 2.

## Przykład Z1-2

*Termiczna stała czasowa silnika wynosi  $T_T = 50$  min. Znamionowa moc ciągła silnika  $P_{S1} = 20$  kW. Określić dopuszczalną moc przy pracy dorywczej  $P_{S2}$ , jeśli czas pracy dorywczej wynosi  $t_{S2} = 60$  min. Przy pracy znamionowej ciągłej, straty stałe silnika wynoszą  $\Delta P_{st} = 0.4 \cdot \sum \Delta P_n$ , a znamionowe straty zmienne:  $\Delta P_{zm} = 0.6 \cdot \sum \Delta P_n$ , przy czym można przyjąć, że straty zmienne są proporcjonalne do kwadratu mocy. Przy czym przez  $\sum \Delta P_n$  oznaczono całkowite straty, przy obciążeniu znamionowym silnika.*

Przy pracy ciągłej oraz przy obciążeniu znamionowym całkowite straty silnika wynoszą:

$$\sum \Delta P_n = 0.4 \cdot \sum \Delta P_n + 0.6 \cdot \sum \Delta P_n = T_u \cdot const$$

Przy obciążeniu innym, nieznamionowym, na przykład przy obciążeniu mocą dorywczą:

$$\sum \Delta P = 0.4 \cdot \sum \Delta P_n + 0.6 \cdot \sum \Delta P_n \cdot \left( \frac{P_{S2}}{P_{S1}} \right)^2 = T'_u \cdot const$$

Z powyższych dwóch równań otrzymano:

$$T'_u = T_u \cdot \left[ 0.4 + 0.6 \cdot \left( \frac{P_{S2}}{P_{S1}} \right)^2 \right]$$

Wprowadzając tę zależność do równania postaci:

$$T = T_u \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_r}} \right)$$

i wstawiając dodatkowo do tego równania współrzędne punktu granicznego ( $t_{S2}$ ,  $T_u$ ), otrzymujemy po odpowiednich przekształceniach wartość mocy dorywczej  $P_{S2}$ :

$$P_{S2} = \sqrt{\frac{P_{S1}^2}{0.6 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{6}{5}} \right)} - \frac{2}{3} \cdot P_{S1}^2} = \sqrt{\frac{20000^2}{0.6 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{6}{5}} \right)} - \frac{2}{3} \cdot 20000^2} = 26200 \text{ W} = 26.2 \text{ kW}$$

### Przykład Z1-3

***Jak długo może pracować silnik w obudowie zamkniętej o mocy znamionowej 8.5 kW i prędkości obrotowej  $n = 950$  l / min, przy obciążeniu momentem 1.8 razy większym od momentu znamionowego.***

Oczywiście, że czas pracy przy takim przeciążeniu będzie ograniczony temperaturą nagrzania silnika. Przyjmijemy tu założenie dotyczące strat, jak w przykładzie Z1-2.

Posłużymy się zależnością na przyrost temperatury w procesie nagrzewania silnika:

$$T = T_u \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_r}} \right)$$

przy czym założono, że termiczna stała czasowa przedmiotowego silnika wynosi  $T_r = 30$  min.

Przy obciążeniu znamionowym i powstających wówczas stratach, maksymalny przyrost temperatury silnika wynosi  $T_u = 60^\circ\text{C}$ . Zgodnie z założeniami straty są proporcjonalne do  $I^2$  oraz do  $M^2$ , a także do  $P^2$ . Gdybyśmy zatem obciążali silnik przez czas dowolnie długi momentem większym od znamionowego  $p_M \cdot M_n$ , wówczas w silniku powstałyby straty większe i końcowy przyrost temperatury byłby również większy.

Przy obciążeniu momentem znamionowym temperatura ustalona zostanie określona przez następującą zależność:

$$T_u = k \cdot M_n^2$$

przy czym przez  $k$  określono pewien współczynnik proporcjonalności.

Natomiast przy obciążeniu silnika momentem  $p_M \cdot M_n$  większym od znamionowego, temperatura ustalona wyniesie:

$$T'_u = k \cdot (p_M \cdot M_n)^2$$

Wobec tego przyrost temperatury silnika przy obciążeniu  $p_M \cdot M_n$  wyniósłby w dowolnym czasie  $t$ :

$$T' = T'_u \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_T}} \right)$$

a ponieważ nie możemy dopuścić do nagrzania się silnika przekraczającego dopuszczalny przyrost temperatury  $T_u = 60^\circ\text{C}$ , więc musi zachodzić warunek:

$$T' = T'_u \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_{S2}}{T_T}} \right) \leq 60^\circ\text{C} \quad (\text{Z1-31})$$

Z poprzednich równań i rozważań wynika:

$$T'_u = T_u \cdot \left( \frac{p_M \cdot M_n}{M_n} \right)^2 = 60 \cdot p_M^2$$

Wprowadzając powyższą zależność do równania postaci (Z1-31), uzyskano:

$$60 = 60 \cdot p_M^2 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_{S2}}{T_T}} \right)$$

Stąd obliczymy dopuszczalny czas  $t_{S2}$  obciążenia dorywczego:

$$1 = p_M^2 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_{S2}}{T_T}} \right)$$

skąd:

$$t_{S2} = T_T \cdot \ln \frac{p_M^2}{p_M^2 - 1}$$

Założywszy, że w rozważanym przypadku  $T_T = 30$  min obliczamy:

$$p_M = \frac{1.8 \cdot M_n}{M_n} = 1.8$$

oraz

$$t_{S2} = T_T \cdot \ln \frac{p_M^2}{p_M^2 - 1} = 30 \cdot \ln \frac{1.8^2}{1.8^2 - 1} = 11 \text{ min}$$

Przy przeciążeniu  $p_M = 3.6$  oraz przy  $T_T = 30$  min uzyskalibyśmy:

$$t_{s2} = T_T \cdot \ln \frac{p_M^2}{p_M^2 - 1} = 30 \cdot \ln \frac{3.6^2}{3.6^2 - 1} = 2.45 \text{ min}$$

Przy pracy dorywczej silnika należy za każdym razem sprawdzić, czy silnik posiada dostateczną przeciążalność momentem.

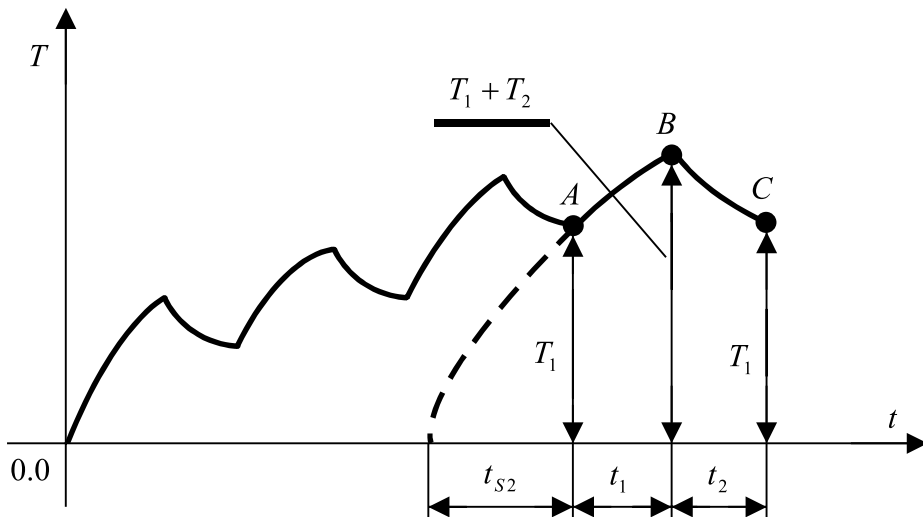
### Praca przerywana

Inaczej przedstawia się całe zjawisko przy pracy przerywanej (rysunek Z1-4). Przyrost temperatury odbywa się według odcinków krzywych wykładniczych nagrzewania, poprzedzielanych kolejno odcinkami krzywej stygnięcia, wyrażonej zależnością:

$$T = T_u \cdot e^{-\frac{t}{T_T}} \quad (\text{Z1-32})$$

W zależności tej założono tę samą wartość stałej czasowej, którą uwzględniono w zależności na przyrost temperatury w procesie nagrzewania.

Założono zatem, że warunki chłodzenia w okresach obciążenia i w przerwach są identyczne. Tym czasem przy pracy przerywanej z przerwami beznapięciowymi, silnik podczas przerw nie pracuje. Jeżeli jest to silnik z przewietrzaniem własnym, to w czasie przerwy silnik chłodzi się tylko w sposób naturalny, bez sztucznego przewietrzania. Przy pracy przerywanej z przerwami jałowymi, silnik wprawdzie podczas przerw wiruje i przewietrznik działa, ale wówczas w silniku mamy do czynienia ze stratami jałowymi. Wynika z tego, że zjawisko jest dosyć skomplikowane, toteż tylko przy analizie wstępnej zakłada się równość parametru  $T_T$  w odniesieniu do krzywych grzania i stygnięcia.



Rysunek Z1-4. Przebieg przyrostu temperatury silnika przy pracy przerywanej S3

Linia łamana złożona z odcinków wspomnianych wyżej krzywych, wznosi się do pewnego poziomu, przy którym chłodzenie maszyny w czasie przerw postojowych wystarcza do tego, aby szczyty temperatury więcej się nie wznosiły i nie przekroczyły dopuszczalnego przyrostu  $T_u$ .

Obierzmy jeden taki cykl, po którym przyrost temperatury wraca znów do wartości początkowej. Załóżmy, że cykl ten składa się z okresu obciążenia mocą ciągłą  $P_{SI}$  oraz z okresu spoczynku. Moc do pracy ciągłej  $P_{SI}$  odpowiada ustalony przyrost temperatury  $T_u$ . Odcinek AB krzywej nagrzewania przedłużamy w lewo, aż do przecięcia się z osią  $t$  (rysunek Z1-4).

Punktowi A odpowiada na podstawie równania (Z1-22):

$$T_1 = T_u \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_r}} \right) \quad (\text{Z1-33})$$

natomiast punktowi B:

$$T_1 + T_2 = T_u \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_0 + t_1}{T_r}} \right) \quad (\text{Z1-34})$$

i wreszcie punktowi C z krzywej stygnięcia:

$$T_1 = (T_1 + T_2) \cdot e^{-\frac{t_2}{T_r}} \quad (\text{Z1-35})$$

Z równania postaci (Z1-33) wyznaczamy:

$$e^{-\frac{t_0}{T_r}} = \frac{T_u - T_1}{T_u} \quad (\text{Z1-36})$$

i wstawiamy do równania postaci (Z1-34):

$$T_1 + T_2 = T_u - T_u \cdot \frac{T_u - T_1}{T_u} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_r}} \quad (\text{Z1-37})$$

Wartość tę wstawiamy do równania postaci (Z1-35) i otrzymujemy:

$$T_1 = \left[ T_u - (T_u - T_1) \cdot e^{-\frac{t_1}{T_r}} \right] \cdot e^{-\frac{t_2}{T_r}} \quad (\text{Z1-38})$$

skąd po przekształceniach uzyskano:

$$T_1 = \frac{T_u \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{T_r}} \right) \cdot e^{-\frac{t_2}{T_r}}}{1 - e^{-\frac{t_1 + t_2}{T_r}}} \quad (\text{Z1-39})$$

Z równania postaci (Z1-35) otrzymaliśmy:

$$T_1 + T_2 = \frac{T_1}{e^{-\frac{t_2}{T_r}}} \quad (\text{Z1-40})$$

Wyrażenie postaci (Z1-40) wstawiamy wartość  $T_1$  z zależności (Z1-39) i otrzymujemy:

$$\frac{T_1 + T_2}{T_u} = \frac{1 - e^{-\frac{t_1}{T_r}}}{1 - e^{-\frac{t_1+t_2}{T_r}}} \quad (\text{Z1-41})$$

Zależność ta pozwala stwierdzić, że przy obciążeniu silnika mocą przy pracy ciągłej  $P_{S2}$ , w okresach czasu  $t_1$ , z następującymi po nich przerwami, trwającymi  $t_2$  sekund, osiągamy przyrosty szczytowe mniejsze niż dopuszczalne przy pracy ciągłej, czyli że:

$$(T_1 + T_2) < T_u \quad (\text{Z1-42})$$

W celu wyzyskania silnika i podniesienia temperatury jego izolacji przy pracy przerywanej, nie przekraczając przy tym przyrostu  $T_u$ , nawet w punktach szczytowych, należy dobrać moc  $P_{S3}$  do pracy przerywanej tak, aby:

$$\left( \frac{P_{S3}}{P_{S1}} \right)^2 = \frac{T_u}{T_1 + T_2} = \frac{1 - e^{-\frac{t_1+t_2}{T_r}}}{1 - e^{-\frac{t_1}{T_r}}} \quad (\text{Z1-43})$$

stąd:

$$P_{S3} \approx P_{S1} \cdot \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_1+t_2}{T_r}}}{1 - e^{-\frac{t_1}{T_r}}}} \quad (\text{Z1-44})$$

Rozwijamy wyrażenie pod pierwiastkiem w szereg Maclaurina według formuły:

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{2 \cdot 3} + \dots \quad (\text{Z1-45})$$

a odrzucając wyrazy z potęgami wyższymi niż 1 otrzymujemy wyrażenie przybliżone:

$$P_{S3} \approx \frac{P_{S1}}{\sqrt{\frac{t_1}{t_1 + t_2}}} = \frac{P_{S1}}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (\text{Z1-46})$$

w którym  $\varepsilon$  oznacza względny czas pracy silnika.

Jak wynika z powyższego moc silnika do pracy przerywanej S3 nie zależy od termicznej stałej czasowej silnika  $T_T$ , lecz tylko od względnego czasu pracy  $\varepsilon = \frac{t_1}{t_1 + t_2}$ .

Pamiętać jednak musimy, że wprowadzone powyżej uproszczenie polegające na odrzuceniu wyższych potęg wyrażen  $\frac{t_1}{T_T}$  i  $\frac{t_1 + t_2}{T_T}$  jest słuszne tylko wówczas, gdy

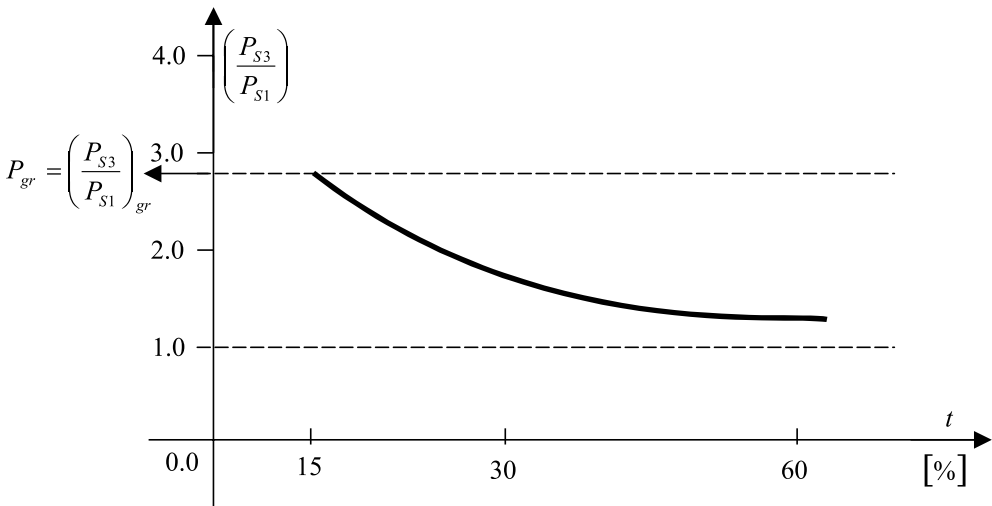
$T_T \gg (t_1 + t_2)$ , tj. gdy czas trwania cyklu jest znacznie mniejszy od termicznej stałej czasowej silnika. Ponadto należy pamiętać jeszcze o tym, że przy wyprowadzaniu zależności nie uwzględniliśmy odmiennych warunków odprowadzania ciepła z silnika przy pracy oraz w czasie postoju, i że braliśmy pod uwagę tylko straty rezystancyjne.

Krzywa przebiegu stosunku  $P_{S3}/P_{S1}$  w funkcji względnego czasu pracy jest przedstawiona na rysunku Z1-5.

Trzeba jednak zawsze mieć na uwadze, że przebiegi zjawisk fizycznych przy pracy dorywczej S2 i pracy przerywanej S3 są odmienne i należy je traktować z osobna. Silniki do pracy przerywanej są budowane elektrycznie odmiennie od silników do pracy ciągłej i bywają ujmowane w odrębne katalogi, posługiwanie się zaś zależnością postaci (Z1-46) ogranicza się do przypadków, gdy chodzi o orientacyjne wyznaczenie mocy, którą można uzyskać przy pracy przerywanej z silnika zbudowanego na moc ciągłą.

W niniejszym załączniku wyprowadzono, a następnie posługiwano się krzywymi wykładniczymi przebiegu przyrostów temperatury w czasie nieustalonych stanów cieplnych.

Dla ścisłości należy stwierdzić, że rzeczywiste przebiegi nieznacznie tylko się różnią od przebiegów teoretycznych i stałe  $T_T$ , którymi operujemy, ulegają nieznacznym zmianom podczas stanu nieustalonego. W obliczeniach napędowych w celu ich uproszczenia posługujemy się tylko funkcjami wykładniczymi.



Rysunek Z1-5. Zależność stosunku dopuszczalnej mocy przerywanej  $P_{S3}$  do mocy ciągłej  $P_{S1}$  od względnego czasu pracy



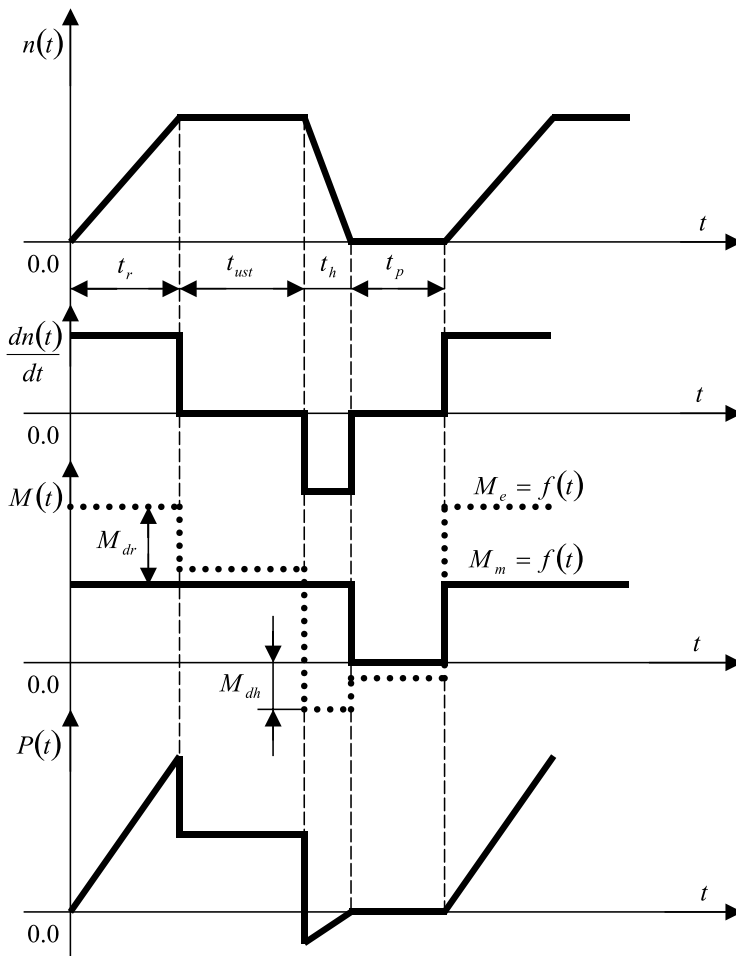
## ZAŁĄCZNIK 2

### Metody wyznaczania mocy silnika przy różnych obciążeniach

Przy bardziej złożonych przebiegach obciążenia silnika w czasie, niedających się zaliczyć do któregoś znormalizowanych rodzajów pracy S1, S2 lub S3 stosujemy inne metody obliczania potrzebnej mocy silnika [1].

