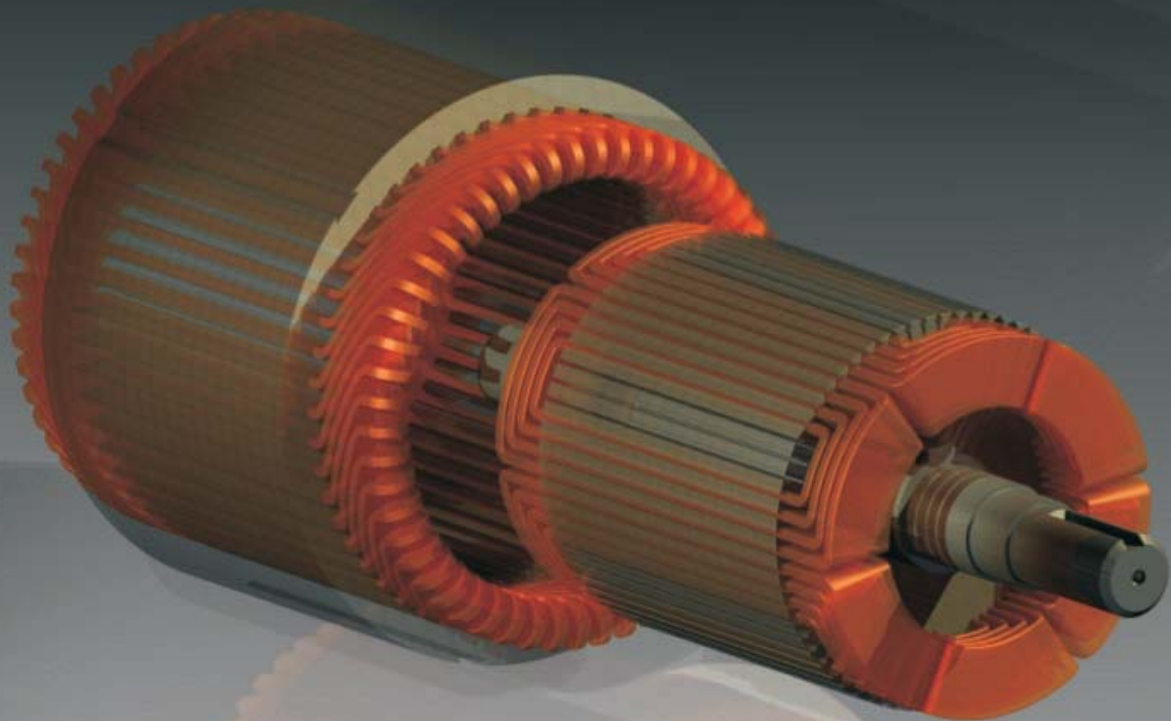


MASZYNY ELEKTRYCZNE WOKÓŁ NAS

Zastosowanie, budowa, modelowanie, charakterystyki, projektowanie



Mieczysław Ronkowski
Michał Michna
Grzegorz Kostro
Filip Kutt

redakcja Mieczysław Ronkowski

Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Materiały zostały przygotowane w związku z realizacją projektu
pt. „Zamawianie kształcenia na kierunkach
technicznych, matematycznych i przyrodniczych – pilotaż”
współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego nr umowy: 46/DSW/4.1.2/2008
zadanie 018240 w okresie od 21.08.2008-15.03.2012

MASZYNY ELEKTRYCZNE WOKÓŁ NAS

Zastosowanie, budowa, modelowanie, charakterystyki, projektowanie

Mieczysław Ronkowski
Michał Michna
Grzegorz Kostro
Filip Kutt

redakcja Mieczysław Ronkowski

Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ
Romuald Szymkiewicz

RECENZENT
Paweł Staszewski

PROJEKT OKŁADKI
Filip Kutt

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<http://www.pg.gda.pl/WydawnictwoPG>

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
Gdańsk 2011

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

ISBN 978–83–7348–401–6

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 15,5, ark. druku 15,0, 982/659

Pamięci: Profesora Stanisława Kaniewskiego
Profesora Stefana Roszczyka
Profesora Zbigniewa Muszalskiego
Docenta Zdzisława Manitiusa
Doktora Stanisława Lebiody

Spis treści

Od Autorów	11
1. Wprowadzenie	15
1.1. Uwagi wstępne	15
1.2. U źródeł maszyn elektrycznych	15
1.3. Dziś i jutro maszyn elektrycznych	17
1.4. Nauczanie maszyn elektrycznych	18
1.5. Podsumowanie	22
1.6. Literatura	22
2. Podstawy fizyczne budowy i działania maszyn elektrycznych	23
2.1. Uwagi wstępne	23
2.2. Definicja maszyny elektrycznej	23
2.3. Ogólna struktura maszyn elektrycznych	25
2.3.1. Struktura mechaniczna	25
2.3.2. Struktura elektromagnetyczna	27
2.4. Maszyna elektryczna a system przetwarzania energii	28
2.5. Zjawiska fizyczne wykorzystane do budowy maszyn elektrycznych	30
2.5.1. Podstawy działania	30
2.5.2. Pole elektromagnetyczne i jego wielkości charakterystyczne	30
2.5.3. Prymitywna maszyna elektryczna a maszyny współczesne	31
2.6. Podsumowanie	38
2.7. Literatura	39
3. Przykładowe zastosowania maszyn elektrycznych we współczesnych systemach elektromechanicznych	42
3.1. Uwagi wstępne	42
3.2. Wprowadzenie	42
3.3. System elektroenergetyczny na pokładzie współczesnego samolotu	43
3.3.1. Koncepcja systemu	43
3.3.2. Budowa trójstopniowego generatora synchronicznego	47
3.3.3. Literatura	50
3.4. System kogeneracji energii elektrycznej i ciepłej	51
3.4.1. Koncepcja systemu	51
3.4.2. Generatory elektryczne stosowane w systemach micro-CHP	51
3.4.3. Literatura	54
3.5. Współczesne systemy trakcyjne transportu kolejowego	55
3.5.1. System trakcyjny klasyczny – szynowy	55
3.5.2. System trakcyjny niekonwencjonalny – liniowy	62
3.5.3. Literatura	63
3.6. Systemy trakcyjne rowerów	63
3.6.1. Rower elektryczny	63
3.6.2. Literatura	67

3.7. Podsumowanie	68
4. Transformatory	69
4.1. Uwagi wstępne	69
4.2. Formy budowy	69
4.3. Modele fizyczne i obwodowe	72
4.4. Stan jałowy transformatora	75
4.5. Stan obciążenia	78
4.6. Stan zwarcia transformatora	80
4.7. Charakterystyki ruchowe	82
4.7.1. Zmienność napięcia	82
4.7.2. Sprawność	83
4.8. Układy połączeń i przekładania transformatorów trójfazowych	85
4.9. Praca równoległa	87
4.10. Transformatory specjalne	88
4.11. Podsumowanie	88
4.12. Pytania	89
4.13. Zagadnienia obliczeniowe i pomiarowe (laboratoryjne)	89
4.14. Literatura	89
5 Maszyny prądu stałego	91
5.1. Uwagi wstępne	91
5.2. Formy budowy	92
5.3. Model fizyczny i obwodowy	96
5.4. Charakterystyka elektromechaniczna i mechaniczna	102
5.5. Sterowanie prędkością kątową/obrotową	104
5.6. Maszyny specjalne	105
5.7. Podsumowanie	108
5.8. Pytania	108
5.9. Zagadnienia obliczeniowe i pomiarowe (laboratoryjne)	109
5.10. Literatura	109
6. Maszyny synchroniczne	112
6.1. Uwagi wstępne	112
6.2. Formy budowa	112
6.3. Modele fizyczne i obwodowe	119
6.3.1. Założenia modelu	119
6.3.2. Stan jałowy i obciążenia	122
6.3.3. Stan zwarcia	124
6.4. Praca generatorowa w systemie autonomicznym/w sieci elastycznej	127
6.5. Praca generatorowa w systemie energetycznym/w sieci sztywnej	130
6.5.1. Synchronizacja z siecią systemu	130
6.5.2. Stan obciążenia – charakterystyki ruchowe (regulacja mocy czynnej i biernej)	132
6.6. Praca silnikowa maszyny synchronicznej – silnik synchroniczny	136
6.7. Podsumowanie	140
6.8. Pytania	140
6.9. Zagadnienia obliczeniowe i pomiarowe (laboratoryjne)	141
6.10. Literatura	141

7	Maszyny indukcyjne/asynchroniczne	144
7.1.	Uwagi wstępne	144
7.2.	Formy budowy	145
7.3.	Modele fizyczne i obwodowe	147
7.3.1.	Stan jałowy	155
7.3.2.	Stan rozruchowy/zwarcia	156
7.3.3.	Stan obciążenia – charakterystyka mechaniczna (naturalna)	157
7.4.	Sterowanie prędkością kątową/obrotową	159
7.5.	Silniki indukcyjne specjalne	163
7.6.	Podsumowanie	163
7.7.	Pytania	163
7.8.	Zagadnienia obliczeniowe i pomiarowe (laboratoryjne)	164
7.9.	Literatura	164
8.	Maszyny elektryczne specjalne	167
8.1.	Uwagi wstępne	167
8.2.	Silniki bezszczotkowe z magnesami trwałymi	168
8.2.1.	Formy budowy	169
8.2.2.	Rozkład pola magnetycznego	171
8.2.3.	Analiza rozkładu pola	173
8.2.4.	Modele fizyczne i obwodowe	178
8.2.5.	Charakterystyki ruchowe i sterowanie prędkością obrotową	187
8.2.6.	Literatura	194
8.3.	Silniki indukcyjne wielofazowe	196
8.3.1.	Formy budowy	196
8.3.2.	Układy zasilania i zasada sterowania	197
8.3.3.	Charakterystyki ruchowe i sterowanie prędkością obrotową	198
8.3.4.	Podsumowanie	200
8.3.5.	Literatura	200
8.4.	Silniki reluktancyjne przełączalne	200
8.4.1.	Formy budowy	201
8.4.2.	Układy zasilania i zasada sterowania	202
8.4.3.	Modele fizyczne i obwodowe	203
8.4.4.	Literatura	205
8.5.	Silniki o ruchu złożonym	206
8.5.1.	Uwagi ogólne	206
8.5.2.	Formy budowy	207
8.5.3.	Podsumowanie	208
8.5.4.	Literatura	208
9.	Elementy projektowania maszyn elektrycznych. Przykłady obliczeń	209
9.1.	Uwagi wstępne	209
9.2.	Projekt silnika indukcyjnego klatkowego	210
9.2.1.	Dobór wymiarów głównych i szczegółowych silnika	211
9.2.2.	Wizualizacja wyników obliczeń silnika	217
9.2.3.	Wymiary żłobków stojana i wirnika	217
9.2.4.	Wymiary główne maszyny	218
9.2.5.	Uzwojenie stojana silnika	220
9.2.6.	Podsumowanie wyników obliczeń silnika	221
9.2.7.	Literatura	221
9.3.	Projekt silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi	221

9.3.1. Dane wejściowe do obliczeń silnika	221
9.3.2. Materiały magnetyczne trwałe	223
9.3.3. Szczelina powietrzna/robocza silnika	224
9.3.4. Punkt pracy magnesów trwałych silnika	225
9.3.5. Dobór wysokości magnesów trwałych silnika	227
9.3.6. Wysokość jarzma wirnika	228
9.3.7. Sprawdzenie wymiarów wirnika	228
9.3.8. Podsumowanie wyników obliczeń silnika	229
9.3.9. Literatura	229
9.4. Podsumowanie	229
Literatura	230
Książki/podręczniki	230
Skrypty	232
Artykuły/referaty	232
Ważniejsze normy	234
Adresy internetowe	234
Załączniki	236
Wykaz ważniejszych oznaczeń	237

OD AUTORÓW

Maszyny elektryczne – to klasyczny dział elektrotechniki¹⁾. Mimo długiej historii są w stałym intensywnym rozwoju, dzięki nowym, wręcz rewolucyjnym odkryciom w zakresie materiałów, metod modelowania, obliczeń i projektowania, nowych układów zasilania i sterowania, miniaturyzacji itp. Szczególna atrakcyjność maszyn elektrycznych polega na kompleksowym kojarzeniu w jeden spójny system różnych działów elektrotechniki, matematyki, fizyki, chemii, mechaniki, technologii i informatyki.

Maszyny elektryczne były powszechnie stosowane już na początku rozwoju elektrotechniki – współcześnie napotkać można je praktycznie wszędzie. Obrazowo można by powiedzieć: „maszyny elektryczne to bijące serce elektrotechniki”.

Współcześnie buduje się maszyny elektryczne o mocach obejmujących zakres od miliwatów (mikrosilniki napędzające urządzenia bioinżynieryjne) do około 2 tysięcy megawatów (generatory synchroniczne w elektrowniach). Część maszyn, napędzająca proste urządzenia technologiczne, wiruje ze stałą prędkością obrotową. Są też maszyny pracujące ze zmienną prędkością, które realizują bardzo skomplikowane, trójwymiarowe trajektorie (napędy robotów), łącząc ruch obrotowy, liniowy i drgający.

Podstawą działania maszyn elektrycznych są dwa odkrycia: **efektu magnetycznego prądu** przez **Hansa Oersteda** (21 kwietnia 1820 r.) i **zjawiska indukcji elektromagnetycznej** przez **Michała Faradaya** (29 sierpnia 1831 r.).

Wspominamy tutaj celowo odkrycia H. Oersteda i M. Faradaya, gdyż ich doświadczenia są dzisiaj stosowane (permanently powtarzane) w większości urządzeń elektromagnetycznych (elektromechanicznych), użytkowanych na całym globie i nikt, na ogół, się nad tym nie zastanawia. Doświadczenia te muszą jednak być ciągle przypomniane, gdyż ich znaczenie dydaktyczne jest fundamentalne.

Wśród historyków nauki powszechnie uważa się, że doświadczenia H. Oersteda należą do najbardziej pamiętnych eksperymentów w całej historii nauki, a prawo Faradaya jest kołem zamachowym gospodarki (ekonomii). Zatem, nie powinno być wątpliwości – bez maszyn elektrycznych tak szybki postęp cywilizacyjny byłby niemożliwy.

Niniejszy e-skrypt zawiera wykłady z przedmiotu **Maszyny elektryczne**, które wygłosiliśmy w roku akad. 2009/2010 dla studentów drugiego roku na kierunku **Elektrotechnika** – studia stacjonarne 1-szego stopnia (poziom inżynierski), Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Wykładowi maszyny elektryczne, realizowanemu na trzecim semestrze w wymiarze 30 godzin, towarzyszy laboratorium z maszyn elektrycznych w wymiarze 30 godzin.

W ramach kierunku Elektrotechnika realizowano projekt systemowy „**Zamawianie kształcenia na kierunkach technicznych, matematycznych i przyrodniczych-pilotaż**” – Priorytet IV PO KL „Szkolnictwo wyższe i nauka” – specjalność zamawiana: **Technologie Informatyczne w Elektrotechnice**. Oczywiście opracowany e-skrypt nie zawiera tekstu dosłownego wykładów, lecz już opracowany – czasem w większym, czasem w mniejszym stopniu. Wykłady te stanowią tylko część pełnego procesu dydaktycznego. Dla ich wysłuchania 190 osobowa grupa studentów, podzielona na dwie części (w tym 31 osobowa grupa studentów specjalności Technologie Informatyczne w Elektrotechnice),

¹⁾ Współcześnie, zamiast klasycznej nazwy „maszyny elektryczne”, często używa się nazwy fachowej „przetworniki elektromechaniczne”.

zbierała się raz w tygodniu w wielkiej sali wykładowej, po czym w mniejszych grupach (12 osobowych) odbywały się ćwiczenia laboratoryjne.

Podstawowym założeniem procesu dydaktycznego było zharmonizowanie wykładów i ćwiczeń laboratoryjnych. Tematyka wykładów i kolejność jej prezentacji zostały tak dobrane, aby zapewnić bezpośrednio po wykładzie przerabianie materiału wykładowego na ćwiczeniach laboratoryjnych w tym samym semestrze²⁾. Takie podejście do nauczania wymagało położenia większego nacisku na podstawowe zasady budowy, działania, modelowania i analizy stanów ustalonych pracy i oraz charakterystyk ruchowych maszyn elektrycznych, niż na aktualne zagadnienia techniczne maszyn.

Szczególnym celem, który wytyczyliśmy sobie, przygotowując wykłady, było podtrzymanie zainteresowania elektromagnetyzmem studentów (trafiających ze szkół średnich do naszej uczelni), na przykładzie jego zastosowania do budowy maszyn elektrycznych. Ponadto, na wskazanie znaczenia maszyn elektrycznych (elektromechanicznych przetworników energii) we wszystkich dziedzinach gospodarki. Zwrócenie uwagi na rozszerzanie zasad ich działania i powstawanie nowych rodzajów maszyn. Przedstawienie złożonych zespołów zjawisk zachodzących w elektromechanicznych przetwornikach energii, w nawiązaniu do aktualnie realizowanych kierunków badawczych w ramach programów finansowanych z funduszy Unii Europejskiej. Podkreślenie, że problematyka maszyn elektrycznych jest jednym z podstawowych elementów wykształcenia inżyniera elektryka oraz jest rozszerzeniem elektrotechniki teoretycznej na systemy zawierające przetworniki energii.

Za tytuł e-skryptu przyjęliśmy „**Maszyny elektryczne wokół nas**”. Intencją użycia słów „wokół nas” w tytule było zwrócenie uwagi, że z maszynami elektrycznymi spotykamy się na co dzień: w domu, w czasie podróży, w pracy i w czasie odpoczynku – często nie zdając sobie z tego sprawy.

Człowiek jest przede wszystkim istotą mechaniczną, która żyje w środowisku mechanicznym. Codzienne zwyczaje człowieka są głównie podyktowane przez zastanawianie się: jak szybko może się przemieszczać i zaspokoić głód. Co więcej, jego standard życia jest w zaczym stopniu funkcją jego możliwości powiększania siły swoich mięśni (muskulów), zarówno dla lepszego (sprawniejszego) transportu (komunikacji), jaki i do realizacji procesów przemysłowych i szeroko pojętych usług, niezbędnych w rozwiniętym społeczeństwie.

Należy zauważyć, że energię (moc) napędową w transporcie i w procesach przemysłowych uzyskuje się głównie poprzez konwersję/przetworzenie energii elektrycznej na mechaniczną – rolę tę spełniają silniki elektryczne.

Dlatego w e-skrypcie zastosowania maszyn elektrycznych omówiliśmy na przykładzie ich aplikacji we współczesnych systemach transportowych (bardziej elektrycznego samolotu „more electrical aircraft”, pociągu elektrycznego i roweru elektrycznego) oraz w systemach skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej w gospodarstwach domowych.

Należy podkreślić, że energia w postaci tylko elektrycznej jest faktycznie bezużyteczna. Ponadto, największym i najszybciej rozwijającym się segmentem naszej gospodarki jest przemysł produkujący urządzenia użytkujące energię elektryczną, której źródłem dochodu jest sprzedaż energii elektrycznej. Jest to wymownym świadectwem, że energia elektryczna może być łatwo przetwarzana w różne formy, aby służyć pomocą człowiekowi w jego środowisku mechanicznym.

Zaczynając wykłady, założyliśmy, że studenci wynieśli jakieś wiadomości ze szkoły średniej (znają podstawowe zjawiska/prawa elektromagnetyzmu) oraz znają podstawy teorii obwodów elektrycznych (wykłady na pierwszym roku studiów – kontynuacja na sem. 3). Pewną niedogodnością były odbywające się równolegle wykłady z elektrodynamiki – brak pełnego „oswojenia” się z pojęciami teorii pola elektromagnetycznego na poziomie uniwersyteckim. Z drugiej strony, studenci w ramach

²⁾ W programie studiów nie przewidziano ćwiczeń audytoryjnych – stanowiło to także znaczne utrudnienie dla studentów w opracowaniu sprawozdań z ćwiczeń laboratoryjnych. Przerobienie kompletu zadań, które naświetlałyby niektóre zagadnienia z wykładów, jest jednym ze sposobów dopomożenia studentom. Zadania stwarzają dobrą okazję do uzupełnienia materiału wykładowego oraz sprawiają, że wyłożone zagadnienia stają się bardziej realne, pełniejsze i lepiej ugruntowane w umysłach.

tych wykładów na bieżąco poznawali prawa/zjawiska elektromagnetyzmu wykorzystane do budowy maszyn elektrycznych.

Nie widzieliśmy też powodu, by w wykładach trzymać się określonego porządku w tym sensie, że nie mielibyśmy prawa wspomnieć o czymś przed omówieniem tego szczegółowo. Bardzo często wspominaliśmy bez szczegółowego omówienia o problemach, które miały się dopiero pojawić. Omówienia bardziej szczegółowe następowały później, gdy słuchacze byli już lepiej przygotowani. Przykładem może być potraktowanie zagadnienia elektromagnetycznego³⁾ wzbudzenia pola o wirującym/wędrującym strumieniu magnetycznym, które to pojęcie wprowadzono najpierw w sposób bardzo jakościowy, a pełniej rozwinięto dopiero potem – omawiając maszyny indukcyjne (asynchroniczne).

Zakres materiału e-skryptu odpowiada w zasadzie programowi wykładów Maszyn elektrycznych obowiązującemu na kierunku Elektrotechnika – studia stacjonarne 1. stopnia (poziom inżynierski), Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Materiał obejmuje podstawy budowy, działania, modelowania i podstawowe charakterystyki ruchowe współcześnie produkowanych i powszechnie stosowanych maszyn elektrycznych. Dodano materiał obejmujący elementy projektowania maszyn elektrycznych, mając na uwadze, że jedną z podstawowych umiejętności inżyniera elektryka powinno być projektowanie urządzeń elektrycznych, w szczególności maszyn elektrycznych.

W pewnym sensie e-skrypt ma charakter przewodnika. Nie omówiono części szczegółów z zakresu budowy maszyn elektrycznych (np. uzwojeń, których zrozumienie większości studentów sprawia znaczne trudności). Podano odsyłacze do literatury przedmiotu, której obszerny wykaz załączono na końcu każdego rozdziału.

Zagadnienia obejmujące materiał ćwiczeń laboratoryjnych zawiera zestaw instrukcji dostępnych na stronie internetowej Katedry Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych.

Zamierzone efekty kształcenia:

- Kompetencje w dziedzinie elektrotechniki:
znajomość budowy, działania, charakterystyk, rozpoznawania oraz rozwiązywania podstawowych problemów technicznych (inżynierskich) z zakresu urządzeń (maszyn) do elektromechanicznego przetwarzania energii.
- Kompetencje ogólne:
umiejętność wyrażania koncepcji i argumentacji słownej w sytuacjach formalnych i nieformalnych oraz umiejętność pracy w zespole.

E-skrypt jest pracą zbiorową pod redakcją Mieczysława Ronkowskiego.

Rozdziały opracowane przez poszczególnych autorów:

- Rozdział 1, 2, 4, 5, 6, 7 – Mieczysław Ronkowski;
- Rozdział 3 – Grzegorz Kostro, Michał Michna i Filip Kutt;
- Rozdział 8 – Grzegorz Kostro, Michał Michna i Mieczysław Ronkowski;
- Rozdział 9 – Grzegorz Kostro i Michał Michna.

Szczególne podziękowania pragniemy wyrazić prof. Jackowi Gierasowi (Hamilton Sundstrand, HS Fellow, Applied Research Electrical Engineering, Rockford, IL, USA, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy) za podarowanie nam swojej książki „**Advancements in Electric Machines**” oraz udostępnienie materiałów. Książka była dla nas inspiracją do opracowania e-skryptu i zachętą do wsparcia Jego działań na rzecz promocji maszyn elektrycznych.

Jesteśmy wdzięczni prof. Bernard Nogarède, prof. Jean François Rochoun i inż. Dominique Harribey z INPT-ENSEEIH (Tuluza, Francja) za udostępnienie materiałów do e-skryptu oraz prowadzenia wykładów. Szczególnie dziękujemy prof. Bernard Nogarède za podarowanie nam swojej książki „**Électrodynamique appliquée. Bases et principes physiques de l'électrotechnique**” Książka była dla

³⁾ W przeciwieństwie do metody elektromechanicznego wzbudzania pola o wirującym/wędrującym strumieniu magnetycznym.

nas inspiracją do opracowania e-skryptu i zachętą do wsparcia Jego działań na rzecz promocji maszyn elektrycznych.

Pragniemy wyrazić podziękowania prof. Grzegorzowi Kamińskiemu z Politechniki Warszawskiej za udostępnienie materiałów oraz podarowanie nam swoich książek: „Silniki elektryczne o ruchu złożonym” i „Silniki elektryczne z toczącymi się wirnikami” oraz udostępnienie materiałów. Książki były dla nas inspiracją do opracowania e-skryptu i zachętą do wsparcia działań Profesora na rzecz promocji maszyn elektrycznych.

Jesteśmy wdzięczni prof. Marianowi Łukaszniszynowi z Politechniki Opolskiej za podarowanie nam książek: „Tarczowe silniki prądu stałego” oraz „Komputerowe modelowanie bezszczotkowych silników prądu stałego z magnesami trwałymi” oraz udostępnienie materiałów. Książki były dla nas inspiracją do opracowania e-skryptu i zachętą do wsparcia Jego działań na rzecz promocji maszyn elektrycznych.

Autorzy dziękują doktorantowi mgr. inż. Dominikowi Adamczykowi za wykorzystanie części materiału Jego pracy dyplomowej.

Dziękujemy producentom maszyn elektrycznych i transformatorów udostępnienie materiałów, które wzbogaciły merytoryczną zawartość e-skryptu.

Dziękujemy Kolegom z Katedry Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych PG za inspirację i cenne uwagi oraz udostępnienie materiałów. Szczególne podziękowania składamy panom Markowi Kamińskiemu i Romanowi Grotowi za pomoc przy budowie modeli dydaktycznych maszyn i wykonaniu pomiarów laboratoryjnych.

Szczególne dziękujemy naszym żonom za cierpliwość i wsparcie.

Dziękujemy prof. Piotrowi Chrzanowi za zachętę do opracowania e-skryptu i podtrzymywanie nas na duchu.

Autorzy e-skryptu pragną serdecznie podziękować Jego recenzentowi prof. Pawłowi Staszewskiemu – za szczególnie wnikliwą recenzję, pozwalającą uniknąć wielu usterek i nieścisłości.

Czytelników e-skryptu prosimy o przesyłanie wszelkich uwag na adres m.ronkowski@ely.pg.gda.pl.

Mieczysław Ronkowski

Michał Michna

Grzegorz Kostro

Filip Kutt

„Ostatnią rzeczą
którą się odkrywa pisząc książkę,
jest to, co należy pomieścić na początku.”

Blaise Pascal

1. Wprowadzenie

1.1. Uwagi wstępne

Mimo długiej historii **maszyny elektryczne** znajdują się w stałym intensywnym rozwoju, dzięki nowym, wręcz rewolucyjnym odkryciom w zakresie materiałów, metod obliczeń i projektowania, nowych układów sterowania, miniaturyzacji itp. Szczególna ich atrakcyjność polega na kompleksowym kojarzeniu w jeden spójny system różnych działów elektrotechniki, matematyki, fizyki, chemii, mechaniki i technologii.

Niniejszy rozdział jest próbą odpowiedzi na pytanie jaka jest ranga przedmiotu **Maszyny elektryczne** w procesie dydaktycznym, a także jakie umiejętności powinien wynieść z tego przedmiotu przyszły absolwent w ramach przygotowania do zawodu **inżyniera elektrotechnika**.

1.2. U źródeł maszyn elektrycznych

Odkrycia: **efektu magnetycznego prądu** w 1820 r. przez Hansa Oersteda i **zjawiska indukcji elektromagnetycznej** w 1831 r. przez Michała Faradaya, oraz sformułowanie opisujących je praw fizycznych stało się znaczącą przyczyną rewolucji w nauce i technice – przyspieszenia postępu cywilizacyjnego¹⁾. Odkryte zjawiska przyczyniły się zarówno do wynalezienia wielu rodzajów urządzeń i aparatów elektrycznych, w szczególności elektromechanicznych i elektromagnetycznych przetworników energii, jaki do powstania przemysłu elektrotechnicznego i elektroenergetyki. Efektem pracy kilkunastu pokoleń twórczych pracowników nauki i inżynierów jest obecna dojrzała postać ciągle intensywnie rozwijanej dziedziny elektromagnetycznych i elektromechanicznych przetworników energii – **transformatorów i maszyn elektrycznych** [93–96]²⁾.

Należy zauważyć, że u podstaw rozwoju maszyn elektrycznych i transformatorów leżała myśl naukowa, a nie rzemiosło, jak w przypadku wielu innych dziedzin techniki. Podstawy tej nowej dziedziny – maszyn elektrycznych i transformatorów, opracowali doskonali fizycy, którzy pierwsi opracowali i przedstawili propozycje struktur maszyn elektrycznych. Wśród nich należy wymienić m.in.: William Ritchi i Charles Wheatstone (Londyn), Florise Nollet (Bruksela), Antonio Pacinotti (Piza), Anyos Jedlik

¹⁾ W dniu 21 kwietnia, 1820 r., na wykładzie o obwodach elektrycznych duński naukowiec, Hans Oersted, koło igły kompasu umieścił drut, przez który płynął prąd, i ze zdumieniem zobaczył, że igła ta się obróciła.

G. Sarton (amerykański historyk nauki): „Doświadczenia, które rozpoczął H. Oersted w kwietniu 1820 roku należą do najbardziej pamiętnych eksperymentów w całej historii nauki” [E. M. Rogers: Fizyka dla dociekliwych, cz. 4, Elektryczność i magnetyzm, PWN Warszawa 1986, s. 213].

W. Lewin (profesor fizyki w MIT): “A crucial discover was made in eighteen twenty by the Danish physicist Oerstadt. And he discovered that a magnetic needle responds to a current in a wire. And this linked magnetism with electricity. And this is arguably, perhaps, the most important experiment ever done” (Lecture 11); „And this was a profound discovery (by Faraday) which changed our world and it contributed largely to the technological revolution of the late nineteenth and early twenty century” (Lecture 16); “And that (Faraday’s law) runs our economy” (Lecture 17) [8.02 *Electricity and Magnetism, Spring 2002*, (Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare). <http://ocw.mit.edu> (accessed 10.01, 2009). License: Creative Commons Attribution-Noncommercial-Share Alike].

²⁾ Wykaz literatury przedmiotu maszyny elektryczne znajdują się w rozdziale 10 „Literatura” – umieszczonym na końcu e-skryptu.

(Budapeszt), František Adam Petfina (Praga), P.O.C. Yorselman de Heer (Deventer, Holandia), Heinrich Gustav Magnus (Berlin), Moritz Herman Jacobi (Dorpat, później Petersburg), Galileo Ferraris (Turyn), Nicola Tesla (urodzony w Chorwacji, pracujący w USA), Charles Proteusz Steinmetz (urodzony w Wrocławiu, pracujący w USA) i William Thomson (lord Kelvin) (Glasgow) [37, 38, 56–58, 93, 100].

W drugiej połowie XIX w. twórczej działalności w dziedzinie maszyn elektrycznych podjęli się wybitni inżynierowie i technicy. Wśród nich byli, m.in., Zenobe Theophile Gramme, Ginsbert Kapp, Fridrich Hemer-Alteneck, Werner Siemens, Marcel Deprez, Soren Hjorth, Charles Grafton Page, Sebastian Ziani de Ferranti [93]. Należy zauważyć, że wśród nich byli także twórcy pochodzenia polskiego: Michał Dolivo-Dobrowolski [90, 98], Witold Kamil Rechniewski [50], Aleksander Rothert [51, 114].

Warto bardziej przybliżyć dwie sylwetki: Ch. P. Steinmetza i M. Dolivo-Dobrowolskiego.

Charles Proteus Steinmetz – wrocławian, Żyd, Niemiec, Amerykanin – urodził się 9 kwietnia 1865 r. Po ukończeniu studiów matematycznych na Uniwersytecie Wrocławskim, wyemigrował do Szwajcarii, aby studiować elektrotechnikę na politechnice w Zurychu. Nie zagrał tam jednak długo miejsca i przeniósł się – tym razem już na stałe – do Stanów Zjednoczonych. Znalazł pracę w koncernie General Electric, zostając w końcu dyrektorem do spraw badań i rozwoju. Koncern specjalnie dla niego wybudował laboratoria naukowe. Obwołany guru przemysłu elektrycznego, zażądał od firmy General Electric 10 tys. dolarów za jedną konsultację dotyczącą wadliwie pracującej maszyny elektrycznej. Na obudowie maszyny zaznaczył kredą, w którym miejscu należy zmienić uzwojenie. Wypisany przez niego rachunek opiewał: „10 dolarów – za postawienie X, 9990 dolarów – za wiedzę, gdzie należy go postawić”. John Dos Passos w książce „42. równoleżnik” napisał o uczonym, że „był najcenniejszym przyrządem w posiadaniu General Electric” [105, 120].

W amerykańskim czasopiśmie „Survey” z dnia 25 marca 1922 r., można było przeczytać: „Jest więc coś, co nazywamy energią, co pod postacią ruchu obraca koła maszyn, napędza pociągi, parowce, tramwaje i samoloty; jako światło zmienia noc w dzień, w postaci ciepła czyni domy mieszkalnymi zimą i zapewnia nam strawę, a w innej postaci przekształca rudę w stal i glinę w aluminium. Bez swobodnego dostępu do zasobów tej energii (elektrycznej) nasza cywilizacja szybko by zamarła”. Autorem tych słów był Ch. P. Steinmetz [120].

Ch. P. Steinmetz był jednym z geniuszy przełomu XIX i XX stulecia: genialnym matematykiem i wizjonerem, ekscentrycznym uczonym, któremu zawdzięczamy rozwój nauki o elektryczności i jej zastosowaniach w niewiele mniejszym stopniu niż sławnemu i wszystkim znanemu Tomaszowi Edisonowi [105, 120]³⁾. Jego szczególne osiągnięcia są na polu teorii i praktyki urządzeń elektrycznych (maszyn elektrycznych) prądu przemiennego (wprowadził liczby zespolone do analizy obwodów) [56, 57]. Należy podkreślić, że największe osiągnięcia zawdzięczał połączeniu wykształcenia matematycznego z inżynierską skłonnością do ułatwiania sobie życia.

Nie doceniono ukochanej koncepcji Steinmetza – samochodów elektrycznych. Od 1917 r. osobiście je projektował i usiłował sprzedawać – poszły jednak w zapomnienie. Po prawie stu latach, w obliczu kryzysu paliwowego, ta odrzucona technologia staje się poważną szansą.

Przypuszcza się, że to Steinmetz podsunął Leninowi, z którym korespondował, hasło: „Komunizm to władza sowiecka i elektryfikacja”.

Amerykanie do dziś pamiętają jego zasługi. Amerykańskie Towarzystwo Inżynierów Elektryków i Elektroników (IEEE) przyznaje co rok nagrodę naukową imienia Steinmetza.

Niestety, wielki wrocławianin nie jest dziś w ogóle znany mieszkańcom tego miasta. We Wrocławiu nie ma ulicy Steinmetza i nie ma też o nim żadnej wzmianki w „Mikrokosmosie” Normana Daviesa. Tak się bowiem składa, że „twarda” nauka traktowana jest przez specjalistów od historii w sposób wybiórczy. W popularnej (skróconej) wersji sławnego dzieła „A Study of History” Arnolda Toynbee

³⁾ Edison, choć zdolny wynalazca, nie był w pełni inżynierem - brakowało mu wiedzy matematycznej. Do konstruowania urządzeń prądu stałego można było się posługiwać metodą prób błędów – do budowy maszyn prądu przemiennego konieczna była solidna znajomość matematyki i fizyki.

nie ma nawet wzmianki o Koperniku, Galileuszu, Kartezjuszu i Newtonie! Nie ma się więc co oburzać, że o Steinmetzu we Wrocławiu niemal nikt nic nie wie [105, 120].

Michał Doliwo-Dobrowolski – pionier techniki prądu trójfazowego – urodził się 2 stycznia 1862 roku w Gątczynie pod Petersburgiem, pochodził z mazowieckiej rodziny szlacheckiej herbu Doliwa. Średnią szkołę realną ukończył w Odessie (1878), gdzie mieszkał z rodzicami od 1872 r. Od 1878 studiował na wydz. chemicznym politechniki w Rydze. W 19. roku życia został relegowany z uczelni bez prawa studiowania w Rosji. Wyjechał z rodzicami do Niemiec [90].

Studia kontynuował na politechnice w Darmstadt - najpierw na Wydz. Mechanicznym, a następnie na Wydz. Elektrycznym, który ukończył w 1884 r. Wydział Elektryczny, utworzony jako pierwszy w świecie, zorganizowany był przez słynnego profesora Erazmusa Kittlera. W 1887 rozpoczął pracę w Berlinie, w przedsiębiorstwie Deutsche Edison Gesellschaft, przekształconym wkrótce na AEG (Allgemeine Elekiricitats Gesellschaft). Od 1888, pracował nad zagadnieniami wirującego pola magnetycznego (maszyny elektryczne) i trójfazowego systemu elektroenergetycznego. Opatentował pierwszy elektryczny silnik trójfazowy (1889) zapewniając koncernowi AEG światowy prymat w tej dziedzinie [90, 98].

W ówczesnej prasie na określenie prądu trójfazowego używano zwrotów: „Drehstromsystems von Dobrowolski”, „Le systèm M. Dobrowolsky” lub „Kraft von Dolivos”. Jest on znany naszym sąsiadom z zachodu i ze wschodu, którzy wymieniają jego nazwisko przy okazji akcentowania znaczenia systemu prądu przemiennego trójfazowego, jednak w Polsce znany jest tylko wąskim grupom specjalistów [90].

Michał Doliwo-Dobrowolski – urodzony w Rosji w czasie rozbiorów, Polak z pochodzenia, obywatel rosyjski i szwajcarski działający w Niemczech – jak mało kto spełnia warunki, by stać się jednym z symboli zjednoczonej Europy. Z tych też względów wszelkie działania promujące tę postać w Polsce i za granicą wydają się celowe i zasadne [90].

Należy także przypomnieć, że w pierwszej w historii szkolnictwa wyższego katedrze elektrotechniki, powstałej w 1882 r. w Wyższej Szkole Technicznej w Darmstadtzie, kierowanej przez prof. Erazma Kittlera, rozpoczęły się wykłady z maszyn elektrycznych [93]. W latach 1886 i 1890 prof. Erazm Kittler opublikował dwutomową książkę zawierającą pierwszy obszerny wykład o maszynach elektrycznych [24].

1.3. Dziś i jutro maszyn elektrycznych

Maszyny elektryczne zajmują znaczącą pozycję we współczesnej cywilizacji. **Ich ciągły rozwój trwa od około 150 lat. W dającej się przewidzieć perspektywie czasowej maszyny elektryczne nie zostaną zastąpione innymi urządzeniami.** Pracując jako generatory (prądnice) wytwarzają niemal całą energię elektryczną (ponad 99%). Z kolei jako silniki stosowane są we wszystkich działach gospodarki – przetwarzają na energię mechaniczną około 60% energii elektrycznej. Są najliczniej i najszerzej występującymi maszynami, zwłaszcza w energetyce, przemyśle, rolnictwie, transporcie, gospodarce komunalnej, gospodarstwie domowym. Należy zauważyć, że w każdym samochodzie jest co najmniej 7 maszyn elektrycznych, w lokomotywie elektrycznej, oprócz czterech maszyn trakcyjnych, znajduje się około 40 innych maszyn elektrycznych. W statystycznym miejskim gospodarstwie domowym ich liczba przekroczyła już 50, a w gospodarstwie wiejskim aż 70 [93].

Funkcją maszyn elektrycznych (przetworników elektromechanicznych) jest nie tylko elektromechaniczne przetwarzanie energii, znajdują również szerokie zastosowanie jako:

- przetworniki sygnału (bardzo liczna i różnorodna grupa elektrycznych maszynowych elementów automatyki – np. selsyny, tachometry, wzmacniacze, itp.);
- urządzenia przetwarzania i transportu materii w procesach technologicznych (spawarki, przyspieszacz, pompy materiałów ciekłych lub sypkich przewodzących prąd elektryczny, drążarki, itp.).

Zakres parametrów znamionowych maszyn elektrycznych jest bardzo szeroki – nie spotykany w innych urządzeniach technicznych. **Ich moce znamionowe obejmują zakres od około 10^{-4} W (silniki**

w bioinżynierii) do około 1800 MW (generatory w elektrowniach). Także znaczny zakres obejmują znamionowe prędkości obrotowe – od ułamka obrotu na minutę do ponad 300 000 obr/min. Natomiast w przypadku maszyn o ruchu liniowym prędkości przesuwu części ruchomej są w przedziale od około 1 m/min do około 10^3 m/min [93]. Zakresy napięć znamionowych maszyn obejmują wartości od około 1 V do 110 kV. Co więcej, przewiduje się budowę generatorów o napięciu do 200 kV. Szeroki jest również zakres częstotliwości napięć i prądów znamionowych (50 Hz ÷ 200 kHz) [15, 93].

Transformatory energetyczne, o ponad stuletniej historii, są integralnym elementem systemu elektroenergetycznego: obniżają radykalnie straty transportu i rozdziалу energii elektrycznej, warunkując ekonomiczną pracę systemu elektroenergetycznego [93]. Moc znamionowa największych współczesnych transformatorów przekracza 1000 MVA, a najwyższe znamionowe napięcie osiągają 1000 kV. Warto zauważyć, że moc zainstalowanych transformatorów w systemie elektroenergetycznym w Polsce przekroczyła już 100 000 MVA – około trzykrotnie więcej niż suma mocy generatorów [93].

Najwcześniej wynaleziono maszyny elektrostatyczne oraz maszyny działające na zasadzie indukcji elektrycznej. Stosowane są one nadal w aparaturze fizycznej i zasilaczach wysokiego napięcia (np. radiostacji na statkach/okrętach). Później wynaleziono maszyny elektryczne działające na zasadzie zjawiska indukcji elektromagnetycznej – stanowią one przeważającą większość maszyn elektrycznych [93]⁴⁾. W ostatnich latach zbudowano maszyny piezoelektryczne – wykorzystujące zjawisko elektrostrykcji we wzbudnikach zbudowanych z materiałów piezoelektrycznych [15, 39, 93]. W maszynach piezoelektrycznych część ruchoma jest dociskana do części nieruchomej. Ze względu na wysoką częstotliwość napięcia zasilania (jednofazowe lub wielofazowe), nazywane są także maszynami ultrasonicznymi. Kolejną grupę stanowią różne odmiany maszyn pracujących na zasadzie zjawisk magnetostrykcyjnych. Z kolei w technice kosmicznej stosuje się silniki pracujące na zasadzie odrzutu jonowego przy wysokim napięciu. Charakteryzują się one precyzyjnym generowaniem siły lub momentu obrotowego o względnie małej wartości. Ten krótki przegląd maszyn elektrycznych nie jest pełny; można prognozować wynalezienie kolejnych maszyn działających na jeszcze innych zasadach, np. na podstawie zjawisk termoelektrycznych [93].

Kolejny etap zawansowanego rozwoju maszyn elektrycznych związany jest z **mechatroniką** – techniką synergicznego projektowania maszyn i procesów, zdolnych do inteligentnych zachowań [61]. Mechatronika wyłoniła się stosunkowo nagle z maszyn elektrycznych (elektromechaniki) w wyniku postępu technicznego w energoelektronice, mikroelektronice i technice komputerowej. Znamienne dla mechatroniki jest nierozłączne, powiązanie mechaniki, elektromechaniki, elektrodynamiki technicznej, elektroniki, informatyki, myślenia systemowego i ekonomii. W procesie realizacji systemów/urządzeń mechatroniki stosuje się metody inżynierii współbieżnej. Należy zauważyć, że przetwornik elektromechaniczny stanowi integralną część projektowanego systemu – projektowanie przetwornik zaczyna się od podstaw. Aby osiągnąć efekt synergii w projektowanym systemie, nie jest możliwe zastosowanie seryjnie produkowanych maszyn elektrycznych, tzw. „maszyn z półki producenta”. Stawia to nowe wyzwania przed konstruktorami maszyn elektrycznych.

1.4. Nauczanie maszyn elektrycznych

W publikacji [118] Prof. Janusza Turowskiego czytamy: *„Problem – doskonalenia treści i form kształcenia jest tak stary jak samo szkolnictwo i przypuszczalnie trudno byłoby znaleźć nauczyciela akademickiego, dla którego rzecz ta nie byłaby przedmiotem stałej troski i dążeń do ulepszeń. Gorzej jest z trafnym wyborem całościowej koncepcji kształcenia i nieustanne dyskusje potwierdzają tylko pogląd, że zadanie znalezienia idealnego modelu nauczania nie ma jednoznacznego i obiektywnego rozwiązania. Zbyt wiele występuje tu elementów subiektywnych i przypadkowych lub wręcz przeciw-*

⁴⁾ Maszyny elektryczne bazujące na energii pola elektrycznego są rzadko stosowane do elektromechanicznego przetwarzania energii. Jednym z powodów jest osiągalna współcześnie względnie niska gęstość energii pola elektrycznego – około 10 000 razy mniejsza niż w przypadku gęstości energii pola magnetycznego.

stawnych. Ostateczne decyzje zapadają zwykle na zasadzie mniej lub bardziej uzasadnionych kompromisów, w których nierzadko o przyznaniu przewagi tej czy innej zasadzie decyduje jakiś autorytet lub bardziej sugestywna argumentacja”.

Od kilkudziesięciu lat odbywają się międzynarodowe konferencje (ICEM) a w Polsce międzynarodowe sympozja maszyn elektrycznych (SME) (w roku 2009 odbyło się kolejne 45 sympozjum). Odbyły się także krajowe konferencje w zakresie nauczania maszyn elektrycznych organizowane przez ośrodki akademickie w Krakowie – Akademia Górniczo-Hutnicza [104] w Gdańsku – Politechnika Gdańska i w Łodzi – Politechnika Łódzka [102].

Współautorzy niniejszego e-skryptu brali aktywny udział w powyższych konferencjach i sympozjach, prezentując swoje referaty i biorąc udział w dyskusjach [107–111, 122].

Zasadnicze wnioski wynikające z referatów i dyskusji, prezentowanych na powyższych sympozjach i konferencjach, można sformułować następująco:

- maszyna elektryczna nie koncentruje już w sobie wszystkich zagadnień elektrotechniki, tak jak to było w pierwszym okresie jej rozwoju;
- mimo to maszyna elektryczna nadal pozostaje członem kluczowym w systemach przetwarzania energii na drodze elektromechanicznej – systemach elektroenergetycznych i systemach napędowych.

Wynika to zarówno ze spełnianej przez maszynę elektryczną roli – podstawowego członu przetwarzania energii mechanicznej na elektryczną lub odwrotnie, jak również ze względu na bogactwo zjawisk w niej zachodzących.

Wyraźne zmniejszenie udziału zagadnień maszynowych w całości problemów elektrotechniki wiąże się z powstaniem i dynamicznym rozwojem energoelektroniki. W systemach elektroenergetycznych i systemach napędowych energoelektronika przyjęła na siebie zarówno rolę medium sterującego jak i rolę czynnika przetwarzającego parametry energii elektrycznej generowanej przez maszynę elektryczną bądź też zasilającej maszynę elektryczną. W ostatnich latach ważną rolę w rozwoju układów sterowania maszyn elektrycznych zaczęła odgrywać także technika mikroprocesorowa.

Dalszym etapem rozwoju integracji układów energoelektronicznych, mikroprocesorowych i mechanicznych z maszynami elektrycznymi są systemy o cechach synergetycznych – systemy mechatroniki [61].

Rozwój energoelektroniki i techniki mikroprocesorowej umożliwił z jednej strony uproszczenie konstrukcji maszyny a z drugiej strony nastąpiło zintegrowanie układów energoelektronicznych z obwodami maszyny. Wraz z rozwojem energoelektroniki i jej zastosowaniem w budowie systemów elektroenergetycznych i napędowych pojawiły się problemy inne niż maszynowe, ale i zarazem większe bogactwo zjawisk zachodzących w maszynach elektrycznych. Z jednej strony ograniczało to udział problemów maszynowych, a z drugiej strony wymuszało pogłębione badania zjawisk zachodzących w maszynach elektrycznych.

Aby sformułować cele nauczania maszyn elektrycznych należy przede wszystkim podać odpowiedź na pytanie dotyczące roli poznania maszyn w całości wykształcenia ogólnotechnicznego inżyniera elektryka [102, 104, 118]. Ogólnie rzecz biorąc, rola ta powinna odpowiadać roli maszyn elektrycznych w całości problemów elektrotechniki. Określa to także rolę przedmiotu Maszyny elektryczne w całości procesu kształcenia przyszłego inżyniera elektryka – przedmiotu obowiązującego wszystkich studentów wydziałów elektrycznych politechnik na kierunku Elektrotechnika.

Z obecnych doświadczeń wynika, że na kierunku Elektrotechnika dominują specjalności „układowe”, a tylko kilkanaście procent studentów wybiera specjalności konstrukcyjne. Wychodząc z tej podstawy można przyjąć, że zakres przedmiotu Maszyny elektryczne, obowiązkowego dla wszystkich studentów, narzucony jest przez specjalności „układowe” – elektroenergetykę, energoelektronikę i napęd elektryczny.

W wyniku procesu „bolońskiego”⁵⁾ na studiów dziennych w politechnikach krajowych powszechne jest kształcenie na dwóch poziomach – inżynierskim i magisterskim. W pracy [88] podjęto próbę oceny szans, ryzyka i stanu bieżącego procesu „bolońskiego” w RFN. Ze względu na duże podobieństwo systemów kształcenia w RFN i Polsce, przedstawione w tej pracy wnioski mogą być wykorzystane przy wprowadzaniu zasad „bolońskich” w kraju.

Warto się także odnieść do reprezentatywnej uczelni zagranicznej – wybrano Massachusetts Institute of Technology (MIT) [143–145]. W uzasadnieniu można przyjąć, że MIT uchodzi za uczelnię pionierską w wprowadzaniu nowych programów nauczania i metod opisu (modelowania) systemów elektromechanicznego przetwarzania energii [14, 64, 65].

Powyższe rozważania i występujące tendencje w kształceniu na uczelniach technicznych posłużyły za wskazówki do opracowywania programu i metod nauczania problematyki maszyn elektrycznych – ogólnie elektromechanicznego przetwarzania energii – na kierunku Elektrotechnika w Politechnice Gdańskiej.

Uważamy, że program przedmiotu Maszyny elektryczne, obowiązkowego dla wszystkich studentów kierunku Elektrotechnika Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG, jest narzucony przez specjalności „układowe” (Elektroenergetykę oraz Elektronikę i Informatykę Przemysłową). Ponadto, wydaje się, że „na dziś” w wykładzie podstawowym przedmiotu Maszyny elektryczne nadal powinno być stosowane ujęcie obwodowe opisu (modelowania) maszyn elektrycznych. Natomiast modelowanie w ujęciu polowym i opartym na przemianach energii – zasadzie wariacyjnej Hamilton’a – powinno być stosowane dopiero na poziomie studiów drugiego stopnia (magisterskich).

Kolejna uwaga dotyczy posługiwania się w dydaktyce maszyn elektrycznych uogólnioną teorią obwodową maszyn, której istotnym elementem jest tzw. „maszyna uogólniona”. Praktyka dydaktyczna jednak wykazała, że uogólniona teoria maszyn elektrycznych nie została powszechnie zaakceptowana w dydaktyce na wydziałach elektrycznych politechnik [91].

W ramach wykładu położyliśmy szczególny nacisk na uproszczenie samej procedury formułowania modeli maszyn elektrycznych – dotyczy to w szczególności modelowania procesu przetwarzania energii w maszynie. Założono, że można tego dokonać w oparciu o koncepcję i modele dwóch sprzężeń podstawowych występujących w maszynach elektrycznych – tzw. **wzorcowego sprzężenia transformatorowego i wzorcowego sprzężenia elektromechanicznego** [108].

Wzięliśmy pod uwagę, że istotną rolę w procesie dydaktycznym – przekazu informacji na płaszczyźnie wykładowca-student – odgrywa wizualizacja przekazu [122]. Stąd założono, że ciąg logiczny budowa-działanie-model maszyny elektrycznej będzie miał przede wszystkim postać graficzną. Do jej opracowania wykorzystano pewne koncepcje zawarte w pracy Kron’a [28] – ograniczenie zapisu symbolicznego („równaniowego”) do niezbędnego minimum.

Istotą przyjętej koncepcji opisu/modelowania maszynach elektrycznych dla potrzeb dydaktyki jest bezpośrednie „tłumaczenie” struktury maszyny, zachodzących zjawisk fizycznych oraz mechanizmów działania maszyny na równoważny opis/model matematyczny o stałych skupionych – odwzorowany w formie obwodowego schematu zastępczego. Forma schematu jest tak dobrana, aby do symulacji stanów pracy maszyn elektrycznych można było zastosować program PSpice [86].

Jak wiadomo, wielkością kluczową w maszynie elektrycznej – występującego w niej sprzężenia elektromechanicznego – jest użyteczny moment obrotowy i warunki jego generacji. Najogólniej można przyjąć, że generacja momentu obrotowego jest efektem interakcji pól elektromagnetycznych stojana i wirnika. Fizyczną miarą efektu interakcji pól jest generowana siła Lorentz’a, która jest pomostem między układem elektromagnetycznym a układem mechanicznym maszyny. Innymi słowy jest tą wielkością, która sprzęga dwa układy o tak odmiennej naturze, jakimi są układ elektromagnetyczny i układ mechaniczny maszyny.

⁵⁾ W konsekwencji wejścia Polski do Unii Europejskiej kształcenie na dwóch poziomach (undergradu te/graduate degrees) stało się obligatoryjne, celem sprostania wyzwaniom globalizacji nauki, techniki i ekonomii w nowym tysiącleciu (Bologna declaration. <http://europa.eu.int/comm/education/socrates/erasmus/bologna.pdf>).

Na etapie omawiania warunków generacji momentu obrotowego przedstawia się elementarną maszynę prądu stałego z komutatorem mechanicznym, a następnie demonstruje się możliwości układu alternatywnego – zastosowania komutatora energoelektronicznego dla przypadku maszyny „odwróconej”, której twornik jest na stojanie a wzbudzenie na wirniku. Podkreśla się jednocześnie, że aby maszyna ta posiadała takie same właściwości ruchowe – jak maszyna komutatorowa – konieczne jest sterowanie pracą elementów energoelektronicznych za pomocą kąta położenia wirnika. Obie te maszyny są prostym przykładem zasady pracy maszyn, jako układów o cyklicznie przełączanych uzwojeniach – charakterystycznych dla współczesnych systemów elektromechanicznego przetwarzania energii.

Podstawowym założeniem nauczania jest zharmonizowanie wykładów i ćwiczeń laboratoryjnych. Tematyka wykładów i kolejność jej prezentacji zostały tak dobrane, aby zapewnić bezpośrednio po wykładzie przerabianie materiału wykładowego na ćwiczeniach laboratoryjnych w tym samym semestrze. Takie podejście do nauczania wymagało położenia większego nacisku na podstawowe zasady budowy, działania, metody modelowania i analizy stanów ustalonych oraz charakterystyk ruchowych maszyn, niż na aktualne zagadnienia techniczne maszyn.

Znaczne uszczuplenie liczby godzin wykładowych (30 godzin) spowodowało, że wiele zagadnień zostało wyłączonych z programu. Inne zagadnienia zostały skrócone do postaci encyklopedycznej (np. zagadnienia materiałowe, praca niesymetryczna transformatorów, autotransformator, uzwojenia maszyn prądu stałego i przemiennego).

Wykład z maszyn elektrycznych potraktowano także jako przygotowanie do przedmiotów o charakterze napędowym, ograniczając się zasadniczo do omawiania statycznych charakterystyk silników. Obecny wymiar godzin nie pozwala na rozwijanie teorii stanów nieustalonych tak istotnych w eksploatacji maszyn elektrycznych i transformatorów.

W ramach wykładu z teorii maszyn elektrycznych są omawiane następujące tematy:

- podstawy fizyczne działania maszyna elektrycznych,
- przykłady zastosowań maszyn elektrycznych,
- transformatory,
- maszyny prądu stałego,
- maszyny synchroniczne,
- maszyny indukcyjne,
- maszyny specjalne,
- elementy projektowania maszyn elektrycznych.

Przyjęty układ e-skryptu wynika z pragnienia wzbudzenia w studentach ciekawości do studiowania zaprezentowanego materiału. Po podstawowych informacjach, prezentujących podstawy fizyczne działania maszyn elektrycznych, następuje rozdział, w którym przedstawiamy zastosowanie maszyn elektrycznych we współczesnych układach transportowych oraz systemach skojarzonej produkcji energii elektrycznej i cieplnej. Prezentowane przykłady wynikają z realizowanych kierunków badawczych w Katedrze Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych PG w ramach programów finansowanych z funduszy Unii Europejskiej. Dalsza treść wykładu obejmuje podstawy budowy, działania, modelowania i podstawowe charakterystyki ruchowe współcześnie produkowanych i powszechnie stosowanych maszyn elektrycznych. Ta część wykładu rozpoczyna się od transformatora i maszyny prądu stałego, w których w sposób jawny występują zjawiska, stanowiące podstawy do opracowania metod opisu maszyn elektrycznych (wzorcowego sprzężenia transformatorowego oraz wzorcowego sprzężenia elektromechaniczne).

Na zakończenie e-skryptu dodano materiał obejmujący elementy projektowania maszyn elektrycznych, mając na uwadze, że jednym z podstawowych umiejętności inżyniera elektryka powinno być projektowanie urządzeń elektrycznych, w szczególności maszyn elektrycznych.

Uzupełnieniem do treści wykładu są ćwiczenia laboratoryjne. Zagadnienia obejmujące materiał ćwiczeń laboratoryjnych zawiera zestaw instrukcji dostępnych na stronie internetowej Katedry Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych PG.

1.5. Podsumowanie

Zamierzone efekty kształcenia:

- Kompetencje w dziedzinie elektrotechniki:
Znajomość budowy, działania, charakterystyk, rozpoznawania oraz rozwiązywania podstawowych problemów technicznych (inżynierskich) z zakresu maszyn do elektromechanicznego przetwarzania energii.
- Kompetencje ogólne:
Umiejętność wyrażania koncepcji i argumentacji słownej w sytuacjach formalnych i nieformalnych oraz umiejętność pracy w zespole.

1.6. Literatura

Wykaz literatury przedmiotu maszyny elektryczne znajdują się w rozdziale 10 „Literatura” – umieszczonym na końcu e-skryptu.

"Jeżeli mogę wytworzyć model mechanizmu to rozumiem,
Jeżeli nie mogę – nie rozumiem."

lord Kelvin

2. Podstawy fizyczne budowy i działania maszyn elektrycznych

Maszyna elektryczna jest urządzeniem do elektromechanicznego przetwarzania energii z udziałem strumienia ładunku elektrycznego (prądu elektrycznego) i strumienia masy – „ruchu elektrycznego” i ruchu mechanicznego.

Proces przemiany energii może zachodzić w dwóch kierunkach: maszyna elektryczna może pracować jako prądnica (*generator*) lub jako *silnik*.

Transformator jest urządzeniem do elektromagnetycznego przetwarzania energii elektrycznej o jednym napięciu na energię o innym napięciu, bez udziału energii mechanicznej (ruchu mechanicznego).

Proces przemiany energii w transformatorze może zachodzić w dwóch kierunkach.

Podstawą działania i budowy maszyn elektrycznych i transformatorów są dwa odkrycia: efektu magnetycznego prądu (Hans Oersted odkrył 21 kwietnia 1820 r.) i zjawiska indukcji elektromagnetycznej (Michał Faraday odkrył 29 sierpnia 1831 r.).

2.1. Uwagi wstępne

W rozdziale omówimy podstawy fizyczne budowy i działania maszyn elektrycznych, które obejmują następujące zagadnienia:

- definicja maszyny elektrycznej;
- ogólna struktura maszyn elektrycznych (mechaniczna i elektromagnetyczna);
- maszyna elektryczna a system przetwarzania energii;
- zjawiska fizyczne wykorzystane do budowy maszyn elektrycznych;
- podstawy działania maszyn elektrycznych;
- prymitywna maszyna elektryczna a maszyny współczesne;
- wielkości elektromechaniczne maszyny elektrycznej (moment elektromagnetyczny i SEM rotacji).

Rozdział zakończymy krótkim omówieniem i odpowiedzią na pytanie: czy warto zajmować się maszynami elektrycznymi?

2.2. Definicja maszyny elektrycznej

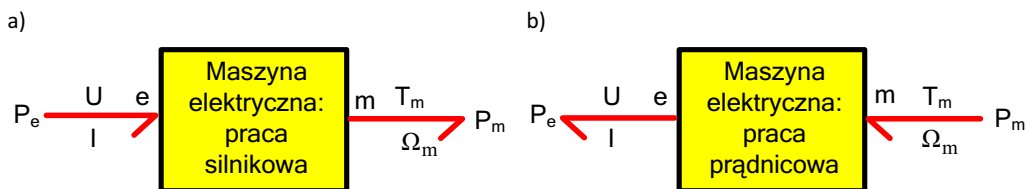
Maszyna elektryczna jest przetwornikiem do elektromechanicznego przetwarzania (konwersji) energii z udziałem strumienia ładunku elektrycznego (prądu elektrycznego) – „ruchu elektrycznego” i strumienia masy – ruchu mechanicznego.

Proces przemiany energii w maszynach elektrycznych może zachodzić w dwóch kierunkach:

- przetwarzania energii elektrycznej (EE) na mechaniczną w **silnikach** (motorach, rys. 2.1a);
- przetwarzania energii mechanicznej (EM) na elektryczną w **prądnicach** (generatorach, rys. 2.1b).

Może też zachodzić przypadek, kiedy energia elektryczna i energia mechaniczna są przetwarzane na trzecią postać, np. w energię cieplną w procesie elektrycznego hamowania maszyny.

Możliwe jest przetwarzanie energii elektrycznej na energię elektryczną o innych parametrach (na ogół o innej częstotliwości) w **przetwornicach elektromaszynowych** – wirujących. Współcześnie zostały one zastąpione przez przetwornice energoelektroniczne – statyczne.



Rys. 2.1. Ogólna struktura maszyny elektrycznej i kierunki procesu przetwarzania energii: a) praca silnikowa, b) praca prądnicowa. Wrota „e” oraz „m” – miejsca przepływu energii/mocy odpowiednio elektrycznej i mechanicznej; Wielkości wrotowe/zaciskowe: P_e – moc elektryczna; P_m – moc mechaniczna; U – napięcie, I – prąd, T_m – moment obrotowy, Ω_m – prędkość kątowna. Przyjęta konwencja strzałkowania w ujęciu grafów wiązań¹⁾ oznacza: moc dopływająca do maszyny jest mocą dodatnią, a moc odpływająca – mocą ujemną

Ruch elektryczny w maszynie elektrycznej – przepływ prądu elektrycznego poprzez wrota elektryczne może mieć charakter prądu stałego lub prądu przemiennego (1-fazowego lub 3-fazowego). Wyróżniamy zatem przy najbardziej ogólnym podziale – w aspekcie prądu pobieranego lub wydawanego – **maszyny prądu stałego** i **maszyny prądu przemiennego**²⁾.

Ruch mechaniczny w maszynie elektrycznej – ruch części ruchomych może być ruchem obrotowym (wirującym), liniowym (postępowym) lub złożonym – obrotowo-liniowym. Wyróżniamy zatem, **maszyny elektryczne wirujące**, **maszyny elektryczne liniowe** i maszyny elektryczne o ruchu złożonym – **maszyny elektryczne obrotowo-liniowe** [16].

Pojęcie „maszyna elektryczna wirująca/liniowa” zawiera w sobie także pojęcie przyrządów, działających na podobnej zasadzie, których głównym zadaniem nie jest jednak elektromechaniczne przetwarzanie energii, lecz np. elektromechaniczne przetwarzanie sygnałów – **przetworniki elektromechaniczne**, czy elektromechaniczne wytwarzanie momentu obrotowego w stanie spoczynku – **silniki momentowe**.

Do tak zdefiniowanych maszyn elektrycznych nie zalicza się przetworników energii działających bez udziału ruchu mechanicznego – **transformatorów**³⁾. Transformator jest przetwornikiem elektromagnetycznym – przetwarza (transformuje) energię elektryczną na energię elektryczną o innych (na ogół) parametrach, np. o innym napięciu, innym prądzie itp. (rys. 2.2).



Rys. 2.2. Ogólna struktura transformatora i kierunki procesu przetwarzania energii: wrota „1” oraz „2” – miejsca przepływu energii/mocy elektrycznej. Wielkości wrotowe/zaciskowe: U_1 , U_2 – napięcia, I_1 , I_2 – prądy. Przyjęta konwencja strzałkowania w ujęciu grafów wiązań oznacza: moc dopływająca P_1 do transformatora jest mocą dodatnią, a moc odpływająca P_2 – mocą ujemną

W każdej maszynie elektrycznej i transformatorze kierunek przepływu energii może być zmienny: np. każda prądnica może pracować jak silnik, każdy silnik może pracować jak prądnica, każdy

¹⁾ Grafy wiązań - metoda graficzna opisu/modelowania systemów przetwarzania energii opracowana przez H. Paintera [4, 22]. Podstawy metody opisano w załączniku do niniejszego e-skryptu (Modelowanie i symulacja maszyn elektrycznych metodą grafów wiązań).

²⁾ Zauważmy, że współcześnie elektromechaniczne przetwarzanie energii coraz częściej wspomagane jest przez przetworniki energoelektroniczne – prądy pobierane i wydawane przez maszynę elektryczną mają charakter prądów odkształconych: pulsujących lub zmiennych (zawierających wyższe harmoniczne).

³⁾ Mimo, że formalnie transformatorów nie zalicza się do maszyn elektrycznych – elektromechanicznych przetworników energii, to przedmiot Maszyny elektryczne obejmuje również transformatory.

transformator może przetwarzać energię o wyższym napięciu na energię o niższym napięciu i na odwrót.

Każdy proces przetwarzania energii charakteryzuje się powstawaniem strat: oprócz zamierzonych postaci energii podczas przetwarzania, towarzyszą jej jeszcze inne. Na przykład: przetwarzanie elektromechaniczne, które zazwyczaj występuje z przemianą elektryczno-cieplną (ciepło Joule'a w obwodach elektrycznych) oraz mechaniczno-cieplną (tarcie mechaniczne części maszyny). Im bardziej udział innych postaci energii w przetwarzaniu elektromechanicznym wzrasta, tym sprawność tej przemiany maleje.

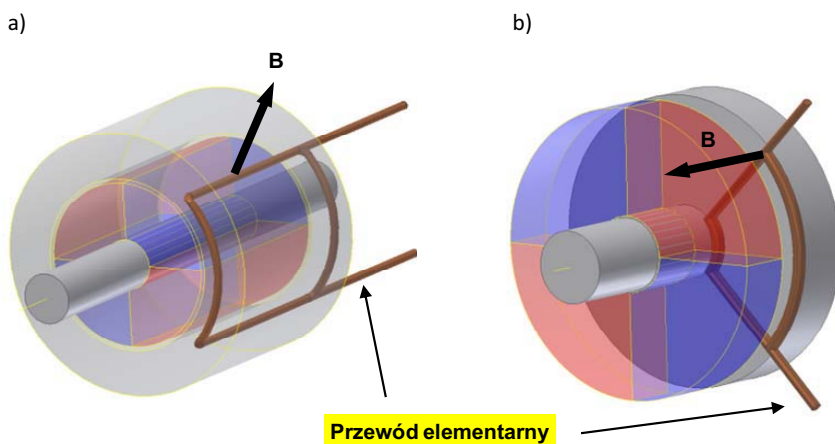
Podstawą opisu elektromechanicznego i elektromagnetycznego przetwarzania energii jest ogólne prawo jej zachowania – do równoważności energii i masy włącznie.

W procesie elektromechanicznego przetwarzania energii na ogół zachodzą jednocześnie zjawiska elektromagnetyczne i elektromechaniczne, należy je więc uwzględniać łącznie.

Wszystkie maszyny elektryczne podlegają tym samym prawom elektrodynamiki – opisanymi równaniami Maxwella [7, 12, 14, 50], i prawom elektromechaniki – opisanymi zasadą najmniejszego działania (Hamiltona) [24, 38, 46–49].

2.3. Ogólna struktura maszyn elektrycznych

W przypadku maszyn elektrycznych wirujących, ze względu na kształt wirnika i stojana, wyróżniamy dwie struktury podstawowe: walcową i tarczową⁴⁾ (rys. 2.3).

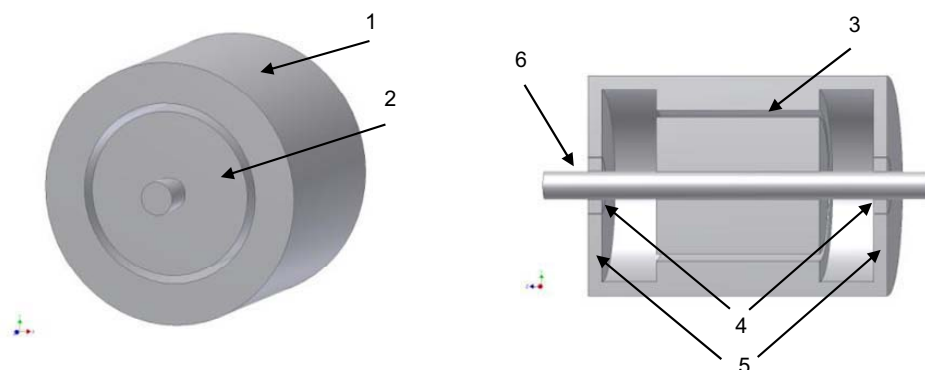


Rys. 2.3. Podstawowe struktury maszyn elektrycznych wirujących: a) walcowa, b) tarczowa

2.3.1. Struktura mechaniczna

Maszyna elektryczna zbudowana jest z szeregu elementów/części. Poszczególne elementy maszyny pełnią określone funkcje i mają swoje fachowe nazwy w literaturze maszyn elektrycznych. Podstawowe elementy najczęściej stosowanych maszyn pokazano na rys. 2.4.

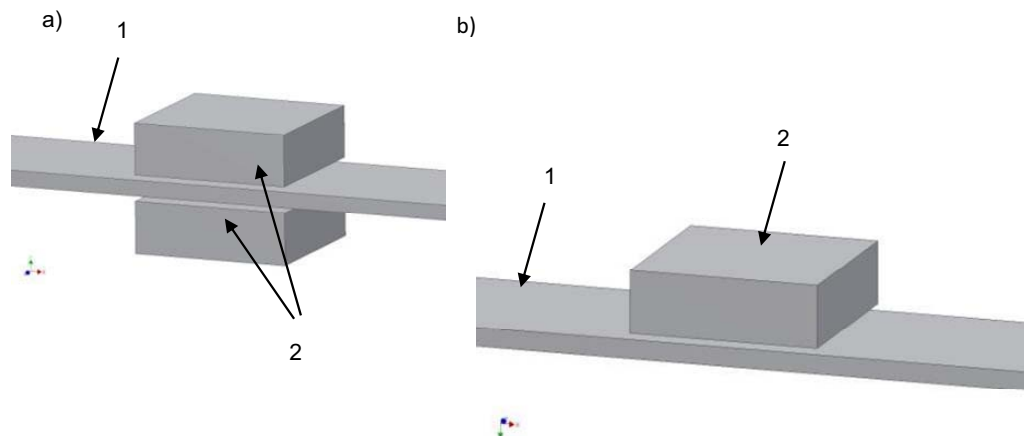
⁴⁾Współcześnie buduje się także maszyny elektryczne o strukturze złożonej, np. z wirnikami kulistymi [16].



Rys. 2.4. Schemat typowej budowy maszyny elektrycznej wirującej o strukturze cylindrycznej:
1 – stojan, 2 – wirnik, 3- szczelina robocza (powietrzna), 4 – łożyska, 5 – tarcze

Stojan (stator) jest to część nieruchoma, a **wirnik** (rotor) jest to część ruchoma - wirująca (wykonuje ruch obrotowy) maszyny elektrycznej wirującej. Wirnik umieszczony jest na **wale maszyny**. Współosiowe położenie stojana i wirnika zapewniają **łożyska** i **tarcze łożyskowe**.

Przy nieskończonej wielkości promienia obrotu ruch postępowy może być traktowany jako krańcowy przypadek ruchu obrotowego. W tym rozumieniu **maszyna elektryczna liniowa** (o ruchu postępowym) może być traktowana jako krańcowy przypadek maszyny elektrycznej wirującej. W maszynach liniowych najczęściej wyróżniamy dwie części: nieruchomy **induktor** oraz ruchomy **bieżnik** (rys. 2.5).



Rys. 2.5. Schemat typowej budowy maszyny elektrycznej liniowej:
a) induktor dwustronny, b) induktor jednostronny, 1 – bieżnik, 2 – induktor

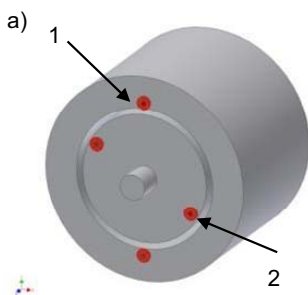
Z punktu widzenia działania maszyny elektrycznej nie jest istotne, czy część wirująca maszyny jest zewnętrzna, czy wewnętrzna. Można umieścić część wirującą - wirnik na zewnątrz części nieruchomej – stojana. Czasami jest konieczne, np. dla uzyskania większego momentu bezwładności, lub wbudowania silnika w koła pojazdu (samochodu o napędzie elektrycznym) – uzyskuje się wtedy napęd bezpośredni bez przekładni.

2.3.2. Struktura elektromagnetyczna

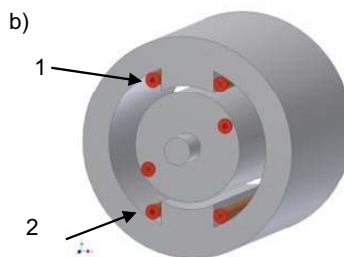
W zależności od sposobu wytwarzania momentu obrotowego (elektromagnetycznego) lub siły pociągowej (elektromagnetycznej) wyróżnimy maszyny elektryczne zasilane: dwustronnie – **elektrodynamiczne** i jednostronnie – **elektromagnetyczne**.

W przypadku maszyn elektrodynamicznych źródłem momentu elektromagnetycznego jest wzajemne oddziaływanie prądów w uzwojeniach stojana i wirnika, wzmocnione koncentracją linii sił pola magnetycznego wytworzonego przez oba uzwojenia w ferromagnetycznym rdzeniu maszyny.

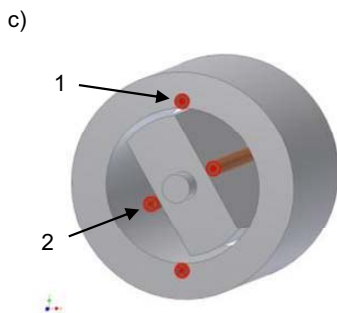
Podstawowe struktury elektromagnetyczne maszyn elektrycznych wirujących pokazano na rys. 2.6.



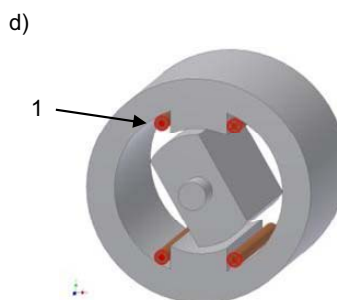
**Cylindryczny stojan i wirnik:
szczelina równomierna**



**Wydatnobiegunowy stojan
oraz cylindryczny wirnik:
szczelina wydatnobiegunowa
jednostronnie**



**Cylindryczny stojan
oraz wydatnobiegunowy wirnik:
szczelina wydatnobiegunowa
jednostronnie**



**Wydatnobiegunowy stojan
oraz wydatnobiegunowy wirnik:
szczelina wydatnobiegunowa
dwustronnie**

Rys. 2.6. Podstawowe struktury maszyn elektrycznych wirujących:
a), b) i c) maszyny zasilane dwustronnie, b) maszyny zasilanie jednostronnie
1 – uzwojenie stojana, 2 – uzwojenie wirnika

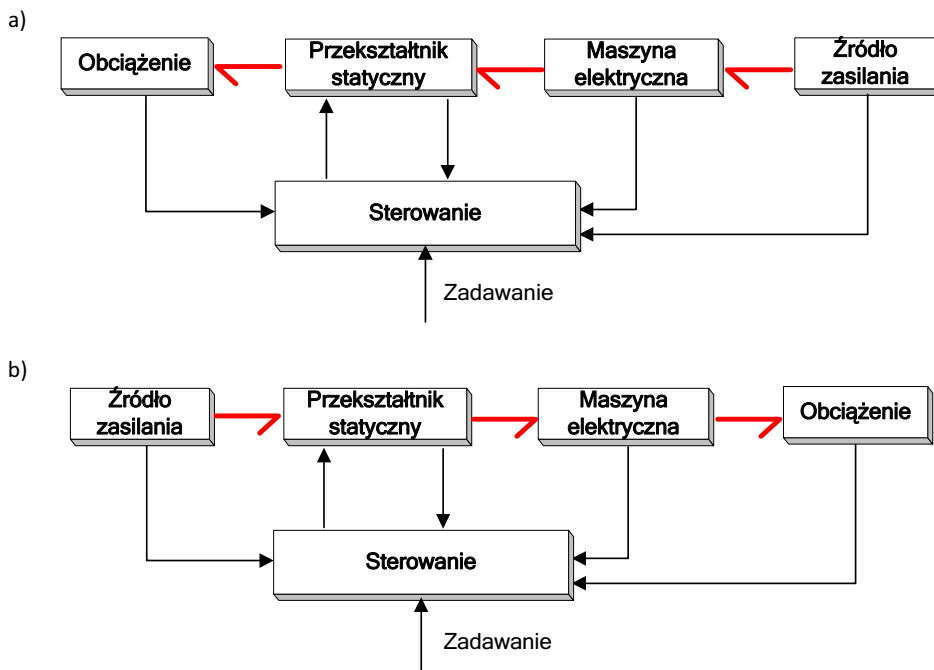
Na ogół w maszynie **uzwojenia** umieszczone są zarówno w stojanie jak i w wirniku. Występują także maszyny z uzwojonym tylko wirnikiem albo tylko stojanem. Dopytyw lub odpływ energii elektrycznej do/z uzwojenia wirnika następuje poprzez **zestyk ślizgowy**. Zestyk tworzą nieruchome **szczotki** (mocowane do tarcz łożyskowych) i **pierścienie ślizgowe** alb **komutator** (mocowany na wale maszyny) i szczotki (mocowane do tarcz łożyskowych).

Twornik (może to być stojan albo wirnik) jest częścią maszyny wirującej, do której doprowadza się energię elektryczną do przetworzenia, albo od której odprowadza się energię elektryczną przetworzoną w maszynie.

Magneśnica lub **wzbudnik** (może to być także stojan albo wirnik) jest to część maszyny elektrycznej wirującej, służąca do wzbudzenia strumienia magnetycznego, ale w której nie występuje przetwarzanie energii (z wyjątkiem zjawiska dyssypacji). Wzbudzenie maszyny realizuje się za pomocą uzwojenia zasilanego prądem – mówimy wtedy o **wzbudzeniu elektromagnetycznym**, albo za pomocą magnesów trwałych – mówimy wtedy o **wzbudzeniu magnetoelektrycznym**.

2.4. Maszyna elektryczna a system przetwarzania energii

Maszyna elektryczna jest najczęściej elementem złożonych systemów elektromechanicznych, których podstawową funkcją jest elektromechaniczne przetwarzanie energii: mechanicznej na elektryczną, bądź elektrycznej na mechaniczną. Przykłady ogólnej struktury takich systemów pokazano na rys. 2.7.



Rys. 2.7. Ogólna struktura systemu elektromechanicznego przetwarzania energii:

a) funkcja elektroenergetyczna – wytwarzanie energii elektrycznej, b) funkcja napędowa – wytwarzanie energii mechanicznej

Na przykład prądnica (generator) bądź transformator są elementami złożonego systemu elektroenergetycznego, którego funkcją jest wytwarzanie i przesyłanie (transport) energii elektrycznej. W klasycznym systemie prądnica pracuje ze stałą prędkością obrotową, aby zapewnić stałą częstotliwość napięcia zasilania [36]. Natomiast w systemach nowoczesnych, w szczególności autonomicznych, funkcję tą przejmuje przełącznik statyczny [20]. Z kolei silnik elektryczny jest elementem złożonego, odpowiednio sterowanego lub zautomatyzowanego systemu napędowego. Funkcją członu sterującego parametrami energii elektrycznej zasilającej silnik spełnia przełącznik statyczny – kształtuje charakterystykę silnika wymaganą dla obciążenia – napędzanej maszyny roboczej [19].

Kolejny etap zaawansowanego rozwoju systemów elektromechanicznego przetwarzania energii związany jest z **mechatroniką** – techniką synergicznego projektowania maszyn i procesów, zdolnych do inteligentnych zachowań [26, 46]. Mechatronika wyłoniła się stosunkowo nagle z maszyn elektrycznych (elektromechaniki) w wyniku postępu technicznego w energoelektronice, mikroelektronice i technice komputerowej. Znamienne dla mechatroniki jest nierozłączne, powiązanie mechaniki, elektromechaniki, elektrodynamiki technicznej, elektroniki, informatyki, myślenia systemowego i ekonomii (rys. 2.8). Przetwornik elektromechaniczny stanowi integralną część projektowanego systemu. Aby osiągnąć efekt synergii, nie jest możliwe zastosowanie seryjnie produkowanych maszyn elektrycznych, tzw. „maszyn z półki producenta”. Projektowanie przetwornika zaczyna się od podstaw i jest współbieżne z procesem projektowania całego systemu mechatroniki.



Rys. 2.8. Definicja mechatroniki w aspekcie konstruktora elektryka

„Mechatronika jest synergiczną techniką projektowania i wytwarzania maszyn zdolnych do inteligentnych zachowań, o nierozłącznym, powiązaniu mechaniki, elektroniki, informatyki, elektrodynamiki technicznej, myślenia systemowego i ekonomii” [46]

Z powyższych rozważań wnika, że maszynę elektryczną należy traktować jako jeden (często najważniejszy i najbardziej skomplikowany) z elementów składowych systemu elektromechanicznego i odwzorowywać ją takimi opisami, które pozwalają włączyć maszynę w opis całego systemu [23[23], 24]. Równocześnie, w przypadku systemów klasycznych (systemy nie spełniające zasad synergii) maszyna elektryczna jest elementem skończonym, wydzielonym, stanowiącym odrębny wyrób przemysłu elektrotechnicznego. Występuje w niej szereg zjawisk fizycznych. Opisanie tych zjawisk, nawet z ograniczeniem do samej maszyny, prowadzi niejednokrotnie do skomplikowanego modelu (układu równań) – narzuca to konieczność traktowania maszyny jako wydzielonego elementu, celem ułatwienia poznania zachodzących w niej zjawisk fizycznych. Niejednokrotnie wygodniej jest przy tym posługiwać się opisem fizycznego przebiegu zjawiska niż stosować złożony opis matematyczny [23, 24].

2.5. Zjawiska fizyczne wykorzystane do budowy maszyn elektrycznych

2.5.1. Podstawy działania

Podstawą działania maszyn elektrycznych – procesu elektromechanicznego przetwarzania energii, najogólniej rzecz ujmując, są zjawiska związane z wzajemnym oddziaływaniem ładunków elektrycznych.

Najwcześniej wynaleziono **maszyny elektrostatyczne** oraz maszyny działające na zasadzie **indukcji elektrycznej**. Później wynaleziono **maszyny elektryczne**⁵ działające na zasadzie zjawiska **indukcji elektromagnetycznej** – stanowią one przeważającą większość maszyn elektrycznych [93]⁶. **Wzbudniki**⁷ tych maszyn zbudowane są z **materiałów ferromagnetycznych**. W ostatnich latach zbudowano maszyny piezoelektryczne (ultrasoniczne) – wykorzystujące **zjawisko elektrostrykcji** we wzbudnikach zbudowanych z **materiałów piezoelektrycznych** (PZT) [9, 26, 34]. Kolejną grupę stanowią różne odmiany maszyn pracujących na zasadzie **zjawisk magnetostrykcyjnych**. Z kolei w technice kosmicznej stosuje się silniki pracujące na zasadzie **odrzutu jonowego** przy wysokim napięciu.

Ze względu na dominującą rolę maszyn elektrycznych – elektromagnetycznych, w systemach przetwarzania energii oraz ograniczenia narzucone na objętość niniejszego e-skryptu, rozważania ograniczymy do maszyn działających na zasadzie zjawiska indukcji elektromagnetycznej. Ogólne zasady budowy i działania maszyn, opartych na innych zjawiskach, omówimy w rozdziale 8 poświęconym maszynom specjalnym.

Przestawimy prosty sposób otrzymania, dla procesu elektromechanicznego przetwarzania energii, charakterystycznych wielkości fizycznych i zachodzących relacji między wielkościami występującymi na wrotach przepływu mocy/energii w maszynach elektrycznych. Pozwoli to ominąć trudny aparat matematyczny, konieczny przy korzystaniu z równań Maxwella lub praw elektromechaniki – opisanymi zasadą najmniejszego działania (Hamiltona).

2.5.2. Pole elektromagnetyczne i jego wielkości charakterystyczne

Wzajemne oddziaływanie ładunków elektrycznych opisujemy wprowadzając pojęcie pola elektromagnetycznego. Przez pole elektromagnetyczne rozumiemy przestrzeń, w której na ładunek q działa siła Lorentza [14]:

$$\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.1)$$

gdzie: \mathbf{E} , \mathbf{B} – natężenie pola elektrycznego i indukcja pola magnetycznego, wielkości wektorowe zależne od miejsca i czasu obserwacji, \mathbf{v} – prędkość ładunku.

U podstaw teorii pola elektromagnetycznego leżą dwie ważne zasady: superpozycji i zachowania ładunku. Pierwsza oznacza, że wektory \mathbf{E} i \mathbf{B} są sumą od wszystkich ładunków. Druga stwierdza, że ładunek całkowity przy wszelkich przemianach fizycznych jest stały.

Rozważymy pole w próżni. Ośrodki materialne traktujemy jako próżnię, w której uwzględniamy specyficzny dla rozważanego środowiska ruch i zachowanie się znajdujących się w nim ładunków.

Do opisu maszyn elektrycznych w ujęciu obwodowym posługujemy się formami całkowitymi praw Maxwella [14]:

- elektrostatyka (prawo Gaussa)

⁵ Właściwa nazwa tych maszyn powinna być „maszyny elektromagnetyczne”, gdyż pole magnetyczne jest wielkością sprzęgającą proces elektromechanicznej przemiany energii.

⁶ Maszyny elektryczne bazujące na energii pola elektrycznego są rzadko stosowane do elektromechanicznego przetwarzania energii. Jednym z powodów jest osiągalna współcześnie względnie niska gęstość energii pola elektrycznego – około 10 000 razy mniejsza niż w przypadku gęstości energii pola magnetycznego.

⁷ Część maszyn, której funkcją jest wzbudzenie pola elektrycznego lub magnetycznego.

$$\oint_A (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n}) da = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (2.2)$$

gdzie: A – całkowita powierzchnia ograniczająca objętość V , w której znajduje się całkowity ładunek Q ,
 $\epsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm – przenikalność elektryczna próżni.

- magnetostatyka (prawo przepływu - prawo Ampera)

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \mu_0 I \quad (2.3)$$

gdzie: S – dowolny kontur zamknięty, przez który przepływa całkowity prąd I , $\mu_0 = 1/(\epsilon_0 c_0^2) = 4\pi \cdot 10^{-8}$
 Vs/Am – przenikalność magnetyczna próżni, $c_0 \approx 3 \cdot 10^8$ m/s – prędkość światła.

- elektrodynamika (prawo indukcji elektromagnetycznej – prawo Faradaya)

$$e = \int_S (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{S} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.4)$$

gdzie: S – dowolny kontur zamknięty poruszający się z prędkością \mathbf{v} w polu magnetycznym \mathbf{B} , przez który przepływa całkowity strumień ϕ , $(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ – dodatkowe natężenie pola elektrycznego będącego rezultatem działania siły Lorenzta, e – całkowita siła elektromotoryczna (SEM) indukowana w konturze S .

Należy zauważyć, że **siła Lorenzta (rów. (2.1)) jest pomostem między polem elektromagnetycznym a mechaniką**. Mechanika wiąże się z ruchem masy w postaci ciała stałego, płynu lub gazu. Możemy zatem powiedzieć, że pomost ten ma charakter „elektro-magneto-mechaniczny”. Dziedzina, która to opisuje nazywamy **elektromechaniką**.

Zatem rodzą się następujące pytania:

- co można z tego zbudować?
- jak to zbudować?

Odpowiedzi na te pytania zilustrujemy posługując się prymitywnym modelem maszyny elektrycznej prądu stałego.

2.5.3. Prymitywna maszyna elektryczna a maszyny współczesne

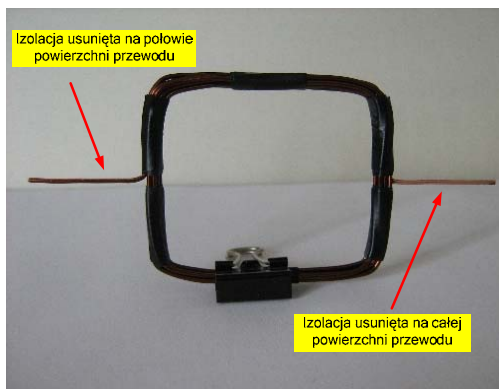
Rozważymy dwa warianty prymitywnej maszyny elektrycznej o ruchu obrotowym, w których zastosujemy cykliczne przełączanie uzwojenia – **komutację prądu zasilania** maszyny. Pierwszy wariant prymitywnej maszyny elektrycznej przedstawiamy na rys. 2.9.

Maszyna (rys. 2.9) składa się z cewki (uzwojenia), magnesu trwałego i dwóch podpór oraz podstawy. Cewkę wykonujemy z izolowanego przewodu miedzianego, nadając jej kształt ramki. Na podstawie mocujemy magnes trwały, a cewkę ustawiamy na podporach wykonanych z przewodu miedzianego z usuniętą izolacją.

a)



b)



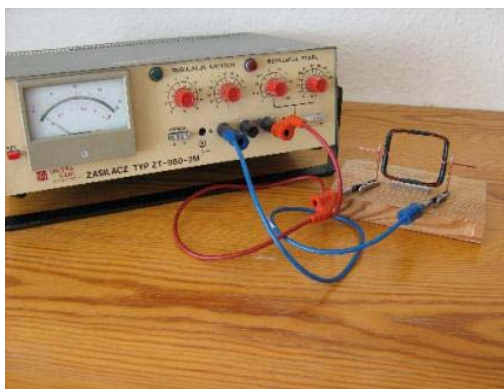
c)



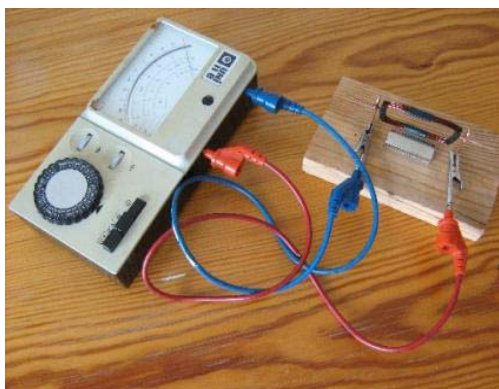
d)



e)



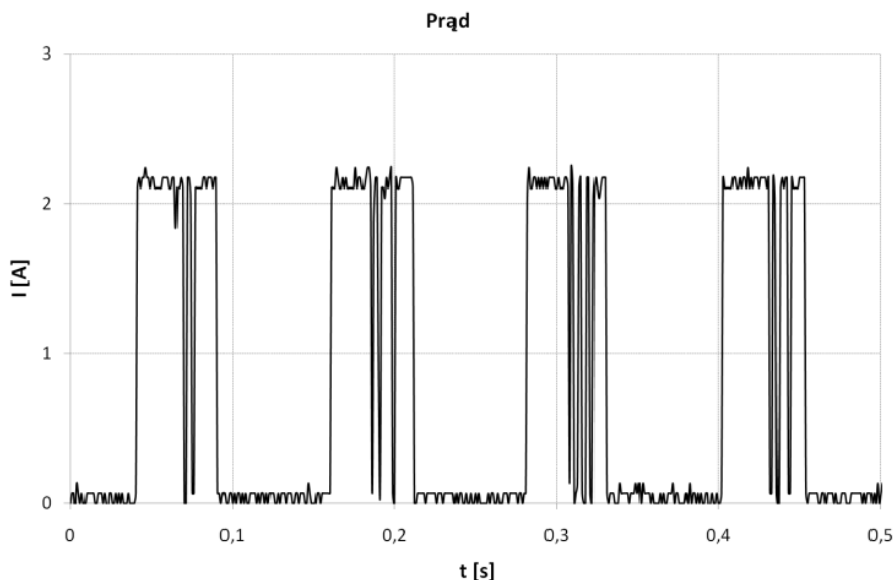
f)



Rys. 2.9. Prymitywny model maszyny elektrycznej prądu stałego: a) uzwojenie, b) miejsca usunięcia izolacji na końcach przewodów cewki, e) podstawa, podpory – zaciski cewki i magnes trwały, d) maszyna złożona, e) praca silnikowa, f) praca prądnicowa

Badanie pracy silnikowej maszyny

Opis przygotowania cewki do komutowania przepływu prądu pokazano na rys. 2.9b. Usunięcie izolacji na połowie powierzchni jednej końcówki cewki spowoduje przepływ prądu przez cewkę tylko w czasie połowy jej pełnego obrotu – efektem jest działanie siły Lorenzta w tym sam kierunku. Prąd w cewce będzie miał przebieg o charakterze impulsowym – ilustruje to pomierzony przebiegu prądu w cewce (rys. 2.10).



Rys. 2.10. Pomierzony przebieg prądu cewki maszyny prymitywnej (rys. 2. 9)

Zasilacz wymusi w cewce przepływ prąd o natężeniu I . Jest on miarą ładunków poruszających się wzdłuż boków cewki z prędkością \mathbf{v} , czyli wielkości $q\mathbf{v}$ w rów. (2.1). Efektem przepływu prądu jest siła Lorenzta \mathbf{F} , która działa na płynący ładunek w cewce prostopadle do płaszczyzny leżącej na wektorze prędkości ładunku \mathbf{v} i wektorze indukcji \mathbf{B} – zgodnie z regułą iloczynu wektorowego $q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ (rys. 2.11rys.). Na rysunku 2.11, odpowiednio przekształcając rów. (2.1), podano zależności na siłę Lorenzta⁸⁾.

Siła Lorenzta działa na oba boki cewki – powstaje zatem moment obrotowy o naturze elektromagnetycznej, który wymusi ruch obrotowy cewki (ilustruje to plik video: [model_mps_1.avi](#) – adres podany w załączniku do e-skryptu)⁹⁾. Ze względu na nierównomierny rozkład indukcji pola magnesu trwałego w obszarze cewki wartości siły Lorenzta nie są jednakowe.

⁸⁾ Pytanie: co wykonują pracę: siła Lorenzta, czy płynący ładunek?

⁹⁾ Analogiczne filmy dostępne są w Internecie na stronie <http://www.youtube.com/>. Wystarczy wpisać do wyszukiwarki „electric motor”.

GENERACJA SIŁY LORENTZA:
efekt ruchu elektrycznego w polu jednorodnym magnetycznym

Założenie: jednorodny rozkład indukcji
wzdłuż prostego przewodu oraz kąt $\alpha = 90^\circ$

$$\mathbf{F}_L = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \Rightarrow F_L = q \cdot v \cdot B$$

$$v = \frac{L}{t} \Rightarrow F_L = \left(q \cdot \frac{L}{t} \right) \cdot B$$

$$\frac{q}{t} = I \Rightarrow \mathbf{F}_L = (I \cdot L) \cdot \mathbf{B}$$

Rys. 2.11. Wyznaczenie wektora siły Lorentza F działającej na ładunek q poruszający się z prędkością v wzdłuż przewodu o długości L umieszczonej w polu o indukcji B

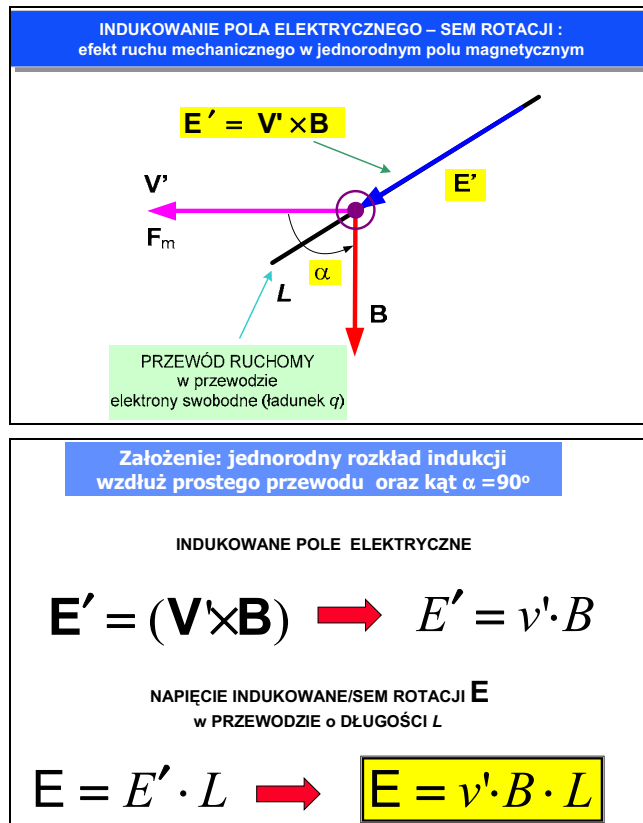
Uwaga:

- cewka wymaga ręcznego popchnięcia – ważny jest kierunek wirowania cewki!;
- aby siła Lorentza działała na boki cewki w tym samym kierunku konieczne jest odpowiednie sterowanie - komutowanie kierunkiem przepływu prądu przez cewkę, czyli cykliczne przełączanie zacisków cewki względem zacisków źródła prądu. Jest to warunek wymuszenia jednokierunkowego ruchu obrotowego;
- w przypadku jednokierunkowego przepływu prądu przez cewkę – braku komutacji – średnia wartość moment jest równa zero – maszyna nie wytwarza użytecznej mocy mechanicznej.

Badanie pracy prądnicowej maszyny

Po podłączeniu woltomierza do szczotek i wymuszeniu ruchu obrotowego cewki (ręczne popchnięcie cewki) zaobserwujemy wychylenie wskazówki miernika. Wychylenie jest efektem przepływu prądu w obwodzie cewka-miernik, który wymusi SEM indukowaną w cewce polem magnesu. (ilustruje to plik video: [model_mps_2.avi](#) – adres podany w załączniku do e-skryptu). Na rys. 2.12, odpowiednio przekształcając równ. (2.4), podano zależności na indukowaną SEM. Ze względu na to, że jej źródłem jest ruch mechaniczny – ruch obrotowy – nazywamy ją także **SEM rotacji**¹⁰⁾.

¹⁰⁾ Powstaje pytanie: gdzie jest źródło mocy/energii w obwodzie elektrycznym?



Rys. 2.12. Wyznaczenie wektora pola elektrycznego E' oraz indukowanej SEM rotacji E dla przypadku przewodu o długości L poruszającego się prędkością v w polu o indukcji B

Wnioski:

- ruch ładunku (ruch elektryczny) w polu magnetycznym wymusza ruch mechaniczny (wirowanie cewki) – maszyna pracuje jako silnik;
- ruch mechaniczny cewki (wirowanie cewki) w polu magnetycznym indukuje pole elektryczne - napięcie na zaciskach cewki (SEM rotacji), które może wymusić przepływ prądu - maszyna pracuje jako prądnica;
- maszyna elektryczna jest maszyną odwracalną.

Podstawową wadą maszyny (rys. 2.9) jest wykorzystanie jej uzwojenia – zużytej miedzi do jej budowy – tylko w ciągu połowy obrotu (połowy jednego cyklu pracy). Rozważymy teraz drugi wariant maszyny, która jest pozbawiona tej wady.

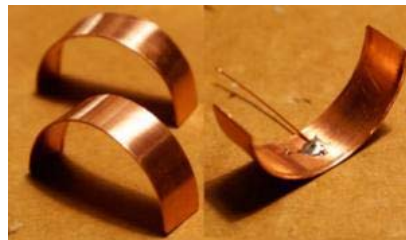
Drugi wariant prymitywnej maszyny elektrycznej przedstawiamy na rys. 2.13. Zastosowano w niej zestyk ślizgowy zbudowany z komutatora złożonego z dwóch półpierścieni (rys. 2.13b) oraz pary szczotek – przewodów miedzianych¹¹⁾. Do wzbudzenia pola magnetycznego, zamiast magnesu trwałego zastosowano elektromagnes w kształcie litery „U” – uzwojenie wzbudzenia umieszczono na rdzeniu złożonym z blach. Efektem wprowadzenia tych modyfikacji jest pełne wykorzystanie miedzi uzwojenia twornika oraz samodzielny rozruch maszyny po załączeniu zasilania.

¹¹⁾ W początkach rozwoju maszyn elektrycznych do budowy zestawu ślizgowego stosowano wiązki przewodów przypominające wyglądem szczotkę. Dlatego nadano nazwę „szczotki” temu elementowi maszyny. Współcześnie wykonuje się je z materiału kompozytowego: elektrografitu lub metalografitu, które strukturą nie przypominają już szczotki – nazwa „szczotki” jednak pozostała.

a)



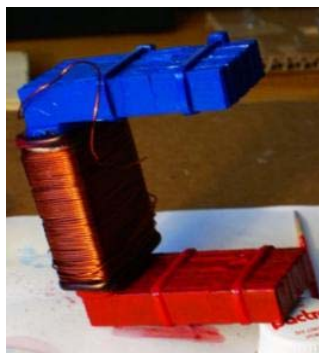
b)



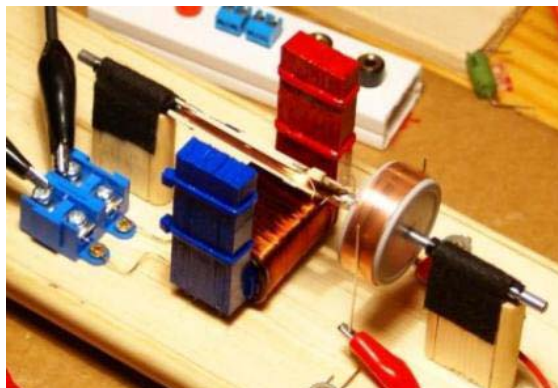
c)



d)



e)



f)



Rys. 2.13. Prymitywny model maszyny elektrycznej prądu stałego ¹²⁾:

- a) uzwojenie – twornik , b) wycinki komutatora, c) zestyk ślizgowy - komutator i szczotki,
d) stojan - magnesia, e) twornik ustawiony na podporach – łożyskach, f) praca silnikowa

Zastosowany sposób komutowania prądu w maszynie prymitywnej to **komutowanie elektromechaniczne**, a element spełniający tą funkcję w maszynie to **komutator elektromechaniczny**. Maszyny elektryczne z komutatorem elektromechanicznym zasilane prądem stałym **nazywamy maszynami prądu stałego** ¹³⁾. Budowę i zasady działania tych maszyn omawiamy w rozdz. 5 e-skryptu.

¹²⁾ Maszynę elektryczną zbudował student Marcin Hołowiński – słuchacz wykładów z Maszyn elektrycznych w sem. 3, rok akad. 2009/2010. Autorzy wyrażają wdzięczność Panu Marciniowi Hołowińskiemu za udostępnienie zdjęć maszyny.

¹³⁾ Maszyny z komutatorem elektromechanicznym mogą być także zasilane prądem przemiennym – pracują wtedy jako silniki. W literaturze fachowej nazywamy je **silnikami uniwersalnymi** – stosowanymi powszechnie w urządzeniach gospodarstwa domowego i w elektronarzędziach.

Uwaga: do wzbudzenia pola magnetycznego w **silnikach uniwersalnych** nie możemy zastosować magnesów trwałych. Stosujemy połączenie szeregowo obu uzwojeń silnika – równoczesna zmiana kierunku przepływu prądu w obu uzwojeniach generuje moment elektromagnetyczny o stałym kierunku działania.

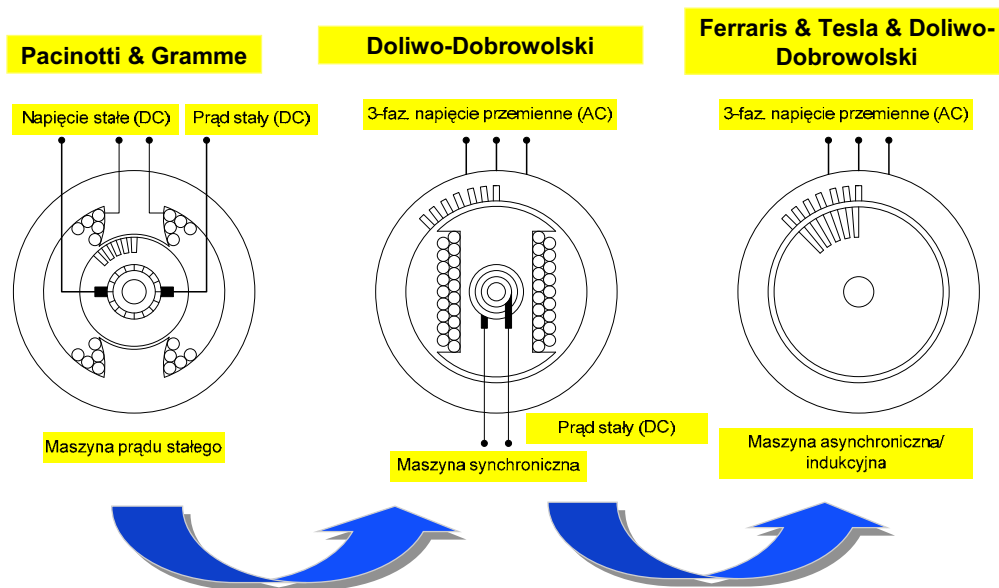
Współcześnie coraz częściej do komutacji prądu w maszynach stosuje się **komutowanie elektroniczne**, wykorzystując do tego sterowane elementy półprzewodnikowe – **tranzystory**. Element spełniający tę funkcję w maszynach małej mocy nazywamy **komutatorem elektronicznym**, a dla maszyn dużej mocy – **komutatorem energoelektronicznym**.

Maszyny elektryczne w których wykorzystuje się taki sposób komutacji prądu nazywamy **maszynami z komutacją elektroniczną** lub **maszynami bezszczotkowymi** w przypadku zastosowania do wzbudzenia pola magnesów trwałych [11, 26, 33]¹⁴⁾. W takich maszynach wzbudzenie – magnesy trwałe – umieszczamy na wirniku, a uzwojenie twornika na stojanie. Końce uzwojenia łączymy odpowiednio z komutatorem elektronicznym, który zasilamy ze źródła napięcia stałego. Komutator elektroniczny cyklicznie przełącza połączenie uzwojenia z źródłem zasilania napięcia/prądu stałego.

Uwaga: Aby komutator elektroniczny spełniał analogiczną funkcję jak komutator elektromechaniczny, konieczny jest **czujnik położenia kąтового wirnika**, który poprzez układ logiczny odpowiednio steruje kluczowaniem tranzystorów.

Komutator elektroniczny sterowany **czujnikiem położenia kąтового wirnika** wymusza taki przepływ prądu w uzwojeniach stojana, który wzbudzi pole magnetyczne o wirującym strumieniu. Wirujący strumień stojana wchodzi w interakcję z polem magnetycznym wirnika – efektem interakcji jest generowanie momentu elektromagnetycznego. Moment wymusza ruch obrotowy wirnika zsynchronizowany z wirującym strumieniem pola stojana.

EWOLUCJA MASZYN ELEKTRYCZNYCH KLASYCZNYCH



Rys. 2.14. Ewolucja klasycznych maszyn elektrycznych działających w na zasadzie zjawiska indukcji elektromagnetycznej – pola magnetycznego (podano nazwiska wynalazców i budowniczych maszyn)

¹⁴⁾ Przykłady budowy i zastosowania maszynach elektrycznych z komutatorem elektronicznym/energoelektronicznym omawiamy w rozdz. 3 i 8 e-skryptu.

Wzbudzenie wirującego strumienia pola stojana jest podstawą budowy i działania **maszyn prądu przemiennego**. W maszynach tych wirujący strumień stojana wzbudzamy bez zastosowania komutatora. Realizujemy to za pomocą **uzwojenia trójfazowego**¹⁵⁾, które zasilamy napięciem/prądem trójfazowym. Zgodnie z zasadą odwracalności pracy maszyn elektrycznych, maszynę z takim uzwojeniem – **maszynę synchroniczną** – wykorzystujemy do wytwarzania energii prądu przemiennego, którą przesyłamy w trójfazowych systemach elektroenergetycznych.

Przykłady zastosowania takich maszyn omawiamy w rozdz.3, a ich budowę i zasady działania – w rozdz. 5, 6 i 7 e-skryptu.

Podsumowanie naszych rozważań przedstawiamy poglądowo na rys. 2.14, który ilustruje ewolucję tzw. „klasycznych” maszyn elektrycznych.

Określenie „maszyny klasyczne” oznacza, że maszyny te:

- produkują stały moment obrotowy,
- mogą być zasilane bezpośrednio z sieci napięcia stałego lub przemiennego,
- mogą pracować bez elektronicznych układów sterowania.

Szczegóły budowy i działanie różnych typów maszyn elektrycznych – klasycznych i specjalnych omawiamy w kolejnych rozdziałach e-skryptu, a dalszą ich ewolucję opisano w rozdz. 8 (rys. 8.1). Zagadnienia sprzężeń wzorcowych w maszyn elektrycznych: transformatorowego i elektromechanicznego omawiamy kolejno w rozdz. 4 i 5. Sprzężenia wzorowe i opisujące je wielkości elektromagnetyczne (SEM transformacji) i elektromechaniczne (moment elektromagnetyczny i SEM rotacji) wykorzystujemy do formułowania modeli obwodowych maszyn elektrycznych – w miejsce **teorii maszyny uogólnionej**.

2.6. Podsumowanie

W rozdziale omówiliśmy podstawy fizyczne budowy i działania maszyn elektrycznych, które obejmują następujące zagadnienia:

- definicja maszyny elektrycznej;
- ogólna struktura maszyn elektrycznych (mechaniczna i elektromagnetyczna);
- maszyna elektryczna a system przetwarzania energii;
- zjawiska fizyczne wykorzystane do budowy maszyn elektrycznych;
- podstawy działania maszyn elektrycznych;
- prymitywna maszyna elektryczna a maszyny współczesne;
- wielkości elektromechaniczne maszyny elektrycznej (moment elektromagnetyczny i SEM rotacji).

W następnych rozdziałach e-skryptu omówimy szczegóły budowy i działanie różnych typów maszyn elektrycznych – klasycznych i specjalnych.

Materiał ilustrujący omawiane zagadnienia – w postaci filmów video – dostępny jest w Katedrze Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych PG.

Na koniec stawiamy pytanie: **czy warto zajmować** maszynami elektrycznymi? Myślimy, że częściowa odpowiedź na to pytanie podana jest poniżej – ogłoszenie w Gazecie Wyborczej. Dalsze odowiedzi pojawią się w trakcie czytania niniejszego e-skryptu – do czego bardzo zachęcają jego autorzy.

¹⁵⁾ W maszynach małych mocy stosujemy uzwojenia dwufazowe. Postęp w energoelektronice umożliwia budowanie maszyn z uzwojeniem wielofazowym.



**ENERGISING
THE FUTURE WITH
INNOVATION...**

**Bardzo atrakcyjne wynagrodzenie + koszty przeprowadzki - miejsce pracy
Stamford, Lincolnshire, Wielka Brytania.**

Cummins Generator Technologies (dawniej Newage AvK SEG) stanowi część Cummins Inc i jest światowym liderem o siedemdziesięcioletnim doświadczeniu w zakresie systemów wytwarzania energii elektrycznej. Prowadząc działalność pod rozpoznawalnymi markami Markon, Stamford i AvK produkujemy szeroką gamę produktów cieszących się doskonałą opinią wynikającą z ich innowacyjności, jakości, parametrów eksploatacyjnych oraz niezawodności.

W związku z nieustannym rozwojem oferujemy dwa atrakcyjne stanowiska pracy w naszym zakładzie produkcyjnym w Stamford skierowane do osób kreatywnych, pracowitych i zainteresowanych dalszym rozwojem zawodowym na stanowisku

**Projektant Maszyn Elektrycznych
(Electromagnetic Design Engineer) x 2**

Oferta 1 - Ref STA 29752: Przewidywany zakres obowiązków obejmuje projektowanie i analizę elektromagnetyczną nowych konstrukcji maszyn elektrycznych w ramach prac zespołu badawczo - rozwojowego (R&D).

Oferta 2 - Ref STA 29774: Przewidywany zakres obowiązków obejmuje projektowanie i testy generatorów synchronicznych wydatniegunowych o mocy do 2000kVA oraz konsultacje techniczne w tym zakresie.

Do najważniejszych zadań należeć będą modyfikacje produkowanych urządzeń ukierunkowane na zwiększenie bezpieczeństwa użytkownika, parametrów znamionowych oraz niezawodności a także obniżenia kosztów i usprawnienia produkcji. Ponadto przewiduje się współpracę z dostawcami w zakresie kontroli jakości i certyfikacji materiałów oraz konsultacje techniczne dla naszych klientów.

Od kandydatów wymagamy wykształcenia wyższego technicznego popartego udokumentowanym doświadczeniem w pracy na stanowisku projektanta maszyn elektrycznych. Niezbędna jest wiedza z zakresu metod projektowania i analizy pracy maszyn i urządzeń elektrycznych. Kandydat powinien charakteryzować się doskonałą znajomością teorii pól elektromagnetycznych i matematyki. Dodatkowo oczekujemy podstawowej wiedzy z zakresu systemów elektroenergetycznych oraz mechaniki.

Jeżeli jesteście Państwo zainteresowani kontynuowaniem kariery zawodowej w Wielkiej Brytanii zapraszamy do wypełnienia wybranej aplikacji na stronie internetowej:

www.eujobs.cummins.com

Cummins Generator Technologies

2.7. Literatura

- [1] Adkins B., *The general theory of electrical machines*. Chapman and Hall, London, 1957.
- [2] Cichy M., *Modelowanie systemów energetycznych*, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk, 2001.
- [3] Chapman S. J., *Electric Machinery Fundamentals*, 4th ed., McGraw Hill Book Co (Education), 2004.
- [4] Chiasson J., *Modeling and High Performance Control of Electric Machines*, IEEE Press Series on Power Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2005.
- [5] Dąbrowski M., *Konstrukcja maszyn elektrycznych*, Warszawa, WNT 1977.
- [6] Demenko A., *Obwodowe modele układów z polem elektromagnetycznym*. Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań, 200
- [7] Feynmam R.P., Leighton Robert B., Sands M., *Feynmana wykłady z fizyki, t2.1 i t2.2, Elektryczność i magnetyzm. Elektrodynamika*, wyd. 6, WNT, Warszawa 2007.
- [8] Fitzgerald A. E., Kingsley Ch., Jr., Umans. S. D., *Electric Machinery*. 6th ed., McGraw-Hill, 2003.
- [9] Gieras J.F., *Advancements in Electric Machines*, Heidelberg, Springer 2009.
- [10] Gieras J.F., Gieras I.AA., *Electrical energy utilization*, Wyd. Adam Marszałek, Toruń 1998.
- [11] Glinka T., *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2002.
- [12] Griffiths D.J., *Podstawy elektrodynamiki*, wyd.3, Warszawa, PWN, 2001.

-
- [13] Hamnod P. (tłumaczenie Krawczyk A.). , *Od Gilberta do Einsteina. Krótka historia elektromagnetyzmu*, Wyd. Pol. Częstochowskiej, Częstochowa, 1999.
- [14] Hryńczuk J., *Od Feynmana do Maxwella*, Gdańsk, Wyd. Pol. Gdańskiej, 1994.
- [15] Kamiński G., Przyborowski W., *Uzwojenia i parametry maszyn elektrycznych*, OWPW, Warszawa, 2005.
- [16] Kamiński G., *Silniki elektryczne o ruchu złożonym*, Oficyna Wyd. Pol. Warszawskiej, Warszawa, 1994.
- [17] Kamiński G., *Silniki elektryczne z toczącymi się wirnikami*, Oficyna Wyd. Pol. Warszawskiej, Warszawa, 2003.
- [18] Karnopp D.C., Margolis D. L., Rosenberg R.C.: *System dynamics. Modeling and simulation of mechatronic systems*, 3rd ed, John Wiley & Sons Inc., New York, 2000.
- [19] Kaźmierkowski M.P., Tunia H., *Automatic control of converter-fed driver*, Elsevier, PWN, 1994.
- [20] Koczara W., Odsprężone wytwarzanie energii elektrycznej w układach z maszynami wirującymi, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2004, R. 80, nr 1, s.1-6.
- [21] Kron G., *Equivalent circuit of electric machinery*. John Wiley and Sons, New York, 1951
- [22] Kudarauskas S., *Introduction to Oscillating Electrical Machines*, Klaipeda, 2004.
- [23] Latek W., *Zarys maszyn elektrycznych*. WNT, Warszawa, 1974.
- [24] Latek W., *Teoria maszyn elektrycznych*. Wyd. 2. WNT, Warszawa, 1987.
- [25] Levi E., Panzer M., *Electromechanical power conversion: low-frequency, low-velocity conversion processes*, McGraw-Hill, 1966.
- [26] Lyshevski S. E., *Electromechanical systems, electric machines, and applied mechatronics*. CRC Press, Boca Raton, FL, 1999.
- [27] Lyshevski S. E., *Nano- and Micro-Electromechanical Systems: Fundamentals of Nano- and Microengineering*, 2nd Ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2005.
- [28] Martin T. C., Tesla N. *The Inventions, Researches and Writings of Nikola Tesla, with Special Reference to His Work in Polyphase Currents and High Potential Lighting*. New York: The Electrical Engineer. 1984.
- [29] Manitius Z., *Maszyny elektryczne, Cz.1*, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk, 1982.
- [30] Manitius Z., *Maszyny elektryczne, Cz.2*, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk, 1984.
- [31] Matulewicz W., *Maszyny elektryczne. Podstawy, wyd. 3*, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk, 2008.
- [32] Meisel J., *Zasady elektromechanicznego przetwarzania energii*. WNT, Warszawa, 1970.
- [33] Miller, Timothy John Eastham, *Brushless permanent-magnet and reluctance motor driver*, Oxford : Clarendon Press, 1989.
- [34] Nogarède B., *Électrodynamique appliquée. Bases et principes physiques de l'électrotechnique*, Dynod, Paris 2005.
- [35] O'Kelly D., *Performance and control of electrical machines*, London, McGraw-Hill, 1991.
- [36] Paska J., *Wytwarzanie energii elektrycznej*, Oficyna Wyd. Pol. Warszawskiej, Warszawa, 2005.
- [37] Plamitzer A. M., *Maszyny elektryczne*. Wyd. 7. WNT, Warszawa, 1982.
- [38] Puchała A., *Dynamika maszyn i układów elektromechanicznych*. PWN, Warszawa, 1977.
- [39] Pustoła J., *Analiza działania szybko reagujących silników komutatorowych i impulsowych*. (Publikacja nr 10 serii wydawniczej Komitetu Elektrotechniki PAN: Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki). PWN, Warszawa, 1971.
- [40] Ronkowski M., *Modelowanie i symulacja maszyn elektrycznych metodą grafów wiązań*. *Przegl. Elektrotechniczny*, R. 80, nr 10, 2004, s. 944-947.
- [41] Ronkowski M., Nieznański J., *Electrical machines modelling – teaching aspects*, Proc. Inter. Conference on Electrical Machines. ICEM'2000. Helsinki, 2000, vol. 3, pp.1256-1260.
- [42] Roszczyk S., *Teoria maszyn elektrycznych*. WNT, Warszaw, 1979.
- [43] Skwarczyński J., Tertel Z., *Elektromechaniczne przetwarzanie energii*. Uczelniane Wyd. Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, 2000.
- [44] Sobczyk T.J., *Obwodowe modele matematyczne maszyn elektrycznych - stan aktualny i perspektywy*, Z. N. Pol. Śląskiej, Elektryka, z. 176, Gliwice 2001, pp. 31-40.
- [45] Sobczyk T.J., *Metodyczne aspekty modelowania matematycznego maszyn indukcyjnych*. WNT, Warszawa, 2004.
- [46] Turowski J., *Podstawy mechatroniki*, Łódź, Wydawnictwo WSHE 2008.
- [47] Turowski J., *Elektrodynamika Techniczna*, wyd. 2 zmienione, Warszawa, WNT, 1993.

-
- [48] White D.C., Woodson H.H., *Electromechanical Energy Conversion*. J. Wiley, New York, 1959.
- [49] Woodson H.H., Melcher J.R., *Electromechanical dynamics*. Part1: Discrete systems. Part2: Fields, forces, and motion. Part3: Elastic and Fluid media. J. Wiley, New York, 1968.
- [50] Zimny P., *Wykłady z elektrodynamiki technicznej dla specjalności zamawianej „Technologie Informatyczne w Elektrotechnice”*, (e-skrypt), Wyd. Elektrotechniki i Automatyki, Gdańsk, 2009-2010.

Materiały do nauczania interaktywnego (e-learning)

- [51] *Interactive and Unified E-Based Education and Training for Electrical Engineering*. INETELE. Project Leonardo da Vinci No: CZ/02/B/F/PP/134009, 2002–2005. Boboń A., Kudła J., Miksiewicz R.: *Maszyny elektryczne prądu przemiennego (asynchroniczne i synchroniczne)*. Multimedialny podręcznik elektroniczny wchodzący w skład projektu INETELE (www.tuke.sk/inetele)

Adresy internetowe

- [52] Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Electrical Engineering and Computer Science. www.eecs.mit.edu
- [53] 6.061 / 6.690 Introduction to Electric Power Systems (Undergraduate Courses/ Graduate Courses) <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Electrical-Engineering-and-Computer-Science/6-061Spring-2007/CourseHome/index.htm>
- [54] 6.685 Electric Machines (Graduate Courses) <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Electrical-Engineering-and-Computer-Science/6-685Fall-2005/CourseHome/index.htm>
- [55] Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Physics. <http://web.mit.edu/physics>
- [56] 8.02 Electricity and Magnetism (freshman physics class in electromagnetism, complete set of videotaped lectures) <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Physics/8-02Electricity-and-MagnetismSpring2002/CourseHome/index.htm>
- [57] Politechnika Warszawska. Zakład Maszyn Elektrycznych. Materiały dydaktyczne: wykłady, ćwiczenia rachunkowe, laboratoria, projektowanie <http://www.ime.pw.edu.pl/zme>

3. Przykładowe zastosowania maszyn elektrycznych we współczesnych systemach elektromechanicznych

3.1. Uwagi wstępne

W rozdziale omówimy głównie zastosowanie maszyn elektrycznych i transformatorów w zaawansowanych technologicznie systemach elektromechanicznych. Opiszemy cechy takich systemów oraz wymagania dotyczące maszyn elektrycznych stosowanych w systemach elektroenergetycznych oraz systemach napędowych. Przedstawimy kolejno: system elektroenergetyczny współczesnego samolotu pasażerskiego, mikro system skojarzonej generacji energii elektrycznej i ciepłej, systemy trakcyjne transportu kolejowego oraz system napędu roweru elektrycznego.

3.2. Wprowadzenie

Ze względu na współczesne tendencje do rozproszonego elektromechanicznego przetwarzania energii elektrycznej, coraz większe znaczenie mają autonomiczne systemy energetyczne (ASE). Systemy tego typu możemy podzielić na dwie podstawowe grupy:

- pokładowe ASE – systemy mobilne znajdujące się na samolotach, statkach, samochodach i rowerach;
- stacjonarne ASE – systemy służące do zasilania w energię elektryczną budynków i domów.

Jednym z kluczowych elementów ASE jest węzeł wytwórczy – źródło energii mechanicznej i bezszczotkowy generator synchroniczny (BGS). Istotną cechą nowoczesnych ASE jest praca BGS przy zmiennej prędkości obrotowej i częstotliwości. Rozwiązania tego typu znajdziemy między innymi w samochodzie hybrydowym, generatorze wiatrowym, samolocie czy agregatach prądotwórczych stosowanych w mikro-układach skojarzonej generacji energii (ang. *combined heat and power CHP*) (tab. 3.1).

Tabela 3.1

Zakres mocy i prędkości obrotowych generatorów w nowoczesnych ASE

Zastosowanie	Moc [kW]	Prędkość obrotowa [obr/min]
Samochód hybrydowy	30 – 130	0 – 13000
Mały generator wiatrowy	2 – 10	300 – 1700
Samolot	120 – 150	11000 – 23000
Agregat prądotwórczy (CHP)	1 – 150	2000 – 4000

Kolejnym przykładem zastosowania zaawansowanych technologicznie systemów elektroenergetycznych jest transport kolejowy. Zgodnie z wytycznymi Unii Europejskiej dotyczącymi polityki rozwoju transportu zakłada się, że do 2020 roku powinna podwoić się liczba pasażerów korzystających z transportu publicznego. Stawia to nowe wyzwania i możliwości rozwoju przed takimi producentami jak np. ALSTOM Transport. Należy zauważyć, że osiągnięcie zamierzonych celów możliwe jest jedynie

poprzez zastosowanie silników trakcyjnych o większych mocach. Zastosowanie tradycyjnych rozwiązań prowadzi do zwiększenia masy pojazdów. Jest to sprzeczne z innym priorytetem, który zakłada redukcję masy pojazdów w celu zmniejszenia kosztów eksploatacji oraz zmniejszania uciążliwości dla środowiska. Zastosowanie pojazdów niskopodłogowych (ang. *low floor*) czy dwupoziomowych (ang. *double deck*) wymaga zmniejszenia objętości i masy układów napędowych. Prowadzi to do oczywistego wniosku, że rozwój w zakresie układów napędowych, w tym i silników elektrycznych, jest niezbędnym elementem dla zwiększenia atrakcyjności transportu kolejowego.

Kluczową rolę w powyższych systemach wypełniają zawansowane technologicznie rozwiązania maszyn elektrycznych.

Jako przykłady nowoczesnych systemów elektroenergetycznych zostaną opisane:

- pokładowy system elektroenergetyczny samolotu pasażerskiego,
- system kogeneracji energii elektrycznej i ciepłej,
- systemy trakcyjne transportu kolejowego,
- systemy trakcyjne rowerów i skuterów elektrycznych.

3.3. System elektroenergetyczny na pokładzie współczesnego samolotu

3.3.1. Koncepcja systemu

Rozwój pokładowych systemów energetycznych współczesnych samolotów związany jest z ideami określanymi w języku angielskim jako "Powered-by-wire" oraz "More Electrical Aircraft" (MEA) [2–5, 7, 13]. U podstaw tych idei leży opracowanie technologii umożliwiających zastąpienie ciężkich i zawodnych systemów hydraulicznych i pneumatycznych ich elektromechanicznymi odpowiednikami. Powinno to zapewnić realizację takich celów jak [6, 7]:

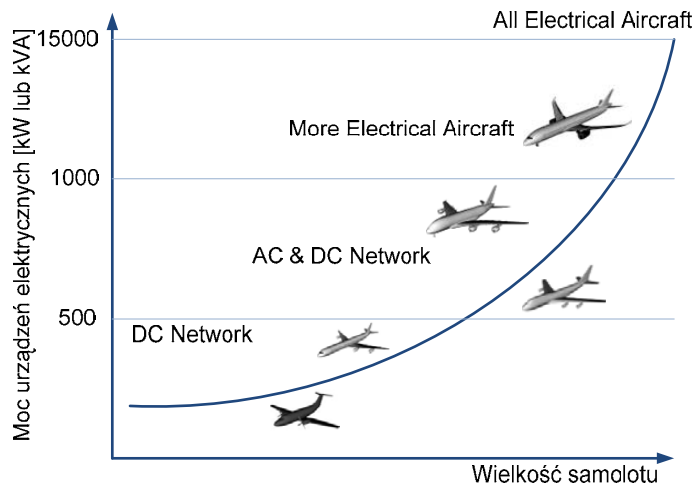
- wzrost całkowitej sprawności systemu,
- zmniejszenie wagi, objętości układów wykonawczych,
- zmniejszenie kosztów,
- zwiększenie niezawodności i bezpieczeństwa,
- zmniejszenie kosztów utrzymania i serwisu,
- zwiększenie funkcjonalności,
- łatwość implementacji,
- wykorzystanie technologii przyjaznych środowisku.

Osiągnięcie wyżej wymienionych celów jest możliwe dzięki badaniom naukowym prowadzonym przy ścisłej współpracy przemysłu lotniczego, ośrodków naukowo-badawczych i akademickich. Z inicjatywy europejskiego przemysłu lotniczego, w latach 2006-2009, realizowano projekt MOET (ang. *More Open Electrical Technologies*) [13]. Projekt finansowany był w ramach VI Programu Ramowego Unii Europejskiej, a głównym koordynatorem była firma Airbus. Celem projektu było opracowanie nowych standardów projektowania pokładowych systemów elektroenergetycznych samolotów pasażerskich. W projekcie wzięło udział 46 firm oraz 15 ośrodków naukowo-badawczych z 14 krajów europejskich. Jednym z partnerów projektu MOET była Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych Wydziału EIA PG [MiS SME]. Główne zadania realizowane przez KEiME dotyczyły:

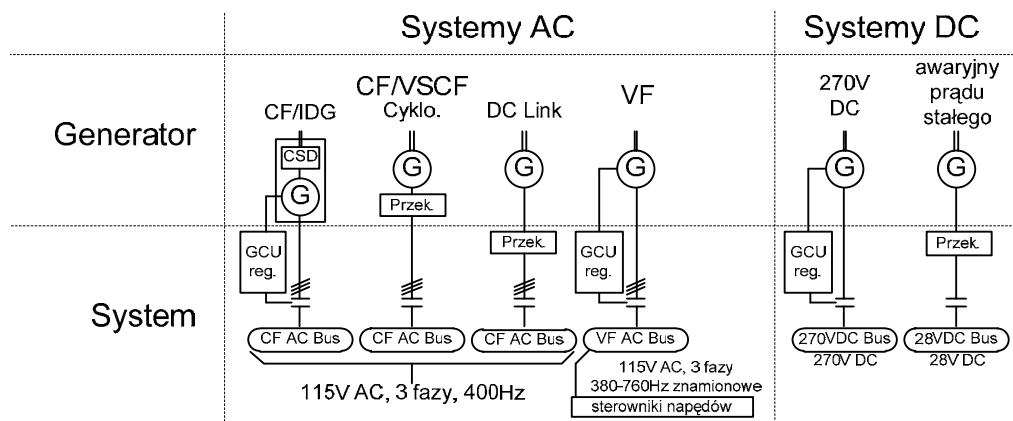
- sterowania bezczujnikowej wysokoobrotowej maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi do napędu w układach wentylacji, chłodzenia i odladzania (Liebherr),
- modelowanie pokładowego systemu generacji i dystrybucji energii elektrycznej z uwzględnieniem wysokoobrotowego generatora synchronicznego (ThalesGroup) oraz układów transformacji napięcia ATU + ATRU.

Poziom mocy urządzeń elektrycznych instalowanych w samolotach wzrasta od szeregu lat [5] (rys. 3.1). Wynika to z realizacji koncepcji samolotu elektrycznego (MEA) i konieczności zasilania urządzeń elektromechanicznych zastępujących układy pneumatyczne i hydrauliczne. Wzrost zużycia energii elektrycznej

w samolotach, zwłaszcza pasażerskich, wynika również z coraz większych wymagań pasażerów dotyczących komfortu lotu (klimatyzacja, urządzenia audio-video, sieć internetowa, telefonia itd.).



Rys. 3.1. Poziom mocy urządzeń elektrycznych instalowanych we współczesnych samolotach [5]



Rys. 3.2. Podstawowe struktury ASE na pokładach samolotów [5]

W latach czterdziestych i pięćdziesiątych XX wieku najczęściej stosowano generatory prądu stałego o napięciu 28V. Maksymalny dopuszczalny prąd twornika na poziomie 400 A ogranicza moc takich generatorów do około 12kW. W nowszych rozwiązaniach np. w myśliwcu Lockheed Martin F-22 Raptor [15], stosuje się generatory prądu stałego o napięciu 270V osiągających do 100kW mocy. Pierwsze generatory napięcia przemiennego zastosowano w myśliwcu McDonnell Douglas F-4 Phantom pod koniec lat 60. XX wieku. Początkowo generatory AC pracowały w systemach o napięciu 115 VAC oraz stałej częstotliwości 400 Hz. Wymagało to zastosowania skomplikowanych przekładni hydro-mechanicznych w celu utrzymania stałej prędkości generatora przy zmianach prędkości napędu samolotu (ang. *CSD – constant speed driver*). Postęp w dziedzinie energoelektroniki pozwolił na wyeliminowanie zawodnego systemu stabilizacji prędkości i wprowadzenie systemów o zmiennej prędkości obrotowej i stałej częstotliwości (ang. *VSCF – variable speed/constant frequency*). Napięcie z generatora o zmiennej częstotliwości jest przekształcane do poziomu 115 VAC i 400 Hz przez przekształtnik energoelektroniczny. Układy takie stosowano między innymi w samolotach pasażerskich Boeing 737, Airbus A340. W najnowszych konstrukcjach samolotów projektowanych i budowanych

zgodnie z ideą „samolotu bardziej elektrycznego” stosuje się ASE o zmiennej częstotliwości i napięciach 115 VAC (Airbus A380 [9]) lub 230 VAC (Boeing 787 [10]). Podstawowe struktury ASE stosowane na pokładach samolotów zostały przedstawione na rys. 3.2.

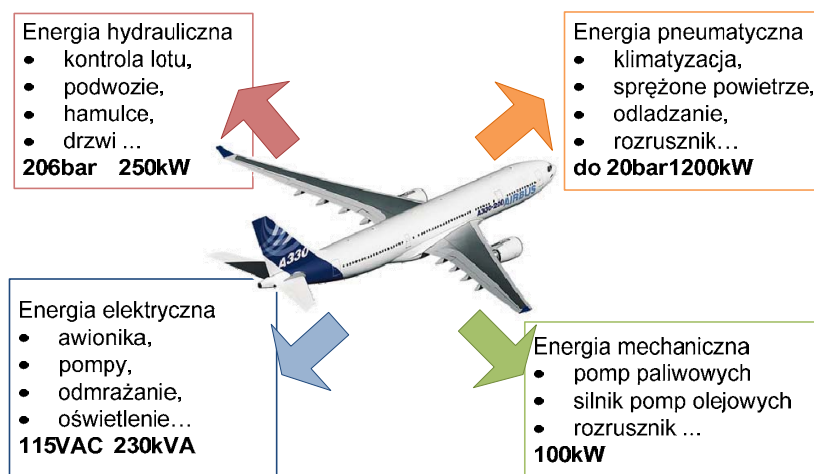
Przykłady generatorów i typów ASE stosowanych we współczesnych samolotach pasażerskich i wojskowych zestawiono w tab. 3.2. W Airbusie A380 zainstalowane są cztery generatory synchroniczne o mocy 150 kVA (firmy Goodrich). W samolocie Boeing 787 Dreamliner każdy z silników turbowentylatorowych napędza po dwa generatory elektryczne o mocy 250kVA 230V (firmy Hamilton Sundstrand). Należy zauważyć, że dwa generatory VFG w Boeing’u 787 zajmują niewiele więcej miejsca niż jeden generator o mocy 120kVA (o stałej prędkości) instalowany kilkanaście lata temu w samolotach Boeing 767 [7, 8].

Tabela 3.2

Typy generatorów i typy ASE stosowanych w samolotach pasażerskich i wojskowych [5]

Typ generatora	Samoloty cywilne		Samoloty wojskowe
IDG/CF 115 VAC/400Hz	B777 2 x 120kVA A340 4 x 90 kVA B737NG 2 x 90 kVA	B747-X 4 x 120 kVA B717 2 x 40 kVA B767-400 2 x 120 kVA	
VSCF (Cycloconverter) 115 VAC/400Hz			F-18E/F 2 x 60/65 kVA
VSCF (DC link) 115 VAC/400Hz	B777 2 x 20 kVA	MD-90 2 x 75 kVA	
VF 115 VAC/400-760Hz	A380 4 x 150 kVA	Global Ex 2 x 40 kVA Horizon 2 x 20 kVA	Boeing JSF 2 x 50 kVA
VF 230 VAC/400-760Hz	B787 4x250kVA		
270 VDC			LM F-22 Raptor 2 x 70 kVA BJSF X-32A/B/C 2 x 50 kVA

Wykorzystanie energii elektrycznej do zasilania pokładowych systemów elektroenergetycznych osiągnęło taki poziom, przy którym zapewnienie jej niezawodnej generacji i dystrybucji stało się jednym z kluczowych zagadnień [5].



Rys. 3.1. Instalacje energetyczne w standardowym samolocie pasażerskim – Airbus A330 [7, 8]

W klasycznych samolotach pasażerskich energia z silnika odrzutowego jest dostarczana w czterech formach: elektrycznej, mechanicznej, hydraulicznej i pneumatycznej (rys. 3.3) [1, 7]:

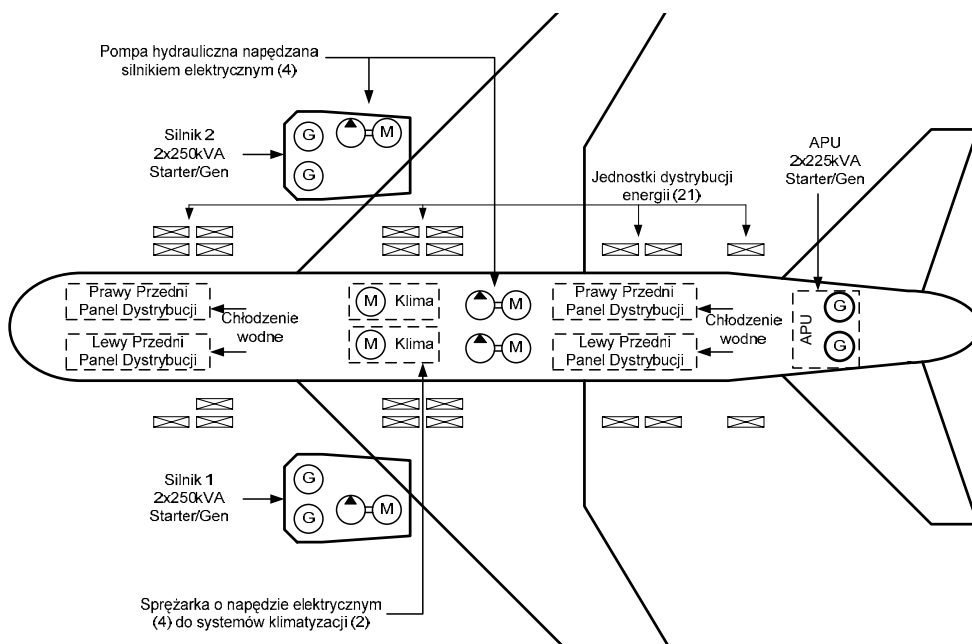
- system mechaniczny dostarcza energię do napędu urządzeń pomocniczych takich jak pompy olejowe, paliwowe i hydrauliczne oraz bezpośrednio lub poprzez przekładnię napędza generatory elektryczne,
- system hydrauliczny wykorzystywany jest w mechanizmach sterujących lotem, podwoziem, drzwiami itp.,
- system pneumatyczny wykorzystywany jest w układach odladzania oraz systemach klimatyzacji i uzdatniania powietrza (ang. *cabin environmental control*),
- system elektryczny zasila awionikę, oświetlenie, silniki elektryczne, kuchnie itp.

W nowoczesnych samolotach, typu MEA lub AEA (ang. *All Electric Aircraft*), zakłada się, że będzie rozprowadzana jedynie energia elektryczna, a większość układów hydraulicznych i pneumatycznych zostanie zastąpiona przez ich elektromechaniczne lub elektrohydrauliczne odpowiedniki [1, 7, 8]. Wykorzystanie energii elektrycznej powinno znacznie uprościć system rozprowadzenia energii oraz zwiększyć jego niezawodność (tab. 3.3).

Tabela 3.3

Porównanie systemów dystrybucji energii w samolocie [1]

System	Złożoność	Konserwacja	Dojrzałość technologii
Elektryczny	złożony	prosta	dojrzała, samoloty elektryczne - niedojrzała
Hydrauliczny	prosty	złożona i niebezpieczna	dojrzała
Mechaniczny	bardzo złożony	częsta, wolna	bardzo dojrzała
Pneumatyczny	prosty	złożona	bardzo dojrzała

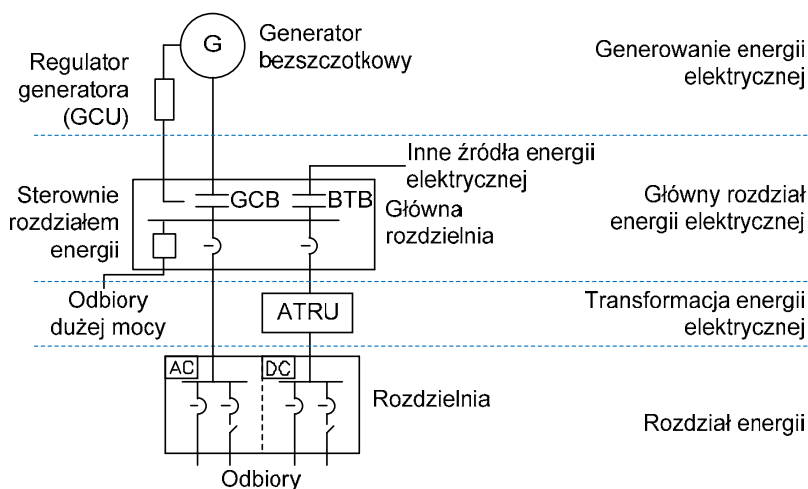


Rys. 3.4. ASE na pokładzie Boeing 787 Dreamliner [5]

Zapotrzebowanie na energię elektryczną w samolotach przekroczyło 500kW co oznacza, że nie może być ona dostarczana z pojedynczego generatora. Konwencjonalne rozwiązania ASE w samolotach nie pozwalają na zasilanie pojedynczych odbiorów z dwóch różnych sieci, jak również nie ma możliwości podłączenia więcej niż jednego generatora do pojedynczej sieci. W samolotach bardziej elektrycznych system dystrybucji energii elektrycznej jest zaprojektowany bardziej elastycznie, między innymi pozwala na zasilanie pojedynczych odbiorów z więcej niż jednej sieci [1].

Podstawowe elementy składowe typowego ASE współczesnego samolotu to (rys. 3.5) [2]:

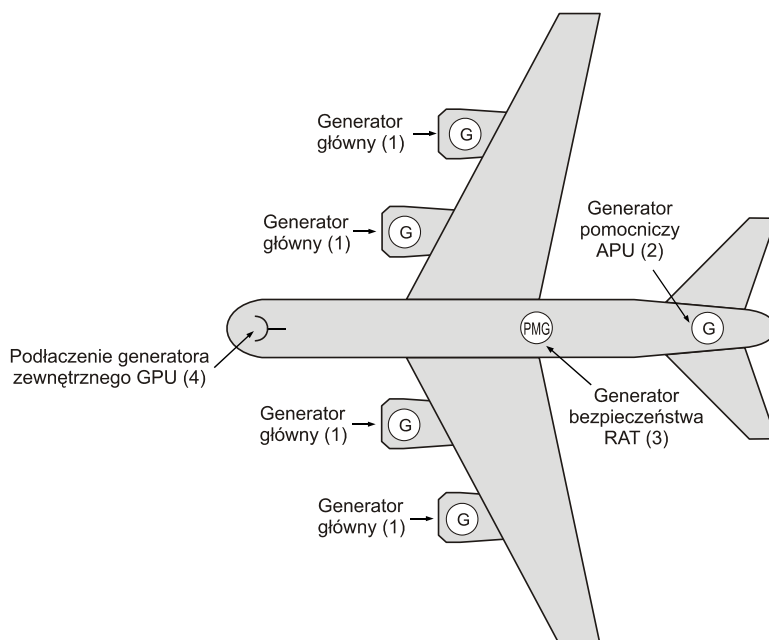
- generator wraz z regulatorem (GCU – Generator Control Unit),
- główny rozdział energii,
- transformacja energii: ATRU (autotransformator z prostownikiem),
- rozdział energii na odbiory AC i DC.



Rys. 3.5. System elektroenergetyczny współczesnego samolotu [2]

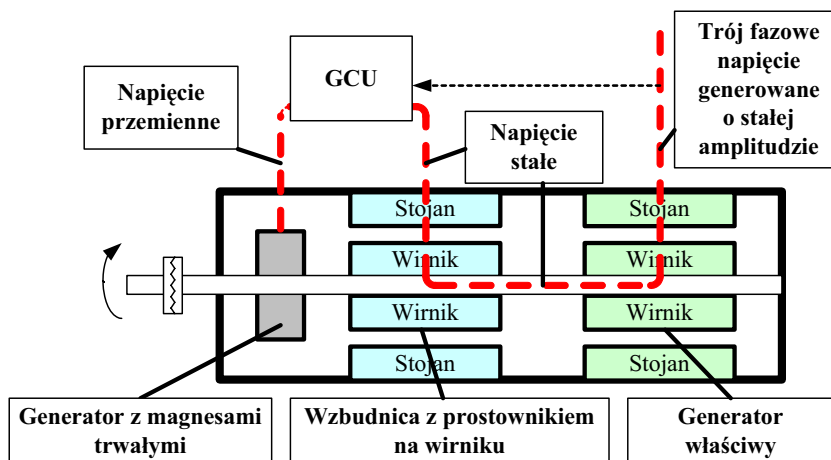
3.3.2. Budowa trójstopniowego generatora synchronicznego

Na pokładzie współczesnego samolotu znajduje się kilka generatorów energii elektrycznej (rys. 3.6). Podstawowym źródłem zasilania są generatory główne (ang. *main generator*) napędzane bezpośrednio lub przez przekładnię z silników odrzutowych samolotu (rys. 3.10). W zależności od wymaganej mocy instaluje się jeden lub dwa generatory pod każdym silnikiem odrzutowym. W tylnej części samolotu znajduje się generator pomocniczy (ang. *auxiliary power unit APU*). APU wykorzystywany jest do zasilania sieci pokładowej w przypadku awarii generatorów głównych lub podczas postoju na lotnisku. Dodatkowo generatory główne jak i pomocnicze mogą pracować jako silniki i być wykorzystane do rozruchu silników odrzutowych. W przypadku stanów awaryjnych, gdy zawiodą generatory główne i pomocnicze, najważniejsze instalacje w samolocie (awioniki) zasilane są z generatora awaryjnego napędzanego przez turbinę powietrzną (ang. *ram air turbine RAT*) wysuwaną z kadłuba samolotu. Jako generatory awaryjne stosuje się przeważnie prądnice o niewielkich mocach (od 5 do 15kVA) wzbudzone magnesami trwałymi. Na lotnisku, gdy główne silniki samolotu nie pracują, instalacja elektryczna zasilana jest z generatora naziemnego (ang. *ground power unit GPU*) [4].



Rys. 3.6. Podstawowe i pomocnicze źródła energii elektrycznej w samolocie: 1 generator główny, 2 – generator pomocniczy (*auxiliary power unit APU*), 3 – generator bezpieczeństwa (*ram air turbine RAT*), 4 – generator naziemny (*ground power unit GPU*) [4]

Nowoczesny trójstopniowy generator energii elektrycznej w samolotach typu MEA składa się z trzech maszyn elektrycznych osadzonych na wspólnym wale (rys. 3.7) [1, 4, 5].



Rys. 3.2. Nowoczesny trójstopniowy generator energii elektrycznej stosowany w samolotach typu MEA

Generator główny to klasyczny trójfazowy generator synchroniczny, w którym uzwojenie wzbudzenia znajduje się na wirniku, a uzwojenie twornika na stojanie. Z uwagi na wysoką prędkość obrotową wirnik budowany jest przeważnie jako cylindryczny, a uzwojenie wzbudzenia rozłożone w żłobkach. Żłobki zabezpieczone są specjalnymi klinami w celu zabezpieczenia uzwojenia przed działaniem sił odśrodkowych. Dodatkowo połączenia czołowe uzwojeń wirnika są ostosnięte za pomocą metalo-

wych niemagnetycznych pierścieni. W przypadku wirników o konstrukcji wydatno-biegunowej w przestrzeń między biegunami znajdują się aluminiowe kliny, których zadaniem jest polepszenie warunków chłodzenia uzwojenia wzbudzenia (rys. 3.8). Klatki tłumiące znajdują się na żłobkach umieszczonych na powierzchni nabiegunków (maszyny wydatno biegunowe) lub w przestrzeni tzw. dużego zęba (maszyny cylindryczne).



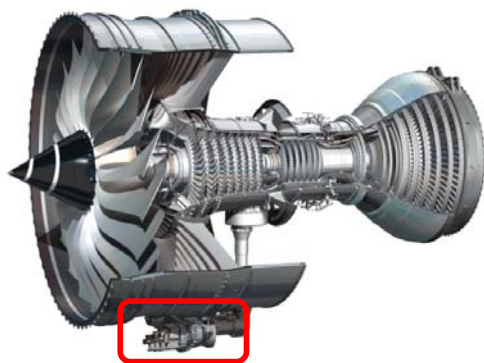
Rys. 3.8. Wirnik nowoczesnego trójstopniowego generatora synchronicznego: a) na wspólnym wale znajdują się od lewej: wzbudzenie generatora z magnesami trwałymi, wzbudzenie głównego generatora, twornik wzbudnicy, b) twornik wzbudnicy z wirującym prostownikiem diodowym [11]

Uzwojenie twornika, z uwagi na dużą prędkość obrotową, składa się z połączonych równolegle cewek o małej liczbie zwoi (spotyka się nawet cewki o jednym zwoju). W celu zmniejszenia zawartości wyższych harmonicznych w rozkładzie indukcji magnetycznej w szczeliny stosuje się dużą liczbę żłobków na biegun i fazę oraz uzwojenia dwuwarstwowe. W celu ograniczenia strat wywołanych prądami wirowymi rdzenie stojana i wirnika złożone są z cienkich blach wykonanych ze stopu żelazo-kobalt [4].



Rys. 3.9. Wirnik i stojan nowoczesnego trójstopniowego generatora synchronicznego [4,11]

Uzwojenie wzbudzenia jest zasilane ze wzbudnicy poprzez wirujący prostownik diodowy. Wzbudnica to prądnica synchroniczna odwrócona – uzwojenie wzbudzenia znajduje się na stojanie, a uzwojenie twornika na wirniku. Uzwojenie twornika wzbudnicy jest połączone bezpośrednio z wirującym prostownikiem. Uzwojenie wzbudzenia wzbudnicy zasilane jest poprzez regulator generatora (ang. *generator control unit* GCU) z prądnicy o magnesach trwałych [4].



Rys. 3.10. Położenie głównego generatora synchronicznego pod silnikiem turbowentylatorowym.
This photograph is reproduced with the permission of Rolls-Royce plc, copyright © Rolls-Royce plc 2010

Częstotliwość napięcia wyjściowego generatora zależy od prędkości obrotowej wirnika. Wirnik generatora może być połączony bezpośrednio lub poprzez przekładnię z wałem silnika odrzutowego (rys. 3.10). Typowe prędkości obrotowe generatorów w samolotach wynoszą od 7200 do 27 000 obr/min a moc wyjściowa od 30 do 250 kVA.

3.3.3. Literatura

- [1] Avery C.R., Burrow S.G., Mellor P.H.: *Electrical generation and distribution for the more electric aircraft*. 42nd International Universities Power Engineering Conference, 2007. UPEC 2007. Page(s):1007–1012.
- [2] Chang J., Wang A.: *New VF-Power System Architecture and Evaluation for Future Aircraft*, IEEE Transactions On Aerospace And Electronic Systems Vol. 42, No. 2 April 2006
- [3] Croke S. Herrenschmidt J.: *More electric initiative-power-by-wire actuation alternatives*. Proceedings of the IEEE 1994 National Aerospace and Electronics Conference, 1994. NAECON 1994. Pages 1338–1346 vol.2
- [4] Gieras J.: *Advancements in Electric Machines*. Springer 2008.
- [5] Moir I., Seabridge A.: *Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionic Subsystem Integration*. AIAA Education Series, 2001.
- [6] Raimondi G. M., Sawata T., Holome M., Barton A., White G., Coles J., Mellor P. H., and Sidell N.: *Aircraft embedded generator system*. International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2002., page(s): 217–222, April 2002.
- [7] Rosero, J.A., Ortega J.A., Aldabas, E., Romeral L.: *Moving towards a more electric aircraft*. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Volume: 22, Issue: 3 pp: 3–9, March 2007
- [8] Orgando J.: *Boeing's 'More Electric' 787 Dreamliner Spurs Engine Evolution*. Design News, June 3, 2007 [link](#).

Adresy stron internetowych

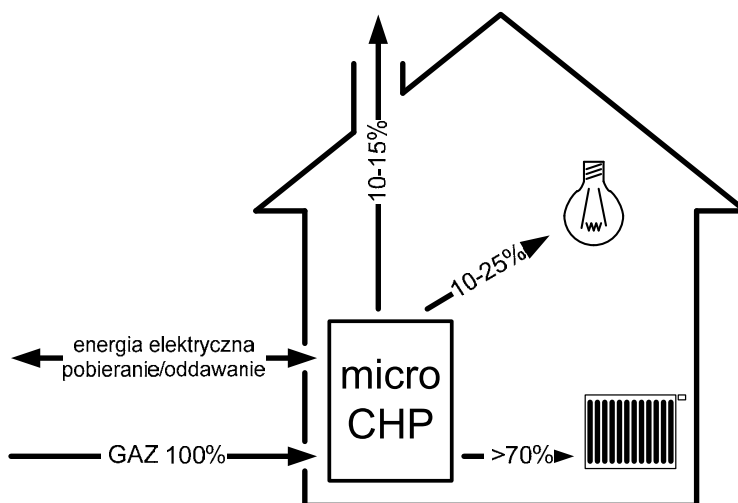
- [9] Airbus A380 www.airbus.com/en/aircraftfamilies/a380/
- [10] Boeing 787 www.boeing.com/commercial/787family/index.html
- [11] Goodrich www.goodrich.com
- [12] Hamilton Sundstrand www.hamiltonsundstrand.com
- [13] MOET www.eurtd.com/moet/
- [14] Thales Group www.thalesgroup.com
- [15] The Joint Strike Fighter Program www.jsf.mil

3.4. System kogeneracji energii elektrycznej i ciepłej

3.4.1. Koncepcja systemu

Urządzenia typu micro-CHP (micro-Combined Heat and Power) służą do skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej. Mogą one pracować jako część krajowego systemu elektroenergetycznego lub jako autonomiczny system elektroenergetyczny (ASE). Rysunek 3.11 przedstawia ogólną zasadę pracy urządzenia micro-CHP.

Urządzenie to pobiera gaz ziemny lub inne paliwo kopalniane, następnie spala je w silniku spalinowym lub turbinie napędzając generator. Generator jest w stanie zaspokoić od 50 do 100% zapotrzebowania na energię elektryczną. Spaliny służą do wstępnego podgrzewania medium ogrzewającego dom. W zależności od ilości zimnych dni w roku tego typu instalacji może się zwrócić w okresie od 2 do 10 lat [24–27].



Rys. 3.11. System typu micro-CHP zasilający pojedyncze gospodarstwo

Rosnące znaczenie systemów kogeneracji energii elektrycznej i ciepłej podkreślają nowe opracowania przemysłowe i liczne prace naukowe. Również w Katedrze Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych prowadzone są badania w tym zakresie. Mgr inż. Filip Kutt realizuje grant promotorski pt. "Modele bezszczotkowego generatora synchronicznego do badania autonomicznego systemu elektroenergetycznego".

3.4.2. Generatory elektryczne stosowane w systemach micro-CHP

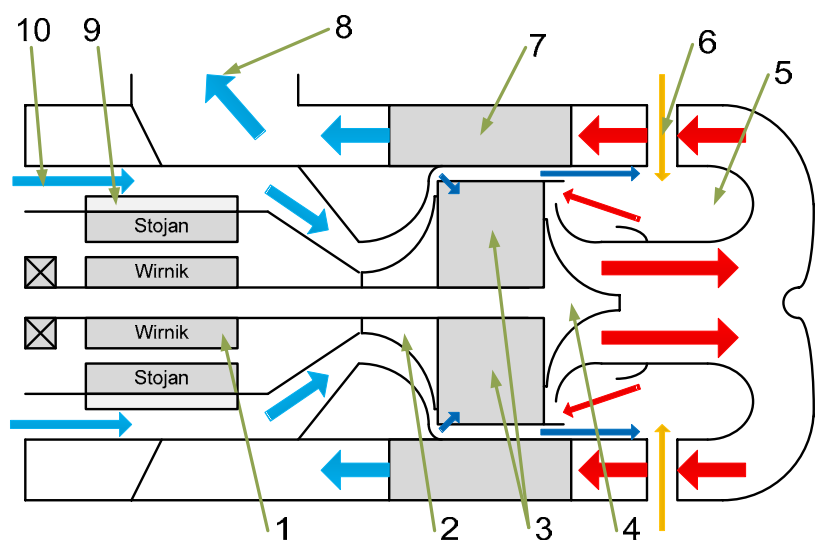
Jednym z kluczowych elementów urządzeń CHP jest przetwornik elektromechaniczny – generator energii elektrycznej napędzany turbiną gazową lub silnikiem spalinowym. W systemach całkowicie autonomicznych, ze względu na charakterystykę mechaniczną źródła momentu, generator musi pracować ze zmienną prędkością obrotową zależną od obciążenia instalacji elektrycznej. Nowoczesne generatory stosowane w systemach micro-CHP muszą spełniać następujące wymagania [18]:

- konstrukcja bezszczotkowa,
- minimalna liczba części z jakich składa się generator,
- mała objętość,
- duża gęstość energii (wysoki stosunek mocy wyjściowej do masy oraz mocy wyjściowej do objętości),
- wysoka sprawność,
- niskie koszty produkcji.

Dwa pierwsze wymagania wynikają z konieczności zwiększenia niezawodności systemu. Zmniejszenie objętości turbiny możliwe jest poprzez eliminację przekładni mechanicznej. W konsekwencji wirnik generatora elektrycznego porusza się z tą samą prędkością co wirnik turbiny gazowej. Wysoka prędkość obrotowa (30 000–120 000 obr/min) to również wysoka częstotliwość (nawet do 2,4 kHz) i mniejszą objętość generatora. Dalsze zmniejszenie wielkości generatora i zwiększenie gęstości energii jest możliwe przez stosowanie wydajnych systemów chłodzenia. Wzrost sprawności uzyskano między innymi dzięki eliminacji przekładni mechanicznej oraz stosowanie łożysk bezstykowych (powietrznych lub magnetycznych). Zastosowanie wysokoenergetycznych magnesów trwałych spowodowało zmniejszenie strat mocy w wirniku.

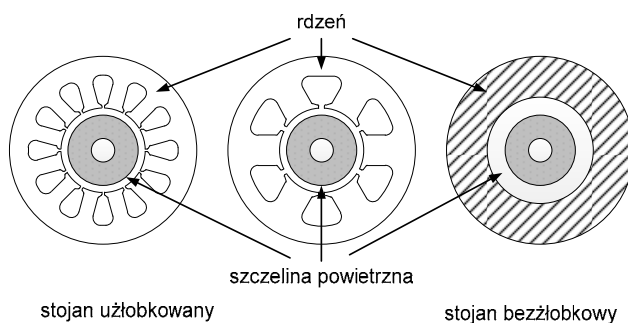
Wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną oraz większe oczekiwania względem sprawności ASE, wymagają zastosowania do ich budowy nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych oraz materiałów.

W systemach micro-CHP małej mocy (30–200 kW) jako generatory wykorzystywane są maszyny z magnesami trwałymi zintegrowane z turbiną (rys. 3.12) [16, 23] lub bezszczotkowe generatory synchroniczne (BGS) (rys. 3.15).



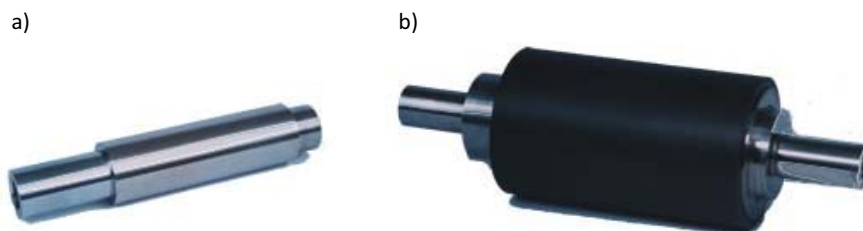
Rys. 3.12. Mikroturbina gazowa z wbudowanym generatorem bezszczotkowym z magnesami trwałymi:
 1 — generator, 2 — kompresor, 3 — łożyska powietrzne, 4 — turbina, 5 — komora spalania, 6 — wtryskiwacz paliwa, 7 — odzysknicza ciepła (rekuperator), 8 — wylot spalin, 9 — żebra chłodzące generatora, 10 — wlot powietrza [18, 25]

Elementy turbiny gazowej oraz wirnik generatora z magnesami trwałymi umieszczone są na jednym wale. Stojan i wirnik generatora jest wykonany z pakietu blach grubościami 0,2 mm dla częstotliwości poniżej 400Hz i o grubości około 0,1 mm dla częstotliwości powyżej 700 Hz. Do budowy generatorów stosuje się nisko-stratne blachy ze stali krzemowej lub stopów żelaza z kobaltem. Stojan może być wykonany jako bezżłobkowy (rys. 3.13) [22]. Uzwojenie twornika, z uwagi na wysokie częstotliwości, wykonuje się z wiązki Litz'a [16].



Rys. 3.13. Struktury stojana wysokobrotowego generatora [22]

Do budowy wirników stosuje się najczęściej wysokoenergetyczne magnesy trwałe np. neodymowe NdFeB lub samarowo-kobaltowe SmCo. Magnesy w kształcie wycinków pierścienia klejone są na powierzchni wirnika oraz zabezpieczone przed działaniem sił odśrodkowych za pomocą specjalnych tulej lub bandaży. Tuleje mogą być wykonane z niemagnetycznych stopów metali Inconel 718 (NiCoCr) [30] lub kompozytów węglowo-grafitowych (rys. 3.14). Tuleje metalowe mają mniejszą wytrzymałość mechaniczną (250m/s vs 320m/s) ale wyższą dopuszczalną temperaturę pracy niż tuleje kompozytowe (290C vs 180C) [18].



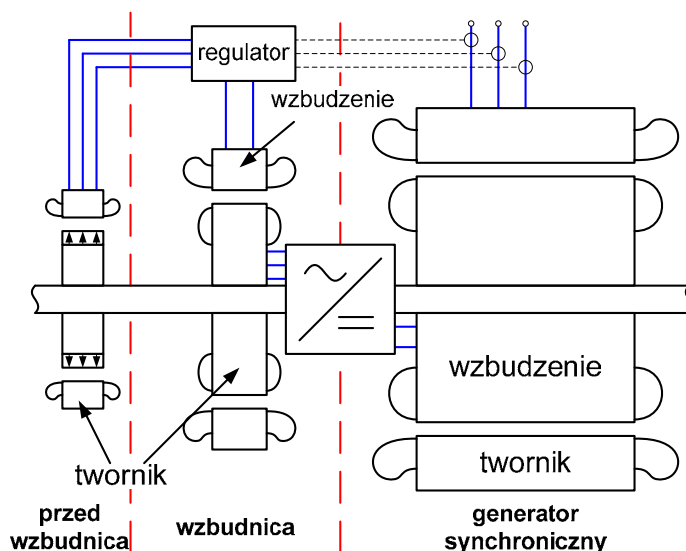
Rys. 3.14. Wirniki wysokobrotowych generatorów z magnesami trwałymi. Wirnik zabezpieczony tuleją: a) z metalu niemagnetycznego (Inconel 718) b) kompozytów węglowo-grafitowych [19, 31].

Średnica wirnika dobierana jest z uwagi na wytrzymałość na zginanie oraz maksymalną wysokość magnesów trwałych jaka może być utrzymana przez pierścień (lub bandaż) ochronny. Średnica zewnętrzna stojana oraz długość generator jest obliczana biorąc pod uwagę moc wyjściową oraz średnicę zewnętrzną wirnika. Przy projektowaniu tego typu generatorów ważnym zagadnieniem są obliczenia cieplne. Należy się upewnić czy temperatura wirnika nie przekroczy temp. Curie, która może spowodować odmagnesowanie magnesów trwałych [16,22].