W rachubę wchodzi, oczywiście tylko obciążenia cykliczne, których czas cyklu jest mniejszy od termicznej stałej czasowej silnika –  $t_{\text{cyklu}} < T_T$ .

W zasadzie czas cyklu nie powinien być większy niż 10 min.



Rysunek Z2-1. Przebiegi czasowe prędkości, przyspieszeń, momentów i mocy na wale silnika ( $M_{dr}$  – moment dynamiczny rozruchowy,  $M_{dh}$  – moment dynamiczny hamujący)

Przystępując do doboru silnika, znamy zazwyczaj przebieg prędkości w czasie jednego cyklu, przebieg przyspieszenia, przebieg momentu oporowego w czasie oraz wartość momentu bezwładności urządzenia napędzanego.

Chcąc wyznaczyć moment całkowity, który powinien być rozwijany przez silnik napędowy, należy orientacyjnie wyznaczyć moment bezwładności silnika. W tym celu powinno się oszacować wstępnie moc silnika i znaleźć w odpowiednim katalogu jego moment bezwładności. Znając moment całkowity bezwładności układu oraz przyspieszenia, można wyznaczyć momenty dynamiczne w stanach nieustalonych, jak również przebieg momentu całkowitego, który powinien być rozwijany przez silnik w czasie całego cyklu.

Na rysunku Z2-1 podano przebiegi czasowe prędkości, przyspieszeń, momentów i mocy na wale silnika. Znając przebiegi  $n = f(t)$ ,  $M = f(t)$  można dokładniej obliczyć moc silnika.

### Wyznaczanie wartości zastępczych prądu, momentu i mocy

W obliczeniach przybliżonych zakłada się, że ilość ciepła wydzielonego w silniku zależy tylko od strat w uzwojeniach głównego toru energetycznego przetwornika elektromechanicznego. Następnie zakłada się, że przy zmiennej prędkości obrotowej silnika, warunki chłodzenia nie ulegają zmianie i są takie same jak przy pracy znamionowej, co oznacza, że przedmiotowy silnik posiada wentylację obcą. Przy tych założeniach można wyznaczyć prąd zastępczy o stałej wartości w czasie całego cyklu pracy, który byłby przyczyną powstania w czasie cyklu takiej samej ilości ciepła, co prąd rzeczywisty, zmieniający swoją wartość na skutek zmian obciążenia silnika. Wartość tę można obliczyć, obierając za wyjściowe równanie równoważnej ilości ciepła:

$$I_z^2 \cdot R \cdot \int_0^{t_x} dt = R \cdot \int_0^{t_x} I_x^2 \cdot dt \quad (\text{Z2-1})$$

lub operując przedziałami, w których przebiegi prądu w czasie są zlinearyzowane:

$$I_z^2 \cdot \sum t_x = \sum (I_x^2 \cdot t_x) \quad (\text{Z2-2})$$

Tak więc prąd zastępczy opisany zostaje przez następującą zależność:

$$I_z = \sqrt{\frac{\sum (I_x^2 \cdot t_x)}{\sum t_x}} \quad (\text{Z2-3})$$

Prądem zastępczym jest nazywany prąd, którego wartość w czasie jest stała, a który, jeśli chodzi o jego działanie termiczne, jest równoważny prądowi rzeczywistemu. Parametry zastępcze, takie jak prąd, moment i moc, mogą być podstawą przy doborze silnika z katalogu silników przeznaczonych do pracy ciągłej.

Przy doborze silnika do pracy przebiegającej przy różnym obciążeniu postępujemy zazwyczaj, obierając za punkt wyjścia nie przebieg prądu w obwodzie głównym, lecz przebieg w czasie momentu na wale, gdyż poznaliśmy go, rozwiązując zadanie na podstawie warunków obciążenia układu napędowego. Pod względem termicznym

trzeba będzie przy tym sprawdzić, jaki jest przebieg prądu głównego całkowitego, powodującego straty ciepłne w uzwojeniach.

Przy stałym strumieniu ( $\Phi = const$ ) zakładamy liniową zależność między prądem a momentem, czyli upraszczamy dalej zagadnienie, zakładając, że silnik prądu przemiennego pracuje w całym zakresie przy współczynniku mocy równym jedności ( $\cos\varphi = 1$ ).

Przy tych założeniach upraszczających można się posłużyć momentem zastępczym:

$$M_z = \sqrt{\frac{\sum (M_x^2 \cdot t_x)}{\sum t_x}} \quad (Z2-4)$$

Zależnością na moment zastępczy można się posługiwać tylko wówczas, gdy wzbudzenie silnika jest stałe ( $\Phi = const$ ).

W niektórych przypadkach, np. przy regulacji prędkości obrotowej silnika bocznikowego (obcowzbudnego) prądu stałego za pomocą zmiany wartości strumienia magnetycznego, związek pomiędzy prądem a momentem jest nieliniowy. Jak w takim przypadku należy postępować przy wyznaczaniu danych silnika?

Założmy, że przy regulacji prędkości obrotowej silnika bocznikowego (obcowzbudnego) prądu stałego w drodze zmiany wartości strumienia magnetycznego, wartość momentu rozwijanego przez silnik pozostaje stała ( $M = const$ ), rezystancja obwodu głównego nie ulega zmianie ( $R_g = const$ ) i stałe jest też napięcie doprowadzane do silnika ( $U = const$ ). Jeżeli pominiemy zmienność spadków napięć, to siła elektromotoryczna silnika będzie również wartością stałą  $E_r = k_e \cdot \Phi_m \cdot n \approx const$ . Z zależności tej otrzymujemy związek pomiędzy prędkością obrotową a strumieniem:

$$\Phi_M = \frac{1}{n} \cdot const \quad (Z2-5)$$

Równanie momentów  $M = k_m \cdot \Phi_m \cdot I$  i zależność postaci (Z1-5) pozwalają określić związek pomiędzy prądem a prędkością:

$$I = n \cdot const \quad (Z2-6)$$

Wynika stąd wniosek, że przy regulacji prędkości obrotowej silnika przez zmianę strumienia wzbudzenia, przy stałej wartości momentu obciążenia, prąd obwodu głównego zmienia się w przybliżeniu według takiej samej funkcji czasowej, jak i prędkość obrotowa. Znając przebieg prędkości obrotowej  $n = f(t)$ , można wyznaczyć przebieg prądu w skali momentu, który może być podstawą do wyznaczenia momentu zastępczego.

Na rysunku Z2-2 pokazano taki przypadek. Wykres prędkości przewiduje regulację, od zera do  $n_1$  przez zmianę napięcia przy stałym wzbudzeniu oraz regulację od  $n_1$  do  $n_2$ , w drodze zmiany strumienia przy stałym napięciu doprowadzanym do

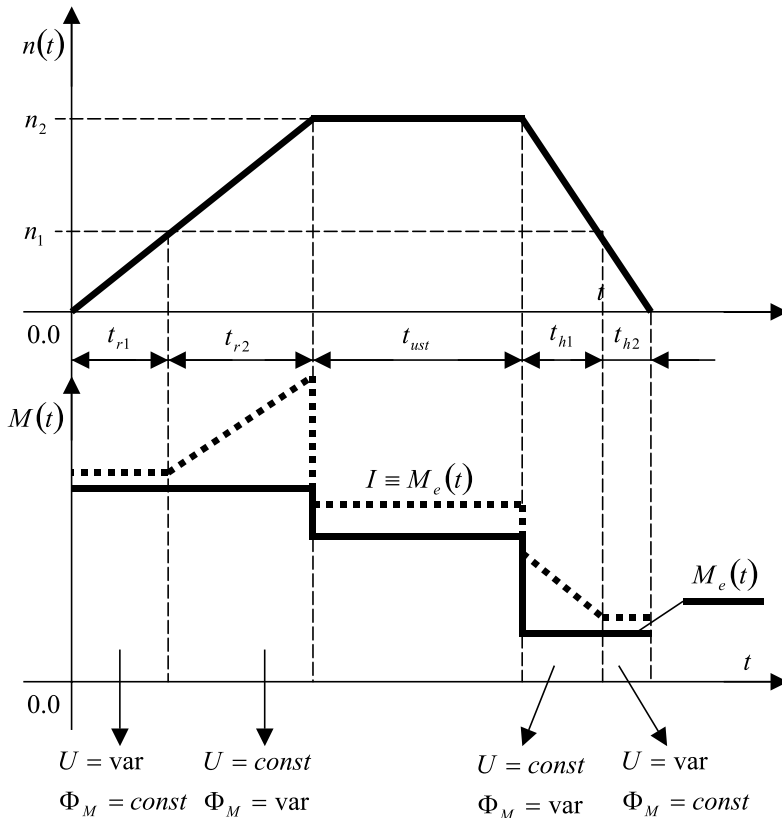
obwodu głównego. Na wykresie  $M = f(t)$  linią ciągłą wyznaczony jest rzeczywisty przebieg momentu na wale silnika, a linią przerywaną – przebieg prądu w skali momentu. Do wyznaczenia momentu zastępczego posłużymy się krzywą prądu w skali momentu, toteż do równania momentu zastępczego wstawiać będziemy wartości wyznaczone na rysunku Z2-2 krzywą przerywaną.

Wyznamy moment zastępczy dla przypadku przedstawionego na rysunku Z2-3. Cały czas cyklu jest podzielony na sześć przedziałów czasowych. W każdym z tych przedziałów, przebieg momentu ma charakter liniowy.

W pierwszym, trzecim i piątym przedziale czasowym, moment ma wartość stałą, natomiast w przedziale drugim i czwartym zmienia się w czasie liniowo.

Wyznamy moment zastępczy w przedziale, w którym jego zmiany w czasie przebiegają liniowo, np. w przedziale drugim:

$$M_z = \sqrt{\frac{1}{t_2} \cdot \int_0^{t_2} M^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{t_2} \cdot \int_0^{t_2} \left[ \frac{M_2 - M_1}{t_2} \cdot t + M_1 \right]^2 dt} = \sqrt{\frac{M_1^2 + M_1 \cdot M_2 + M_2^2}{3}} \quad (Z2-7)$$

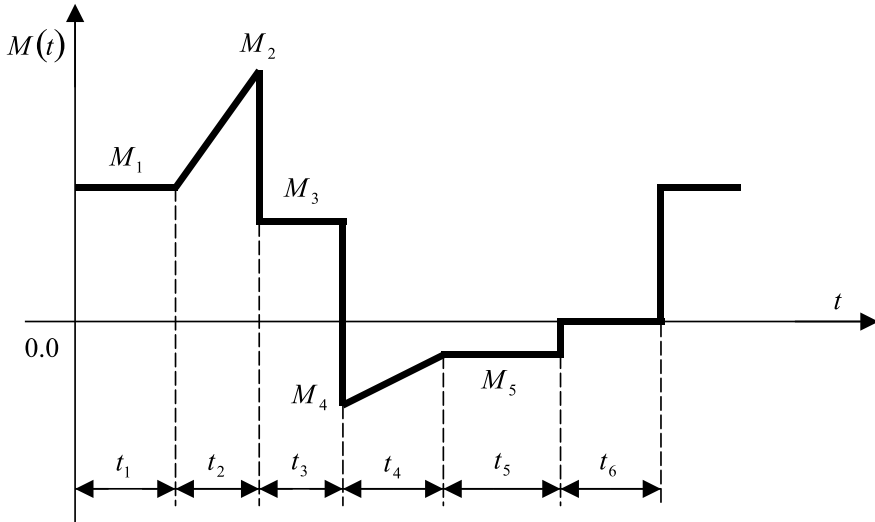


Rysunek Z2-2. Przebieg prędkości, momentu i prądu przedstawionego w skali momentu, przy dwustrefowej regulacji prędkości obrotowej silnika obcowzbudnego (boczni-

kowego) prądu stałego

Całkowity moment zastępczy przy przebiegu  $M = f(t)$  przedstawionym na rysunku Z2-3:

$$M_z = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + (M_1^2 + M_1 \cdot M_2 + M_2^2) \frac{t_2}{3} + M_3^2 \cdot t_3 + (M_4^2 + M_4 \cdot M_5 + M_5^2) \frac{t_4}{3} + M_5^2 \cdot t_5}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}} \quad (Z2-8)$$

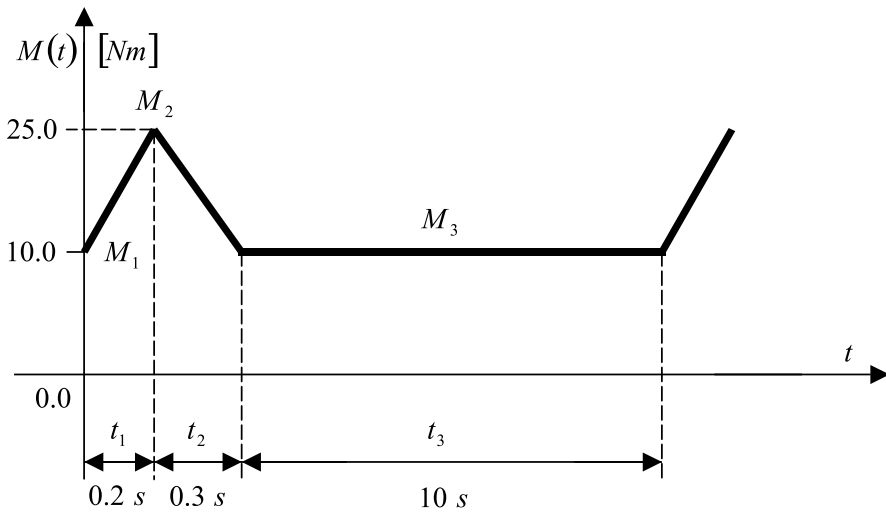


Rysunek Z2-3. Przebieg momentu w czasie

Na podstawie obliczonego momentu zastępczego można dobrać z katalogu silnik przewidziany do pracy ciągłej. Moment znamionowy silnika powinien być większy od obliczonego momentu zastępczego, ze względu na przyjęte wyżej uproszczenia  $M_z / M_n \leq 0.96$ .

## Przykład Z2-1

Wyznaczyć moment zastępczy, jeśli moment rozwijany przez silnik zmienia się w czasie według funkcji podanej na rysunku Z2-4.



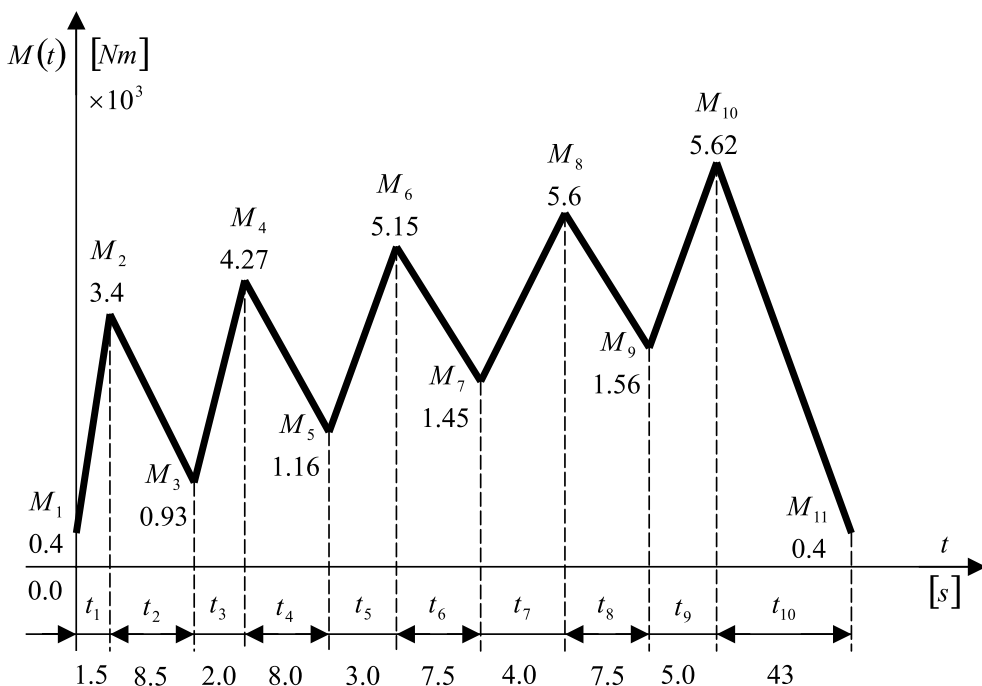
Rysunek Z2-4. Przebieg momentu w czasie (do przykładu Z2-1)

$$\begin{aligned} M_z &= \sqrt{\frac{(M_1^2 + M_1 \cdot M_2 + M_2^2) \cdot \frac{t_1}{3} + (M_2^2 + M_2 \cdot M_3 + M_3^2) \cdot \frac{t_2}{3} + M_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \\ &= \sqrt{\frac{(10^2 + 10 \cdot 25 + 25^2) \cdot \frac{0.2}{3} + (25^2 + 25 \cdot 10 + 10^2) \cdot \frac{0.3}{3} + 10^2 \cdot 1}{0.2 + 0.3 + 1}} = 13.2 \text{ Nm} \end{aligned}$$

## Przykład Z2-2

**Silnik asynchroniczny o momencie znamionowym równym  $M_n = 2.56 \text{ kNm}$ , napędza urządzenie walcownicze, przy czym przebieg momentu elektromagnetycznego  $M = f(t)$ , rozwijanego przez przedmiotowy silnik przedstawiono na rysunku Z2-5. Wyznaczyć moment zastępczy dla danego przebiegu  $M = f(t)$ .**

$$M_z = \frac{(M_1^2 + M_1 \cdot M_2 + M_2^2) \cdot \frac{t_1}{3} + (M_2^2 + M_2 \cdot M_3 + M_3^2) \cdot \frac{t_2}{3} + (M_3^2 + M_3 \cdot M_4 + M_4^2) \cdot \frac{t_3}{3} +}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10}} + \frac{(M_4^2 + M_4 \cdot M_5 + M_5^2) \cdot \frac{t_4}{3} + (M_5^2 + M_5 \cdot M_6 + M_6^2) \cdot \frac{t_5}{3} + (M_6^2 + M_6 \cdot M_7 + M_7^2) \cdot \frac{t_6}{3} +}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10}} + \frac{(M_7^2 + M_7 \cdot M_8 + M_8^2) \cdot \frac{t_7}{3} + (M_8^2 + M_8 \cdot M_9 + M_9^2) \cdot \frac{t_8}{3} + (M_9^2 + M_9 \cdot M_{10} + M_{10}^2) \cdot \frac{t_9}{3} +}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10}} + \frac{(M_{10}^2 + M_{10} \cdot M_{11} + M_{11}^2) \cdot \frac{t_{10}}{3}}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10}} \quad (\text{Z2-9})$$