W turbinach większych mocy (200 kW ÷ 1 MW) stosuje się trójstopniowe bezszczotkowe generatory synchroniczne. Są to układy składające się z 3 maszyn na wspólnym wale: przedwzbudnicy, wzbudnicy oraz maszyny synchronicznej (rys.3.15). Budowa tych maszyn jest analogiczna do rozwiązań stosowanych w lotnictwie i opisanych w rozdziale 3.3.2. W prowadzonych badaniach nad tego typu konstrukcjami rozważ się możliwość połączenia przedwzbudnicy i wzbudnicy w jedną maszynę o wzbudzeniu hybrydowym. Takie rozwiązanie pozwoli na zmniejszenie gabarytów i wagi generatora [17, 20, 21].

Wdrożenie urządzeń micro-CHP w lokalnych strukturach energetycznych pozwoli na bardziej ekologiczne wykorzystanie źródeł energii pierwotnej (paliw płynnych, gazu ziemnego, biopaliw) poprzez skojarzone wytwarzanie energii cieplnej oraz elektrycznej, uzyskując wysokie sprawności na poziomie 85–90%.

Badania nad metodami rozproszonej kogeneracji energii elektrycznej i ciepłej, a zwłaszcza nad instalacjami micro-CHP są intensywnie prowadzone w krajach uprzemysłowionych, takich jak Japonia i Stany Zjednoczone. Zastosowanie ASE ma duże znaczenie z punktu widzenia obszarów wiejskich, podmiejskich oraz małych miast. Systemy micro-CHP pozwolą uniezależnić się od zewnętrznych, niedługo daleko położonych, dostawców energii elektrycznej i ciepłej oraz zabezpieczyć się na wypadek awarii krajowego systemu elektroenergetycznego.



Rys. 3.15. Schemat nowoczesnego trójstopniowego bezszczotkowego generatora synchronicznego

3.4.3. Literatura

- [16] Aglén O.: A High-Speed Generator for Microturbines. Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Technology, 2001.
- [17] Amara Y., Vido L., Gabsi M., Hoang E., Lécrivain M., Chabot F.: Hybrid excitation synchronous machines: Energy efficient solution for vehicle propulsion, IEEE 2006.
- [18] Gieras J.: Advancements in Electric Machines. Springer 2008.
- [19] Gieras J.: Advancements in Electric Machines. Lecture No 6. High Speed Permanent Magnet Brushless Machines. University of Technology and Life Science. Bydgosz. Poland. 2009.
- [20] Hanczewski P.: Prądnica synchroniczna o wzbudzeniu hybrydowym. Praca doktorska Pol. Warszawska 2008
- [21] Hoang E., Lécrivain M., Gabsi M.: A new structure of a switching flux synchronous polyphase machine with hybrid excitation, IEEE 2006.
- [22] Wang F.; Zong M.; Zheng W.; Guan E.: Design features of high speed PM machines. Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2003. ICEMS 2003. Page(s):66 - 70 vol.1.
- [23] Wang J., Wang F., Yu Tao: Analysis of Rotor Losses for a High Speed PM Generator. Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. page(s): 889-892 Vol. 2.

Adresy stron internetowych

- [24] Baxi Heating UK Ltd www.baxi.co.uk
- [25] Capstone Turbine Corporation www.capstoneturbine.com
- [26] The Combined Heat and Power Association www.chpa.co.uk
- [27] WhisperGen™ heat and power system www.whispertech.co.nz
- [28] www.oftech.com
- [29] www.moog.it

[30] Special Metals Corporation www.specialmetals.com

[31] Calnetix www.calnetix.com

[32] S2M www.s2m.fr

3.5. Współczesne systemy trakcyjne transportu kolejowego

3.5.1. System trakcyjny klasyczny – szynowy

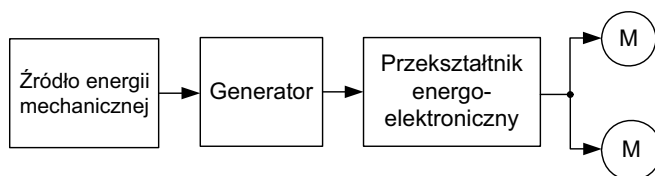
Napęd elektryczny na kolei wprowadzono dzięki pracom Ernsta Wernera von Siemens oraz inżynierów amerykańskich (m.in. T. Edisona). W tamtym okresie pojazdy trakcyjne zasilano przy pomocy trzeciej szyny (1890, Londyn), natomiast zasilanie górne stosowane było głównie w sieciach tramwajowych (F. Sprague, Richmond 1888). Po wynalezieniu pantografu i wprowadzeniu liny nośnej ten typ zasilania wprowadzono również także na kolejach głównych (od pierwszej dekady XX wieku). Początkowo pojazdy elektryczne na kolei, oprócz tramwajów i SKM stosowano przede wszystkim na trudnych odcinkach górskich, gdzie efekty ekonomiczne polepszano wykorzystując lokalne elektrownie wodne. W pierwszej połowie XX wieku pojazdy trakcyjne zasilane były głównie prądem stałym. Udoskonalenie zasilania prądem przemiennym spowodowało większą popularność tego typu zasilania w liniach i sieciach elektryfikowanych w późniejszym okresie [35].

Pierwsza eksperymentalna lokomotywa spalinowo-elektryczna zbudowana przez General Electric według pomysłu H. Lempa na kolei pojawiła się w 1914. Upowszechnienie zastosowania spalinowozów na kolei przypada na lata 20 XX stulecia (stosowane głównie w ruchu manewrowym i na trasach specjalnych). W USA spalinowozy do ruchu normalnego wprowadzono pod koniec lat 30 XX wieku [35]. W ulepszonej formie stosowane są do dnia dzisiejszego na odcinkach, na których nadal brak trakcyjnych linii elektrycznych.

Zainteresowanie maszynami elektrycznymi w transporcie kolejowym wynikało głównie z problemów związanych z przeniesieniem mocy z silnika napędowego (początkowo parowego, a w późniejszym okresie silnika spalinowego Diesla) na koła jezdne. Początkowo, kiedy moce konstruowanych pojazdów były niewielkie, problemy te udawało się rozwiązywać stosując sprzęgła i przekładnie mechaniczne, jednak kiedy wzrosło zapotrzebowanie na moc w pojazdach trakcyjnych zaczęto poszukiwać innego rozwiązania przeniesienia napędu. Powstały wówczas pojazdy trakcyjne z tzw. „sprzęgłami elektrycznymi”. Jak już wspomniano wyżej źródłem energii mechanicznej w pojazdach trakcyjnych były początkowo silniki parowe, a później silniki spalinowe Diesla. Jako generatory początkowo wykorzystywano prądnice prądu stałego, a jako silniki napędowe stosowano silniki szeregowo-prądu stałego. Silniki te znalazły zastosowanie w napędzie trakcyjnym ze względu na możliwości uzyskania dużych wartości momentu obrotowego przy małych prędkościach (cecha ta jest szczególnie istotna w napędach pojazdów) i łatwość sterowania. Jedną z wad tych silników jest możliwość rozbiegania się w przypadku braku obciążenia przy zasilaniu obwodów twornika i wzbudzenia, jednak dla zastosowań trakcyjnych wada ta nie ma istotnego znaczenia, ponieważ silniki napędowe na stałe są połączone z układem jezdny. W późniejszym okresie kiedy opanowano projektowanie i konstruowanie maszyn prądu przemiennego jako generatory zaczęto stosować maszyny synchroniczne, a w dalszych etapach też maszyny asynchroniczne.

Ze względu na problemy eksploatacji maszyn prądu stałego, związanych głównie z zestykiem ślizgowym (szczotki i komutator) konstruktorzy dalej poszukiwali silników, które miałyby charakterystyki mechaniczne zbliżone do charakterystyk silników stosowanych do tej pory, ale nie posiadałyby komutatora.

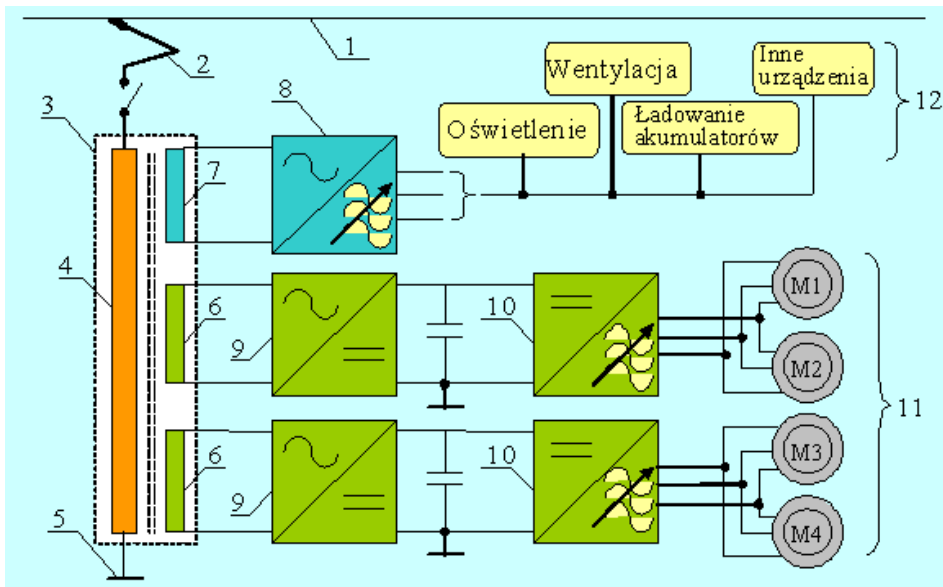
Dalszy rozwój napędów trakcyjnych związany był z postępem w energoelektronice, który umożliwił budowę układów zasilających silniki trakcyjne (falowniki), zastosowanie oraz większe możliwości kształtowania charakterystyk mechanicznych silników indukcyjnych stosowanych w napędach pojazdów trakcyjnych. Schemat blokowy głównych elementów napędu obecnie stosowanych spalinowozów pokazano na rys. 3.16.



Rys. 3.16. Schemat blokowy napędu spalinowozu z uwzględnieniem jego głównych elementów

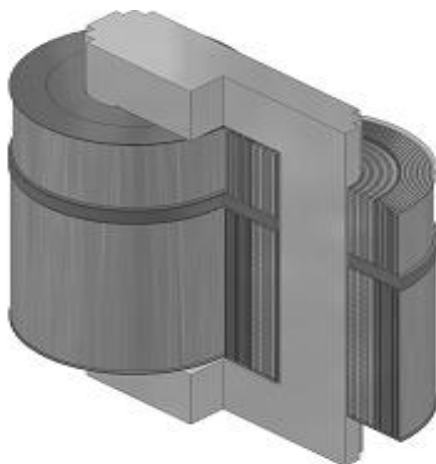
W obecnych rozwiązaniach jako źródła energii mechanicznej stosowane są silniki spalinowe, jako generatory prądnice synchroniczne i asynchroniczne. Jako silniki napędowe stosowane są silniki szeregowo prądu stałego, silniki asynchroniczne klatkowe, silniki synchroniczne ze wzbudzeniem elektromagnetycznym i silniki prądu przemiennego z magnesami trwałymi.

Elektrowozy, czyli pojazdy trakcyjne napędzane silnikami elektrycznymi zasilane z linii elektrycznych początkowo stosowane głównie w sieciach kolei miejskich i sieciach tramwajowych po zelektryfikowaniu linii kolejowych zastąpiły spalinowozy na liniach dalekobieżnych. Pojazdy te początkowo zasilane były z sieci napięcia stałego a jako silniki napędowe wykorzystywano silniki szeregowo prądu stałego. W niektórych krajach do dnia dzisiejszego funkcjonują trakcyjne linie napięcia stałego. W miarę rozwoju i rosnących wymagań dotyczących wzrostu prędkości, a co z tym jest związane i wzrostu mocy trakcyjne linie napięcia stałego zaczęto zastępować liniami napięcia przemiennego (możliwość podwyższania i obniżania wartości napięcia z zastosowaniem transformatorów, możliwość przesyłania większych mocy na duże odległości przy wyższych napięciach). Obecnie w krajach europejskich funkcjonuje wiele różnego rodzaju elektrycznych linii trakcyjnych: linie napięcia stałego (3000V), linie napięcia przemiennego (15 kV i 16⅔ Hz – pociągi regionalne; 25 kV i 50 Hz – szybka kolej – Train à Grande Vitesse – TGV). Schemat blokowy głównych obwodów obecnie stosowanych pojazdów trakcyjnych zasilanych z sieci napięcia przemiennego pokazano na rys. 3.17.

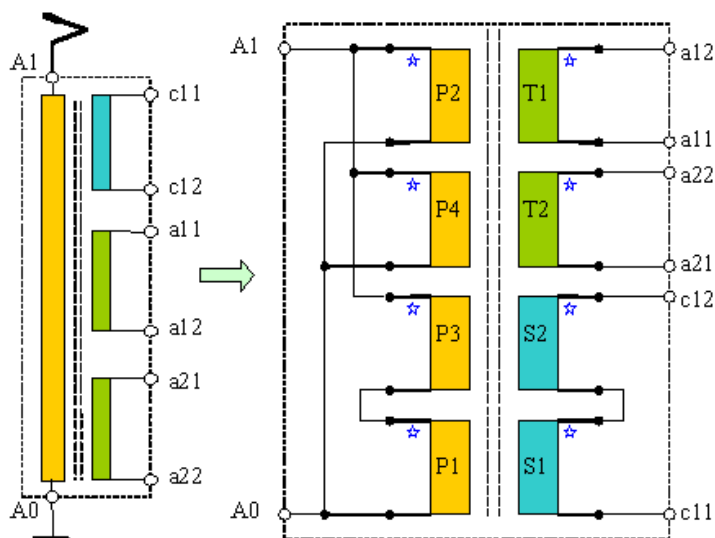


Rys. 3.17. Schemat blokowy głównych obwodów pojazdu trakcyjnego: 1 – sieć zasilająca, 2 – pantograf, 3 – główny transformator, 4 – uzwojenie pierwotne, 5 – szyna, 6 – uzwojenie wtórne trakcyjne, 7 – uzwojenie wtórne pomocnicze, 8 – przetwornik napięcia obwodów pomocniczych, 9 – przetwornik napięcia obwodów trakcyjnych, 10 – układ przetwornikowy w obwodzie trakcyjnym, 11 – silniki trakcyjne, 12 – urządzenia obwodu pomocniczego [34]

Transformatory stosowane w pociągach elektrycznych są transformatorami jednofazowymi dwukolumnowymi (rys. 3.18) lub płaszcзовymi. Każdy z takich transformatorów zależnie od konstrukcji może zawierać jedno lub kilka uzwojeń pierwotnych oraz kilka uzwojeń wtórnych (rys. 3.19).

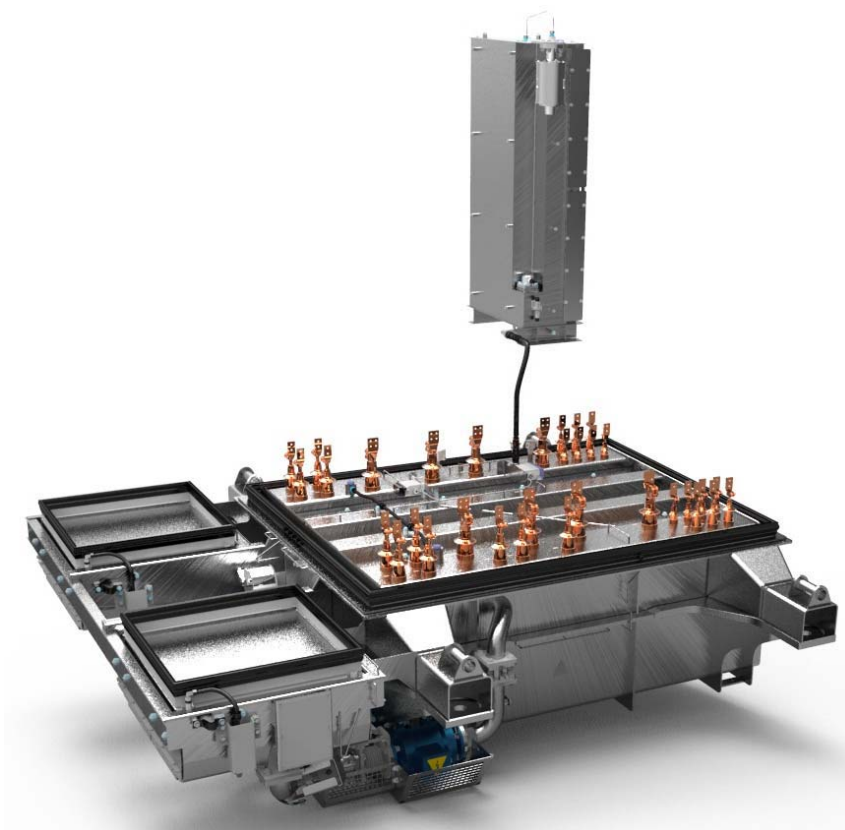


Rys. 3.18. Transformator dwukolumnowy [34]

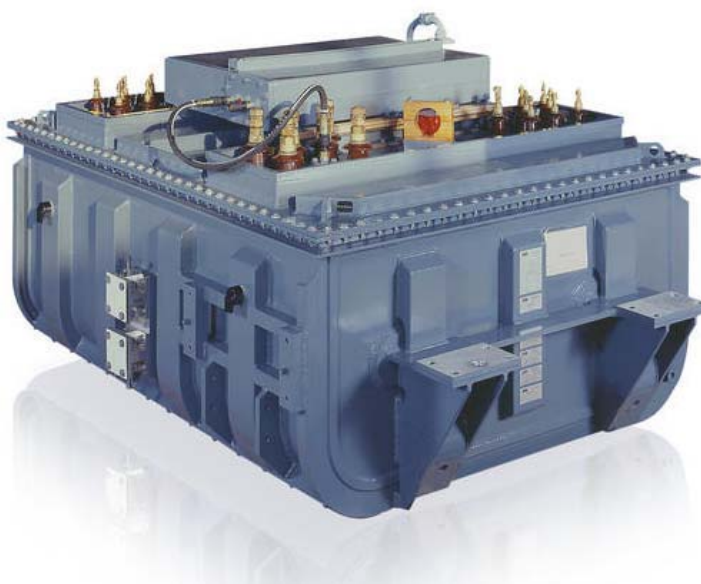


Rys. 3.19. Przykład połączeń uzwojeń typowych transformatorów trakcyjnych [34]

Transformatory trakcyjne ze względu na duże gęstości mocy są transformatorami olejowymi. Duże gęstości mocy wynikają głównie z konieczności ograniczania wymiarów gabarytowych transformatora przy rosnącej mocy odbiorników. Konstrukcje transformatorów i ich układów chłodzenia zależne są od miejsca montażu w pojeździe trakcyjnym. W praktyce transformatory te umieszczane są bądź w specjalnej komorze (transformatory pracujące w pozycji pionowej), bądź pod podwoziem (rys. 3.20) lub na dachu jednostki trakcyjnej (transformatory pracujące w pozycji poziomej, rys. 3.21).



Rys. 3.20. Transformator trakcyjny instalowany w specjalnej komorze pojazdu trakcyjnego ze zbiornikiem oleju instalowanym oddzielnie w przeznaczony do tego celu komorze (źródło: materiały ABB)



Rys.3.21. Transformator trakcyjny montowany na dachu pojazdu trakcyjnego (źródło: materiały ABB)

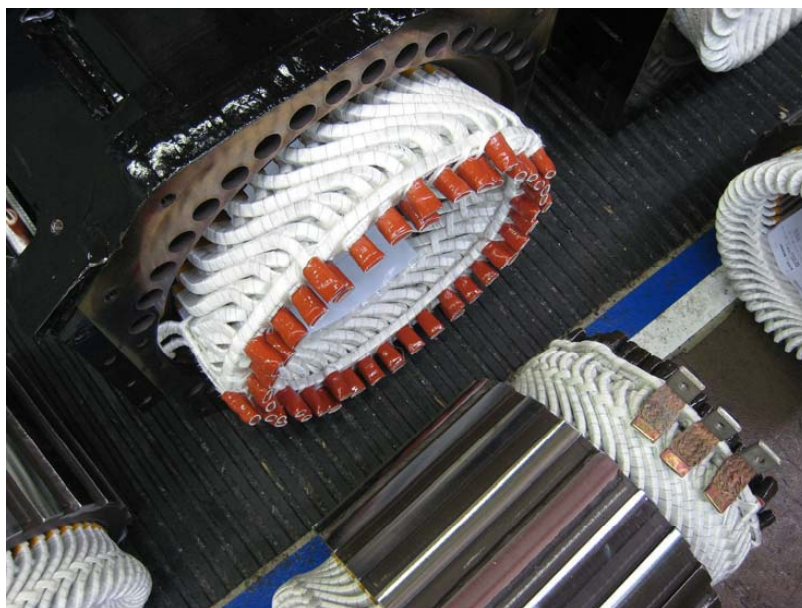
Bardzo często, we wspólnej obudowie z transformatorem, umieszczane są dodatkowe dławiki (dodatkowe indukcyjności niezbędne do poprawnej pracy przekształtników – możliwość podwyższenia napięcia wyjściowego).

Każdy transformator trakcyjny wyposażony jest w:

- trzy termostaty – termostaty sygnalizują przekroczenie zadanego poziomu temperatury, 15°C – temperatura bazowa, 105°C – poziom wskazujący na konieczność redukcji mocy obciążenia transformatora, 115°C – alarm, osiągnięcie tego poziomu temperatury prowadzi do odłączenia transformatora;
- wskaźnik obiegu oleju – awaria pompy wymuszającej przepływ oleju powoduje pogorszenie warunków chłodzenia i wzrost temperatury transformatora;
- wziernik oleju;
- zabezpieczenie ciśnieniowe – zabezpiecza transformator przed eksplozją.

Moce transformatorów trakcyjnych zawierają się w przedziale od 0,5 MVA (metro) do 6,5 MVA (pociągi towarowe). Napięcia znamionowe transformatorów, to 15kV przy częstotliwości 16⅔ Hz (pociągi regionalne) i 25 kV przy częstotliwości 50 Hz (szybkie pociągi).

W szybkich pociągach jako silniki trakcyjne wykorzystywane są głównie silniki asynchroniczne i silniki synchroniczne ze wzbudzeniem elektromagnetycznym. Rozwój materiałów magnetycznych, a w szczególności magnesów trwałych i konstrukcji maszyn z magnesami trwałymi wzbudził zainteresowanie tymi maszynami do zastosowań w trakcji elektrycznej. Pojazd trakcyjny skonstruowany przez inżynierów z firmy ALSTOM wyposażony w zestawy napędowe z silnikami asynchronicznymi klatkowymi i silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi 3 kwietnia 2007 roku ustanowił kolejny rekord prędkości pojazdów szynowych na poziomie 574,7 km/h.

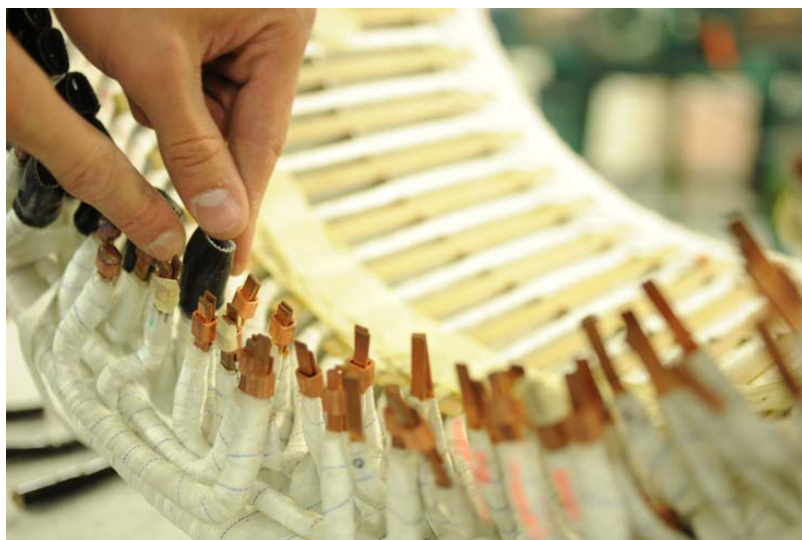


Rys. 3.22. Widok silnika synchronicznego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym na etapie produkcji (źródło: materiały ALSTOM)

Zastosowanie silników z magnesami trwałymi pomimo zalet związanych z większą sprawnością oraz lepszą charakterystyką mechaniczną w stosunku do silników asynchronicznych jest ograniczone w pojazdach trakcyjnych dużych prędkości. Wydaje się, że najważniejszą przyczyną tego stanu rzeczy jest brak możliwości wygaszenia pola magnetycznego wzbudzanego magnesami trwałymi. Szczegół-

nie istotne jest to w stanach awaryjnych, zwłaszcza przy zwarcjach w uzwojeniach silnika. To powoduje, że w szybkich pociągach jako silniki trakcyjne stosowane są silniki synchroniczne ze wzbudzeniem elektromagnetycznym (łatwość wygaszania pola magnetycznego). Na rysunku 3.22 pokazano produkowany przez ALSTOM (ośrodek w Ornans – Francja) stojan silnika synchronicznego. Moc silnika synchronicznego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym stosowanym do napędu pojazdów trakcyjnych produkowanych przez ALSTOM wynosi 1100 kW, masa wirnika 730 kg, natomiast masa całkowita to 1515 kg. Silnik ten nazywany jest przez personel SNCF (Francuskich Kolei Państwowych) „Marignan” (Marignan jest nazwą miejscowości pod którą 13 września 1515 roku francuski król Franciszek I stoczył zwycięską bitwę z wojskami Federacji Szwajcarskiej. Bitwa ta była punktem zwrotnym w „wojnach włoskich”).

Uzwojenie silnika „Mirignan” wykonane jest z przewodów profilowych. Czas wykonania takiego uzwojenia to 280 roboczogodzin. Na rysunku 3.23 pokazano widok uzwojenia stojana wykonanego z drutów profilowanych.



Rys. 3.23. Widok uzwojenia stojana silnika synchronicznego na etapie produkcji (źródło: materiały ALSTOM)

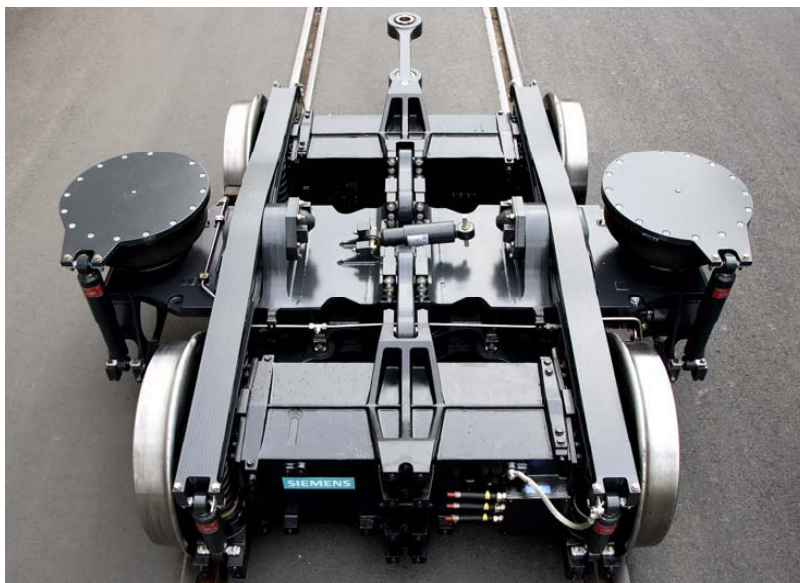
Pomimo istnienia dobrych i sprawdzonych rozwiązań napędów szybkich pociągów z silnikami synchronicznymi ze wzbudzeniem elektromagnetycznym prowadzone są prace nad opracowywaniem nowych rozwiązań silników napędowych z zastosowaniem magnesów trwałych. Inżynierowie pracujący w firmie ALSTOM mają nadzieję, że niebawem rozwiążą problemy ograniczające stosowanie silników synchronicznych w napędach szybkich pociągów i następcą TGV, czyli AGV będzie napędzany takimi silnikami.

Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi ze względu na wysoką sprawność i duże gęstości mocy znajdują również zastosowanie w napędach samochodów elektrycznych. Na rysunku 3.24 pokazano silnik produkcji SIEMENS, którego pierwszą aplikacją był napęd elektrycznego samochodu Volvo C30.



Rys. 3.24. Prototyp silnika z magnesami trwałymi montowanymi powierzchniowo (źródło: materiały ALSTOM)

Maszyny cylindryczne pracujące jako silniki trakcyjne w większości przypadków połączone są z kołami jezdnyymi jednostek trakcyjnych za pomocą przekładni mechanicznych. Spotykane są również rozwiązania o tzw. napędzie bezpośrednim (bez przekładni mechanicznych), wykorzystującym głównie maszyny z magnesami trwałymi. Na rysunku 3.25 pokazano przykładowe rozwiązanie napędu bezpośredniego z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi o budowie modułowej.



Rys. 3.25. Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o budowie modułowej stosowane do napędu bezpośredniego pojazdów metra (montowane bezpośrednio na osi wózka trakcyjnego metra) (źródło: materiały SIEMENS)

3.5.2. System trakcyjny niekonwencjonalny - liniowy

W ostatnich dekadach ważną formą modernizacji trakcji elektrycznej stało się użycie silnika liniowego. Miało ono miejsce na kolejach miejskich. Pierwszą linię tego typu otwarto w 1985r. pod Toronto (Scarborough Rapid Transit). Na większą skalę technologia ta znajduje zastosowanie w podziemnym metrze ze względu na to, że daje duże oszczędności przy budowie tuneli (nawet 15% kosztów tunelu kolei o napędzie klasycznym). Pierwszą linię kolejową, w której wykorzystano silniki liniowe oddano do użytku w 1990 r. w Osace [35]. Główne zalety zastosowania silników liniowych jako napędu pojazdów trakcyjnych to:

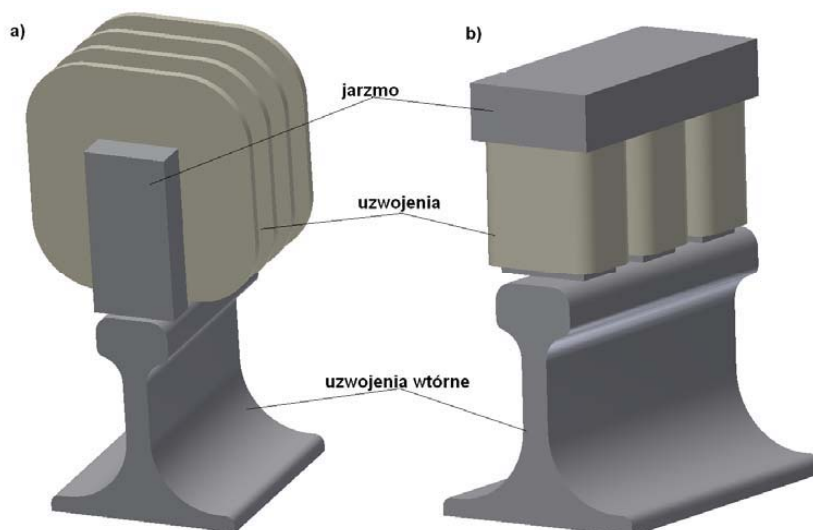
- brak przekładni mechanicznych,
- brak łożysk,
- otwarta budowa maszyny poprawiająca znacznie warunki jej chłodzenia,
- główne straty (straty w uzwojeniach wtórnych – odpowiednik uzwojeń wirnika w maszynie cylindrycznej) rozpraszane są poza maszyną,
- cienki stojan – łatwość mocowania silnika do podwozia jednostki trakcyjnej.

Rozwiązania tego typu mają również pewne wady:

- słabe wykorzystanie części aktywnej silnika, a co z tego wynika kilkakrotnie większa masa w stosunku do maszyny cylindrycznej,
- dużo większy koszt materiałów przewodzących niż w maszynie cylindrycznej – w niektórych rozwiązaniach uzwojenie wtórne wykonane jest z płyt aluminiowych przymocowanych w odpowiedni sposób do szyn trakcyjnych (rys. 3.26),
- duże straty, a co z tego wynika mniejsza sprawność w stosunku do maszyn cylindrycznych w przypadku wykorzystania szyny trakcyjnej jako obwodu wtórnego silnika liniowego (rys. 3.27).



Rys. 3.26. Fragment toru kolejki miejskiej napędzanej silnikami liniowymi (źródło: materiały SIEMENS)



Rys. 3.27. Model 3D silnika liniowego stosowanego przez firmę SIEMENS: a) uzwojenie nawinięte na jarzmo, jeden biegun; b) model z uzwojeniem rozłożonym z żłobkach, dwa biegun [33]

3.5.3. Literatura

- [33] Materiały konferencji zorganizowanej przez ALSTOM Transport w Gdańsku w ramach transferu wiedzy w projekcie europejskim PREMAID
- [34] Raport projektu PREMAID
- [35] Historia kolei http://pl.wikipedia.org/wiki/Historia_kolei

Przy opracowywaniu rozdziału wykorzystano wiedzę zdobytą podczas prac w europejskim projekcie PREMAID. Projekt dotyczył przewidywania i diagnostyki uszkodzeń układu zasilania i układu napędowego jednostki trakcyjnej. Koordynatorem projektu była firma ALSTOM (Francja). W projekcie uczestniczyły następujące ośrodki: ALSTOM, Uniwersytet Techniczny Bolognie (Włochy), Uniwersytet Techniczny Owiedo (Hiszpania), Uniwersytet Techniczny Coimbra (Portugalia), Politechnika Gdańska Wydział Elektrotechniki i Automatyki Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych.

3.6. Systemy trakcyjne rowerów

3.6.1. Rower elektryczny

System komunikacyjny dzisiejszych polskich miast staje się coraz mniej wydajny – jest coraz więcej samochodów, natomiast dróg i miejsc parkingowych nie przybywa w odpowiednim tempie. Szuka się skutecznych alternatyw do sprawnego i ekologicznego poruszania się po mieście. Rower napędzany siłą mięśni jest alternatywą dla samochodu na krótkich dystansach. Rower napędzany silnikiem elektrycznym zyskuje nowe atuty takie jak większy zasięg, większą średnią prędkość, możliwość używania przez osoby starsze. Nie jest to jednak rozwiązanie idealne zwłaszcza ze względu na sezonowość, słabo rozwiniętą w Polsce siatkę ścieżek rowerowych oraz małą liczbę parkingów dla rowerów.

Istotny jest aspekt ekologiczny tego rozwiązania, ponieważ rower elektryczny można zaliczyć do grupy pojazdów o zerowej emisji spalin (ang. *zero emission vehicle*). Ciągły wzrost cen paliw kopalnych oraz skutek ich spalania, sprzyja wdrażaniu nowych ekologicznych technologii, często tańszych niż stosowane obecnie. Otwiera to nowe możliwości przed pojazdami elektrycznymi. Upowszechnienie się rowerów elektrycznych związane jest z ciągłym rozwojem techniki w zakresie energoelektroniki, budowy maszyn elektrycznych, materiałoznawstwa, oraz elektrochemicznych źródeł

energii. Aktualne rozwiązania pozwalają na budowę małych i lekkich silników o dużym stosunku mocy do masy. Rozwój technologii zasobników energii pozwala budować lekkie i pojemne akumulatory, zwiększając zasięg pojazdów. Nowe rozwiązania techniczne sprawiają, że napęd elektryczny staje się coraz efektywniejszy oraz konkurencyjny cenowo względem napędu spalinowego.

Budowa lub kupno roweru z napędem elektrycznym to wydatek od 1400 do 3500 zł. Można kupić fabrycznie złożony rower elektryczny lub zestaw do samodzielnego montażu. Najistotniejszym elementem kosztów obu rozwiązań jest cena baterii/akumulatora. Kalkulacja kosztów eksploatacji roweru elektrycznego wygląda następująco. Rower elektryczny z bateriami o pojemności 20Ah i napięciu 48V jest w stanie przejechać maksymalnie 65 km bez pedałowania, dalsza jazda nie jest zalecana ze względu na możliwe uszkodzenie akumulatorów. Czas ładowania przy użyciu szybkiej ładowarki (300W) to około 3,5 godziny. Napięcie średnie na akumulatorach wynosi ok. 50V. Energia zużyta podczas jednego cyklu to 1 kWh. Cena jednego ładowania, w zależności od ceny prądu pobieranego przez ładowarkę, wynosi 0,71 zł (taryfa nocna: 0,5 zł z VAT za 1 kWh) lub 0,85 zł (taryfa dzienna: 0,5 zł z VAT za 1 kWh). Do kosztu ładowania jest wliczona sprawność akumulatorów, która wynosi ok. 0,7. Koszt nowych akumulatorów to 480 zł, a zachowują one swoje właściwości przez ok. 800 cykli ładowania. Koszt przejechania 100 km rowerem elektrycznym, wliczając amortyzację akumulatorów, waha się od 1,7 zł do 1,9 zł.

Obecnie bardzo popularny jest napęd rowerów z wykorzystaniem silnika zamocowanego w piaście koła. Silnik taki najczęściej jest montowany w piaście koła przedniego, rzadziej tylnego. Zasilany z baterii akumulatorów umieszczonych w specjalnym pojemniku lub w sakwach. Wbudowanie silnika w koło pozwala zaoszczędzić miejsce, nie obciąża nadmiernie konstrukcji koła ani roweru i nie wymaga stosowania przekładni mechanicznej. Ze względu na budowę wyróżniamy dwa rodzaje silników – bezpośrednie (ang. *direct driver*) i pośrednie (ang. *geared*). Pośrednie posiadają przekładnię zintegrowaną z silnikiem, przez co osiągają większy moment, w porównaniu z rozwiązaniem bezpośrednim. Warto zaznaczyć, że silniki pośrednie mają o połowę mniejszą wagę, przy tym samym momencie, co silniki bezpośrednie, wiąże się to jednak z dwukrotnie mniejszą osiąganą prędkością obrotową. Jako silniki napędowe mogą być stosowane komutatorowe silniki prądu stałego lub silniki bezszczotkowe prądu stałego (ang. *brushless dc motor BLDC*). Oczywiście zalety silnika BLDC wynikają z wyeliminowania komutatora mechanicznego – są one mniejsze, lżejsze i bardziej niezawodne. Z drugiej strony silniki BLDC wymagają specjalnych algorytmów sterowania oraz zastosowania czujnika położenia (czujnik Halla).

Wyposażenie roweru w napęd elektryczny podlega regulacjom prawnym. Zgodnie ze stanem prawa na 2008 rok:

- z przepisami holenderskimi,
- z przygotowywaną (kwiecień 2008) normą europejską EN 15194 dla rowerów ze wspomagającym napędem elektrycznym (CEN, www.cen.eu),
- ze zmianami zaproponowanymi (czerwiec 2008) przez inicjatywę Miasta dla rowerów (www.rowery.org.pl) w przepisach rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 31 grudnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia (Dz. U. z 2003 r. Nr 32, poz. 262 ze zm.),

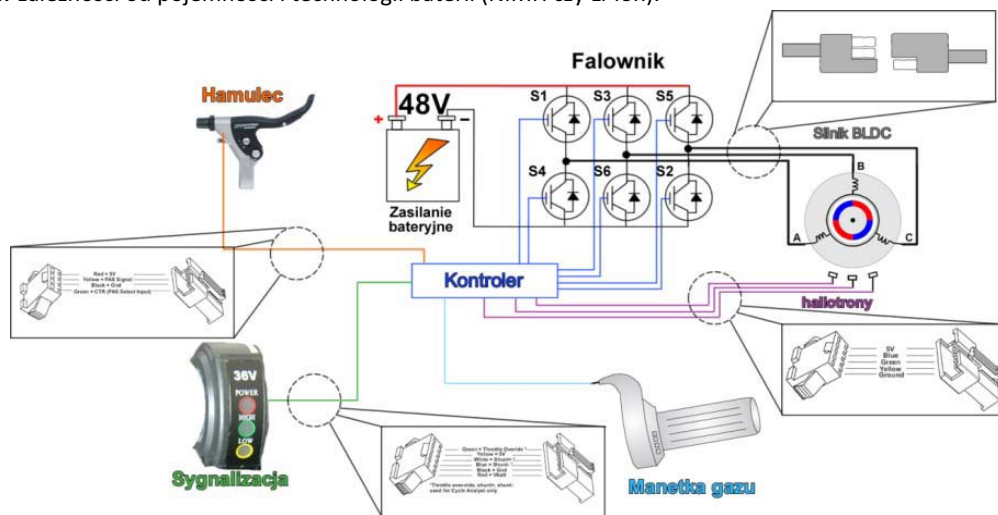
dopuszcza się wyposażenie roweru w pomocniczy napęd elektryczny o znamionowej mocy ciągłej nie większej niż 250 W, zasilany napięciem nie wyższym niż 48 V i który jest automatycznie odłączany kiedy rower osiąga prędkość 25 km/godz.

W sklepach dostępne są zestawy do samodzielnego montażu, dzięki którym każdy może szybko przerobić zwykły rower na rower elektryczny. W skład zestawu do samodzielnego montażu wchodzi koło z wbudowanym silnikiem, kontroler, baterie z ładowarką sieciową oraz manetka do przyspieszania (rys. 3.28).



Rys. 3.28. Zestawy do samodzielnego montażu roweru elektrycznego [37]

Montaż sprowadza się do zamontowania koła z wbudowanym fabrycznie silnikiem, połączeniu przewodów kontrolera z silnikiem, bateriami i manetkami. Sterowanie polega jedynie na regulowanym wychyleniu przycisku przy manetce, co powoduje włączenie i pracę silnika z żądaną, proporcjonalną do wychylenia manetki prędkością (rys. 3.29). Cena takiego zestawu wynosi około 2000 zł, w zależności od pojemności i technologii baterii (NIMH czy Li-ion).



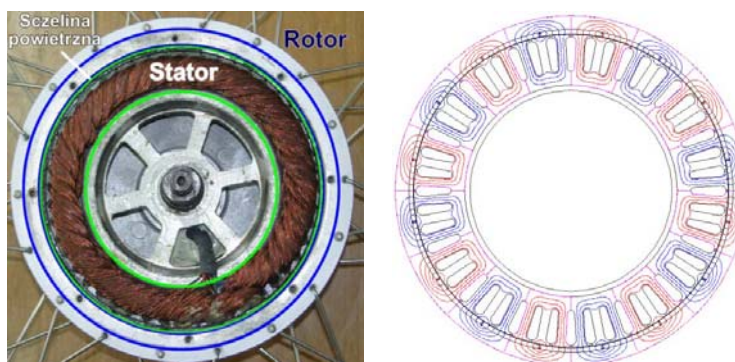
Rys. 3.29. Przykładowy schemat zasilania i sterowania napędem roweru elektrycznego [36]

Opisywany zestaw posłużył do budowy roweru elektrycznego w ramach jednego z projektów Naukowego Koła Studentów Elektryków oraz został opisany w pracy dyplomowej mgr inż. Dominika Adamczyka [36].

Silniki jak i kontrolery produkowane są w Chinach, co budzi pewne zastrzeżenia co do jakości. Uzwojenia silnika wykonywane jest ręcznie, zdarza się, że w trakcie eksploatacji silnika, następuje uszkodzenia uzwojenia w miejscach lutowania cewek. O niskiej jakości wykonania świadczy również brak powtarzalności parametrów i tak np. rezystancja międzyfazowa silników tego samego typu różni się nawet o 20%.

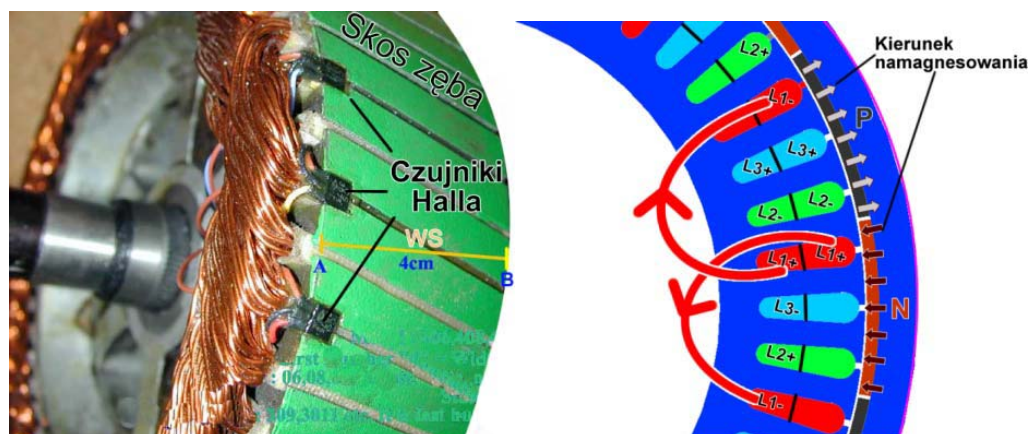
Jakość wykonania kontrolera jest dobra, pomimo małych rozmiarów i znamionowego napięcia zasilania 36 V, bez problemu pracuje on przy napięciu baterii sięgającym 48 V, nie wykazując wyraźnego wzrostu temperatury. W środku wszystko jest szczelnie zalane żywicą, dzięki czemu kontroler jest odporny na wstrząsy. Ograniczenie prądowe kontrolera do 20 A, jest wystarczające do zastosowania w napędzie lekkiego roweru elektrycznego. Naturalnie kontrolery o wyższym dopuszczalnym obciążeniu są droższe, natomiast nie mają znaczącego wpływu na maksymalną prędkość roweru.

W analizowanym układzie zastosowano bezszczotkowy silnik prądu stałego Clyte 408 o mocy 500 W oraz 8 parach biegunów. Silnik ten posiada wirnik zewnętrzny, na którego powierzchni przyklejono 16 neodymowych magnesów trwałych (rys. 3.30). Wirnik osadzony jest na dwóch łożyskach, a całość szczelnie zamknięta w metalowej obudowie, która za pomocą szprych połączona jest z obręczą koła roweru.



Rys. 3.30. Silnika Clyte 408: a) budowa silnika, b) rozkład pola wzbudzenia [36, 37]

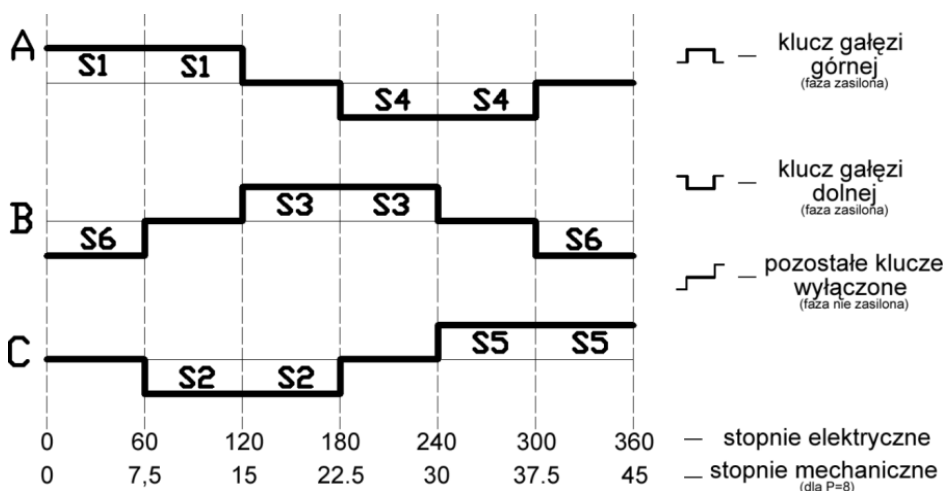
Twornik maszyny (stojan) osadzony jest na nieruchomym wale, który jest jednocześnie osią mocującą koło do ramy roweru. Uzwojenia twornika jest dwuwarstwowe i umieszczone w 48 skośnych żłobkach. Trzy czujniki Halla umiejscowione są w specjalnie wykonanych żłobkach między zębami stojana (rys. 3.31).



Rys. 3.31. Silnik Clyte 408: a) Umiejscowienie czujników Halla b) Kierunek namagnesowania magnesów oraz sposób nawinięcia cewek [36]

Silnik zintegrowany jest w jednej obudowie z kontrolerem. Układ kontrolera załącza wybraną parę kluczy energoelektronicznych, które zasilają wybrane dwie fazy na podstawie sygnałów z trzech

czujników Halla przesuniętych względem siebie o 60 stopni elektrycznych. Na podstawie stopnia wychylenia manetki gazu kontroler reguluje napięcie silnika przy uwzględnieniu ograniczenia prądowego. Regulacja napięcia uzyskiwana jest za pomocą modulacji gęstością impulsów (PDM – *Pulse-Density Modulation*) (rys. 3.32).



Rys. 3.32. Regulacja napięcia za pomocą modulacji gęstością impulsów (PDM – *Pulse-Density Modulation*)

Częstotliwość kluczowania to 15 kHz. Ze względu na niskie napięcie zasilania (~50V) w obwodach falownika stosuje się wyłącznie tranzystory unipolarne typu MOSFET. Tranzystory MOSFET posiadają rezystancję przejścia, która w nowoczesnych układach jest równa lub mniejsza 0,03 Ω . Klucze tego typu są szybsze niż tranzystory bipolarne (sterowane prądem) ale nie dlatego używa się ich w tych układach. W porównaniu z tranzystorami bipolarnymi lub IGBT, które mają stały spadek napięcia ~1,5 V, straty na kluczu MOSFET w tym przypadku są znacznie mniejsze. Ma to duże znaczenie w układach niskiego napięcia.

Kontrolery stosowane przez firmę Crystolyte posiadają ograniczenie prądowe 20 A i 30 A oraz nie pozwalają odzyskiwać energii z hamowania (praca prądnicowa).

Najnowsze akumulatory wykonane w technologii litowo-polimerowej, według przewidywań mają napędzać w przyszłości wszystkie pojazdy elektryczne. W chwili obecnej nie są znane wiarygodne dane na temat tych akumulatorów, ale według producentów posiadają najwyższy stosunek energii do masy oraz największą żywotność. Akumulatory Li-ion są lekkie i trwałe, także posiadają duży stosunek energii zgromadzonej do masy. Niestety są obecnie najdroższymi akumulatorami na rynku. Akumulatory Li-ion wymagają specjalnych ładowarek mikroprocesorowych oraz elektroniki, która nie pozwala im przegrzać się powyżej temp. 50°C, ponieważ grozi to zapaleniem lub wybuchem ogni. Głębokie rozładowanie oraz niskie temperatury skracają żywotność tych akumulatorów.

Znacznie częściej stosowanymi akumulatorami są akumulatory kwasowo-ołowiowe. Mimo ich dużej wagi cena jest 3 krotnie niższa niż Li-ion. Ze względu na ciągłe wstrząsy i przechylenia w pojazdach, używa się w nich elektrolitu w postaci żelu. W przypadku tego typu akumulatorów, należy unikać głębokiego rozładowania jak i przeładowania. Oba te stany skracają żywotność akumulatora oraz mogą być niebezpieczne.

3.6.2. Literatura

- [36] Adamczyk D. Model polowo-obwodowy silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi w programie Flux2D/3D. Praca magisterska. Politechnika Gdańska. Gdańsk 2009.

Adresy stron internetowych

- [37] Electric Bicycle Motor & Controller <http://crystalte.com/>
- [38] Headline Electric Co., Ltd. <http://www.headline-motor.com>
- [39] Hub Motor Simulator <http://www.ebikes.ca/simulator/>

3.7. Podsumowanie

W rozdziale opisano wybrane konstrukcje maszyn elektrycznych i transformatorów stosowanych we współczesnych systemach elektromechanicznych. Opisano przykłady maszyn elektrycznych stosowanych na pokładzie współczesnego samolotu pasażerskiego, w trakcyjnych systemach napędowych, do napędu roweru elektrycznego oraz w agregatach prądotwórczych stosowanych w mikroukładach skojarzonej generacji energii. W systemach tych obserwuje się tendencję do zwiększania mocy jednostkowej instalowanych maszyn, wymagając równocześnie aby zajmowały one jak najmniejszą objętość. Wynika stąd konieczność projektowania i budowania maszyn elektrycznych o większych gęstościach mocy (moc na jednostkę objętości) oraz wyższych prędkościach obrotowych (np. trójstopniowe generatory synchroniczne). Jednocześnie wymaga się by maszyny te miały wysoką sprawność i były niezawodne (np. maszyny z magnesami trwałymi).

W kolejnych rozdziałach zostaną przedstawione: budowa, działanie, modele fizyczne i obwodowe oraz wybrane charakterystyki maszyn elektrycznych i transformatorów, których przykłady zastosowań opisano w niniejszym rozdziale.

4. Transformatory

Transformator jest *urządzeniem elektromagnetycznym*, służącym do *przetwarzania energii elektrycznej* o jednym napięciu na energię o innym napięciu, bez udziału energii mechanicznej.

Podstawą działania i budowy transformatora jest *zjawisko indukcji elektromagnetycznej* – prawo Faraday’a.

4.1. Uwagi wstępne

W rozdziale omówimy głównie transformatory pracujące w systemach elektroenergetycznych – **transformatory energetyczne: blokowe, przesyłowe i rozdzielcze**. Obecnie moc zainstalowanych transformatorów w systemie energetycznym jest 3–4 razy większa od mocy łącznej zainstalowanych generatorów synchronicznych i nadal rośnie. Stan ten wynika z konieczności wielokrotnego transformowania energii elektrycznej na drodze od źródła do odbiornika energii.

Oprócz transformatorów energetycznych istnieje liczna grupa transformatorów specjalnych: **autotransformatorów, transformatorów piecowych, spawalniczych, prostowniczych** (wielofazowych), **pomiarowych**, itp.

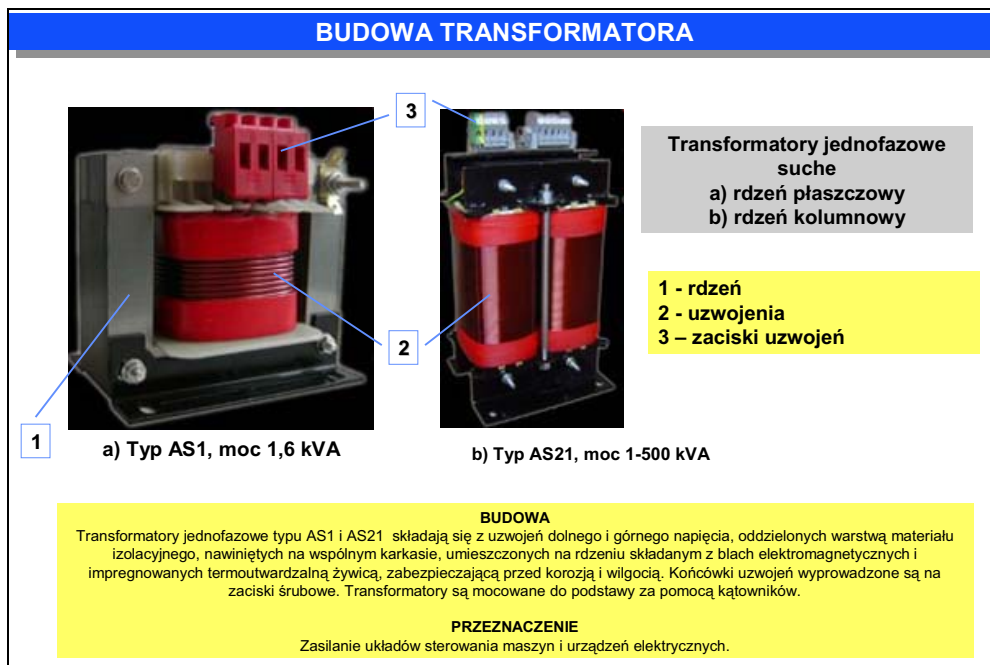
Podstawowe zjawiska i procesy fizyczne, występujące we wspomnianych transformatorach, są takie same, chociaż każdy typ transformatora wyróżnia się swoją specyficzną charakterystyką. Stąd omawianie transformatorów opieramy na najważniejszym dla systemu energetycznego transformatorze energetycznym: **jedno- i trójfazowym**.

Na wstępie krótko opiszemy budowę transformatorów, a następnie rozważymy trzy stany ich pracy: **stan jałowy, stan obciążenia i stan zwarcia**. Dla poszczególnych stanów pracy przedstawimy modele fizyczne i obwodowe transformatora oraz ich parametry. Omówimy najważniejsze **charakterystyki ruchowe** transformatora: **zmienności napięcia i sprawności**. Następnie opiszemy **układy połączeń uzwojeń** transformatorów trójfazowych oraz **pracę równoległą transformatorów**. Rozdział zakończymy krótkim omówieniem transformatorów specjalnych.

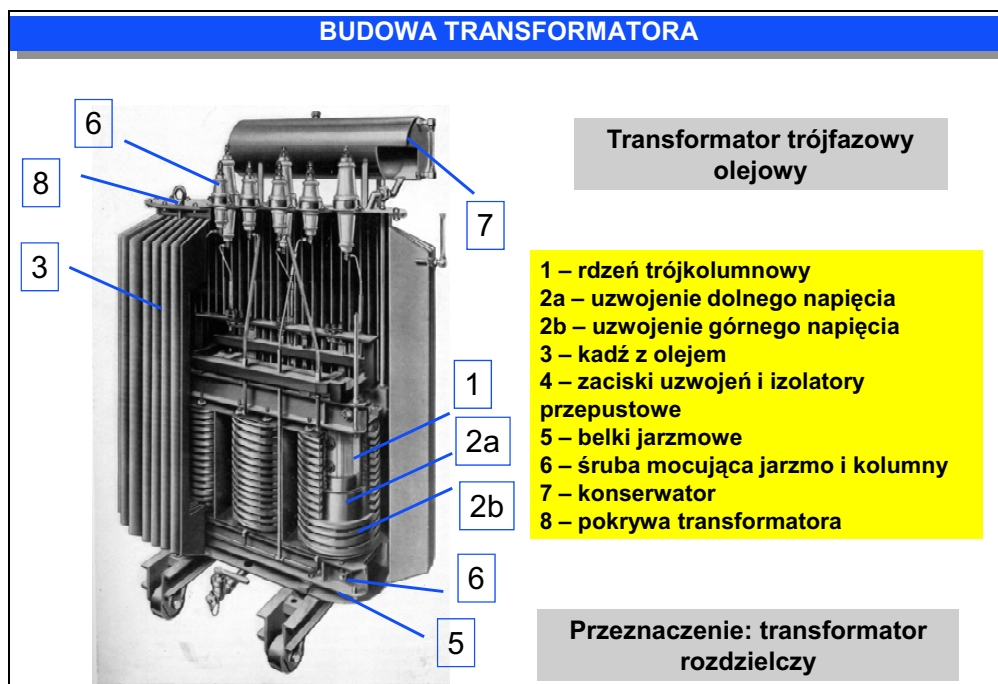
4.2. Formy budowy

Zagadnienia konstrukcji i technologii transformatorów stanowią oddzielną dziedzinę wiedzy technicznej w stosunku do analogicznych zagadnień maszyn elektrycznych wirujących. Zagadnieniom tym poświęcone są specjalne książki, opracowania i normy. W języku polskim są to książki autorstwa profesora Eugeniusza Jezierskiego, np. pozycja [5]. Natomiast rys historyczny początku rozwoju transformatorów zawiera książka profesora Mirosława Dąbrowskiego [2]. W tym miejscu ograniczymy się jedynie do kilku podstawowych informacji o budowie transformatorów – koniecznych do opisu teoretycznego zachodzących w nich zjawisk elektromagnetycznych.

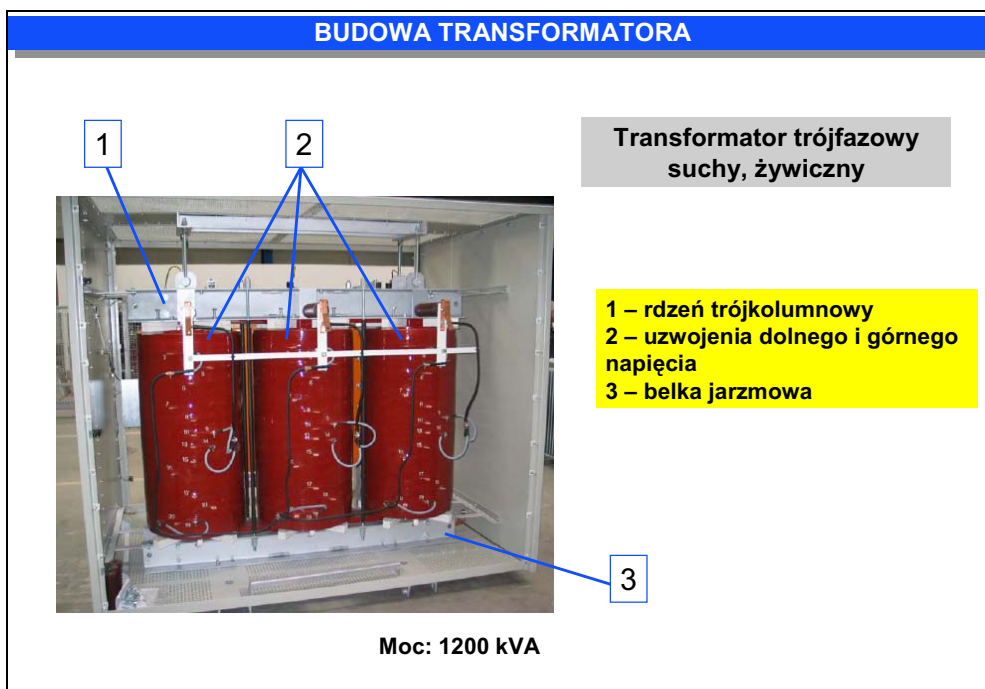
Przykłady budowy i podstawowe elementy transformatorów 1-fazowych i 3-fazowych przedstawiono kolejno na rys. 4.1–4.3 Transformator składa się z elementów **czynnych i konstrukcyjnych**. Elementy czynne: **rdzeń** (obwód magnetyczny), **uzwojenie dolne napięcia** i **uzwojenie górne napięcia** (obwody elektryczne) biorą udział w przetwarzaniu energii elektrycznej. Natomiast elementy konstrukcyjne: **kadź, pokrywa i belki jarzmowe** służą do połączenia i usztywnienia elementów czynnych.



Rys. 4.1. Przykład budowy transformatora jednofazowego chłodzonego powietrzem
 Producent: AS ELEKTROTECHNIK (<http://www.as-elektrotechnik.pl/index3.php>)



Rys. 4.2. Przykład budowy transformatora trójfazowego chłodzonego olejem



Rys. 4.3. Przykład budowy transformatora trójfazowego chłodzonego powietrzem – układ izolacji uzwojeń typu „żywicznego”. Producent: Fabryka Transformatorów w Żychlinie (www.ftz.pl)

Rdzeń wykonany jest z izolowanych **blach transformatorowych**. Współcześnie zamiast blach **gorąco walcowanych** stosuje się najczęściej **blachy zimnowalcowane**, charakteryzujące się mniejszymi **stratami mocy** i wysoką **magnesowalnością**. Rdzeń składa się z **kolumn** i **jarzm**, które mocowane są za pomocą **belek jarzmowych** (rys. 4.2) i śrub. Na kolumnach umieszczone są uzwojenia **dolnego napięcia** i **uzwojenia górnego napięcia** (2b). Rdzeń umieszczony jest w kadzi z olejem wykonanej z blachy falistej, celem zwiększenia powierzchni chłodzenia. Ze względu na rozszerzanie się oleju ze wzrostem temperatury, z kadzią połączony jest dodatkowy zbiornik oleju – **konserwator**. **Izolatory przepustowe** wykonane są z **porcelany elektrotechnicznej** i montowane na pokrywie transformatora.

Ze względu na liczbę uzwojeń, wyróżniamy transformatory **dwuuzwojeniowe**, **trójuzwojeniowe**, **czteruuzwojeniowe** i **jednuuzwojeniowe**. Transformator jednuuzwojeniowy nazywamy także **auto-transformatorem**.

Ze względu na rodzaj prądu wyróżniamy transformatory jednofazowe i wielofazowe – najczęściej trójfazowe.

Uzwojenie, do którego doprowadza się energię, nazywamy **uzwojeniem pierwotnym**, a wszystkie wielkości odnoszące się do tego uzwojenia oznaczamy indeksem „1”.

Uzwojenie, z którego odprowadza się energię, nazywamy **uzwojeniem wtórnym**, a wszystkie wielkości odnoszące się do tego uzwojenia oznaczamy indeksem „2”.

Tabliczka znamionowa transformatora najczęściej zawiera następujące dane [22]:

- nazwę lub znak wytwórcy,
- nazwę i typ wyrobu,
- numer fabryczny,
- rok wykonania,
- częstotliwość znamionową i liczbę faz,
- moc znamionową, napięcia znamionowe i prądy znamionowe poszczególnych uzwojeń,

- zmierzone napięcie zwarcia w %,
- zmierzone straty jałowe i straty w stanie zwarcia,
- symbol znamionowego rodzaju pracy,
- symbol grupy połączeń uzwojeń,
- klasę materiałów izolacyjnych,
- stopień ochrony,
- masę całkowitą.

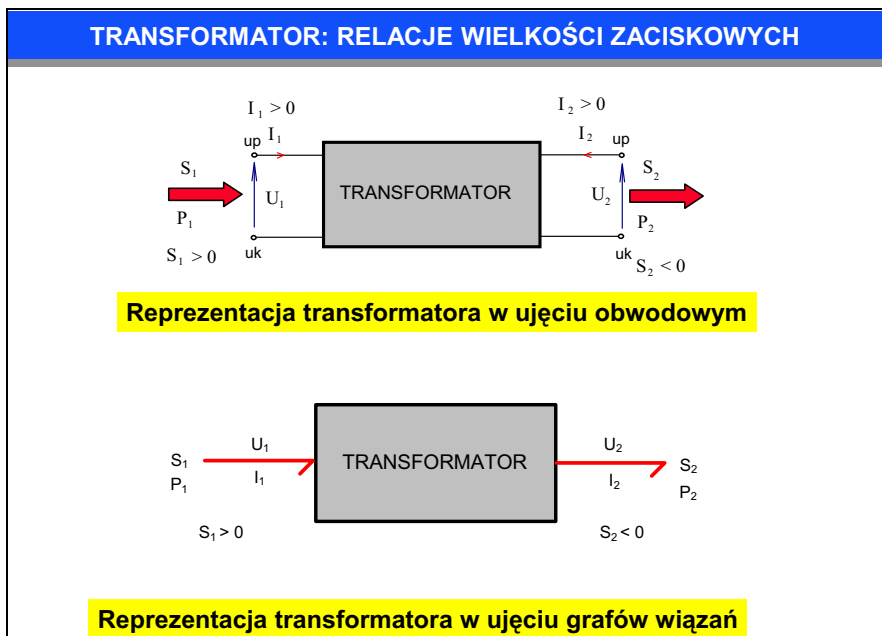
4.3. Modele fizyczne i obwodowe

Zagadnienia modelowania i pomiarów transformatorów stanowią oddzielną dziedzinę wiedzy technicznej w stosunku do analogicznych zagadnień maszyn elektrycznych wirujących. Zagadnieniom tym poświęcone są specjalne książki, opracowania i normy. Najbardziej znane pozycje specjalistyczne w języku polskim to książki profesora Eugeniusza Jezierskiego, np. pozycja [5]. W tym miejscu ograniczymy się jedynie do podstawowych informacji o modelowaniu transformatorów – koniecznych do opisu ich **charakterystyk ruchowych**. Będziemy rozważać transformator jednofazowy, zakładając, że transformator trójfazowy możemy zbudować z odpowiednio połączonych transformatorów jednofazowych. Z drugiej strony, w transformatorze trójfazowym symetrycznie obciążonym zjawiska zachodzące w kolejnych fazach są przesunięte odpowiednio w fazie o kąt 120° . Zatem wystarczy analizować obwody tylko jednej fazy transformatora trójfazowego.

Transformator jednofazowy jest **przetwornikiem elektromagnetycznym** (rys. 4.4) o dwóch **wrotach (parach zacisków)**, które fizycznie reprezentują: zaciski uzwojenia pierwotnego „1” i zaciski uzwojenia wtórnego „2”. Moce elektryczne przepływające przez wrota, odpowiednio dostarczana S_1 i odbierana S_2 , ulegają przemianie za pośrednictwem pola magnetycznego. Zakładamy, że energia pola magnetycznego jest energią wewnętrzną transformatora, gdyż przetwornik nie ma możliwości wymiany tej energii z otoczeniem.

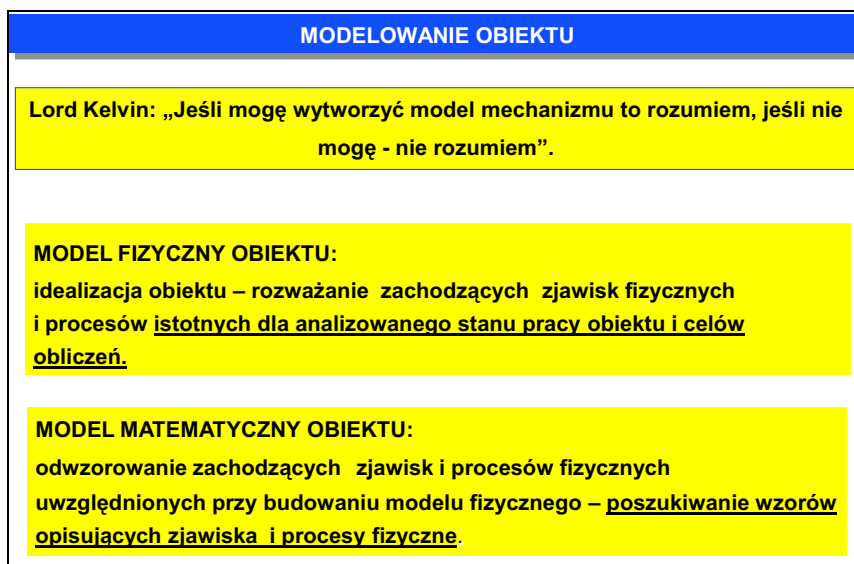
Podstawą do wyznaczenia charakterystyk ruchowych transformatora jest opis relacji między jego wielkościami zaciskowymi: mocami (S_1, P_1, S_2, P_2), napięciami (U_1, U_2) i prądami (I_1, I_2), odpowiednio po stronie pierwotnej, jak i wtórnej. Punktem wyjścia jest opracowanie odpowiedniego modelu fizycznego, a następnie sformułowanie modelu abstrakcyjnego (matematycznego) w formie symbolicznej lub graficznej – obwodu elektrycznego. Model matematyczny w postaci obwodu elektrycznego nazwiemy **modelem obwodowym transformatora** (nazwa tradycyjna – **schemat zastępczy transformatora**). Model ten tworzą odpowiednio połączone elementy skupione: indukcyjności (reaktancje) i rezystancje, odwzorowujące odpowiednio magazynowanie energii pola magnetycznego i rozpraszanie (straty) energii ¹⁾.

¹⁾ Pomijamy pojemności międzyzwojowe i pojemności między innymi elementami transformatora, wynikającymi ze zmagazynowanej energii pola elektrycznego.



Rys. 4.4. Transformator – dwuwrotowy przetwornik elektromagnetyczny: wrota (zaciski) obwodu pierwotnego „1” – dopływ mocy elektrycznej S_1 przetwarzanej ma moc elektryczną S_2 , wrota (zaciski) obwodu wtórnego „2” – odpływ mocy elektrycznej S_2 . Przyjęta konwencja na rysunku: „up” – umownym początkiem uzwojenia jest zacisk, do którego prąd dodatni dopływa, „uk” – umownym końcem uzwojenia jest zacisk, z którego prąd dodatni wypływa, moc dopływająca S_1 jest mocą dodatnią, moc odpływająca S_2 jest mocą ujemną

Podstawowe pojęcia ogólne dotyczące modelowania obiektów technicznych przedstawiamy na rys. 4.5.

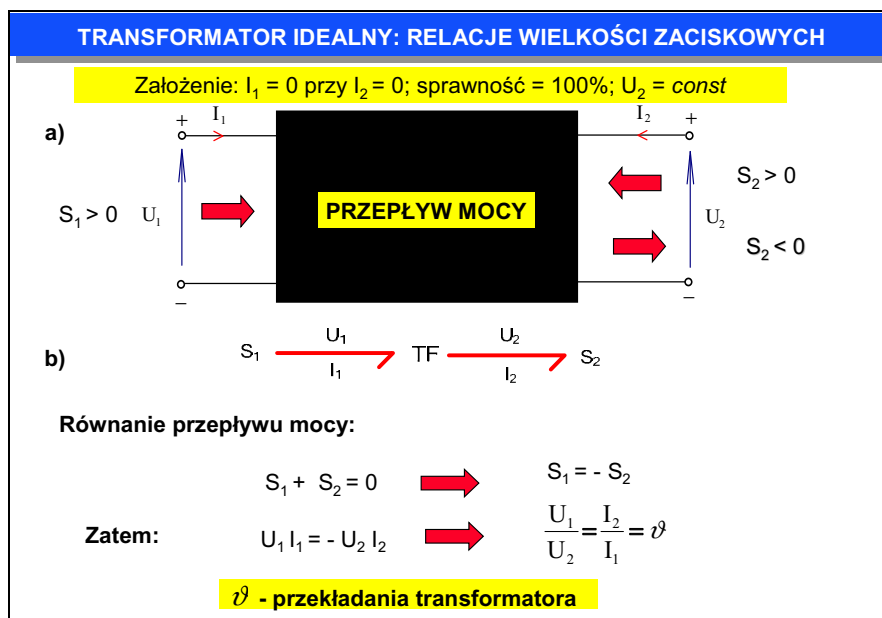


Rys. 4.5. Podstawowe pojęcia ogólne dotyczące modelowania obiektu

Sformułowanie modelu fizycznego rozważanego obiektu polega na jego idealizacji (uproszczeniu) – uwzględnienie zachodzących w nim zjawisk i procesów fizycznych, które są istotne dla analizowanego stanu pracy i celów obliczeń [1]²⁾. Skrajnym przypadkiem uproszczenia transformatora jest **transformator idealny** – transformator o pomijalnie małym pobieranym prądzie koniecznym do wzbudzenia strumienia magnetycznego oraz o pomijalnych stratach mocy. Oznacza to, że moce po stronie pierwotnej i wtórnej są jednakowe – przetwarzanie energii odbywa się bez strat (sprawność wynosi 100%).

Model idealny transformatora i wynikające z niego relacje dla zmiennych zaciskowych pokazujemy na rys. 4.6. Wielkością, która wynika z tych relacji, jest **przekładnia transformatora** – wielkość charakterystyczna transformatora

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \vartheta \quad (4.1)$$



Rys. 4.6. Model transformatora idealnego („czarna skrzynka”) – relacje dla zmiennych zaciskowych: w ujęciu obwodowym, b) w ujęciu grafów wiązań

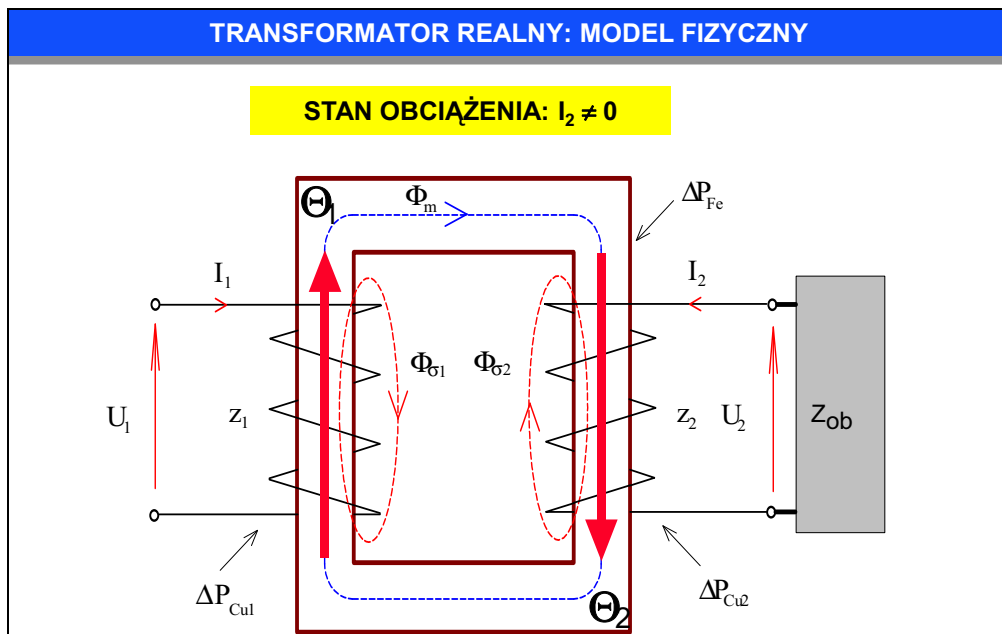
W dalszych rozważaniach omówimy modele fizyczne transformatora realnego dla trzech podstawowych stanów pracy transformatora: **stanu jałowego**, **stanu obciążenia** i **stanu zwarcia**. Zasadniczym stanem pracy transformatora jest stan obciążenia, który oznacza odbiór mocy po stronie wtórnej (załączony odbiornik). Dla tego stanu przedstawimy jego model fizyczny, który będzie punktem wyjścia do sformułowania modeli obwodowych, odwzorowujących właściwości transformatora, kolejno w stanie jałowym, obciążenia i zwarcia.

Na podstawowy model fizyczny transformatora realnego w stanie obciążenia (uwzględniamy podstawowe zjawiska fizyczne towarzyszące przepływowi energii przez transformator), pokazany na rys. 4.7 składają się:

- elementy czynne: rdzeń, uzwojenia pierwotne (liczba zwojów z_1) i wtórne (liczba zwojów z_2);

²⁾ Pomijamy zjawiska i procesy, które nie mają istotnego wpływu na właściwości (charakterystyki) obiektu dla rozważanego stanu pracy.

- wielkości fizyczne: napięcia na zaciskach uzwojeń (U_1, U_2), prądy płynące w uzwojeniach (I_1, I_2), przepływy uzwojeń (Θ_1, Θ_2), strumień magnetyczny główny (Φ_m), strumienie rozproszenia uzwojeń ($\Phi_{\sigma 1}, \Phi_{\sigma 2}$), straty w rdzeniu (ΔP_{Fe}) i straty w uzwojeniach ($\Delta P_{Cu1}, \Delta P_{Cu2}$).



Rys. 4.7. Model fizyczny transformatora realnego w stanie obciążenia: rozpył strumienia głównego Φ_m oraz strumieni rozproszenia $\Phi_{\sigma 1}$ i $\Phi_{\sigma 2}$; straty w rdzeniu (żelazie) ΔP_{Fe} ; straty w uzwojeniach (miedzi) ΔP_{Cu1} oraz ΔP_{Cu2}

Uwaga: zgodnie z przyjętą konwencją strzałkowania zwroty strzałek odpowiadają wartościom dodatnim wielkości fizycznych

4.4. Stan jałowy transformatora

Stan jałowy transformatora – stan, w którym uzwojenie pierwotne zasilane jest napięciem przemiennym U_1 , a uzwojenie wtórne jest otwarte ($U_2 = U_{20}$, $I_2 = 0$). Prąd płynący w uzwojeniu pierwotnym nazywamy **prądem jałowym** (I_0), a jego dwie składowe – **składową czynną** I_{0cz} i **składową bierną (magnesującą)** I_m . Wartości prądu jałowego zwykle wyrażamy w procentach prądu znamionowego I_N transformatora:

$$I_{0\%} = \frac{I_0}{I_N} 100 \text{ [%]} \quad (4.2)$$

W transformatorach energetycznych (mocy) procentowa wartość znamionowa prądu stanu jałowego zawiera się w zakresie 1 – 10% prądu znamionowego.

Zasada: im większa moc, tym na ogół mniejsza wartość prądu stanu jałowego.

Przemienny przepływ $\Theta_1 = I_0 z_1$ wzbudza strumień, w którym wyróżniamy **strumień magnesujący** (główny) Φ_m – strumień sprzężony z obydwooma uzwojeniami – oraz **strumień rozproszenia** $\Phi_{\sigma 1}$ – strumień sprzężony tylko z uzwojeniem własnym (zasilanym).

Zgodnie z prawem Faraday'a, efektem sprzężenia przemiennego strumienia rozproszenia $\Phi_{\sigma 1}$ z uzwojeniem pierwotnym oraz strumienia głównego Φ_m z obu uzwojeniami jest indukowanie w nich SEM o wartościach skutecznych określonych zależnościami:

$$E_{\sigma 1} = 4,44 z_1 \Phi_{\sigma 1} f \quad (4.3)$$

$$E_1 = 4,44 z_1 \Phi_m f \quad (4.4)$$

$$E_2 = 4,44 z_2 \Phi_m f \quad (4.5)$$

Dzieliąc stronami zależności (4.4) i (4.5) stronami, otrzymujemy charakterystyczną wielkość:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{z_1}{z_2} = \vartheta_z \quad (4.6)$$

którą nazywamy **przekładnią zwojową transformatora**.

Dla obwodu pierwotnego możemy zapisać następujące równanie równowagi:

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + \underline{E}_{\sigma 1} + \underline{E}_1 \quad (4.7)$$

Możemy założyć, że SEM E_1 jest w przybliżeniu równa napięciu pierwotnemu U_1 . Zatem, pomijamy spadek napięcia $R_1 I_1$ oraz SEM $E_{\sigma 1}$, ze względu niewielką wartość prądu stanu jałowego. Stąd rów. (4.7) upraszczamy do postaci:

$$\underline{U}_1 \approx \underline{E}_1 \quad (4.8)$$

Dla transformatora jednofazowego napięcie na jego zaciskach wtórnych w stanie jałowym U_{20} jest równe SEM E_2 . Zatem, rów. (4.6) możemy napisać w postaci:

$$\frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} = \vartheta \quad (4.9)$$

Stosunek wyrażony rów. (4.9) jest **przekładnią napięciową ϑ transformatora**. Wyrażenie to jest tożsame z rów. (4.1), wyznaczonym dla transformatora idealnego.

Uwaga: W przypadku transformatorów trójfazowych, na ogół nie obowiązuje ta zasada (patrz p. 4.8 i materiały do laboratorium [19]).

Dla przyjętego modelu fizycznego transformatora bilans mocy jest następujący:

$$P_1 = P_0 = R_1 I_0^2 + \Delta P_{Fe} \quad (4.10)$$

gdzie, ΔP_{Fe} – straty w rdzeniu (żelazie) transformatora wywołane zjawiskami histerezy i prądów wirowych.

Uwaga: W przypadku transformatorów trójfazowych w równ. (4.10) straty w uzwojeniach należy pomnożyć przez 3 (patrz materiały do laboratorium [19]).

Ze względu na niewielką wartość prądu stanu jałowego możemy pominąć straty w uzwojeniu pierwotnym. Zatem wyr. (4.10) możemy uprościć do postaci:

$$P_0 \approx \Delta P_{Fe} \quad (4.11)$$

Moc pobierana przez transformator w stanie jałowym pokrywa straty w rdzeniu. Jej wartość odniesiona do mocy znamionowej transformatora stanowi $(P_0/S_n) \cdot 100 = (0,3 \div 3)\%$

Zasada: im większa moc, tym na ogół mniejsza procentowa wartość strat jałowych.

Straty w rdzeniu oraz wpływ strumienia głównego na właściwości transformatora możemy opisać parametrami obwodowymi zdefiniowanymi następująco:

- rezystancją odwzorowującą straty w rdzeniu

$$R_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{I_{0cz}^2} \quad (4.12)$$

- reaktancją magnesującą odwzorowującą magnesowanie

$$X_m = \frac{E_1}{I_m} \quad (4.13)$$

- przy czym prąd stanu jałowego jest sumą geometryczną następujących składowych:

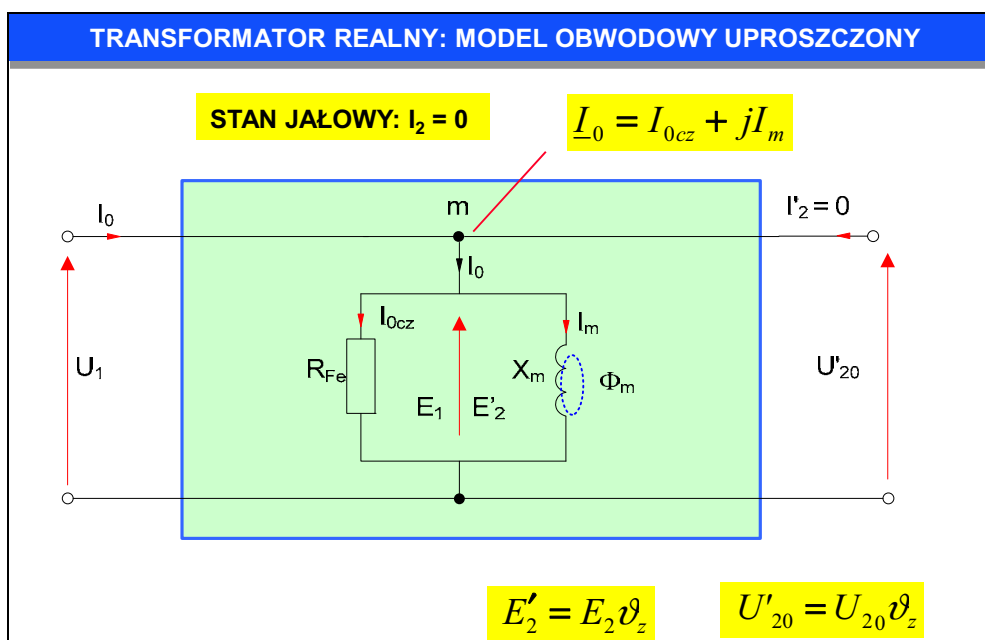
$$\underline{I}_0 = I_{0cz} + jI_m \quad (4.14)$$

$$I_0 = \sqrt{I_{0cz}^2 + I_m^2} \quad (4.15)$$

I_{0cz} – składowej czynnej – prądu pokrywającego straty w rdzeniu,

I_m – składowej biernej – prądu wzbudzającego strumień główny (magnesującego rdzeń).

Row. (4.13) ma charakter nieliniowy: wartość reaktancji magnesującej X_m zależy od poziomu nasycenia obwodu magnetycznego (rdzenia) transformatora.



Rys. 4.8. Model obwodowy transformatora realnego w stanie jałowym

Uwaga: wielkości i parametry uzwojenia wtórnego zredukowano do uzwojenia pierwotnego

Przy uwzględnieniu powyższych rozważań, odwzorowujemy model fizyczny transformatora w stanie jałowym (model na rys. 4.7 z odłączonym obciążeniem) modelem obwodowym pokazanym na rys. 4.8.

Aby połączyć galwanicznie oba uzwojenia dokonujemy redukcji wielkości i parametrów uzwojenia wtórnego do pierwotnego, tzn. liczbę zwojów z_2 uzwojenia zastępujemy liczbą $z'_2 = z_1$ (przezważamy transformator po stronie wtórnej). Uzyskujemy zrównanie poziomów napięć obu uzwojeń, dokonując przeliczeń napięć wg zależności podanych na rys. 4.8.

Właściwości transformatora w stanie jałowym określone są głównie przez strumień główny Φ_m oraz straty w rdzeniu ΔP_{Fe} zależne od wymiarów i jakości blach transformatorowych. Właściwości te odwzorowują parametry obwodowe: rezystancja strat w rdzeniu R_{Fe} oraz reaktancja magnesująca X_m .

Wartości parametrów modelu na rys. 4.8 wyznaczymy w oparciu o wyniki pomiarów wykonanych w ramach **próby stanu jałowego** (pomiar napięć, prądów i mocy). Sposób przeprowadzenia próby i szczegóły obliczeń opisano w załączonym wykazie literatury przedmiotu i normach oraz w materiałach pomocniczych do laboratorium maszyn elektrycznych [19].

4.5. Stan obciążenia

Stan obciążenia transformatora – stan transformatora, w którym uzwojenie wtórne jest zamknięte przez impedancję obciążenia Z_{ob} . SEM E_2 w obwodzie wtórnym wymusza przepływ prądu I_2 . W transformatorze obciążonym, **zgodnie z zasadą zachowania energii**, strumień główny Φ_m powstaje przez współdziałanie przepływów (sił magnetomotorycznych) obu uzwojeń: przepływu pierwotnego Θ_1 i przepływu wtórnego Θ_2 .

W zakresie obciążeń znamionowych transformatora możemy założyć, że **suma geometryczna przepływów obu uzwojeń ma stałą wartość – równą przepływowi w stanie jałowym**:

$$\underline{\Theta}_1 + \underline{\Theta}_2 = \underline{\Theta}_0 \quad [\text{A}] \quad (4.16)$$

lub

$$\underline{I}_1 z_1 + \underline{I}_2 z_2 = \underline{I}_0 z_1 \quad [\text{A}] \quad (4.17)$$

Po redukcji wielkości i parametrów uzwojenia wtórnego do pierwotnego, równ. (4.17) przyjmie postać:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_0 \quad [\text{A}] \quad (4.18)$$

Powyższe równania – **równania równowagi przepływów** – wynikają z podstawowej zasady pracy transformatora – tendencji do wzbudzenia ekstremalnego strumienia, innymi słowy tendencji do zmagazynowania ekstremalnej energii w polu magnetycznym transformatora.

Wniosek: w zakresie obciążeń znamionowych transformator praktycznie pracuje przy stałym module strumienia głównego

$$\Phi_m \equiv \text{const}$$

i w konsekwencji przy stałych stratach w rdzeniu $\Delta P_{Fe} \equiv \text{const}$.

Powyższy wniosek potwierdza ogólna zasada w przyrodzie:

NATURA NIE ZNOSI ZMIANY STRUMIENIA!

W elektrotechnice, powyższe prawo, znane jest jako **zasada stałych sprzężeń magnetycznych**. Z powyższych rozważań wynika kolejny bardzo użyteczny wniosek: transformator jest **wzorcowym sprzężeniem elektromagnetycznym**, gdyż osie magnetyczne przepływów obu uzwojeń pokrywają się.

W efekcie, przy danych przepływach obu uzwojeń, **transformator wzbudza maksymalny strumień magnetyczny**.

Efektom działania przepływu wtórnego Θ_2 jest wzbudzenie strumienia rozproszenia uzwojenia wtórnego $\Phi_{\sigma 2}$ (strumień sprzężony tylko z uzwojeniem wtórnym), a na skutek wzrostu prądu pierwotnego I_1 zwiększa się strumień rozproszenia uzwojenia pierwotnego $\Phi_{\sigma 1}$. Strumienie rozproszenia $\Phi_{\sigma 1}$ i $\Phi_{\sigma 2}$ indukują odpowiednio w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym SEM $E_{\sigma 1}$ oraz $E_{\sigma 2}$. Ponadto, prądy w obu uzwojeniach transformatora powodują spadki napięcia na rezystancjach uzwojenia pierwotnego $I_1 R_1$ oraz wtórnego $I_2 R_2$.

Zatem, dla obwodu pierwotnego i wtórnego rozważanego transformatora możemy zapisać następujące równania równowagi:

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + \underline{E}_{\sigma 1} + \underline{E}_1 \quad (4.19)$$

$$\underline{U}_2 = R_2 \underline{I}_2 + \underline{E}_{\sigma 2} + \underline{E}_2 \quad (4.20)$$

SEM $E_{\sigma 1}$ oraz $E_{\sigma 2}$ odwzorowujemy za pomocą wielkości obwodowych – spadku napięcia na **reaktancji rozproszenia** uzwojenia pierwotnego $X_{\sigma 1}$ oraz wtórnego $X_{\sigma 2}$:

$$E_{\sigma 1} = X_{\sigma 1} I_1 \text{ [V]} \quad (4.21)$$

$$E_{\sigma 2} = X_{\sigma 2} I_2 \text{ [V]} \quad (4.22)$$

Równaniach (4.21)–(4.22) mają charakter liniowy: wartości reaktancji rozproseń są stałe, gdyż droga przepływu obu strumieni zamyka się przez powietrze. Reluktancja tej części drogi strumieni decyduje o wartości strumieni rozproszenia.

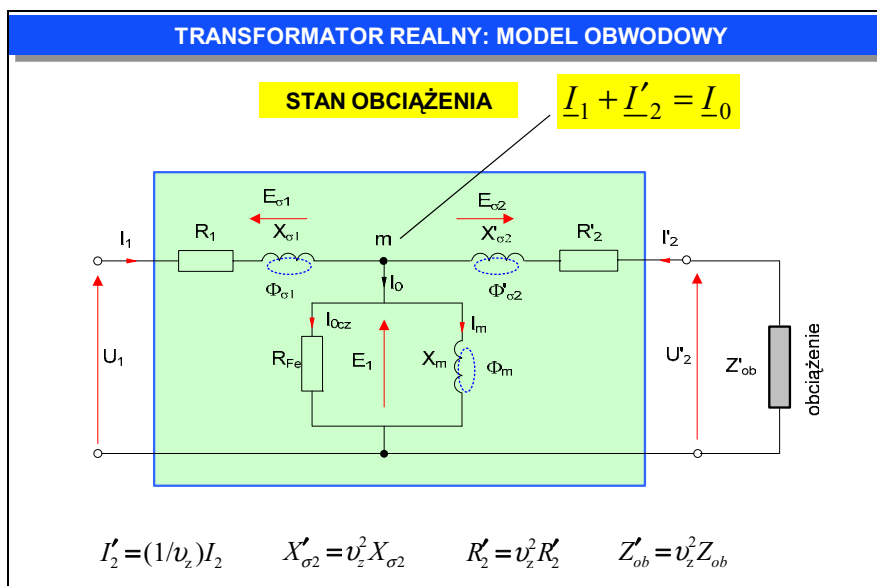
Istotny wpływ na właściwości transformatora w stanie obciążenia mają straty w miedzi uzwojenia pierwotnego ΔP_{Cu1} i wtórnego ΔP_{Cu2} – nazywane także **stratami obciążeniowymi** (zmiennymi). Do ich odwzorowania przyjmujemy wielkości obwodowe – rezystancje uzwojeń – zdefiniowane następująco:

$$R_1 = \frac{\Delta P_{Cu1}}{I_1^2} \text{ [\Omega]} \quad (4.23)$$

$$R_2 = \frac{\Delta P_{Cu2}}{I_2^2} \text{ [\Omega]} \quad (4.24)$$

Uwaga: W przypadku transformatorów trójfazowych w równ. (4.23–4.24) straty w uzwojeniach należy podzielić przez 3 (patrz materiały do laboratorium [19]).

Przy uwzględnieniu powyższych rozważań, odwzorowujemy model fizyczny transformatora w stanie obciążenia (rys. 4.7) modelem obwodowym transformatora pokazanym na rys. 4.9.



Rys. 4.9. Model obwodowy transformatora realnego w stanie obciążenia – model o konturze „T”
 Uwaga: Model odpowiada transformatorowi zredukowanemu (sprowadzonemu) do przekładni $v = 1$.
 Wartości wielkości i parametrów uzwojenia wtórnego zredukowano do uzwojenia pierwotnego przy założeniu równości przepływów i strat uzwojenia zredukowanego i rzeczywistego

Stan obciążenia transformatora jest stanem pośrednim między dwoma stanami krańcowymi – stanem jałowym a stanem zwarcia.

4.6. Stan zwarcia transformatora

Stan zwarcia pomiarowego transformatora (lub krótko: stan zwarcia transformatora) – stan transformatora, w którym uzwojenie wtórne jest zwarte ($U_2 = 0$), zaś uzwojenie pierwotne jest zasilane odpowiednio obniżonym napięciem ($U_{1z} \ll U_{1N}$), tzn. takim, które wymusza w obu uzwojeniach prądy zwarcia o wartościach prądów znamionowych transformatora, odpowiednio $I_{1z} = I_{1N}$ oraz $I_{2z} = I_{2N}$.

Definicja: Wartość napięcia, jakie należy przyłożyć do zacisków pierwotnych transformatora, przy zwartym uzwojeniu wtórnym, celem wymuszenia w obu jego uzwojeniach przepływu prądów znamionowych, nazywamy **napięciem zwarcia**.

Napięcia zwarcia jest ważnym parametrem eksploatacyjnym transformatora – podanym na jego tabliczce znamionowej, określanym zwykle w procentach napięcia znamionowego, wg następującej zależności:

$$U_{z\%} = \frac{U_{1z}}{U_{1N}} \cdot 100\% \quad (4.25)$$

gdzie: $U_{z\%}$ – napięcie zwarcia wyrażone w procentach,
 U_{1z} – napięcie zwarcia mierzone w woltach,
 U_{1N} – napięcie znamionowe,
 I_{1N} – prąd znamionowy.

Dla normalnych transformatorów energetycznych napięcie zwarcia zawiera się w zakresie 3–15% napięcia znamionowego.

Zasada: im większa moc, tym, na ogół, większe procentowe napięcie zwarcia.

W stanie zwarcia transformatora, zasilanego znacznie obniżonym napięciem ze względu na znacznie obniżony poziom strumienia magnesującego ($\Phi_{mz} \ll \Phi_{mN}$), wartość prądu jałowego w bilansie przepływów i wartość strat w rdzeniu są pomijalnie małe:

$$\underline{I}_{1N}z_1 + \underline{I}_{2N}z_2 \approx 0 \quad [A] \quad (4.26)$$

stąd

$$\underline{I}_{1N}z_1 \approx -\underline{I}_{2N}z_2 \quad (4.27)$$

Zatem dla modułów mamy:

$$I_{1N} \approx I_{2N} \frac{z_2}{z_1} = I_{2N} \frac{1}{\vartheta} \quad [A] \quad (4.28)$$

W stanie zwarcia pomiarowego mamy $\Phi_{mz} \ll \Phi_{mN}$, zatem straty w rdzeniu, zależne od kwadratu indukcji (strumienia), można przyjąć jako pomijalnie małe w stosunku do strat w rdzeniu przy napięciu znamionowym. Zatem moc pobierana w stanie zwarcia pomiarowego pokrywa straty w uzwojeniach transformatora:

$$P_{1z} \approx P_{Cu1N} + P_{Cu2N} \quad (4.29)$$

Stąd, z równ. (4.27) i (4.29) wynika, że możemy pominąć gałąź magnesującą w modelu obwodowym transformatora (rys. 4.9).

Po wprowadzeniu zredukowanego prądu wtórnego:

$$I'_{2N} = I_{2N} \frac{1}{\vartheta} \quad [A] \quad (4.30)$$

otrzymamy odpowiednio zredukowane wartości rezystancji i reaktancji rozproszenia w obwodzie wtórnym:

$$R'_2 = \vartheta^2 R_2 \quad X'_{\sigma 2} = \vartheta^2 X_{\sigma 2} \quad (4.31)$$

Przy uwzględnieniu powyższych rozważań, można odwzorować stan zwarcia transformatora modelem obwodowym (rys. 4.9) uproszczonym do postaci pokazanej na rys. 4.10.

Na podstawie modelu obwodowego transformatora (rys. 4.10) w stanie zwarcia możemy sformułować następującą zależność do obliczania napięcia zwarcia transformatora:

$$U_{z\%} = \frac{Z_z I_{1N}}{U_{1N}} 100 \quad (4.32)$$

gdzie impedancja zwarcia transformatora

$$Z_z = \sqrt{R_z^2 + X_z^2} \quad (4.33)$$

rezystancja zwarcia transformatora

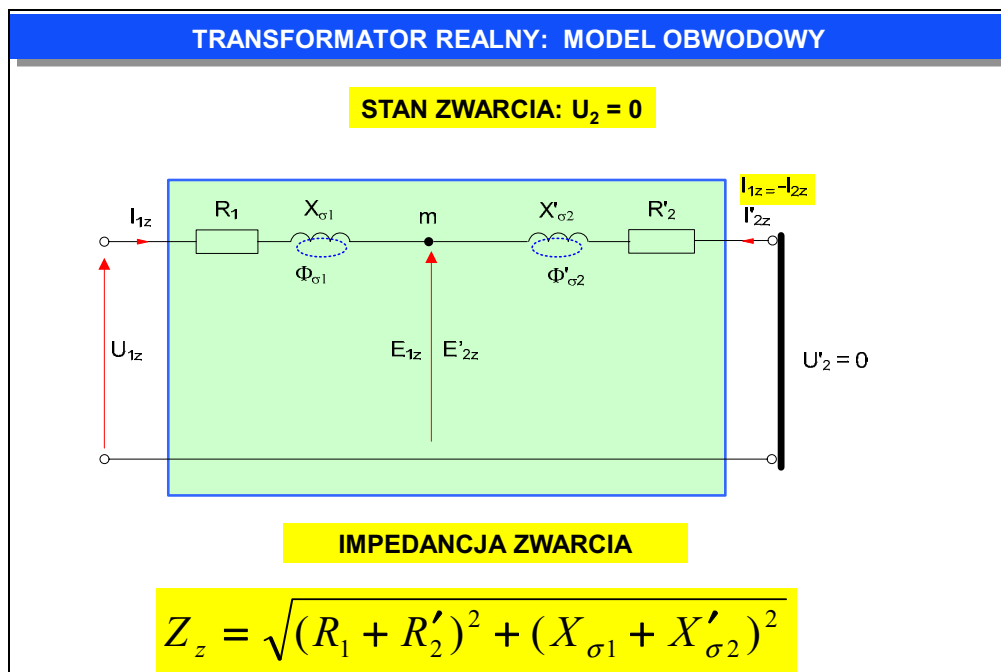
$$R_z = R_1 + R'_2 \quad (4.34)$$

oraz reaktancja zwarcia transformatora

$$X_z = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} \quad (4.35)$$

Właściwości transformatora w stanie zwarcia określone są głównie przez strumienie rozproszenia uzwojenia pierwotnego $\Phi_{\sigma 1}$ i wtórnego $\Phi_{\sigma 2}$ oraz stratami w uzwojeniach ΔP_{Cu1} oraz ΔP_{Cu2} zależnymi od wymiarów i rozmieszczenia uzwojeń.

Właściwości te odwzorowują parametry obwodowe: rezystancja zwarcia transformatora $R_z = R_1 + R'_2$ oraz reaktancja zwarcia transformatora $X_z = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2}$.



Rys. 4.10. Model obwodowy transformatora realnego w stanie zwarcia

Wartości parametrów modelu obwodowego transformatora (rys. 4.10) wyznaczmy w oparciu o wyniki pomiarów wykonanych w ramach **próby stanu zwarcia** (pomiarów napięć, prądów i mocy). Sposób przeprowadzenia próby i szczegóły obliczeń opisano w załączonym wykazie literatury przedmiotu i normach oraz w materiałach pomocniczych do laboratorium maszyn elektrycznych [19].

4.7. Charakterystyki ruchowe

Omawianie charakterystyk ruchowych transformatora ograniczymy tylko do najważniejszych: **zmienności napięcia** i **sprawności**. Charakterystyki te są syntetycznym ujęciem **charakterystyki zewnętrznej** i **charakterystyki obciążenia** transformatora. Do ich wyznaczenia możemy posłużyć się wynikami próby stanu jałowego i stanu zwarcia transformatora.

2.7.1. Zmienność napięcia

Definicja zmienności napięcia

Zmienność napięcia wyraża spadek wtórnego napięcia transformatora przy przejściu od stanu jałowego do stanu obciążenia przy określonym współczynniku mocy, niezmienionym napięciu pierwotnym i niezmienionej częstotliwości. Parametr ten jest ważny w eksploatacji transformatora, gdyż określa jego właściwość jako źródła napięcia.

Zmienność napięcia określamy w procentach napięcia znamionowego:

$$\Delta\Delta_{\%} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100 \quad (4.36)$$

gdzie: U_{20} – napięcie wtórne w stanie jałowym,
 U_2 – napięcie wtórne przy obciążeniu.

Wyznaczanie zmienności napięcia

W praktyce inżynierskiej wartość procentową zmienności napięcia obliczamy z zależności przybliżonej:

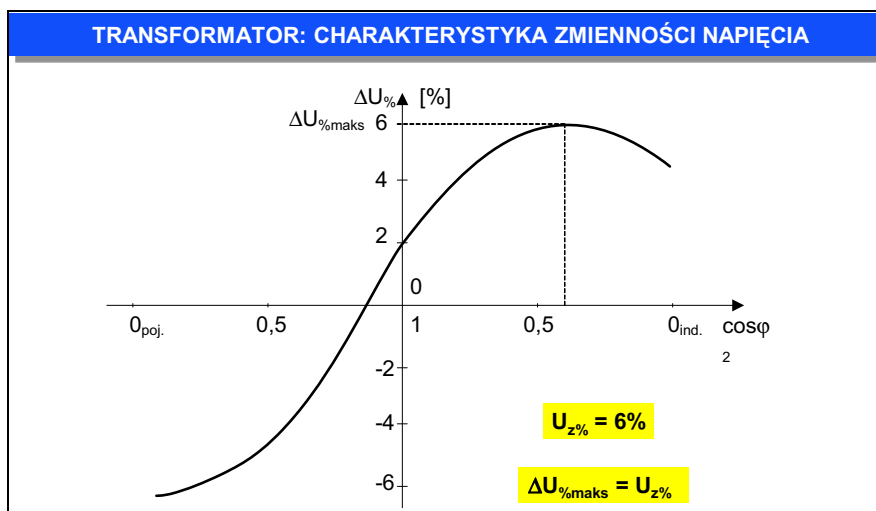
$$\Delta U_{\%} \approx \alpha (U_{R\%} \cos \varphi_2 \pm U_{X\%} \sin \varphi_2) [\%] \quad (4.37)$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{I_1}{I_{1N}} \quad U_{R\%} = \frac{R_z I_{1N}}{U_{1N}} 100 \quad U_{X\%} = \frac{X_z I_{1N}}{U_{1N}} 100 \quad (4.38)$$

Z zależności (4.36) i (4.37) wynika, że największa procentowa wartość zmienności napięcia transformatora równa jest jego procentowemu napięciu zwarcia.

Przykładową zależność zmienności napięcia transformatora od charakteru obciążenia ilustruje rys. 4.11.



Rys. 4.11. Charakterystyka zmienności napięcia transformatora o napięciu zwarcia $U_{z\%} = 6\%$

2.7.2. Sprawność

Definicja sprawności

Sprawność transformatora określa jego właściwości energetyczne. Można ją określić jako stosunek mocy czynnej oddanej P_2 do mocy czynnej pobranej P_1 przez transformator:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 [\%] \quad (4.39)$$

Sprawność znamionową określa się przy znamionowych parametrach pracy, współczynniku mocy $\cos\varphi_2 = 1$, znamionowej wydajności urządzeń pomocniczych i przy temperaturze uzwojeń 75°C (348,2 K).

Sprawność transformatora jest na ogół duża – największa ze sprawności wszystkich urządzeń elektrycznych – osiąga wartości do 99%.

Wyznaczenie sprawności

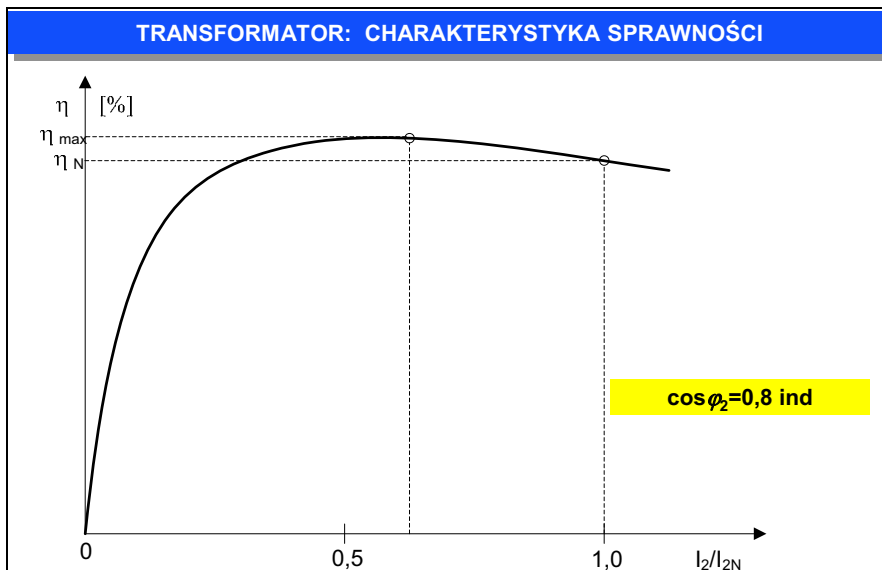
W praktyce inżynierskiej sprawność transformatora wyznaczamy metodą strat poszczególnych. Metoda ta polega na określeniu strat w transformatorze w warunkach znamionowych. Sprawność zgodnie z definicją wynosi:

$$\eta = 1 - \frac{\sum \Delta P}{P_2 + \sum \Delta P} \quad (4.40)$$

przy czym, sumaryczne straty mocy czynnej w transformatorze:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{Cu}} \quad [\text{W}] \quad (4.41)$$

Straty w rdzeniu (żelazie) należą do kategorii **strat jałowych** (stałych), a straty w uzwojeniach (miedzi) do kategorii **strat obciążeniowych** (zmiennych). Podstawą do określenia strat w zależnościach (4.40) i (4.41) są wyniki próby stanu jałowego i stanu zwarcia transformatora.



Rys. 4.12. Charakterystyka sprawności transformatora przy $\cos\varphi_2 = 0,8$

Straty w rdzeniu wyznaczamy na podstawie charakterystyki stanu jałowego, natomiast straty w uzwojeniach wg wzoru:

$$\Delta P_{\text{Cu}} = \alpha^2 \Delta P_{\text{CuN}} \quad [\text{W}] \quad (4.42)$$

gdzie: ΔP_{CuN} – znamionowe straty w miedzi w stanie nagrzanym transformatora,
 $\alpha = I_2/I_{2N}$ – stosunek obciążenia faktycznego do znamionowego.

Moc czynną P_2 wyznaczamy z zależności:

$$P_2 = \alpha \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2 \quad [\text{W}] \quad (4.43)$$

gdzie: S_N – moc znamionowa transformatora,
 $\cos \varphi_2$ – współczynnik mocy odbiornika.

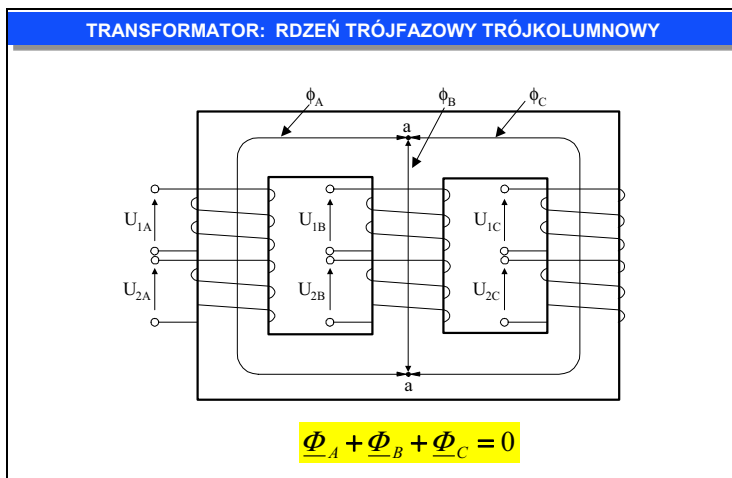
Można wykazać, że sprawność maksymalna transformatora występuje przy takim obciążeniu, przy którym straty w uzwojeniach równe są stratom w żelazie. Typową charakterystykę sprawności transformatora przy stałym współczynniku mocy, przedstawiono narys. 4.12.

4.8. Układy połączeń i przekładania transformatorów trójfazowych

Uzwojenia transformatorów trójfazowych można łączyć zarówno w gwiazdę (symbol Y lub y) jaki i w trójkąt (symbol D lub d). Dodatkowo uzwojenie wtórne można także łączyć w zygzak (symbol z). Przy czym, każde z tych połączeń można wykonać na parę sposobów – otrzymać można dużą liczbę możliwości.

Punktem wyjścia do łączenia uzwojeń transformatora jest topologia rdzenia i rozmieszczenia uzwojeń (rys. 4.13). Uzwojenia należy tak połączyć, aby było spełnione następujące równ. strumieni poszczególnych faz (kolumn):

$$\underline{\Phi}_A + \underline{\Phi}_B + \underline{\Phi}_C = 0 \quad (4.44)$$



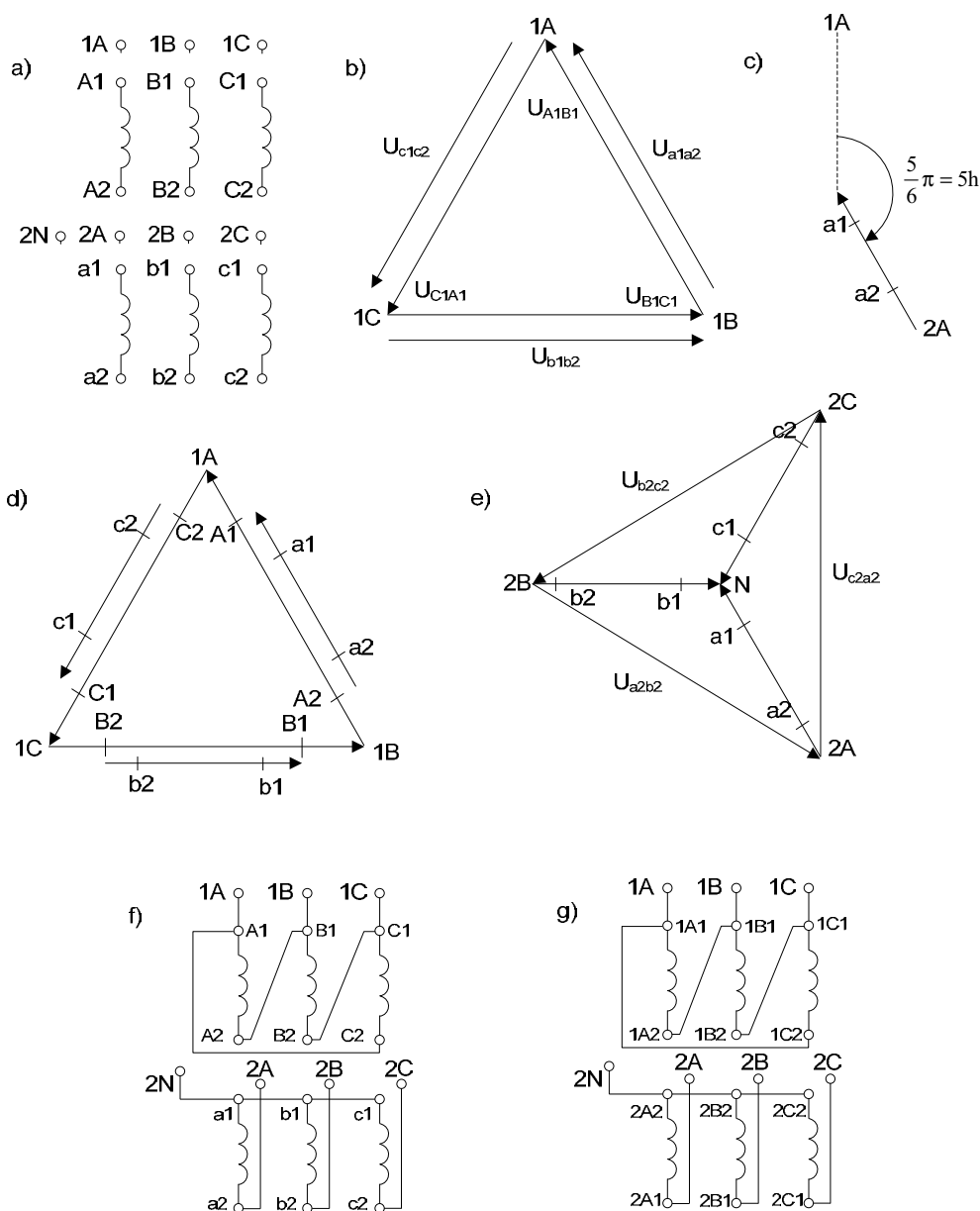
Rys. 4.13. Rozpływ strumieni i rozmieszczenie uzwojeń w transformatorze trójfazowym trójkolumnowym

Uzwojenia powinny być nawinięte w tym samym kierunku. Konieczne jest także odpowiednie oznaczenie zacisków uzwojeń – reguluje to odpowiednia norma [23].

Na rys. 4.14 przedstawiono sposób łączenia uzwojeń w układzie: trójkąt (D) po stronie pierwotnej i gwiazda (y) po stronie wtórnej. Ponadto uzwojenia połączone są w ten sposób, aby kąt przesunięcia między odpowiednimi napięciami przewodowymi wynosił 150° . W praktyce kąt wyraża się nie w stopniach (radianach), lecz w jednostkach odpowiadających oznaczeniom godzin na tarczy zegara – jedna godzina odpowiada kątowi 30° . Zatem dla kąta 150° będzie to liczba 5 – godzina 5. Układ połączeń Dy dla takiego przesunięcia kątownego napięć oznacza się symbolem Dy5.

Celem łatwiejszego omawiania czynności łączenia, założono wstępne (dydaktyczne) oznaczenia końcówek uzwojeń transformatora (rys. 4.14a). Dany jest trójkąt napięć międzyprzewodowych 1A-1B-1C (rys. 4.14b). Ponieważ w układzie trójkąta, napięcia przewodowe są jednoznaczne z napięciami

ciami fazowymi, więc fazyzy napięć fazowych po stronie wtórnej są do nich równoległe. Przedstawiono to na rys. 4.14b.



Rys. 4.14. Układ połączeń Dy5 transformatora trójfazowego: a), b), c), d) i e) wykresy wskazowe napięć; f) układ połączeń uzwojeń

Aby uzyskać wymagane połączenie Dy5, rysuje się z punktu N promień przesunięty względem $N1A$ o kąt $5\pi/6$, którego koniec wyznacza punkt $2A$ (rys. 4.14c) określający napięcie U_{a1a2} po stronie wtórnej. Jak widać, jest on równoległy do fazyzy U_{A1B1} , zatem uzwojenie $A1-A2$ po stronie pierwotnej transformatora powinno być przyłączone między zaciski $1A$ i $1B$ (rys. 4.14d). W ten sposób okre-

ślone zostają również zwroty napięć w uzwojeniach strony wtórnej. Do punktu gwiazdowego N strony wtórnej muszą być przyłączone zaciski a1, b1, c1 (rys. 4.14e), przy czym kolejność faz na rys. 4.14e musi być taka sama jak na rys. 4.14d. Stąd łatwo jest określić schemat montażowy (rys. 4.14f), na którym podano wstępne (dydaktyczne) oznaczenia zacisków transformatora – oznaczenia zgodnie z normą [23] podano na rys. 4.14.

Definicja przekładni

Zgodnie z normą [22] przekładnia transformatora trójfazowego jest równa stosunkowi (wartość większa od jedności) napięć międzyprzewodowych, odpowiednio górnego i dolnego napięcia:

$$\vartheta_u = \frac{U_g}{U_{do}} \quad (4.45)$$

Znajomość przekładni transformatora jest niezbędna przy analizie jego pracy samodzielnej i równoległej. Pozwala ona określić napięcia strony wtórnej przy zadanych napięciach strony pierwotnej oraz przeliczyć parametry schematu zastępczego, dane dla jednej strony, na stronę drugą. Przekładnie napięciowa transformatora trójfazowego, w związku z różnymi kombinacjami połączeń jego uzwojeń, różni się na ogół od przekładni zwojowej. W materiałach [19] podano odpowiednie zależności między tymi przekładniami dla różnych układów połączeń.

Pojęciem ścisłym jest pojęcie przekładni zwojowej. Natomiast pojęcie przekładni napięciowej jest związane z uproszczeniem (dopuszczalnym w praktyce), wynikającym z pominięcia spadków napięć: w uzwojeniu pierwotnym (od przepływu jałowego) i w uzwojeniu wtórnym (od przepływu prądu pobieranego przez woltomierz) w czasie pomiaru napięć na zaciskach transformatora. W związku z tym, w celu ograniczenia błędu pomiarowego, pomiary przekładni napięciowej należy wykonać w zakresie prostoliniowej części charakterystyki magnesowania rdzenia transformatora, a więc przy obniżonym napięciu.

4.9. Praca równoległa

Przy pracy równoległej transformatorów ich zaciski uzwojenia górnego napięcia są przyłączone do wspólnych szyn górnego napięcia, a zaciski uzwojenia dolnego napięcia do wspólnych szyn dolnego napięcia (rys. 4.15).

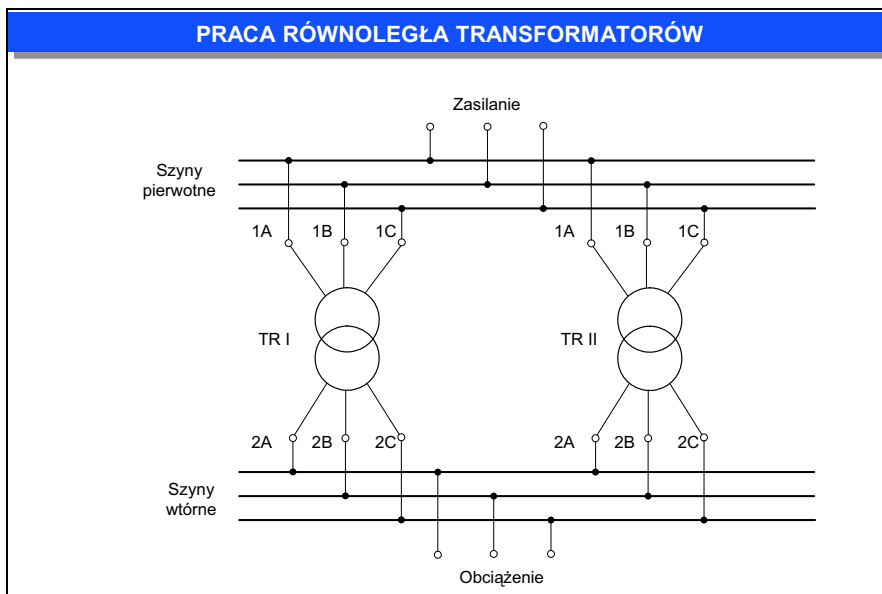
Doskonała praca polega równoległa jest wtedy:

- 1) gdy szyny napięcia wtórnego nie są obciążone w uzwojeniach transformatorów nie płyną żadne prądy poza prądami stanu jałowego w uzwojeniach pierwotnych;
- 2) ze wzrostem obciążenia zewnętrznego transformatory obciążają się równomiernie (tj. proporcjonalnie do ich mocy znamionowych) i osiągają jednocześnie obciążenie znamionowe;
- 3) prądy transformatorów są ze sobą w fazie i dodają się arytmetycznie.

Wymienione wyżej warunki doskonałej pracy równoległej praktycznie nie mogą być spełnione w sposób idealny. Z tej przyczyny norma [22] dopuszczają następujące odchylenia (warunki rzeczywistej pracy równoległej):

- 1) odchyłka przekładni napięciowej nie może przekroczyć ich wartości średniej,
- 2) odchyłka napięć zwarcia nie może przekroczyć +10% ich wartości średniej,
- 3) zaleca się stosunek mocy znamionowej transformatorów nie większy niż 1:3,
- 4) grupy połączeń transformatorów powinny być jednakowe.

Powyższe warunki muszą być sprawdzone przed równoległym połączeniem transformatorów. Trzy z powyższych warunków mogą być sprawdzone tylko drogą pomiaru [6, 13].



Rys. 4.15. Schemat połączeń transformatorów trójfazowych do pracy równoległej

4.10. Transformatory specjalne

W praktyce występuje duża różnorodność specjalnych wykonania transformatorów. Należą do nich **autotransformatory**, **transformatory trójzwojowe**, **transformatory trakcyjne**, **transformatory piecowe**, **transformatory prostownikowe**, **transformatory spawalnicze**, **transformatory probieczne**, **transformatory pomiarowe** (przekładniki) i wiele innych.

W poprzednim rozdziale (3.5.1) pokazano przykłady budowy i zastosowań transformatorów trakcyjnych (rys. 3.18–3.21) w systemach elektroenergetycznych nowoczesnego transportu szynowego.

Transformatory specjalne można stosować do zwielokrotniania częstotliwości, liczby faz, jako dławiki itd.

Wszystkie wymienione transformatory różnią się formami konstrukcyjnymi. Podstawowe zjawiska i procesy fizyczne oraz zasada działania (prawo indukcji elektromagnetycznej) pozostają zawsze takie same, chociaż każdy typ transformatora wyróżnia się swoją specyficzną charakterystyką i parametrami (napięcia, napięcia zwarcia itd.).

Szczegóły dotyczące budowy i charakterystyk ruchowych transformatorów specjalnych podano w obszernej literaturze przedmiotu, której wykaz zamieszczamy na końcu niniejszego rozdziału.

4.11. Podsumowanie

Transformator jest urządzeniem elektromagnetycznym, służącym do przetwarzania energii elektrycznej o pewnym napięciu na energię o innym napięciu, bez udziału energii mechanicznej.

Podstawą działania i budowy transformatora jest zjawisko indukcji elektromagnetycznej – prawo Faradaya.

W rozdziale omówiono głównie transformatory pracujące w systemach elektroenergetycznych – **transformatory energetyczne**.

Na wstępie krótko opisano budowę transformatorów, a następnie rozważono trzy stany ich pracy: **stan jałowy**, **stan obciążenia** i **stan zwarcia**. Dla poszczególnych stanów pracy przedstawiono modele fizyczne i obwodowe transformatora oraz ich parametry. Omówiono najważniejsze **charakte-**

rystyki ruchowe transformatora: **zmienności napięcia** i **sprawności**. Następnie opisano układy połączeń uzwojeń transformatorów trójfazowych oraz pracę równoległą transformatorów. Rozdział zakończono krótkim omówieniem transformatorów specjalnych.

4.12. Pytania

1. Podać rodzaje budowy transformatorów. Naszkicować, nazwać i podać funkcje podstawowych elementów transformatora.
2. Co to są wielkości pierwotne i wtórne, dolne i górne transformatora?
3. Podać definicję przekładni transformatora.
4. Podać definicję napięcia zwarcia transformatora.
5. Podać różnicę między transformatorem idealnym a rzeczywistym.
6. Podać, jakie zjawiska są podstawą budowy i działania transformatora. Wyjaśnić zasadę działania transformatora w ujęciu ciągu logicznego: przyczyna - skutek.
7. Narysować modele transformatora: fizyczny i obwodowy (schemat zastępczy). Podać i wyjaśnić wzajemne relacje między wielkościami fizycznymi a zmiennymi i parametrami modelu obwodowego.
8. Narysować model obwodowy transformatora i nazwać tworzące go elementy.
9. Podać i objaśnić podstawowe wielkości charakterystyczne i zależności dotyczące transformatorów.
10. Podać definicję zmiany napięcia transformatora. Od czego zależą jego wartości? Jaka jest wartość maksymalnej i zmiany napięcia?
11. Podać definicję sprawności transformatora. Od czego zależą jej wartości. Kiedy wystąpi sprawność maksymalna transformatora?
12. Dlaczego nie buduje się transformatora przy założeniu maksymalnej sprawności przy obciążeniu znamionowym?

4.13. Zagadnienia obliczeniowe i pomiarowe (laboratoryjne)

Przerobienie kompletu zadań, które naświetlałyby niektóre zagadnienia z wykładów, jest jednym ze sposobów pomocy studentom. Zadania stwarzają dobrą okazję do uzupełnienia materiału wykładowego oraz sprawiają, że wyłożone zagadnienia stają się bardziej realne, pełniejsze i lepiej ugruntowane w umysłach.

Zagadnieniom obliczeniowym transformatorów poświęconych jest szereg podręczników [4, 7, 21] i skryptów [11, 16, 18]. Szczególnie cenny jest najnowszy podręcznik [21] obejmujący zagadnienia obliczeniowe w eksploatacji maszyn elektrycznych.

Zagadnienia pomiarowe (laboratoryjne) dotyczące transformatorów omówiono w podręcznikach [10] i skryptach [6, 13, 19].

4.14. Literatura

- [1] Canon R.H. (jr.), Dynamika układów fizycznych, WNT, Warszawa 1973.
- [2] Dąbrowski M., Początki rozwoju transformatorów, wyd. 2, Ośrodek Wydawnictw Naukowych, PAN Oddział w Poznaniu, Poznań 2008.
- [3] Fitzgerald A. E., Kingsley Ch., Jr., Umans. S. D., Electric Machinery. 6th ed., McGraw-Hill, 2003.
- [4] Glinka T., Mizia W., Żywiec A., Hickiewicz J., Zadania z maszyn elektrycznych, WNT, Warszawa 1973.
- [5] Jezierski E., Transformatory, wyd. 2, WNT, Warszawa 1983.
- [6] Kamiński G., Kosk J., Przyborowski W., Laboratorium maszyn elektrycznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.

- [7] Koter T., Pełczewski W., Maszyny elektryczne w zadaniach, WNT, Warszawa 1975.
- [8] Latek W., Zarys maszyn elektrycznych, WNT, Warszawa 1974.
- [9] Latek W., Teoria maszyn elektrycznych, Wyd. 2, WNT, Warszawa 1987.
- [10] Latek W., Badanie maszyn elektrycznych w przemyśle, WNT, Warszawa 1987.
- [11] Łukaniszyn M., Zbiór zadań z maszyn elektrycznych dla studentów studiów zaocznych, skrypt, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2000.
- [12] Manitius Z., Transformatory (skrypt), Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 1977.
- [13] Manitius Z. (red.), Laboratorium maszyn elektrycznych, skrypt, wyd. 2, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 1990.
- [14] Matulewicz W., Maszyny elektryczne. Podstawy, wyd. 2, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 2003.
- [15] Matulewicz W., Maszyny elektryczne w elektroenergetyce, PWN, Warszawa 2005.
- [16] Mizia W., Transformatory. Przykłady obliczeniowe, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
- [17] Plamitzer A. M., Maszyny elektryczne. Wyd. 7. WNT, Warszawa, 1982. Gdańskiej, Gdańsk 1990.
- [18] Rafalski W., Ronkowski M., Zadania z maszyn elektrycznych, Cz. I: Transformatory i maszyny asynchroniczne, skrypt, wyd. 4, Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1994.
- [19] Ronkowski M. (red.), Laboratorium maszyn elektrycznych, Pol. Gdańska, Gdańsk 2009 (<http://www.ely.pg.gda.pl/e-mechatronika/>).
- [20] Roszczyk S., Teoria maszyn elektrycznych. WNT, Warszawa 1979.
- [21] Staszewski P., Urbański W., Zagadnienia obliczeniowe w eksploatacji maszyn elektrycznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.

Ważniejsze Normy

- [22] PN-EN 60076-1:2002 Transformatory. Wymagania ogólne.
- [23] PN-E-81003:1996 Transformatory. Oznaczenia zacisków i zaczepów uzwojeń, rozmieszczenie zacisków.
- [24] PN-IEC 60076-8:2002 Transformatory. Część 8.: Przewodnik stosowania.
- [25] PN-EN 60076-2:2001 Transformatory. Przyrosty temperatury.

Ważniejsze adresy internetowe producentów/dystrybutorów

- [26] ABB Sp. z o.o., www.abb.pl/ProductGuide/
- [27] ABB, www.abb.com/transformers
- [28] AREVA T&D Sp. z o.o. Zakład Transformatorów, www.areva-td.pl
- [29] AS ELEKTROTECHNIK, www.as-elektrotechnik.pl
- [30] Fabryka Transformatorów w Żychlinie Sp. z o.o., www.ftz.pl

5. Maszyny prądu stałego

Maszyna prądu stałego jest przetwornikiem do elektromechanicznego przetwarzania energii prądu stałego i energii mechanicznej. Proces przemiany energii może zachodzić w dwóch kierunkach: maszyna może pracować jako prądnica (generator) lub jako silnik.

Silniki prądu stałego cechują się wzorcowymi charakterystykami ruchowymi – mechanicznymi: płynnym i szerokim zakresem zmian prędkości kątowej i momentu obrotowego. Właściwości te wynikają z wzajemnego ustawienia osi pól magnetycznych stojana i wirnika – pola są nieruchome względem siebie oraz tworzą charakterystyczny kąt prosty (maszyna dwubiegunowa).

Podstawą działania i budowy maszyn prądu stałego są dwa odkrycia: efektu magnetycznego prądu (Hans Oersted odkrył 21 kwietnia 1820 r.) i zjawiska indukcji elektromagnetycznej (Michał Faraday odkrył 29 sierpnia 1831 r.).

5.1. Uwagi wstępne

W rozdziale omówimy głównie maszyny prądu stałego pracujące w **systemach napędowych**¹⁾ [18]. Zasadniczą ich funkcją jest przetwarzanie energii prądu stałego w energię mechaniczną o parametrach sterowanych/regulowanych – zmiennej prędkości kątowej i zmiennym momencie obrotowym. Mimo intensywnego rozwoju **napędów przekształtnikowych** [18] z maszynami prądu przemiennego – silnikami indukcyjnymi i synchronicznymi, silniki prądu stałego są nadal stosowane (szczególnie w napędach trakcyjnych). Uzasadnia to stosunkowo prosty (tani) sterowany układ zasilania oraz bardzo dobre (wzorcowe) właściwości ruchowe silników prądu stałego. Wadą silników prądu stałego jest wyższy koszt produkcji i problemy w eksploatacji zestyku ślizgowego: szczotki-komutator.

Oprócz maszyn prądu stałego, pełniących funkcję napędową, istnieje liczna grupa maszyn specjalnych, które należą do grupy **elektrycznych maszynowych elementów automatyki** – pracują w systemach automatyki jako silniki wykonawcze (aktuatory) oraz tachoprądnice (mierniki prędkości obrotowej). Ponadto istnieje bardzo liczna grupa mikromaszyn prądu stałego i silników uniwersalnych, stosowanych w urządzeniach elektrotechniki lub elektroniki domowej (w tym zabawek), elektrotechniki samochodowej i elektronarzędziach [12, 42]²⁾.

Podstawowe zjawiska i procesy fizyczne, występujące w wymienionych wyżej maszynach prądu stałego, są takie same, chociaż każdy typ maszyn wyróżnia się specyficzną charakterystyką. Omawianie maszyny prądu stałego opieramy na najważniejszej dla systemu napędowego maszynie „energetycznej” – przetwarzającej energię elektryczną prądu stałego na energię mechaniczną o parametrach sterowanych/regulowanych – zmiennej prędkości kątowej i zmiennym momencie obrotowym.

Na wstępie krótko opiszemy budowę maszyny prądu stałego. Następnie przedstawimy ich modele fizyczne i obwodowe. Omówimy najważniejsze charakterystyki ruchowe silników prądu stałego: **elektromechaniczne i mechaniczne** oraz metody ich kształtowania. Rozdział zakończymy krótkim omówieniem specjalnych maszyn prądu stałego.

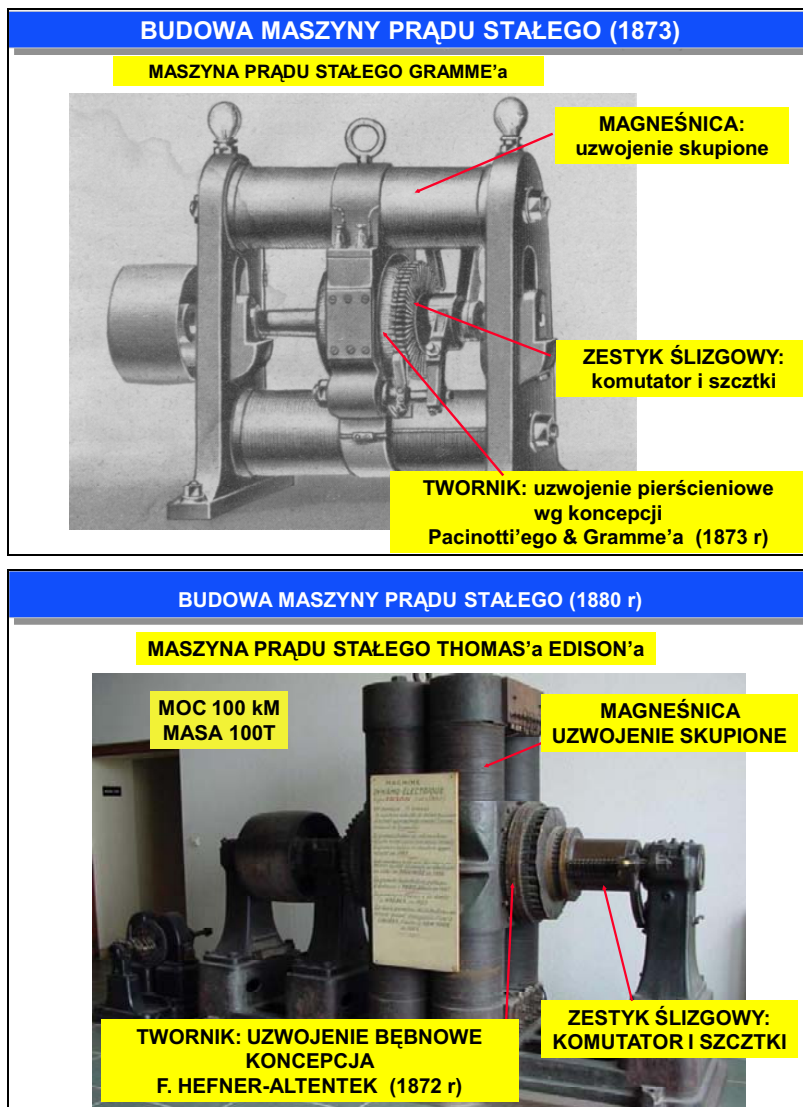
¹⁾ Do końca lat 70. ubiegłego wieku maszyny prądu stałego stosowano jako prądnice w sterowanych napędach elektrycznych – układach Leonarda. Wraz z intensywnym rozwojem energoelektroniki prostowniki sterowane stopniowo wyparty, prawie całkowicie, prądnice prądu stałego.

²⁾ Liczba produkowanych maszyn prądu stałego jest zdecydowanie większa niż liczba łącznie produkowanych maszyn prądu przemiennego.

5.2. Formy budowy

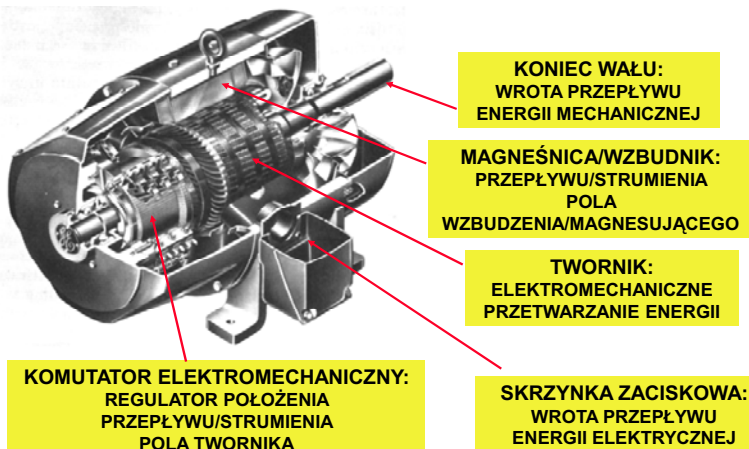
Zagadnienia konstrukcji i technologii maszyn prądu stałego stanowią obszerną dziedzinę wiedzy technicznej. Zagadnieniom tym poświęcone są specjalne książki, opracowania i normy. W języku polskim są to książki autorstwa profesorów: M. Dąbrowskiego [6], B. Dubickiego [8], Z. Gogolewskiego i Z. Gabryśia [15[15]] oraz A. Kordeckiego [20]. Natomiast rys historyczny początku rozwoju maszyn prądu stałego zawiera książka [24]. Ograniczymy się jedynie do kilku podstawowych informacji o budowie maszyn prądu stałego – koniecznych do opisu teoretycznego zachodzących w nich zjawisk elektromechanicznych. Nie omawiamy zagadnienia budowy uzwojeń – szczegóły dotyczące tych zagadnień dostępne są w literaturze przedmiotu, np. w podręczniku [16]. Pomijamy także ważne zagadnienia układów chłodzenia maszyn prądu stałego – omawiane są we wspomnianych publikacjach.

Przykłady budowy i podstawowe elementy maszyn prądu stałego przedstawiamy kolejno na rys. 5.1–5.3.



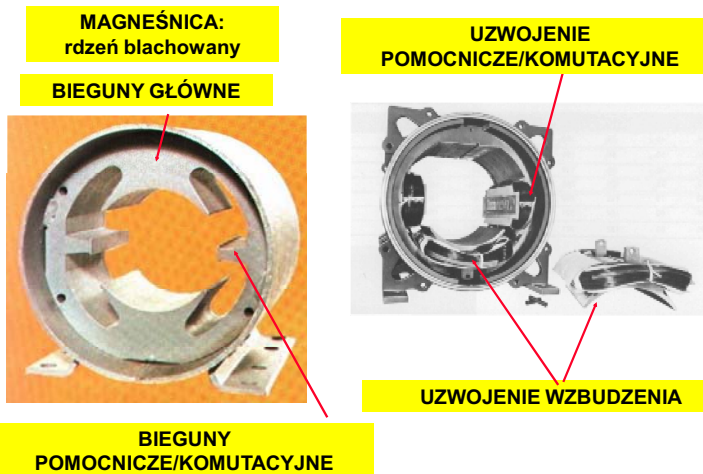
Rys. 5.1. Przykłady budowy maszyn prądu stałego na początku ich historycznego rozwoju

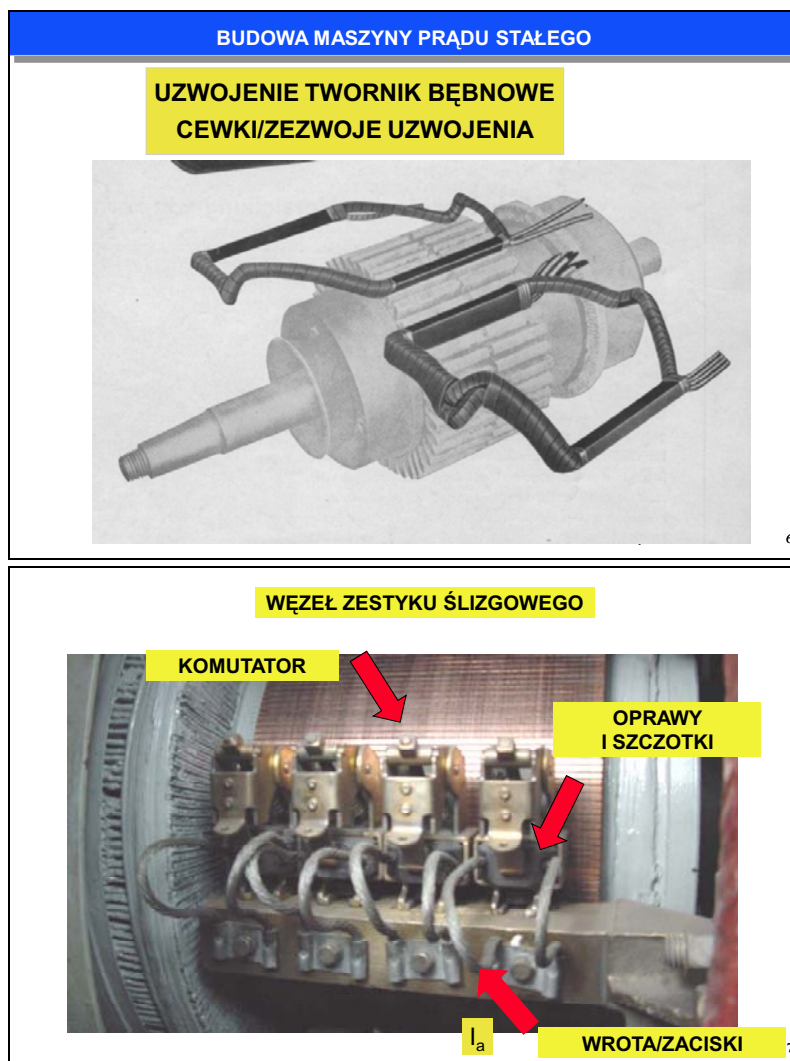
BUDOWA WSPÓŁCZESNEJ MASZYNY PRĄDU STAŁEGO ELEMENTY MASZYNY I ICH FUNKCJE



Rys. 5.2. Budowa współczesnej maszyny prądu stałego

BUDOWA MASZYNY PRĄDU STAŁEGO





Rys. 5.3. Budowa i podstawowe elementy współczesnych maszyny prądu stałego

Maszyna prądu stałego składa się z następujących części:

- **jarzma stojana** wykonanego na ogół z odlewu stalowego lub stali walcowanej (stanowi nie tylko część konstrukcyjną, lecz jest również częścią obwodu magnetycznego maszyny),
- **biegunów głównych** przymocowanych do jarzma, a wykonanych z wytłoczonych blach (na biegunach umieszczone jest uzwojenie wzbudzenia),
- **biegunów komutacyjnych** (pomocniczych), znajdujących się między biegunami głównymi (na biegunach komutacyjnych jest umieszczone uzwojenie),
- **wału**,
- pakietu blach **rdzenia wirnika** (w żłobkach umieszczone jest **uzwojenie komutatorowe/twornika**),
- **komutatora**,
- **szczotkotrzymaczy**,
- **tarcz łożyskowych** (lub stojaków łożyskowych) z łożyskami.

Należy zauważyć, że we współczesnych maszynach prądu stałego stosuje się blachowane rdzenie stojane, a także **uzwojenie kompensacyjne** (umieszczone w nabiegunkach biegunów głównych)³⁾. Zatem zjawisko reakcji twornika i prądów wirowych zostało praktycznie wyeliminowane.

Fundamentalnym problemem maszyn prądu stałego jest jakość pracy zestyku ślizgowego szczotki – komutator, czyli **komutacji**. Przekształtnikowe układy sterowania pracą tych maszyn stworzyły znacznie trudniejsze od klasycznych warunki zasilania: generacja napięć i prądów odkształconych oraz praktycznie ciągłe stany dynamiczne.

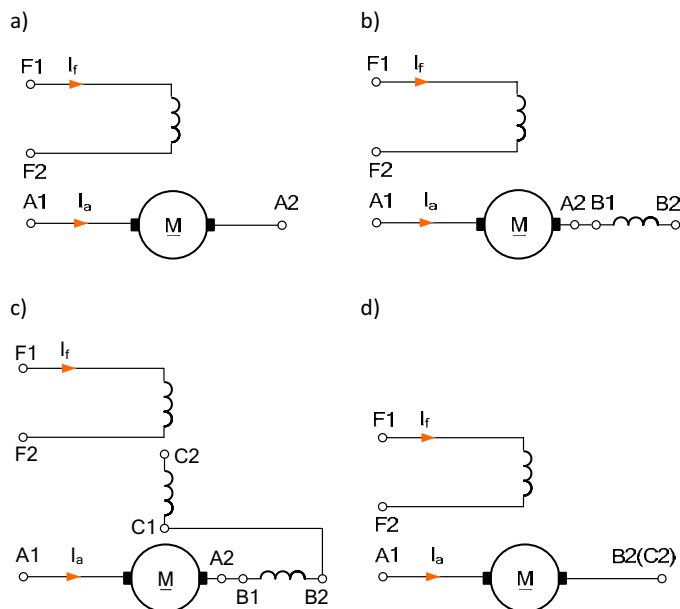
Uwaga: Bieguny komutacyjne (pomocnicze) stosuje się do poprawy komutacji – eliminacji iskrzenia szczotek. Na biegunach komutacyjnych nawinięte jest uzwojenie połączone szeregowo z uzwojeniem twornika.

Uzwojenie kompensacyjne stosuje się do eliminacji oddziaływania twornika; umieszczone w żłobkach nabiegunków biegunów głównych.

Maszyny z magnesami trwałymi omawiamy w punkcie dotyczącym specjalnych maszyn prądu stałego.

Z uwagi na sposób wzbudzenia silniki prądu stałego dzielimy na:

- silniki obcowzbudne (w tym silniki z magnesami trwałymi),
- silniki bocznikowe,
- silniki szeregowe,
- silniki bocznikowo-szeregowe.



Rys. 5.4. Schematy układów połączeń uzwojeń obcowzbudnego silnika prądu stałego:

a) układ podstawowy, b) silnik z uzwojeniem pomocniczym (komutacyjnym),

b) silnik z uzwojeniem kompensacyjnym, d) uproszczony schemat układu połączenia

³⁾ Struktura elektromagnetyczna współczesnych maszyn prądu stałego, szczególnie małej średniej mocy, jest analogiczna do maszyn komutatorowych prądu przemiennego (jednofazowych), stosowanych dawniej w trakcji elektrycznej.

Współcześnie, w praktyce napędów elektrycznych, stosowane głównie silniki obcowzbudne oraz szeregowo. Dlatego rozważania ograniczymy tylko do tej grupy maszyn.

Obcowzbudny silnik prądu stałego ma dwa niezależne obwody elektryczne, które zasilane są przez dwa oddzielne źródła napięcia stałego: obwód twornika i obwód wzbudzenia (rys. 5.4). Podstawowymi uzwojeniami silnika są: uzwojenie twornika (A_1, A_2) i uzwojenie wzbudzenia (F_1, F_2). Przy czym litera „A” oznacza uzwojenie twornika, litera „F” – uzwojenie wzbudzenia, liczba „1” oznacza umowny początek uzwojenia, liczba „2” – umowny koniec uzwojenia.

Uzwojenia pomocnicze/komutacyjne oznacza się literą „B”, a uzwojenie kompensacyjne literą „C”. Uzwojenia komutacyjne i kompensacyjne są łączone szeregowo z uzwojeniem twornika.

W przypadku silnika szeregowego, jak nazwa wskazuje, wszystkie uzwojenia łączy się odpowiednio szeregowo.

Tabliczka znamionowa maszyny prądu stałego najczęściej zawiera następujące dane [63]:

- nazwę lub znak wytwórcy,
- nazwę i typ wyrobu,
- numer fabryczny,
- rok wykonania,
- rodzaj wzbudzenia,
- moc znamionową, napięcia znamionowe i prądy znamionowe poszczególnych uzwojeń,
- symbol znamionowego rodzaju pracy,
- klasę materiałów izolacyjnych,
- stopień ochrony,
- masę całkowitą.

5.3. Model fizyczny i obwody

Zagadnienia modelowania i pomiarów maszyn prądu stałego stanowią oddzielną dziedzinę wiedzy technicznej w stosunku do analogicznych zagadnień maszyn prądu przemiennego. Zagadnieniom tym poświęcone są specjalne książki, opracowania i normy. Najbardziej znane pozycje specjalistyczne w języku polskim to publikacje [8, 15, 20]. W tym miejscu ograniczymy się jedynie do podstawowych informacji o modelowaniu maszyn prądu stałego – koniecznych do opisu charakterystyk ruchowych: charakterystyki elektromechanicznej i mechanicznej. Będziemy rozważać silnik obcowzbudny, zakładając, że pozostałe silniki możemy zbudować, łącząc odpowiednio ich uzwojenia.

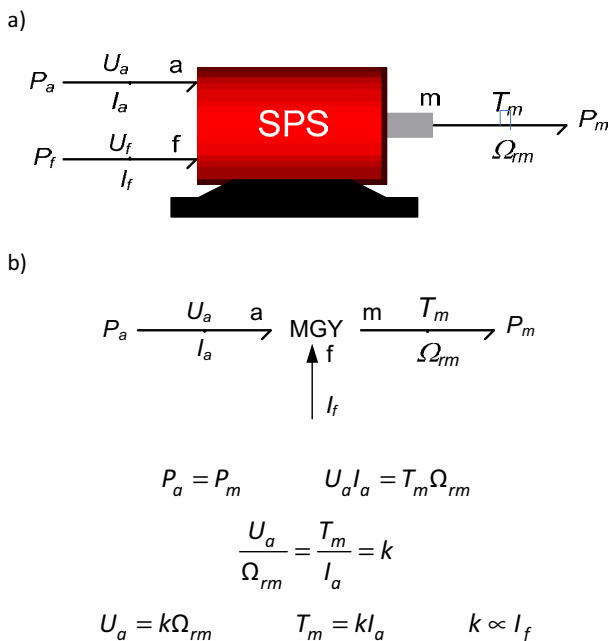
Podstawowe pojęcia ogólne dotyczące modelowania przedstawiliśmy w rozdz. 4 (rys. 4.5).

Silnik prądu stałego (SPS) jest przetwornikiem elektromechanicznym (rys. 5.5) o trzech wrotach (parach zacisków), które fizycznie reprezentują: dwa „wejścia elektryczne” – zaciski uzwojenia twornika „a” i zaciski uzwojenia wzbudzenia „f”; jedno „wyjście mechaniczne” – koniec wału (sprzęgło). Moc elektryczna (dostarczana) P_o i moc mechaniczna (odbierana) P_m ulegają przemianom elektromechanicznej za pośrednictwem pola magnetycznego. Energia pola magnetycznego jest energią wewnętrzną silnika, gdyż przetwornik nie ma możliwości wymiany tej energii z otoczeniem.

Podstawą do wyznaczenia charakterystyk ruchowych SPS jest opis relacji między jego wielkościami wrotowymi/zaciskowymi: mocami (P_o, P_f, P_m), napięciami (U_o, U_f) i prądami (I_o, I_f) po stronie elektrycznej oraz mocą mechaniczną P_m , momentem obrotowym użytecznym (zewnętrznym)⁴⁾ T_m oraz prędkością kątową Ω_{rm} po stronie mechanicznej. Punktem wyjścia jest opracowanie odpowiedniego **modelu fizycznego**, a następnie sformułowanie **modelu abstrakcyjnego** (matematycznego) w formie symbolicznej lub graficznej – obwodu elektrycznego. Model matematyczny w postaci obwodu elektrycznego nazwiemy **modelem obwodowym SPS** (nazwa tradycyjna – **schemat zastępczy**

⁴⁾ W maszynach wyróżniamy moment obrotowy elektromagnetyczny (wewnętrzny) i moment obrotowy użyteczny (zewnętrzny). Momenty te różnią się o wartość strat mechanicznych (tarcia i wentylacji).

SPS). W przypadku bardziej ogólnym (analiza stanów dynamicznych) model ten tworzą odpowiednio połączone elementy skupione: sterowane źródła napięcia, indukcyjności, moment bezwładności, rezystancje i opory tarcia. Elementy te odpowiednio odwzorowują: wielkości elektromechaniczne (SEM rotacji twornika i moment elektromagnetyczny), magazynowanie energii pola magnetycznego i energii kinetycznej wirnika oraz rozpraszanie (straty) energii⁵⁾.



Rys. 5.5. Silnik prądu stałego – trójwrotowy przetwornik elektromechaniczny:

a) silnik realny b) silnik idealny – żyrotor modulowany wrota (zaciski) obwodu twornika „a” – dopływ energii elektrycznej przetwarzanej ma energię mechaniczną, wrota obwodu wzbudzenia (wzбудnika) „f” – dopływ energii pola wzbudzenia, wrota układu (obwodu) mechanicznego „m” – odpływ energii mechanicznej

Model maszyny w formie graficznej – obwodu elektrycznego stosunkowo łatwo można implementować do dowolnego symulatora obwodów, np. Spice [62].

Rozważania ograniczymy do pracy SPS w stanie ustalonym – sformułujemy **statyczny model obwodu** SPS.

Sformułowanie modelu fizycznego rozważanego SPS polega na jego idealizacji (uproszczeniu) – uwzględnienie zachodzących w nim zjawisk i procesów fizycznych, które są istotne dla analizowanego stanu pracy i celów obliczeń.

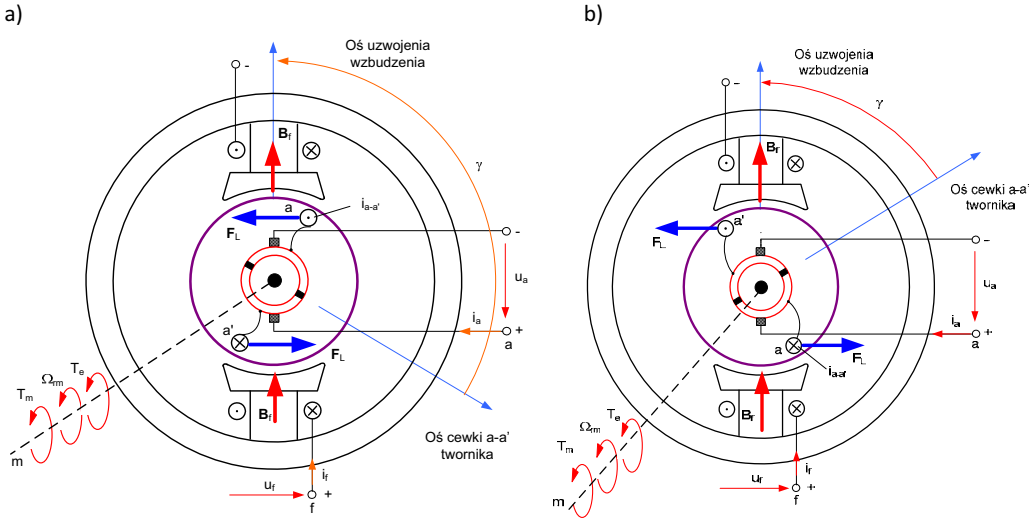
Skrajnym przypadkiem uproszczenia SPS jest silnik idealny – silnik o pomijalnie małym pobieranym prądzie koniecznym do wzbudzenia strumienia magnetycznego oraz o pomijalnych stratach mocy. Oznacza to, że moce po stronie pierwotnej i wtórnej są jednakowe – przetwarzanie energii odbywa się bez strat (sprawność wynosi 100%).

Podstawy działania SPS omówiliśmy w rozdz. 2 na przykładzie prymitywnej maszyny prądu stałego.

Układ elektromechaniczny na rys. 5.6 przedstawia schematycznie budowę elementarnego SPS wraz z ilustracją zasady jego działania. Podstawą działania silnika jest generacja pary sił Lorentza F_L ,

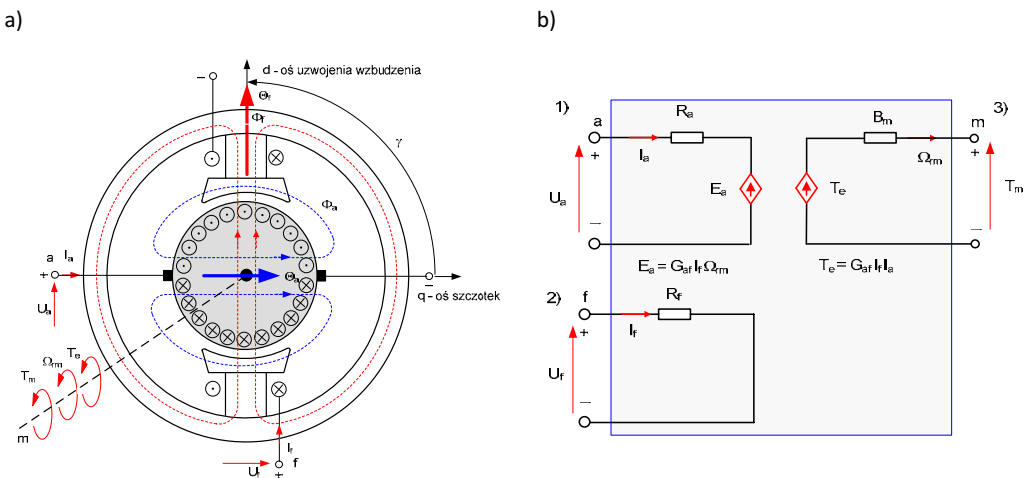
⁵⁾ Pomijamy: pojemności międzyzwojowe i między innymi elementami silnika (wynikające z magazynowania energii pola elektrycznego), sprężystość wału.

które działają na przewody tworzące uzwojenie (cewkę) $a-a'$ twornika, przez które płynie prąd $i_{a-a'}$. Dwuwycinkowy komutator sprawia, że zwrot pary sił Lorentza nie zależy od położenia kąowego cewki $a-a'$ (porównaj rys. 5.6a i rys. 5.6b). W efekcie para sił Lorentza generuje jednokierunkowy moment elektromagnetyczny T_e – wartość średnia użytecznego momentu dla pełnego obrotu wirnika jest różna od zera ($T_{e\text{sr}} \neq 0$).



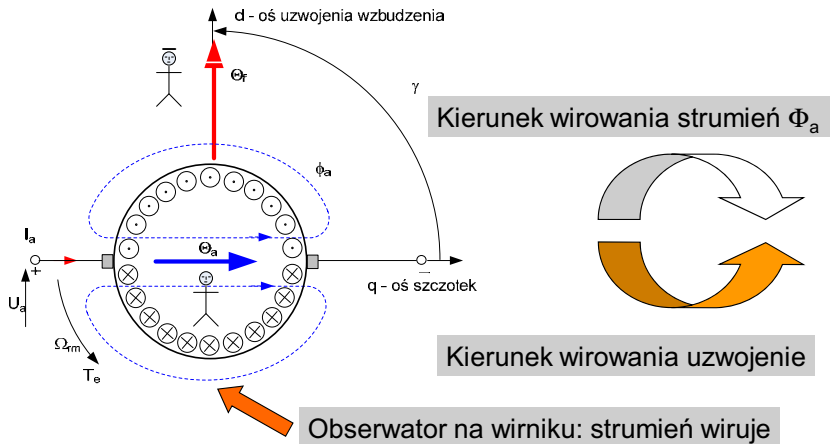
Rys. 5.6. Elementarny silnik prądu stałego: budowa i ilustracja zasady działania – generacja pary sił Lorentza F_L (momentu elektromagnetycznego) o niezmiennym zwrocie (zwrot niezależny od położenia kąowego cewki $a-a'$ twornika)

W rozwiązaniach praktycznych, celem eliminacji pulsacji momentu elektromagnetycznego, uzwojenie twornika SPS zbudowane jest z szeregu cewek. Boki tych cewek umieszczone są w żłobkach, a początki i końce cewek połączone są odpowiednio z komutatorem wielowycinkowym. Uzwojenie takie nazywamy krótko uzwojeniem komutatorowym. SPS o takiej budowie schematycznie przedstawiono na rys. 5.7a (pominięto uzwojenie biegunów komutacyjnych).



c)

Obserwator na stojanie: strumień nie wiruje



Twornik - układ wytwarzający pole wirujące względem wirującego uzwojenia twornika

Rys. 5.7. Podstawowe modele silnika prądu stałego: a) model fizyczny – zjawisko generacji nieruchomego przepływu twornika Θ_a w osi q prostopadłej do osi pola wzbudzenia (wzbudnika) d , b) model obwodowy – 1) obwód twornika, 2) obwód wzbudzenia, 3) obwód mechaniczny – analog elektryczny układu mechanicznego c) ilustracja pomiaru prędkości strumienia pola twornika przez dwóch obserwatorów – umieszczonego na wirniku i stojanie

Wielocewkowe uzwojenie twornika SPS, odpowiednio połączone z wycinkami komutatora, wytwarza przepływ (magnetyczny) Θ_a nieruchomy⁶⁾ względem przepływu wzbudzenia Θ_f . W SPS przygotowanym prawidłowo do eksploatacji przepływ Θ_a skierowany jest wzdłuż osi szczotek (oś oznaczona symbolem q) oraz prostopadłe do osi wzbudzenia (oś oznaczona symbolem d), jak pokazano na rys. 5.7a. Takie wzajemne położenie przepływów twornika Θ_a i wzbudzenia Θ_f – nieruchomych względem siebie – sprawia, że podstawowe wielkości elektromechaniczne silnika można określić następującymi zależnościami [25, 36, 41, 52, 55]:

moment elektromagnetyczny

$$T_e = k_T \Phi_f I_a \quad (5.1)$$

SEM rotacji

$$E_a = k_E \Phi_f \Omega_{rm} \quad (5.2)$$

gdzie: k_E oraz k_T – stała SEM rotacji i stała momentu elektromagnetycznego⁷⁾;

Φ_f – strumień główny (wzbudzenia, magnesowania), przypadający na jeden biegun wzbudnika (podziałkę biegunową silnika);

I_a – prąd twornika;

Ω_{rm} – mechaniczna prędkość kątowna wirnika (silnika).

⁶⁾ Przepływ twornika Θ_a jest ruchomy (wiruje) względem uzwojenia, które go wytwarza, tzn. przepływ twornika wzbudza pole wirujące względem uzwojenia twornika. Komutator i szczotki sprawiają, że przepływ twornika Θ_a jest nieruchomy względem przepływu twornika wzbudzenia Θ_f .

⁷⁾ Stałe k_E oraz k_T nazywane są często „stałymi konstrukcyjnymi” silnika prądu stałego, gdyż ich wartości zależą od parametrów uzwojenia twornika: liczby boków uzwojenia, liczby par gałęzi równoległych i liczby par biegunów.

Relacja między prędkością kątową silnika Ω_{rm} – liczoną w [rad/s], a prędkością obrotową silnika n – liczoną w [obr/min] jest następująca:

$$\Omega_{rm} = \frac{2\pi n}{60} \quad (5.3)$$

Uwaga: Jeżeli w zależności (5.2) prędkość silnika wyrażona jest w [rad/s], to zachodzi równość współczynników $k_E = k_T$. W przypadku wyrażenia prędkości silnika w [obr/min] $k_E = k_T 2\pi/60$.

Na podstawie rozważanego modelu modelu silnika prądu stałego (rys. 5.7) można sformułować następujące wnioski:

MASZYNA/SILNIK PRĄDU STAŁEGO WZORCOWE SPRZĘŻENIE ELEKTROMECHANICZNE

Wzajemnie prostopadłe położenie osi przepływu Θ_a uzwojenia wirnika (twornika) względem osi przepływu Θ_f uzwojenia stojana (wzbudzenia) generuje:

- moment elektromagnetyczny (jako efekt interakcji dwóch pól) proporcjonalny do iloczynu modułów wektorów przepływów stojana $|\Theta_f|$ i wirnika $|\Theta_a|$
- (przy pominięciu efektu nasycenia żelaza i reakcji twornika).