Rysunek Z2-5. Zlinearyzowany przebieg momentu elektromagnetycznego (do przykładu Z2-2)

Po wstawieniu danych do zależności postaci (Z2-9), uzyskano co następuje:

$$M_z = \frac{\frac{(0.4^2 + 0.4 \cdot 3.4 + 3.4^2) \cdot \frac{1.5}{3} + (3.4^2 + 3.4 \cdot 0.95 + 0.95^2) \cdot \frac{8.5}{3} + 1.5 + 8.5 + 2.0 + 8.0 + 3.0 + 7.5 + 4.0 + 7.5 + 5.0 + 43.0}{3} + \frac{(0.95^2 + 0.95 \cdot 4.27 + 4.27^2) \cdot \frac{2.0}{3} + (4.27^2 + 4.27 \cdot 1.16 + 1.16^2) \cdot \frac{8.0}{3} + 1.5 + 8.5 + 2.0 + 8.0 + 3.0 + 7.5 + 4.0 + 7.5 + 5.0 + 43.0}{3} + \frac{(1.16^2 + 1.16 \cdot 5.15 + 5.15^2) \cdot \frac{3.0}{3} + (5.15^2 + 5.15 \cdot 1.45 + 1.45^2) \cdot \frac{7.5}{3} + 1.5 + 8.5 + 2.0 + 8.0 + 3.0 + 7.5 + 4.0 + 7.5 + 5.0 + 43.0}{3} + \frac{(1.45^2 + 1.45 \cdot 5.6 + 5.6^2) \cdot \frac{4.0}{3} + (5.6^2 + 5.6 \cdot 1.56 + 1.56^2) \cdot \frac{7.5}{3} + 1.5 + 8.5 + 2.0 + 8.0 + 3.0 + 7.5 + 4.0 + 7.5 + 5.0 + 43.0}{3} + \frac{(1.56^2 + 1.56 \cdot 5.62 + 5.62^2) \cdot \frac{5.0}{3} + (5.62^2 + 5.62 \cdot 0.4 + 0.4^2) \cdot 43.0}{3}}{1.5 + 8.5 + 2.0 + 8.0 + 3.0 + 7.5 + 4.0 + 7.5 + 5.0 + 43.0} = 2.44 \text{ kNm}$$

Moment znamionowy silnika walcowniczego w przykładzie Z2-2 wynosi  $M_n = 2.56 \text{ kNm}$ , zatem stosunek momentu zastępczego do znamionowego wynosi:

$$\frac{M_z}{M_n} = \frac{2.44}{2.56} = 0.955$$

a więc silnik został dobrany właściwie również pod względem termicznym.

### Przykład Z2-3

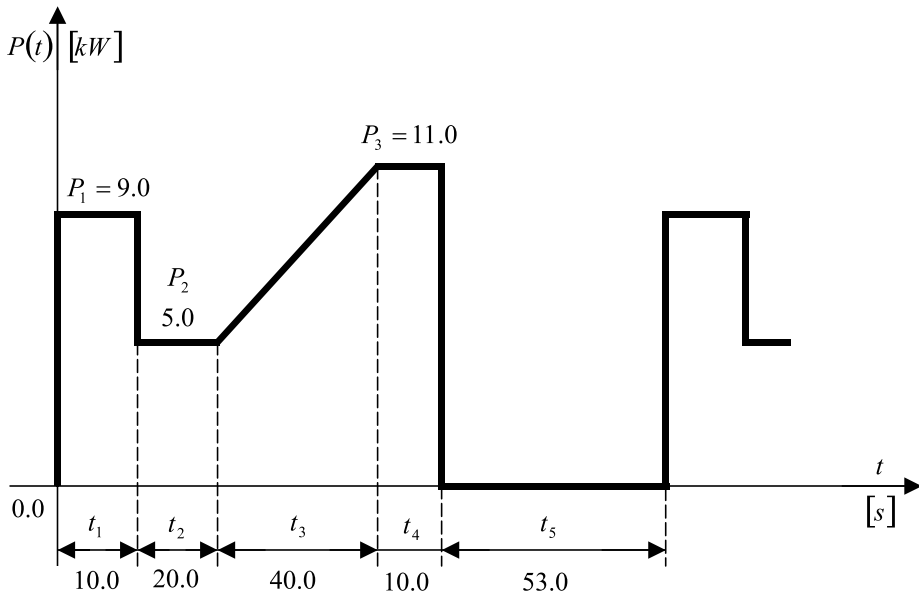
*Należy dobrać silnik trójfazowy asynchroniczny, który przy zmiennym obciążeniu ma wirować z prawie stałą prędkością. Przebieg mocy na wale silnika w funkcji czasu przedstawia wykres na rysunku Z2-6.*

Zakłada się dla uproszczenia, że straty całkowite w silniku są proporcjonalne do kwadratu prądu wirnika –  $I_2^2$ . Ponieważ moment obrotowy silnika jest wprost proporcjonalny do prądu, więc straty są proporcjonalne także do kwadratu momentu tzn. do  $M^2$ , a przy stałej (w przybliżeniu) prędkości obrotowej  $n$  – proporcjonalne do kwadratu mocy  $P^2$ .

Obliczmy moc zastępczą dla przedstawionego cyklu pracy:

$$P_z = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + (P_2^2 + P_2 \cdot P_3 + P_3^2) \cdot \frac{t_3}{3} + P_3^2 \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}} \quad (\text{Z2-10})$$





Rysunek Z2-6. Przebieg mocy na wale silnika w funkcji czasu (do przykładu Z2-3)  
Po wprowadzeniu danych do zależności postaci (Z2-10), uzyskano co następuje:

$$P_z = \sqrt{\frac{9.0^2 \cdot 10 + 5.0^2 \cdot 20 + (5.0^2 + 5.0 \cdot 11.0 + 11.0^2) \cdot \frac{40}{3} + 11.0^2 \cdot 10}{10 + 20 + 40 + 10 + 53}} \approx 5.8 \text{ kW}$$

Posługując się katalogiem silników do pracy ciągłej S1, można było by w tym przypadku dobrać silnik asynchroniczny o mocy 5.8 kW, ale powinien by on mieć przeciążalność  $p_M = \frac{11 \text{ kW}}{5.8 \text{ kW}} = 1.9$ .

Gdyby natomiast przeciążalność silników odpowiedniej serii katalogowej nie przekraczała  $p_M = 1.6$ , wówczas należałoby zastosować silnik o mocy:

$$P_n = \frac{P_{\max}}{p_M} = \frac{11 \text{ kW}}{1.6} = 6.9 \text{ kW}$$

przy czym silnik ten nie byłby wówczas wyzyskany pod względem cieplnym.

Ponieważ z treści przykładu Z2-3 wynika, że cykl pracy będzie się powtarzać systematycznie, przy czym czas jego trwania jest krótki, wynosi bowiem tylko 133 s, więc jeśli dysponujemy katalogiem silników do pracy przerywanej S3, możemy z tego katalogu wybrać odpowiedni typ silnika.

W tym celu obliczamy moc zastępczą, odpowiadającą samemu tylko czasowi obciążenia, tj.  $t_1 + t_2 + t_3 + t_4$ . Wówczas moc zastępcza zostanie określona przez następującą zależność:

$$P_z = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + (P_2^2 + P_2 \cdot P_3 + P_3^2) \cdot \frac{t_3}{3} + P_3^2 \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}} \quad (\text{Z2-11})$$

Po podstawieniu wartości liczbowej do zależności postaci (Z2-11), uzyskano co następuje:

$$P_z = \sqrt{\frac{9.0^2 \cdot 10 + 5.0^2 \cdot 20 + (5.0^2 + 5.0 \cdot 11.0 + 11.0^2) \cdot \frac{40}{3} + 11.0^2 \cdot 10}{10 + 20 + 40 + 10}} \approx 7.5 \text{ kW}$$

W ten sposób przebieg obciążenia podany na rysunku Z2-6 zostaje zastąpiony przebiegiem nowym, złożonym z okresu obciążenia mocą o wartości 7.5 kW w ciągu  $t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = 80 \text{ s}$  i z okresu przerwy trwającej  $t_5 = 53 \text{ s}$ . Otrzymaliśmy przebieg obciążenia, odpowiadający pracy znamionowej, przerywanej ze względnym (procentowym) czasem pracy:

$$\varepsilon = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5} \cdot 100\% = \frac{80 \text{ s}}{133 \text{ s}} \cdot 100\% = 60\%$$

Możemy zatem zastosować silnik asynchroniczny trójfazowy mocy znamionowej  $P_n = 7.5 \text{ kW}$ , przeznaczony do pracy przerywanej S3, odpowiadający 60% czasowi pracy.

W rozważaniach niniejszego załącznika Z2 założono, iż warunki chłodzenia silnika w czasie pracy nie ulegają zmianie. W przypadku, gdy silnik wiruje ze stałą prawie prędkością, warunek ten jest spełniony, a gdy prędkość obrotowa silnika była zmienna, zakładaliśmy, że silnik ma wentylację obcą.

W większości przypadków mamy do czynienia ze zmianami obciążenia silnika oraz ze zmianą jego prędkości wirowania, np. przy rozruchu, hamowaniu, gdy chłodzenie jest własne. Przy zmiennej prędkości wirowania i przewietrzaniu za pomocą wentylatora osadzonego na wale silnika, ilość powietrza chłodzącego przepływającego przez silnik jest funkcją prędkości.

Przy przewietrzaniu własnym silnika, intensywność chłodzenia jest więc zależna od prędkości wirowania silnika. Warunki chłodzenia przy postoju silnika są gorsze, aniżeli wtedy gdy silnik wiruje.

W czasie rozruchu i hamowania silnika warunki chłodzenia są pośrednie, pomiędzy warunkami postoju a ruchem pełną prędkością. Chcąc uwzględnić zmienne wa-

runki chłodzenia silnika o własnym przewietrzaniu, przy zmiennej prędkości jego wirowania, korygujemy rzeczywisty czas cyklu, występujący w równaniu prądu zastępczego, wynikający z warunku równoważnej ilości ciepła wydzielonego w przypadku podanym na rysunku Z2-1

$$I_z^2 \cdot [(t_r + t_h) \cdot \alpha + t_{ust} + t_p \cdot \beta] = \int I_x^2 dt \quad (Z2-12)$$

przy czym:

- $t_r$  – czas rozruchu [s];
- $t_h$  – czas hamowania [s];
- $t_{ust}$  – czas pracy przy prędkości ustalonej znamionowej [s];
- $t_p$  – czas postoju przy  $n = 0$  [s];
- $\alpha$  – współczynnik uwzględniający pogorszenie się warunków chłodzenia w czasie rozruchu i hamowania w porównaniu z warunkami przy prędkości znamionowej [wielkość bezwymiarowa];
- $\beta$  – współczynnik uwzględniający pogorszenie się warunków chłodzenia w czasie postoju [wielkość bezwymiarowa];

Współczynnik  $\beta$  jest stosunkiem termicznej stałej czasowej przy pełnej prędkości obrotowej silnika –  $T_T$ , do termicznej stałej czasowej w okresie postoju silnika –  $T_{T0}$ :

$$\beta = \frac{T_T}{T_{T0}} \quad (Z2-13)$$

Wartości współczynnika  $\beta$  są następujące: 0.9–0.95, gdy silniki są zamknięte bez przewietrzania; 0.4–0.6 – silniki zamknięte z przewietrzaniem i 0.25–0.35 – silniki półotwarte z przewietrzaniem.

Współczynnik korekcyjny  $\alpha$  jest średnią arytmetyczną współczynnika równego 1, odpowiadającego znamionowym warunkom chłodzenia przy pełnej prędkości wirowania i liczby  $\beta$ , określającej warunki chłodzenia w czasie postoju silnika, a zatem:

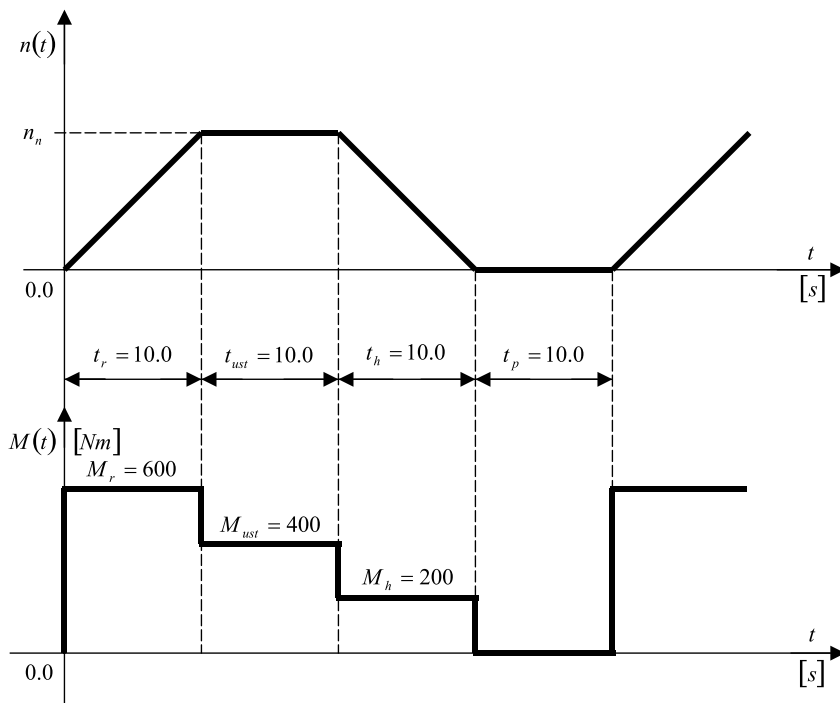
$$\alpha = \frac{1 + \beta}{2} \quad (Z2-14)$$

## Przykład Z2-4

*Silnik boczniowy (obcowzbudny) prądu stałego półotwarty z przewietrzaniem własnym, pracuje według programu podanego na rysunku Z2-7. Obliczyć moment zastępczy silnika przy chłodzeniu własnym i chłodzeniu obcym.*

Zakładamy, że współczynnik  $\beta = 0.3$ , wobec czego:

$$\alpha = \frac{1 + \beta}{2} = \frac{1 + 0.33}{2} = 0.66$$



Rysunek Z2-7. Przebieg prędkości i momentu w czasie (do przykładu Z2-4)

Moment zastępczy przy chłodzeniu własnym wyniesie:

$$M_z = \sqrt{\frac{M_r^2 \cdot t_r + M_{ust}^2 \cdot t_{ust} + M_h^2 \cdot t_h}{t_r \cdot \alpha + t_{ust} + t_h \cdot \alpha + t_p \cdot \beta}} = \sqrt{\frac{600^2 \cdot 10 + 400^2 \cdot 10 + 200^2 \cdot 10}{10 \cdot 0.66 + 10 + 10 \cdot 0.66 + 10 \cdot 0.33}} = 460 \text{ Nm}$$

Natomiast przy chłodzeniu obcym:

$$M'_z = \sqrt{\frac{M_r^2 \cdot t_r + M_{ust}^2 \cdot t_{ust} + M_h^2 \cdot t_h}{t_r + t_{ust} + t_h + t_p}} = \sqrt{\frac{600^2 \cdot 10 + 400^2 \cdot 10 + 200^2 \cdot 10}{10 + 10 + 10 + 10}} = 374 \text{ Nm}$$

Stosunek momentu zastępczego tego samego silnika, przy chłodzeniu własnym do momentu zastępczego przy chłodzeniu obcym wynosi:

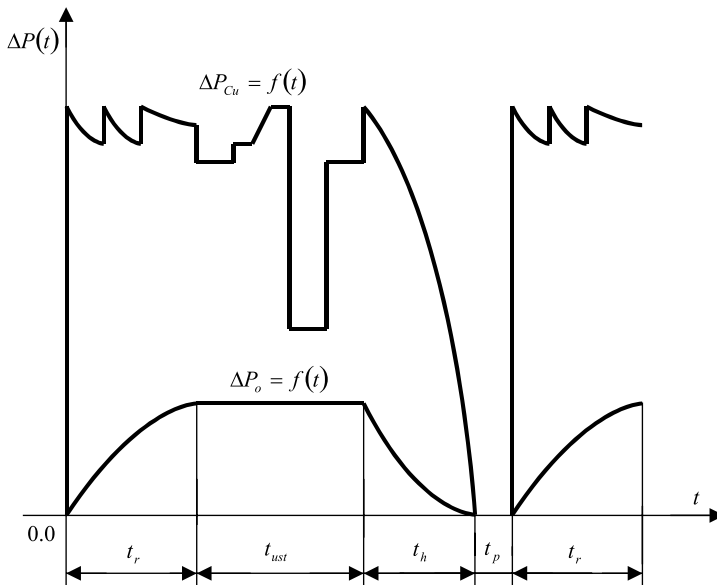
$$\frac{M_z}{M'_z} = \frac{460 \text{ Nm}}{374 \text{ Nm}} = 1.23$$

Przy chłodzeniu obcym można będzie zastosować silnik o ok. 20% mniejszy, niż silnik zastosowany przy chłodzeniu własnym.

## Metoda strat zastępczych

Metoda wyznaczania danych znamionowych silnika przez obliczenie momentu zastępczego lub mocy zastępczej obarczona jest błędem, wynikającym z uwzględnienia jedynie strat w uzwojeniach silnika, głównego toru energetycznego i zupełnego pominięcia źródeł ciepła takich jak np. obwód magnetyczny, uzwojenia wzbudzające itp.

Wymienione wady poznanych dotychczas metod usuwa w pewnym stopniu metoda strat zastępczych umożliwiającą osiąganie rezultatów na ogół wystarczająco dokładnych. Stosując tę metodę, należy uprzednio oszacować jednym z podanych sposobów moc zastępczą silnika, obrać typ silnika i otrzymać od producenta dane dotyczące wartości strat rezystancyjnych i strat przy biegu jałowym, tzn. strat magnetycznych, mechanicznych, przewietrzeniowych oraz innych. Mając te dane, jak również uproszczony wykres przebiegu pracy, wykreśla się krzywą strat w uzwojeniach  $\Delta P_{Cu}$  oraz strat jałowych  $\Delta P_o$  – rysunek Z2-8.



Rysunek Z2-8. Przebieg strat jałowych i strat w uzwojeniach silnika (do opisu metody strat zastępczych)

Oznaczenia do rysunku Z2-8:

- $t_r$  – czas rozruchu;
- $t_{sut}$  – czas pracy ustalonej;
- $t_h$  – czas hamowania;
- $t_p$  – czas przerwy beznapięciowej.