Stwarza to szczególnie korzystne warunki kształtowania charakterystyki zewnętrznej (mechanicznej) maszyny zarówno dla stanu statycznego jak i dynamicznego.

Składają się na nie:

- wyodrębnienie sterowanego źródła napięcia zasilania obwodu stojan kształtującego strumień wzbudzenia maszyny;
- wyodrębnienie sterowanego napięcia zasilania obwodu wirnika, kształtującego prąd wirnika.

Wprowadzając koncepcję **indukcyjności rotacji** G_{af} , zdefiniowanej następująco:

$$G_{af} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{k_E \Phi_f}{I_f} \quad (5.4)$$

$$G_{af} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{k_T \Phi_f}{I_f} \quad (5.5)$$

zależności (5.1) i (5.2), można zapisać w postaci:

$$E_a = G_{af} I_f \Omega_{rm} \quad (5.6)$$

$$T_e = G_{af} I_f I_a \quad (5.7)$$

W przypadku silnika szeregowego zachodzi równość prądów $I_f = I_a$, zatem zależności (5.6) i (5.7) przyjmują postać:

$$E_a = G_{af}(I_a) I_a \Omega_{rm} \quad (5.8)$$

$$T_e = G_{af}(I_a) I_a^2 \quad (5.9)$$

Z zależności (5.9) wynika cenna cecha silnika szeregowego – moment obrotowy jest proporcjonalny do kwadratu prądu twornika (przy założeniu nienasyconego obwodu magnetycznego – zapis $G_{af}(I_a)$ oznacza uzależnienie wartości indukcyjności rotacji od prądu obciążenia silnika). Z tych względów silnik ten jest głównie stosowany w napędach trakcyjnych.

Uwaga: Modele rozszerzone silnika prądu stałego uwzględniają zjawisko nasycenia obwodu magnetycznego lub zjawisko reakcji twornika, bądź też oba równocześnie. Zagadnienia te omawiane są w publikacjach [15, 20].

Opisanie twornika (wirnika) z uzwojeniem komutatorowym jako elementu, w którym prąd twornika wytwarza nieruchomy w przestrzeni przepływ Θ_a (strumień Φ_a), pozwala odwzorować model fizyczny SPS (rys. 5.7a) w statycznych stanach pracy za pomocą modelu obwodowego na rys. 5.7b. Wielkości elektromechaniczne: SEM rotacji E_a i moment elektromagnetyczny T_e reprezentują sterowane źródła napięciowe⁸⁾ oznaczone symbolem \diamond . Straty w obwodach elektrycznych odwzorowują rezystancje: R_a – twornika i R_f – wzbudzenia, a straty w obwodzie mechanicznym współczynnik tarcia lepkiego B_m .

Model obwodowy silnika prądu stałego na rys. 5.7b opisuje następujący układ równań algebraicznych:

równanie równowagi obwodu twornika

$$U_a = R_a I_a + E_a \quad (5.10)$$

równanie równowagi obwodu wzbudzenia

$$U_f = R_f I_f \quad (5.11)$$

równanie równowagi układu (obwodu) mechanicznego

$$T_e = B_m \Omega_{rm} + T_m \quad (5.12)$$

gdzie: U_a, U_f – napięcia zasilania obwodu twornika i wzbudzenia,
 I_a, I_f – prądy obwodu twornika i wzbudzenia,
 T_m – moment użyteczny (zewnątrzny) na wale silnika.

Zależności na moce poszczególnych wrót, dla założonego modelu silnika prądu stałego (rys. 5.7b), opisują następujące wzory:

moc doprowadzona do obwodu twornika silnika

$$P_a = U_a I_a \quad (5.13)$$

moc doprowadzona do obwodu wzbudzenia silnika

$$P_f = U_f I_f \quad (5.14)$$

moc odprowadzona z wału silnika – użyteczna moc mechaniczna silnika

$$P_m = T_m \Omega_{rm} \quad (5.15)$$

Uwaga: Moc znamionowa SPS P_n jest użyteczną mocą mechaniczną – mocą odprowadzoną z jego wału. Moc wzbudzenia P_f stanowi 0,5–1,5% mocy znamionowej P_n silnika. Energia wzbudzenia SPS nie ulega przetworzeniu na energię mechaniczną – zamienia się w energię cieplną wydzielaną w uzwojeniu (obwodzie) wzbudzenia.

Dla SPS, zgodnie z przyjętymi założeniami upraszczającymi do budowy jego modelu obwodowego, zachodzą następujące równości przetwarzanych mocy na drodze elektromechanicznej:

wewnętrzna moc elektryczna

$$P_e = E_a I_a = (G_{af} I_f \Omega_{rm}) I_a \quad (5.16)$$

⁸⁾ W modelu obwodowym układu mechanicznego przyjęto analogie: napięcie – moment obrotowy, prąd – prędkość kątowna, rezystancja – współczynnik tarcia lepkiego.

wewnętrzna moc mechaniczna

$$P'_m = T_e \Omega_{rm} = (G_{af} I_f I_a) \Omega_{rm} \quad (5.17)$$

zatem zachodzi równość

$$P_e = P'_m \quad (5.18)$$

Z relacji tej wynikają następujące wnioski:

SEM rotacji możemy interpretować jak miarę mocy elektrycznej przetwarzanej na moc mechaniczną – SEM rotacji sterują zapotrzebowaniem silnika na moc mechaniczną.

Na podstawie siły Lorentza i siły elektromotorycznej rotacji możemy przedstawić istotę przemiany energii elektrycznej na mechaniczną

$$E_a I_a = T_e \Omega_{rm}$$

Wartości mocy w zależnościach (5.16) i (5.17) można wyznaczyć następująco:

$$P_e = P_a - \Delta P_a = P_a - R_a I_a^2 \quad (5.19)$$

$$P_m = P'_m - \Delta P_m = P'_m - B_m \Omega_{rm}^2 \quad (5.20)$$

gdzie: ΔP_a – straty w obwodzie twornika (uzwojenia obwodu twornika i zestyk ślizgowy),

ΔP_m – straty mechaniczne (tarcie i wentylacja).

Znamionowe straty mechaniczne ΔP_{mn} oraz odwzorowujący je współczynnik tarcia lepkiego B_m można oszacować następująco:

$$\Delta P_{mn} \cong \frac{(0,3 \dots 1)\%}{100} P_n \quad (5.21)$$

$$B_m \cong \frac{\Delta P_{mn}}{\Omega_{rmn}^2} \text{ [Nm}\cdot\text{s/rad]} \quad (5.22)$$

Sprawność SPS, zgodnie z przyjętym modelem, opisują zależności:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100 = \frac{P_m}{P_a + P_f} 100 = \frac{P_m}{P_m + \Sigma \Delta P} 100 \quad (5.23)$$

gdzie: P_1 – moc pobrana przez silnik,

P_2 – moc oddana przez silnik,

$\Sigma \Delta P_m$ – sumaryczne straty w silniku.

5.4. Charakterystyka elektromechaniczna i mechaniczna

Definiuje się następujące charakterystyki ruchowe SPS dla stanu ustalonego:

charakterystyka elektromechaniczna

$$\Omega_{rm} = \Omega_{rm}(I_a) \quad (5.24)$$

charakterystyka mechaniczna

$$\Omega_{rm} = \Omega_{rm}(T_e) \quad (5.25)$$

przy założeniu określonych warunków zasilania i obciążenia silnika. Charakterystyki te określają zachowanie silnika w stanach pracy ustalonej – nazywane są **charakterystykami statycznymi silnika**.

Przekształcając odpowiednio równania (5.5) – (5.9), uzyskujemy następujące zależności odwzorowujące charakterystyki ruchowe SPS:

elektromechaniczna

$$\Omega_{rm} = \frac{U_a}{G_{af} I_f} - \frac{r_a}{(G_{af} I_f)^2} T_e \quad (5.26)$$

mechaniczna

$$\Omega_{rm} = \frac{U_a}{G_{af} I_f} - \frac{r_a}{(G_{af} I_f)^2} T_e \quad (5.27)$$

W oparciu o zależności (5.26) i (5.27) definiuje się następujące wielkości ruchowe SPS:

prędkość kątowna idealnego biegu jałowego

$$\Omega_{rm0i} = \frac{U_a}{G_{af} I_f} \quad \text{przy } I_a \rightarrow 0 \quad (5.28)$$

oraz

prąd rozruchowy

$$I_{ar} = \frac{U_a}{R_a} \quad (5.29)$$

moment rozruchowy

$$T_{er} = (G_{af} I_f) \frac{U_a}{R_a} \quad \text{przy } \Omega_{rm} = 0 \quad (5.30)$$

Celem ograniczenia prądu rozruchowego⁹⁾ obniża się napięcia zasilania twornika w stosunku do napięcia znamionowego ($U_a < U_{an}$) lub włącza się dodatkową (rozruchową) rezystancję R_{ad} , tak aby prąd rozruchowy spełniał nierówność:

$$I_{ar} \leq 2I_{an} \quad (5.31)$$

gdzie: I_{an} – prąd znamionowy twornika.

Zatem

wartość napięcia rozruchowego

$$U_{ar} \leq 2R_a I_{an} \quad (5.32)$$

wartość rezystancji rozruchowej

$$R_{ad} \geq \frac{U_{an}}{2I_{an}} - R_a \quad (5.33)$$

wartość przybliżona rezystancji rozruchowej

$$R_{ad} \geq \frac{U_{an}}{2I_{an}} \quad (5.34)$$

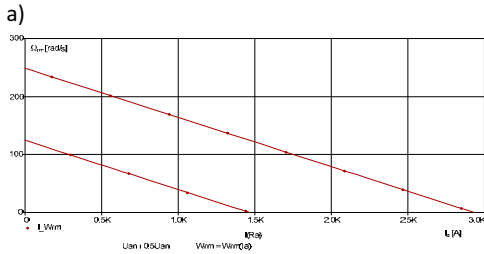
⁹⁾ Tak duże ograniczenie prądu rozruchowego silnika – niespotykane w maszynach prądu przemiennego – wynika z niebezpieczeństwa uszkodzenia zestyku ślizgowego – konsekwencją niespełnienia tych ograniczeń może być pojawienie się łuku elektrycznego na komutatorze, który prowadzi do uszkodzenia komutatora.

5.5. Sterowanie prędkości kątową/obrotową

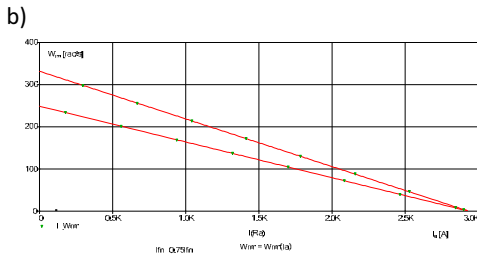
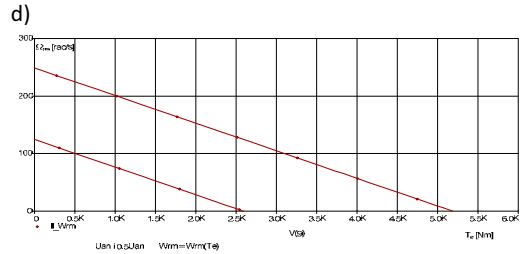
Z równań (5.26) i (5.27) wynikają następujące metody kształtowania charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika:

- sterowanie przez zmianę wartości napięcia U_a zasilania obwodu twornika;
- sterowanie przez zmianę wartości prądu I_f (strumienia) wzbudzenia;
- sterowanie przez zmianę wartości rezystancji dodatkowej R_{ad} w obwodzie twornika.

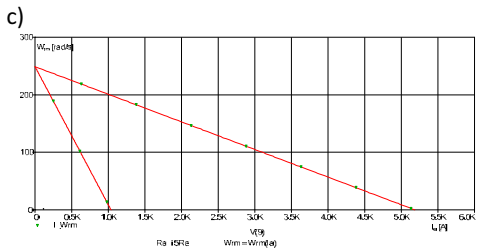
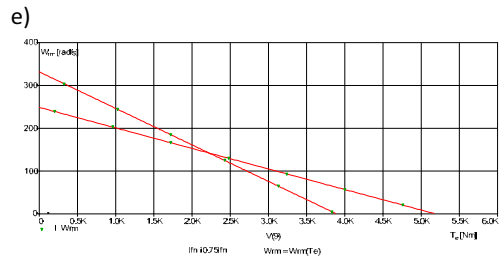
Przykładowe charakterystyki przedstawiono na rys. 5.8. Są to charakterystyki idealizowane, gdyż wyznaczającą je zależność (5.21). Sformułowaliśmy je przy założeniach upraszczających: pominięto nasycenia obwodu magnetycznego oraz zjawisko oddziaływania twornika. Ich wykresy sporządzono za pomocą programu symulacji obwodów elektrycznych PSpice [62] – model w symulatorze sporządzono w oparciu o model obwodowy SPS podany na rys. 5.7b.



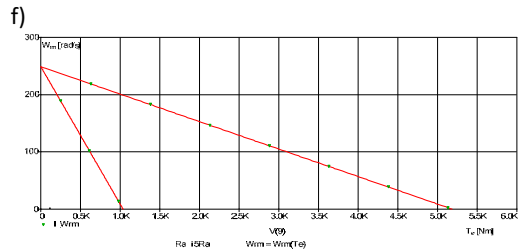
Sterowanie przez zmianę wartości napięcia U_a przy $I_f = \text{const}$, $R_{ad} = 0$



Sterowanie przez zmianę wartości prądu I_f przy $U_a = \text{const}$, $R_{ad} = 0$



Sterowanie przez zmianę wartości rezystancji dodatkowej R_{ad} przy $U_a = \text{const}$, $I_f = \text{const}$



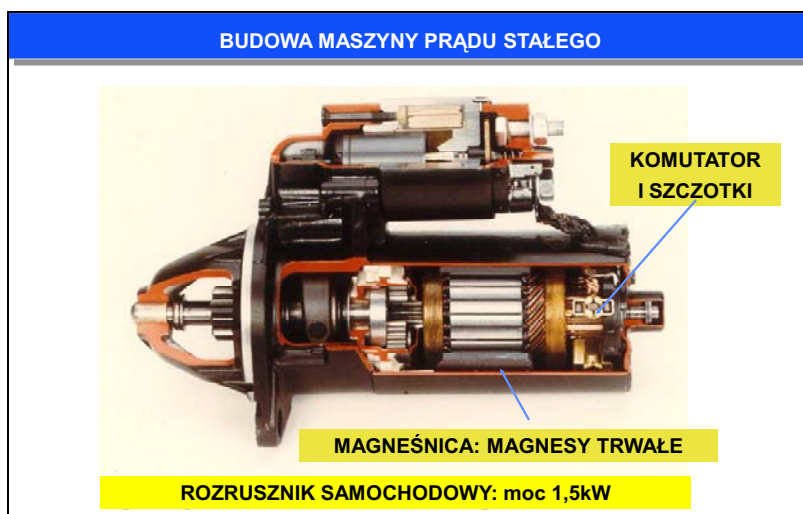
Rys. 5.8. Przykładowe charakterystyki (idealizowane) obcowzbudnego silnika prądu stałego i metody ich kształtowania: a), b), c) elektromechaniczne; d), e), f) mechaniczne

5.6. Maszyny specjalne

Komutatorowe silniki prądu stałego z magnesami trwałymi

W silnikach prądu stałego małej mocy, zamiast uzwojenie wzbudzenia, często stosuje się magnesy trwałe (rys. 5.9–5.12). Umożliwia to zmniejszenie wymiarów zewnętrznych silnika – magnes trwały zajmuje mniejszą objętość niż bieguny i uzwojenie. Silniki takie są zwykle zasilane z regulowanych źródeł napięcia (w tym PWM). Jako wzbudzenie stosuje się najczęściej tanie magnesy ferrytowe, rzadziej magnesy Al-Ni-Co lub magnesy z pierwiastków ziem rzadkich (Nd-Fe-B, Sm-Co). Magnes trwały wytwarza stałe pole wzbudzenia, wobec czego, silnik może być traktowany jak silnik bocznikowy prądu stałego.

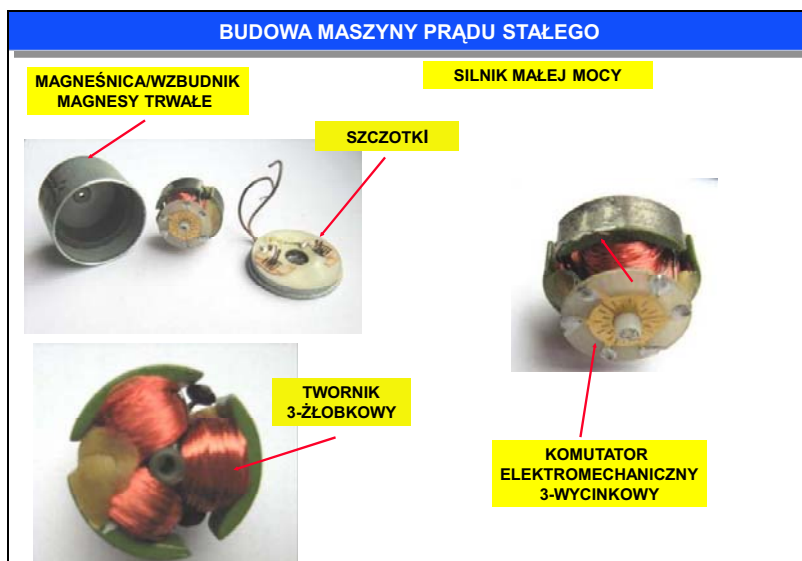
Zastosowanie magnesów trwałych umożliwia budowę prostych, a dzięki temu tanich i niezawodnych silników. Silniki te cechuje większa sprawność, większy moment rozruchowy, mniejsze zużycie materiałów, niższe koszty produkcji i eksploatacji. Z tego powodu silniki te są chętnie stosowane w przemyśle samochodowym (np. rozruszniki z rys. 5.9), w sprzęcie gospodarstwa domowego, w napędach dysków twardych, napędach optycznych czy w napędach zabawek (rys. 5.10).



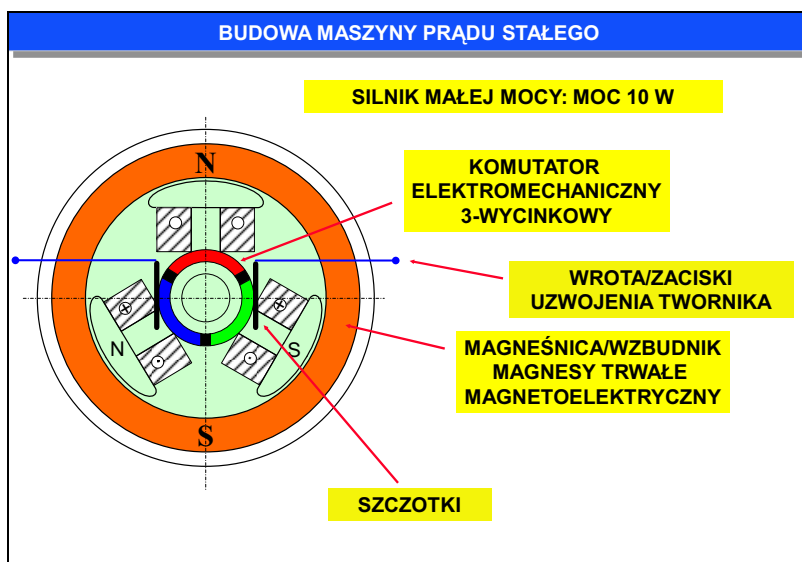
Rys. 5.9. Budowa rozrusznika samochodowego

Na rysunkach 5.10 oraz 5.11 przedstawiono budowę prostego silnika prądu stałego stosowanego w układach napędowych małej mocy (kilka W) zasilanych z baterii (np. zabawkach).

Silnik ma trzy zęby (żłobki) twornika (wirnika), magneśnicę w postaci pierścienia z magnesu trwałego oraz komutator elektromechaniczny (o trzech wycinkach). Jest to silnik o prostej konstrukcji, tani w produkcji, o stosunkowo dużej sprawności (ok. 50%). Wadą są duże pulsacje momentu elektromagnetycznego i prędkości obrotowej. Czas eksploatacji takiego silnika jest ograniczony przez trwałość komutatora elektromechanicznego.



Rys. 5.10. Silniki prądu stałego stosowane w zabawkach



Rys. 5.11. Budowa silnika prądu stałego małej mocy: o wzbudzeniu magnetoelektrycznym

Innym ciekawym typem silnika prądu stałego o wzbudzeniu magnesami trwałymi jest silnik o polu osiowym (silnik tarczowy) pokazany na rys. 5.12. Płaska (ang. *pancake shape*) i zwarta budowa, wysoka gęstość energii czynią z takiego silnika idealne rozwiązania do napędu pojazdów elektrycznych, pomp, wentylatorów, wirówek, itp. Płaska budowa wirnika umożliwia budowę silników wielowarstwowych (o kilku wirnikach). Wirnik silnika tarczowego może być wykonany jako uzwojony w wersji żłobkowej lub bezżłobkowej (ang. *slotless*). Stosuje się również wirniki bez części ferromagnetycznych (ang. *ironless*) z drukowanym uzwojeniem twornika (ang. *printed winding*) (rys. 5.12). Zaletą tych silników jest między innymi możliwość zintegrowania ich wirników z częściami napędzanymi np. silniki wbudowane w koła samochodów.



Rys. 5.12. Silnik tarczowy prądu stałego z magnesami trwałymi

Silniki uniwersalne

Budowę silnika uniwersalnego prądu stałego pokazano na rys. 5.13. Jest to zwykły komutatorowy silnik szeregowy, który może być zasilany zarówno napięciem stałym, jak i przemiennym. W takim silniku uzwojenie twornika i wzbudzenia jest połączone szeregowo. W przypadku zasilania napięciem przemiennym jednocześnie zmienia się kierunek prądu twornika i wzbudzenia, a więc i kierunek przepływów twornika i wzbudzenia. W rezultacie synchronicznych zmian prądu twornika i wzbudzenia kierunek działania momentu nie zmienia się. Obwody magnetyczne wirnika i stojana silnika uniwersalnego muszą być wykonane z pakietu izolowanych blach stalowych, aby ograniczyć straty mocy wywołane indukowaniem się prądów wirowych.



Rys. 5.13. Uniwersalny silnik prądu stałego

Silniki uniwersalne stosuje się w napędach elektronarzędzi lub urządzeń gospodarstwa domowego. Silniki te mogą pracować przy dużych prędkościach obrotowych (do 30 tys. obr/min), np. w odkurzaczach, suszarkach.

5.7. Podsumowanie

Maszyna prądu stałego jest przetwornikiem do elektromechanicznego przetwarzania energii prądu stałego i energii mechanicznej. Proces przemiany energii może zachodzić w dwóch kierunkach: maszyna może pracować jako prądnica (generator) lub jako silnik.

Maszyna prądu stałego stanowi przykład wzorcowego sprzężenia elektromechanicznego, które wynika z wzajemnie prostopadłego położenia osi przepływu Θ_a uzwojenia wirnika (twornika) względem osi przepływu Θ_f uzwojenia stojana (wzbudzenia). Generowany moment elektromagnetyczny (jako efekt interakcji dwóch pól) jest proporcjonalny do iloczynu modułów wektorów przepływów stojana $|\Theta_f|$ i wirnika $|\Theta_a|$ (przy pominięciu efektu nasycenia żelaza i reakcji twornika). Stwarza to szczególnie korzystne warunki kształtowania charakterystyki zewnętrznej (mechanicznej) maszyny zarówno dla stanu statycznego jak i dynamicznego. Składają się na nie:

- **wyodrębnienie sterowanego źródła napięcia zasilania obwodu stojana kształtującego strumień wzbudzenia maszyny;**
- **wyodrębnienie sterowanego napięcia zasilania obwodu wirnika kształtującego prąd wirnika.**

W rozdziale omówiliśmy głównie maszyny prądu stałego pracujące w **systemach napędowych**. Na wstępie opisaliśmy budowę maszyny prądu stałego. Następnie przedstawiliśmy ich modele fizyczne i obwodowe. Omówiliśmy najważniejsze charakterystyki ruchowe silników prądu stałego: **elektromechaniczne i mechaniczne** oraz metody ich kształtowania. Rozdział zakończyliśmy krótkim omówieniem specjalnych maszyn prądu stałego: komutatorowych silników z magnesami trwałymi, silników uniwersalnych.

5.8. Pytania

1. Opisać maszynę prądu stałego jako trójwrotowy przetwornik elektromechaniczny. Przedstawić kierunki przepływu mocy przy pracy prądnicowej i silnikowej.
2. Wymienić i nazwać podstawowe elementy maszyny prądu stałego i podać ich funkcje.
3. Jaka jest funkcja komutatora i szczotek w maszynie prądu stałego?
4. Opisać zasadę działania obcowzbudnego silnika prądu stałego w ujęciu ciągu logicznego przyczyna-skutek.
5. Naszkicować elementarny model silnika prądu stałego. Wyjaśnić działanie (funkcję) komutatora i szczotek.
6. Naszkicować model fizyczny (podstawowy) obcowzbudnego silnika prądu stałego – układ dwóch przepływów/pól magnetycznych. Wykazać, że układ dwóch przepływów jest nieruchomy względem siebie – ich osie magnetyczne tworzą kąt prosty. Jakie są tego konsekwencje w aspekcie właściwości ruchowych silnika?
7. Narysować podstawowy model obwodowy obcowzbudnego silnika prądu stałego. Wyjaśnić, jakie zjawiska fizyczne zachodzące w silniku odwzorowują poszczególne elementy modelu. Podać równania opisujące model obwodowy silnika.
8. Podać zależność i wykreślić idealizowaną charakterystykę elektromechaniczną i mechaniczną obcowzbudnego silnika prądu stałego.

5.9. Zagadnienia obliczeniowe i pomiarowe (laboratoryjne)

Przerobienie kompletu zadań, które naświetlałyby niektóre zagadnienia z wykładów, jest jednym ze sposobów dopomożenia studentom. Zadania stwarzają dobrą okazję do uzupełnienia materiału wykładowego oraz sprawiają, że wyłożone zagadnienia stają się bardziej realne, pełniejsze i lepiej ugruntowane w umysłach.

Zagadnieniom obliczeniowym maszyn prądu stałego poświęconych jest szereg podręczników [14, 21, 43] i skryptów [51, 57, 58]. Szczególnie cenna jest najnowsza publikacja [43] obejmująca zagadnienia obliczeniowe w eksploatacji maszyn elektrycznych.

Zagadnienia pomiarowe (laboratoryjne) dotyczące transformatorów omówiono w podręczniku [27] i skryptach [49, 54].

5.10. Literatura

Książki/podręczniki

- [1] Adkins B., *The general theory of electrical machines*. Chapman and Hall, London 1957.
- [2] Arnold E., *Die Gleichstrommaschine, Band.1: Theorie und Untersuchung, Band. 2: Konstruktion, Berechnung, Untersuchung und Arbeitsweise, 1902-1903*, Springer.
- [3] Beaty W. H., Kirtley J. L. Jr., *Electric motor handbook*. McGraw-Hill 1998.
- [4] Chapman S. J., *Electric Machinery Fundamentals, 4th ed.*, McGraw Hill Book Co (Education), 2004.
- [5] Chiasson J., *Modeling and High Performance Control of Electric Machines*, IEEE Press Series on Power Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York 2005.
- [6] Dąbrowski M., *Konstrukcja maszyn elektrycznych*, WNT, Warszawa 1977.
- [7] Demenko A., *Obwodowe modele układów z polem elektromagnetycznym*. Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań 2004.
- [8] Dubicki B., *Maszyny elektryczne. Maszyny prądu stałego*, T.1, PWN, Warszawa 1958.
- [9] Fitzgerald A. E., Kingsley Ch., Jr., Umans. S. D., *Electric Machinery, 6th ed.*, McGraw-Hill, 2003.
- [10] Gieras J.F., *Advancements in Electric Machines*, Heidelberg, Springer 2009.
- [11] Gieras J.F., Gieras I.A., *Electrical energy utilization*, Wyd. Adam Marszałek, Toruń 1998.
- [12] Glinka T., *Mikromaszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 1995.
- [13] Glinka T., *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2002.
- [14] Glinka T., Mizia W., Żywiec A., Hickiewicz J., *Zadania z maszyn elektrycznych*, WNT, Warszawa 1973.
- [15] Gogolewski Z., Gabryś Z., *Maszyn prądu stałego. Obliczenia, konstrukcja, zagadnienia specjalne*, PWT, Warszawa 1965.
- [16] Kamiński G., Przyborowski W., *Uzwojenia i parametry maszyn elektrycznych*, OWPW, Warszawa 2005.
- [17] Karwacki W., *Maszyny elektryczne*, Oficyna Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław 1994.
- [18] Kaźmierkowski M.P., Tunia H., *Automatic control of converter-fed drives*. Elsevier, Amsterdam 1994.
- [19] Kittler E., *Handbuch der Elektrotechnik*, Stuttgart, Verlag von Ferdinand Enke, I Band 1886, II Band 1890.
- [20] Kordecki A., *Budowa maszyn elektrycznych. Projektowanie maszyn prądu stałego*. WNT, Warszawa 1973.
- [21] Koter T., Pełczewski W., *Maszyny elektryczne w zadaniach*, Wydaw. Nauk.-Tech., Warszawa 1975.
- [22] Krause P.C., *Analysis of electric machinery*. McGraw-Hill, New York 1986.
- [23] Kron G., *Equivalent circuit of electric machinery*. John Wiley and Sons, New York 1951.
- [24] Królikowski L., *Rozwój konstrukcji maszyn elektrycznych do końca XIX wieku*, Zakł. Nar. im. Ossolińskich, Wrocław 1986.
- [25] Latek W., *Zarys maszyn elektrycznych*. WNT, Warszawa 1974.
- [26] Latek W., *Teoria maszyn elektrycznych*. Wyd. 2. WNT, Warszawa 1987.
- [27] Latek W., *Badanie maszyn elektrycznych w przemyśle*, WNT, Warszawa 1987
- [28] Latek W., *Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach*, Wydaw. Nauk.-Tech., Warszawa 1994.

- [29] Levi E., Panzer M., *Electromechanical power conversion: low-frequency, low-velocity conversion processes*, McGraw-Hill 1966.
- [30] Lyshevski S. E., *Electromechanical systems, electric machines, and applied mechatronics*. CRC Press, Boca Raton 1999.
- [31] Nogarède B., *Électrodynamique appliquée. Bases et principes physiques de l'électrotechnique*", Dynod, Paris 2005
- [32] Mohan N.: *Electric drives. An integrative approach*. MNPERE, Minneapolis 2000.
- [33] Miesel J., *Zasady elektromechanicznego przetwarzania energii*. WNT, Warszawa 1970.
- [34] O'Kelly D., *Performance and control of electrical machines*, London, McGraw-Hill 1991.
- [35] Owczarek J., i in., *Elektryczne maszynowe elementy automatyk*, Warszawa, WNT 1983/86.
- [36] Plamitzer A. M., *Maszyny elektryczne*. Wyd. 7. WNT, Warszawa 1982.
- [37] Puchała A., *Dynamika maszyn i układów elektromechanicznych*. PWN, Warszawa 1977.
- [38] Puchała A., *Elektromechaniczne przetworniki energii*. Monografia wykładów. BOBR Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice 2002.
- [39] Pustoła J., *Analiza działania szybko reagujących silników komutatorowych i impulsowych*. (Publikacja nr 10 serii wydawniczej Komitetu Elektrotechniki PAN: Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki). PWN, Warszawa 1971.
- [40] Rothert A., *Teoria i konstrukcja maszyn elektrycznych*, Lwów 1910.
- [41] Roszczyk S., *Teoria maszyn elektrycznych*. WNT, Warszawa 1979.
- [42] Sochocki R., *Mikromaszyn elektryczne*, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej 1996.
- [43] Staszewski P., Urbański W., *Zagadnienia obliczeniowe w eksploatacji maszyn elektrycznych*, Warszawa, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej 2009.
- [44] Toliyat H. A., Kliman G. B. (edited), *Handbook of electric motors, 2nd ed.*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton 2004.
- [45] Turowski J., *Podstawy mechatroniki*, Wydawnictwo WSHE, Łódź 2008.
- [46] Vas P., *Electrical machines and drives. A space-vector theory approach*. Oxford Science Publications, Oxford 1992.
- [47] White D.C., Woodson H.H., *Electromechanical Energy Conversion*. J. Wiley, New York 1959.
- [48] Woodson H.H., Melcher J.R., *Electromechanical dynamics*. Part1: Discrete systems. Part2: Fields, forces, and motion. Part3: Elastic and Fluid media. J. Wiley, New York 1968.

Skrypty

- [49] Kamiński G., Kosk J., Przyborowski W., *Laboratorium maszyn elektrycznych*, OWPW, Warszawa 2005.
- [50] Karwacki W., *Maszyny elektryczne*. Oficyna Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław 1994.
- [51] Łukaniszyn M., *Zbiór zadań z maszyn elektrycznych dla studentów studiów zaocznych*, Skrypt Nr 226, Oficyna Wyd. Pol. Opolskiej, Opole 2000.
- [52] Manitius Z., *Maszyny prądu stałego, wyd. 2*, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 1977.
- [53] Manitius Z., *Maszyny elektryczne, Cz.1*, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 1982.
- [54] Manitius Z (red.), *Laboratorium maszyn elektrycznych, wyd. 2*, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 1990.
- [55] Matulewicz W., *Maszyny elektryczne. Podstawy, wyd. 3*, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 2008.
- [56] Miksiewicz R., *Maszyny elektryczne. Zagadnienia obliczeniowa z wykorzystaniem programu MATCAD*, Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2000.
- [57] Miksiewicz R., *Zastosowanie programu Mathcad do rozwiązywania statycznych zagadnień obliczeniowych maszyn elektrycznych i transformatorów*, Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2007.
- [58] Rafalski W., Ronkowski M., *Zadania z maszyn elektrycznych, Cz. II: Maszyny synchroniczne i maszyny prądu stałego, wyd. 3*, Wyd. Politechniki Gdańskiej 1994.
- [59] Roszczyk S., Witkowski J., *Elektromechaniczne przetworniki energii w zadaniach*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1982.
- [60] Skwarczyński J., Tertil Z., *Maszyny elektryczne. Teoria. Cz. 1, 2*. Wyd. AGH, Kraków 1995 (Cz. 1) 1997 (Cz. 1).
- [61] Skwarczyński J., Tertil Z., *Elektromechaniczne przetwarzanie energii*. Uczelniane Wyd. Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2000.
- [62] Zimny P., *Spice. Klucz do elektrotechniki*. Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 1993.

Ważniejsze normy

- [63] PN-EN 60034-1:2005 Maszyny elektryczne wirujące. Część 1: Dane znamionowe i parametry.
- [64] PN-EN 60034-5:2004/A 1:2007 Maszyny elektryczne wirujące. Część 5: Stopnie ochrony zapewniane przez rozwiązania konstrukcyjne maszyn elektrycznych wirujących (kod IP). Klasyfikacja.
- [65] PN-EN 60034-7:2005 Maszyny elektryczne wirujące. Klasyfikacja form wykonania i sposobów montażu (kod IM).
- [66] PN-EN 60034-6:1999 Maszyny elektryczne wirujące. Sposoby chłodzenia (kod IC)
- [67] PN-IEC 72-1:1996 Maszyny elektryczne wirujące. Wymiary i ciągi mocy maszyn elektrycznych wirujących. Rozmiar obudowy od 56 do 400 i rozmiar kołnierza od 55 do 1080.
- [68] PN-E-06700:1991 Maszyny elektryczne wirujące. Terminologia
- [69] PN-EN 60027-4:2007 Oznaczenia wielkości i jednostek miar używanych w elektryce. Maszyny elektryczne wirujące.

Ważniejsze adresy internetowe producentów/dystrybutorów

- [70] BOBR Maszyn Elektrycznych „KOMEL” www.komel.katowice.pl
- [71] ABB Sp. z o.o., www.abb.pl/ProductGuide/
- [72] Siemens, www.siemens.com
- [73] Zakład Maszyn Elektrycznych EMIT S.A., Żychlin, www.cantonigroup.com/pl/motors/emit/

6. Maszyny synchroniczne

Maszyna synchroniczna jest przetwornikiem do elektromechanicznego przetwarzania energii prądu przemiennego i energii mechanicznej. Proces przemiany energii może zachodzić w dwóch kierunkach: maszyna może pracować jako prądnica (generator) lub jako silnik.

Maszyna synchroniczna należy do grupy maszyn prądu przemiennego. Budowa maszyny synchronicznej oparta jest na wykorzystaniu idei pola o wirującym strumieniu magnetycznym.

Podstawą działania i budowy maszyny synchronicznej są dwa odkrycia: efektu magnetycznego prądu (Hans Oersted odkrył 21 kwietnia 1820 r.) i zjawiska indukcji elektromagnetycznej (Michał Faraday odkrył 29 sierpnia 1831 r.).

6.1. Uwagi wstępne

W rozdziale omówimy głównie maszyny synchroniczne pracujące jako generatory w systemach energetycznych. Zasadniczą ich funkcją jest przetwarzanie energii mechanicznej¹⁾ w energię prądu przemiennego – stanowią podstawowe źródło energii elektrycznej w systemach elektroenergetycznych (również autonomicznych) [33]. Generatory synchroniczne buduje się w zakresach mocy od kilku kVA do 2 GVA (Siemens SGen-3000 W).

Maszyny synchroniczne pełnią także funkcję napędową, pracując jako silniki synchroniczne wzbudane zarówno elektromagnetycznie, jak i magnesami trwałymi [9, 14, 16, 61]. Ponadto istnieje liczna grupa maszyn synchronicznych specjalnych, które należą do grupy **elektrycznych maszynowych elementów automatyki** – pracują w systemach automatyki jako silniki wykonawcze (aktuatory) oraz tachoprądnice (mierniki prędkości obrotowej) [9, 32, 38, 41]. Ponadto, istnieje bardzo liczna grupa mikromaszyn synchronicznych wzbudanych magnesami trwałymi – mikrosilniki magnetoelektryczne, stosowane w systemach mechatroniki [9, 11, 12, 27, 28, 41, 43]

Podstawowe zjawiska i procesy fizyczne, występujące w wymienionych wyżej maszynach synchronicznych, są takie same, chociaż każdy typ maszyny wyróżnia się specyficzną charakterystyką. Omawianie maszyny synchronicznej opieramy na najważniejszej dla systemu energetycznego maszynie „energetycznej” – przetwarzającej energię mechaniczną na energię elektryczną prądu przemiennego o stałych parametrach napięcia, wartości skutecznej i częstotliwości.

Na wstępie krótko opiszemy budowę maszyny synchronicznej. Następnie przedstawimy jej model fizyczny i obwodowy oraz rozważymy trzy stany pracy maszyny: stan jałowy, stan zwarcia i stan obciążenia. Następnie omówimy charakterystyki ruchowe maszyny synchronicznej pracującej w systemie autonomicznym i energetycznym. Omówimy także najważniejsze charakterystyki ruchowe silnika synchronicznego (mechaniczną i kątową) i metody ich kształtowania.

6.2. Formy budowa

Zagadnienia konstrukcji i technologii maszyn synchronicznych (MS) stanowią obszerną dziedzinę wiedzy technicznej. Zagadnieniom tym poświęcone są specjalne książki, opracowania i normy. W języku polskim są to prace autorstwa profesorów: M. Dąbrowskiego [5, 6] i W. Latka [25]. Szcze-

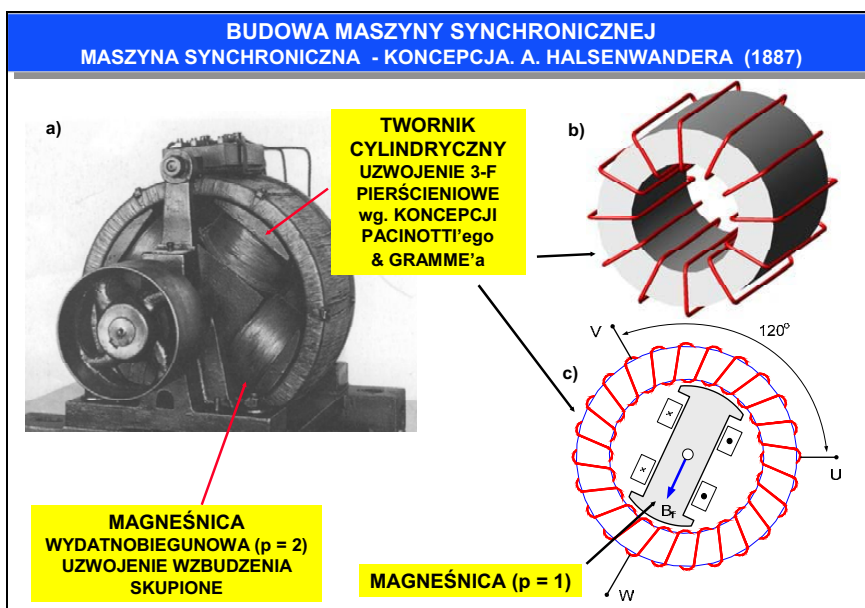
¹⁾ Źródłem energii mechanicznej jest turbina parowa, gazowa, wodna, wiatrowa lub silnik spalinowy.

gólnie obszerna jest monografia prof. W. Latka poświęcona turbogeneratorom. Rys historyczny początku rozwoju MS zawiera książka [20].

Ograniczymy się jedynie do kilku podstawowych informacji o budowie MS – koniecznych do opisu teoretycznego zachodzących w nich zjawisk elektromechanicznych. Zagadnienia budowy uzwojeń dostępne są w obszernej literaturze przedmiotu „maszyny elektryczne”, w szczególności w podręczniku specjalistycznym [15]. Pomijamy także ważne zagadnienia układów chłodzenia dla maszyn bardzo dużych – omawiane są szczegółowo we wspomnianych publikacjach, w szczególności w monografii [25].

Maszyny synchroniczne występują w różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych: turbogeneratory, hydrogeneratory, generatory bezszczotkowe (dwu- i trójstopniowe). Przykłady budowy i podstawowe elementy MS przedstawiamy kolejno na rys. 6.1–6.5.

Przykład budowy MS 3-fazowej z początkowego okresu rozwoju przedstawiamy na rys. 6.1. Strukturą elektromagnetyczną przypomina „odwróconą” maszynę prądu stałego, zbudowaną i produkowaną w większych ilościach przez Z. Gramme’a (rozd. 5, rys. 5.1). Magnesia została przeniesiona ze stojana do wirnika, a twornik – do stojana. Zestaw ślizgowy komutator-szczotki został zastąpiony przez układ dwa pierścienie ślizgowe-szczotki.

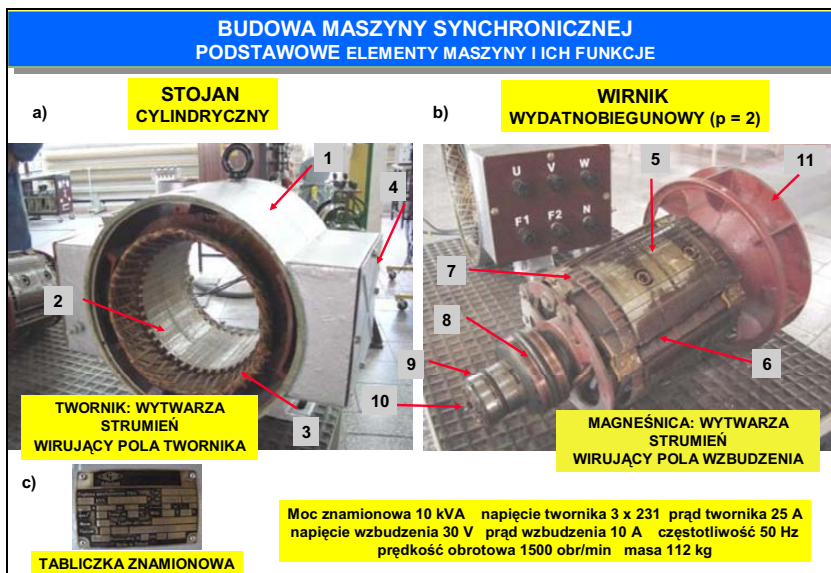


Rys. 6.1. Przykład budowy maszyny synchronicznej 3-fazowej z początkowego okresu rozwoju

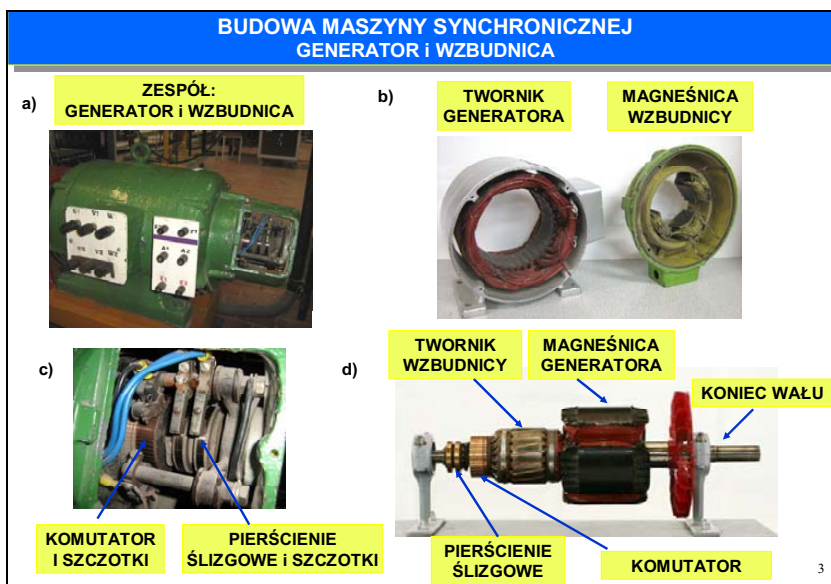
Budowę i podstawowe elementy współczesnej MS małej mocy przedstawiamy na rys. 6.2. Maszyna składa się z następujących elementów czynnych: magnesia/wzbudnika (uzwojenie wzbudzenia, pierścienie ślizgowe, rdzeń wzbudnika); twornika (uzwojenie twornika, rdzeń twornika); wału. Trójfazowe uzwojenie twornika umieszczone jest w żłobkach stojana wykonanego z pakietu blach. Jest to maszyna wydatnobiegunowa – uzwojenie wzbudzenia nawinięte jest na biegunach wirnika. W nabiegownikach umieszczone są mosiężne lub miedziane pręty kłatek tłumiących zwarte po każdej stronie nabiegownika pierścieniami.

W systemach autonomicznych małej mocy, np. na pokładzie statków, stosuje się rozwiązania bezszczotkowe – układ dwóch maszyn synchronicznych (rys. 6.3). Na wspólnym wale umieszczone są dwie maszyny synchroniczne: główna – generator oraz wzbudnica. Wzbudnica posiada uzwojenie 3-fazowe twornika na wirniku, które, poprzez prostownik diodowy wirujący, zasila uzwojenie wzu-

dzenia głównej maszyny (rys. 6.5). Regulacja napięcia wyjściowego głównej maszyny odbywa się przez regulację prądu wzbudzenia wzbudnicy (rys. 6.3).

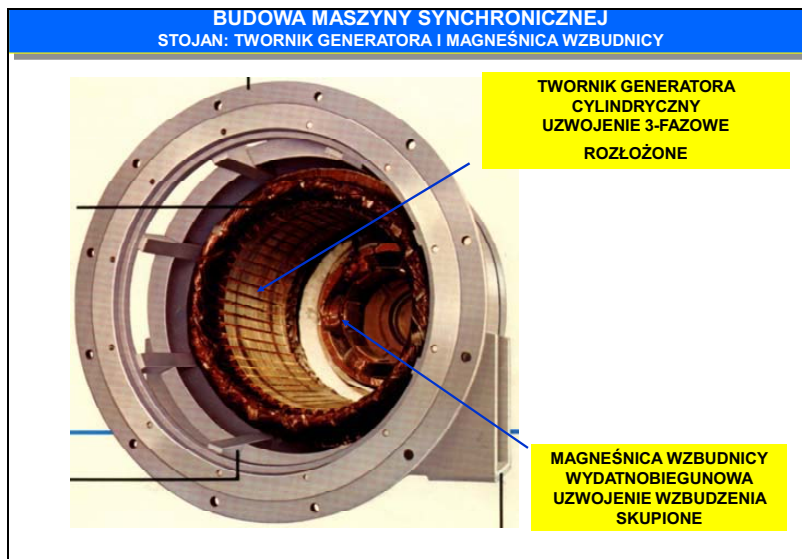


Rys. 6.2. Budowa i podstawowe elementy maszyny synchronicznej (produkcja firmy ELMOR Gdańsk):
a) twornik 3-fazowy, b) wzbudnik wydatnobiegunowy, c) tabliczka zaciskowa, d) tabliczka znamionowa
Elementy maszyny: 1 – kadłub stojana, 2 – rdzeń blachowany, 3 – 3-fazowe uzwojenie twornika, 4 – skrzynka zaciskowa, 5 – biegun/nabiegunnik magnesnicy, 6 – skupione uzwojenie wzbudzenia, 7 – klatka tłumiąca, 8 – pierścienie ślizgowe, 9 – łożyska, 10 – wał, 11 – wentylator

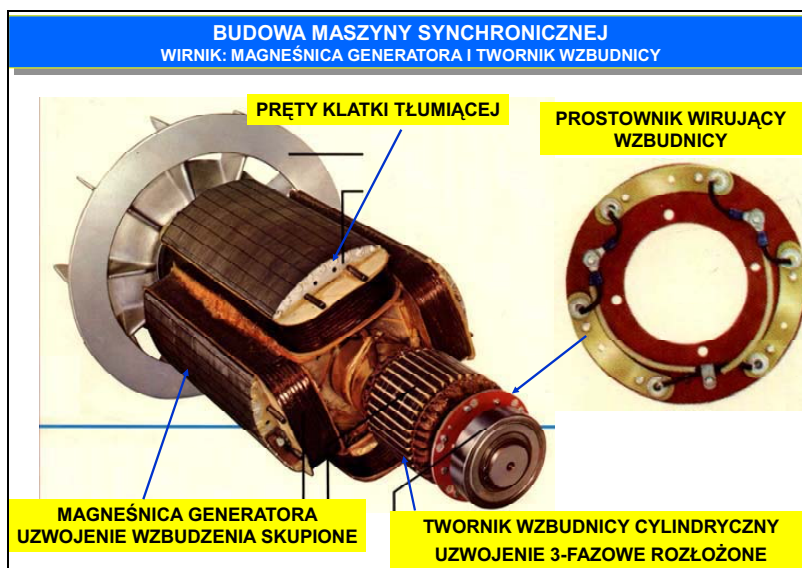


Rys. 6.3. Budowa i podstawowe elementy maszyny synchronicznej z wzbudnicą szczotkową:
a) zespół generator-wzbudnica, b) stojan generatora i wzbudnicy, c) węzeł zestyku ślizgowego wzbudnicy (komutator i szczotki) i magnesnicy (pierścienie ślizgowe i szczotki), d) wirnik generatora i wzbudnicy

Podobne konstrukcje generatorów synchronicznych bezszczotkowych stosuje się w systemach elektroenergetycznych na pokładzie współczesnego samolotu (porównaj punkt 3.4.1, rys. 3.7–3.9) oraz w systemach mikro-CHP (porównaj punkt 3.52 rys. 3.15).



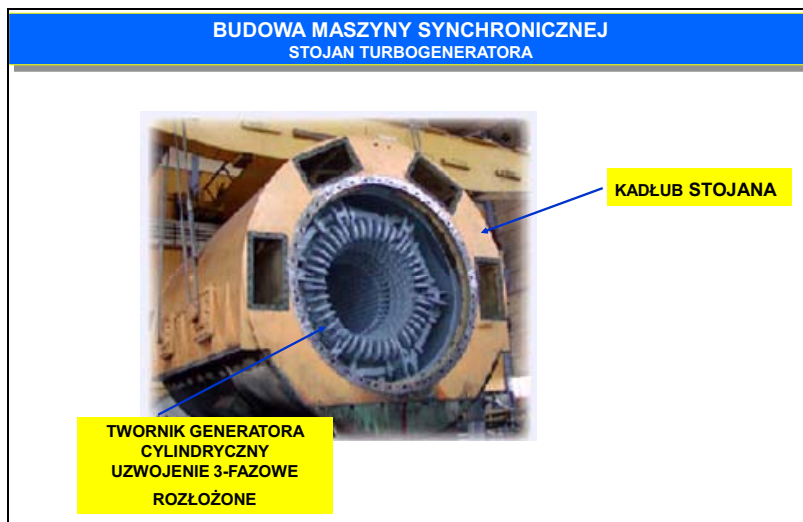
Rys. 6.4. Stojan maszyny synchronicznej bezszczotkowej: uzwojenie twornika generatora i uzwojenie magneśnicy wzбудnicy (źródło: materiały The Lima Electric Co.)



Rys. 6.5. Wirnik maszyny synchronicznej bezszczotkowej: magneśnica generatora, twornik wzbudnicy i prostownik wirujący (źródło: materiały The Lima Electric Co.)

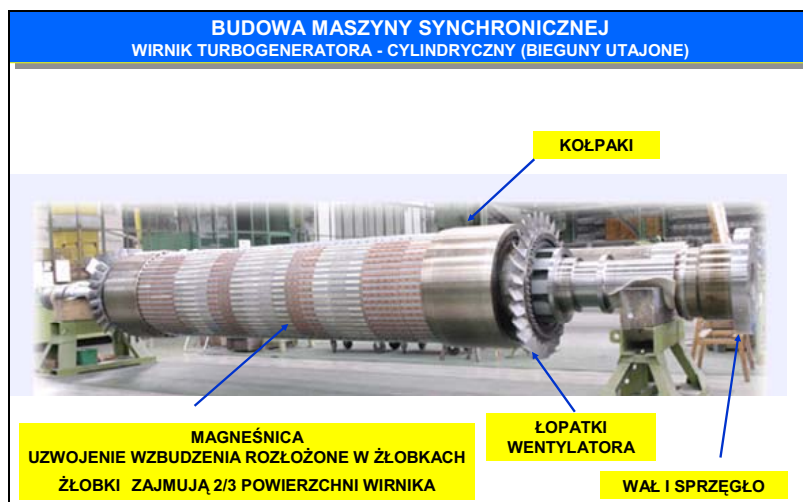
W systemie energetycznym jako źródła energii elektrycznej stosuje się generatory synchroniczne bardzo dużych mocy (nawet do 2 GVA). W elektrowniach węglowych stosuje się turbogeneratory napędzane turbinami parowymi. Prędkość obrotowa wirników to zwykle 1500 lub 3000 obr/min –

wynika stąd liczba biegunów MS – odpowiednio 4 lub 2 dla częstotliwości 50Hz. Rdzeń stojana wykonany jest z pakietów izolowanych blach (rys. 6.6). W żłobkach stojana rozłożone jest trójfazowe uzwojenie twornika.



Rys. 6.6. Stojan turbogeneratora [65]

Cylindryczny wirnik turbogeneratora wykonany jest z odkuwki stalowej łącznie z wałem (rys. 6.7). Średnice zewnętrzne wirników, z uwagi na duże prędkości obrotowe, są niewielkie – w turbogeneratorach najwyższych mocy dochodzą do 1,2 m. Uzwojenie wzbudzenia umieszczone jest w żłobkach wirnika, które zajmuje 2/3 obwodu wirnika (rys. 6.7).



Rys. 6.7. Wirnik turbogeneratora [65]

W elektrowniach wodnych stosowane są tzw. hydrogeneratory (rys. 6.8 i 6.9). Z uwagi na małą prędkość obrotową są to maszyny wielobiegunowe. Wirnik ma konstrukcję wydłużoną (rys.

6.9) o dużej średnicy zewnętrznej. Uzwojenie wzbudzenia nawinięte jest na biegunach – skupione. Hydrogenerator pracuje w pozycji pionowej.

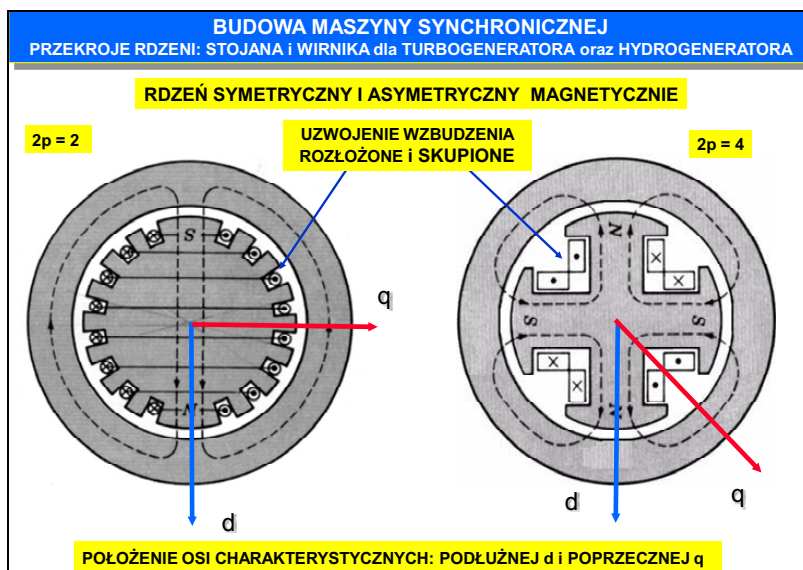


Rys. 6.8. Stojan hydrogeneratora – Elektrownia Wodna we Włocławku (fot. Mikołaj Kiełczyński)



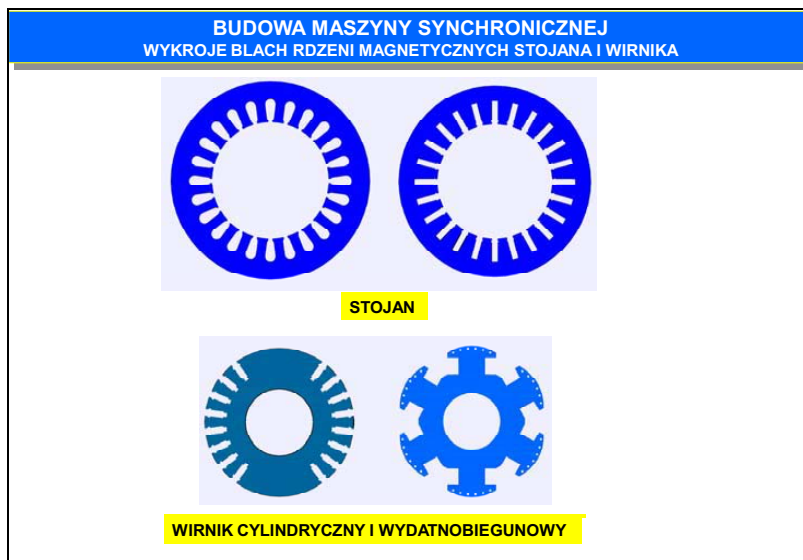
Rys. 6.9. Wirnik hydrogeneratora – Elektrownia Wodna we Włocławku (fot. Mikołaj Kiełczyński)

Na rysunku 6.10 przedstawiono przekroje rdzeni wirników: cylindrycznego oraz wydatno biegunowego. Uzwojenie wzbudzenia w wirniku cylindrycznym zabezpieczone jest przed działaniem sił odśrodkowych za pomocą klinów zamykających żłobki. Kliny te mogą jednocześnie spełniać funkcję klatek tłumiących. W przypadku wirnika wydatno biegunowego klatki tłumiące umieszczone są w żłobkach nabiegunnika. Klatki są zwarte poprzez pierścienie na każdym nabiegunniku osobno lub na wszystkich razem.



Rys. 6.10. Przekroje rdzeni stojana i wirnika dla turbogeneratora oraz hydrogeneratora

Na rysunku 6.11 przedstawiono wykroje blach stojana i wirnika MS. Kształt żłobka stojana zależy od rodzaju użytych przewodów. Dla uzwojeń wykonanych z drutów o przekroju okrągłym stosuje się żłobki o kształcie zaokrąglonym. Druty profilowane (o przekroju prostokątnym) łatwiej umieszczać w żłobkach prostokątnych.



Rys. 6.11. Wykroje blach rdzenia magnetycznego stojana i wirnika [65]

Tabliczka znamionowa maszyny synchronicznej najczęściej zawiera następujące dane [70]:

- nazwę lub znak wytwórcy,
- nazwę i typ wyrobu,
- numer fabryczny,

- rok wykonania,
- rodzaj wzbudzenia,
- moc znamionową, napięcia znamionowe i prądy znamionowe poszczególnych uzwojeń,
- symbol znamionowego rodzaju pracy,
- klasę materiałów izolacyjnych,
- stopień ochrony,
- masę całkowitą.

Przykład tabliczki podano na rys. 6.2.

6.3. Modele fizyczne i obwodowe

Zagadnienia modelowania i pomiarów MS stanowią oddzielną dziedzinę wiedzy technicznej w stosunku do analogicznych zagadnień maszyn indukcyjnych należących do grupy maszyn prądu przemiennego. Zagadnieniom tym poświęcone są specjalne książki, opracowania i normy. Najbardziej znane pozycje specjalistyczne w języku polskim to publikacje [7, 25, 34, 36]. W tym miejscu ograniczymy się jedynie do podstawowych informacji o modelowaniu MS – koniecznych do opisu jej charakterystyk ruchowych.

Podstawowe pojęcia ogólne dotyczące modelowania przedstawiliśmy w rozdz. 4 (rys. 4.5).

6.3.1. Założenia modelu

Maszyna synchroniczna jest przetwornikiem elektromechanicznym (rys. 6.12 i 6.13) o trzech wrotach przepływu energii/mocy, które fizycznie reprezentują: zaciski uzwojenia twornika „a”, zaciski uzwojenia wzbudzenia „f” i koniec wału (sprzęgło) „m”. Moc mechaniczna (dostarczana/obierana) P_m i moc elektryczna (odbierana/dostarczana) P_a ulegają przemianie elektromechanicznej za pośrednictwem pola magnetycznego – pola wytwarzanego uzwojeniem wzbudzenia. Energia pola magnetycznego jest energią wewnętrzną maszyny, gdyż przetwornik nie ma możliwości wymiany tej energii z otoczeniem.

Moc dostarczana do uzwojenia wzbudzenia ulega rozproszeniu – zamienia się na ciepło. W praktyce moc obwodu wzbudzenia jest dużo mniejsza niż obwodu twornika:

$$P_{an} \gg P_{fn} \quad (6.1)$$

$$\frac{P_{fn}}{P_{an}} 100 = 0,5 \div 6 \% \quad (6.2)$$

Zasada: im większa moc znamionowa MS, tym mniejsza wartość procentowa mocy wzbudzenia.

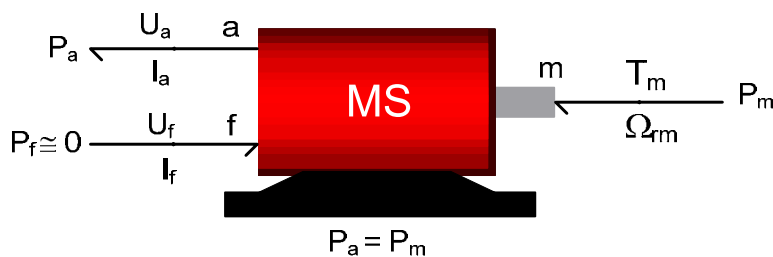


Rys. 6.12. Maszyna synchroniczna (praca prądnicowa) – trójwrotowy przetwornik elektromechaniczny: przepływ energii/mocy wg konwencji grafów wiązań; wrota układu mechanicznego „m” – dopływ energii mechanicznej przetwarzanej na energię elektryczną, wrota (zaciski) obwodu twornika „a” – odpływ energii elektrycznej, wrota obwodu magnesu (wzbudzenia) „f” – dopływ energii wzbudzenia



Rys. 6.13. Maszyna synchroniczna (praca silnikowa) – trójwrotowy przetwornik elektromechaniczny: przepływ energii/mocy wg konwencji grafów wiązań; wrota (zaciski) obwodu twornika „a” – dopływ energii elektrycznej przetwarzanej na energię mechaniczną, wrota układu mechanicznego „m” – odpływ energii mechanicznej, wrota obwodu magneśnicy (wzbudzenia) „f” – dopływ energii wzbudzenia

Skrajnym przypadkiem uproszczenia MS jest generator idealny – o pomijalnie małym poborze prądu koniecznego do wzbudzenia strumienia magnetycznego oraz o pomijalnych stratach mocy. Oznacza to, że moce po stronie mechanicznej P_m i twornika P_o są jednakowe – przetwarzanie energii odbywa się bez strat (sprawność wynosi 100%).



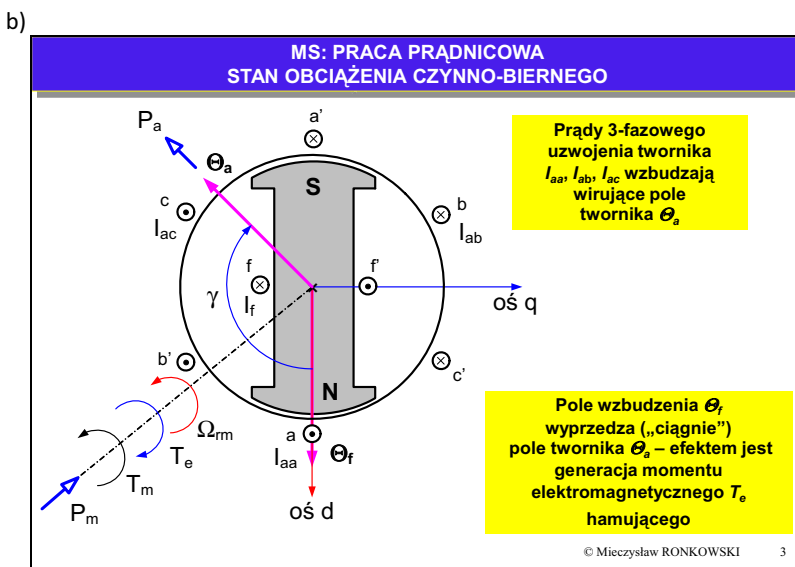
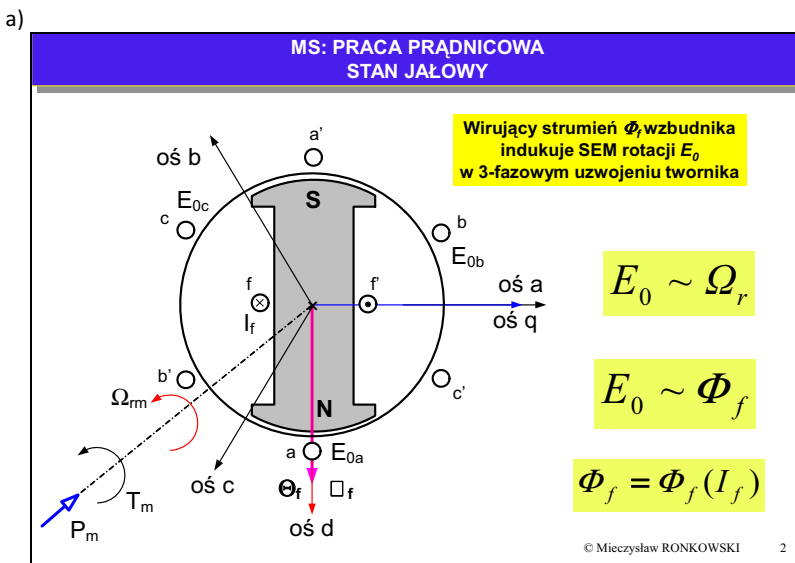
Rys. 6.14. Maszyna synchroniczna (praca prądnicowa) – model maszyny idealnej w konwencji grafów wiązań

Układ elektromechaniczny na rys. 6.15 przedstawia schematycznie uproszczoną strukturę elektromechaniczną 3-fazowej MS o wydatnobiegunowym wirniku wraz z ilustracją zasady jej działania. Do rozważań przyjęliśmy maszynę dwubiegunową ($p = 1$), wychodząc z założenia, że zjawiska elektromagnetyczne zachodzące w symetrycznej maszynie wielobiegunowej ($p > 1$) powtarzają się cyklicznie dla każdej kolejnej pary biegunów.

Uzwojenie twornika MS jest 3-fazowe i równomiernie rozmieszczone w żłobkach stojana. Osie magnetyczne poszczególnych faz a , b , c są względem siebie odpowiednio przesunięte w przestrzeni o kąt 120° (dla MS o liczbie par biegunów $p > 1$ kąt wynosi $120^\circ/p$). Uzwojenie wzbudzenia umieszczone jest na wirniku, a jego osie magnetyczne d i q przesunięte są względem siebie o kąt 90° (dla MS o liczbie par biegunów $p > 1$ kąt wynosi $90^\circ/p$).

Aby zachować czytelność rysunku, układ uzwojeń fazowych (pasm) maszyny zaznaczono szkicowo na rys. 6.15 obwodami $a-a'$, $b-b'$ oraz $c-c'$. Przy czym, litery a , b oraz c oznaczają umowne początki uzwojeń (pasm), a litery a' , b' oraz c' — umowne końce tych uzwojeń²⁾. Analogiczny sposób wyróżniania umownych początków i końców uzwojeń przyjęto dla wirnika (wzbudnika), odpowiednio f oraz f' .

²⁾ Przyjmujemy następującą konwencję: jeżeli wartość prądu twornika danej fazy uzwojenia jest dodatnia, to wtedy prąd dopływa do umownego początku tej fazy (widzimy ogon strzałki – znak „x”) a wypływa z umownego końca tej fazy (widzimy grot strzałki – znak „•”)



Rys. 6.15. Elementarna maszyna synchroniczna – budowa i ilustracja zasady działania: a) stan jałowy – wirujący strumień magnetyczny magnetycy Φ_f , b) ruch synchroniczny wirującego przepływu magnetycy Θ_f i twornika Θ_a

Uzwojenie wzbudzenia $f - f'$, zasilane prądem stałym, wzbudza pole magnetyczne — reprezentowane przez przepływ Θ_f ³⁾. Pole wzbudnika jest nieruchome względem układu elektromagnetycznego wirnika, ale ze względu na ruch obrotowy wirnika (wymuszony maszyną napędową) jest polem wirującym względem uzwojenia twornika (stojana).

³⁾ Przepływ i strumień są wielkościami skalarnymi, gdyż są wielkościami całkowitego pola magnetycznego. W naszych rozważaniach przyjmujemy reprezentację wektorową (kompleksorową) dla tych wielkości fizycznych pola magnetycznego, ale w aspekcie czysto matematycznym — nie fizycznym. Zastosowanie aparatu wektorowego ułatwi nam wyznaczanie wielkości wypadkowych pola maszyny synchronicznej, szczególnie w jej szczelnie roboczej.

Wyznaczenie modelu MS ograniczymy do przypadku maszyny z wirnikiem cylindrycznym – wirnikiem symetrycznym magnetycznie: reluktancja magnetyczna dla strumienia pola twornika jest praktycznie taka sama w osi q i osi d magneśnicy. Oznacza to, że dalsze rozważania będą dotyczyły turbogeneratora.

6.3.2. Stan jałowy i obciążenia

Wirujący strumień wzbudnika Φ_f indukuje SEM rotacji E_0 w poszczególnych fazach uzwojenia twornika. Załączenie obciążenia na zaciski twornika wymusza przepływ prądów 3-fazowych (I_{aa} , I_{ab} , I_{ac}) w uzwojeniach, które wzbudzają pole magnetyczne reprezentowane przez wirujący przepływ twornika Θ_a . Pole twornika (skutek) oddziałuje na pole magneśnicy (przyczynę) – zjawisko to nazywamy **oddziaływaniem/reakcją twornika**. Zjawisko to jest charakterystyczne dla MS i ma istotny wpływ na charakterystyki ruchowe maszyny. Stąd ważne jest zrozumienie aspektów fizycznych – relacji przestrzenno-czasowych – tego zjawiska dla różnych stanów obciążenia/pracy MS. Zjawisko to będziemy analizować w dalszej części naszych rozważań dotyczących modelu fizycznego MS.

Zgodnie z zasadą: akcji towarzyszy równa i przeciwnie skierowana reakcja – pole twornika powinno być lustrzanym odbiciem pola wzbudzenia. Konsekwencją tego jest wirujący ruch synchroniczny wektorów przepływów Θ_f i Θ_a – oba przepływy są względem siebie nieruchome, a ich wzajemne położenie zależy od stanu pracy maszyny synchronicznej. W dalszych rozważaniach wykazemy, że wektory przepływów Θ_f i Θ_a są praktycznie równe co do modułu i przeciwnie skierowane w przypadku stanu zwarcia maszyny synchronicznej. Natomiast dla stanu obciążenia maszyny wektory obu przepływów zmieniają położenie względem siebie, które zależy od charakteru obciążenia (przykładowe położenie dla obciążenia czynno-biernego/indukcyjnego ilustruje rys. 6.15b). Powstaje pewien przepływ wypadkowy w maszynie, który jest warunkiem wytwarzania użytecznego momentu obrotowego – elektromechanicznego przetwarzania energii.

Miarą wzajemnego położenia wektorów przepływów Θ_f i Θ_a jest kąt γ – nazywanym **kątem momentu**, gdyż moment elektromagnetyczny jest funkcją tego kąta. Można łatwo wykazać, że dla pewnych wartości charakterystycznych tego kąta ($\gamma=0$ lub $\gamma=\pi$) moment elektromagnetyczny jest równy zero – prądy płyną w uzwojeniach maszyny, a mimo to nie generuje ona momentu obrotowego. Cecha ta jest szczególną cechą maszyny synchronicznej⁴⁾.

Wzbudzanie wirującego przepływu pola twornika Θ_a w MS związane jest z metodą elektromagnetyczną wzbudzania pola wirującego przez nieruchome uzwojenie wielofazowe. Warunki wytwarzania pola wirującego, w szczególności pola kołowego i związane z tym zależności analityczne podano w literaturze przedmiotu [21, 35, 40, 50].

Uwaga: Zasadą pracy ustalonej maszyny synchronicznej jest ruch synchroniczny pola twornika Θ_a i pola wzbudnika Θ_f – ruch synchroniczny obu pól oznacza, że pola są nieruchome względem siebie.

Wzajemne położenie pól (wektorów pól) zależy od charakteru pracy MS (prądnica lub silnik) oraz od charakteru obciążenia (czynne, czynno-indukcyjne, czynno-pojemnościowe).

Ruch synchroniczny jest warunkiem generacji użytecznej mocy elektrycznej – użytecznego momentu elektromagnetycznego.

⁴⁾ Do wyjaśnienia tego efektu można się posłużyć następującym analogiem: układem dwóch magnesów trwałych umieszczonych koncentrycznie względem siebie. Naturalnym stanem układu jest stan, kiedy osie magnetyczne obu magnesów się pokrywają: nastąpi sparowanie biegunów – S-N (stojan-wirnik) oraz N-S (wirnik-stojan). Efektem przesunięcia osi magnetycznych jest generacja momentu T_e przeciwnie skierowanego do wzrostu kąta γ . Analogiem mechanicznym tego układu jest wirnik połączony z sprężyną spiralną.

Prędkość obrotowa wirnika określa częstotliwość napięcia indukowanego (SEM rotacji E_0) na zaciskach uzwojenia twornika:

$$f_e = \frac{p\Omega_{rm}}{2\pi} \quad \text{lub} \quad f_e = \frac{\Omega_r}{2\pi} \quad (6.3)$$

$$f_e = \frac{pn_s}{60} \quad (6.4)$$

gdzie: Ω_{rm} – prędkość kątowna mechaniczna wirnika (nazywana także prędkością synchroniczną) mierzona w [rad mechaniczne/s];

Ω_r – prędkość kątowna elektryczna wirnika mierzona w [rad elektryczne/s]⁵⁾, przy czym zachodzi relacja $\Omega_r = p\Omega_{rm}$;

n_s – prędkość obrotowa mechaniczna wirnika (nazywana także prędkością synchroniczną) [obr/min];

p – liczba par biegunów.

Na podstawie prawa Faraday'a wyznaczamy zależności na SEM indukowaną strumieniem wirującym głównym (magnesującym) magniesnicy Φ_{mf} (w strumieniu wzbudzenia Φ_f wyróżniamy strumień rozproszenia Φ_{of} i strumień główny Φ_{mf}). Tok rozumowania i zależności analityczne podajemy w załączniku do e-skryptu.

Zależność na SEM indukowaną (wartość skuteczna) w uzwojeniu twornika MS jest następująca:

$$E_0 = 4,44 \Phi_{mf} f_e z_a k_{ua} \quad (6.5)$$

gdzie: z_a – liczba zwojów na fazę uzwojenia twornika;

k_{ua} – współczynnik uzwojenia twornika (uwzględnia równomierne rozłożenie uzwojenia w żłobkach stojana – średnia wartość $k_{ua} = 0,96$).

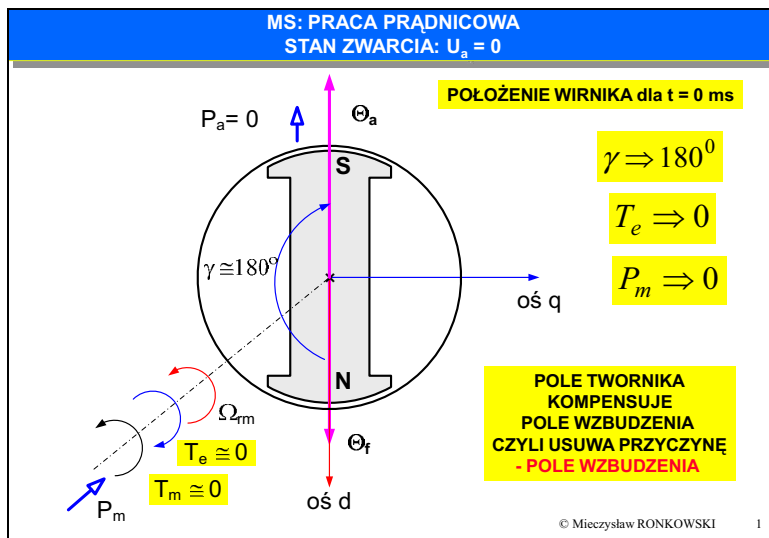
Zależność (6.5) jest analogiczna do zależności na SEM dla transformatora (z pominięciem współczynnika k_{ua}) – podobieństwo jest czysto formalne. Zauważmy, że w zależności dla transformatora wielkość f_e to częstotliwość ruchu elektrycznego, natomiast w przypadku MS – f_e to częstotliwość ruchu mechanicznego.

Uwaga: SEM rotacji E_0 jest wielkością elektromechaniczną – efekt obrotowego ruchu mechanicznego pola magniesnicy Φ_f , które jest wzbudzone elektromagnetycznie prądem I_f i wprowadzane w ruch obrotowy mechanicznie z prędkością kątowną Ω_{rm} .
Częstotliwość f_e SEM rotacji E_0 określa rów. (6.3) lub (6.4).

⁵⁾ Szybkość zmiany kąta w radianach elektrycznych jest p razy większa niż zmiany kąta w radianach mechanicznych ($\theta_e = p\theta_m$ – w przypadku maszyny z liczbą par biegunów $p = 1$ oba kąty są równe). Modele obwodowe maszyn elektrycznych zwykle budujemy dla maszyn dwubiegunowych ($p = 1$), wychodząc z założenia, że zjawiska elektromagnetyczne zachodzące w symetrycznej maszynie wielobiegunowej ($p > 1$) powtarzają się cyklicznie dla każdej kolejnej pary biegunów. Posługujemy się wtedy prędkością kątowną elektryczną wirnika.

6.3.3. Stan zwarcia

Na rysunkach 6.16 i 6.17 przedstawiono prace prądnicową MS w stanie zwarcia.



Rys. 6.16. Maszyna synchroniczna – praca prądnicowa w stanie zwarcia: położenie wektorów przepływów magnetyczny i twornika oraz położenie kątowe wirnika dla $t = 0$

Dokonyjemy podziału strumieni twornik i magnetyczny na dwie składowe: strumień rozproszenia (indeks σ) i główny/magnesowania (indeks m) – ilustruje to rys. 6.17.

Strumień reakcji twornika, analogicznie do strumienia magnetyczny, indukuje SEM rotacji w poszczególnych fazach uzwojeniach twornika:

$$\Phi_{ma} \Rightarrow E_{ma} \quad (6.6)$$

$$\Phi_{\sigma a} \Rightarrow E_{\sigma a} \quad (6.7)$$

przy czym sumaryczna SEM rotacji indukowana w uzwojeniu twornika

$$E_{\sigma a} + E_{ma} = E_a \quad (6.8)$$

Równanie równowagi obwodu twornik (dla jednej fazy) w stanie zwarcia:

- dla wartości chwilowych

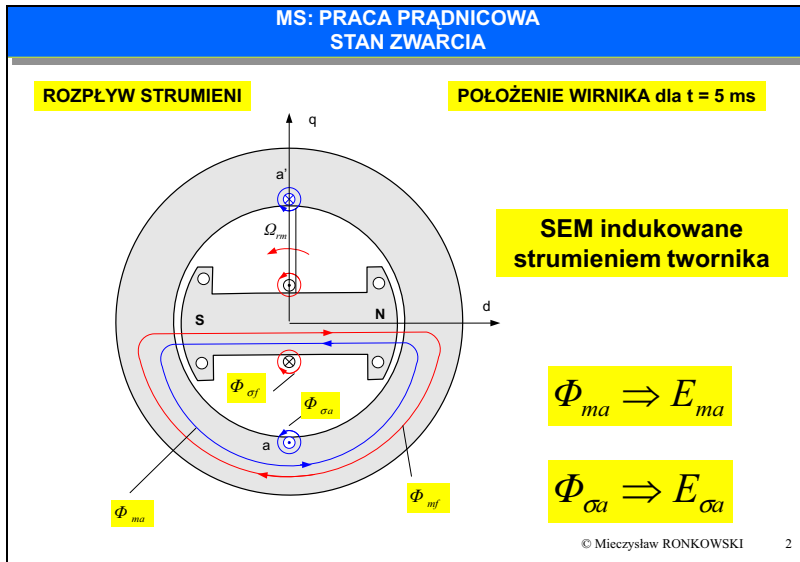
$$e_0 + e_a + R_a i_{az} = 0 \quad (6.9)$$

- dla wartości zespolonych

$$\underline{E}_0 + \underline{E}_a + R_a \underline{I}_{az} = 0 \quad (6.10)$$

Wprowadzamy koncepcję reaktancji synchronicznej (rozważamy przypadek turbogenerators) ⁶⁾.

⁶⁾ Rozważania ograniczamy do turbogenerators, stąd posługujemy się tylko jedną reaktancją: wartości reaktancji dla obu osi q i d są praktycznie takie same. W przypadku hydrogenerators należy posłużyć się reaktancjami dla obu osi q i d . Jest to przypadek znacznie trudniejszy do rozważenia – metodę ich wyznaczenia podano w literaturze przedmiotu [6, 22, 35, 40, 51].



Rys. 6.17. Maszyna synchroniczna - praca prądnicowa, stan zwarcia: rozpływ strumieni, położenie kątowe wirnika dla $t = 5$ ms

Zakładamy następujące relacje liniowe:

$$\Phi_{ma} \sim I_a \quad E_{ma} \sim I_a \quad E_{ma} = X_{ma} I_a \quad (6.11)$$

$$\Phi_{\sigma a} \sim I_a \quad E_{\sigma a} \sim I_a \quad E_{\sigma a} = X_{\sigma a} I_a \quad (6.12)$$

gdzie: $X_{\sigma a}$ – reaktancja rozproszenia uzwojenia twornika,
 X_{ma} – reaktancja oddziaływania (magnesowania) uzwojenia twornika.

Uwaga: Reaktancje $X_{\sigma a}$ oraz X_{ma} odwzorowują odpowiednio wpływ strumienia rozproszenia oraz strumienia oddziaływania twornika na właściwości maszyny synchronicznej.

Uwzględniając zależność (6.8), rów. (6.11) i (6.12) przekształcamy do postaci:

$$E_a = (X_{\sigma a} + X_{ma}) I_a \quad (6.13)$$

$$E_a = X_s I_a \quad (6.14)$$

gdzie, reaktancja sumaryczna $X_s = X_{\sigma a} + X_{ma}$ nazywa się **reaktancją synchroniczną**. Reaktancja synchroniczna jest parametrem charakterystycznym maszyny synchronicznej.

Uwzględniając zależność (6.14), równanie równowagi stanu zwarcia (6.10) przyjmie postać:

$$\underline{E}_0 + jX_s \underline{I}_{az} + R_a \underline{I}_{az} = 0 \quad (6.15)$$

Uwaga: W praktyce $X_s \gg R_a$

Zatem, równanie (6.15) możemy uprościć do postaci:

$$\underline{E}_0 + jX_s \underline{I}_{az} \cong 0 \quad (6.16)$$

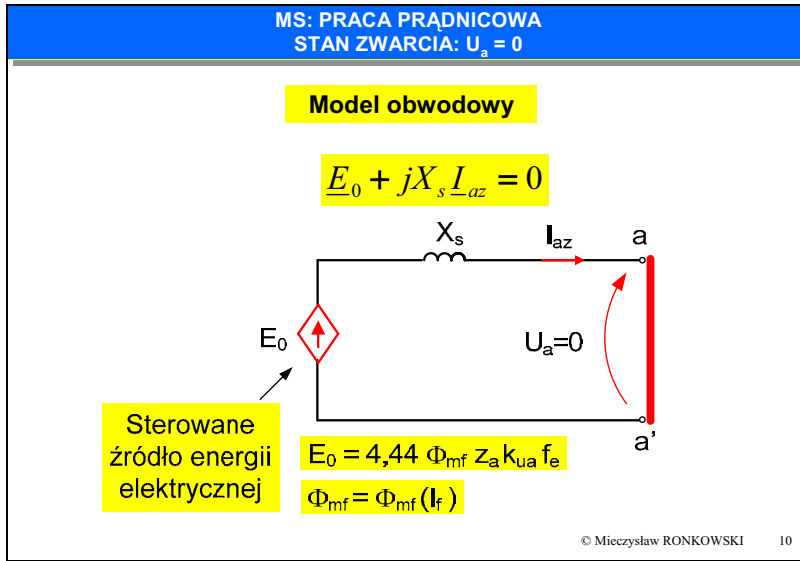
Wskutek silnie rozmagnezującego działania pola twornika, prąd zwarcia maszyny synchronicznej osiąga wartości zbliżone do prądu znamionowego maszyny:

$$\underline{I}_{az} \cong \underline{I}_{an} \quad (6.17)$$

Równanie (6.16), tzn.:

$$\underline{E}_0 + jX_s \underline{I}_{az} = 0 \quad (6.18)$$

przedstawia uproszczony model obwodowy maszyny synchronicznej w stanie zwarcia. Graficzne odwzorowanie tego równania pokazano na rys. 6.18. SEM rotacji E_0 odwzorowujemy źródłem napięciowym sterowanym, tzn. zależnym od prądu wzbudzenia I_f i częstotliwości f_e .



Rys. 6.18. Model obwodowy maszyny synchronicznej/turbogeneratora w stanie zwarcia

Uwaga: SEM rotacji E_0 maszyny synchronicznej jest wielkością elektromechaniczną, gdyż zależy od wielkości elektrycznej – prądu wzbudzenia I_f , oraz wielkości mechanicznej – prędkości kątowej wirnika Ω_{rm} (równanie (6.3)).

W praktyce posługujemy się wartościami względnymi reaktancji synchronicznej – odnosimy jej wartość w $[\Omega]$ do tzw. „impedancji znamionowej” (wielkości fikcyjnej):

$$Z_n \stackrel{\text{def}}{=} \frac{U_{afn}}{I_{afn}} \quad (6.19)$$

Zatem wartość reaktancji synchronicznej w jednostkach względnych [%] wyznaczamy z zależności:

$$X_{s\%} = \frac{X_s [\Omega]}{Z_n [\Omega]} 100 \quad (6.20)$$

W praktyce dla turbogeneratora reaktancja synchroniczna przyjmuje wartości:

$$X_{s\%} = (110 \div 180)\% \quad (6.21)$$

Wartości reaktancji synchronicznej wyznaczamy metodą jednoczesnego pomiaru:

- charakterystyki stanu jałowego [47, 52],
- charakterystyki stanu zwarcia [47, 52].

Postępując się uproszczonym modelem obwodowym turbogeneratora, (rys. 6.18) otrzymamy:

$$X_s \cong \frac{E_0}{I_{az}} \quad (6.22)$$

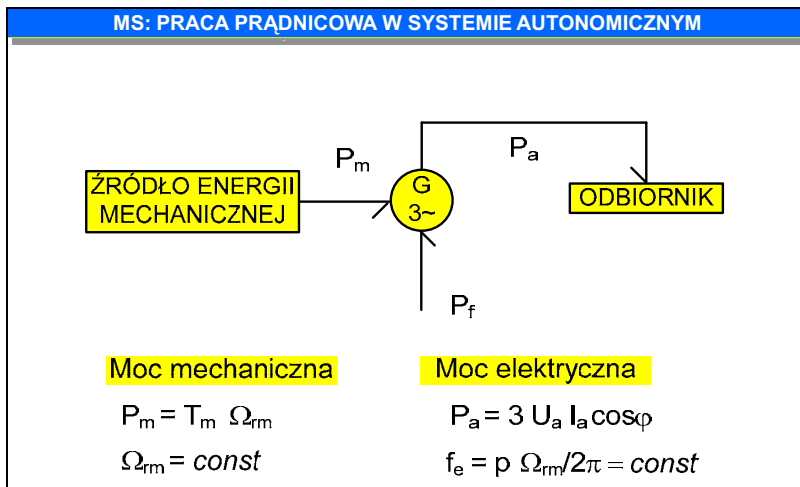
Uwaga: Postępując się równaniem (6.22) należy mieć na uwadze zjawisko nasycenia obwodu magnetycznego maszyny synchronicznej, które powoduje na nieliniową zależność $X_s = X_s(I_f)$. W praktyce postępujemy się odpowiednio wartościami nasyconymi i nienasyconymi reaktancji synchronicznej.

Postępując się uproszczonym modelem obwodowym (rys. 6.18) maszyny synchronicznej, będziemy analizować jej właściwości podczas pracy prądnicowej – dostarczającej energię elektryczną.

Rozważymy dwa charakterystyczne warunki pracy prądnicowej maszyny synchronicznej: praca w **systemie autonomicznym** i w **systemie energetycznym**. W pierwszym przypadku system ma cechy sieć elastycznej – miękkiej: wartości napięcia i częstotliwości mogą podlegać stosunkowo dużym wahaniom i w konsekwencji maszyna „czuje się bardziej swobodnie”. Natomiast w drugim przypadku wartości napięcia i częstotliwości są narzucone przez system – są sztywne i maszyna „musi się podporządkować systemowi”⁷⁾. Tak odmienne warunki pracy mają istotny wpływ na charakterystyki ruchowe maszyny synchronicznej.

6.4. Praca generatorowa w systemie autonomicznym/w sieci elastycznej

Schemat blokowy na rys. 6.19 ilustruje MS pracującą w systemie autonomicznym.



Rys. 6.19. Schemat blokowy systemu autonomicznego z MS obciążoną odbiornikiem indywidualnym

Na rysunku 6.20 przedstawiono model obwodowy systemu autonomicznego z MS obciążoną odbiornikiem indywidualnym. Interesują nas następujące charakterystyki przy $\Omega_{rm} = const$:

charakterystyka zewnętrzna

$$U_a = U_a(I_a) \quad \text{przy} \quad I_f = const. \quad \cos \varphi = const.$$

charakterystyka regulacyjna

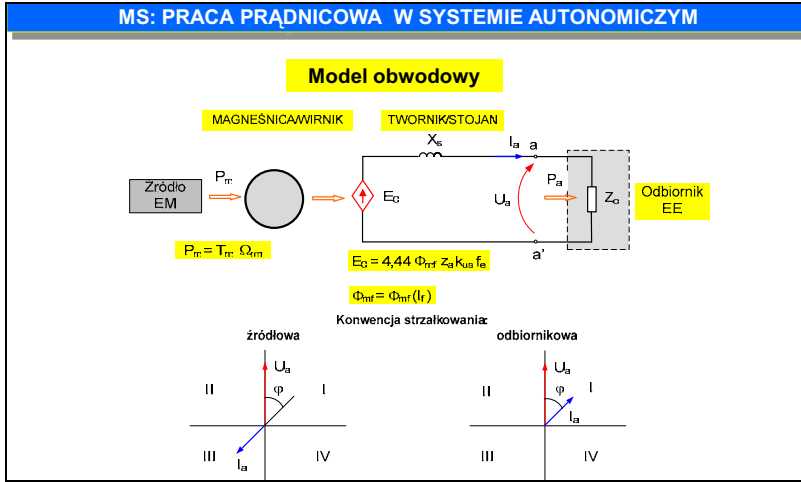
$$I_f = I_f(I_a) \quad \text{przy} \quad U_a = const. \quad \cos \varphi = const.$$

⁷⁾ śp. prof. Kołek mawiał obrazowo w czasie swoich wykładów o maszynach synchronicznych: *maszyna synchroniczna jest trzymana za „pysk” po włączeniu jej do systemu energetycznego.*

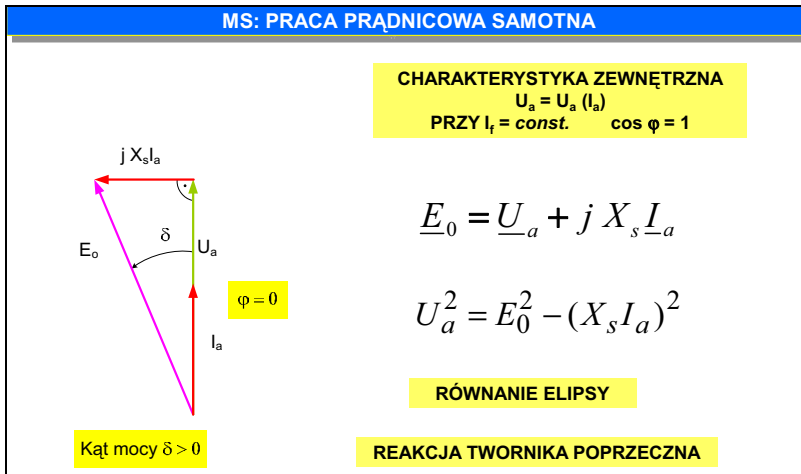
zmiennosc napięcia

$$\Delta U_{\%} = 100 (U_{a0} - U_a) / U_{a0} \quad \text{przy} \quad I_f = \text{const.} \quad \text{oraz} \quad \cos \varphi = \text{const.}$$

Do wyznaczenia powyższych charakterystyk, posłużymy się odpowiednimi wykresami fazowymi sporządzonym w oparciu o model obwodowy MS (rys. 6.20).



Rys. 6.20. Model obwodowy systemu autonomicznego z MS obciążoną odbiornikiem indywidualnym



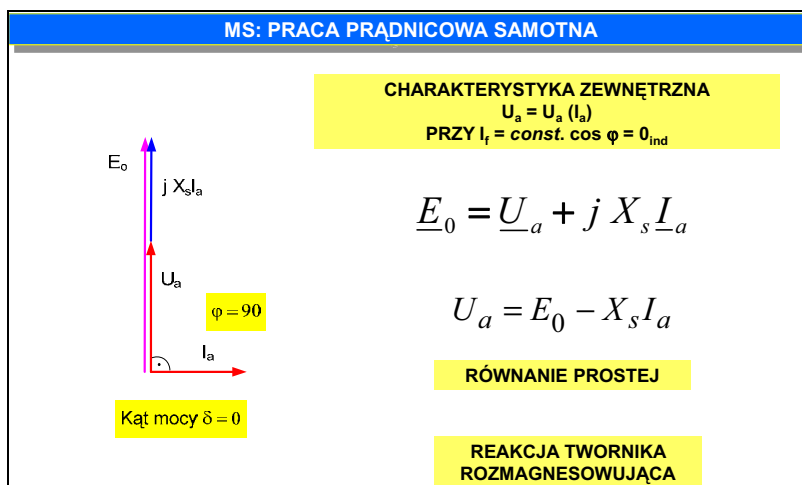
Rys. 6.21. Charakterystyka zewnętrzna MS: $U_a = U_a(I_a)$ przy $I_f = \text{const.}$ $\cos \varphi = 1$ (przyjęto konwencję strzałkowania odbiornikową)

Na rysunku 6.21–6.23 przedstawiamy wykresy fazowe MS dla charakterystycznych obciążeń: czynnego, indukcyjnego i pojemnościowego. Na podstawie wykresów fazowych zapisujemy następujące równania:

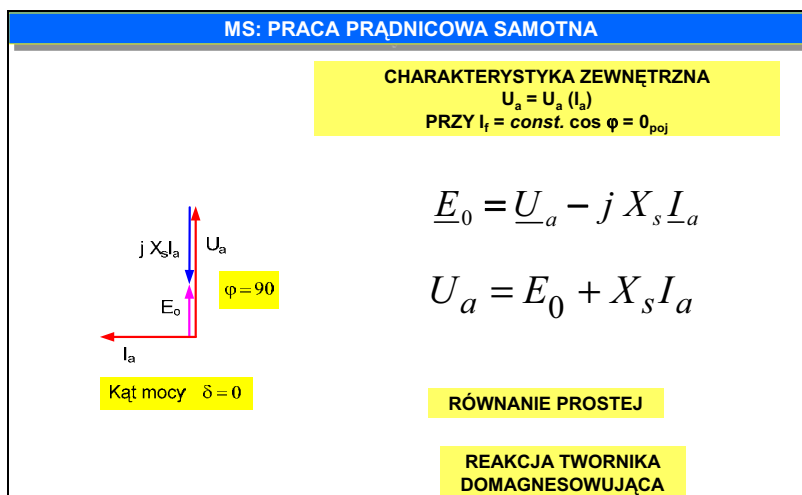
$$\underline{E}_0 = \underline{U}_a + j X_s \underline{I}_a \quad (6.23)$$

$$U_a^2 = E_0^2 - (X_s I_a)^2 \quad (6.24)$$

Wzór opisuje równanie elipsy. Dla tego charakteru obciążenia występuje reakcja twornika poprzeczna – efektem jest obniżenie napięcia na zaciskach twornika.



Rys. 6.22. Charakterystyka zewnętrzna MS: $U_a = U_a(I_a)$ przy $I_f = \text{const.} \cos \varphi = 0_{\text{ind}}$.
(przyjęto konwencję strzałkowania odbiornikową)



Rys. 6.23. Charakterystyka zewnętrzna $U_a = U_a(I_a)$ przy $I_f = \text{const.} \cos \varphi = 0_{\text{poj}}$.
(przyjęto konwencję strzałkowania odbiornikową)

$$U_a = E_0 - X_s I_a \quad (6.25)$$

Wzór opisuje równanie prostej. Dla tego charakteru obciążenia występuje reakcja twornika podłużna rozmagnesowująca – efektem jest znaczne obniżenie napięcia na zaciskach twornika.

$$\underline{E}_0 = \underline{U}_a - j X_s \underline{I}_a \quad (6.26)$$

$$U_a = E_0 + X_s I_a \quad (6.27)$$

Wzór opisuje równanie prostej. Dla tego charakteru obciążenia występuje reakcja twornika podłużna domagnesowująca – efektem jest wzrost napięcia na zaciskach twornika.

6.5. Praca generatorowa w systemie energetycznym/w sieci sztywnej

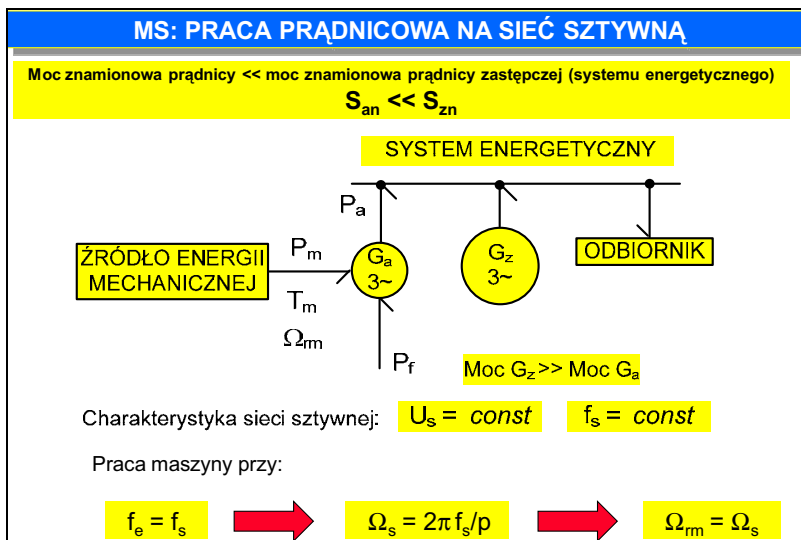
Schemat blokowy na rys. 6.24 ilustruje układ z MS pracującą w systemie energetycznym (SE). Włączenie MS do SE wymaga przeprowadzenia procesu synchronizacji maszyny z siecią systemu energetycznego. Interesują nas następujące charakterystyki ruchowe:

- rozptywu mocy czynnej i biernej,
- kątowna.

Do wyznaczenia powyższych charakterystyk posłużymy się odpowiednimi wykresami fazorowymi, sporządzonym w oparciu o model obwodowy MS.

6.5.1. Synchronizacja z siecią systemu

Włączenie MS do pracy w systemie energetycznym wymaga przeprowadzenia synchronizacji.

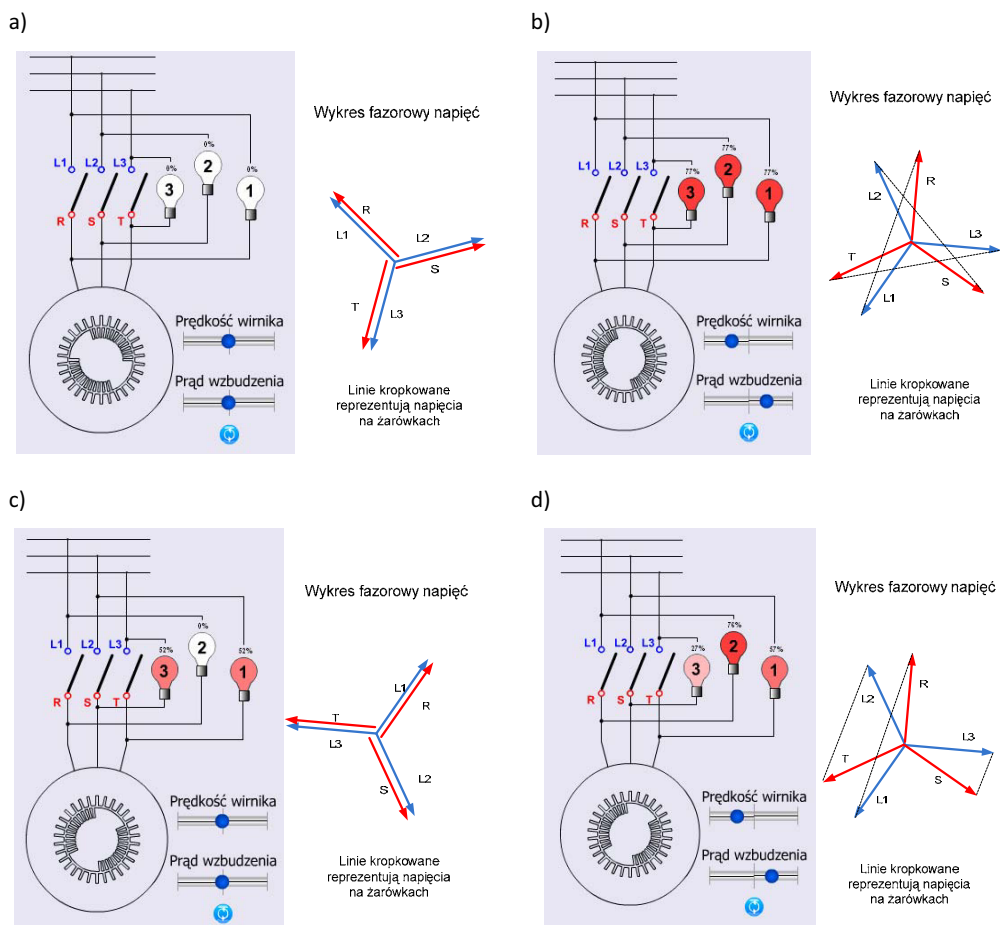


Rys. 6.24. Schemat blokowy MS pracującej w systemie energetycznym

Przeprowadzenie synchronizacji wymaga spełnienia następujących warunków:

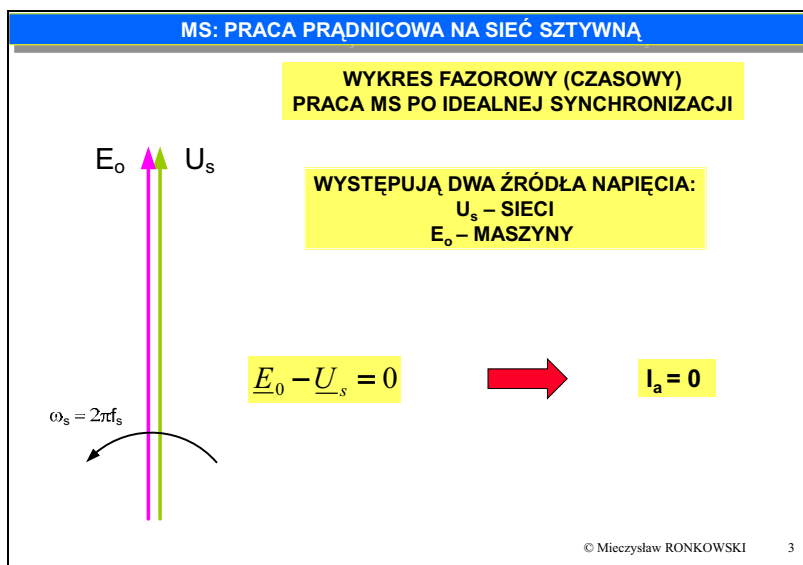
- 1) kolejność faz napięć prądnicy i sieci musi być taka sama,
- 2) wartości skuteczne napięć sieci i prądnicy powinny być jednakowe,
- 3) częstotliwość napięć prądnicy i sieci musi być jednakowa,
- 4) odpowiadające sobie napięcia prądnicy i sieci (napięcia na tych samych biegunach wyłącznika) powinny być ze sobą w fazie.

Na rysunku 6.25 przedstawiono metodę synchronizacji z zastosowaniem układu żarówek ze światłem pulsującym (a, b) i wirującym (c, d).



Rys. 6.25. Metody synchronizacji: a) i b) układ żarówek ze światłem pulsującym, c) i d) układ żarówek ze światłem wirującym [65] – a) i c) warunki synchronizacji są spełnione, b) i d) warunki synchronizacji 2), 3) i 4) nie są spełnione,

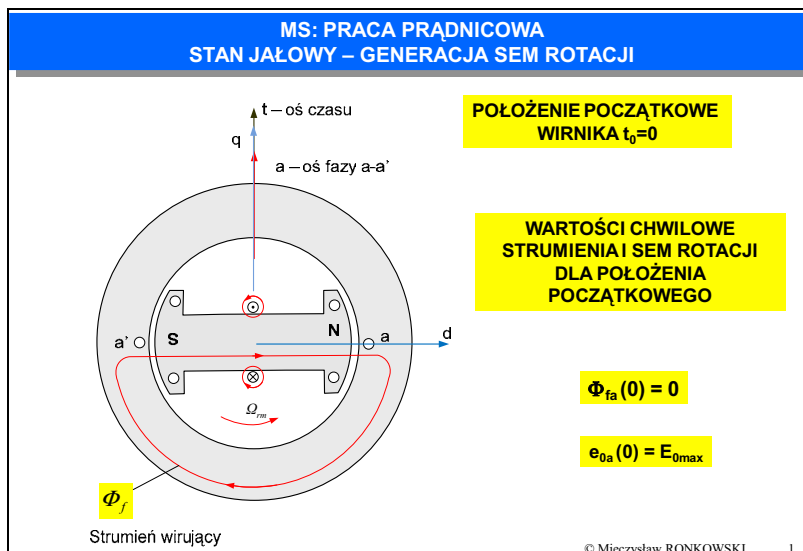
Po włączeniu MS do systemu w układzie przedstawionym na rys. 6.24 występują dwa źródła napięcia: U_s – napięcie sieci i E_o – SEM rotacji maszyny synchronicznej. W przypadku idealnej synchronizacji $\underline{E}_o - \underline{U}_s = 0$, zatem wartość prądu twornika $I_a = 0$ (ilustruje to wykres wskazowy na rys. 6.26).



Rys. 6.26. Stan pracy MS po przeprowadzeniu idealnej synchronizacji – wykres fazorowy (czasowy)

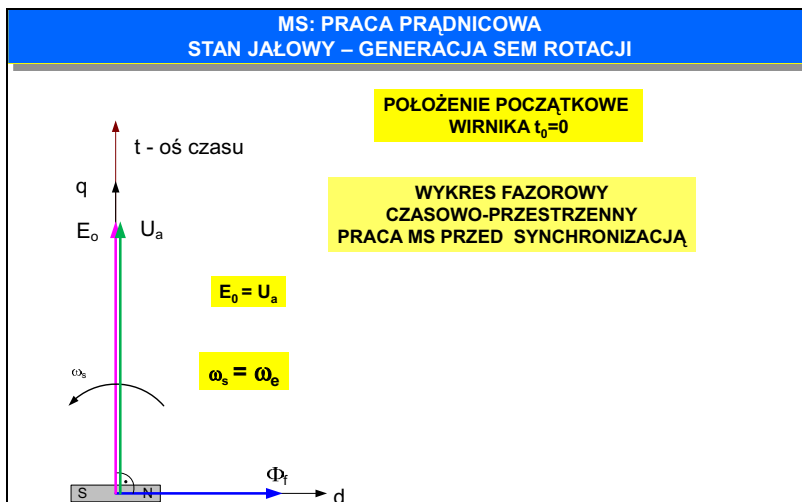
6.5.2. Stan obciążenia – charakterystyki ruchowe (regulacja mocy czynnej i biernej)

Na rysunku 6.27 przedstawiono pracę prądnicową MS w stanie jałowym.



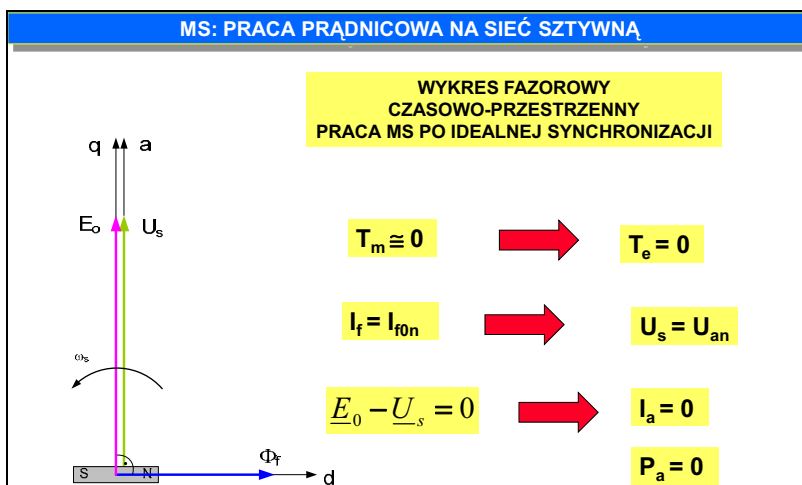
Rys. 6.27. Stan pracy MS przed synchronizacją – rozpyły strumienia wzbudzenia i generacja SEM rotacji E_0 na rysunku celem uproszczenia rozważań, przyjęto całkowity strumień wzbudzenia Φ_r

Na rysunku 6.28 przedstawiono wykres fazorowy MS przed synchronizacją, odpowiadający położeniu wirnika pokazanemu narys. 6.27.



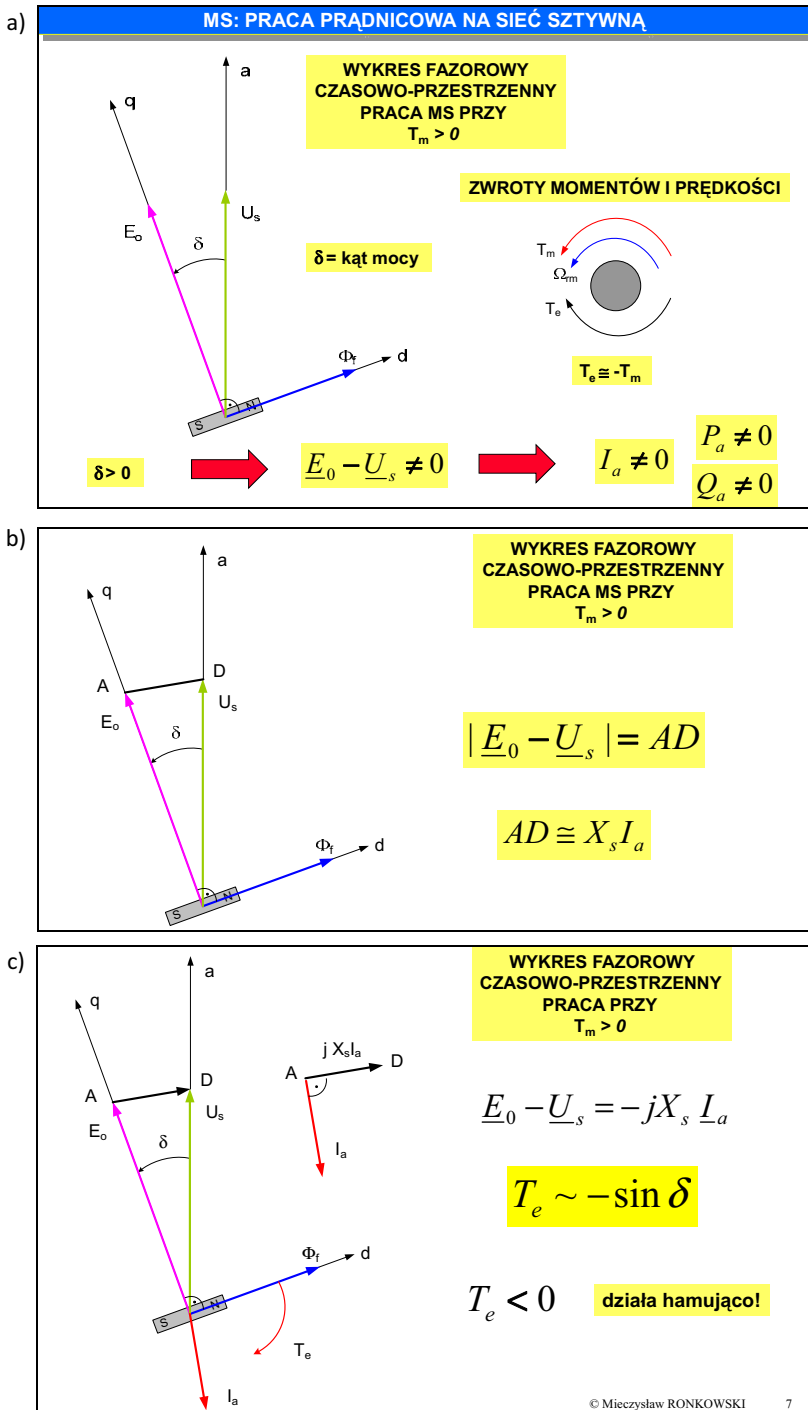
Rys. 6.28. Stan pracy MS przed synchronizacją

Na rysunku 6.29 przedstawiono wykres fazorowy pracy MS po idealnej synchronizacji.



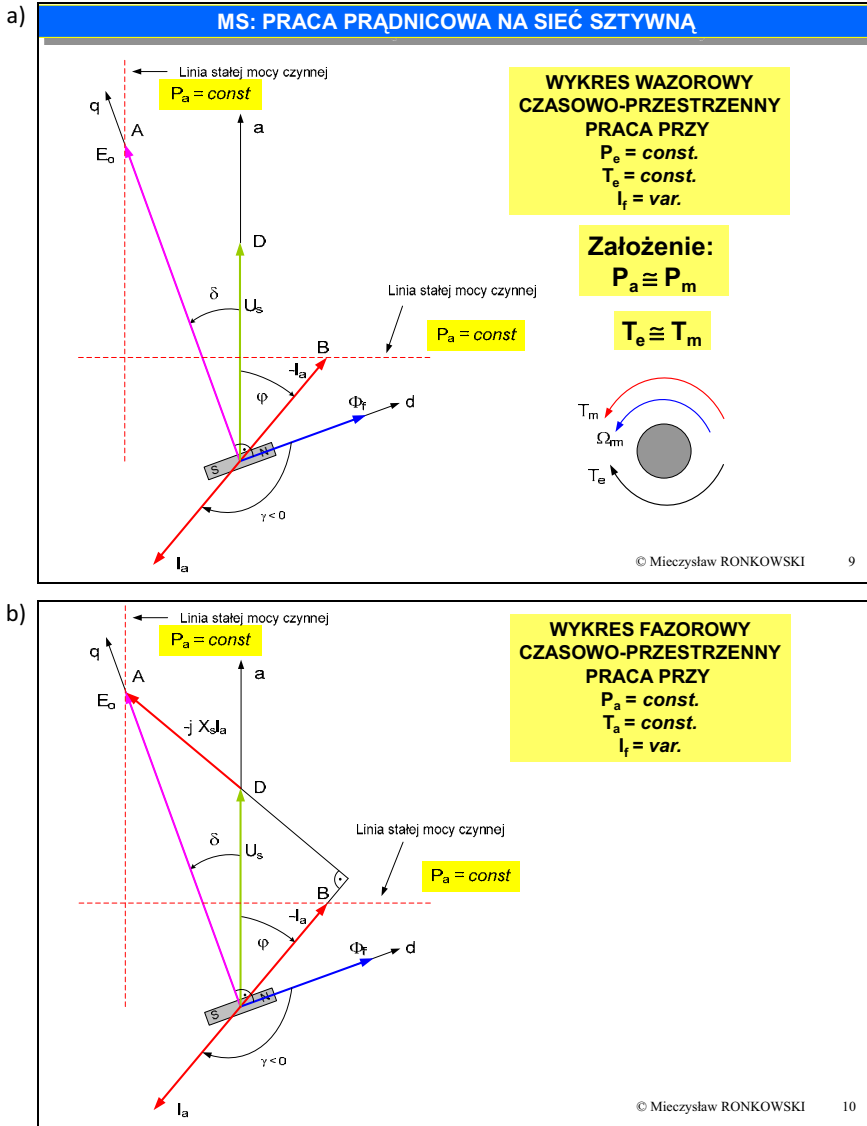
Rys. 6.29. Stan pracy MS po idealnej synchronizacji

Na rysunku 6.30 przedstawiono wykresy fazorowe pracy MS po zwiększonym momencie napędowym ($T_m > 0$) – przyjęto konwencję strzałkowania źródłową.



Rys. 6.30. Stan pracy MS po idealnej synchronizacji i przy zwiększonym momencie napędowym ($T_m > 0$) a) rozchylenie fazy napięć w skutek przemieszczenia kąтового wirnika – zwiększenie momentu napędowego, b) różnica napięć (SEM E_0 i U_s) – równa spadkowi napięcia na reaktancji synchronicznej – wymusza przepływ prądu twornika I_a i generację momentu T_e , c) zwrot momentu T_e jest przeciwnie skierowany do wzrostu kąta mocy δ

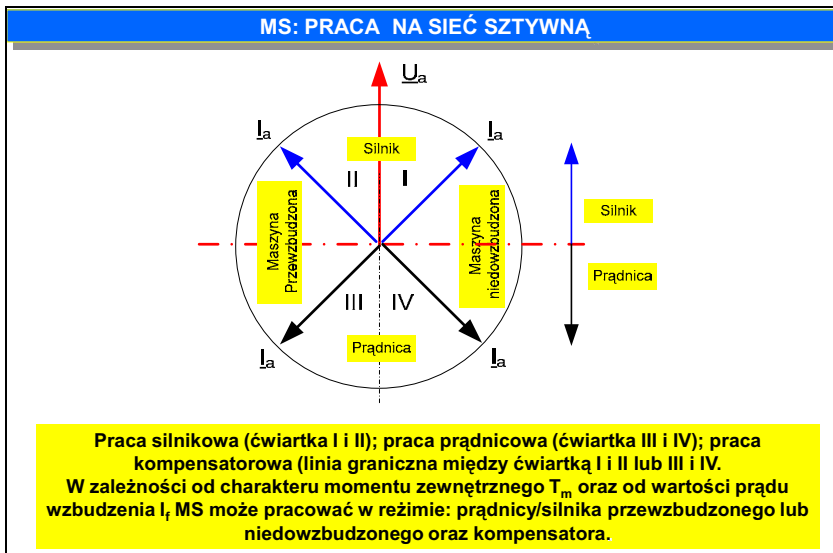
Na rysunku 6.31 przedstawiono wykresy fazorowe pracy MS przy $P_e = \text{const.}$ ($T_e = \text{const.}$) i $I_f = \text{var}$ – przyjęto konwencję strzałkowania źródłową.



Rys. 6.31. Praca MS przy $P_e = \text{const.}$ ($T_e = \text{const.}$) i $I_f = \text{var.}$:

a) wykreślenie położenia linii stałej mocy czynnej, b) kompletny wykres fazorowy (czasowo-przestrzenny)

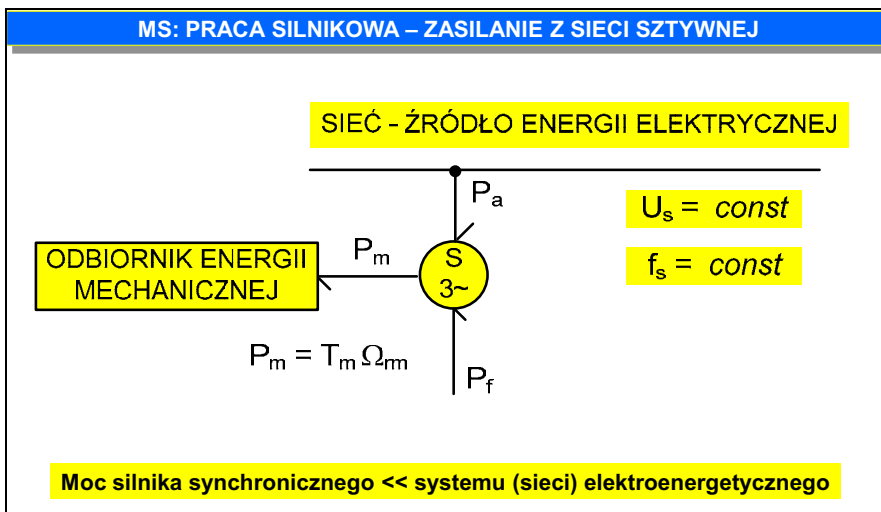
W zależności od charakteru momentu zewnętrznego T_m (napędzający albo hamujący) oraz od wartości prądu wzbudzenia I_f MS może pracować jako prądnica bądź silnik, odpowiednio w stanie przewzbudzone lub niedowzbudzone (rys. 6.32). Może także pracować jako kompensator w przypadku braku przepływu mocy czynnej między maszyną a systemem energetycznym.



Rys. 6.32. Stany pracy MS: praca silnikowa, praca prądnicowa i praca kompensatorowa

6.6. Praca silnikowa maszyny synchronicznej – silnik synchroniczny

Zgodnie z zasadą pracy odwracanej MS może pracować jako silnik – schemat blokowy maszyny pracującej w układzie napędowym pokazujemy na rys. 6.33.



Rys. 6.33. Maszyna synchroniczna - praca silnikowa: zasilanie z sieci sztywnej

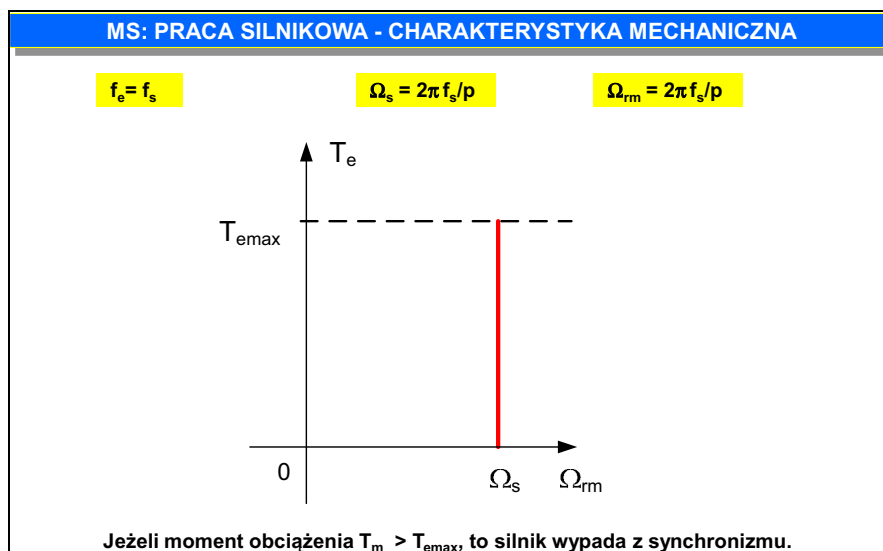
Z powodu braku momentu rozruchowego silnika synchronicznego nie możemy bezpośrednio włączyć do sieci. Rozruch silnika synchronicznego możemy przeprowadzić następującymi metodami: silnikiem pomocniczym wprawiamy w ruch obrotowy silniki synchroniczny i przeprowadzamy synchronizację z siecią; przeprowadzamy rozruch asynchroniczny silnika synchronicznego – wymagana jest klatka rozruchowa na wirniku; przeprowadzamy rozruch częstotliwościowy z zastosowaniem przemiennika częstotliwości – układu energoelektronicznego.

Zaletą silnika synchronicznego jest praca przy prędkości $\Omega_{rm} = \text{const.}$ w warunkach zmiennego momentu obciążenia $T_m = \text{var.}$

Interesującymi charakterystykami ruchowymi silnika synchronicznego są:

- charakterystyka mechaniczna – zależność $T_e = T_e(\Omega_{rm})$,
- charakterystyka kątowna – zależność $T_e = T_e(\delta)$ lub $P_m = P_m(\delta)$,
- charakterystyka „V” (krzywe Mordey’a) – zależność $I_a = I_a(I_f)$ przy $P_a = \text{const.}$

Kształt charakterystyki mechanicznej (rys. 6.34) wynika bezpośrednio z zasady działania silnika synchronicznego. Natomiast do wyznaczenia pozostałych charakterystyk konieczne są wyprowadzenia odpowiednich zależności w oparciu o wykresy fazorowe (czasowo-przestrzenne). Odpowiednie wyprowadzenia, dotyczące maszyny synchronicznej w ogólności, dostępne są w literaturze przedmiotu [21, 35, 40, 50, 53].



Rys. 6.34. Silnik synchroniczny: charakterystyka mechaniczna

Uwaga: Jeżeli moment obciążenia $T_m > T_{emax}$, to silnik synchroniczny wypada z synchronizmu (rys. 6.34).

Równanie momentu elektromagnetycznego maszyny synchronicznej z wirnikiem cylindrycznym – charakterystyki kątownej – opisujemy zależnością:

$$T_e = -m \frac{U_s E_0}{\Omega_s X_s} \sin \delta \quad (6.28)$$

gdzie: m – liczba faz uzwojenia twornika,
 U_s – napięcie zasilania twornika (wartość fazowa),
 E_0 – SEM rotacji (wartość fazowa),
 X_s – reaktancja synchroniczna,
 δ – kąt mocy.

Znak „-” we wzorze (6.28) oznacza, że moment elektromagnetyczny rozwijany przez maszynę synchroniczną przeciwdziała wzrostowi kąta mocy δ .

Dla małych kątów δ [rad] zachodzi tożsamość $\sin \delta \cong \delta$, zatem moment elektromagnetyczny $T_e \sim -\delta$. O takim typie momentu mówimy, że jest **momentem synchronicznym**⁸⁾. Z teorii drgań wyni-

⁸⁾ W przypadku silnika prądu stałego, ze względu na zależność $T_e = k_T \Phi I_a$, zachodzi $T_e \sim I_a$. Taki typ momentu nazywamy **momentem magnetoelektrycznym**.

ka, że system, w którym siła jest proporcjonalna do zmiany współrzędnej położenia i przeciwnie skierowana do wymuszenia, ma cechy systemu oscylacyjnego – w przypadku maszyny synchronicznej zjawisko to nazywamy fachowo **kołysaniami maszyny synchronicznej**⁹⁾. Zjawisko to występuje w stanach nagłych zmian obciążenia w systemie energetycznym, w szczególności w stanach zwarcio- wych systemu. Efektem kołysania maszyny synchronicznej jest niestabilna praca systemu energetycznego, objawiająca się, między innymi, zmianami częstotliwości napięcia systemu. Funkcją tłumiącą kołysania maszyny spełnia klatka tłumiąca umieszczona w żłobkach magnetycznej lub lite elementy rdzenia wirnika.

Pomijając straty mechaniczne – moc czynna twornika równa się praktycznie mocy na wale maszyny – mamy:

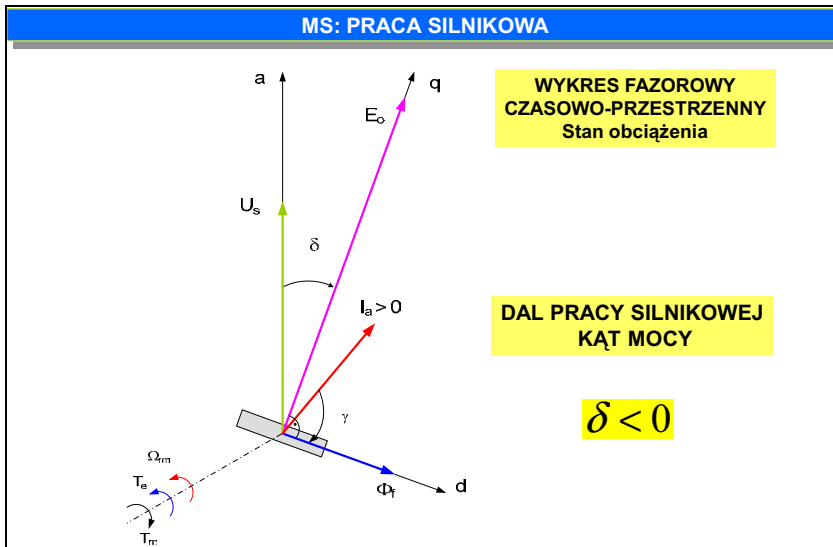
$$P_a \cong P_m \quad (6.29)$$

$$P_m = \Omega_{rm} T_m \cong \Omega_s T_e = -m \frac{U_s E_0}{X_s} \sin \delta \quad (6.30)$$

Zatem moc mechaniczną (moc na wale) maszyny wyrażamy zależnością:

$$P_m = -m \frac{U_s E_0}{X_s} \sin \delta \quad (6.31)$$

Celem interpretacji wzoru (6.31) dla potrzeb wyznaczenia charakterystyki kąto-wej silnika synchronicznego, posłużymy się jego wykresem fazorowym czasowo-przestrzennym (rys. 6.35).



Rys. 6.35. Wykres fazorowy czasowo-przestrzenny silnika synchronicznego w stanie obciążenia

Uwaga: dla silnika przyjęliśmy konwencję: kąt mocy $\delta < 0$

Uwaga: dla prądnicy przyjęliśmy konwencję: kąt mocy $\delta > 0$

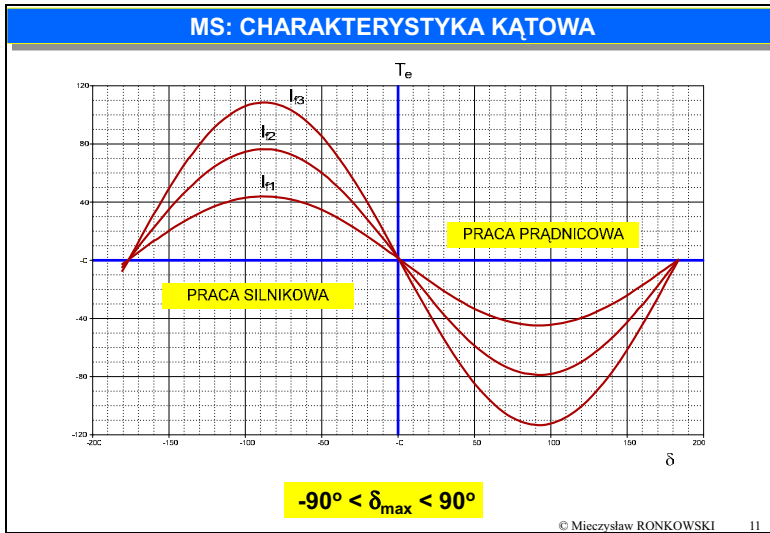
Skoro dla silnika synchronicznego kąt mocy δ ma wartości mniejszą od 0, wtedy odpowiednio równania (6.28) i (6.31) przyjmą postać:

$$T_e = m \frac{U_s E_0}{\Omega_s X_s} \sin \delta \quad (6.32)$$

⁹⁾ Skłonność do kołysań jest pięta „Achillesowa” maszyny synchronicznej.

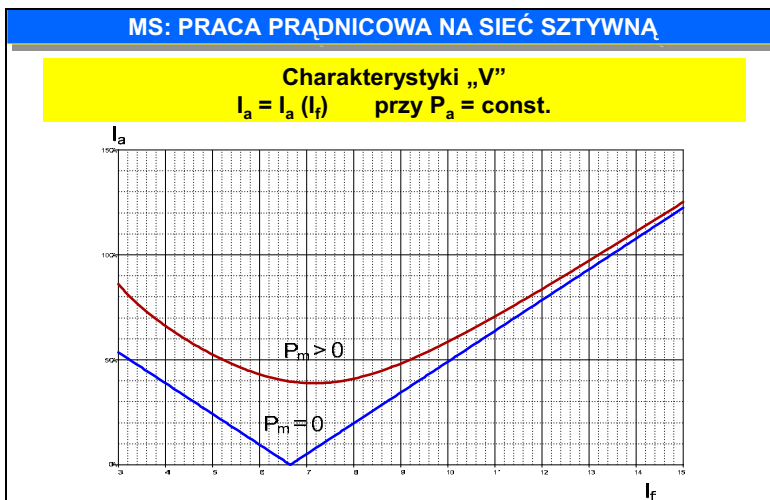
$$P_m = m \frac{U_s E_0}{X_s} \sin \delta \tag{6.33}$$

Charakterystykę kątową maszyny synchronicznej, w zakresie $-180^\circ < \delta < 180^\circ$ i przy różnych wartościach prądu wzbudzenia I_f , przedstawiamy na rys. 6.36. Konsekwencją przekroczenia kąta mocy przy pracy maszyny poza zakres $-90^\circ < \delta < 90^\circ$ jest wypadnięcie maszyn z synchronizmu – przejście w stan pracy awaryjnej. W praktyce dopuszczalny zakres obciążeń wyznacza przeciążalność maszyny synchronicznej, która określana jest stosunkiem mocy maksymalnej (przy $\delta < 90^\circ$) do mocy znamionowej P_{\max}/P_N maszyny; w praktyce nie przekracza wartości 2.



Rys. 6.36. Charakterystyka kątowa maszyny synchronicznej: wyznaczona przy różnych wartościach prądu wzbudzenia

Charakterystyki „V” $I_a = I_a(I_f)$ przy $P_a = \text{const.}$ przedstawiamy na rys. 6.37. Podstawą ich wyznaczania jest wykresy fazorowy pracy maszyny synchronicznej na sieć sztywną przedstawiony na (rys. 6.31).



Rys. 6.37. Maszyna synchroniczna: praca prądnicowa na sieć sztywną

6.7. Podsumowanie

Maszyna synchroniczna jest przetwornikiem służącym do elektromechanicznego przetwarzania energii prądu przemiennego i energii mechanicznej. Proces przemiany energii może zachodzić w dwóch kierunkach: maszyna może pracować jako prądnica (generator) lub jako silnik.

Maszyna synchroniczna należy do grupy maszyn prądu przemiennego. Budowa maszyny synchronicznej oparta jest na wykorzystaniu idei pola o wirującym strumieniu magnetycznym.

Podstawą działania i budowy maszyny synchronicznej są dwa odkrycia: efektu magnetycznego prądu (Hans Oersted) i zjawiska indukcji elektromagnetycznej (Michał Faraday).

W rozdziale omówiono głównie maszyny synchroniczne pracujące w systemach elektroenergetycznych. Na wstępie krótko opisano budowę maszyn synchronicznych, następnie przedstawiono jej model fizyczny i obwodowy oraz rozważono trzy stany pracy maszyny: stan jałowy, stan zwarcia i stan obciążenia. Kolejno opisano charakterystyki ruchowe maszyny synchronicznej pracującej w systemie autonomicznym i energetycznym. Przedstawiono także najważniejsze charakterystyki ruchowe silnika synchronicznego (mechaniczną i kątową).

6.8. Pytania

1. Podać rodzaje budowy maszyny synchronicznej. Wymienić elementy stojana i wirnika.
2. Opisać zasadę działania prądnicy synchronicznej w ujęciu **ciągu logicznego przyczyna-skutek**.
3. Narysować podstawowy (elementarny) model fizyczny (układ dwóch przepływów) prądnicy synchronicznej. Wykazać, że w stanie pracy ustalonej prądnicy układ dwóch przepływów jest nieruchomy względem siebie. Jakie są tego konsekwencje?
4. Opisać reakcję twornika prądnicy synchronicznej dla obciążenia o charakterze czynnym, indukcyjnym i pojemnościowym. Narysować odpowiednie położenia układu dwóch przepływów prądnicy.
5. Opisać obraz fizyczny (składowe strumieni) i statyczny model obwodowy (schemat zastępczy) prądnicy synchronicznej dla biegu jałowego.
6. Opisać obraz fizyczny (składowe strumieni) i statyczny model obwodowy (schemat zastępczy) prądnicy synchronicznej dla stanu zwarcia.
7. Opisać obraz fizyczny (składowe strumieni) i statyczny model obwodowy (schemat zastępczy) prądnicy synchronicznej w stanie obciążenia. Uwzględnić charakter obciążenia.
8. Narysować modele statyczne prądnicy synchronicznej: fizyczny (składowe strumieni) i obwodowy (schemat zastępczy). Podać i wyjaśnić wzajemne relacje między wielkościami modelu fizycznego a zmiennymi i parametrami modelu obwodowego (schematu zastępczego).
9. Narysować statyczny model obwodowy (schemat zastępczy) prądnicy synchronicznej, nazwać tworzące go elementy i dokonać interpretacji fizycznej tych elementów.
10. Podać, nazwać i objaśnić podstawowe wielkości charakterystyczne i zależności dotyczące prądnicy synchronicznej.
11. Na podstawie jakich pomiarów (charakterystyk) wyznacza się parametry statycznego modelu obwodowego (schematu zastępczego) prądnicy synchronicznej? Podać zależności między wynikami tych pomiarów i parametrami schematu zastępczego.
12. Podać charakterystykę biegu jałowego badanej prądnicy synchronicznej i uzasadnić fizycznie oraz analitycznie jej kształt.
13. Podać charakterystykę zwarcia badanej prądnicy synchronicznej i uzasadnić fizycznie oraz analitycznie jej kształt.
14. Podać charakterystyki zewnętrzne badanej prądnicy synchronicznej i uzasadnić fizycznie oraz analitycznie ich kształt. Uwzględnić charakter obciążenia.
15. Podać charakterystyki regulacyjne badanej prądnicy synchronicznej i uzasadnić fizycznie oraz analitycznie ich kształt. Uwzględnić charakter obciążenia.

6.9. Zagadnienia obliczeniowe i pomiarowe (laboratoryjne)

Przerobienie kompletu zadań, które naświetlałyby niektóre zagadnienia z wykładów, jest jednym ze sposobów dopomożenia studentom. Zadania stwarzają dobrą okazję do uzupełnienia materiału wykładowego oraz sprawiają, że wyłożone zagadnienia stają się bardziej realne, pełniejsze i lepiej ugruntowane w umysłach.

Zagadnieniom obliczeniowym maszyn synchronicznych poświęconych jest szereg podręczników i skryptów [13, 17, 49, 54–57]. Szczególnie cenny jest najnowszy podręcznik [42] obejmujący zagadnienia obliczeniowe w eksploatacji maszyn elektrycznych.

Zagadnienia pomiarowe (laboratoryjne) dotyczące maszyn synchronicznych omówiono w skryptach [47, 52].

6.10. Literatura

Książki/podręczniki

- [1] Adkins B., *The general theory of electrical machines*. Chapman and Hall, London 1957.
- [2] Arnold E., J. I. la Cour, *Die Wechselstromtechnik, 3 Band, Die Synchronen Wechselstrommaschine* 1903, Springer.
- [3] Chapman S. J., *Electric Machinery Fundamentals*, 4th ed., McGraw Hill Book Co (Education), 2004.
- [4] Chiasson J., *Modeling and High Performance Control of Electric Machines*, IEEE Press Series on Power Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York 2005.
- [5] Dąbrowski M., *Konstrukcja maszyn elektrycznych*, WNT, Warszawa 1977.
- [6] Dąbrowski M., *Projektowanie maszyn prądu przemiennego*, WNT, Warszawa 1994.
- [7] Demenko A., *Obwodowe modele układów z polem elektromagnetycznym*. Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań 2004
- [8] Fitzgerald A. E., Kingsley Ch., Jr., Umans. S. D., *Electric Machinery*, 6th ed., McGraw-Hill, 2003.
- [9] Gieras J.F., *Advancements in Electric Machines*, Heidelberg, Springer 2009.
- [10] Gieras J.F., Gieras I.A.A., *Electrical energy utilization*, Wyd. Adam Marszałek, Toruń 1998.
- [11] Glinka T., *Mikromaszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 1995.
- [12] Glinka T., *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2002.
- [13] Glinka T., Mizia W., Żywiec A., Hickiewicz J., *Zadania z maszyn elektrycznych*, WNT, Warszawa 1973.
- [14] Kaczmarek T., Zawirski K., *Układy napędowe z silnikiem synchronicznym*, Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań 2000.
- [15] Kamiński G., Przyborowski W., *Uzwojenia i parametry maszyn elektrycznych*, OWPW, Warszawa 2005.
- [16] Kaźmierkowski M.P., Tunia H., *Automatic control of converter-fed drives*. Elsevier, Amsterdam 1994.
- [17] Koter T., Pełczewski W., *Maszyny elektryczne w zadaniach*, Wydaw. Nauk.-Tech., Warszawa 1975.
- [18] Krause P.C., *Analysis of electric machinery*. McGraw-Hill, New York 1986.
- [19] Kron G., *Equivalent circuit of electric machinery*. John Wiley and Sons, New York 1951
- [20] Królikowski L., *Rozwój konstrukcji maszyn elektrycznych do końca XIX wieku*, Zakł. Nar. im. Ossolińskich, Wrocław 1986.
- [21] Latek W., *Zarys maszyn elektrycznych*. WNT, Warszawa 1974.
- [22] Latek W., *Teoria maszyn elektrycznych*. Wyd. 2. WNT, Warszawa 1987.
- [23] Latek W., *Badanie maszyn elektrycznych w przemyśle*, WNT, Warszawa 1987
- [24] Latek W., *Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach*, Wydaw. Nauk.-Tech., Warszawa 1994.
- [25] Latek W., *Turbogenerator*, Wydaw. Nauk.-Tech., Warszawa 1973.
- [26] Levi E., Panzer M., *Electromechanical power conversion: low-frequency, low-velocity conversion processes*, McGraw-Hill 1966.
- [27] Lyshevski S. E., *Electromechanical systems, electric machines, and applied mechatronics*. CRC Press, Boca Raton 1999.
- [28] Nogarède B., *Électrodynamique appliquée. Bases et principes physiques de l'électrotechnique*, Dynod, Paris 2005.

- [29] Mohan N.: *Electric drives. An integrative approach*. MNPERE, Minneapolis 2000.
- [30] Miesel J., *Zasady elektromechanicznego przetwarzania energii*. WNT, Warszawa 1970.
- [31] O'Kelly D., *Performance and control of electrical machines*, London, McGraw-Hill 1991.
- [32] Owczarek J., i in., *Elektryczne maszynowe elementy automatyk*, WNT, Warszawa 1983/86.
- [33] Paska J., *Wytwarzanie energii elektrycznej*, Oficyna Wyd. Pol. Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [34] Paszek W. *Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Wydanie WNT, Warszawa 1986.
- [35] Plamitzer A. M., *Maszyny elektryczne*. Wyd. 7. WNT, Warszawa 1982.
- [36] Puchała A., *Dynamika maszyn i układów elektromechanicznych*. PWN, Warszawa 1977.
- [37] Puchała A., *Elektromechaniczne przetworniki energii*. Monografia wykładów. BOBR Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice 2002.
- [38] Pustoła J., *Analiza działania szybko reagujących silników komutatorowych i impulsowych*. (Publikacja nr 10 serii wydawniczej Komitetu Elektrotechniki PAN: Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki). PWN, Warszawa 1971.
- [39] Rothert A., *Teoria i konstrukcja maszyn elektrycznych*, Lwów 1910.
- [40] Roszczyk S., *Teoria maszyn elektrycznych*. WNT, Warszawa 1979.
- [41] Sochocki R., *Mikromaszyny elektryczne*, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej 1996.
- [42] Staszewski P., Urbański W., *Zagadnienia obliczeniowe w eksploatacji maszyn elektrycznych*, Warszawa, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej 2009.
- [43] Turowski J., *Podstawy mechatroniki*, Wydawnictwo WSHE, Łódź 2008.
- [44] Vas P., *Electrical machines and drives. A space-vector theory approach*. Oxford Science Publications, Oxford 1992.
- [45] White D.C., Woodson H.H., *Electromechanical Energy Conversion*. J. Wiley, New York 1959.
- [46] Woodson H.H., Melcher J.R., *Electromechanical dynamics. Part1: Discrete systems. Part2: Fields, forces, and motion. Part3: Elastic and Fluid media*. J. Wiley, New York 1968.

Skrypty

- [47] Kamiński G., Kosk J., Przyborowski W., *Laboratorium maszyn elektrycznych*, OWPW, Warszawa 2005.
- [48] Karwacki W., *Maszyny elektryczne*. Oficyna Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław 1994.
- [49] Łukaniszyn M., *Zbiór zadań z maszyn elektrycznych dla studentów studiów zaocznych*, Skrypt Nr 226, Oficyna Wyd. Pol. Opolskiej, Opole 2000.
- [50] Manitius Z., *Maszyny synchroniczne*, wyd. 2, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 1977.
- [51] Manitius Z., *Maszyny synchroniczne*, Cz.2, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 1982.
- [52] Manitius Z (red.), *Laboratorium maszyn elektrycznych*, wyd. 2, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 1990.
- [53] Matulewicz W., *Maszyny elektryczne*. Podstawy, wyd. 3, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 2008.
- [54] Miksiewicz R., *Maszyny elektryczne*. Zagadnienia obliczeniowa z wykorzystaniem programu MATCAD, Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2000.
- [55] Miksiewicz R., *Zastosowanie programu Mathcad do rozwiązywania statycznych zagadnień obliczeniowych maszyn elektrycznych i transformatorów*, Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2007.
- [56] Rafalski W., Ronkowski M., *Zadania z maszyn elektrycznych, Cz. II: Maszyny synchroniczne i maszyny prądu stałego*, wyd. 3, Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1994.
- [57] Roszczyk S., Witkowski J., *Elektromechaniczne przetworniki energii w zadaniach*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1982.
- [58] Skwarczyński J., Tertil Z., *Maszyny elektryczne*. Teoria. Cz. 1, 2. Wyd. AGH, Kraków 1995 (Cz. 1), 1997 (Cz. 1).
- [59] Skwarczyński J., Tertil Z., *Elektromechaniczne przetwarzanie energii*. Uczelniane Wyd. Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2000.

Artykuły/referaty

- [60] Koczara W., Odsprężone wytwarzanie energii elektrycznej w układach z maszynami wirującymi, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2004, R. 80, nr 1, s. 1–6.
- [61] Orłowska-Kowalska T., Stan obecny i tendencje rozwojowe napędu elektrycznego, *Przegl. Elektrotechniczny*, nr 3, 2004, pp. 185–197.

Rozprawy doktorskie

- [62] Hańczewski P., *Prądnica synchroniczna o wzbudzeniu hybrydowym*, Rozprawa doktorska, Pol. Warszawska, Warszawa 2008.
- [63] Michna M., *Wpływ struktury obwodów magnetycznych na wybrane parametry silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi*, Rozprawa doktorska, Pol. Gdańska, Gdańsk 2004.
- [64] Moskwa M., *Parallel operation of power electronic generator sets with alternating output voltage*, Rozprawa doktorska, Pol. Warszawska, Warszawa 2006.

Materiały do nauczania interaktywnego (e-learning)

- [65] Interactive and Unified E-Based Education and Training for Electrical Engineering. INETELE. Project Leonardo da Vinci No: CZ/02/B/F/PP/134009, 2002–2005. Boboń A., Kudła J., Miksiewicz R.: Maszyny elektryczne prądu przemiennego (asynchroniczne i synchroniczne). Multimedialny podręcznik elektroniczny wchodzący w skład projektu INETELE (www.tuke.sk/inetele/)

Adresy internetowe ośrodków akademickich

- [66] Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Electrical Engineering and Computer Science. <http://www.eecs.mit.edu/>
- [67] 6.061 / 6.690 Introduction to Electric Power Systems (Undergraduate Courses/ Graduate Courses) <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Electrical-Engineering-and-Computer-Science/6-061Spring-2007/CourseHome/index.htm>
- [68] 6.685 Electric Machines (Graduate Courses) <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Electrical-Engineering-and-Computer-Science/6-685Fall-2005/CourseHome/index.htm>
- [69] Politechnika Warszawska. Zakład Maszyn Elektrycznych. Materiały dydaktyczne: wykłady, ćwiczenia rachunkowe, laboratoria, projektowanie <http://www.ime.pw.edu.pl/zme/>

Ważniejsze normy

- [70] PN-EN 60034-1:2005 Maszyny elektryczne wirujące. Część 1: Dane znamionowe i parametry.
- [71] PN-EN 60034-5:2004/A 1:2007 Maszyny elektryczne wirujące. Część 5: Stopnie ochrony zapewniane przez rozwiązania konstrukcyjne maszyn elektrycznych wirujących (kod IP). Klasyfikacja.
- [72] PN-EN 60034-7:2005 Maszyny elektryczne wirujące. Klasyfikacja form wykonania i sposobów montażu (kod IM).
- [73] PN-EN 60034-6:1999 Maszyny elektryczne wirujące. Sposoby chłodzenia (kod IC)
- [74] PN-IEC 72-1:1996 Maszyny elektryczne wirujące. Wymiary i ciągi mocy maszyn elektrycznych wirujących. Rozmiar obudowy od 56 do 400 i rozmiar kołnierza od 55 do 1080.
- [75] PN-E-06700:1991 Maszyny elektryczne wirujące. Terminologia
- [76] PN-EN 60027-4:2007 Oznaczenia wielkości i jednostek miar używanych w elektryce. Maszyny elektryczne wirujące.

Ważniejsze adresy internetowe producentów/dystrybutorów

- [77] BOBR Maszyn Elektrycznych „KOMEL” www.komel.katowice.pl
- [78] ABB Sp. z o.o., www.abb.pl/ProductGuide/
- [79] Siemens, www.siemens.com
- [80] Zakład Maszyn Elektrycznych EMIT S.A., Żychlin, www.cantonigroup.com/pl/motors/emit/
- [81] The Lima Electric Co. www.limaelectric.com lub Marathon Electric, Inc., www.marathonelectric.com

7. Maszyny indukcyjne/asynchroniczne

Maszyna indukcyjna/asynchroniczna jest przetwornikiem do elektromechanicznego przetwarzania energii prądu przemiennego i energii mechanicznej. Proces przemiany energii może zachodzić w dwóch kierunkach: maszyna może pracować jako prądnica (generator) lub jako silnik.

Maszyna indukcyjna należy do grupy maszyn prądu przemiennego. Budowa maszyny oparta jest na wykorzystaniu idei pola o wirującym strumieniu magnetycznym.

Podstawą działania i budowy maszyny indukcyjnej są dwa odkrycia: efektu magnetycznego prądu (Hans Oersted odkrył 21 kwietnia 1820 r.) i zjawiska indukcji elektromagnetycznej (Michał Faraday odkrył 29 sierpnia 1831 r.).

7.1. Uwagi wstępne

W rozdziale omówimy głównie maszyny indukcyjne/asynchroniczne pracujące w **systemach napędowych** [17]. Zasadniczą ich funkcją jest przetwarzanie energii prądu przemiennego w energię mechaniczną o parametrach sterowanych/regulowanych – zmiennej prędkości kątowej i zmiennym momencie obrotowym. Maszyny indukcyjne buduje się w dwóch odmianach: pierścieniowych i klatkowych. Maszyny indukcyjne należą do najpowszechniejszej grupy maszyn stosowanych w napędach przemysłowych. Silniki indukcyjne klatkowe są jednymi z najważniejszych odbiorników energii elektrycznej. Szacuje się, że silniki klatkowe zużywają około 2/3 energii elektrycznej wyprodukowanej na świecie. Silniki klatkowe charakteryzuje się dużą trwałością i niezawodnością, niemniej warunkiem ich poprawnej pracy jest odpowiednia jakość napięcia zasilania. W praktyce silnik powinien być zasilany symetrycznym napięciem sinusoidalnym o odpowiedniej częstotliwości i wartości skutecznej. Pojawienie się jakichkolwiek zaburzeń w sieci zasilającej – odchylenia częstotliwości lub wartości skutecznej napięcia zasilania, jego asymetrii lub odkształcenia przebiegu od przebiegu sinusoidy – prowadzi do wzrostu strat w silniku i w efekcie do wzrostu temperatury uzwojeń i możliwości jego uszkodzenia.

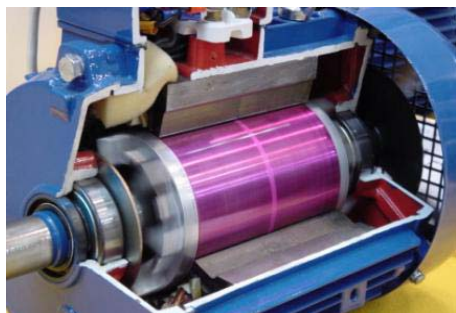
Maszyny indukcyjne pełnią także funkcję generatorową, pracując w elektrowniach wiatrowych [61]. Ponadto istnieje liczna grupa maszyn specjalnych, które należą do grupy **elektrycznych maszynowych elementy automatyki** – pracują w systemach automatyki jako silniki wykonawcze (aktuatory) oraz tachoprądnice (mierniki prędkości obrotowej) [11, 12, 32, 41, 44].

Podstawowe zjawiska i procesy fizyczne, występujące we wymienionych wyżej maszynach, są takie same, chociaż każdy typ maszyny wyróżnia się swoją specyficzną charakterystyką. Omawianie maszyny indukcyjnej opieramy na najważniejszej dla systemu napędowego maszynie klatkowej – maszynie przetwarzającej energię elektryczną na mechaniczną o sterowanych parametrach.

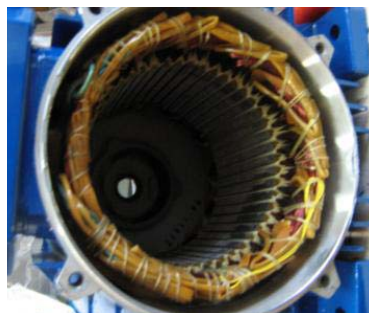
Na wstępie krótko opiszemy budowę maszyny indukcyjnej. Następnie przedstawimy jej model fizyczny i obwodowy oraz rozważymy trzy stany pracy maszyny: stan jałowy, stan zwarcia i stan obciążenia. Omówimy najważniejsze charakterystyki ruchowe silnika indukcyjnego i metody ich kształtowania.

7.2. Formy budowy

Zagadnienia konstrukcji i technologii maszyn indukcyjnych/MI stanowią obszerną dziedzinę wiedzy technicznej. Zagadnieniom tym poświęcone są specjalne książki, opracowania i normy. W języku polskim są to prace autorstwa profesorów: M. Dąbrowskiego [5, 6], B. Dubickiego [9] i T. Śliwińskiego [40]. Szczególnie cenna jest najnowsza monografia prof. T. Śliwińskiego poświęcona metodom obliczania silników indukcyjnych. Rys historyczny początku rozwoju MI zawiera książka [21].



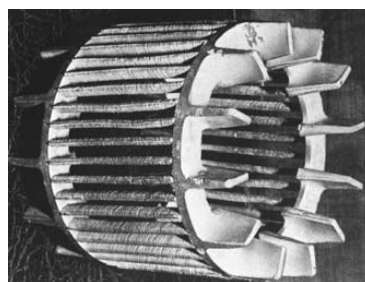
silnik indukcyjny klatkowy



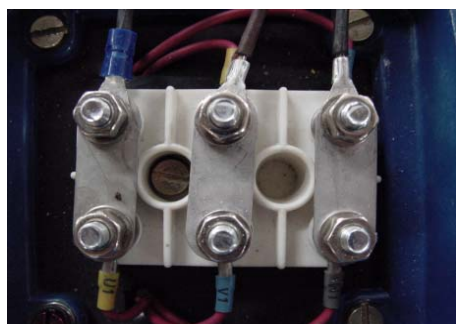
uzwojenie stojana – wzornikowe



uzwojenie wirnika – pierścieniowe (z rdzeniem)



uzwojenie wirnika – klatkowe (bez rdzenia)



fabryczna tabliczka zaciskowa 3-fazowego uzwojenia stojana połączonych w trójkąt (Δ)



tabliczka znamionowa silnika klatkowego

Rys. 7.1. Budowa i podstawowe elementy maszyny indukcyjnej/asynchronicznej (produkcja firmy INDUKTA/CANTONI)

Ograniczymy się jedynie do kilku podstawowych informacji o budowie MI – koniecznych do opisu teoretycznego zachodzących w nich zjawisk elektromechanicznych. Zagadnienia budowy uzwojeń dostępne są w obszernej literaturze przedmiotu maszyny elektryczne, w szczególności w podręczniku

specjalistycznym [15]. Pomijamy także ważne zagadnienia układów chłodzenia, które dostępne są w literaturze przedmiotu.

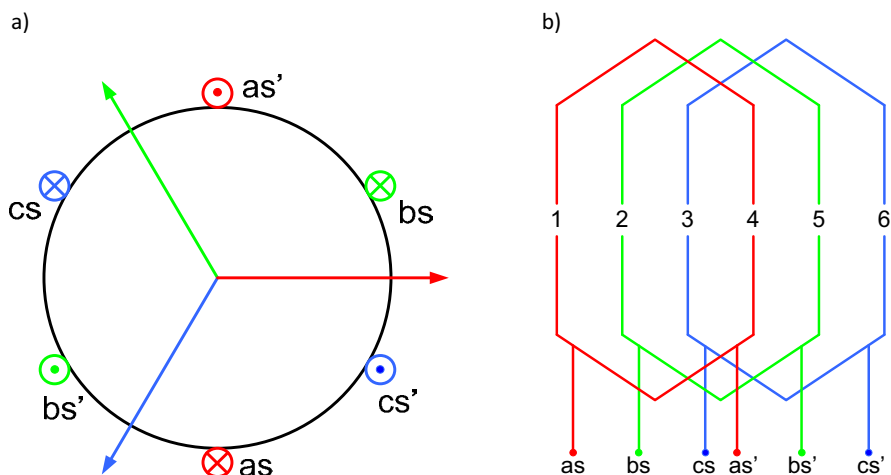
Budowę i podstawowe elementy MI o budowie cylindrycznej przedstawiono na rys. 7.1. Maszyna składa się z następujących elementów czynnych: stojana (rdzeń i uzwojenie 3-fazowe); wirnika (rdzeń i uzwojenie klatkowe lub uzwojenie pierścieniowe – uzwojenie 3-fazowe połączone z pierścieniami ślizgowymi); wału. Stojan pełni funkcję wzbudnika-induktora – prądy płynące w uzwojeniu stojana wzbudzają pole o wirującym strumieniu magnetycznym, który indukuje SEM w uzwojeniu wirnika. Natomiast wirnik pełni, w pewnym sensie funkcję twornika – indukowana w uzwojeniu wirnika SEM wymusza przepływ prądu, który oddziałując z polem stojana generuje moment elektromagnetyczny.

Rdzeń magnetyczny MI (stojan i wirnik) wykonany jest z pakietów blach elektrotechnicznych. Takie wykonanie obwodu magnetycznego maszyny wpływa na zmniejszenie strat na prądy wirowe. Przykładowe wykroje blach stojana i wirnika pokazano na rys. 7.2. Jak widać, z prezentowanych rysunków, zarówno w stojanie jak i w wirniku wykonane są żłobki, od kształtu żłobka uzależniony jest kształt zębów. W przypadku żłobków kroplowych zęby mają jednakową szerokość na całej ich wysokości, z wyjątkiem części przyszczelinowej. Zastosowanie żłobków prostokątnych powoduje zmianę szerokości zęba wzdłuż jego wysokości. Wybór kształtu żłobków stojana uzależniony jest od kształtu przekroju poprzecznego drutu nawojowego, z którego ma być wykonane uzwojenie. W przypadku maszyn małej i średniej mocy uzwojenia stojanów wykonywane są z drutów o przekroju okrągłym, natomiast uzwojenia stojanów maszyn dużej mocy wykonywane są z prętów profilowych (pręty o przekroju prostokątnym).



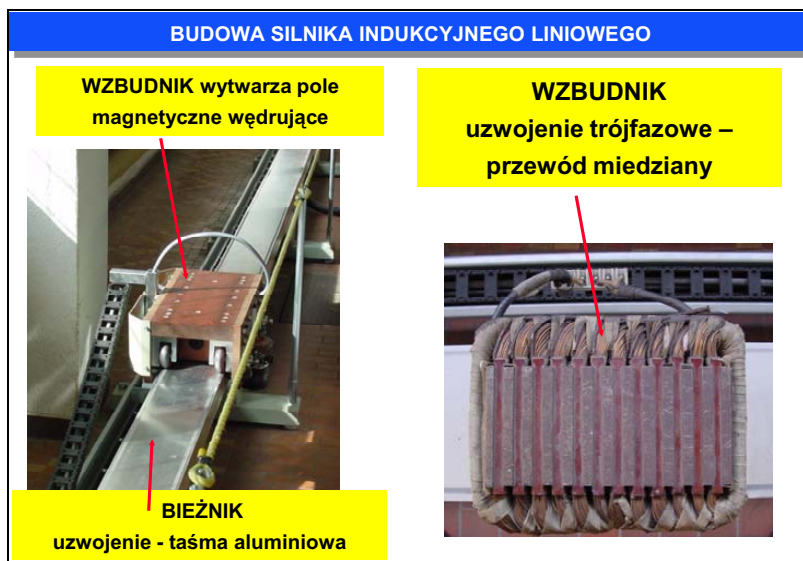
Rys. 7.2. Wykroje blach rdzeni maszyny indukcyjnej [63]

Uzwojenia stojanów maszyn indukcyjnych wykonywane są najczęściej jako trójfazowe, natomiast uzwojenia wirników jako trójfazowe (silniki pierścieniowe) lub wielofazowe (silniki klatkowe). Jak wspomniano wyżej uzwojenia MI umieszczone są w żłobkach. Na rysunku 7.3 pokazano schemat uzwojenia stojana silnika indukcyjnego. Uzwojenie to jest uzwojeniem jednowarstwowym (w jednym żłobku leży jeden bok cewki). Każde pasmo fazowe złożone jest z pojedynczego zezwoju (cewki). Końce pasm fazowych uzwojeń stojana podłączone są do tabliczki zaciskowej (rys. 7.1e). Odpowiednie rozmieszczenie cewek uzwojenia w maszynie jest jednym z podstawowych warunków generacji pola wirującego [22, 35, 39, 51, 54].



Rys. 7.3. Prymitywne uzwojenie stojana maszyny indukcyjnej: $p = 1$, $Q_s = 6$, $q = 1$, $\gamma = 3$:
a) rozmieszczenie przestrzenne cewek, b) schemat rozwinięty uzwojenia

Oprócz MI o klasycznej budowie cylindrycznej, których wirnik podczas pracy wiruje wokół własnej osi spotyka się również tzw. maszyny liniowe (wzbudnik podczas pracy wykonuje ruch postępowy – przemieszcza się wzdłuż bieżni). Przykład budowy maszyny indukcyjnej liniowej pokazano na rys. 7.4.