Z braku bliższych danych, dotyczących podziału strat całkowitych na straty jałowe i straty w uzwojeniach, możemy przyjąć w przybliżeniu, że współczynnik:

$$\gamma = \frac{\Delta P_0}{\sum \Delta P_n} = 0.5 \quad (Z2-15)$$

W tym przypadku straty całkowite w czasie biegu jałowego są równe stratom obciążeniowym przy obciążeniu znamionowym, czyli:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Cu} = P_n \cdot \frac{1 - \eta_n}{2 \cdot \eta_n} \quad (Z2-16)$$

a straty w uzwojeniach dla dowolnej mocy  $P_x$  wynoszą:

$$\Delta P_{Cu} = \left( \frac{P_x}{P_n} \right)^2 \cdot \frac{P_n \cdot (1 - \eta_n)}{2 \cdot \eta_n} = x^2 \cdot P_n \cdot \frac{1 - \eta_n}{2 \cdot \eta_n} \quad (Z2-17)$$

Metoda strat zastępczych, podobnie jak metody momentu zastępczego i mocy zastępczej, oparta jest na wyznaczeniu wartości strat niezmiennych, przy obciążeniu ciągłym w czasie całego cyklu, odpowiadających ilości ciepła, równoważnej stratom powstającym przy zmiennym programie pracy silnika:

$$\Delta P_z \cdot \int_0^{t_x} dt = \int_0^{t_x} \Delta P_x \cdot dt \quad (Z2-18)$$

Z zależności tej wynika, że w celu obliczenia wartości strat zastępczych, należy wyznaczyć najpierw w funkcji czasu, przebieg rzeczywistych strat całkowitych, po czym funkcję tę należy scałkować.

Straty zastępcze uzyskuje się, dzieląc wartość całki oznaczonej przez czas całego cyklu.

Straty, które mogą występować w silnikach elektrycznych są następujące:

$$\Delta P = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_t + \Delta P_{went} + \Delta P_{psz} + \Delta P_w \quad (Z2-19)$$

Zależność poszczególnych strat od parametrów pracy silnika można wyrazić następująco:

- Straty w uzwojeniach:

$$\Delta P_{Cu} = I^2 \cdot const \quad (Z2-20)$$

- Straty w stali:

$$\Delta P_{Fe} = B^2 \cdot f^{1.3} \cdot const \quad (Z2-21)$$

- Straty związane ze zjawiskiem tarcia:

$$\Delta P_t = n \cdot const \quad (Z2-22)$$

- Straty wentylacyjne:

$$\Delta P_{went} = n^3 \cdot const \quad (Z2-23)$$

- Straty przewodzenia szczotek:

$$\Delta P_{psz} = I \cdot const \quad (Z2-24)$$

- Straty w uzwojeniu wzbudzenia:

$$\Delta P_w = I_w^2 \cdot const \quad (Z2-25)$$

Znając zmiany w czasie pracy, prądu płynącego w obwodzie głównym silnika  $I$  indukcji magnetycznej  $B$ , częstotliwości magnesowania obwodu magnetycznego  $f$ , prędkości obrotowej  $n$  oraz prądu wzbudzenia silnika  $I_w$ , można wyznaczyć wartość poszczególnych strat w obranych chwilach oraz straty całkowite w tych chwilach. Sporządzając wykres obliczonych strat całkowitych  $\Delta P = f(t)$  i dokonując całkowania, otrzymamy straty zastępcze.

Straty zastępcze powinny być mniejsze od całkowitych strat znamionowych silnika przy pracy ciągłej.

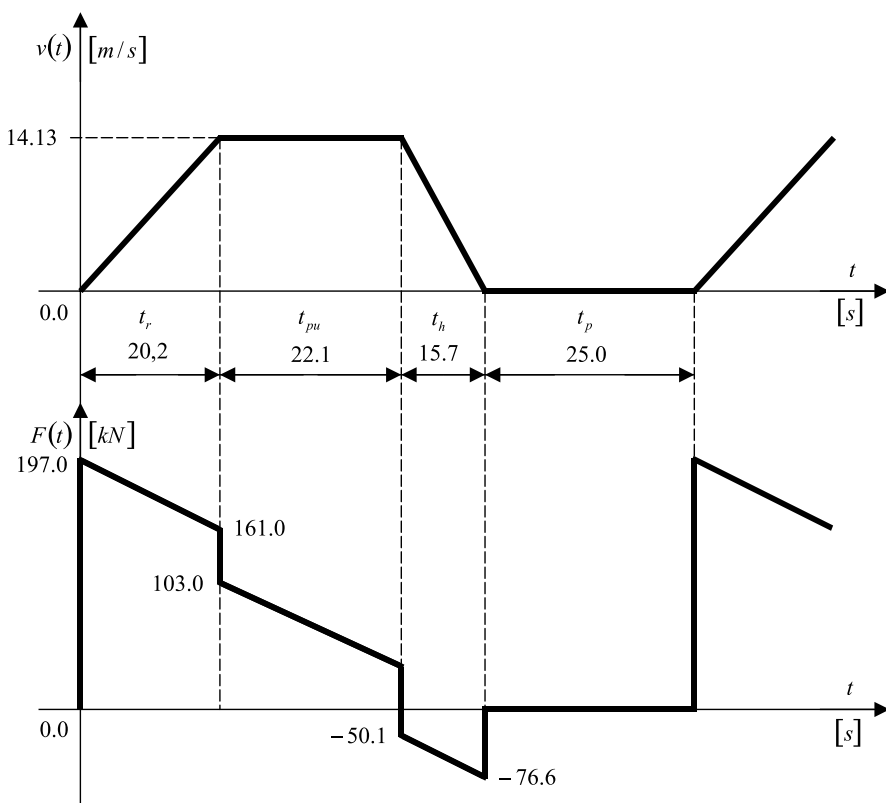
W praktyce stosowana jest zależność:

$$\frac{\Delta P_z}{\Delta P_n} \leq 0.96 \quad (Z2-26)$$

Jeżeli okaże się, że straty zastępcze są równe lub większe od strat znamionowych dobraneo wstępnie silnika, należy wówczas dobrać silnik większy i sprawdzić go ponownie na tzw. straty zastępcze.

## Przykład Z2-5

Wyznaczyć straty zastępcze silnika bocznikowego prądu stałego, pracującego w układzie Leonarda. Silnik jest maszyną otwartą, o wentylacji przelotowej. Dane silnika napędzającego maszynę wyciągową są następujące:  $P_n = 1600 \text{ kW}$ ,  $n_n = 45 \text{ l/m}$ ,  $I_n = 2650 \text{ A}$ ,  $U_n = 650 \text{ V}$ . Znany jest przebieg prędkości w funkcji czasu, oraz przebieg całkowitej siły na obwodzie koła pędnego maszyny wyciągowej – rysunek Z2-9. Siła znamionowa wynosi  $F_n = 112.8 \text{ kN}$ .



Rysunek Z2-9. Przebieg prędkości obrotowej i obciążenia silnika pracującego w układzie Leonarda (do przykładu Z2-5)

Poszczególne straty znamionowe silnika wynoszą:

- W uzwojeniach wirnika  $\Delta P = 50.5 \text{ kW}$ ;
- Straty przewodzenia szczotek  $\Delta P_{pszn} = 6.91 \text{ kW}$ ;
- W uzwojeniach biegunów pomocniczych  $\Delta P_{bpn} = 17.95 \text{ kW}$ ;
- W uzwojeniu kompensacyjnym  $\Delta P_{kn} = 39.0 \text{ kW}$ ;
- Straty tarcia szczotek o komutator  $\Delta P_{tszn} = 2.27 \text{ kW}$ ;
- W obwodzie magnetycznym wirnika  $\Delta P_{Fe} = 13.12 \text{ kW}$ ;
- Straty wentylacyjne  $\Delta P_{wentm} = 3.34 \text{ kW}$ ;
- Straty tarcia w łożyskach  $\Delta P_{tm} = 0.636 \text{ kW}$ ;



- W obwodzie wzbudzenia  $\Delta P_{wn} = 14.3 \text{ kW}$ .

Całkowite straty znamionowe silnika wynoszą:

$$\Delta P_n = 147.93 \text{ kW}$$

Zakłada się, że w czasie całego cyklu pracy wzbudzenie silnika pozostaje stałe  $\Phi_M = \text{const}$ .

Wyznaczamy poszczególne straty powstające w silniku:

1. Straty proporcjonalne do kwadratu prądu obwodu głównego:

$$\Delta P_{I2n} = \Delta P_{Cu\text{w}ir\text{n}} + \Delta P_{b\text{p}n} + \Delta P_{k\text{n}} = 107.45 \text{ kW}$$

przy dowolnym obciążeniu:

$$\Delta P_{I2} = \Delta P_{I2n} \cdot \left( \frac{I}{I_n} \right)^2 = \Delta P_{I2n} \cdot \left( \frac{F}{F_n} \right)^2 = 107.45 \cdot \left( \frac{F}{F_n} \right)^2$$

2. Straty proporcjonalne do pierwszej potęgi prądu obwodu głównego:

$$\Delta P_{I_n} = \Delta P_{p\text{s}zn} = 6.91 \text{ kW}$$

przy dowolnym obciążeniu:

$$\Delta P_I = \Delta P_{I_n} \cdot \left( \frac{F}{F_n} \right) = 6.91 \cdot \left( \frac{F}{F_n} \right)$$

3. Straty proporcjonalne do pierwszej potęgi prędkości silnika:

$$\Delta P_{v_n} = \Delta P_{t\text{s}zn} + \Delta P_{t\text{n}} = 2.27 + 0.64 = 2.91 \text{ kW}$$

przy dowolnej prędkości:

$$\Delta P_v = \Delta P_{v_n} \cdot \left( \frac{n}{n_n} \right) = 2.91 \cdot \left( \frac{v}{v_n} \right)$$

4. Straty proporcjonalne do prędkości w potęgze 1.3:

$$\Delta P_{v1.3n} = \Delta P_{F\text{e}n} = 13.12 \text{ kW}$$

przy dowolnej prędkości

$$\Delta P_{v1.3} = \Delta P_{F\text{e}n} \cdot \left( \frac{v}{v_n} \right)^{1.3} = 13.12 \cdot \left( \frac{v}{v_n} \right)^{1.3}$$

5. Straty proporcjonalne do trzeciej potęgi prędkości:

$$\Delta P_{v3n} = \Delta P_{wentn} = 3.34 \text{ kW}$$

przy dowolnej prędkości:

$$\Delta P_{v3} = \Delta P_{wentn} \cdot \left( \frac{v}{v_n} \right)^3 = 13.12 \cdot \left( \frac{v}{v_n} \right)^3$$

6. Straty wzbudzenia, stałe w przeciągu całego cyklu pracy, gdyż:

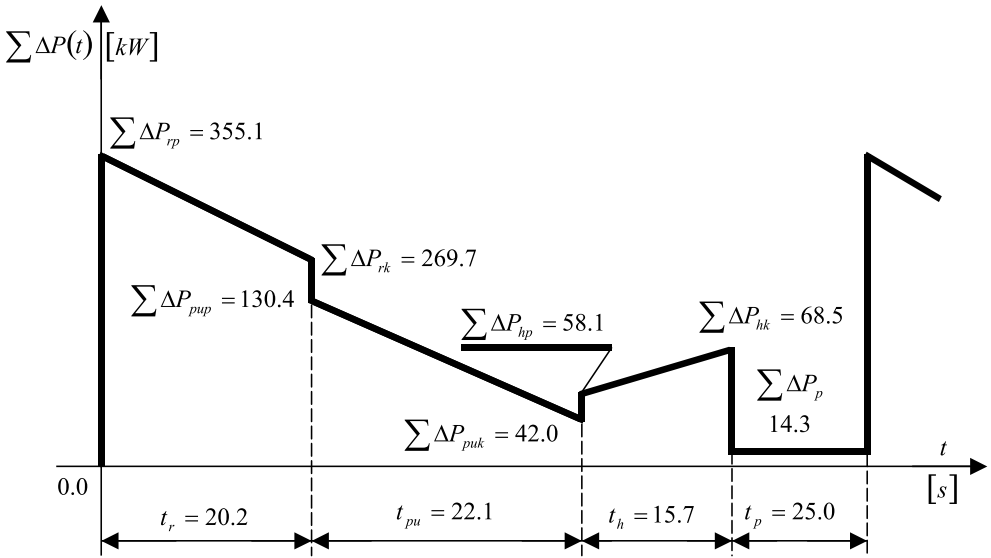
$$\Phi_M = const$$

$$\Delta P_{wn} = \Delta P_w = 14.3 \text{ kW}$$

Posługując się podanymi wyżej zależnościami, obliczamy straty w poszczególnych chwilach i umieszczamy je w tabeli Z2-1.

Tabela Z2-1

	Chwila	$\Delta P_{I2}$	$\Delta P_I$	$\Delta P_v$	$\Delta P_{v1.3}$	$\Delta P_{v3}$	$\Delta P_w$	$\sum \Delta P_x$
		kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW
Rozruch	Początek	328.0	12.8	0.0	0.0	0.0	14.3	355.1
	Koniec	226.0	10.0	2.91	13.12	3.34	14.3	269.7
Praca ustalona	Początek	90.4	6.3	2.91	13.12	3.34	14.3	130.4
	Koniec	6.6	1.7	2.91	13.12	3.34	14.3	42.0
Hamowanie	Początek	21.3	3.1	2.91	13.12	3.34	14.3	58.1
	Koniec	49.5	4.7	0.0	0.0	0.0	14.3	68.5
Postój	-----	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.3	14.3



Rysunek Z2-10. Przebieg strat mocy w silniku w funkcji czasu dla silnika bocznikowego, pracującego w układzie Leonarda (do przykładu Z2-5)

Obliczywszy wartości strat całkowitych, powstających w silniku w poszczególnych chwilach  $\sum \Delta P_x$ , zaznaczamy je na wykresie – rysunek Z2-10. Poszczególne punkty łączymy liniami prostymi, dokonując w ten sposób linearyzacji przebiegów, nie popełniamy zbyt dużych błędów.

Należy zaznaczyć, że obliczenia są przeprowadzane z pewnym zapasem, ponieważ nie wzięto w nich pod uwagę spadków temperatury, pomiędzy poszczególnymi częściami maszyny.

Na podstawie wykresu  $\sum \Delta P = f(t)$  można obliczyć straty zastępcze:

$$\Delta P_z = \frac{\sum \Delta P_x \cdot t_x}{t_{\text{cyklu}}} = \frac{\frac{\sum \Delta P_{rp} + \sum \Delta P_{rk}}{2} \cdot t_r + \frac{\sum \Delta P_{pup} + \sum \Delta P_{puk}}{2} \cdot t_{pu} + \frac{\sum \Delta P_{hp} + \sum \Delta P_{hk}}{2} \cdot t_h + \sum \Delta P_p \cdot t_p}{t_r + t_{pu} + t_h + t_p} \quad (\text{Z2-27})$$

Wprowadzając dane liczbowe z wykresu (rysunek Z2-10), do zależności (Z2-27), uzyskano co następuje:

$$\Delta P_z = \frac{\frac{355.1 + 269.7}{2} \cdot 20.2 + \frac{130.4 + 42.0}{2} \cdot 22.1 + \frac{58.1 + 68.5}{2} \cdot 15.7 + 14.3 \cdot 25}{20.2 + 22.1 + 15.7 + 25} = 113.2 \text{ kW}$$

Gdyby silnik miał tylko wentylację własną, wówczas czas cyklu należałoby skorygować do wartości:

$$t'_{cyklu} = t_r \cdot \alpha + t_{pu} + t_h \cdot \alpha + t_p \cdot \beta \quad (Z2-28)$$

Przy chłodzeniu własnym, zależność opisująca straty zastępcze przyjmie postać:

$$\Delta P'_z = \frac{\sum \Delta P_x \cdot t_x}{t'_{cyklu}} = \frac{\frac{\sum \Delta P_{rp} + \sum \Delta P_{rk}}{2} \cdot t_r + \frac{\sum \Delta P_{pup} + \sum \Delta P_{puk}}{2} \cdot t_{pu} + \frac{\sum \Delta P_{hp} + \sum \Delta P_{hk}}{2} \cdot t_h + \sum \Delta P_p \cdot t_p}{t_r \cdot \alpha + t_{pu} + t_h \cdot \alpha + t_p \cdot \beta} + \quad (Z2-29)$$

Ponieważ silnik posiada wentylację przelotową własną, zakładamy:

$$\beta = 0.3 \quad \text{i} \quad \alpha = 0.66$$

Po wprowadzeniu danych liczbowych do zależności (Z2-29), obliczymy wartość strat zastępczych dla silnika o chłodzeniu własnym:

$$\Delta P'_z = \frac{\frac{355.1 + 269.7}{2} \cdot 20.2 + \frac{130.4 + 42.0}{2} \cdot 22.1 + \frac{58.1 + 68.5}{2} \cdot 15.7 + 14.3 \cdot 25}{20.2 \cdot 0.66 + 22.1 + 15.7 \cdot 0.66 + 25 \cdot 0.33} = 174.0 \text{ kW}$$

Całkowite straty znamionowe silnika wynosiły  $\Delta P = 147.93 \text{ kW}$ , a zatem uzyskaliśmy:

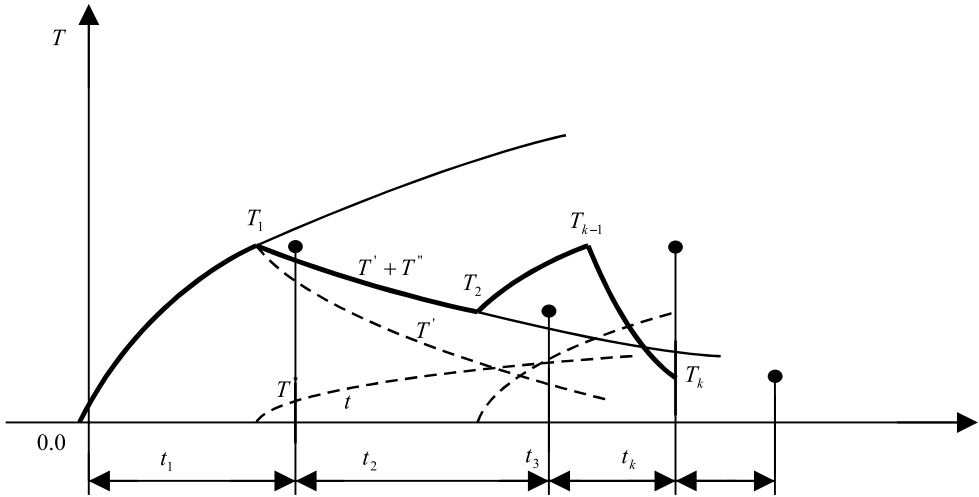
$$\Delta P_z < \Delta P_n; \quad \Delta P'_z > \Delta P_n; \quad \frac{\Delta P_z}{\Delta P_n} = \frac{113.2 \text{ kW}}{147.9 \text{ kW}} = 0.767$$

Stąd wniosek, że silnik przy założonym programie pracy powinien mieć wentylację obcą. Jeśliby wprowadzenie wentylacji obcej nie wchodziło w rachubę, to należałoby zainstalować silnik o większej mocy.

Przy chłodzeniu obcym silnik będzie pracował przy temperaturach niższych od temperatury dopuszczalnej.

## Metoda przyrostów temperaturowych

W przypadkach szczególnie ważnych, można po obliczeniu strat zastępczych i wyborze typu silnika uzupełnić projekt, obliczeniem przebiegu przyrostów temperatury izolacji uzwojeń (rysunek Z2-11).