Rys. 7.4. Przykład budowy silnika indukcyjnego liniowego

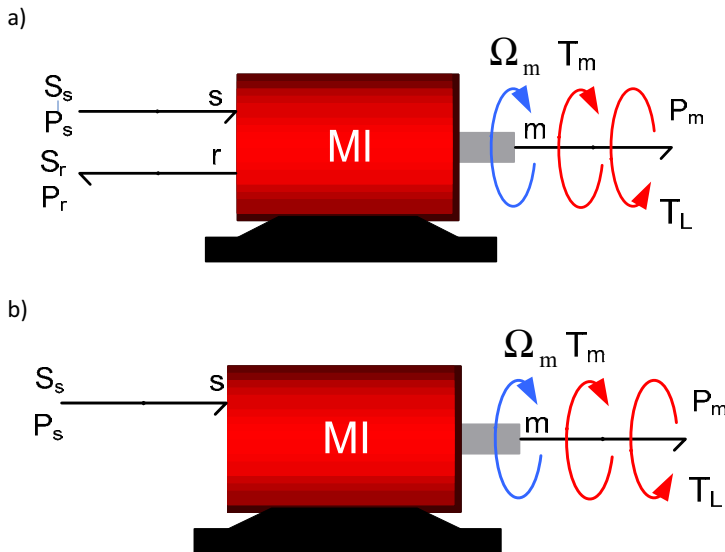
7.3. Modele fizyczne i obwodowe

Zagadnienia modelowania i pomiarów maszyn indukcyjnych stanowią oddzielną dziedzinę wiedzy technicznej w stosunku do analogicznych zagadnień maszyn synchronicznych należących do grupy maszyn prądu przemiennego. Zagadnieniom tym poświęcone są specjalne książki, opracowania i normy. W tym miejscu ograniczymy się jedynie do podstawowych informacji o modelowaniu ma-

szyn indukcyjnych – koniecznych do opisu jej charakterystyk ruchowych. Rozważania przeprowadzimy dla ustalonego stanu pracy maszyny.

Podstawowe pojęcia ogólne dotyczące modelowania przedstawiliśmy w rozdz. 4 (rys. 4.5).

Maszyna indukcyjna jest przetwornikiem elektromechanicznym (rys. 7.5) o trzech wrotach, które fizycznie reprezentują: „wejścia elektryczne” – zaciski uzwojenia stojana „s”; „wyjścia/wejścia elektryczne” – zaciski uzwojenia wirnika „r”; „wyjście mechaniczne” – koniec wału (sprzęgło) „m”. Moc elektryczna (dostarczana) P_s i moc mechaniczna (odbierana) P_m ulegają przemianie elektromechanicznej za pośrednictwem pola magnetycznego. Energia pola magnetycznego jest energią wewnętrzną maszyny, gdyż przetwornik nie ma możliwości wymiany tej energii z otoczeniem.



Rys. 7.5. Maszyna indukcyjna (strzałkowanie dla pracy silnikowej):

- a) trójwrotowy przetwornik elektromechaniczny z wirnikiem pierścieniowym b) dwuwrotowy przetwornik elektromechaniczny z wirnikiem klatkowym: wrota (zaciski) obwodu stojana „s” – dopływ energii elektrycznej przetwarzanej na energię mechaniczną, wrota obwodu wirnika „r” – odpływ energii do odbiornika lub sieci zasilającej, wrota układu (obwodu) mechanicznego „m” – odpływ energii mechanicznej

Na podstawowy model fizyczny silnika indukcyjnego pierścieniowego — pokazany na rys. 7.6 — składają się: a) elementy czynne: wzbudnik-induktor (stojan), twornik (wirnik), wał; b) wielkości (zmienne) fizyczne: napięcia fazowe U_s na zaciskach uzwojeń, prądy fazowe I_s oraz I_r płynące w uzwojeniach, strumień magnetyczny główny (magnesyjący) Φ_m , strumienie rozproszenia uzwojeń $\Phi_{\sigma s}$ oraz $\Phi_{\sigma r}$, moment elektromagnetyczny (wewnętrzny) T_e , moment obrotowy (zewnętrzny) T_m , prędkość kątowna wirnika (mechaniczna) Ω_m , moment obciążenia (oporowy) T_L , straty w żelazie ΔP_{Fe} , straty w uzwojeniach $\Delta P_{Cu s}$ oraz $\Delta P_{Cu r}$, straty mechaniczne (tarcia, wentylacyjne) ΔP_m .

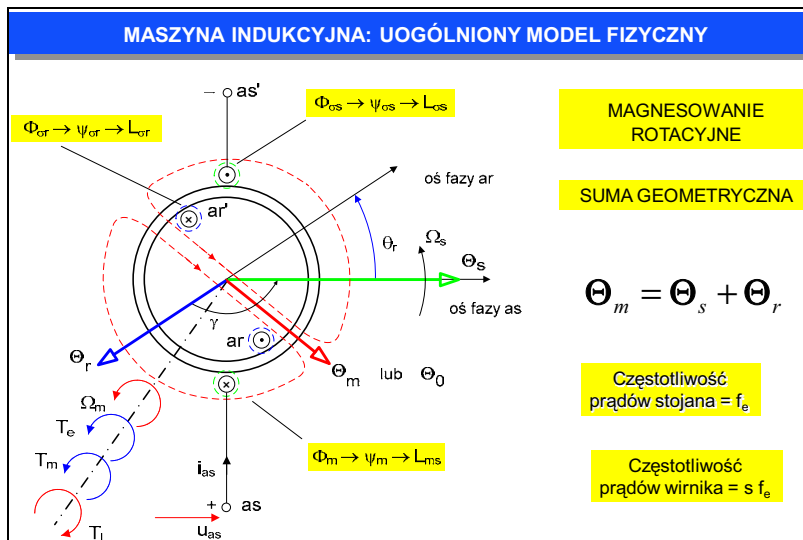
Aby zachować czytelność rysunku rys. 7.6, układ uzwojeń fazowych (pasm) stojana i wirnika zaznaczono szkiecowo tylko dla jednej fazy obwodami $as-as'$ oraz $ar-ar'$, przy czym litery as , ar oznaczają umowne początki tych uzwojeń, a litery as' , ar' — umowne końce¹⁾.

¹⁾ Zarówno uzwojenia stojana jak i wirnika są równomiernie rozmieszczone w żłobkach.

Uzwojenia stojana MI stanowią: trzy fazy (pasma) — osie magnetyczne poszczególnych faz są odpowiednio względem siebie przesunięte w przestrzeni o kąt 120° (dla MI o liczbie par biegunów $p > 1$ kąt wynosi $120^\circ/p$). Analogicznie jest dla uzwojenia wirnika w wykonaniu pierścieniowym. W przypadku uzwojenia wirnika w wykonaniu pierścieniowym liczba faz jest równa liczbie prętów klatki.

W opisie modelu MI, ze względów dydaktycznych, zastosowano oznaczenia: $as-as'$, $bs-bs'$, $cs-cs'$ dla stojana, $ar-ar'$, $br-br'$, $cr-cr'$ dla wirnika, zamiast znormalizowanych: 1U1-1U2, 1V1-1V2, 1W1-1W2 dla stojana, 2U1-2U2, 2V1-2V2, 2W1-2W2 dla wirnika.

Symetryczne prądy trójfazowe, płynące w uzwojeniach stojana, wytwarzają odpowiednio fazowe (osiowe) przepływy pulsujące (siły magnetomotoryczne), które są skierowane zgodnie z osiami magnetycznymi tych uzwojeń: np. oś magnetyczna as dla przepływu uzwojenia stojana $as-as'$. Osie magnetyczne pozostałych faz są odpowiednio przesunięte w przestrzeni o kąt $2\pi/3p$ (p – liczba par biegunów).



Sumowanie geometryczne osiowych przepływów pulsujących stojana wywołuje w efekcie wirującą w przestrzeni falę przepływu. Pierwsza harmoniczna tej fali – odwzorowana wektorem (prze-strzennym) Θ_s – wiruje w przestrzeni względem obserwatora na stojaniu z prędkością kątową $\Omega_s = 2\pi f_e/p$ (f_e – częstotliwość napięcia zasilania uzwojeń stojana), nazywaną zwykle **prędkością synchroniczną**.

Uwaga: Działanie maszyny indukcyjnej/asynchronicznej oparte jest na wykorzystaniu idei pola o wirującym strumieniu magnetycznym, **wzbudzonym metodą elektromagnetyczną**.

Prędkość wirowania pola wzbudnika-induktora określona jest wzorem: $\Omega_s = 2\pi f_e/p$ [rad/s] lub $n_s = 60f_e/p$ [obr/min]

gdzie: f_e – częstotliwość napięcia zasilania silnika, p – liczba par biegunów.

Opis metody graficznej wyznaczania pola wirującego dostępny jest w literaturze przedmiotu [51].

Wirujący przepływ stojana Θ_s wzbudza strumień, który przecinając przewody (pręty) uzwojenia wirnika, indukuje w nich przemienne SEM rotacji, które wymuszają przy zamkniętym uzwojeniu wirnika przepływ prądów przemiennych.

Z kolei prądy uzwojenia wirnika, analogicznie jak prądy uzwojenia stojana, wywołują wirującą w przestrzeni falę przepływu wirnika. Pierwsza harmoniczna tej fali odwzorowuje wektor (prze-strzenny) Θ_r .

Uwaga: Interakcja wirujących pól magnetycznych stojana i wirnika, wzbudzanych przepływami Θ_s oraz Θ_r , generuje moment elektromagnetyczny T_e , który wymusza ruch obrotowy wirnika. Przy czym należy zauważyć, że interakcja obu pól wynika z tendencji układu elektromagnetycznego stojana i wirnika do wzbudzenia **ekstremalnego (maksymalnego) strumienia**, innymi słowy tendencji do zgromadzenia ekstremalnej (**maksymalnej**) energii w układzie (zasada minimalnej pracy – minimalnego działania).

Zatem wektory reprezentujące przepływy Θ_s oraz Θ_r będą dążyły do wzajemnego złożenia (pokrycia) się.

Możliwy jest tylko obrót wektora przepływu wirnika Θ_r w kierunku zgodnym z założonym na rys. 7.6 dodatnim zwrotem prędkości kątowej wirnika Ω_m (dla przyjętej konwencji odbiornikowej strzałkowania, oznacza to zgodny zwrot momentu i prędkości, odpowiadający pracy silnikowej).

Przepływ wirnika Θ_r wiruje w przestrzeni względem obserwatora na wirniku z prędkością kątową równą różnicy prędkości ($\Omega_s - \Omega_m$) – nazywaną zwykle bezwzględną **prędkością poślizgu**; natomiast względem obserwatora na stojanie wiruje z prędkością kątową równą sumie prędkości: $(\Omega_s - \Omega_m) + \Omega_m = \Omega_s$ (należy dodać prędkość unoszenia przepływu wirnika, równą prędkości mechanicznej wirnika Ω_m).

Zatem przepływ wirnika Θ_r wiruje w przestrzeni względem obserwatora na stojanie z prędkością kątową równą prędkości Ω_s .

Oznacza to, dla stanu ustalonego (brak składowych swobodnych) pracy silnika, ruch synchroniczny przepływów stojana Θ_s i wirnika Θ_r ²⁾.

W efekcie przepływu stojana Θ_s i wirnika Θ_r tworzą wspólny (wypadkowy) przepływ – nazywany zwykle przepływem magnesującym, wirującym z prędkością Ω_s (przy prędkości wirnika $\Omega_m \neq \Omega_s$) i wzbudzającym strumień główny (magnesujący) Φ_m .

Ze względu na ruch asynchroniczny strumienia Φ_m oraz wirnika maszyny indukcyjne nazywane są także **maszynami asynchronicznymi**. Jest to zasadnicza cecha maszyn indukcyjnych/asynchronicznych.

Przepływ magnesujący określony jest sumą geometryczną:

$$\Theta_s + \Theta_r = \Theta_m \quad (7.1)$$

Moment elektromagnetyczny T_e zależy od kąta γ (zwanego **kątem momentu**) między przepływami Θ_s oraz Θ_r . Na rysunku 7.6 pokazano schematycznie wzajemne, przestrzenne położenie kątowe osi fazy $as-as'$ uzwojenia stojana względem osi fazy $ar-ar'$ uzwojenia wirnika. Położenie to odpowiada chwili czasowej dla której wartości prądów tych faz osiągają jednocześnie wartości maksymalne. Oznacza to, zgodnie z teorią pola wirującego: położenie wektorów wirujących przepływów stojana Θ_s i wirnika Θ_r jest zgodne z osiami magnetycznymi fazy $as-as'$ i fazy $ar-ar'$.

W teorii maszyn indukcyjnych bezwzględną wartość prędkości poślizgu ($\Omega_s - \Omega_m$) odnosi się do prędkości wirującego pola stojana, którą nazywa się **poślizgiem względnym**, albo po prostu **poślizgiem**:

$$s = \frac{\Omega_s - \Omega_m}{\Omega_s} \quad (7.2)$$

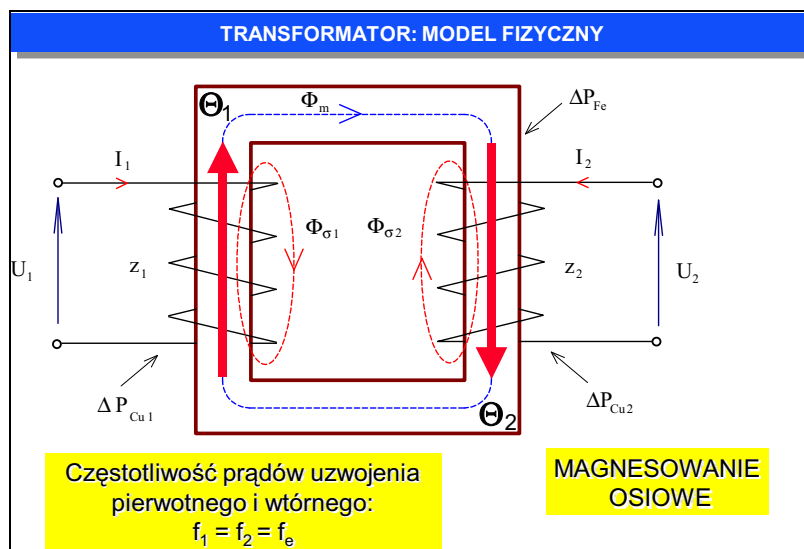
lub

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (7.3)$$

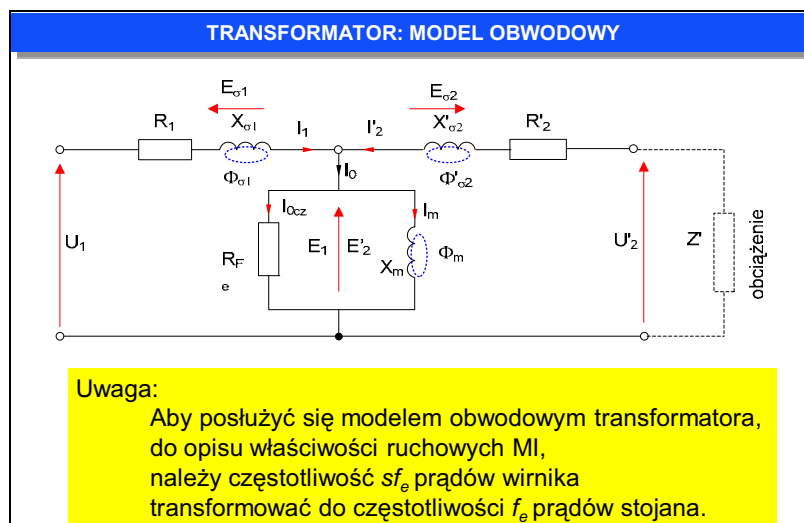
²⁾ Jest to podstawowy warunek generacji momentu o stałym kierunku i zwrocie — momentu o średniej wartości różnej od zera. Zgodnie z zasadą pracy (prawem sterowania) maszyn elektrycznych: **maszyna elektryczna jest układem dwóch pól magnetycznych o osiach nieruchomych względem siebie w przestrzeni**. Poszczególne typy maszyn elektrycznych różnią się tylko sposobem sterowania położeniem tych pól.

gdzie n_s oraz n oznaczają odpowiednio prędkość synchroniczna pola stojana i wirnika (mechaniczna) w obr/min.

Tworzenie wspólnego przepływu magnesującego jest zjawiskiem analogicznym do magnesowania transformatora (rys. 7.7, opisanego w rozdz. 4) – powstawania prądu magnesującego wynikającego z sumy geometrycznej przepływu uzwojenia pierwotnego i wtórnego (**uwaga: przepływów nieruchomych w przestrzeni**). Analogię tą wykorzystuje się w budowie modelu obwodowego (schematu zastępczego) maszyny indukcyjnej.



Rys. 7.7. Model fizyczny transformatora – analogia powstawania wspólnego przepływu magnesującego w maszynie indukcyjnej



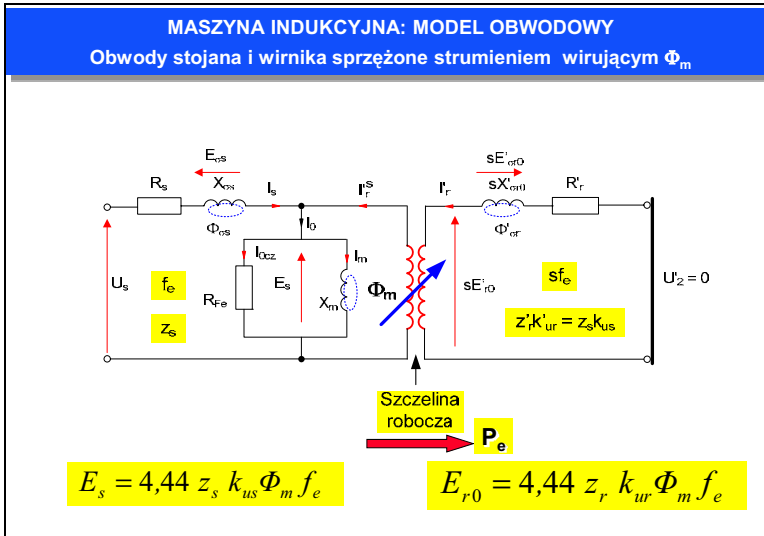
Rys. 7.8. Model obwodowy transformatora obciążonego impedancją Z

Uwaga: Analogia między transformatorem i MI dotyczy tylko generacji wspólnego przepływu magnesyjnego. W transformatorze prąd pierwotny i wtórny mają jednakową częstotliwość. Natomiast w MI, przy stałej częstotliwości prądu stojana (pierwotnego), prąd wirnika (wtórny) ma częstotliwość zmienną, która zależy od prędkości poślizgu (obciążenia)

$$f_r = s f_e \quad (7.4)$$

Korzystając z wyżej przytoczonej analogii pomiędzy transformatorem i maszyną indukcyjną, postaramy się wychodząc z modelu obwodowego transformatora obciążonego impedancją Z (rys. 7.8) opisać poszczególne etapy jego transformacji w celu uzyskania modelu obwodowego MI (rys. 7.11).

W stanie ustalonym pracy MI częstotliwości prądów występujących w uzwojeniach stojana i wirnika są różne. Wielkością wiążącą te dwie częstotliwości jest poślizg s . Bazując na modelu obwodowym transformatora i uwzględniając różnicę częstotliwości prądów stojana i wirnika (fakt że obwody stojana i wirnika są sprzężone strumieniem wirującym) MI można opisać za pomocą modelu obwodowego przedstawionego na rys. 7.9. Wielkości występujące po stronie wirnika z oznaczeniem „prim” odnoszą się do wielkości wirnika sprowadzonych na stronę stojana z uwzględnieniem przekładni napięciowej.



Rys. 7.9. Model obwodowy MI – obwody stojana i wirnika sprzężone wirującym strumieniem Φ_m

SEM indukowaną w uzwojeniach stojana można opisać zależnością:

$$E_s = 4,44 z_s k_{us} \Phi_m f_e \quad (7.5)$$

gdzie: z_s – liczba zwojów pasma fazowego uzwojenia stojana,
 k_{us} – współczynnik uzwojenia stojana,
 Φ_m – strumień główny maszyny,
 f_e – częstotliwość prądu po stronie stojana.

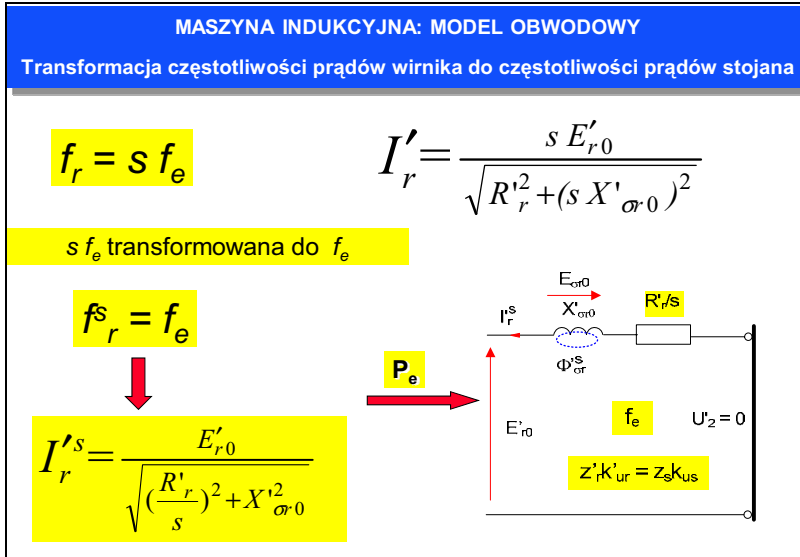
W sposób analogiczny można wyrazić SEM indukowaną w uzwojeniach wirnika

$$E_{r0} = 4,44 z_r k_{ur} \Phi_m f_e \quad (7.6)$$

gdzie: z_r – liczba zwojów pasma fazowego uzwojenia wirnika
 k_{ur} – współczynnik uzwojenia wirnika.

Uwaga: Aby posłużyć się modelem obwodowym transformatora, do opisu właściwości ruchowych MI, należy częstotliwość $s f_e$ prądów wirnika transformować do częstotliwości f_e prądów stojana.

Kolejnym krokiem jest sprowadzenie częstotliwości prądów wirnika do częstotliwości prądów stojana (rys. 7.10).



Rys. 7.10. Transformacja częstotliwości wirnika do częstotliwości stojana

Prąd wirnika przed sprowadzeniem do wspólnej częstotliwości:

$$I'_r = \frac{s E'_{r0}}{\sqrt{R'^2_r + (s X'_{\sigma r0})^2}} \quad (7.7)$$

Prąd wirnika po sprowadzeniu do częstotliwości prądów stojana (oznaczony górnym indeksem s):

$$I_r^s = \frac{E'_{r0}}{\sqrt{\left(\frac{R'_r}{s}\right)^2 + X'^2_{\sigma r0}}} \quad (7.8)$$

Wykonane przekształcenia stanowią podstawę sformułowania **modelu obwodowego** (schematu zastępczego) (rys. 7.11).

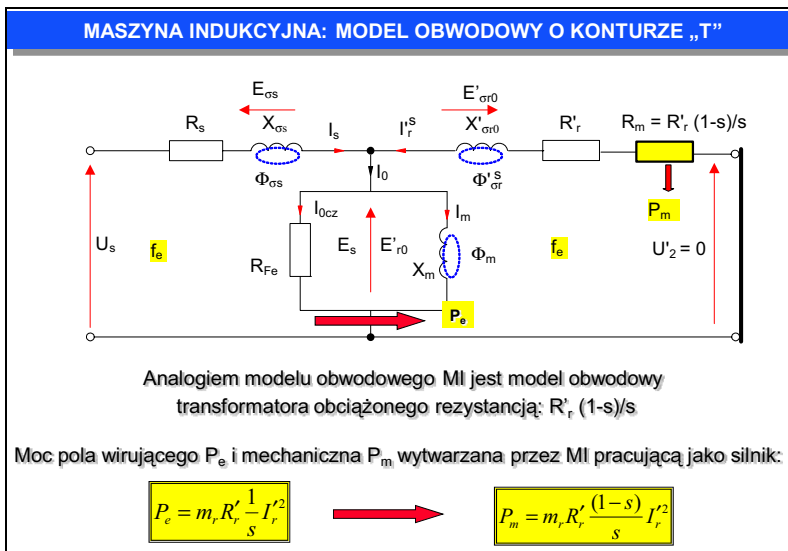
Model obwodowy z rys. 7.11 jest podstawą analizy silnika indukcyjnego dla dowolnego stanu pracy. Przedstawiony model — nazywany zwykle **modelem o konturze „T”** — odpowiada silnikowi indukcyjnemu o uzwojeniu wirnika zarówno sprowadzonym (zredukowanym) do przekładni $\lambda_f = 1$ jak i do częstotliwości prądów stojana. Topologia i elementy modelu wynikają z rozważań fizycznych dotyczących biegu jałowego, stanu obciążenia i stanu zwarcia silnika indukcyjnego. Z kolei wartości parametrów modelu wyznacza się na podstawie wyników dwóch prób: **biegu jałowego** i **stanu zwarcia**.

Parametry modelu obwodowego silnika indukcyjnego:

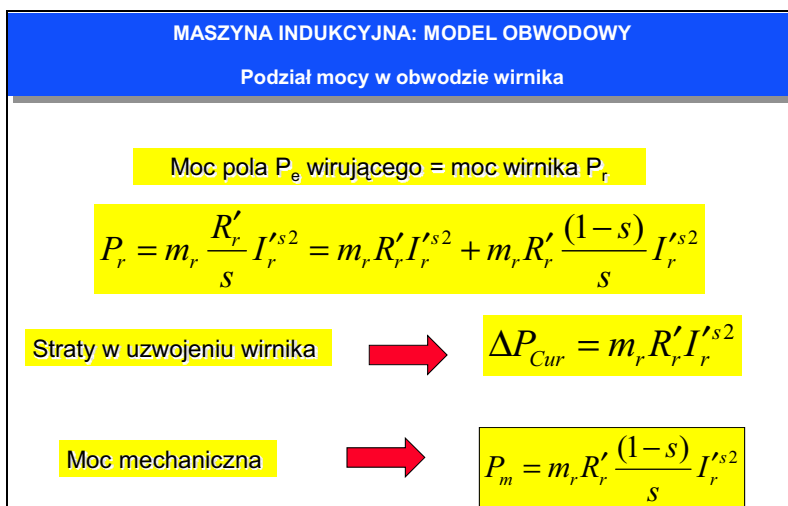
- rezystancja R_{Fe} i reaktancja X_m są wielkościami nieliniowymi zależnymi od wartości strumienia głównego i rodzaju blachy rdzenia,
- pozostałe parametry modelu obwodowego w zakresie prądów znamionowych można przyjąć jako stałe.

Uwaga: W przypadku wartości prądów silnika w stanie rozruch [$I_{sr} > (5 \div 7) I_{sn}$] drogi przepływu strumieni rozproszenia ulegają nasyceniu – wartości reaktancji ulegają zmniejszeniu.

W przypadku silnika klatkowego z klatką rozruchową lub głębokimi żłobkami należy uwzględnić zjawisko wypierania prądu – wartości reaktancji i rezystancji uzwojenia ulegają zmianie wraz ze zmianą poślizgu.



Rys. 7.11. Model obwodowy MI typu T



Rys. 7.12. Podział mocy w obwodzie wirnika

Moc pola wirującego P_e jest sumą strat mocy w uzwojeniach wirnika ΔP_{cur} oraz mocy mechanicznej P_m . Rozdział mocy w obwodzie wirnika przedstawiono na rys. 7.12.

Moment elektromagnetyczny silnika indukcyjnego wyrażony jest jako:

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_{rm}} = pm_r R'_r \frac{(1-s)}{s \omega_r} I_r'^{s2} = pm_r R'_r \frac{I_r'^{s2}}{s \omega_e} = p \frac{P_r}{\omega_e} \quad (7.9)$$

7.3.1. Stan jałowy

Stan pracy silnika, w którym do uzwojenia stojana przyłożone jest napięcie zasilania, uzwojenie wirnika jest zwarte (**uwaga:** w transformatorze uzwojenie wtórne jest otwarte – nie jest obciążone), a wał silnika nie jest obciążony (brak momentu oporowego, hamującego). Silnik wytwarza względnie mały moment elektromagnetyczny, równoważący tylko moment od sił tarcia w łożyskach i od sił tarcia wirnika (wentylatora) o powietrze. Dlatego też prąd w wirniku jest bardzo mały — prędkość wirnika jest bliska prędkości synchronicznej (poślizg $s \approx 0$)³⁾.

W stanie biegu jałowego prąd płynący w uzwojeniu stojana nazywa się **prądem biegu jałowego** I_o a jego wartość wyraża się zwykle w procentach znamionowego prądu I_N silnika:

$$I_{o\%} = \frac{I_o}{I_N} 100 \quad [\%] \quad (7.10)$$

Dla silników indukcyjnych wartość znamionowa prąd biegu jałowego zawiera się w zakresie (25 ÷ 60)% prądu znamionowego.

Zasada: Im większa moc i mniejsza liczba par biegunów tym, na ogół, mniejszy prąd biegu jałowego.

Składowymi prądu stojana przy biegu jałowym są: **składowa bierna (magnesująca)** I_m oraz **składowa czynna** I_{ocz} .

Składowa bierna prądu I_m magnesuje silnik, wzbudzając wirujący strumień główny (magnesujący) Φ_m , który indukuje zarówno w stojanie jak i wirniku SEM rotacji.

Składowa czynna I_{ow} prądu odpowiada stratom w silniku. Wobec $s f_e \approx 0$ można pominąć straty w rdzeniu (żelazie) wirnika i założyć, że straty w rdzeniu przy biegu jałowym silnika indukcyjnego występują tylko w stojanie. Podobnie, wobec bardzo małego prądu w wirniku można pominąć straty w uzwojeniu wirnika – prądu w wirniku pokrywa stosunkowo niewielkie straty mechaniczne silnika indukcyjnego. Ponieważ moc oddana przez silnik przy biegu jałowym jest równa zero (moc mechaniczna nie jest pobierana z wału silnika), to moc pobrana przez silnik pokrywa następujące straty:

- **straty w uzwojeniu stojana** ΔP_{Cus} ;
- **straty w rdzeniu stojana** ΔP_{Fe} (reprezentuje je składowa I_{Fe} prądu I_{ocz});
- **straty mechaniczne** (reprezentuje je składowa I_{om} prądu I_{ocz});
- **straty dodatkowe jałowe.**

Straty dodatkowe jałowe reprezentują głównie straty pulsacyjne i powierzchniowe w zębach stojana i wirnika.

Właściwości silnika indukcyjnego w stanie biegu jałowego określone są głównie przez wartość strumienia magnesującego (głównego) i właściwości rdzenia stojana.

Właściwości te odwzorowuje się wielkościami obwodowymi:

- X_m – reaktancją magnesującą modelującą strumień główny silnika;
- R_{Fe} – rezystancją modelującą straty w rdzeniu (żelazie) ΔP_{Fe} silnika.

³⁾ Idealny bieg jałowy dopowiada poślizgowi $s = 0$, tzn. ruch wirnik jest synchroniczny z polem wirującym stojan.

Dzieląc stronami zależności (7.5, 7.6), przy nieruchomym ($s = 1$) i otwartych obwodach wirnika, otrzymuje się charakterystyczną wielkość:

$$\frac{E_s}{E_r} = \frac{k_{us} z_s}{k_{ur} z_r} = \vartheta \quad (7.11)$$

którą nazywa się **przekładnią napięciową** ϑ **silnika indukcyjnego pierścieniowego**.

W przybliżeniu (z błędem znacznie większym niż w transformatorze) przekładnia napięciową silnika indukcyjnego pierścieniowego jest równa stosunkowi napięcia stojana i wirnika:

$$\vartheta \approx \frac{U_s}{U_r} \quad (7.12)$$

7.3.2. Stan rozruchowy/zwarcia

Stan silnika indukcyjnego, w którym uzwojenie unieruchomionego (zahamowanego) wirnika jest zwarte, zaś uzwojenie stojana jest zasilane odpowiednio obniżonym napięciem, tzn. takim, które wymusza w obu uzwojeniach prądy o wartościach znamionowych (analogicznie jak w stanie zwarcia transformatora).

Napięcie zwarcia silnika indukcyjnego — wartość napięcia, jakie należy przyłożyć do zacisków uzwojenia stojana silnika indukcyjnego przy unieruchomionym i zwartym uzwojeniu wirnika, celem wymuszenia w obu jego uzwojeniach przepływu prądów znamionowych.

Prąd zwarcia silnika indukcyjnego — prąd płynący w uzwojeniach stojana silnika, będącego w stanie zwarcia, jeżeli do uzwojeń stojana przyłożone jest napięcie znamionowe.

Napięcia zwarcia i prąd zwarcia (rozruchowy) są ważnymi parametrami silnika indukcyjnego, określanymi zwykle w procentach, wg następujących zależności:

$$U_{z\%} = \frac{U_{sz}}{U_{sN}} \cdot 100 = \frac{I_{sN} Z_z}{U_{sN}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7.13)$$

$$I_{z\%} = \frac{I_z}{I_{sN}} \cdot 100 = \frac{100}{U_{z\%}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7.14)$$

gdzie: $U_{z\%}$ – napięcie zwarcia procentowe,
 $I_{z\%}$ – prąd zwarcia procentowy,
 U_{sz} – napięcie zwarcia (fazowe) stojana mierzone w voltach,
 U_{sN} – napięcie znamionowe (fazowe) stojana,
 I_{sN} – prąd znamionowy (fazowy) stojana,
 Z_z – impedancja zwarcia silnika indukcyjnego.

Dla normalnych silników indukcyjnych pierścieniowych:

- napięcie zwarcia zawiera się w zakresie (12,5 ÷ 25)% napięcia znamionowego;
- prąd zwarcia zawiera się w zakresie (400 ÷ 800)% prądu znamionowego.

Zasada: im większa moc, tym na ogół większe napięcie zwarcia i mniejszy prąd zwarcia.

W stanie zwarcia silnika indukcyjnego, ze względu znacznie obniżony poziom strumienia magnesyjnego (zasilanie napięciem zwarcia), wartość prądu biegu jałowego w bilansie przepływów jest pomijalnie mała:

$$m_s k_{us} z_s I_{sN} + m_r k_{ur} z_r I_{rN} \approx 0 \quad [\text{A}] \quad (7.15)$$

Stąd dla modułów mamy:

$$\underline{I}_{sN} \approx \underline{I}_{rN} \frac{m_r k_{wr} z_r}{m_s k_{us} z_s} = \underline{I}_{rN} \frac{1}{\vartheta_i} \quad [\text{A}] \quad (7.16)$$

gdzie wielkość

$$\vartheta_i = \frac{m_s k_{us} z_s}{m_r k_{wr} z_r} \quad (7.17)$$

Po wprowadzeniu do wyrażenia (7.16) zredukowanego prądu wirnika:

$$I'_{rN} = I_{rN} \frac{1}{\vartheta_i} \quad [\text{A}] \quad (1.16)$$

otrzymamy odpowiednio zredukowane do uzwojenia stojana wartości rezystancji i reaktancji rozproszenia uzwojenia wirnika:

$$R'_r = \vartheta_i^2 R_r \quad X'_{\sigma r} = \vartheta_i^2 X_{\sigma r} \quad (1.17)$$

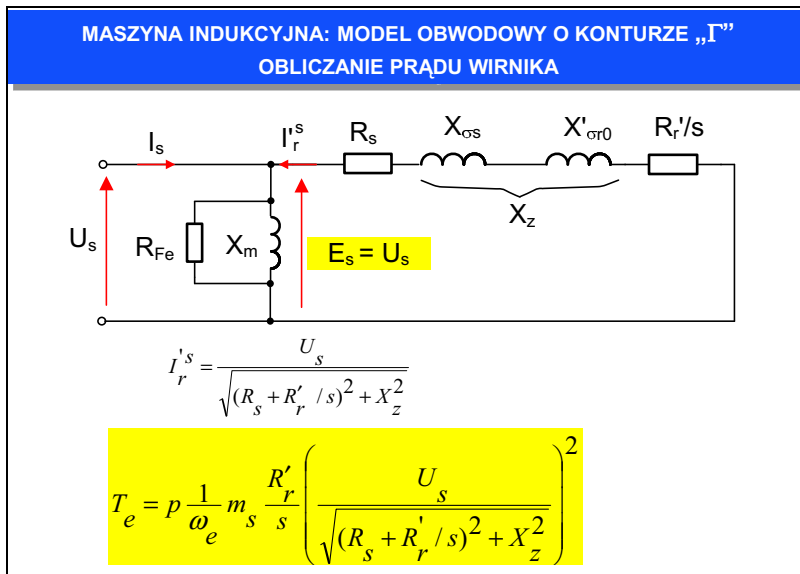
Właściwości silnika indukcyjnego w stanie zwarcia określone są głównie przez strumienie rozproszenia uzwojenia stojana $\Phi_{\sigma s}$ i wirnika $\Phi_{\sigma r}$ oraz stratami w miedzi ΔP_{Cus} oraz ΔP_{Cur} zależnymi od wymiarów i rozmieszczenia uzwojeń.

Właściwości te odwzorowuje się wielkościami obwodowymi:

- $R_z = R_s + R'_r$ – rezystancją zwarcia silnika indukcyjnego,
- $X_z = X_{\sigma s} + X'_{\sigma r}$ – reaktancja zwarcia silnika indukcyjnego,
- $Z_z = R_z + jX_z$ – impedancją zwarcia silnika indukcyjnego.

7.3.3. Stan obciążenia – charakterystyka mechaniczna (naturalna)

Celem analizy stanu obciążenia jest wyprowadzenie wzorów na moment obrotowy – metodą energetyczną bilansu mocy. Podstawę analizy stanowi uproszczony model obwodowy MI o konturze „Γ” (rys. 7.13).



Rys. 7.13. Uproszczony model obwodowy maszyny indukcyjnej o konturze „Γ”

Zakładając, że wartość rezystancji stojana jest bliska zero $R_s \cong 0$ poślizg krytyczny wyraża zależność:

$$s_k = R'_r / X_z \quad (7.18)$$

Wówczas równanie na moment elektromagnetyczny upraszcza się do postaci:

$$T_e \cong pm_s \frac{U_s^2}{\omega_e X_z} \frac{s s_k}{s^2 + s_k^2} \quad (7.19)$$

Należy zauważyć, że moment elektromagnetyczny jest proporcjonalny do kwadratu napięcia zasilającego:

$$T_e \sim U_s^2 \quad (7.20)$$

Przy poślizgu krytycznym osiągamy moment maksymalny:

$$s = s_k \rightarrow \frac{dT_e}{ds} = 0 \Rightarrow T_e = T_{emx} \cong \frac{1}{2} p m \frac{U_s^2}{\omega_e X_z} \quad (7.21)$$

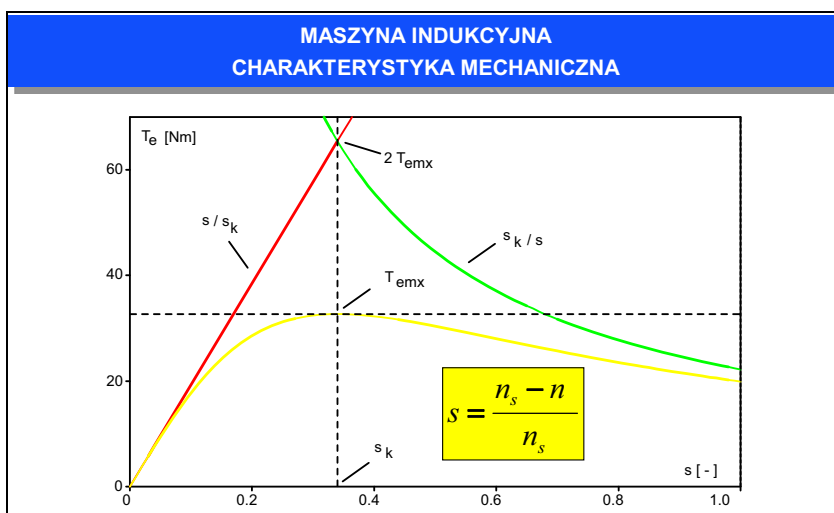
Przy prędkościach bliskich prędkości synchronicznej charakterystyka mechaniczna jest liniowa:

$$s \rightarrow 0 \rightarrow s^2 \cong 0 \Rightarrow T_e \sim \frac{s}{s_k} \quad (7.22)$$

Przy małych prędkościach charakterystyka mechaniczna ma kształt hiperboliczny:

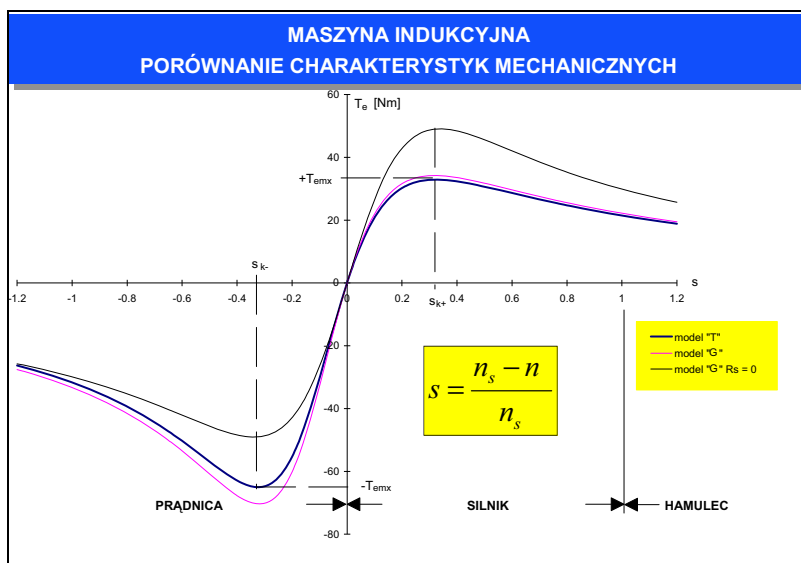
$$s \rightarrow 1 \rightarrow s_k^2 \cong 0 \Rightarrow T_e \sim \frac{s_k}{s} \quad (7.23)$$

Interpretację graficzną powyższych rozważań przedstawiono na rys. 7.14.



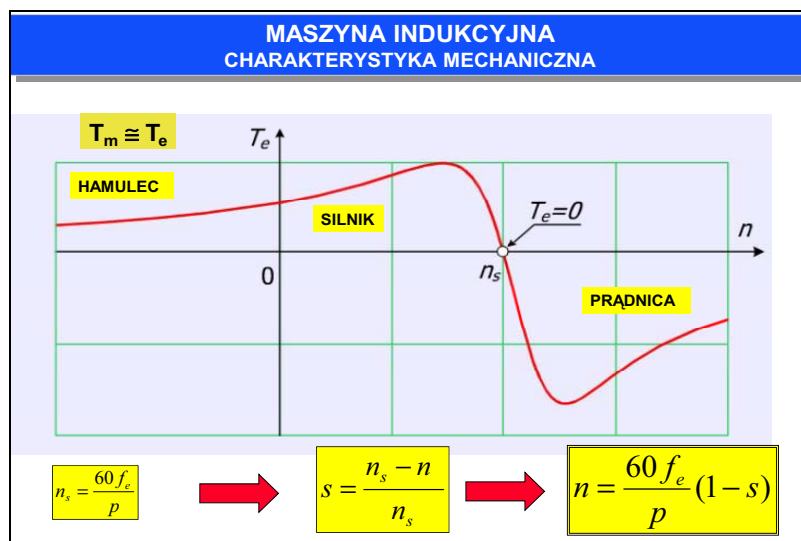
Rys. 7.14. Charakterystyka mechaniczna maszyny indukcyjnej

Porównanie charakterystyk mechanicznych $T_e(s)$ wyznaczonych dla różnych stopni uproszczenia modelu obwodowego MI przedstawiono na rys. 7.15.



Rys. 7.15. Porównanie charakterystyk mechanicznych maszyny indukcyjnej dla różnych modeli obwodowych

Charakterystykę mechaniczną w funkcji prędkości obrotowej z zaznaczeniem obszarów pracy prądnicowej, silnikowej i hamulcowej pokazano na rys. 7.16.



Rys. 7.16. Charakterystyka mechaniczna maszyny indukcyjnej

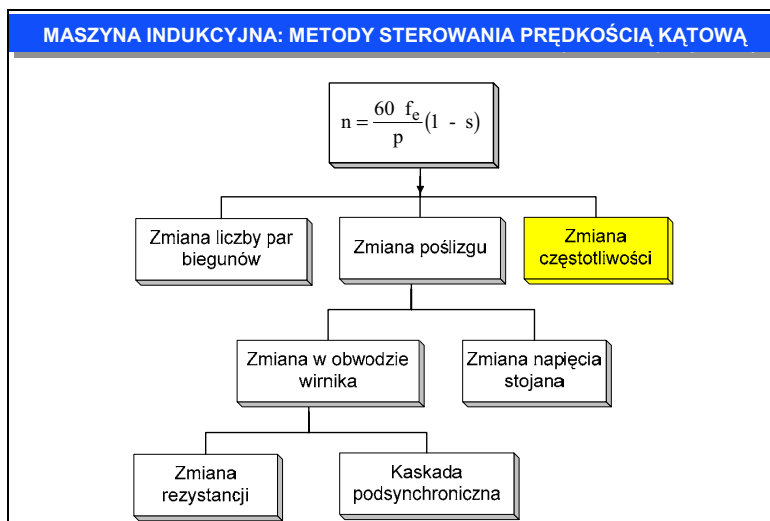
7.4. Sterowanie prędkością kątową/obrotową

Podstawę określenia metod sterowania prędkością kątową/obrotową maszyny indukcyjnej stanowią wzory:

$$\omega_m = \frac{2\pi f_e}{p} (1 - s) \quad (7.24)$$

$$n = \frac{60 f_e}{p} (1 - s) \quad (7.25)$$

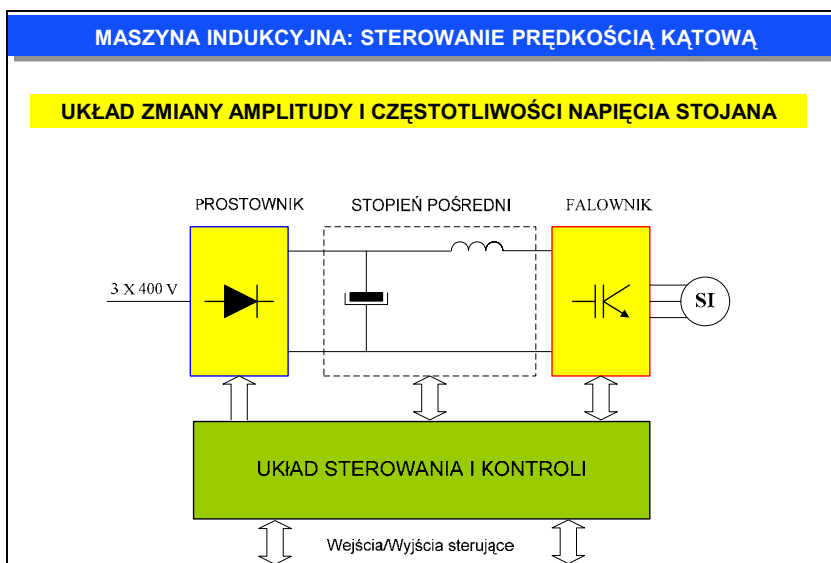
Metody sterowania prędkością obrotową maszyny indukcyjnej, wynikające z wyżej przytoczonych wzorów, przedstawiono na rys. 7.17.



Rys. 7.17. Metody sterowania prędkością obrotową maszyny indukcyjnej

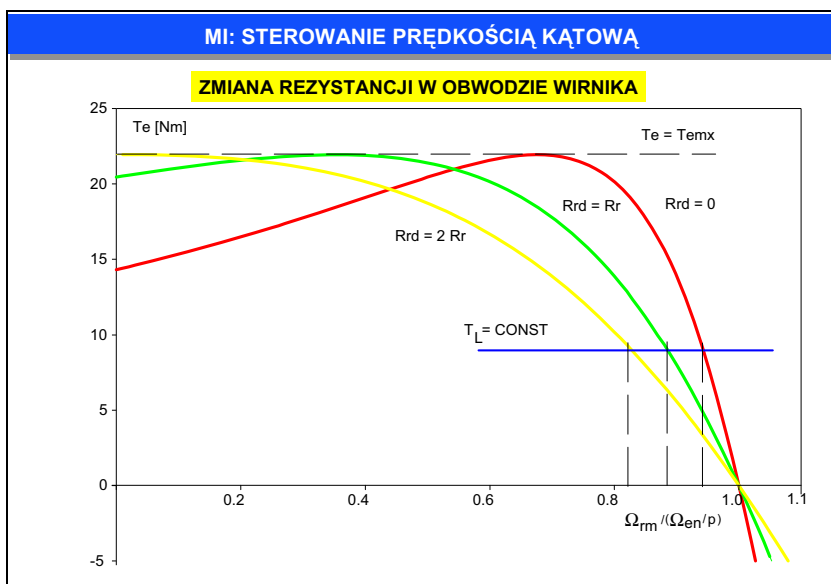
Jak wynika z przedstawionych wzorów istnieją trzy podstawowe metody sterowania prędkością obrotową wirnika silnika indukcyjnego:

- zmiana liczby par biegunów – metoda umożliwia skokową zmianę prędkości obrotowej, jest związana bezpośrednio ze zmianą prędkości wirowania strumienia stojana;
- zmiana poślizgu – poślizg silnika indukcyjnego można regulować poprzez zmianę wartości napięcia zasilającego silnik (silniki pierścieniowe i klatkowe), włączenie dodatkowej rezystancji w obwód wirnika (silniki pierścieniowe, moc poślizgu tracona jest na dodatkowych rezystorach, mało ekonomiczny sposób regulacji prędkości obrotowej), dołączenie prostowników niesterowanego i sterowanego w obwód wirnika (silniki pierścieniowe, część mocy poślizgu jest przekazywana do sieci zasilającej silnik, następuje zwrot energii elektrycznej do sieci);
- zmiana częstotliwości napięcia zasilającego – w przypadku zmiany częstotliwości napięcia zasilającego konieczna jest też zmiana wartości amplitudy podstawowej harmonicznej napięcia. W szerokim zakresie zmian częstotliwości utrzymywana jest stała wartość stosunku U_s/f_e (wynika to z konieczności utrzymania stałej wartości strumienia głównego maszyny, pomijalnie mała wartość rezystancji uzwojeń stojana maszyny w stosunku do wartości reaktancji), jednak w przypadku małych wartości częstotliwości utrzymanie stałej wartości strumienia wymaga zwiększenia wartości amplitudy podstawowej harmonicznej napięcia. Wynika to z tego, że przy małych wartościach częstotliwości wartość rezystancji uzwojeń stojana maszyny jest porównywalna z wartością reaktancji. Regulacja prędkości obrotowej przez zmianę wartości częstotliwości napięcia zasilającego umożliwia uzyskanie dowolnej prędkości obrotowej wirnika, nie powoduje takiego spadku sprawności układu jak w przypadku zmiany poślizgu poprzez włączenie dodatkowych rezystorów w obwód wirnika, wymaga jednak zastosowania specjalnego układu zasilania o regulowanej wartości częstotliwości i amplitudy napięcia zasilającego (falownika) (rys. 7.18).



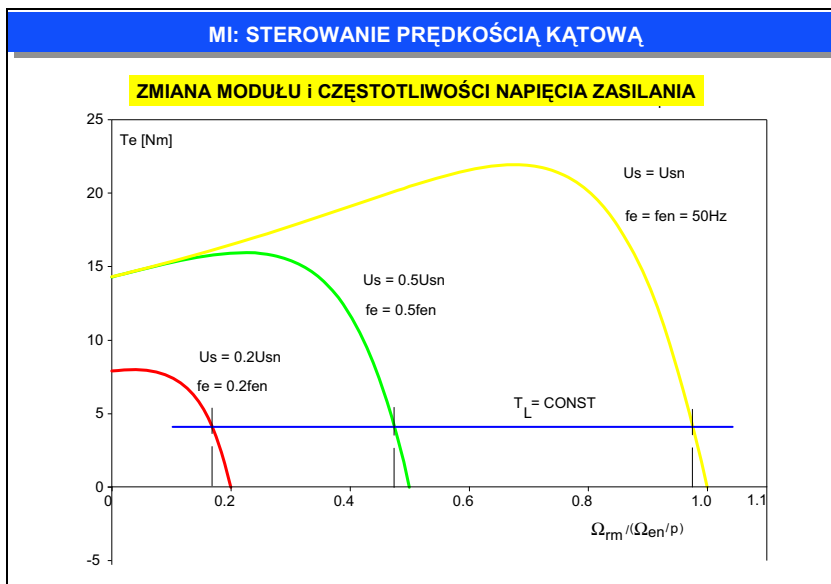
Rys. 7.18. Układ zmiany wartości amplitudy i częstotliwości napięcia stojanej maszyny indukcyjnej

Na rysunku 7.19 przedstawiono charakterystyki mechaniczne silnika indukcyjnego przy zmianie wartości rezystancji dodatkowej włączanej w obwód wirnika.



Rys. 7.19. Charakterystyki mechaniczne maszyny indukcyjnej przy zmianie wartości rezystancji dołączonej do obwodu wirnika

Na rysunku 7.20 przedstawiono charakterystyki mechaniczne przy zmianie wartości amplitudy i częstotliwości napięcia stojanego.

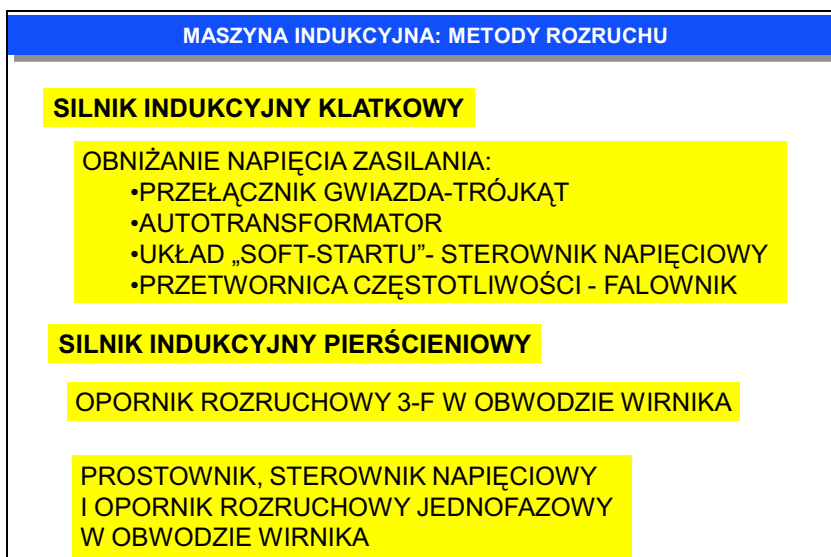


Rys. 7.20. Charakterystyki mechaniczne maszyny indukcyjnej przy zmianie częstotliwości i amplitudy napięcia stojana

Jedną z największych wad silnika indukcyjnego jest duży prąd rozruchowy, nawet kilka razy większy od prądu znamionowego. Wartość prądu stojana określa zależność:

$$I_s \cong \frac{U_s}{\sqrt{(R_s + R_r' / s)^2 + X_z^2}} \quad (7.26)$$

W celu ograniczenia prądu rozruchowego stosuje się metody rozruchu przedstawione na rys. 7.21.



Rys. 7.21. Metody rozruchu silnika indukcyjnego

7.5. Silniki indukcyjne specjalne

Zagadnienia maszyn indukcyjnych specjalnych, w szczególności maszyn wielofazowych, będziemy omawiać w rozdz. 8 (maszyny elektryczne specjalne).

7.6. Podsumowanie

Maszyna indukcyjna jest przetwornikiem do elektromechanicznego przetwarzania energii prądu przemiennego i energii mechanicznej. Proces przemiany energii może zachodzić w dwóch kierunkach: maszyna może pracować jako prądnica (generator) lub jako silnik.

Maszyna indukcyjna należy do grupy maszyn prądu przemiennego. Budowa maszyny indukcyjnej oparta jest na wykorzystaniu idei pola o wirującym strumieniu magnetycznym.

Podstawą działania i budowy maszyny indukcyjnej są dwa odkrycia: efektu magnetycznego prądu (Hans Oersted) i zjawiska indukcji elektromagnetycznej (Michał Faraday).

W rozdziale omówiono głównie maszyny indukcyjne/asynchroniczne pracujące w systemach napędowych. Na wstępie krótko opisano budowę maszyny indukcyjnej, następnie przedstawiono jej model fizyczny i obwodowy oraz rozważono trzy stany pracy maszyny: stan jałowy, stan zwarcia i stan obciążenia. Kolejno opisano charakterystyki ruchowe maszyny indukcyjnej pracującej w systemie. Przedstawiono także najważniejsze charakterystyki ruchowe silnika indukcyjnego – charakterystyki mechaniczne i metody ich kształtowania.

7.7. Pytania

1. Podać rodzaje budowy silników indukcyjnych. Wymienić elementy stojana i wirnika silnika indukcyjnego.
2. Opisać zasadę działania silnika indukcyjnego w ujęciu ciągu logicznego przyczyna - skutek.
3. Narysować podstawowy (elementarny) model fizyczny (układ dwóch przepływów) silnika indukcyjnego. Wykazać analitycznie, wprowadzając dwóch obserwatorów mierzących prędkość kątową pola wirującego wirnika, że w stanie pracy ustalonej silnika układ dwóch przepływów jest nieruchomy względem siebie). Jakie są tego konsekwencje?
4. Opisać obraz fizyczny (składowe strumieni) i model obwodowy (schemat zastępczy) silnika indukcyjnego dla biegu jałowego.
5. Opisać obraz fizyczny (składowe strumieni) i model obwodowy (schemat zastępczy) silnika indukcyjnego w stanie zwarcia.
6. Narysować modele silnika indukcyjnego : fizyczny (składowe strumieni) i obwodowy (schemat zastępczy). Podać i wyjaśnić wzajemne relacje między wielkościami modelu fizycznego a zmiennymi i parametrami modelu obwodowego (schematu zastępczego).
7. Podać i wyjaśnić analogie modelu obwodowego (schematu zastępczego) silnika indukcyjnego i transformatora.
8. Narysować model obwodowy (schemat zastępczy) silnika indukcyjnego, nazwać tworzące go elementy i dokonać interpretacji fizycznej tych elementów.
9. Podać, nazwać i objaśnić podstawowe wielkości charakterystyczne i zależności dotyczące silników indukcyjnych.
10. Na podstawie jakich prób wyznacza się parametry modelu obwodowego (schematu zastępczego) silnika indukcyjnego? Podać zależności między wynikami tych prób i parametrami modelu obwodowego.
11. Podać charakterystyki biegu jałowego badanego silnika indukcyjnego i uzasadnić fizycznie oraz analitycznie ich kształt.

12. Podać charakterystyki zwarcia badanego silnika indukcyjnego i uzasadnić fizycznie oraz analitycznie ich kształt.
13. Podać wykresy wartości parametrów modelu obwodowego (schematu zastępczego) badanego silnika indukcyjnego w funkcji napięcia zasilania U_s : oddzielnie dla gałęzi magnesującej (podłużnej) i gałęzi zwarciowej (poprzecznej) schematu. Uzasadnić fizycznie oraz analitycznie ich kształt.

7.8. Zagadnienia obliczeniowe i pomiarowe (laboratoryjne)

Przerobienie kompletu zadań, które naświetlałyby niektóre zagadnienia z wykładów, jest jednym ze sposobów dopomożenia studentom. Zadania stwarzają dobrą okazję do uzupełnienia materiału wykładowego oraz sprawiają, że wyłożone zagadnienia stają się bardziej realne, pełniejsze i lepiej ugruntowane w umysłach.

Zagadnieniom obliczeniowym maszyn indukcyjnych/asynchronicznych poświęconych jest szereg podręczników i skryptów [13, 18, 43, 50, 56–58]. Szczególnie cenny jest najnowszy podręcznik [43] obejmujący zagadnienia obliczeniowe w eksploatacji maszyn elektrycznych.

Zagadnienia pomiarowe (laboratoryjne) dotyczące maszyn synchronicznych omówiono w podręczniku [24] i skrypcie [53].

7.9. Literatura

Książki/podręczniki

- [1] Adkins B., *The general theory of electrical machines*. Chapman and Hall, London, 1957.
- [2] Arnold E., J. I. la Cour, *Die Wechselstromtechnik*, 5 Band, 1 Teil, Die Induktionsmaschinen 1903, Springer.
- [3] Chapman S. J., *Electric Machinery Fundamentals*, 4th ed., McGraw Hill Book Co (Education), 2004.
- [4] Chiasson J., *Modeling and High Performance Control of Electric Machines*, IEEE Press Series on Power Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2005.
- [5] Dąbrowski M., *Konstrukcja maszyn elektrycznych*, Warszawa, WNT 1977.
- [6] Dąbrowski M., *Projektowanie maszyn prądu przemiennego*, WNT, Warszawa, 1994.
- [7] Demenko A., *Obwodowe modele układów z polem elektromagnetycznym*. Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań, 2004
- [8] Dubicki B., *Maszyny elektryczne. Uzwojenia prądu przemiennego*, T.2, PWN, Warszawa, 1958.
- [9] Dubicki B., *Maszyny elektryczne. Silniki indukcyjne*, T.3, PWN, Warszawa, 1964.
- [10] Fitzgerald A. E., Kingsley Ch., Jr., Umans. S. D., *Electric Machinery*, 6th ed., McGraw-Hill, 2003.
- [11] Gieras J.F., *Advancements in Electric Machines*, Heidelberg, Springer 2009.
- [12] Gieras J.F., Gieras I.AA., *Electrical energy utilization*, Wyd. Adam Marszałek, Toruń 1998.
- [13] Glinka T., Mizia W., Żywiec A., Hickiewicz J., *Zadania z maszyn elektrycznych*, WNT, Warszawa, 1973.
- [14] Kaczmarek T., Zawirski K., *Układy napędowe z silnikiem synchronicznym*, Poznań, Wyd. Pol. Poznańskiej 2000.
- [15] Kamiński G., Przyborowski W., *Uzwojenia i parametry maszyn elektrycznych*, OWPW, Warszawa, 2005.
- [16] Kaniewski S. Roszczyk S., Jaczewski J., Manitius Z., *Silniki indukcyjne asynchroniczne*, PWN Warszawa 1956.
- [17] Kaźmierkowski M.P., Tunia H., *Automatic control of converter-fed drives*. Elsevier, Amsterdam, 1994.
- [18] Koter T., Pełczewski W., *Maszyny elektryczne w zadaniach*, Warszawa, Wydaw. Nauk.-Tech., 1975.
- [19] Krause P.C., *Analysis of electric machinery*. McGraw-Hill, New York, 1986.
- [20] Kron G., *Equivalent circuit of electric machinery*. John Wiley and Sons, New York, 1951
- [21] Królikowski L., *Rozwój konstrukcji maszyn elektrycznych do końca XIX wieku*, Wrocław, Zakł. Nar. im. Ossolińskich, 1986.
- [22] Latek W., *Zarys maszyn elektrycznych*. WNT, Warszawa, 1974.

- [23] Latek W., *Teoria maszyn elektrycznych*. Wyd. 2. WNT, Warszawa, 1987.
- [24] Latek W., *Badanie maszyn elektrycznych w przemyśle*, WNT, Warszawa, 1987
- [25] Latek W., *Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach*, Warszawa Wydaw. Nauk.-Tech., 1994.
- [26] Levi E., Panzer M., *Electromechanical power conversion: low-frequency, low-velocity conversion processes*, McGraw-Hill, 1966.
- [27] Lyshevski S. E., *Electromechanical systems, electric machines, and applied mechatronics*. CRC Press, Boca Raton, FL, 1999.
- [28] Nogarède B., *Électrodynamique appliquée. Bases et principes physiques de l'électrotechnique*, Dynod, Paris 2005
- [29] Mohan N.: *Electric drives. An integrative approach*. MNPERE, Minneapolis 2000.
- [30] Miesel J., *Zasady elektromechanicznego przetwarzania energii*. WNT, Warszawa, 1970.
- [31] O'Kelly D., *Performance and control of electrical machines*, London, McGraw-Hill, 1991.
- [32] Owczarek J., i in., *Elektryczne maszynowe elementy automatyk*, Warszawa, WNT, 1983/86.
- [33] Paska J., *Wytwarzanie energii elektrycznej*, Oficyna Wyd. Pol. Warszawskiej, Warszawa, 2005.
- [34] Paszek W. *Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Wydanie WNT, Warszawa, 1986.
- [35] Plamitzer A. M., *Maszyny elektryczne*. Wyd. 7. WNT, Warszawa, 1982.
- [36] Puchała A., *Dynamika maszyn i układów elektromechanicznych*. PWN, Warszawa, 1977.
- [37] Puchała A., *Elektromechaniczne przetworniki energii*. Monografia wykładów. BOBR Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice, 2002..
- [38] Rothert A., *Teoria i konstrukcja maszyn elektrycznych*, Lwów 1910.
- [39] Roszczyk S., *Teoria maszyn elektrycznych*. WNT, Warszaw, 1979.
- [40] Śliwiński T., *Metody obliczania silników indukcyjnych*, PWN, Warszawa, 2008.
- [41] Śliwiński T., *Silniki jednofazowe*, PWN, Warszawa, 1967.
- [42] Sochocki R., *Mikromaszyn elektryczne*, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej 1996.
- [43] Staszewski P., Urbański W., *Zagadnienia obliczeniowe w eksploatacji maszyn elektrycznych*, Warszawa, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej 2009.
- [44] Turowski J., *Podstawy mechatroniki*, Wydawnictwo WSHE, Łodzi, 2008.
- [45] Vas P., *Electrical machines and drives. A space-vector theory approach*. Oxford Science Publications, Oxford, 1992.
- [46] White D.C., Woodson H.H., *Electromechanical Energy Conversion*. J. Wiley, New York, 1959.
- [47] Woodson H.H., Melcher J.R., *Electromechanical dynamics. Part1: Discrete systems. Part2: Fields, forces, and motion. Part3: Elastic and Fluid media*. J. Wiley, New York, 1968.

Skrypty

- [48] Kamiński G., Kosk J., Przyborowski W., *Laboratorium maszyn elektrycznych*, OWPW, Warszawa, 2005.
- [49] Karwacki W., *Maszyny elektryczne*. Oficyna Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław, 1994.
- [50] Łukaniszyn M., *Zbiór zadań z maszyn elektrycznych dla studentów studiów zaocznych*, Skrypt Nr 226, Oficyna Wyd. Pol. Opolskiej, Opole, 2000.
- [51] Manitius Z., *Maszyny asynchroniczne*, wyd. 2, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk, 1978.
- [52] Manitius Z., *Maszyny elektryczne, cz.2*, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk, 1982.
- [53] Manitius Z (red.), *Laboratorium maszyn elektrycznych*, wyd. 2, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk, 1990.
- [54] Matulewicz W., *Maszyny elektryczne. Podstawy*, wyd. 3, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk, 2008.
- [55] Miksiewicz R., *Maszyny elektryczne. Zagadnienia obliczeniowa z wykorzystaniem programu MA-THCAD*, Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice, 2000.
- [56] Miksiewicz R., *Zastosowanie programu Mathcad do rozwiązywania statycznych zagadnień obliczeniowych maszyn elektrycznych i transformatorów*, Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice, 2007.
- [57] Rafalski W., Ronkowski M., *Zadania z maszyn elektrycznych, Cz. I: Transformatory i maszyny asynchroniczne*, wyd. 4, Wyd. Politechniki Gdańskiej, 1994.
- [58] Roszczyk S., Witkowski J., *Elektromechaniczne przetworniki energii w zadaniach*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1982.
- [59] Skwarczyński J., Tertel Z., *Maszyny elektryczne. Teoria. Cz. 1, 2*. Wyd. AGH, Kraków, 1995 (Cz. 1), 1997 (Cz. 1).

- [60] Skwarczyński J., Tertil Z., *Elektromechaniczne przetwarzanie energii*. Uczelniane Wyd. Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, 2000.

Artykuły/referaty

- [61] Orłowska-Kowalska T., *Stan obecny i tendencje rozwojowe napędu elektrycznego*, Przegl. Elektrotechniczny, nr 3, 2004, pp. 185–197.

Rozprawy doktorskie

- [62] Kostro G., *Analiza parametrów obwodowych połączeń czołowych uzwojeń silników asynchronicznych*, Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Wydz. Elektrotechniki i Atoamtyki, Gdańsk, 2006.

Materiały do nauczania interaktywnego (e-learning)

- [63] Interactive and Unified E-Based Education and Training for Electrical Engineering. INETELE. Project Leonardo da Vinci No: CZ/02/B/F/PP/134009, 2002 - 2005. Boboń A., Kudła J., Miksiewicz R.: Maszyny elektryczne prądu przemiennego (asynchroniczne i synchroniczne). Multimedialny podręcznik elektroniczny wchodzący w skład projektu INETELE (www.tuke.sk/inetele/)

Adresy internetowe ośrodków akademickich

- [64] Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Electrical Engineering and Computer Science. <http://www.eecs.mit.edu/>
- [65] 6.061 / 6.690 Introduction to Electric Power Systems (Undergraduate Courses/ Graduate Courses) <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Electrical-Engineering-and-Computer-Science/6-061Spring-2007/CourseHome/index.htm>
- [66] 6.685 Electric Machines (Graduate Courses) <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Electrical-Engineering-and-Computer-Science/6-685Fall-2005/CourseHome/index.htm>
- [67] Politechnika Warszawska. Zakład Maszyn Elektrycznych. Materiały dydaktyczne: wykłady, ćwiczenia rachunkowe, laboratoria, projektowanie <http://www.ime.pw.edu.pl/zme/>

Ważniejsze normy

- [68] PN-EN 60034-1:2005 Maszyny elektryczne wirujące. Część 1: Dane znamionowe i parametry.
- [69] PN-EN 60034-5:2004/A 1:2007 Maszyny elektryczne wirujące. Część 5: Stopnie ochrony zapewniane przez rozwiązania konstrukcyjne maszyn elektrycznych wirujących (kod IP). Klasyfikacja.
- [70] PN-EN 60034-7:2005 Maszyny elektryczne wirujące. Klasyfikacja form wykonania i sposobów montażu (kod IM).
- [71] PN-EN 60034-6:1999 Maszyny elektryczne wirujące. Sposoby chłodzenia (kod IC)
- [72] PN-IEC 72-1:1996 Maszyny elektryczne wirujące. Wymiary i ciągi mocy maszyn elektrycznych wirujących. Rozmiar obudowy od 56 do 400 i rozmiar kołnierza od 55 do 1080.
- [73] PN-E-06700:1991 Maszyny elektryczne wirujące. Terminologia
- [74] PN-EN 60027-4:2007 Oznaczenia wielkości i jednostek miar używanych w elektryce. Maszyny elektryczne wirujące.

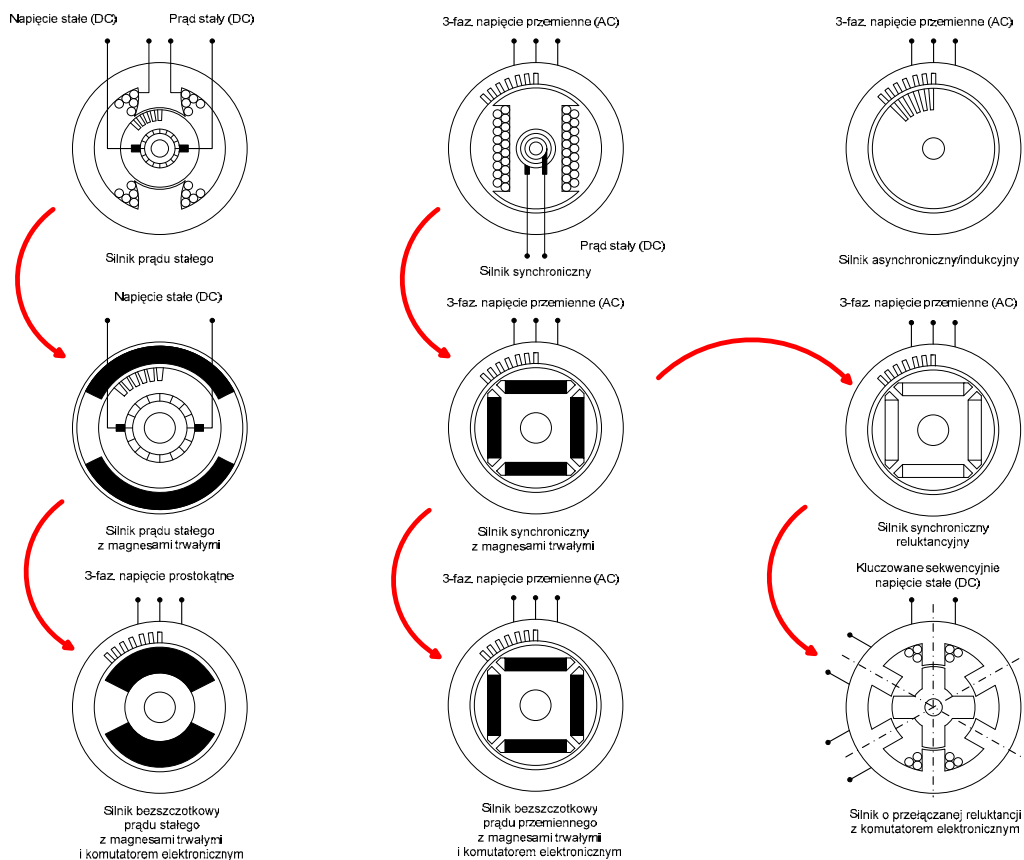
Ważniejsze adresy internetowe producentów/dystrybutorów

- [75] BOBR Maszyn Elektrycznych „KOMEL” www.komel.katowice.pl
- [76] ABB Sp. z o.o., www.abb.pl/ProductGuide/
- [77] Siemens, www.siemens.com
- [78] Zakład Maszyn Elektrycznych EMIT S.A., Żychlin, www.cantonigroup.com/pl/motors/emit/
- [79] Fabryka Maszyn Elektrycznych INDUKTA, Bielsko-Biała, www.indukta.com.pl
- [80] F.S.E. BESEL S.A., Brzeg www.besel.pl
- [81] Spółka Maszyny Elektryczne CELMA S.A., Cieszyn, www.cantonigroup.com/pl/motors/celma/

8. Maszyny elektryczne specjalne

8.1. Uwagi wstępne

Wraz z postępującym rozwojem techniki półprzewodnikowej (energoelektroniki) następuje odchodzenie od konwencjonalnego środowiska elektromechanicznego przetwarzania energii do środowiska rozbudowanego o przekształtniki statyczne, tzw. „przekształtnikowego środowiska przetwarzania energii” (zmienna częstotliwość i zmienny moduł napięcia). Należy zauważyć, że to „nowe” środowisko, w porównaniu ze środowiskiem konwencjonalnym – uważanym w zasadzie za „zamknięte”, jest środowiskiem nadal „otwartym”, i to z wieloma dotąd jeszcze nie określonymi opcjami. Na przykład, istnieje dowolność wyboru: charakteru źródła zasilania maszyny – może być o charakterze napięciowym lub prądowym, liczby faz, liczby biegunów, wartości częstotliwości itd.



Rys. 8.1. Evolucja silników elektrycznych: od silników szczotkowych do silników bezszczotkowych (wersja zmodyfikowana w stosunku do podanej w publikacji [16])

W tych warunkach istnieje wiele możliwości budowy układu napędowego i brak jest jednoznacznej odpowiedzi, który z nich jest najlepszy [24]. Wspomniane warunki zasilania i pracy maszyny elektrycznej, tak różne od konwencjonalnych, stwarzają potrzebę ich „nowej” klasyfikacji. Ewolucję silników elektrycznych przedstawiono na rys. 8.1.

W wierszu pierwszym występują tzw. silniki klasyczne: silnik prądu stałego, silnik synchroniczny o wzbudzeniu elektromagnetycznym, silnik asynchroniczny (pierścieniowy lub klatkowy). Określenie „silniki klasyczne” oznacza, że:

- produkują stały moment,
- mogą być zasilane bezpośrednio z sieci napięcia stałego lub przemiennego,
- mogą pracować bez elektronicznych układów sterowania [16].

Silniki w wierszu drugim powstały przez zastąpienie w silnikach klasycznych wzbudzenia elektromagnetycznego wzbudzeniem o magnesach trwałych. W przypadku silnika synchronicznego taka modyfikacja prowadzi do silnika bezszczotkowego napięcia przemiennego. W przypadku silnika prądu stałego uzyskanie konstrukcji bezszczotkowej wymaga jeszcze umieszczenia wzbudzenia na wirniku.

Osobną grupę maszyn działających w oparciu o pole wirujące, a raczej pole wirujące skokowo (dyskretnie), stanowią silniki skokowe, które na ogół pracują bez potrzeby sterowania wewnętrznego. Można wyróżnić trzy ich typy podstawowe [16]:

- silniki skokowe o przełączalnej reluktancji (ang. *switched-reluctance stepper motors*);
- silniki skokowe o magnesach trwałych (ang. *permanent magnet stepper motors*);
- silniki skokowe hybrydowe (łączą cechy dwóch poprzednich typów).

Podstawowa funkcja silników skokowych to przetwarzanie informacji. Mogą nie tylko pracować w trybie pracy skokowej, ale także w trybie pracy quasi-ciągłej. Dodanie sterowania wewnętrznego poprawia ich właściwości dynamiczne, a wtedy maszyny z przełączalną reluktancją pełnią funkcję przetworników energii i nazywane są silnikami o przełączalnej reluktancji (ang. *switched-reluctance motors*) [16].

W rozdziale omówimy następujące maszyny elektryczne specjalne:

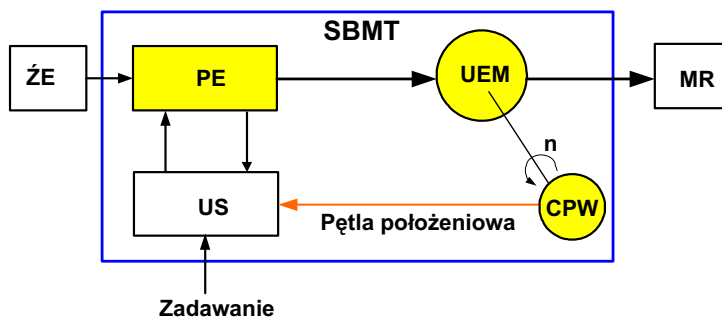
- silniki bezszczotkowe z magnesami trwałymi (walcowe/tarczowe) (dc i ac),
- silniki indukcyjne wielofazowe,
- silniki reluktancyjne przełączalne,
- silniki o ruchu złożonym,
- silniki piezoelektryczne.

8.2. Silniki bezszczotkowe z magnesami trwałymi

Rozwój maszyn elektrycznych jest ściśle związany z rozwojem inżynierii materiałowej, jak również przyrządów półprzewodnikowych mocy i mikroprocesorów stanowiących podstawowe elementy współczesnych układów energoelektronicznych do przetwarzania i sterowania mocy elektrycznej. Zastosowanie magnesów trwałych (MT) o dużych gęstościach energii pozwala budować maszyny elektryczne, które charakteryzują się lepszymi parametrami eksploatacyjnymi, np. większym momentem, wyższą sprawnością. Różnorodność parametrów magnetycznych i mechanicznych magnesów wpływa na wielką różnorodność konstrukcji wytwarzanych obecnie maszyn elektrycznych z MT. Pełne wykorzystanie możliwości rozwojowych maszyn bezszczotkowych wzbudzanych MT o dużych gęstościach energii, wymaga badań w obszarze obejmującym: analizę zachodzących zjawisk w procesie przetwarzania energii elektromechanicznej; metody modelowania i symulacji; projektowanie; optymalizację; identyfikację parametrów i diagnostykę.

8.2.1. Formy budowy

Pod pojęciem silnika bezszczotkowego (bezzestykowego) z magnesami trwałymi (SBMT) rozumie się wszystkie maszyny wzbudzone magnesami trwałymi (magnetoelektrycznie), w których wyeliminowano zestyk ślizgowy – komutator elektromechaniczny oraz szczotki (klasyczny silnik prądu stałego) lub pierścienie ślizgowe i szczotki (klasyczny silnik synchroniczny). Ze złożenia SBMT są zasilane ze źródła energii elektrycznej poprzez odpowiednio sterowany (zależnie) przekształtnik energoelektryczny (rys. 8.2).



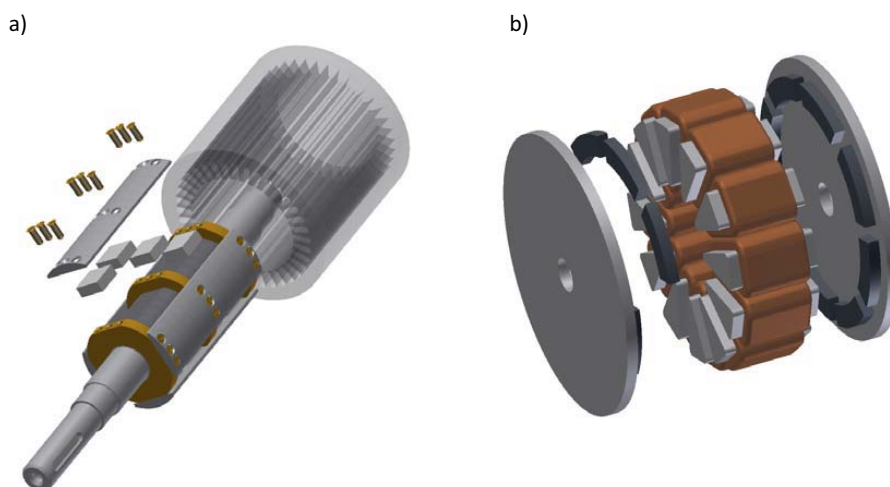
Rys. 8.2. Schemat układu napędowego z silnikiem bezszczotkowym z magnesami trwałymi (SBMT): UEM – układ elektromechaniczny silnika, ŻE – źródło energii elektrycznej, PE – przekształtnik energoelektryczny, US – układ sterowania, CPW – czujnik położenia wirnika, MR – maszyna robocza (obciążenie)

Funkcją przekształtnika jest realizacja transformacji energii źródła zasilania według określonego algorytmu sterowania. Należy podkreślić, że istotną cechą algorytmu sterowania jest zasada sterowania wewnętrznego (z pętli położeniową), tzn. nadrzędnym sygnałem sterowania jest sygnał określony położeniem kątowym wirnika SBMT. Tak określony algorytm sterowania powoduje, że SBMT ma właściwości ruchowe (charakterystyki mechaniczne) analogiczne do właściwości ruchowych silnika prądu stałego z komutatorem elektromechanicznym. Stąd często spotykana nazwa to: silnik bezszczotkowy prądu stałego (ang. *brushless dc motor*).

Pod względem konstrukcyjnym SBMT mogą być pochodną maszyn prądu stałego lub maszyn synchronicznych, w których wzbudzenie elektromagnetyczne zastąpiono magnesami trwałymi umieszczonymi na wirniku. SBMT budowane są w różnorodnych rozwiązaniach konstrukcyjnych, różniących się przede wszystkim konstrukcją twornika i obwodu wzbudzenia. Zasadniczy podział SBMT wynika z ich struktury elektromagnetycznej: buduje się silniki o strukturze walcowej [16] i tarczowej [5, 12](rys. 8.3).