Rys. Z2-11. Przebieg przyrostów temperatury przy pracy praktycznej silnika

Założmy, że  $T_T$  jest termiczną stałą czasową, określającą przebieg temperatury izolacji silnika wirującego, a przez  $T_{T0}$  stałą czasową silnika nieruchomego. Dopuszczalny, graniczny przyrost temperatury, który się oznacza przez  $T_u$ , wystąpi w izolacji silnika przy pracy ciągłej, z którą wiążą się straty mocy  $\Delta P_n$ .

Stała czasowa  $T_{T0}$  przy postoju jest większa niż stała czasowa  $T_T$ , a stosunek  $T_{T0}/T_T$  zawiera się w granicach 1.05 – 4.0. Podzielmy następnie krzywą przebiegu pracy praktycznej, na odcinki odpowiadające czasom  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_x$ . W ciągu każdego takiego odcinka czasu będą powstawały odpowiednio pewne straty  $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3, \dots, \Delta P_x$ , średnie dla każdego odcinka. Rzeczywiste przyrosty temperatury przy końcu każdego odcinka oznaczymy przez:

$$T_1, T_2, T_3, \dots, T_x$$

Krzywa nagrzewania dla stanu zimnego, przy dowolnych stratach wyrazi się zależnością:

$$T_x = T_u \cdot \frac{\Delta P_x}{\Delta P_n} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_T}} \right) \quad (\text{Z2-30})$$

Po upływie czasu odpowiadającego pierwszemu odcinkowi  $t_1$ , przyrost temperatury wyniesie:

$$T_1 = T_u \cdot \frac{\Delta P_1}{\Delta P_n} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{T_T}} \right) \quad (\text{Z2-31})$$

Gdyby w przeciągu czasu odpowiadającego drugiemu odcinkowi, silnik wirował bez obciążenia, to jego temperatura malałaby według krzywej stygnięcia i po upływie czasu  $t_2$ , przyrost temperatury wynosiłby tylko:

$$T' = T_1 \cdot e^{-\frac{t_2}{T_r}} \quad (Z2-32)$$

W rzeczywistości w ciągu czasu  $t_2$  obciążenie istnieje i w silniku występują odpowiednie straty  $\Delta P_2$ . Powinny one ze swej strony spowodować nagrzanie się według następującej zależności:

$$T'' = T_u \cdot \frac{\Delta P_2}{\Delta P_n} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_r}}\right) \quad (Z2-33)$$

W rezultacie przy końcu odcinka czasu  $t_2$ , przyrost temperatury wyniesie:

$$T_2 = T' + T'' \quad (Z2-34)$$

czyli:

$$T_2 = T_1 \cdot e^{-\frac{t_2}{T_r}} + T_u \cdot \frac{\Delta P_2}{\Delta P_n} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_r}}\right) \quad (Z2-35)$$

Słuszność zależności postaci (Z2-35) da się uzasadnić analitycznie na zasadzie zależności podstawowej postaci (Z2-31). Dowolnemu odcinkowi czasu  $t_x$ , w ciągu którego straty wynoszą  $\Delta P_x$ , odpowiada:

$$T_x = T_{x-1} \cdot e^{-\frac{t_x}{T_r}} + T_u \cdot \frac{\Delta P_x}{\Delta P_n} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_x}{T_r}}\right) \quad (Z2-36)$$

Jeżeli na początku pewnego odcinka czasu  $t_k$ , silnik osiągnął przyrost temperatury  $T_{k1}$  i na przeciąg czasu  $t_k$  został zatrzymany, to zacznie on stygnąć według krzywej stygnięcia i po upływie czasu  $t_k$ , osiągnie przyrost:

$$T_k = T_{k-1} \cdot e^{-\frac{t_k}{T_r}} \quad (Z2-37)$$

Zwróćmy uwagę, że w zależności postaci (Z2-37) wystąpiła termiczna stała czasowa  $T_{70}$  przy postoju. W ten sposób zdołamy obliczyć i wykreślić cały przebieg przyrostów temperatury (rysunek Z2-11), a następnie sprawdzić, czy przyrosty temperatury  $T_1, T_2, T_3, \dots$  są mniejsze od dopuszczalnego przyrostu  $T_u$ . Zauważymy przy tym, że temperatura przy przejściu od większych obciążeń do mniejszych może wzrastać lub maleć. Wynika to jasno z zależności postaci (Z2-36).

### **Obliczanie mocy silników przy temperaturze otoczenia różniącej się od znormalizowanej temperatury maksymalnej**

Bardzo często przy projektowaniu napędu wiadomo jest z góry, że silnik będzie pracował w temperaturze otoczenia stale niższej lub stale wyższej od największej po-

danej w odpowiednich przepisach (normach) temperatury dopuszczalnej. Temperatura ta w myśl polskich norm wynosi 40°C.

W temperaturze otoczenia stale wyższej niż 40°C pracują np. niektóre silniki w kotłowniach, w temperaturze zaś otoczenia stale niższej – silniki w chłodniach. Ponieważ największa temperatura uzwojeń dopuszczalna dla danego rodzaju izolacji jest stała, dopuszczalne przyrosty temperatury w silnikach zmieniają się zależnie od temperatury otoczenia. Gdy temperatura otoczenia różni się od 40°C o  $\pm \Delta T$ , przyrost dopuszczalny zmienia się o  $\pm \Delta T'$ . Gdy temperatura otoczenia wynosi np. 55°C, czyli jest o 15°C większa od przepisowej - przyrost temperatury powinien być o 15°C mniejszy i wynosić  $T_u - 15^\circ$ .

Ponieważ przyrosty ustalone są proporcjonalne do strat, a straty uważamy za proporcjonalne do kwadratu mocy, więc przy założeniu, że  $\Phi = const$ ,  $n = const$ , otrzymujemy wyrażenie:

$$\frac{T_u - 15^\circ}{T_u} = \frac{\Delta P_{55^\circ}}{\Delta P_{40^\circ}} = \left( \frac{P_{55^\circ}}{P_{40^\circ}} \right)^2 \quad (\text{Z2-38})$$

skąd:

$$P_{55^\circ} \approx P_{40^\circ} \cdot \sqrt{\frac{T_u - 15}{T_u}} \quad (\text{Z2-39})$$

przy czym przez  $P_{55^\circ}$  oznaczono moc silnika w temperaturze otoczenia 55°C, a przez  $P_{40^\circ}$  – moc katalogową, w temperaturze 40°C.

Ogólnie możemy napisać:

$$P_{40^\circ \pm \Delta T'} \approx P_{40^\circ} \cdot \sqrt{\frac{T_u \text{ m}\Delta T'}{T_u}} \quad (\text{Z2-40})$$

## Przykład Z2-6

*Jaką mocą maksymalną można obciążyć zwykły katalogowy silnik o mocy 30 kW, jeżeli ma on pracować stale w temperaturze otoczenia wynoszącej 65°C oraz jak powinna być moc silnika katalogowego, aby mógł on w podanych warunkach oddawać moc 30 kW.*

- Zakłada się, że straty w silniku są proporcjonalne do kwadratu jego mocy na wale, a więc korzystamy z zależności postaci (Z2-40):

$$P_{40^\circ \pm \Delta T'} \approx P_{40^\circ} \cdot \sqrt{\frac{T_u \text{ m}\Delta T'}{T_u}}$$

Przy maksymalnej temperaturze otoczenia, wynoszącej według norm 40°C, dopuszczalny przyrost temperatury izolacji klasy F wynosi  $T_u = 100^\circ\text{C}$ . W temperaturze otoczenia wynoszącej 65°C, a więc przy  $\Delta T' = 25^\circ\text{C}$  otrzymamy:

$$P_{65^\circ} = P_{40^\circ} \cdot \sqrt{\frac{T_u - 25}{T_u}} = 30 \cdot \sqrt{\frac{100 - 25}{100}} \approx 26 \text{ kW}$$

Jest to maksymalna moc, którą można obciążyć silnik w podanej wyżej temperaturze otoczenia.

- Przekształcając odpowiednio zależność postaci (Z2-40), uzyskaliśmy:

$$P_{40^\circ} = P_{40^\circ \pm \Delta T'} \cdot \sqrt{\frac{T_u}{T_u \text{ m}\Delta T'}} \quad (\text{Z2-41})$$

skąd:

$$P_{40^\circ} = P_{65^\circ} \cdot \sqrt{\frac{T_u}{T_u - 25}} = 30 \cdot \sqrt{\frac{100}{100 - 25}} = 40 \text{ kW}$$

Moc 40 kW jest mocą silnika dobieranego według katalogu, opracowanego dla temperatury otoczenia 40°C. Przy temperaturze otoczenia 65°C będzie on mógł wydawać moc 26 kW.

### **Dobór silników z uwzględnieniem ekonomicznego kryterium trwałości**

Rozwiązanie tego zdania powinno spełniać dwa częściowo przeciwstawne warunki: z jednej strony silniki powinny mieć dużą trwałość, a z drugiej strony – powinny być lekkie i tanie, aby nie powiększały kosztów inwestycyjnych. Przez trwałość silnika rozumiemy przy tym, całkowity czas niezawodnej pracy silnika w okresie jego amortyzacji. O trwałości decyduje przede wszystkim jakość izolacji maszyny. Wiadomo, że najważniejszym czynnikiem, zapewniającym zadowalającą trwałość maszyny jest ograniczona temperatura izolacji, przy której ona pracuje. Im wyższa tempera-



tura, tym szybciej przebiega proces starzenia się izolacji i tym mniejsza jest trwałość. Z badań fizykochemicznych Arrcheniusa wynika, że trwałość oznaczana przy temperaturze  $\Theta$  izolacji przez  $T_{\Theta}$  (w jednostkach czasu) wyraża się zależnością:

$$T_{\Theta} = A_0 \cdot e^{-h \cdot \Theta} \quad (Z2-42)$$

W tym wyrażeniu współczynniki  $A_0$  i  $h$  związane są z jakością (klasą wytrzymałości cieplnej i technologią) izolacji,  $\Theta$  zaś jest temperaturą najgorętszego miejsca izolacji w pracy. Gdy mamy izolację klasy A, trwałość przy temperaturze 105°C wyniesie:

$$T_{105^{\circ}} = 6.225 \cdot 10^4 \cdot e^{-0.865 \cdot 105^{\circ}} = 7.2 \text{ lat}$$

W rzeczywistości, przy uwzględnieniu, że temperatura otoczenia jest zazwyczaj mniejsza od znamionowej (40°C), a obciążenie jest zmienne poniżej wartości znamionowej, trwałość jest większa i dochodzi nawet do 20–25 lat. Jeżeli wykonać wykres funkcji  $T_{\Theta} = f(\Theta)$  w ten sposób, że dla temperatur przyjąć skalę liniową, a dla trwałości – logarytmiczną, to jako odwzorowanie w taki układzie współrzędnych funkcji  $T_{\Theta} = f(\Theta)$ , otrzymamy linię prostą (rysunek Z2-12) podaną przez Montsingera i przedstawiającą tzw. prawo 8 stopni. Obliczenie łatwo wykazuje, że zmniejszenie temperatury  $\Theta$  o 8°C podwaja trwałość, a każde takie samo zwiększenie temperatury zmniejsza trwałość do połowy. W rzeczywistości dalsze badania wykazały, że ośmiostopniowy skok temperatury nie jest wielkością stałą, lecz zmienia się w granicach 5°–12° zależnie od różnych warunków pracy i rodzajów izolacji. Jeśli jednak, upraszczając, uznać że podwajanie się trwałości następuje przy zmniejszeniu temperatury o 8°C, a jej zmniejszanie się do połowy – przy takim samym wzroście temperatury, to wypływa stąd wniosek o ogromnej doniosłości wpływu na trwałość temperatury oraz ekonomiczność pracy maszyn napędowych.

Jeśli założymy, że przy stałej temperaturze izolacji jej zużycie jest proporcjonalne do czasu trwania obciążenia, odpowiadającego tej temperaturze (przy pominięciu okresów przejściowych), to biorąc pod uwagę przebieg obciążenia z kolejnych okresów czasu  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_k$  i odpowiednich temperatur  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \dots, \Theta_k$ , dla których trwałości wynoszą  $T_1, T_2, T_3, \dots, T_k$ , możemy znaleźć całkowity stopień zużycia, odpowiadający danemu programowi obciążenia:

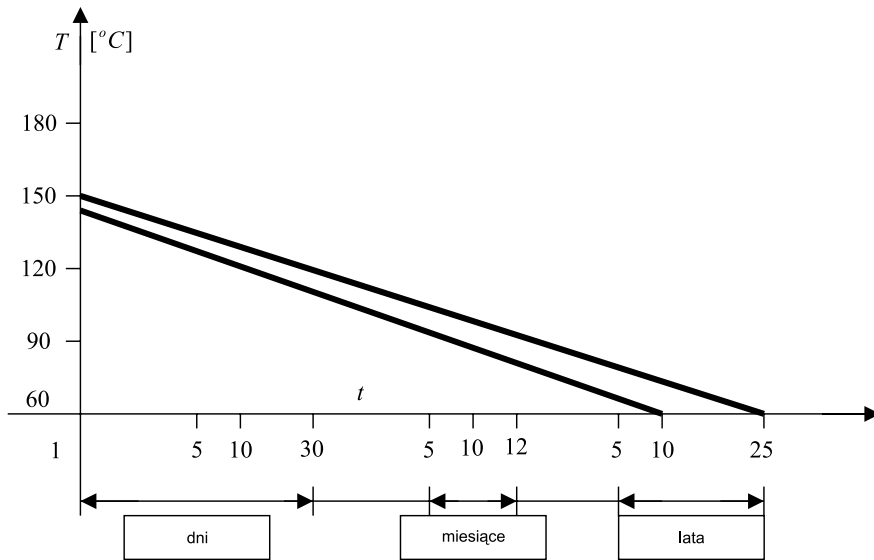
$$\sum_1^k \xi = \frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \dots + \frac{t_k}{T_k} \quad (Z2-43)$$

Trwałość maszyny będzie wyzyskana całkowicie, gdy  $\sum_1^k \xi = 1$ . Gdy  $\sum_1^k \xi < 1$ , to pewien zapas trwałości pozostanie niewyzyskany, a gdy natomiast  $\sum_1^k \xi > 1$ , to założony program nie da się zrealizować, bez przedwczesnego zniszczenia izolacji.

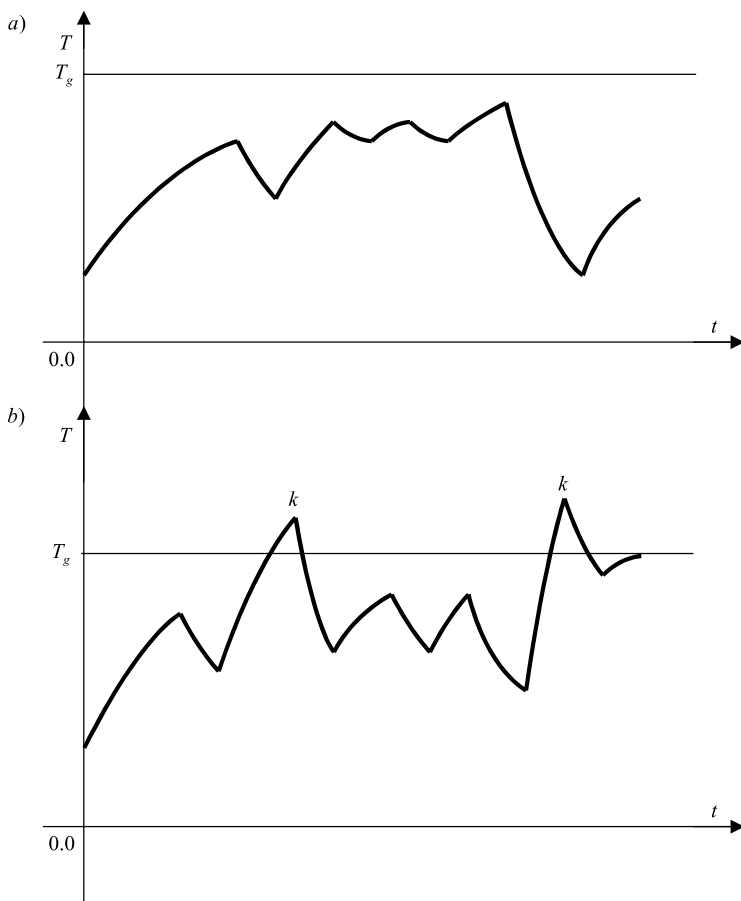
Jeśli natomiast w pewnych okresach pracy zużycie izolacji w jednostce czasu będzie mniejsze niż  $1/T_n$  ( $T_n$  – trwałość znamionowa), to uzyskany zapas trwałości

można wyzyskać w innym okresie pracy, przeciążając chwilowo maszynę ponad jej temperaturę znamionową  $\Theta_n$  (rysunek Z2-13).

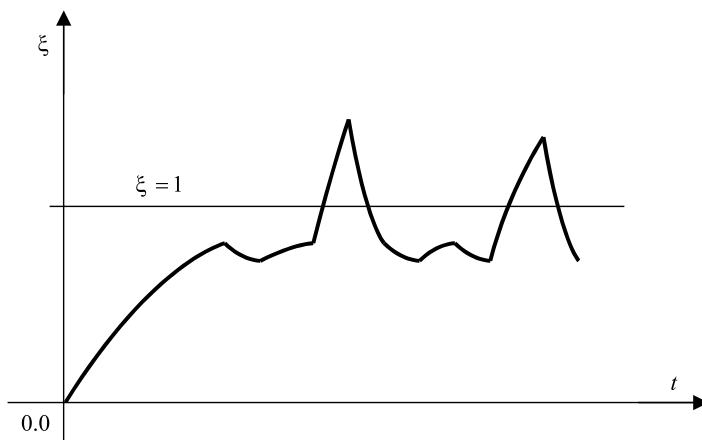
Ten sposób postępowania pozwala na lepsze wyzyskanie maszyny niż w przypadku, gdyby temperaturę izolacji utrzymywać bezwarunkowo poniżej  $\Theta_n$ . Niektórzy producenci maszyn dopuszczają takie chwilowe przekraczanie pułapu  $\Theta_n$ , pod warunkiem, by pole zawarte między krzywą  $\zeta$  a osią czasu (rysunek Z2-14) było mniejsze od pola prostokąta między poziomą  $\zeta=1$  a osią czasu. Umożliwia to oszczędniejsze wymiarowanie silników, zmniejszenie ciężaru i momentów bezwładności, co jest szczególnie ważne w napędach dźwignicowych.



Rysunek Z2-12. Trwałość izolacji (klasy A) silnika, w zależności od przyrostu temperatury



Rysunek Z2-13. Przebieg zmian temperatury uzwojeń silników przy obciążeniach zmiennych: a) poniżej pułapu  $T_g$ , b) z chwilowymi przekroczeniami pułapu  $T_g$ .



Rysunek Z2-14. Prędkość starzenia się izolacji w przypadku jak na rysunku Z2-13b

## ZAŁĄCZNIK 3

### Parametry charakteryzujące maszyny elektryczne prądu przemiennego i stałego

#### Nazwy i określenia

1. *Dane znamionowe* – zbiór wartości i warunków pracy;
2. *Wartość znamionowa* – wartość pewnej wielkości, ustalana zwykle przez wytwórcę, charakteryzująca określony stan pracy maszyny w określonych warunkach;
3. *Bieg jałowy* – stan pracy maszyny wirującej przy mocy wydawanej równej zeru (ale przy zachowaniu innych normalnych warunków pracy);
4. *Pełne obciążenie* – obciążenie powodujące, że maszyna pracuje przy danych znamionowych;
5. *Postój* – całkowity brak ruchu oraz zasilania elektrycznego lub napędzania mechanicznego maszyny;
6. *Praca* – obciążenie lub zestaw obciążeń, któremu maszyna jest poddawana, z uwzględnieniem, jeżeli występują, okresów ruchu, hamowania elektrycznego, biegu jałowego i postoju, a także czasów ich trwania i kolejności występowania;
7. *Rodzaj pracy* – ciągły, dorywczy lub okresowy przebieg pracy, obejmujący pojedyncze obciążenie lub kilka obciążeń stałych w określonym czasie, lub nieokresowy przebieg pracy, w którym na ogół obciążenie i prędkość obrotowa zmieniają się w dopuszczalnym zakresie;
8. *Względny czas obciążenia* – stosunek czasu pracy maszyny pod obciążeniem, łącznie z czasem rozruchu i hamowania elektrycznego, do czasu trwania całego okresu pracy, wyrażony w procentach;
9. *Moment obrotowy przy zahamowanym wirniku* – najmniejsza z wartości momentu obrotowego, zmierzonych na czopie napędowym wału, zahamowanego wirnika, przy różnych jego położeniach kątowych i przy zasilaniu silnika napięciem znamionowym o częstotliwości znamionowej;
10. *Prąd przy zahamowanym wirniku* – największa ze wszystkich wartości skutecznych prądu pobieranego z sieci w stanie ustalonym, przy różnych położeniach kątowych zahamowanego wirnika, przy zasilaniu silnika napięciem znamionowym o częstotliwości znamionowej;
11. *Najmniejszy moment rozruchowy (silnika prądu przemiennego)* – najmniejsza wartość momentu obrotowego, wytwarzanego przez silnik przy pracy asynchronicznej, w stanie ustalonym, występująca w zakresie prędkości obrotowej od zera do prędkości obrotowej, odpowiadającej momentowi krytycznemu, i przy zasilaniu napięciem znamionowym o częstotliwości znamionowej;  
Definicji tej nie stosuje się do silników indukcyjnych, w których moment obrotowy zmniejsza się monotonicznie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej.  
UWAGA. Dodatkowo przy pracy asynchronicznej w stanie ustalonym, przy niektórych prędkościach obrotowych, pojawiają się momenty synchroniczne zależne od kąta obciążenia wirnika.

Przy tych prędkościach obrotowych, dla określonych kątów obciążenia wirnika, moment dynamiczny może być ujemny.

Z doświadczeń i obliczeń wynika, że powoduje to tylko chwilową zmianę warunków działania i dlatego też momenty synchroniczne od składowych harmonicznym nie przeszkadzają w rozruchu silnika i nie zostały uwzględnione w niniejszej definicji.

12. *Moment krytyczny (silnika prądu przemiennego)* – największa wartość momentu obrotowego, wytwarzanego przez silnik przy pracy asynchronicznej, w stanie ustalonym bez nagłego spadku prędkości obrotowej, przy zasilaniu napięciem znamionowym o częstotliwości znamionowej;  
Definicji tej nie stosuje się do silników indukcyjnych, w których moment obrotowy zmniejsza się monotonicznie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej.
13. *Największy moment obrotowy (silnika synchronicznego)* – największy moment obrotowy wytwarzany przez silnik synchroniczny, będący w stanie nagrzanym, przy synchronicznej prędkości obrotowej oraz przy znamionowych wartościach napięcia, częstotliwości i prądu wzbudzenia;
14. *Znamionowy współczynnik kształtu prądu stałego zasilającego twornik silnika prądu stałego z przekształtnika* – stosunek największej dopuszczalnej wartości skutecznej prądu  $I_{ef, \max N}$  do jego wartości średniej  $I_{avn}$  (średnia całkowa w przedziale jednego okresu) w warunkach znamionowych:

$$k_{fN} = \frac{I_{ef, \max N}}{I_{avn}}$$

15. *Współczynnik tętnienia prądu* – stosunek różnicy między wartością największą  $I_{\max}$  a jego wartością najmniejszą  $I_{\min}$  prądu tętniącego, do podwójnej jego wartości średniej  $I_{av}$  (średnia całkowa w przedziale jednego okresu):

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \times I_{av}}$$

U W A G A . Współczynnik tętnienia małych wartości prądu tętniącego, można obliczyć w przybliżeniu z następującego wyrażenia:

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Powyższe wyrażenie można stosować jako przybliżone, jeżeli obliczona z niego wartość  $q_i$  jest równa lub mniejsza niż 0.4.

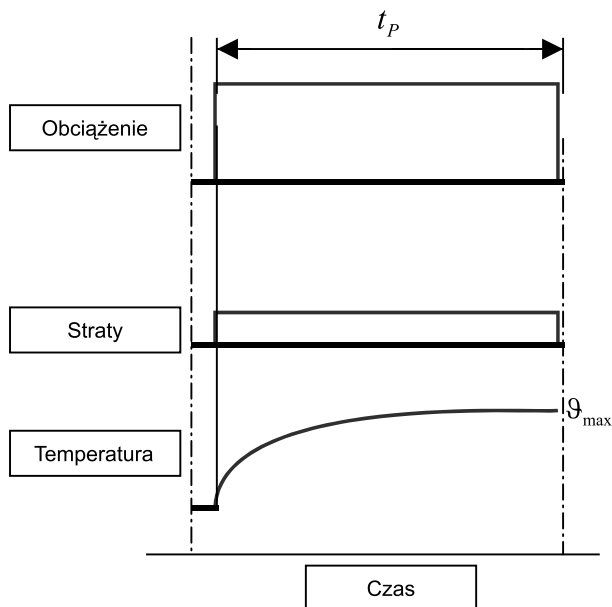
16. *Równowaga cieplna* – stan cieplny maszyny, w którym przyrosty temperatury poszczególnych części maszyny, nie zmieniają się więcej niż o 2°K przez jedną godzinę;

## Rodzaje pracy

Rozróżnia się następujące rodzaje pracy maszyn elektrycznych wirujących.

1. **Praca ciągła – rodzaj pracy S1** - praca z obciążeniem stałym, trwającym tak długo, aż zostanie osiągnięty stan równowagi cieplnej (rysunek Z3-1.).

Odpowiedni skrót: S1.



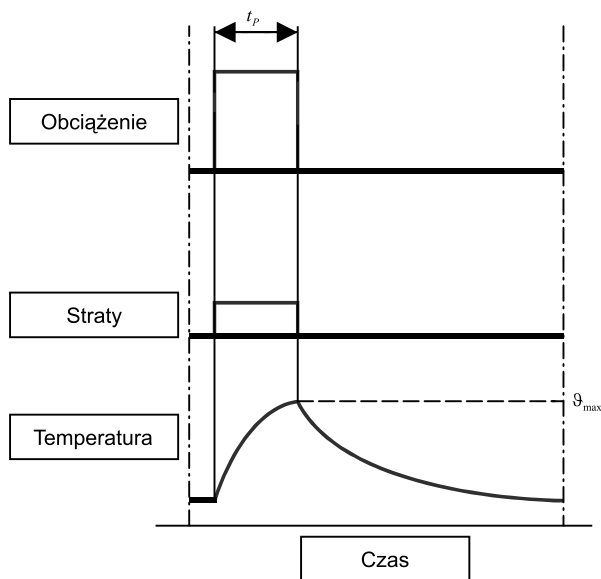
Rysunek Z3-1. Praca ciągła – rodzaj pracy S1

- $\vartheta_{\max}$  – najwyższa temperatura osiągana przy pracy ciągłej;  
 $t_p$  – czas pracy przy obciążeniu stałym.

2. **Praca dorywcza – rodzaj pracy S2** – praca z obciążeniem stałym, trwającym przez określony czas, krótszy niż czas potrzebny do osiągnięcia równowagi cieplnej i następującym po tym czasie postojem, trwającym tak długo, aż ustalona temperatura maszyny nie będzie się różnić więcej niż  $2^{\circ}\text{K}$  od temperatury czynnika chłodzącego (rysunek Z3-2.).

Odpowiedni skrót: S2, po którym należy podać czas trwania tej pracy.

Przykład: S2 60 min.



Rysunek Z3-2. Praca dorywcza – rodzaj pracy S2

$\vartheta_{\max}$  – najwyższa temperatura osiągnięta przy pracy dorywczej,  
 $t_p$  – czas pracy przy obciążeniu stałym.

3. **Praca okresowa przerywana – rodzaj pracy S3** – szereg identycznych okresów pracy, z których każdy obejmuje czas pracy przy obciążeniu stałym i czas postoju. Przy tym rodzaju pracy okres jest taki, że prąd rozruchowy nie wpływa w sposób znaczący na nagrzewanie się maszyny (rysunek Z3-3.).

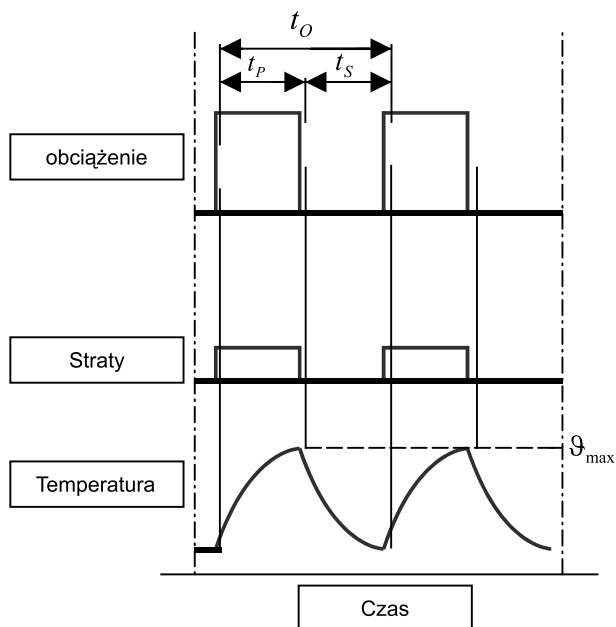
Odpowiedni skrót: S3, po którym podaje się względny czas obciążenia.

Przykład: S3 25%.

4. **Praca okresowa przerywana z rozruchem – rodzaj pracy S4** – szereg identycznych okresów pracy, z których każdy obejmuje znaczący (ze względów cieplnych) czas rozruchu, czas pracy przy obciążeniu stałym i czas postoju (rysunek Z3-4).

Odpowiedni skrót: S4, po którym należy podać względny czas obciążenia, moment bezwładności silnika ( $J_M$ ) i moment bezwładności obciążenia ( $J_{ext}$ ), oba sprowadzone do osi wału silnika.

Przykład: S4 25%       $J_M = 0.15 \text{ kg} \times \text{m}^2$        $J_{ext} = 0.15 \text{ kg} \times \text{m}^2$



Rysunek Z3-3. Praca okresowa przerywana – rodzaj pracy S3

- $\vartheta_{\max}$  – najwyższa temperatura osiągnięta w okresie pracy,  
 $t_o$  – czas trwania okresu,  
 $t_p$  – czas pracy przy obciążeniu stałym,  
 $t_s$  – czas postoju.

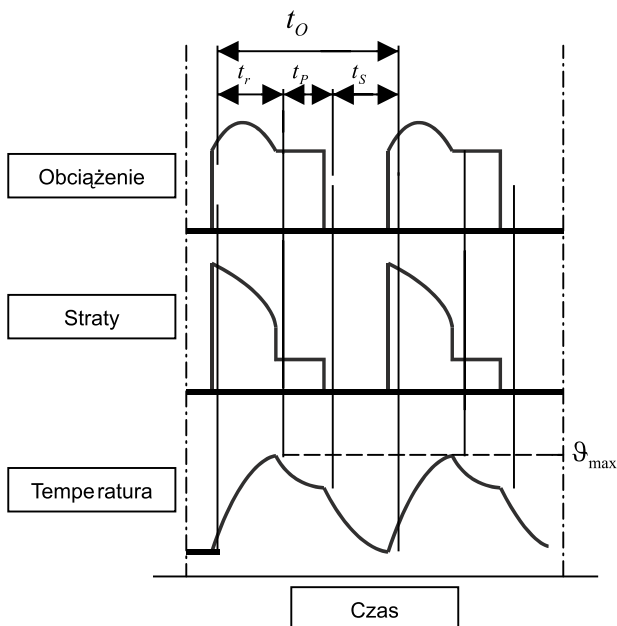
$$\text{Względny czas obciążenia} = \frac{t_p}{t_p + t_s} \cdot 100 [\%]$$

5. **Praca okresowa przerywana z hamowaniem elektrycznym – rodzaj pracy S5** – szereg identycznych okresów pracy, z których każdy obejmuje czas rozruchu, czas pracy przy obciążeniu stałym, czas hamowania elektrycznego oraz czas postoju (rysunek Z3-5.).

Odpowiedni skrót: S5, po którym należy podać względny czas obciążenia, moment bezwładności silnika ( $J_M$ ) i moment bezwładności obciążenia ( $J_{ext}$ ), oba sprowadzone do osi wału silnika.

Przykład: S5 25%      $J_M = 0.15 \text{ kg} \times \text{m}^2$       $J_{ext} = 0.15 \text{ kg} \times \text{m}^2$





Rysunek Z3-4. Praca okresowa przerywana z rozruchem – rodzaj pracy S4

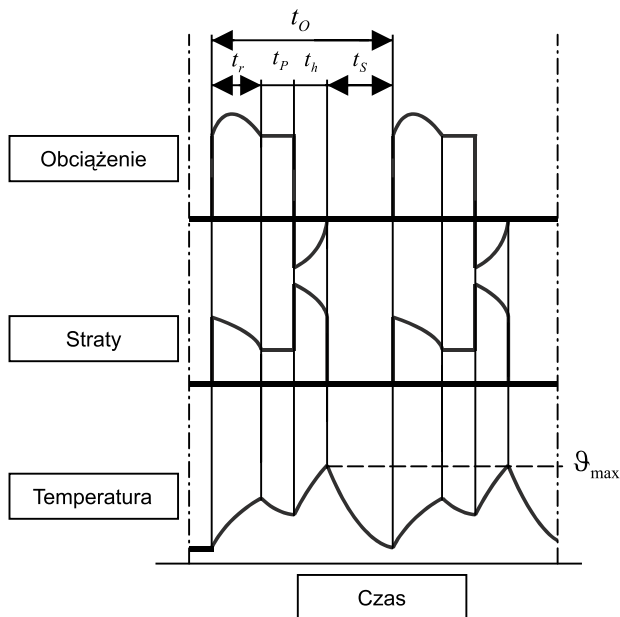
- $\vartheta_{\max}$  – najwyższa temperatura osiągnięta w okresie pracy,
- $t_o$  – czas trwania okresu,
- $t_r$  – czas rozruchu,
- $t_p$  – czas pracy przy obciążeniu stałym,
- $t_s$  – czas postoju.

$$\text{Względny czas obciążenia} = \frac{t_r + t_p}{t_r + t_p + t_s} \cdot 100 [\%]$$

6. **Praca okresowa długotrwała z przerwami jałowymi – rodzaj pracy S6** – szereg identycznych okresów pracy, z których każdy obejmuje czas pracy przy obciążeniu stałym i czas pracy przy biegu jałowym (bez obciążenia). W tym rodzaju pracy nie występuje czas postoju (rysunek Z3-6.).

Odpowiedni skrót: S6, po którym należy podać względny czas obciążenia.

Przykład: S6 40%



Rysunek Z3-5. Praca okresowa przerywana z hamowaniem elektrycznym – rodzaj pracy S5

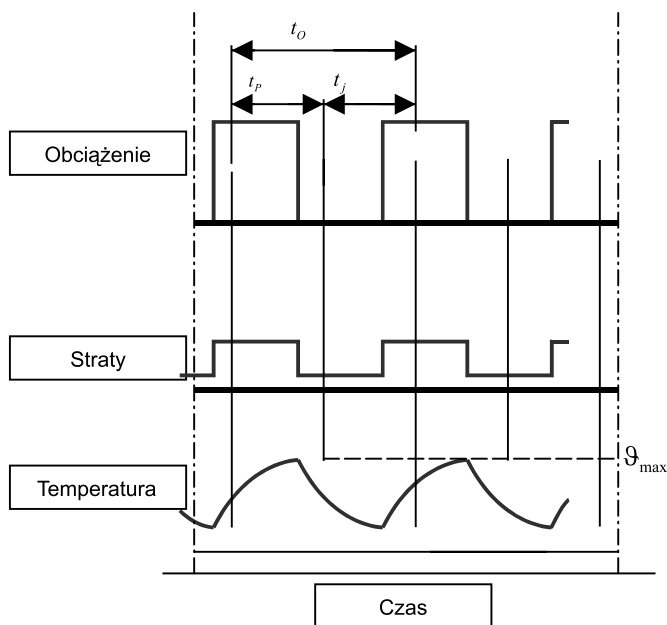
- $\vartheta_{\max}$  – najwyższa temperatura osiągnięta w okresie pracy,
- $t_o$  – czas trwania okresu,
- $t_r$  – czas rozruchu,
- $t_p$  – czas pracy przy obciążeniu stałym,
- $t_h$  – czas hamowania,
- $t_s$  – czas postoju.

$$\text{Względny czas obciążenia} = \frac{t_r + t_p + t_h}{t_r + t_p + t_h + t_s} \cdot 100 [\%]$$

- 7. Praca okresowa długotrwała z hamowaniem elektrycznym – rodzaj pracy S7**  
 – szereg identycznych okresów pracy, z których każdy obejmuje czas rozruchu, czas pracy przy obciążeniu stałym oraz czas hamowania elektrycznego. W tym rodzaju pracy nie występuje czas postoju (rysunek Z3-7.).

Odpowiedni skrót: S7, po którym należy podać moment bezwładności silnika ( $J_M$ ), i moment bezwładności obciążenia ( $J_{ext}$ ), oba sprowadzone do osi wału silnika.

Przykład: S7       $J_M = 0.15 \text{ kg} \times \text{m}^2$        $J_{ext} = 0.15 \text{ kg} \times \text{m}^2$



Rysunek Z3-6. Praca okresowa długotrwała z przerwami jałowymi – rodzaj pracy S6

- $\vartheta_{\max}$  – najwyższa temperatura osiągnięta w okresie pracy,  
 $t_o$  – czas trwania okresu,  
 $t_p$  – czas pracy przy obciążeniu stałym,  
 $t_j$  – czas pracy przy biegu jałowym.

$$\text{Względny czas obciążenia} = \frac{t_p}{t_p + t_j} \cdot 100 [\%]$$

8. **Praca okresowa długotrwała z równoczesnymi zmianami obciążenia i prędkości obrotowej – rodzaj pracy S8** – szereg identycznych okresów pracy, z których każdy obejmuje czas pracy przy obciążeniu stałym odpowiadającym określonej uprzednio prędkości obrotowej i z jednego lub kilku czasów pracy przy innych obciążeniach, odpowiadających innym prędkościom obrotowym (osiąganych np. przez zmianę liczby biegunów w przypadku silników indukcyjnych). W tym rodzaju pracy nie występuje czas postoju (rysunek Z3-8.).

Odpowiedni skrót: S8, po którym należy podać moment bezwładności silnika ( $J_M$ ), i moment bezwładności obciążenia ( $J_{ext}$ ), oba sprowadzone do osi wału silnika, wraz z wartościami obciążenia, prędkości obrotowej i względnego czasu obciążenia, dla wszystkich prędkości obrotowych.

Przykład: S8

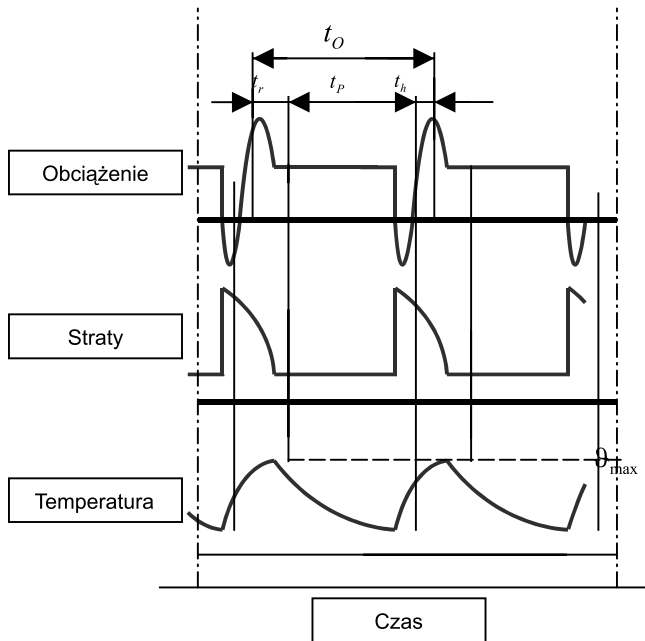
$$J_M = 0.15 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$J_{ext} = 0.15 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$16 \text{ kW } 740 \text{ min}^{-1} \text{ } 30\%$$

$$40 \text{ kW } 1460 \text{ min}^{-1} \text{ } 30\%$$

$$25 \text{ kW } 980 \text{ min}^{-1} \text{ } 40\%$$



Rysunek Z3-7. Praca okresowa długotrwała z hamowaniem elektrycznym – rodzaj pracy S7

$\vartheta_{\max}$  – najwyższa temperatura osiągnięta w okresie pracy,

$t_o$  – czas trwania okresu,

$t_r$  – czas rozruchu,

$t_p$  – czas pracy przy obciążeniu stałym,

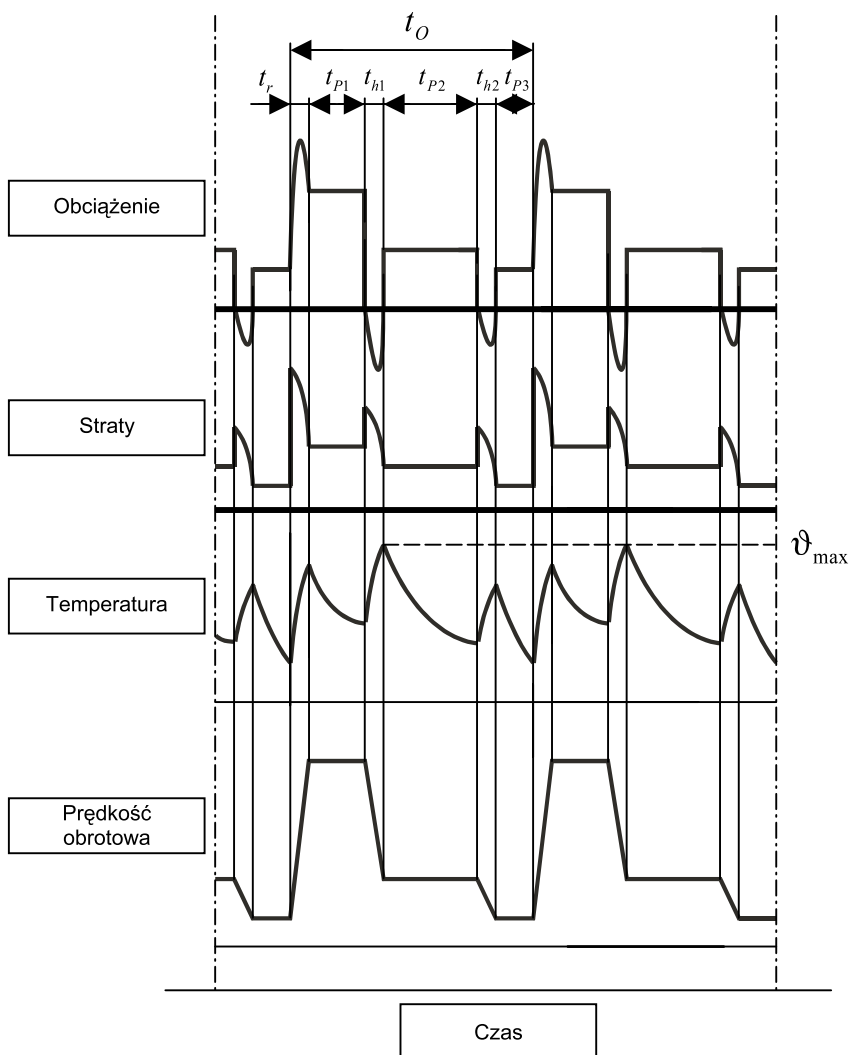
$t_h$  – czas hamowania.

Względny czas obciążenia = 1.

9. **Praca z nieokresowymi zmianami obciążenia i prędkości obrotowej (praca nieokresowa) – rodzaj pracy S9** – praca, przy której na ogół obciążenie i prędkość obrotowa zmieniają się nieokresowo w dopuszczalnym zakresie. Praca ta obejmuje często przeciążenia, które mogą przekraczać znacznie pełne obciążenie (rysunek Z3-9.).

UWA GA. Dla tego rodzaju pracy jako podstawę do ustalenia przeciążenia przyjmuje się odpowiednie wartości pełnego obciążenia.

Odpowiedni skrót: S9.



Rysunek Z3-8. Praca okresowa długotrwała ze zmianami prędkości obrotowej – rodzaj pracy S8

- $\vartheta_{max}$  – najwyższa temperatura osiągnięta w okresie pracy,
- $t_o$  – czas trwania okresu,
- $t_r$  – czas rozruchu,
- $t_{p1}, t_{p2}, t_{p3}$  – czasy pracy przy obciążeniu odpowiadającym różnym stałym prędkościom obrotowym,
- $t_{h1}, t_{h2}$  – czasy hamowania.

Względne czasy obciążenia:

$$\frac{t_r + t_{P1}}{t_r + t_{P1} + t_{h1} + t_{P2} + t_{h2} + t_{P3}} \cdot 100 [\%]$$

$$\frac{t_{h1} + t_{P2}}{t_r + t_{P1} + t_{h1} + t_{P2} + t_{h2} + t_{P3}} \cdot 100 [\%]$$

$$\frac{t_{h2} + t_{P3}}{t_r + t_{P1} + t_{h1} + t_{P2} + t_{h2} + t_{P3}} \cdot 100 [\%]$$

10. **Praca z określonymi obciążeniami stałymi – rodzaj pracy S10** – przebieg pracy obejmujący nie więcej niż cztery określone wartości obciążenia (lub obciążenia równoważnego), z których przy każdej wartości obciążenia, trwającego dostatecznie długo, maszyna może osiągnąć równowagę cieplną. Minimalne obciążenie w pewnym okresie pracy może mieć wartość równą zeru (bieg jałowy lub postój) – (rysunek Z3-10.).

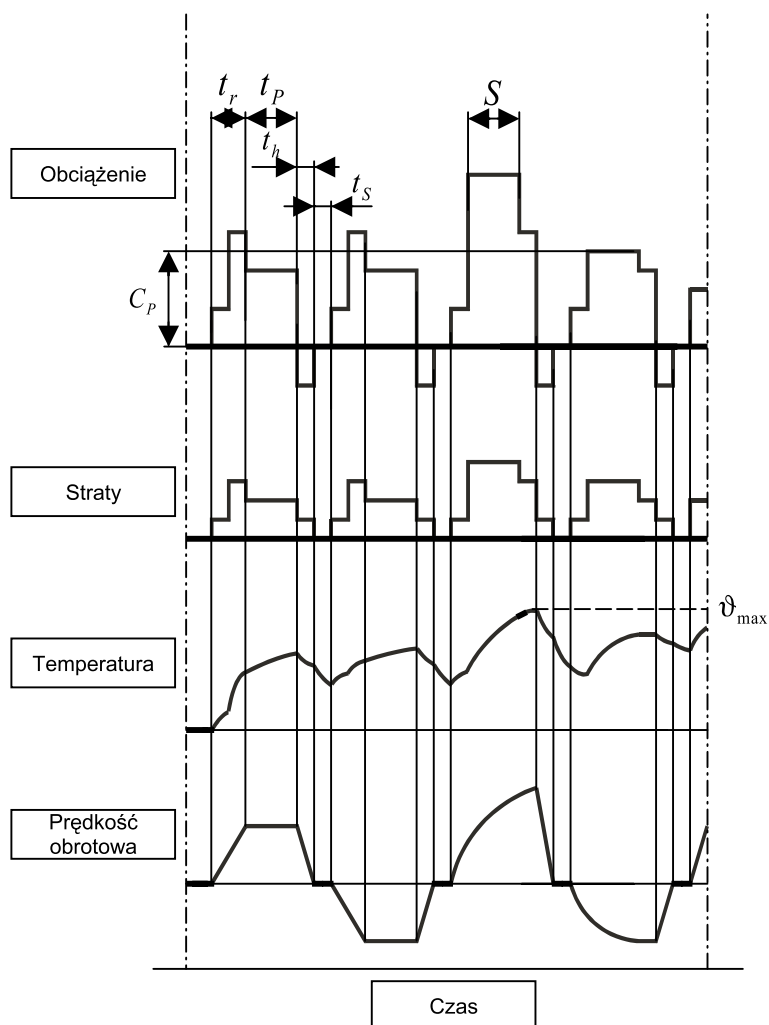
Odpowiedni skrót: S10, po którym należy podać wartości względne  $p/\Delta t$  dla poszczególnych obciążeń i czas trwania oraz wartość względną TL przewidywanej trwałości cieplnej układu izolacyjnego. Wartością odniesienia przewidywanej trwałości cieplnej jest przewidywana trwałość cieplna, przy danych znamionowych dla pracy ciągłej i przy granicznych przyrostach temperatury, odnoszących się do pracy S1. W przypadku postoju zamiast wartości obciążenia należy podać literę r.

Przykład: S10  $p/\Delta t = 1.1/0.4; 1.0/0.3; 0.9/0.2; r/0.1$  TL=0.6

Wartość TL należy zaokrąglić do najbliższej wielokrotności 0.05 (załącznik 4).

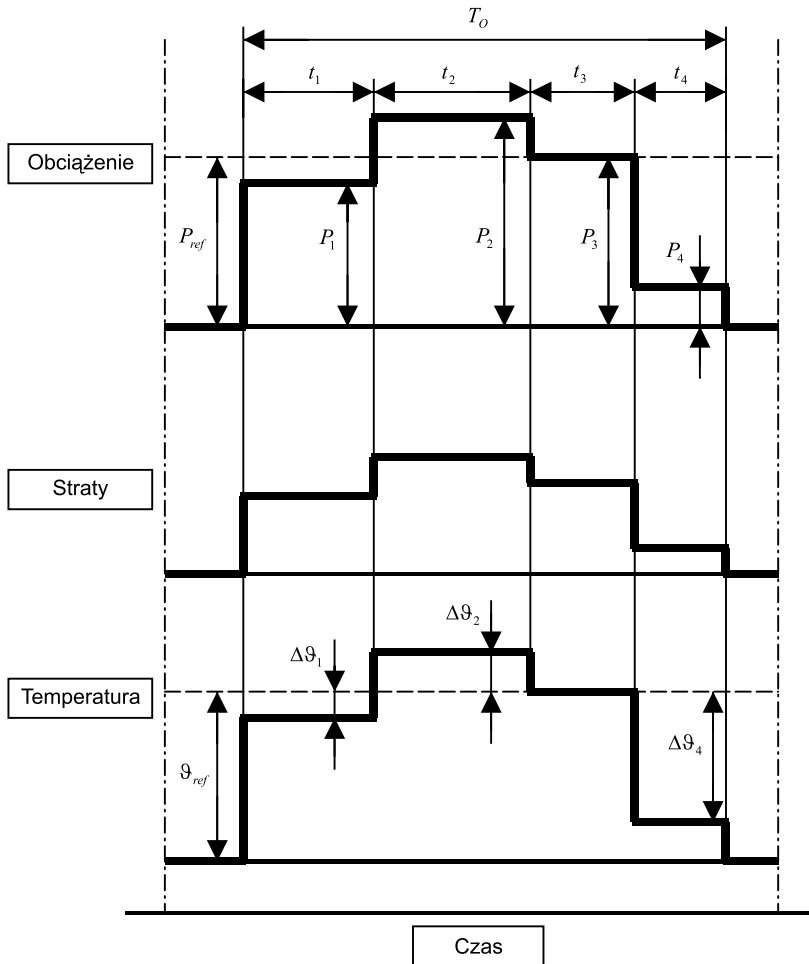
Dla pracy S10, wartością odniesienia  $P_{ref}$  do określonych obciążeń stałych jest odpowiednio dobrana wartość obciążenia stałego dla rodzaju pracy S1.

**UWAGA.** Jako określone wartości obciążeń stałych, podaje się zwykle wartości obciążeń równoważnych, obliczonych na podstawie ich całkowania w funkcji czasu. Nie jest konieczne, aby każdy cykl obciążenia był dokładnie taki sam, ale taki, aby przy każdym określonym obciążeniu, trwającym dostatecznie długo, osiągnięta była równowaga cieplna, i aby każdy cykl obciążenia, po scałkowaniu, dał tę samą wartość względną przewidywanej trwałości cieplnej.



Rysunek Z3-9. Praca z nieokresowymi zmianami obciążenia i prędkości obrotowej (praca nieokresowa) – rodzaj pracy S9

- $\vartheta_{max}$  – najwyższa osiągnięta temperatura,
- $t_r$  – czas rozruchu,
- $t_p$  – czas pracy przy zmiennym obciążeniu,
- $t_s$  – czas postoju,
- $S$  – praca przy przeciążeniu,
- $C_p$  – pełne obciążenie.



Rysunek Z3-10. Praca z określonymi obciążeniami stałymi – rodzaj pracy S10

- $T_o$  – czas trwania jednego cyklu pracy,  
 $t_1, t_2, t_3, t_4$  – czasy trwania poszczególnych cykli,  
 $P_{ref}$  – obciążenie odniesienia określone przy rodzaju pracy S1,  
 $P_1, P_2, P_3, P_4$  – kolejne obciążenia w poszczególnych cyklach pracy,  
 $\vartheta_{ref}$  – temperatura przy obciążeniu odniesienia, określonym przy rodzaju pracy S1,  
 $\Delta\vartheta_1 - \Delta\vartheta_2$  – różnica między przyrostem temperatury uzwojenia, dla poszczególnych cykli pracy, obciążeniu a przyrostem temperatury przy obciążeniu odniesienia i rodzaju pracy S1.



## Dane znamionowe

1. *Moc znamionowa silnika* – mocą znamionową silnika, jest to moc mechaniczna wydawana na wale. Powinna ona być wyrażona w watach ( $W$ ).
2. *Napięcie znamionowe* – to napięcie międzyfazowe na zaciskach maszyny, przy mocy znamionowej.

## Warunki w miejscu pracy

1. *Wysokość nad poziomem morza* – nie powinna przekraczać 1000 m.
2. *Największa temperatura powietrza otaczającego* – nie powinna przekraczać  $40^{\circ}\text{C}$ .
3. *Najmniejsza temperatura powietrza otaczającego* – nie powinna być niższa niż  $-15^{\circ}\text{C}$  dla wszystkich maszyn.

W przypadku maszyn:

- których iloraz mocy znamionowej, wyrażonej w kW (lub kVA) przez prędkość obrotową w  $\text{min}^{-1}$  jest większa niż 3.3,
  - o mocy znamionowej  $< 600\text{ W}$  (lub VA),
  - z komutatorem,
  - z łożyskiem ślizgowym,
  - dla których pierwotnym lub wtórnym czynnikiem chłodzącym jest woda, temperatura powietrza otaczającego nie powinna być niższa niż  $0^{\circ}\text{C}$ .
4. *Temperatura wody chłodzącej* – na wlocie do maszyny lub wymiennika ciepła nie powinna być wyższa niż  $+25^{\circ}\text{C}$  i nie niższa niż  $+5^{\circ}\text{C}$ ;

## Zasilanie elektryczne silników prądu przemiennego

1. **Silniki prądu przemiennego**, których dane znamionowe określono dla warunków zasilania ze źródła o stałej częstotliwości, powinny przy zasilaniu z prądnic prądu przemiennego (lokalnie lub przez sieć) być zdolne do pracy przy współczynniku zawartości harmonicznych (HVF) napięcia zasilającego nie przekraczającym:
  - 0.02 dla silników jednofazowych i trójfazowych, w tym silników synchronicznych, lecz z wyjątkiem silników w wykonaniu N (patrz IEC 60034-12), jeżeli wytwórca nie zadeklarował innej wartości;
  - 0.03 dla silników w wykonaniu N.

Współczynnik HVF należy obliczać według wzoru:

$$HVF = \sqrt{\sum \frac{u_n^2}{n}}$$

w którym:

$u_n$  – jest względną wartością harmonicznego napięcia (odniesioną do napięcia znamionowego  $U_N$ ),

$n$  – jest rzędem harmonicznej (niepodzielnym przez trzy w przypadku trójfazowych silników prądu przemiennego).

Zazwyczaj wystarczy uwzględnić harmoniczne rzędu  $n \leq 13$ .

Trójfazowe silniki prądu przemiennego, powinny być zdolne do pracy przy zasilaniu napięciem z sieci trójfazowej, o składowej symetrycznej przeciwnej nie większej niż 1% składowej symetrycznej zgodnej, w długim okresie, lub 1.5% w krótkim okresie, nie przekraczającym kilku minut, i o składowej symetrycznej zerowej nie większej niż 1% składowej symetrycznej zgodnej.

UWAGA. Zaleca się, aby silniki były zdolne do pracy przy zasilaniu napięciem o składowej symetrycznej przeciwnej, wynoszącej 2%, ale może to pociągnąć za sobą bardzo poważne pogorszenie warunków pracy, które mogłyby wpłynąć na trwałość silników.

Jeżeli wartości graniczne współczynnika HVF oraz składowych symetrycznej przeciwnej i zerowej, występują jednocześnie przy obciążeniu znamionowym, to nie powinno to prowadzić do powstania temperatury szkodliwej dla silnika i zaleca się, aby powstała nadwyżka przyrostu temperatury lub temperatury w stosunku do wartości granicznych, nie była większa niż około  $10^{\circ}\text{K}$ .

UWAGA. W pobliżu dużych obciążeń jednofazowych (np. piece indukcyjne) lub w okręgach rolniczych, szczególnie w przypadkach wspólnych sieci dla przemysłu i potrzeb komunalnych, mogą wystąpić deformacje zasilania większe niż ustalone wyżej. W takim przypadku konieczne jest podjęcie innych odpowiednich środków.

2. **Silniki prądu przemiennego** zasilane z przekształtników powinny być odporne na wyższe harmoniczne zawarte w napięciu zasilającym (patrz IEC 60034-17), w przypadku silników klatkowych (patrz IEC 60034-12).

UWAGA. Gdy napięcie znacznie odbiega od sinusoidy, np. przy zasilaniu z przekształtników, wartość skuteczna całkowitej fali i fali podstawowej są istotne przy ustalaniu parametrów maszyny prądu przemiennego.

### **Silniki prądu stałego zasilane z przekształtników**

W przypadku silnika prądu stałego, zasilanego z przekształtnika, tętnienie napięcia i prądu wpływa na charakterystyki pracy maszyny. Straty i przyrost temperatury rosną, a komutacja jest gorsza niż w silniku zasilanym ze źródła prądu stałego (bez tętnień).

W przypadku silników o mocy znamionowej większej niż 5 kW, przeznaczonych do zasilania z przekształtników, należy je zaprojektować odpowiednio do zasilania z określonego źródła i jeżeli wytwórca uzna to za konieczne, zastosować indukcyjność zewnętrzną, w celu zmniejszenia tętnienia.

Rodzaj zasilania z przekształtnika powinien być określony za pomocą kodu identyfikacyjnego, w następujący sposób:

$$[CCC - U_{aN} - f - L]$$

przy czym:

- $CCC$  – jest kodem identyfikacyjnym układu połączeń przekształtnika zgodnie z normą IEC 60971,
- $U_{aN}$  – składa się z trzech lub czterech cyfr, określających znamionowe napięcie przemiennie na zaciskach wejściowych przekształtnika, wyrażone w V,
- $f$  – składa się z dwóch cyfr wskazujących znamionową częstotliwość wejściową, wyrażone w Hz,
- $L$  – składa się z jednej, dwóch lub trzech cyfr, określających indukcyjność szeregową, wyrażoną w mH, przeznaczoną do włączania zewnętrznie do obwodu twornika silnika. Jeżeli ta wartość jest równa zero, należy ją pominąć.

Silniki o mocy znamionowej nieprzekraczającej 5 kW, zamiast dopasowania do określonego rodzaju przekształtnika, mogą być zaprojektowane do stosowania z dowolnym przekształtnikiem z indukcyjnością zewnętrzną lub bez, z zastrzeżeniem, że znamionowy współczynnik kształtu, na jaki silnik został zaprojektowany, nie będzie przekroczony i że poziom izolacji obwodu twornika silnika, odpowiada znamionowemu napięciu przemiennemu na zaciskach wejściowych przekształtnika.

We wszystkich przypadkach przyjmuje się, że tętnienie prądu na wyjściu przekształtnika jest tak małe, iż wynikający z niego współczynnik tętnienia prądu, nie jest większy niż 0.1 w znamionowych warunkach pracy.

### **Graniczne wartości przyrostów temperatury**

Przyrosty temperatury w warunkach odniesienia nie powinny przekraczać wartości granicznych podanych w tablicy Z3-1.

Tabela Z3-1. Graniczne wartości przyrostów temperatury uzwojeń chłodzonych pośrednio powietrzem

Lp.	Klasa izolacji	A			E			B			F			H			
		Th K	R K	ETD K	Th K	R K	ETD K	Th K	R K	ETD K	Th K	R K	ETD K	Th K	R K	ETD K	
	Części maszyny																
1a)	Uzwojenia prądu przemiennego maszyn o mocy znamionowej 5000 kW (lub kVA) lub większej	-	60	65	-	-	-	-	80	85	-	100	105	-	125	130	-
1b)	Uzwojenia prądu przemiennego maszyn o mocy znamionowej większej niż 200 kW (lub kVA) lecz mniejszej niż 5000 kW (lub kVA)	-	60	65	-	-	75	-	80	90	-	105	110	-	125	130	-
1c)	Uzwojenia prądu przemiennego maszyn o mocy znamionowej równej lub mniejszej niż 200 kW (lub kVA)	-	60	-	-	-	75	-	80	-	-	105	-	-	125	-	-
1d)	Uzwojenia prądu przemiennego maszyn o mocy znamionowej mniejszej niż 600 W (lub VA)	-	65	-	-	-	75	-	85	-	-	110	-	-	130	-	-
1e)	Uzwojenia prądu przemiennego z chłodzeniem własnym bez przewietrzania (IC40) i/lub z uzwojeniami hermetyzowanymi	-	65	-	-	-	75	-	85	-	-	110	-	-	130	-	-
2	Uzwojenia tworników wyposażonych w komutatory	50	60	-	65	75	-	70	80	-	85	105	-	105	125	-	-
3	Uzwojenia wzbudzające główne maszyn prądu przemiennego i stałego zasilane prądem stałym inne niż podano w pkt. 4	50	60	-	65	75	-	70	80	-	85	105	-	105	125	-	-
4a)	Uzwojenia wzbudzające maszyn synchronicznych z wirnikiem cylindrycznym zasilanym prądem stałym, umieszczone w złołkach, z wyjątkiem silników indukcyjnych synchronizowanych	-	-	-	-	-	-	-	90	-	-	110	-	-	135	-	-
4b)	Izolowane nieruchome uzwojenia wzbudzające maszyn prądu stałego, mające więcej niż jedną warstwę	50	60	-	65	75	-	70	80	90	85	105	110	105	125	135	-
4c)	Uzwojenia wzbudzające maszyn prądu przemiennego i stałego o małej rezystancji, mające więcej niż jedną warstwę i uzwojenia kompensacyjne maszyn prądu stałego	60	60	-	75	75	-	80	80	-	100	100	-	125	125	-	-
4d)	Jednowarstwowe uzwojenia maszyn prądu przemiennego i stałego z odsłoniętymi gołymi lub lakierowanymi powierzchniami metalowymi	65	65	-	80	80	-	90	90	-	110	110	-	135	135	-	-

## Inne charakterystyki i badania

1. *Krótkotrwałe przeciążenie prądem – postanowienia ogólne.* Przeciążalność prądem maszyn wirujących podaje się w celu dostosowania tych maszyn do urządzeń sterujących i zabezpieczających. Nagrzewanie się uzwojeń maszyn zmienia się w przybliżeniu proporcjonalnie do iloczynu czasu i kwadratu prądu. Prąd większy niż prąd znamionowy powoduje wzrost temperatury. Jeżeli wytwórca i zamawiający nie uzgodnili inaczej, można przyjąć, że maszyna będzie pracowała przy podanych przeciążeniach tylko przez kilka krótkich okresów w czasie eksploatacji. Jeżeli maszyna prądu przemiennego ma pracować zarówno jako prądnica, jak i silnik, to jej przeciążalność prądem powinna być przedmiotem uzgodnienia.
2. *Krótkotrwałe przeciążenie prądem – silniki prądu przemiennego (z wyjątkiem silników komutatorowych).* Silniki trójfazowe prądu przemiennego o mocy znamionowej nie większej niż 315 kW i o napięciu znamionowym nie większym niż 1 kV, powinny wytrzymać przeciążenie prądem, równym 1.5 wartości prądu znamionowego przez co najmniej 2 minuty.

U W A G A . Nie określa się krótkotrwałego przeciążenia prądem silników trójfazowych o mocy znamionowej większej niż 315 kW i wszystkich silników jednofazowych.

3. *Krótkotrwałe przeciążenie prądem – maszyny komutatorowe.* Maszyna komutatorowa powinna wytrzymać w ciągu 60 s przeciążenie prądem, równym 1.5 krotnej wartości prądu znamionowego w niżej określonych warunkach:
  - a. prędkość obrotowa:
    - silnik prądu stałego – największa prędkość obrotowa, odpowiadająca pełnemu wzbudzeniu;
    - prądnica prądu stałego – znamionowa prędkość obrotowa;
    - silnik komutatorowy prądu przemiennego – największa prędkość obrotowa, odpowiadająca pełnemu wzbudzeniu;
  - b. napięcie twornika – odpowiadające określonej prędkości obrotowej.
4. *Chwilowe przeciążenie momentem obrotowym – silniki indukcyjne wielofazowe oraz silniki prądu stałego.* Silniki niezależnie od rodzaju pracy i budowy, powinny wytrzymać przez 15 s bez utknięcia i nagłej zmiany (przy stopniowym wzroście momentu obrotowego) przeciążenie momentem obrotowym o 60% większym, niż znamionowy moment obrotowy, przy znamionowym napięciu i znamionowej częstotliwości (silniki indukcyjne). W przypadku silników prądu stałego, moment powinien być wyrażony poprzez przeciążenie prądem.

Silniki dla rodzaju pracy S9, powinny wytrzymać chwilowe przeciążenia momentem obrotowym określone dla tego rodzaju pracy.

5. *Chwilowe przeciążenie momentem obrotowym – silniki indukcyjne o specjalnym przeznaczeniu.* W silnikach o specjalnym przeznaczeniu, wymagających dużego momentu obrotowego (np. do urządzeń dźwigowych), przeciążenie momentem powinno być przedmiotem uzgodnienia.

W przypadku silników indukcyjnych klatkowych, zaprojektowanych specjalnie pod kątem zapewnienia prądu rozruchowego mniejszego niż 4.5 krotna wartość prądu znamionowego, przeciążenie momentem obrotowym może być mniejsze niż 60% znamionowego momentu obrotowego, lecz nie mniejsze niż 50%.

W przypadku silników indukcyjnych szczególnego rodzaju o specjalnych właściwościach rozruchowych, np. silników przeznaczonych do pracy przy zmiennej częstotliwości lub silników indukcyjnych zasilanych z przekształtników, przeciążenie momentem obrotowym powinno być przedmiotem uzgodnienia.

6. *Chwilowe przeciążenie momentem obrotowym – silniki synchroniczne wielofazowe.* Jeżeli nie uzgodniono inaczej, silnik synchroniczny wielofazowy, niezależnie od rodzaju pracy, powinien przy wzbudzeniu odpowiadającym obciążeniu znamionowemu, wytrzymać przez 15 s bez wypadnięcia z synchronizmu, przeciążenie momentem obrotowym podane niżej. W przypadku wzbudzenia regulowanego automatycznie, graniczne wartości momentu obrotowego powinny być takie same, jak przy układzie wzbudzenia, pracującym w warunkach normalnych:

- silniki indukcyjne synchronizowane (o wirniku uzwojonym): 35% przeciążenia momentem obrotowym;
- silniki synchroniczne (o wirniku cylindrycznym): 35% przeciążenia momentem obrotowym;
- silniki synchroniczne (o biegunach wydatnych): 50% przeciążenia momentem obrotowym.

7. *Chwilowe przeciążenie momentem obrotowym – inne silniki.* Chwilowe przeciążenie momentem obrotowym silników jednofazowych, komutatorowych i pozostałych powinno być przedmiotem uzgodnienia.

8. *Minimalny moment rozruchowy.* Jeżeli nie uzgodniono inaczej, minimalny moment rozruchowy silników klatkowych przy pełnym napięciu, nie powinien być mniejszy od podanych niżej wartości:

- silniki trójfazowe jednobiegowe:
  - o mocy mniejszej niż 100 kW: 0.5 wartości znamionowego momentu obrotowego i 0.5 momentu obrotowego przy zahamowanym wirniku;
  - o mocy równej lub większej 100 kW: 0.3 wartości znamionowego momentu obrotowego i 0.5 momentu obrotowego przy zahamowanym wirniku;
  - dla silników indukcyjnych klatkowych o napięciu mniejszym lub równym 690V – zgodnie z normami IEC 60034-12.
  - silniki jednofazowe i silniki trójfazowe wielobiegowe: 0.3 wartości znamionowego momentu obrotowego.

9. *Zwiększona prędkość obrotowa.* Maszyny elektryczne powinny być tak zaprojektowane, aby mogły wytrzymać zwiększoną prędkość obrotową podaną w tablicy Z3-2.

Tabela Z3-2. Zwiększone prędkości obrotowe

Lp.	Rodzaj maszyny	Zwiększona prędkość obrotowa
1	Maszyny prądu przemiennego Wszystkie maszyny oprócz wymienionych niżej:	1.2 największej znamionowej prędkości obrotowej
1a)	Prądnice napędzane turbinami wodnymi i wszystkie maszyny pomocnicze, połączone bezpośrednio (elektrycznie lub mechanicznie) z maszyną główną	Jeżeli nie uzgodniono inaczej prędkość obrotowa rozbiegania się zespołu, lecz nie mniej niż 1.2 największej znamionowej prędkości obrotowej
1b)	Maszyny, które w pewnych okolicznościach mogą być napędzane przez urządzenie obciążające	Ustalona prędkość obrotowa rozbiegania się zespołu, lecz nie mniej niż 1.2 największej znamionowej prędkości obrotowej
1c)	Silniki szeregowe i uniwersalne	1.1 prędkości obrotowej biegu jałowego, przy napięciu znamionowym. Dla silników połączonych z urządzeniami obciążającymi w taki sposób, że nie mogą się one rozłączyć przypadkowo, wyrażenie „prędkość obrotowa biegu jałowego” należy rozumieć jako prędkość obrotową, przy najmniejszym możliwym obciążeniu
1d)	Trójfazowe jednobiegowe silniki indukcyjne klatkowe	1.2 największej bezpiecznej prędkości obrotowej
2	Maszyny prądu stałego	
2a)	Silniki ze wzbudzeniem bocznikowym lub obcowzbudne	1.2 największej znamionowej prędkości obrotowej lub 1.15 prędkości obrotowej, odpowiadającej prędkości obrotowej biegu jałowego, zależnie od tego, która z nich jest większa
2b)	Silniki z dowzbudzeniem szeregowym o zakresie nastawienia prędkości obrotowej, nie większej niż 35%	1.2 największej znamionowej prędkości obrotowej lub 1.15 prędkości obrotowej, odpowiadającej prędkości obrotowej biegu jałowego, zależnie od tego, która z nich jest większa, lecz nieprzekraczająca 1.5 największej znamionowej prędkości obrotowej

Lp.	Rodzaj maszyny	Zwiększona prędkość obrotowa
2c)	Silniki z dowzbudzeniem szeregowym i zakresie regulacji prędkości obrotowej, większym niż 35% oraz silniki o wzbudzeniu szeregowym	Wytwórca powinien ustalić największą bezpieczną prędkość obrotową pracy, którą należy podać na tabliczce znamionowej. Zwiększona prędkość obrotowa tych silników powinna wynosić 1.1 największej bezpiecznej prędkości obrotowej. Podanie tej prędkości obrotowej nie jest wymagane dla silników, które są w stanie wytrzymać zwiększoną prędkość obrotową, wynoszącą 1.1 prędkości obrotowej biegu jałowego, przy napięciu znamionowym
2d)	Silniki wzbudzone magnesami trwałymi	Zwiększona prędkość obrotowa jak w pkt. 2a), z wyjątkiem przypadku, gdy silnik ma również uzwojenie szeregowo i powinien wytrzymać zwiększone prędkości obrotowe podane w pkt. 2b) lub 2c), zależnie od przypadku
2e)	Prądnice	1.2 znamionowej prędkości obrotowej



## ZAŁĄCZNIK 4

### Wskazówki dotyczące stosowania rodzaju pracy S10 oraz ustalenia wartości względnej przewidywanej trwałości cieplnej TL

1. Obciążenie maszyny w każdej chwili jest równoważne obciążeniu przy pracy S1 zgodnie z załącznikiem Z3. Niemniej cykl obciążenia może obejmować obciążenia inne niż obciążenie odniesienia, równe wyznaczonemu dla rodzaju pracy S1. Jeden cykl obciążenia może obejmować nie więcej niż 4 określone obciążenia stałe, zgodnie z rysunkiem Z3-10.
2. Zależnie od wartości i czasu trwania poszczególnych obciążeń w jednym cyklu, względna przewidywana trwałość maszyny oparta na cieplnym starzeniu się układu izolacyjnego, może być obliczona z następującego równania:

$$\frac{1}{TL} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \times 2^{\frac{\Delta \vartheta_i}{k}}$$

w którym:

- $TL$  – jest względną oczekiwaną trwałością cieplną, odniesioną do przewidywanej trwałości cieplnej, w przypadku rodzaju pracy S1 przy mocy odniesienia;
  - $\Delta \vartheta_i$  – jest różnicą między przyrostem temperatury uzwojenia, przy każdym ze zmieniających się obciążeń w jednym cyklu i przyrostem temperatury, dla rodzaju pracy S1 przy mocy odniesienia;
  - $\Delta t_i$  – jest to czas w wartościach względnych, jednego stałego obciążenia w cyklu obciążenia;
  - $k$  – jest to wzrost przyrostu temperatury w °K, który prowadzi do skrócenia przewidywanej trwałości cieplnej układu izolacyjnego o 50%;
  - $n$  – jest to liczba nieokreślonych wartości obciążenia ( $n \leq 4$ ).
3. Wielkość TL jest integralną częścią jednoznacznej identyfikacji klasy danych znamionowych.
  4. Wartość wielkości TL może być tylko wtedy określona, kiedy w uzupełnieniu do informacji dotyczącej cyklu obciążenia, zgodnie z rysunkiem Z3-10, znana jest wartość  $k$  dla układu izolacyjnego. Tę wartość  $k$  wyznacza się eksperymentalnie zgodnie z normą IEC 60034-18, dla całego zakresu temperatury, a występujące w cyklu obciążenia, zgodnie z rysunkiem Z3-10.

5. TL może być ustalana tylko jako wartość względna. Wartość ta może być stosowana do przybliżonego oszacowania rzeczywistej zmiany, przewidywanej trwałości cieplnej maszyny, w porównaniu do rodzaju pracy S1 przy mocy odniesienia, ponieważ można przyjąć, że z uwagi na istniejące różne obciążenia w cyklu, pozostałe wpływy na trwałość maszyny (np. naprężenia dielektryczne, wpływy środowiskowe), są w przybliżeniu takie same, jak w przypadku rodzaju pracy S1 przy mocy odniesienia.
6. Wytwórca maszyny jest odpowiedzialny za prawidłowe zestawienie poszczególnych parametrów do określania wartości TL.

## Literatura

1. Gogolewski Z., Kuczewski Z.: *Napęd elektryczny*. WNT, Warszawa, 1971;
2. Praca zbiorowa pod redakcją Grunwalda Z.: *Napęd elektryczny*. WNT, Warszawa, 1987;
3. Polska Norma PN-EN 60034-1: *Maszyny elektryczne wirujące, Dane znamionowe i parametry*;
4. Polska Norma PN-89 E-05012: *Urządzenia elektroenergetyczne, Dobór silników elektrycznych i ich instalowanie. Ogólne wymagania i odbiór techniczny*;
5. Polska Norma PN-EN 61800-2: *Elektryczne układy napędowe mocy o regulowanej prędkości*;
6. Polska Norma PN-E-06717: *Maszyny elektryczne wirujące, Wytyczne stosowania silników klatkowych zasilanych z przetworników*.