Drugi zasadniczy podział SBMT wynika z rozkładu indukcji w jego szczeliny roboczej. Z rozkładem indukcji stowarzyszony jest przebieg napięcia indukowanego (SEM) rotacji, a od niego zależy metoda określania położenia kąowego wirnika [17]. Wg kryterium przebiegu napięcia indukowanego wyróżnia się [8, 18, 20]:

- silniki z trapezoidalnym przebiegiem napięcia indukowanego rotacji, zasilane prądem o przebiegu prostokątnym (w przybliżeniu) – przebiegi analogiczne do prądu w cewkach klasycznych silników prądu stałego (silniki komutatorowe),
- silniki z sinusoidalnym przebiegiem napięcia indukowanego rotacji, zasilane prądem o przebiegu sinusoidalnym – przebiegi analogiczne do prądu w cewkach klasycznych silników prądu przemiennego (silniki synchroniczne).



Rys. 8.3. Struktury SBMT: a) walcowa, b) tarczowa [10, 12]



Rys. 8.4. Podział silników z magnesami trwałymi

Napędy wykorzystujące SBMT cieszą się obecnie dużą popularnością [19]. Opanowują one coraz szerszy obszar zastosowań: od silników małej mocy – wykorzystywanych w napędach dysków komputerowych, czy też licznych urządzeniach AGD, poprzez silniki w układach napędowych samochodów hybrydowych i elektrycznych a nawet dużych jednostek morskich [6, 8, 9]. Popularność SBMT wynika z ich doskonałych właściwości regulacyjnych, które predysponują je do zastosowań w systemach napędowych realizujących wysokiej jakości regulację prędkości obrotowej lub położenia [8, 9].

SBMT, w porównaniu z maszynami indukcyjnymi i maszynami komutatorowymi prądu stałego, wyróżniają się:

- wyższym stosunkiem momentu obrotowego do momentu bezwładności,
- wyższym stosunkiem mocy do masy,
- wyższą sprawnością,
- mniejszą awaryjnością.

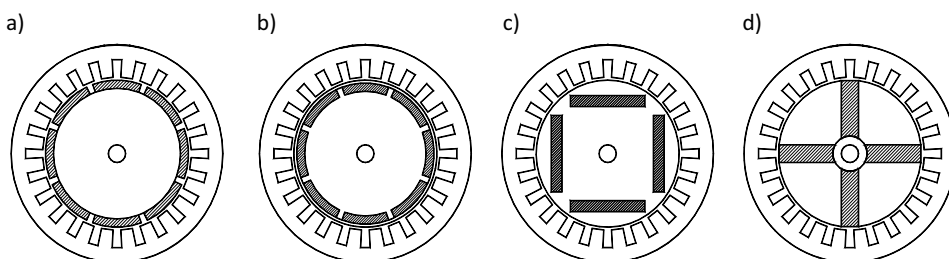
Ponadto SBMT charakteryzują się dobrym rozpraszaniem ciepła (straty energii występują praktycznie w stojanie, skąd ciepło może być łatwo odprowadzane poprzez kadłub, a w przypadku silników o większych mocach może być zastosowany układ chłodzenia wodnego), małą bezwładnością wirnika oraz możliwością pracy w bardzo szerokim zakresie prędkości obrotowej.

Zastosowanie magnesów trwałych o dużych gęstościach energii stwarza nowe problemy zarówno w budowie samych MSBMT, jak i w projektowaniu zintegrowanych z nimi komutatorów (układów) energoelektronicznych oraz układów sterujących. Jednym z ważniejszych problemów do rozwiązania jest odpowiednie kształtowanie rozkładu pola magnetycznego w SBMT poprzez dobór struktury ich obwodów magnetycznych. Rozkład pola magnetycznego ma decydujący wpływ na parametry całkowite i właściwości eksploatacyjne SBMT.

8.2.2. Rozkład pola magnetycznego

W celu odpowiedniego kształtowania rozkładu pola wzbudzonego magnesami trwałymi stosuje się wirniki o różnorodnych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Konstrukcje te uwzględniają rodzaj zastosowanego magnesu trwałego, kryteria minimalnych kosztów i gabarytów oraz postulowanych parametrów i właściwości eksploatacyjnych maszyn. Najczęściej projektuje się maszyny o strukturze walcowej, z magnesami spolaryzowanymi radialnie do osi wirnika (rys. 8.5) [4, 7, 11, 15]. Można wyróżnić następujące konstrukcje wirnika:

- magnesy mocowane (klejone) na powierzchni rdzenia wirnika (ang. *surface mounted magnets*),
- magnesy umieszczone w rdzeniu tuż pod powierzchnią wirnika (ang. *inset mounted magnets*),
- magnesy zagłębione w rdzeniu wirnika (ang. *buried, interior magnets*),
- magnesy ułożone promieniowo z koncentracją strumienia (ang. *flux concentration*).



Rys. 8.5. Wybrane struktury wirników: a) MT mocowane na powierzchni wirnika, b) MT umieszczone tuż pod powierzchnią wirnika, c) MT zagłębione w wirniku, d) MT ułożone promieniowo z koncentracją strumienia

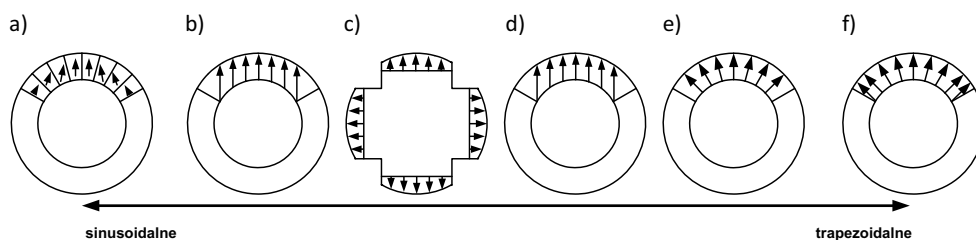
Odpowiedni rozkład pola można uzyskać przez dobór struktury wirnika (mocowanie powierzchniowe lub zagłębione) jak również przez właściwą polaryzację magnetyczną magnesów trwałych.

Mocowanie powierzchniowe MT

Najpowszechniej stosowanym sposobem mocowania magnesów trwałych jest mocowanie powierzchniowe przy zastosowaniu magnesów w kształcie wycinka pierścienia. Wówczas, w celu właściwego ukształtowania pola w szczelinie roboczej, należy dobrać odpowiedni kierunek magnesowania magnesów trwałych (rys. 8.6). Jest to stosunkowo proste i tanie rozwiązanie w przypadku, gdy chcemy uzyskać trapezoidalny rozkład indukcji – stosując magnesy izotropowe namagnesowane promieniowo (rys. 8.6e). Rozkład bardziej trapezoidalny uzyskamy, stosując magnesy o większej gęstości energii przy brzegach (rys. 8.6f) [7].

W celu uzyskania rozkładu sinusoidalnego przy mocowaniu powierzchniowym należy stosować bardziej skomplikowane metody magnesowania lub specjalne układy magnesów trwałych. Wpływa to na wzrost kosztów oraz powoduje komplikacje w procesie produkcji. Rozkład sinusoidalny uzyskamy, stosując:

- specjalny układ magnesów o różnym kierunku magnesowania, zwanych macierzą Halbacha [23],
- układy zwiększające efekt rozproszenia na krańcach magnesów,
- kształtując odpowiednio szczelinę roboczą, np. poprzez zastosowanie nabiegunników (rys. 8.6).



Rys. 8.6. Możliwości kształtowania rozkładu pola w SBMT: a) macierz Hallbacha, b) rozmagnesowanie krańców magnesu, c) kształtowanie szczeliny roboczej, d) magnesowanie równoległe, e) magnesowanie promieniowe, f) domagnesowanie krańców magnesu [7]



Rys. 8.7. Silnik z magnesami trwałymi z mocowaniem powierzchniowym magnesów trwałych [31]

Do wad montażu powierzchniowego należy zaliczyć konieczność zabezpieczenia magnesów przed wpływem sił odśrodkowych przy dużych prędkościach oraz przed rozmagnesowaniem. W celu poprawienia pewności mocowania magnesów stosuje się bandażowanie, jednak powoduje to zwiększenie szczeliny roboczej. W przypadku mocowania powierzchniowego istnieją ograniczone możliwości pracy w stanie odwzbudzenia szczególnie istotnego w przypadku napędów trakcyjnych.

Mocowanie zagłębione MT

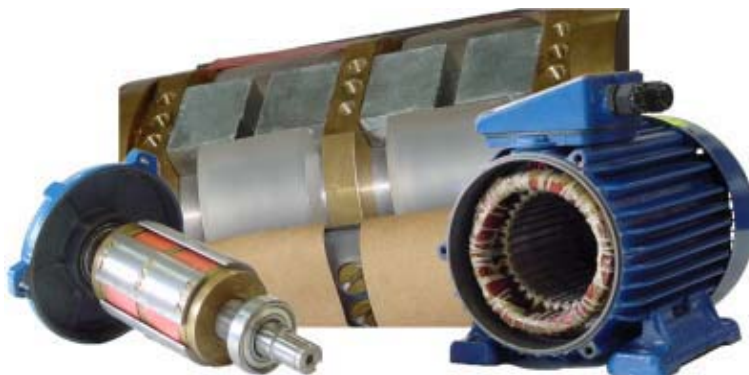
Główną zaletą stosowania silników z magnesami trwałymi zagłębionymi jest stosunkowo prosta możliwość kształtowania rozkładu pola w szczelinie roboczej przy zastosowaniu prostopadłościennych magnesów trwałych (rys. 8.5c, d). Dodatkowo, konstrukcje te cechuje duża odporność na rozmagnesowanie, działanie sił odśrodkowych i możliwość pracy przy osłabionym polu wzbudzenia [3].

Do silników z magnesami trwałymi zagłębionymi zaliczamy:

- silniki z magnesami wewnętrznymi (rys. 8.5c),
- silniki z magnesami mocowanymi przy pomocy nabiegunków,
- silniki z magnesami zagłębionymi (koncentracją pola) rozłożone symetrycznie (rys. 8.5d).

Jedną z metod kształtowania rozkładu indukcji w szczelinie roboczej silników z zagłębionymi magnesami trwałymi jest zastosowanie odpowiednio ukształtowanego nabiegunka. Metodę tę stosuje się również w klasycznych maszynach synchronicznych w celu uzyskania sinusoidalnego rozkładu indukcji. Jej zalety – prosta, w pełni rozłączna konstrukcja, łatwy sposób wymiany magne-

sów oraz zmiany geometrii szczeliny roboczej – powodują, że ma ona szczególnie duże znaczenie w przypadku badań doświadczalnych na silnikach z magnesami trwałymi [13, 14].



Rys. 8.8. Silnik z mocowaniem zagłębionym MT [13]

Tabela 8.1

Porównanie cech silników z mocowaniem powierzchniowym i zagłębionym MT

Mocowanie powierzchniowe MT	Mocowanie zagłębione MT
indukcja w szczelinie mniejsza niż indukacja remanencji	indukcja w szczelinie może być większa od indukcji remanencji
prosta konstrukcja silnika	konstrukcja stosunkowo złożona
mała moc obwodów twornika	duża moc obwodów twornika, droższy przekształtnik
magnesy nie są zabezpieczone przed odmagnesowaniem	magnesy są zabezpieczone przed odmagnesowaniem
mała odporność na działanie sił odśrodkowych	odporność na działanie sił odśrodkowych
prądy wirowe w magnesach trwałych	brak prądów wirowych w magnesach trwałych
ograniczone możliwości pracy w stanie odwzbudzenia	możliwość pracy przy osłabionym polu wzbudzenia
	stosunkowo prosta możliwość kształtowania rozkładu pola w szczelinie roboczej

8.2.3. Analiza rozkładu pola

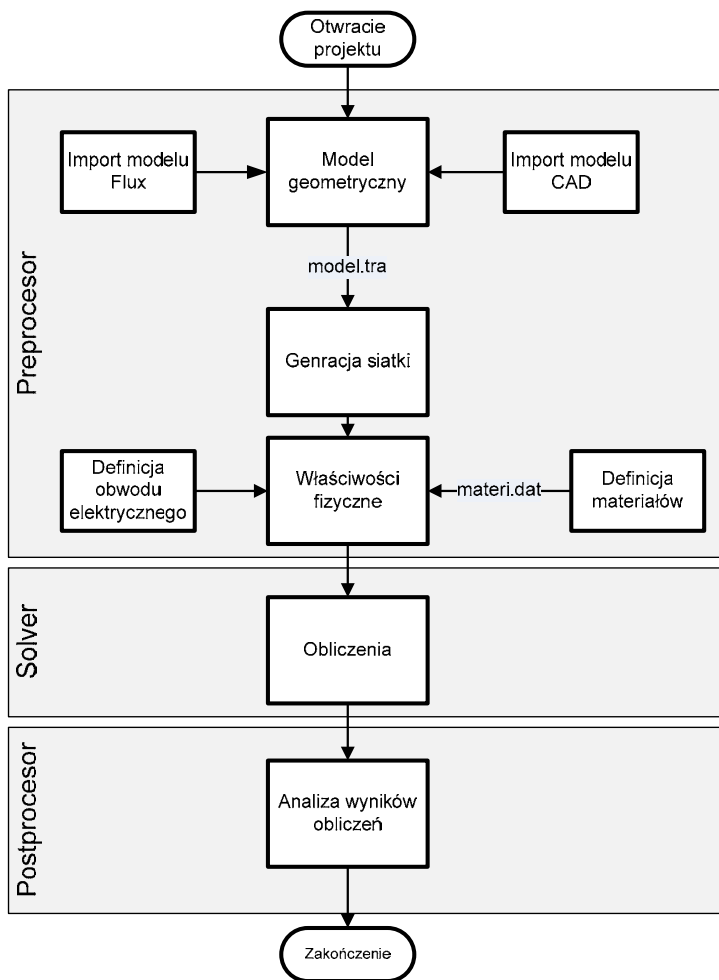
Podstawą analizy wpływu struktury obwodu magnetycznego na parametry maszyny elektrycznej jest znajomość rozkładu pola w szczelinie roboczej maszyny. Obecnie do tego celu najczęściej stosuje się metodę elementów skończonych (MES). Jednak stosunkowo duży nakład czasu potrzebny na przygotowanie modelu polowego maszyny, jak i sam czas obliczeń sprawia, że w dalszym ciągu są rozwijane i stosowane metody analityczne analizy pola.

Istnieją stosunkowo proste rozwiązania analityczne równań pola dla maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi mocowanymi powierzchniowo i o magnesowaniu promieniowym lub równoległym [14, 22]. W przypadku analizy pola silników bezszczotkowych z magnesami trwałymi zagłębionymi w wirniku z zasady stosuje metody numeryczne – MES. MES umożliwia analizę pola elektromagnetycznego w stanach przejściowych i stanach stacjonarnych, z uwzględnieniem właściwości materiałowych środowiska bardzo zbliżonych do rzeczywistych.

Realizacja praktyczna metod numerycznych wymaga komputerowego programu symulacyjnego, który może być programem symulacyjnym samodzielnie opracowanym do rozwiązania postawionego problemu lub też programem symulacyjnym uniwersalnym – zwykle komercyjnym programem symulacyjnym. Jest oczywiste, że opracowanie do każdego modelu numerycznego SBMT dedykowanego programu symulacyjnego optymalizuje proces obliczeń numerycznych, ale faza przygotowania i uruchomienia programu jest pracochłonna – kosztowna. Jeżeli ograniczy się kosztowną procedurę tworzenia własnego programu symulacyjnego wyłącznie do analizy nietypowych problemów, to wskazane jest zastosowanie uniwersalnych programów symulacyjnych rozwiązujących pewną klasę problemów [10, 21]. Jednym z bardziej rozbudowanych pakietów komercyjnych do symulacji metodami polowymi, stosowanymi w krajowych oraz międzynarodowych ośrodkach akademickich i badawczych, jest pakiet FLUX 2 [2].

Program FLUX, w zależności od wersji, oblicza dla przekrojów płaskich lud dla obiektów trójwymiarowych, magnetyczne, elektryczne lub cieplne stany urządzeń. Analiza tych stanów pozwala na obliczanie wielu wielkości globalnych i lokalnych, takich jak indukcja, potencjał, strumień, energia, siła itd. [1].

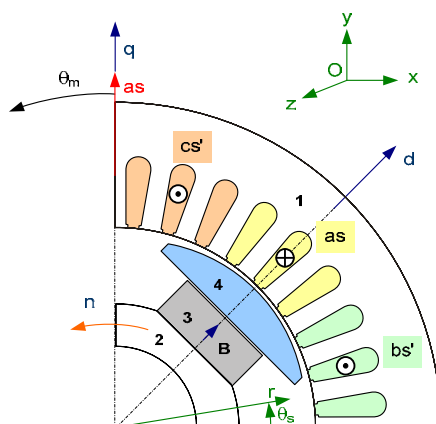
Wykonanie obliczeń w programie Flux2D poprzedzone jest procesem wprowadzenia modelu geometrycznego, zdefiniowania materiałów oraz źródeł pola (rys. 8.9). Obliczenia można wykonywać w funkcji określonych parametrów geometrycznych, właściwości materiałów lub wartości wymuszeń pola. Analizę wyników obliczeń wykonuje się w postprocesorze programu Flux2D.



Rys. 8.9. Ogólny algorytm obliczeń w programie Flux2D

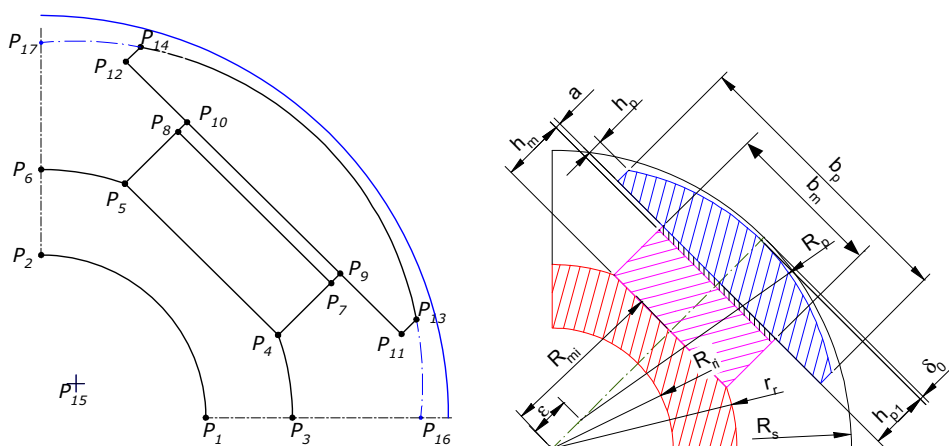
Poniżej przedstawione wybrane wyniki analizy numerycznej silnika bezszczotkowego z mocowaniem zagłębionym magnesów zbudowanego na bazie seryjnie produkowanego silnika asynchronicznego typu Sg100L-4A (moc znamionowa – 2,2 kW, prędkość obrotowa 1420 obr/min, częstotliwość 50Hz, napięcie 3×380V). Do budowy silnika wykorzystano uzwojony stojan silnika Sg100L-4A oraz wał wraz z układem łożyskowania.

Część przekroju poprzecznego silnika przedstawiono na rys. 8.10. Na wale umieszczono magnesy trwałe, nabiegunniki i jarzmo, które tworzą specjalnie opracowaną konstrukcję rozłączną. Założeniem konstrukcji rozłącznej wzbudzenia magnetoelektrycznego było zapewnienie jej łatwej modyfikacji, polegającej zarówno na wymianie magnesów, jak i na zmianie profilu geometrii szczeliny roboczej silnika modelowego. Zmianę profilu geometrii szczeliny roboczej zrealizowano za pomocą wymiennych nabiegunników oraz wkładek diamagnetycznych pod magnesami.

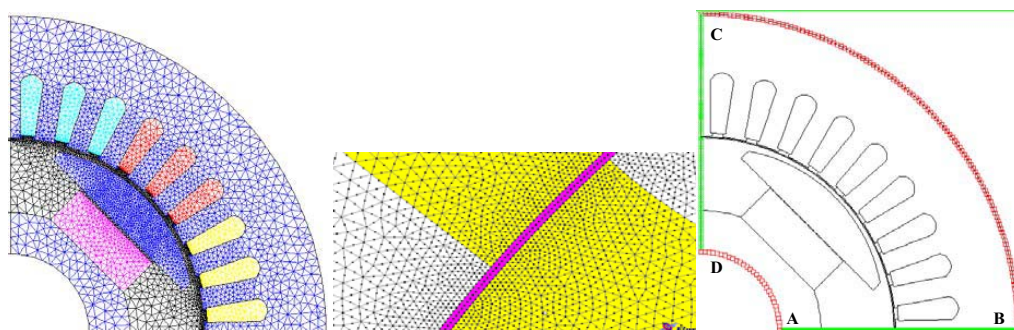


Rys. 8.10. Model fizyczny silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi – ¼ przekroju poprzecznego – mocowanie zagłębione magnesów: 1 – stojan, 2 – jarzmo wirnika, 3 – magnes trwały, 4 – nabiegunnik, as, bs', cs' – pasma uzwojenia twornika, q, d – oś poprzeczna i podłużna wirnika

Na podstawie modelu fizycznego silnika w preprocesorze programu Flux2D zdefiniowano parametryczny model geometryczny (rys. 8.11), ustalone warunki brzegowe i przeprowadzono dyskretyzacje modelu (podział na elementy skończone) (rys. 8.12).



Rys. 8.11. Parametryczny model geometryczny wirnika silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi



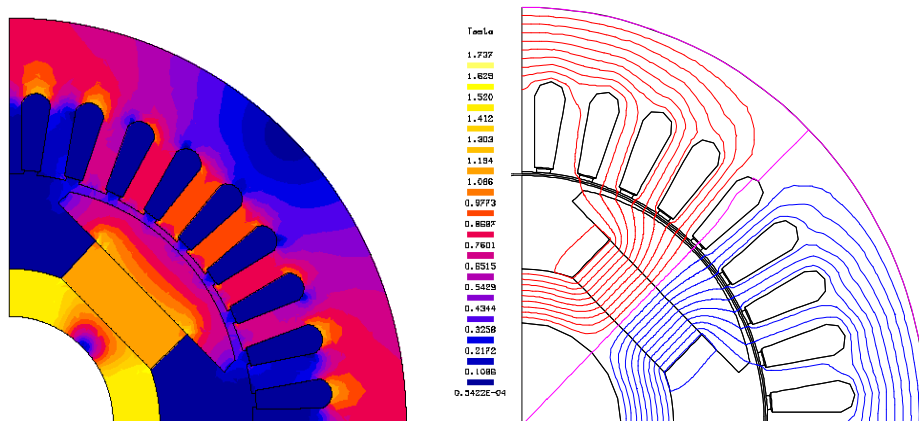
Rys. 8.12. Model numeryczny silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi:
a) dyskretyzacja, b) dyskretyzacja szczeliny powietrznej, c) warunki brzegowe

Zadanie odpowiednich wymuszeń pola wzbudzenia, pola twornika i prędkości obrotowej pozwoliło na wyznaczenie:

- rozkładów przestrzennych indukcji,
- charakterystyk kątowych napięcia indukowanego rotacji,
- charakterystyk kątowych indukcyjności własnych i wzajemnych oraz ich pochodnych,
- charakterystyk kątowych momentów: elektromagnetycznego, reluktancyjnego oraz zaczepowego.

Analiza pola wzbudzenia dotyczy stanu, w którym pole w silniku wymuszone jest jedynie magnesami trwałymi – pasma uzwojeń twornika nie są zasilane. Założono wymuszenie kinematyczne o stałej prędkości obrotowej równej prędkości synchronicznej (1500 obr/min).

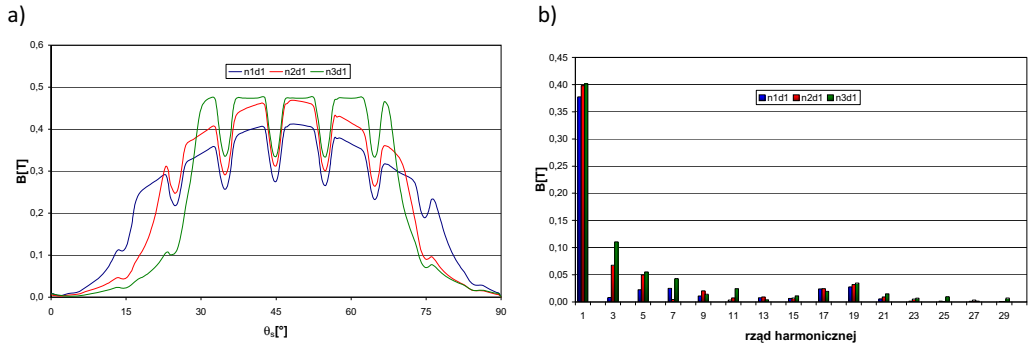
Rozkład pola magnetycznego w obszarze SBMT, wymuszanego polem magnesów trwałych przedstawiono na rys. 8.13.



Rys. 8.13. Rozkład indukcji pola wzbudzenia silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi

Rozkład amplitudy wektora indukcji magnetycznej, wyznaczonych wzdłuż łuków zakreślonych promieniem $r = 46,9$ mm w szczelinie roboczej oraz jego analizę harmoniczną, przedstawiono na rys. 8.14.

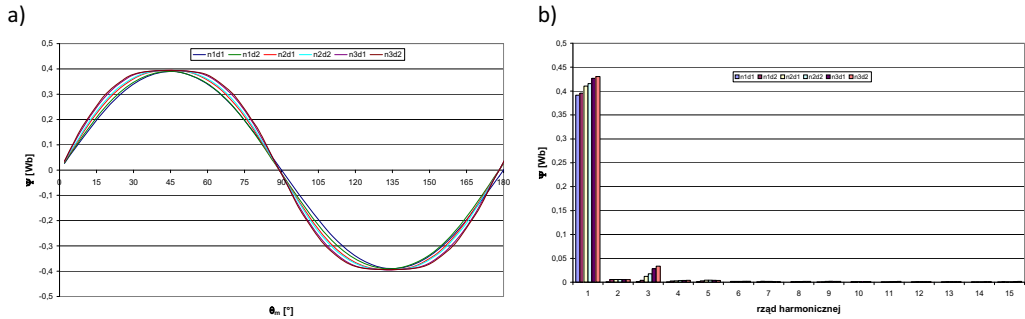
Wyniki analizy wskazują, że zmiana szerokości nabiegownika powoduje zmianę efektywnej powierzchni, przez którą przepływa strumień pola wzbudzenia. Ze względu na to, że strumień jest praktycznie stały (punkt pracy magnesu trwałego głównie zależy od szczeliny powietrznej), to wraz ze zmniejszaniem szerokości nabiegownika rośnie amplituda indukcji magnetycznej.



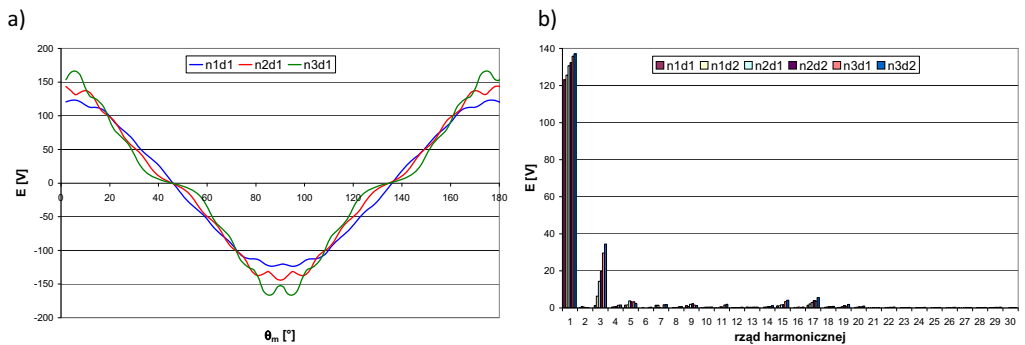
Rys. 8.14. Porównanie rozkładu przestrzennego amplitudy indukcji magnetycznej w szczeliny roboczej SBMT dla różnych szerokości nabiegownika ($n1$ $n2$ $n3$): a) rozkład amplitudy indukcji magnetycznej b) analiza harmoniczna rozkładu indukcji

Strumienie sprzężone wzbudane magnesami i napięcia indukowane rotacji poszczególnych pasm uzwojenia twornika silnika modelowego wyznaczono przy założeniach (rys. 8.16):

- pole w silniku wzbudane jest jedynie magnesami trwałymi,
- wirnik obraca się ze stałą prędkością obrotową (prędkość znamionowa 1500 obr/min),
- początkowe położenie kątowe wirnika wynosi $\theta_m = 0$.



Rys. 8.15. Charakterystyki kątowe strumieni (wzbudane magnesami) sprzężonych z pasmem as uzwojenia twornika dla różnych szerokości nabiegowników ($n1$ $n2$ $n3$) i różnych wielkości szczeliny powietrznej ($d1$ $d2$): a) charakterystyki kątowe napięcia, b) analiza harmoniczna



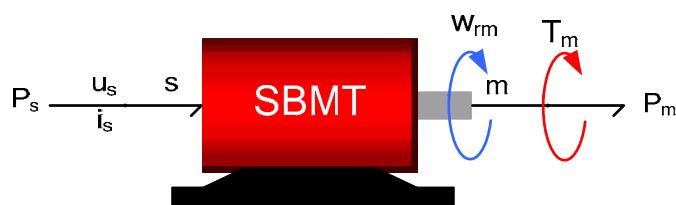
Rys. 8.16. Charakterystyki kątowe napięć indukowanych rotacji pasma as dla różnych szerokości nabiegowników ($n1$ $n2$ $n3$) i różnych wielkości szczeliny powietrznej ($d1$ $d2$): a) charakterystyki kątowe napięcia, b) analiza harmoniczna

Z analizy wyników obliczeń wynika, że zwężenie nabiegownika powoduje wzrost wartości maksymalnej oraz amplitudy 1. harmonicznej napięcia rotacji. Jednocześnie zauważa się znaczny wzrost amplitudy 3. harmonicznej: powoduje to silne odkształcenie przebiegu napięcia indukowanego rotacji. Z kolei zmniejszenie szczeliny powietrznej powoduje wzrost amplitudy indukcji magnetycznej – wzrasta również amplituda napięcia indukowanego rotacji.

8.2.4. Modele fizyczne i obwodowe

Model fizyczny silnik bezszczotkowy o magnesach trwałych: uzwojenie 2-pasmowe dzielone

SSBMT jest przetwornikiem elektromechanicznym (rys. 8.17) o dwóch wrotach (parach zacisków), które fizycznie reprezentują: jedno „wejście elektryczne” – zaciski uzwojenia stojana/twornika „s”; jedno „wyjście mechaniczne” – koniec wału (sprzęgło). Moc elektryczna (dostarczana) P_s i moc mechaniczna (odbierana) P_m ulegają przemianie elektromechanicznej za pośrednictwem pola magnetycznego wzbudzanego magnesami trwałymi (MT). Energia pola magnetycznego jest energią wewnętrzną silnika, gdyż przetwornik nie ma możliwości wymiany tej energii z otoczeniem.

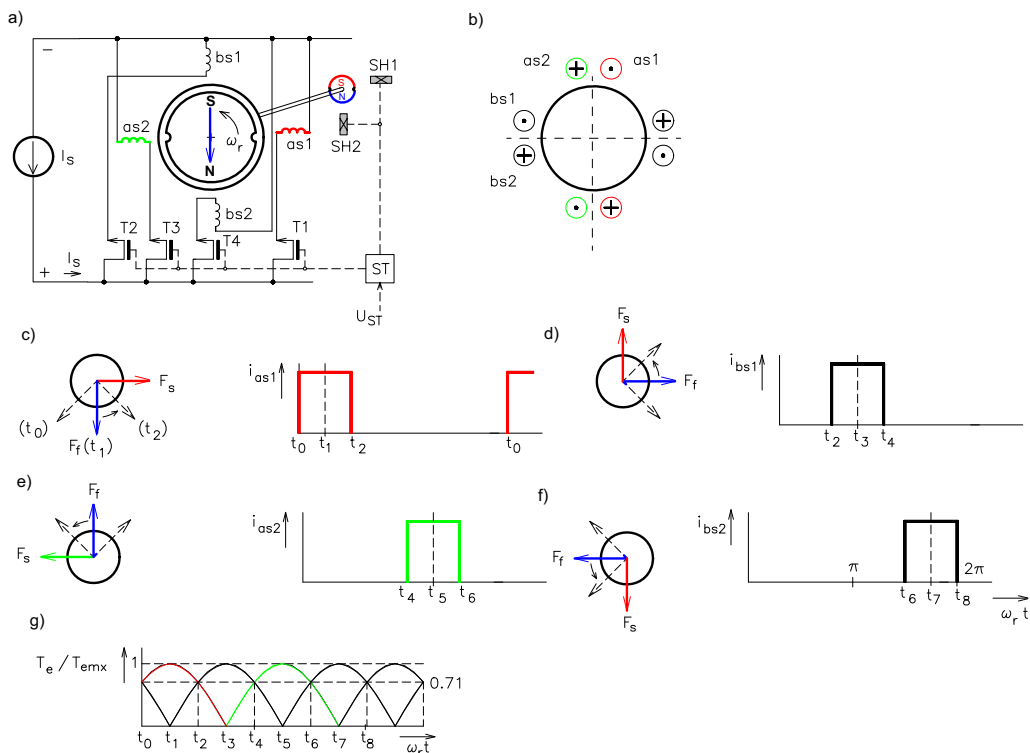


Rys. 8.17. Silnik bezszczotkowy o magnesach trwałych – dwuwrotowy przetwornik elektromechaniczny: wrota (zaciski) obwodu stojana/twornika „s” – dopływ energii elektrycznej przetwarzanej ma energię mechaniczną, wrota układu (obwodu) mechanicznego „m” – odpływ energii mechanicznej

Jedno z wielu możliwych rozwiązań SBMT przedstawiono na rys. 8.18a. Stojan (twornik) silnika stanowi układ uzwojenia dwupasmowego dzielonego (rys. 8.18b – uzwojenie równoważne czterem pasmami „połówkowym” połączonym w gwiazdę), zintegrowanego z falownikiem zasilanym ze stałego źródła prądowego o wydajności I_s . Na wirniku umocowany jest magnes trwały jako źródło pola wzbudzenia o indukcji B_f i strumieniu Φ_f – równoważnego polu magnetycznego z uzwojeniem wzbudzenia o przepływie F_f zasilanego ze źródła prądowego o wydajności I_f . Czujniki SH1 oraz SH2 (sondy Hall’a) służą do określenia położenia kąтового wirnika; ich sygnały sterują kluczowaniem tranzystorów mocy T1, T2, T3 i T4. Kolejne etapy sterowania pracą silnika pokazano na od rys. 8.18c do rys. 8.18f (położenia przepływów stojana i wirnika oraz przebiegi czasowe prądów w fazach „połówkowych”). Na rysunku 8.18g przedstawiono przebieg czasowy momentu elektromagnetycznego przy założeniu sinusoidalnego rozkładu indukcji pola wzbudzenia i przepływu twornika.

Zasada działania silnika oparta jest na zasadzie minimalnej pracy – skłonności zwiększania całkowitego strumienia magnetycznego sprzężonego z stojanem i wirnikiem, czyli tendencji do magazynowania maksymalnej energii. Moment elektromagnetyczny jest efektem interakcji dwóch przepływów. **Warunkiem generacji stałego jednokierunkowego momentu obrotowego jest utrzymanie tych przepływów (pól) nieruchomych względem siebie dla ustalonego stanu pracy.** Z warunku tego wynika zasada sterowania – odpowiednia sekwencja kluczowania tranzystorów celem wymuszenia niezmiennego położenia osi pola stojana względem osi pola magnesu, tzn. wektorów F_s oraz F_f . **Sygnalem sterującym kluczowaniem tranzystorów jest położenie kątowe wirnika!!!**

Uwaga: Praca silnika ma charakter cykliczny (układ o cyklicznie przełączanych uzwojeniach) – jeden cykl pracy odpowiada jednemu obrotowi wirnika. W jednym cyklu pracy występują cztery takty – w każdym taktie zasilana jest tylko jedna półka uzwojenia.



Rys. 8.18. Budowa i zasada działania bezszczotkowego silnika (prądu stałego) o magnesach trwałych z uzwojeniem dwupasmowym dzielonym

Do opisu modelu fizycznego maszyny przyjęto kolejno:

1. Założenia:

- reprezentację obwodową pola elektromagnetycznego (rezystancje, indukcyjności własne i wzajemne uważa się za parametry skupione);
- sinusoidalny rozkład przestrzenny pola stojana (twornika) i pola magnesu trwałego wirnika (jeżeli jest inaczej, to uwzględnia się tylko podstawową harmoniczną pola w szczelinie powietrznej);
- liniowy obwód magnetyczny;
- pomijalnie małe straty w żelazie.

2. Zmienne i parametry:

a) zmienne i parametry elektryczne:

- napięcia pasm uzwojenia stojana u_{as} , u_{bs} ;
- prądy pasm uzwojenia stojana i_{as} , i_{bs} ;
- rezystancje pasm uzwojeń stojana r_s ;

b) zmienne elektromagnetyczne:

- przepływy wirujące (siły magnetomotoryczne — SMM o sinusoidalnym rozkładzie przestrzennym) odpowiednio stojana F_s i wirnika F_f (źródłem pola wzbudzenia wirnika jest umocowany magnes trwały o strumieniu ϕ_f — równoważny polu magnetycznemu o przepływie F_f wzbudzonego uzwojeniem zasilanym ze źródła prądowego o wydajności I_f).
- strumień magnesujący (główne) stojana ϕ_{ms} i wirnika (magnesu trwałego) ϕ_f ;
- strumień rozproszenia uzwojeń stojana ϕ_s ;
- moment elektromagnetyczny T_e ;

c) zmienne i parametry mechaniczne:

- kąt położenia θ_r osi q wirnika względem osi as uzwojenia stojana;
- elektryczna prędkość kątowna wirnika ω_r ;
- moment obciążenia T_L ;
- współczynnik tarcia lepkiego B_m ;
- moment bezwładności wirnika J .

Model obwodowy silnika bezszczotkowego o magnesach trwałych: uzwojenie 2-pasmowe

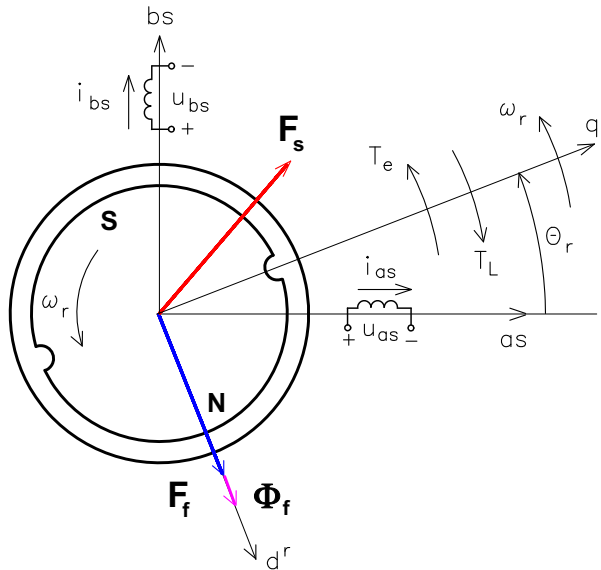
Założono, że dzielone uzwojenie stojana (twornika) silnika (rys. 8.18) odwzorowuje niedzielone uzwojenie dwupasmowe, rozłożone sinusoidalnie w żłobkach (rys. 8.19). Przyjęto także, że napięcia na zaciskach poszczególnych pasm uzwojenia stojana zawierają tylko pierwszą harmoniczną o przebiegach określanych wg następującej zależności:

$$\begin{aligned} u_{as} &= \sqrt{2}U_s \cos \theta_{esu} \\ u_{bs} &= \sqrt{2}U_s \sin \theta_{esu} \end{aligned} \quad (8.1)$$

przy czym kąt fazowy θ_{esu} sterowany jest kątem położenia wirnika wg następującej zależności:

$$\theta_{esu} = \int_0^t \omega_r(\xi) d\xi + \theta_{esu}(0) \quad (8.2)$$

gdzie: U_s – wartość skuteczna napięcia stojana;
 ω_r – elektryczna prędkość kątowna wirnika zależna od czasu t ,
 $\theta_{esu}(0)$ – faza początkowa napięcia stojana,
 ξ – zmienna podcałkowa,
 t – czas.



Rys. 8.19. Model fizyczny (obwodowy) silnika bezszczotkowego o magnesach trwałych w układzie osi naturalnych stojana as bs i wirnika qd^r

Eliminację zmiennego sprzężenia magnetycznego stojana i wirnika będącego funkcją kąta położenia wirnika θ_r , uzyskuje się przez zastąpienia uzwojenia stojana uzwojeniem „jakby ruchomym”. Niesymetria elektryczna i magnetyczna (dla przypadku ogólnego) silnika narzuca układ osi sztywno

związany z układem osi prostopadłych qd wirnika, wirujących z wirnikiem z prędkością kątową ω_r . Rysunek 8.20 przedstawia dwuosiowy model obwodowy silnika bezszczotkowego w takim układzie współrzędnych, który jest podstawą tworzenia dynamicznego schematu zastępczego (analogu elektrycznego) silnika.

Przyjęty na rys. 8.20 system strzałkowania napięć, prądów, prędkości kątowej wirnika i momentów obrotowych dotyczy pracy silnikowej.

Zmiennymi obwodowymi modelu dwuosiowego są następujące wielkości:

- u_{qs}^r – napięcie zasilania uzwojenia stojana „jakby ruchomego” w osi q ;
- u_{ds}^r – napięcie zasilania uzwojenia stojana „jakby ruchomego” w osi d ;
- i_{qs}^r – prąd uzwojenia stojana „jakby ruchomego” w osi q ;
- i_{ds}^r – prąd uzwojenia stojana „jakby ruchomego” w osi d ;
- λ_{fd}^r – strumień magnesu sprzęgający się z uzwojeniem stojana w osi d ;
- I_f^r – wydajność źródła prądowego zasilającego zastępcze uzwojenie wzbudzenia w osi d o przepływie F_f – równoważnym magnesowi wzbudzającym strumień λ_{fd}^r ;
- e_{qs}^r, e_{ds}^r – SEM rotacji indukowane w uzwojeniach stojana w osiach qd (odzwzorowują elektromechaniczne przetwarzanie energii – efekt ruchu względnego rzeczywistych uzwojeń stojana i wirnika maszyny).

Przy czym górny indeks r oznacza wartości zmiennych mierzone przez obserwatora wirującego z układem osi wirnika qd^r , natomiast indeks *prim* oznacza sprowadzenie (redukcję) wartości zmiennych i parametrów wirnika do liczby zwojów uzwojenia stojana. Ponadto w modelu obwodowym równania ruchu (rys. 8.20b) przyjęto następujące analogie:

- napięcie – moment obrotowy,
- prąd – prędkość kątowa,
- indukcyjność – moment bezwładności,
- rezystancja – współczynnik tarcia.

Relacje między zmiennymi zaciskowymi w układzie osi stojana $as\ bs$ i układzie osi wirnika qd^r opisują równania:

$$\begin{bmatrix} u_{qs}^r \\ u_{ds}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ \sin \theta_r & -\cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \end{bmatrix} \quad (8.3)$$

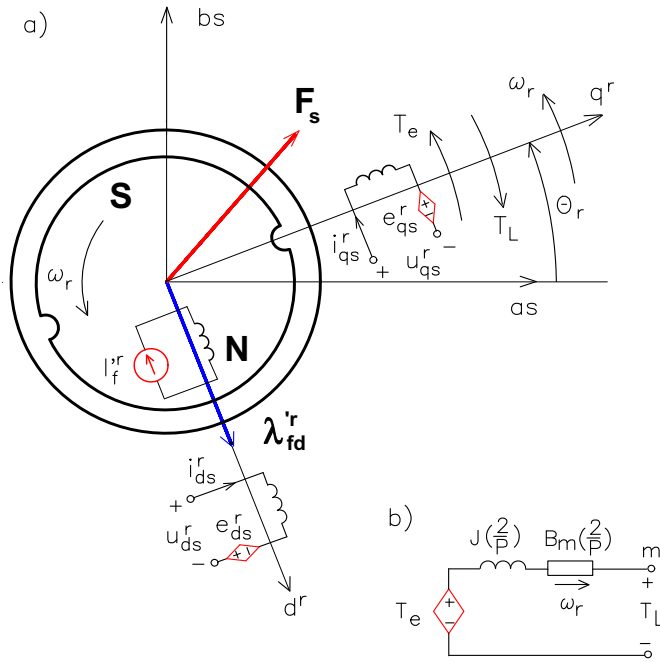
$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ \sin \theta_r & -\cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^r \\ i_{ds}^r \end{bmatrix} \quad (8.4)$$

gdzie, kąt obrotu wirnika (radiany elektryczne)

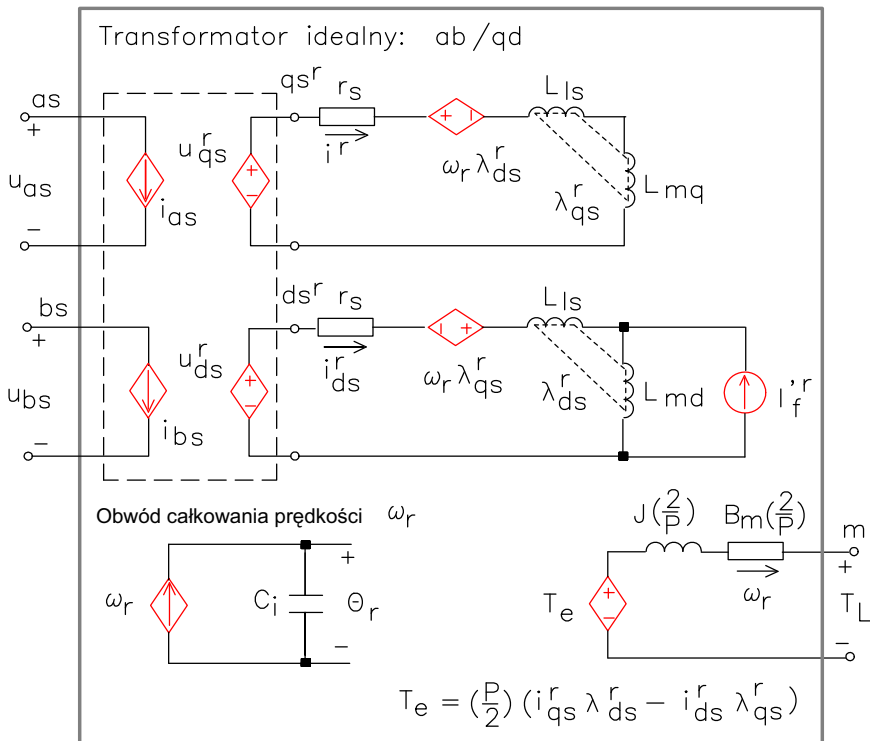
$$\theta_r = \int_0^t \omega_r(\xi) d\xi + \theta_r(0) \quad (8.5)$$

Dynamiczny model obwodowy silnika bezszczotkowego o magnesach trwałych: uzwojenie 2-pasmowe

Model fizyczny silnika na rys. 8.20 można odzwzorować za pomocą dynamicznego modelu obwodowego pokazanego na rys. 8.21.



Rys. 8.20. Model fizyczny (obwodowy) silnika bezszczotkowego o magnesach trwałych w układzie osi qd^r wirnika: a) układ elektromagnetyczny stojana i wirnika, b) analog elektryczny układu mechanicznego



Rys. 8.21. Dynamiczny model obwodowy silnika bezszczotkowego o magnesach trwałych w układzie osi $as\ bs/qd^r$

W modelu silnika równania transformacji (8.3)–(8.4) odwzorowano modelem obwodowym transformatora idealnego (pokazany na rys. 8.21 jako „transformator idealny: ab/qd ”). Ponadto w występują tam modele następujących sprzężeń:

Modele sprzężeń transformatorowych uzwojeń stojana i wirnika w osiach qd^r

Sprzężenie transformatorowe, obwodów położonych współosiowo, opisują następujące równania strumieni sprzężonych w osiach qd^r :

$$\begin{aligned}\lambda_{qs}^r &= L_{ls} i_{qs}^r + L_{mq} i_{qs}^r \\ \lambda_{ds}^r &= L_{ls} i_{ds}^r + L_{md} (i_{ds}^r + I_f^r) = L_{ls} i_{ds}^r + L_{md} i_{ds}^r + \lambda_{fd}^r\end{aligned}\quad (8.6)$$

Wielkości fizyczne i parametry sprzężeń transformatorowych w równ. (8.6) są następujące:

- λ_{qs}^r – strumień sprzężony z uzwojeniem stojana „jakby ruchomym” w osi q ;
- λ_{ds}^r – strumień sprzężony z uzwojeniem stojana „jakby ruchomym” w osi d ;
- L_{mq} – indukcyjność magnesowania modelująca wpływ strumienia głównego (magnesującego) w osi q na właściwości silnika;
- L_{md} – indukcyjność magnesowania modelująca wpływ strumienia głównego (magnesującego) w osi d na właściwości silnika;
- L_{ls} – indukcyjności rozproszenia uzwojenia stojana modelująca wpływ strumienia rozproszenia na właściwości silnika.

Modele sprzężeń elektromechanicznych uzwojeń stojana i wirnika w osiach qd^r

Efektom sprzężeń elektromechanicznych między uzwojeniami stojana a wirnikiem w osiach qd jest elektromechaniczne przetwarzanie energii w maszynie. Podstawowymi wielkościami charakterystycznymi tych sprzężeń są: SEM rotacji i moment elektromagnetyczny.

SEM rotacji

Efektom ruchu względnego fizycznych (rzeczywistych) uzwojeń stojana i wirnika maszyny są napięcia indukowane w uzwojeniach stojana. Innymi słowy występuje ruch geometryczny strumieni osiowych λ_{qs}^r oraz λ_{ds}^r z prędkością kątową ω_r , który generuje SEM rotacji odpowiednio w uzwojeniu osi q stojana i uzwojeniu osi d stojana. SEM rotacji, analogicznie jak dla maszyny prądu stałego, opisane są następującymi równaniami:

$$e_{ds}^r = \omega_r \lambda_{qs}^r \quad (8.7)$$

$$e_{qs}^r = \omega_r \lambda_{ds}^r \quad (8.8)$$

Moment elektromagnetyczny

Interakcja strumienia i cewki z płynącym prądem o układzie osi magnetycznych wzajemnie prostopadłych, analogicznie jak w maszynie prądu stałego, generuje moment elektromagnetyczny. W przypadku SBMT generowane są odpowiednio dwie składowe tego momentu (dla każdej pary: cewka z płynącym prądem i_{qs}^r w osi q – strumień λ_{ds}^r w osi d ; cewka z płynącym prądem i_{ds}^r w osi d – strumień λ_{qs}^r w osi q):

$$T_{eq} = +i_{qs}^r \lambda_{ds}^r \quad (8.9)$$

$$T_{ed} = -i_{ds}^r \lambda_{qs}^r \quad (8.10)$$

Wypadkowy moment elektromagnetyczny można przedstawić jako sumę tych dwóch składowych, z uwzględnieniem liczby biegunów P (każda para biegunów generuje moment):

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) (i_{qs}^r \lambda_{ds}^r - i_{ds}^r \lambda_{qs}^r) \quad (8.11)$$

Uwzględniając zależności na strumieniu sprzężone (równ. (8.6)) w osiach qd , równanie powyższe można zapisać w następującej postaci:

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) [L_{md} I_f' i_{qs}^r + (L_{md} - L_{mq}) i_{qs}^r i_{ds}^r] \quad (8.12)$$

W przypadku symetrii magnetycznej wirnika, indukcyjność $L_{mq} = L_{md}$ (brak momentu reluktancyjnego), rów. (12) redukuje się do postaci:

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) i_{qs}^r (L_{md} I_f') = \left(\frac{P}{2}\right) i_{qs}^r \lambda_{fd}'' \quad (8.13)$$

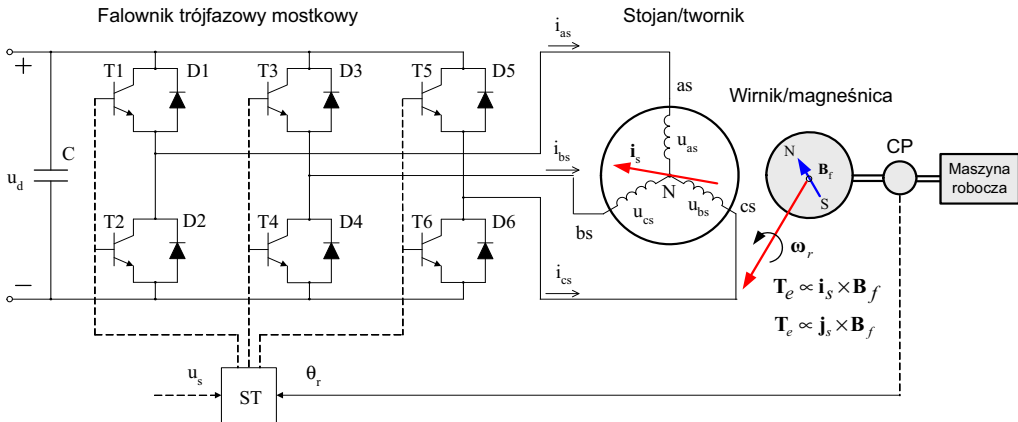
Równania (8.11) i (8.13) można przedstawić w formie iloczynu wektorowego (zapis Euler'a):

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) |\vec{i}_s^r| |\vec{\lambda}_s^r| \sin \alpha \quad (8.14)$$

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) |\vec{i}_s^r| |\vec{\lambda}_{fd}''| \sin \beta \quad (8.15)$$

Model fizyczny silnik bezszczotkowego o magnesach trwałych: uzwojenie 3-pasmowe

W praktyce najczęściej stosowanym rozwiązaniem silnika bezszczotkowego o magnesach trwałych (SBMT) jest układ przedstawiony na rys. 8.22. Na stojanie silnika umieszczone jest klasyczne uzwojenie trójfazowe (analogicznie jak w silniku indukcyjnym 3-fazowym lub maszynie synchronicznej 3-fazowej), a na wirniku umieszczone są magnesy trwałe¹⁾. Uzwojenie jest zwykle zasilane z dwustopniowego falownika napięcia z prostownikiem (nie pokazany na rysunku) i kondensatorem w obwodzie pośredniczącym, w którym tranzystory (np. IGBT) są sterowane położeniem kątowym wirnika.



Rys. 8.22. Układ silnika bezszczotkowego o magnesach trwałych z uzwojeniem 3-pasmowym (CP – czujnik położenia kątownego wirnika, ST – układ sterowania)

¹⁾ Ze względu na podobieństwo silnika (rys. 8.22) do maszyny synchronicznej wzbudzonej magnetoelektrycznie, silnik taki nazywany jest często silnikiem synchronicznym (SS) magnetoelektrycznym lub permasynem. Nazwa ta nie jest właściwa, gdyż w silniku synchronicznym nie występuje czujnik położenia wirnika. Ponadto moment elektromagnetyczny SS zależy od kąta mocy.

Dynamiczny model obwodowy silnika bezzszczotkowego o magnesach trwałych: uzwojenie 3-pasmowe

Celem sformułowania modelu silnika do badania jego właściwości ruchowych przyjęto, że napięcia fazowe na zaciskach uzwojenia stojana zawierają tylko pierwszą harmoniczną:

$$\begin{aligned} u_{as} &= \sqrt{2}U_s \cos(\theta_{esu}) \\ u_{bs} &= \sqrt{2}U_s \cos\left(\theta_{esu} - \frac{2}{3}\pi\right) \\ u_{cs} &= \sqrt{2}U_s \cos\left(\theta_{esu} + \frac{2}{3}\pi\right) \end{aligned} \quad (8.16)$$

i sterowane są kątem położenia wirnika

$$\theta_{esu} = \int_0^t \omega_r(\xi) d\xi + \theta_{esu}(0) \quad (8.17)$$

gdzie: U_s – wartość skuteczna napięcia stojana;
 ω_r – elektryczna prędkość kątowa wirnika,
 $\theta_{esu}(0)$ – faza początkowa napięcia stojana,
 ξ – zmienna podcałkowa,
 t – czas.

Eliminację zmiennego sprzężenia magnetycznego stojana i wirnika, będącego funkcją kąta położenia wirnika θ_r , uzyskuje się – analogicznie jak dla silnika z uzwojeniem dwupasmowym (rys. 8.20) – przez zastąpienia uzwojenia stojana uzwojeniem „jakby ruchomym”, które jest związane z układem osi prostopadłych qd^r wirnika, wirujących z wirnikiem z prędkością kątową ω_r .

Relacje między zmiennymi zaciskowymi w układzie osi stojana as bs cs i w układzie osi wirnika qd^r opisują równania:

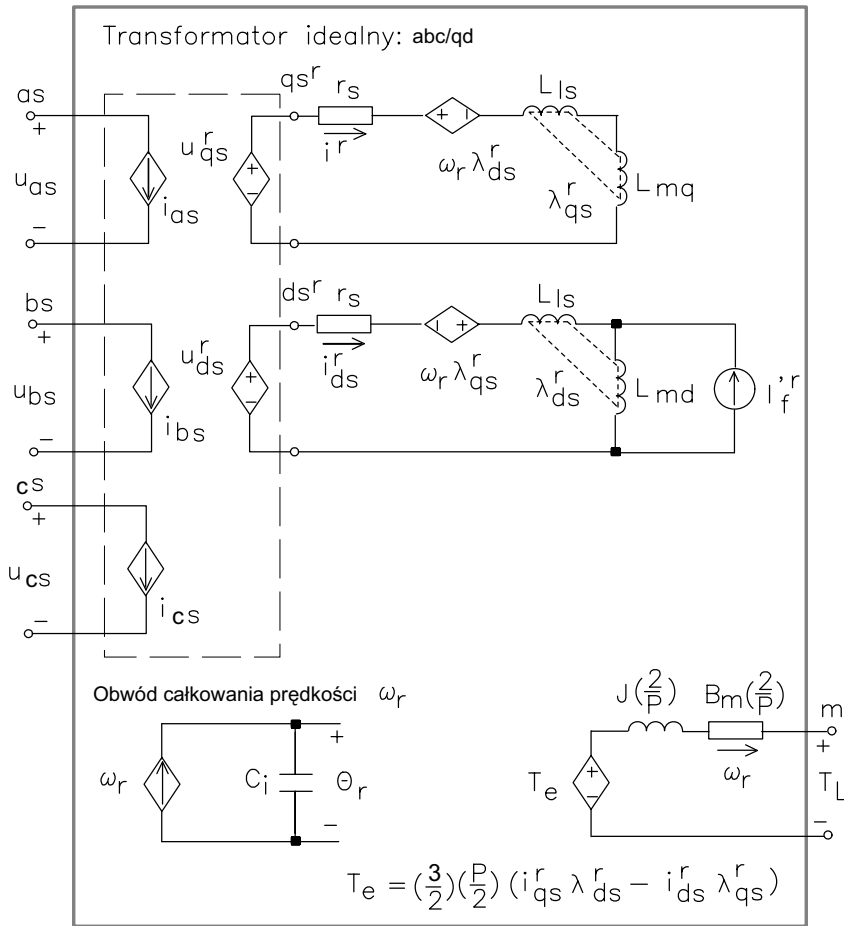
$$\begin{bmatrix} u_{qs}^r \\ u_{ds}^r \\ u_{0s} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin\theta_r & \sin\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} \quad (8.18)$$

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r & 1 \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^r \\ i_{ds}^r \\ i_{0s} \end{bmatrix} \quad (8.19)$$

gdzie, kąt obrotu wirnika (radiany elektryczne)

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r(\xi) d\xi + \theta_r(0) \quad (8.20)$$

Model obwodowy silnika z uzwojeniem 3-pasmowym u układzie osi qd^r – analogiczny do modelu fizycznego silnika z uzwojeniem 2-pasmowym na rys. 8.20 – można odwzorować za pomocą dynamicznego modelu obwodowego pokazanego na rys. 8.23.



Rys. 8.23. Dynamiczny model obwodowy silnika bezszczotkowego o magnesach trwałych z uzwojeniem 3-pasmowym w układzie osi $as\ bs\ cs/qd^r$

W modelu na rys. 8.23 równania transformacji (8.18)–(8.19) odwzorowano modelem obwodowym transformatora idealnego (pokazany na rys. 8.23 jako „transformator idealny: abc/qd^r ”). Przy czym, równanie momentu elektromagnetycznego silnika ma postać:

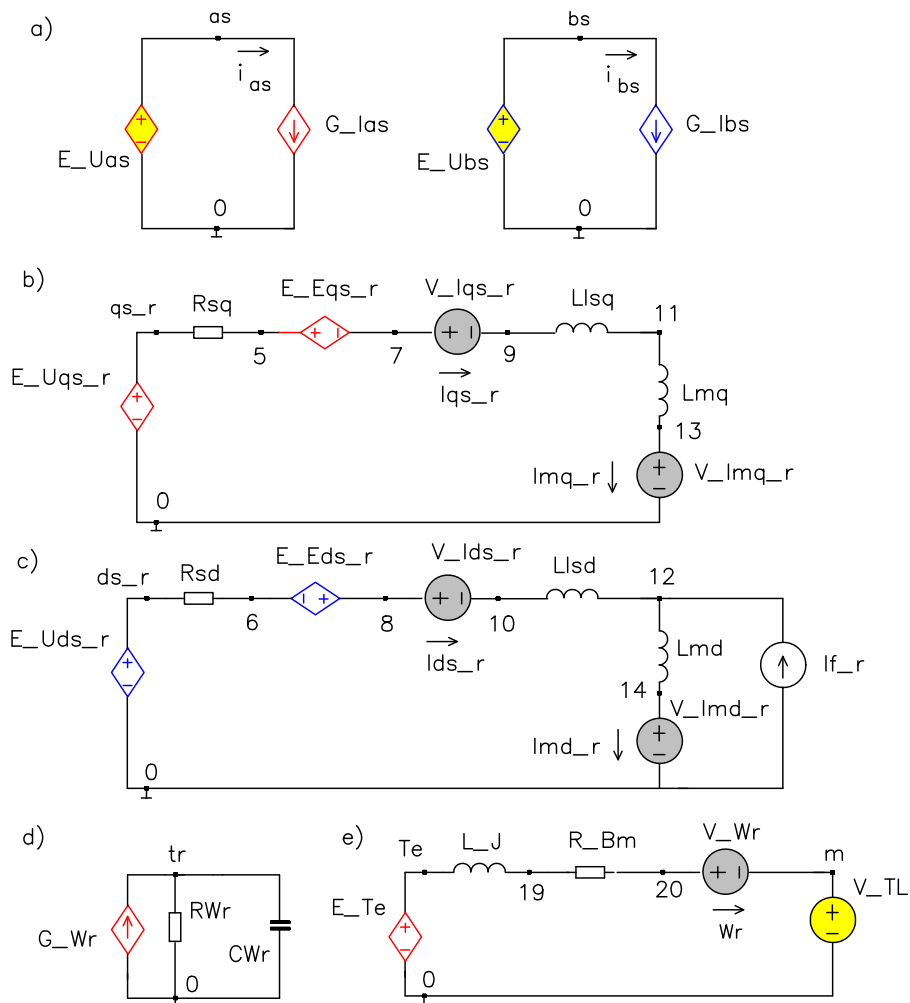
$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right) (i_{qs}^r \lambda_{ds}^r - i_{ds}^r \lambda_{qs}^r) \quad (8.21)$$

Powyższe równanie różni się od równania (8.11) współczynnikiem $3/2$, który wynika z konieczności zapewnienia niezmienniczości (kowariantności) mocy przy przejściu z układu osi $as\ bs\ cs$ do układu osi qd^r . Równ. (8.21) można także przekształcić do postaci równ. (8.12)–(8.15) z uwzględnieniem współczynnika $3/2$.

8.2.5. Charakterystyki ruchowe i sterowanie prędkością obrotową

Przykłady analizy: SBMT 2-pasmowy

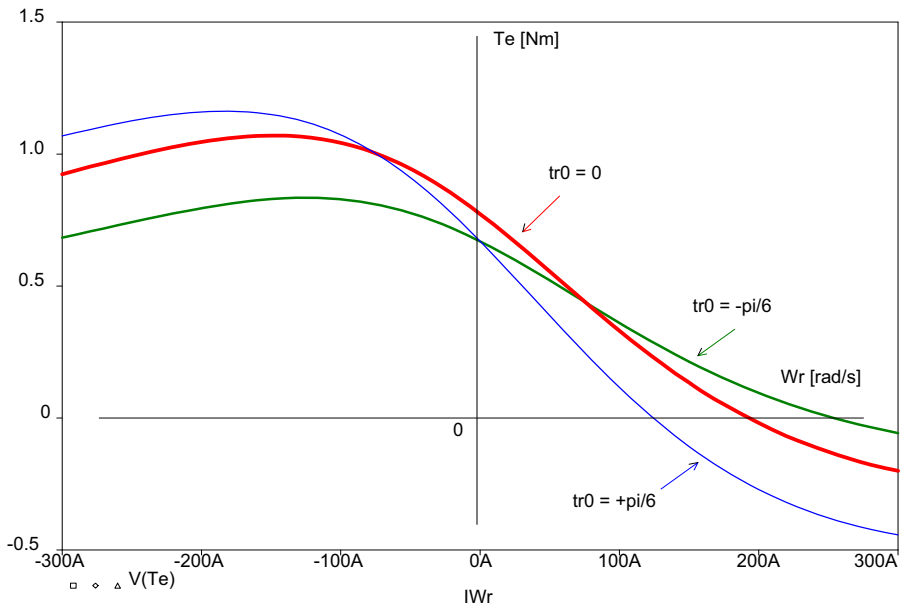
Podstawą sformułowania pliku wsadowego jest model obwodowy na rys. 8.24, oparty na modelu z rys. 8.21. Oznaczenia elementów obwodowych na rys. 8.24 są zgodne z konwencją programu PSPICE'a.



Rys. 8.24. Analog elektryczny silnika bezszczotkowego o magnesach trwałych (układ osi $as\ bs/qd'$) do sformułowania pliku wsadowego PSPICE'a: a) układ obliczania transformacji zmiennych $as\ bs/qd'$; b) obwody osi q stojana; c) obwody osi d stojana; d) układ obliczania położenia kąтового wirnika, e) analog elektryczny układu mechanicznego

Stan ustalony

Interesującą charakterystyką stanu ustalonego jest charakterystyka mechaniczna $T_e = T_e(\Omega_r)$. Wyznacza się ją za pomocą analizy stałoprądowej DC symulatora PSPICE. Jej przebieg pokazano na rys. 8.25.

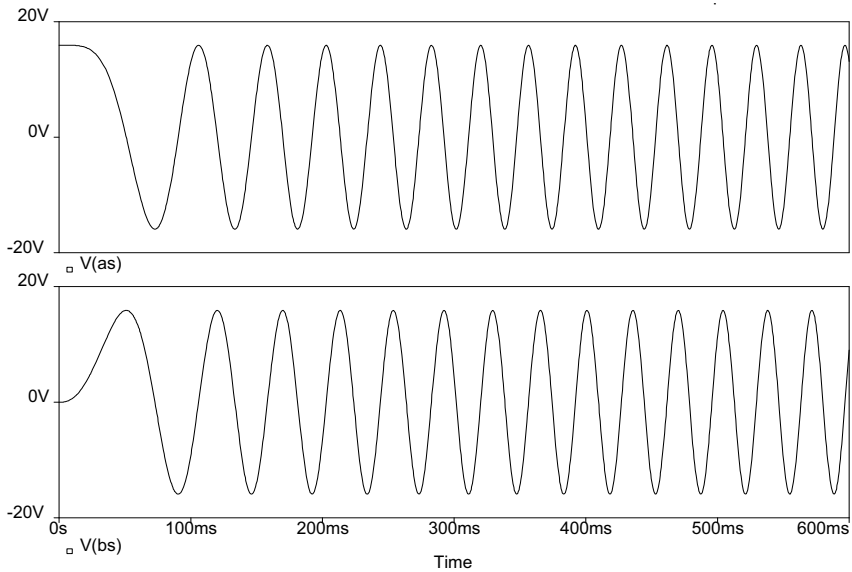


Rys. 8.25. Wyniki analizy DC silnika bezszczotkowego o magnesach trwałych:
 statyczna charakterystyka mechaniczna $T_e = T_e(\Omega_r)$
 przy $\theta_{esu}(0) = 0$ oraz $\theta(0) = 0; = -\pi/6; = +\pi/6$

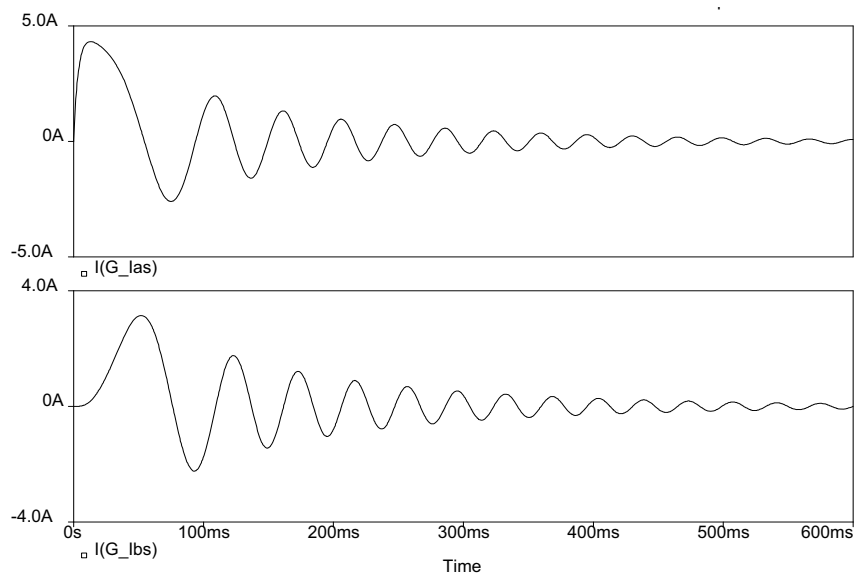
Stan nieustalony

Interesującymi charakterystykami stanu nieustalonego są charakterystyki rozruchowe. Wyznacza się je za pomocą analizy stanu nieustalonego **TRAN** symulatora PSPICE. Przykładowe przebiegi pokazano kolejno na rys. 8.26– 8.29.

a)



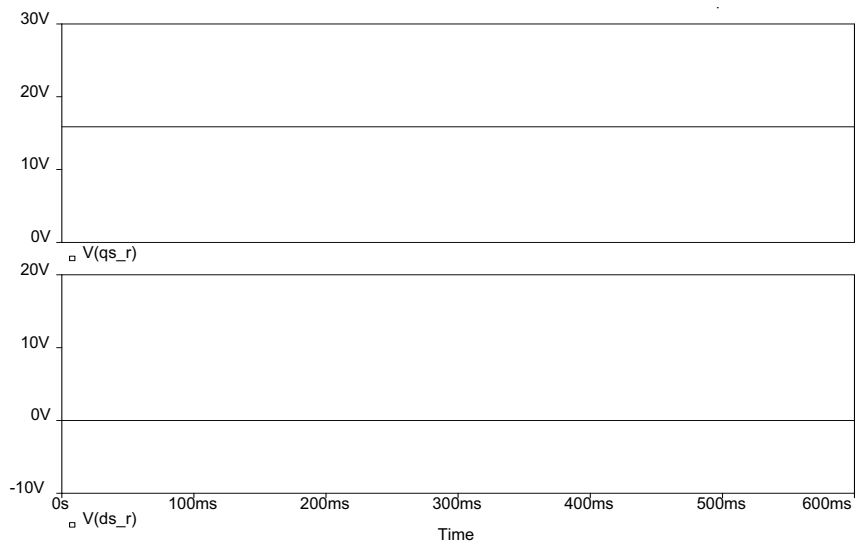
b)

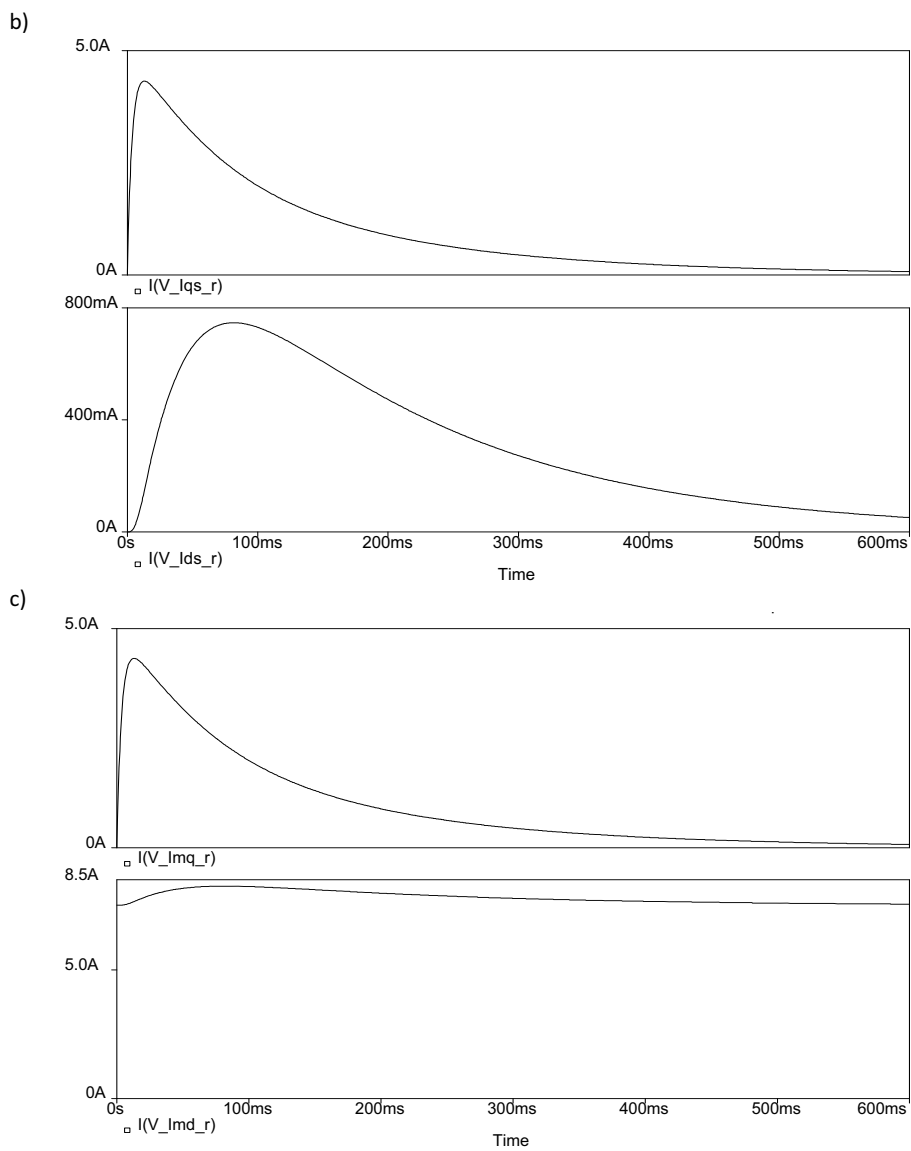


Rys. 8.26. Wyniki analizy **TRAN SBMT**: rozruch silnika przy $\theta_{esu}(0) = 0$; $\theta_r(0) = 0$ oraz $T_L = 0$:

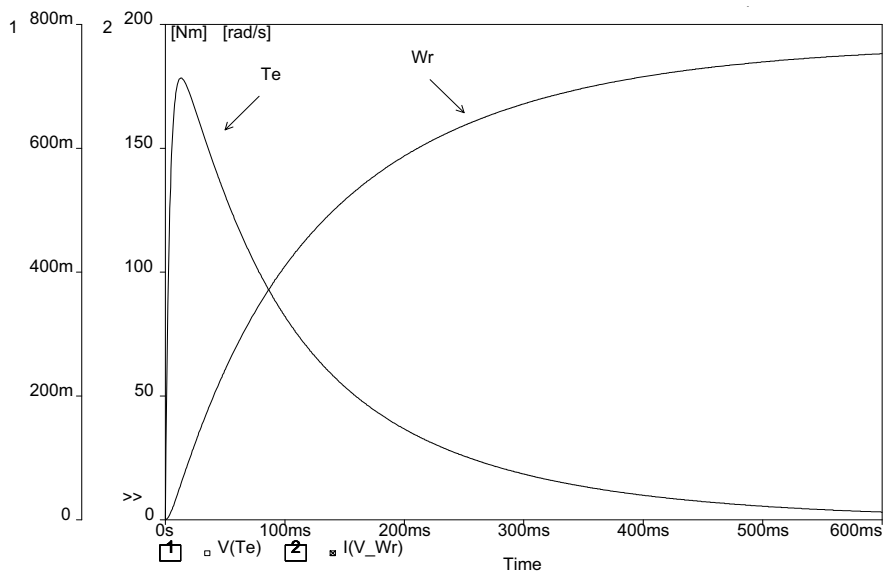
a) napięcia pasmowe stojana; b) prądy pasmowe stojana w układzie osi naturalnych $as\ bs$

a)

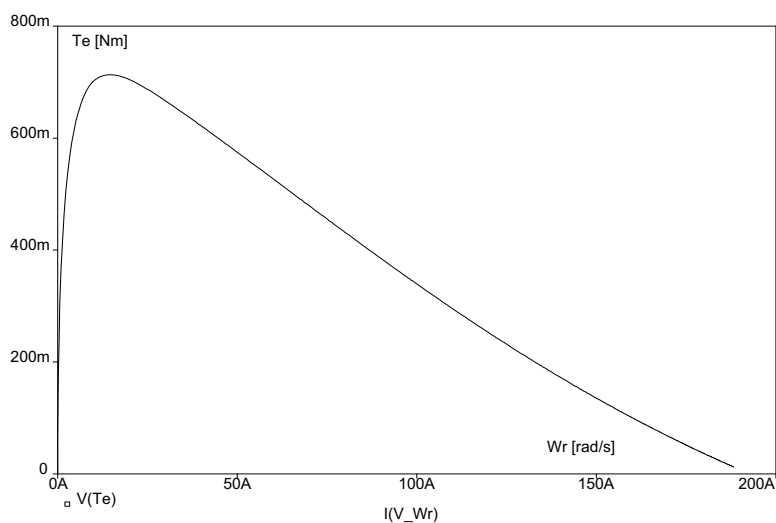




Rys. 8.27. Wyniki analizy **TRAN SBMT**: rozruch przy $\theta_{esu}(0) = 0$; $\theta_r(0) = 0$ oraz $T_L = 0$:
 a) napięcia stojana; b) prądy stojana c) prądy magnesujące w układzie osi wirujących qd^r



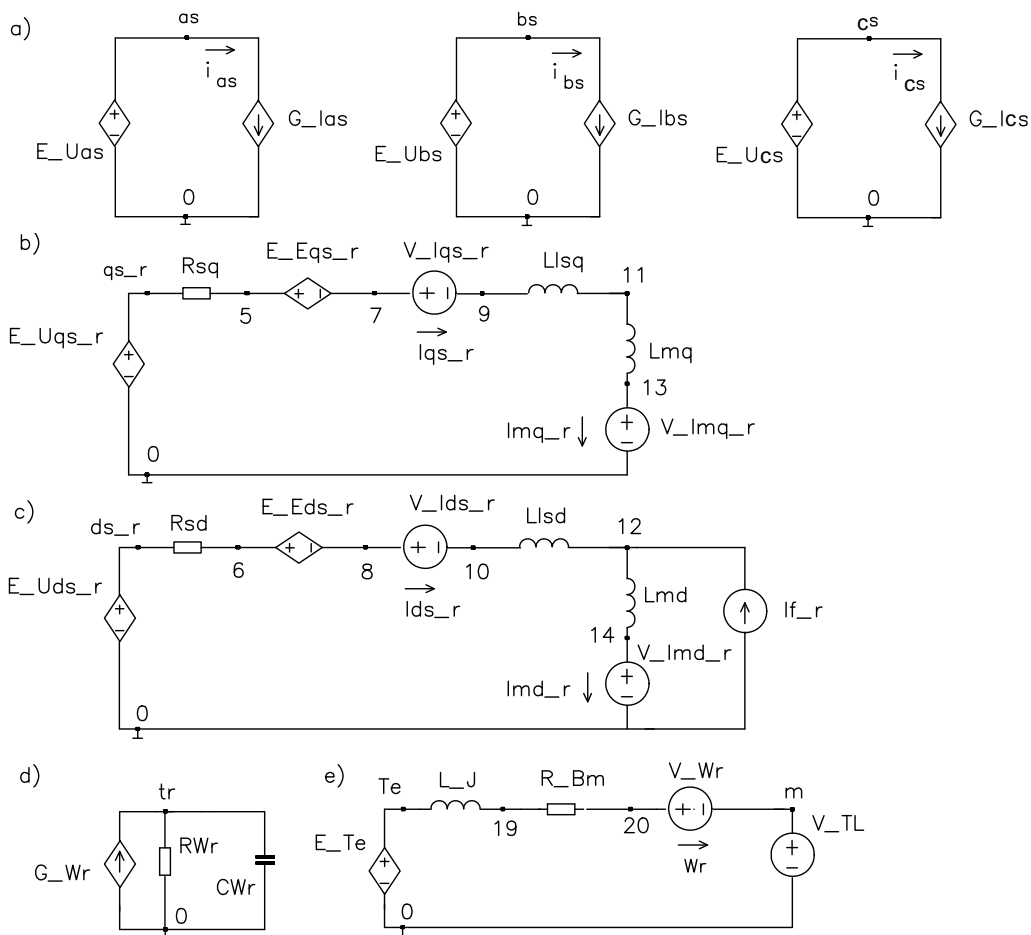
Rys. 8.28. Wyniki analizy **TRAN SBMT**: rozruch przy $\theta_{esu}(0) = 0$; $\theta_r(0) = 0$ oraz $T_L = 0$:
 T_e – moment elektromagnetyczny; ω_r – (Wr) elektryczna prędkość kątowa silnika



Rys. 8.29. Wyniki analizy **TRAN SBMT**: rozruch przy $\theta_{esu}(0) = 0$; $\theta_r(0) = 0$ oraz $T_L = 0$:
 dynamiczna charakterystyka mechaniczna $T_e = T_e(\omega_r)$

Przykłady analizy: SBMT z uzwojeniem 3-pasmowym

Podstawą pracowania pliku wsadowego PSPICE'a jest model obwodowy na rys. 8.30, oparty na modelu obwodowym z rys. 8.23. Oznaczenia elementów obwodowych na rys. 8.30 są zgodne z konwencją PSPICE'a. Badano dwa przypadki zasilania silnika: sinusoidalne i falownikowe (odkształcone). Analizę wykonano dla silnika firmy **BALDOR**: silnik typu BSM100N-4150AA.



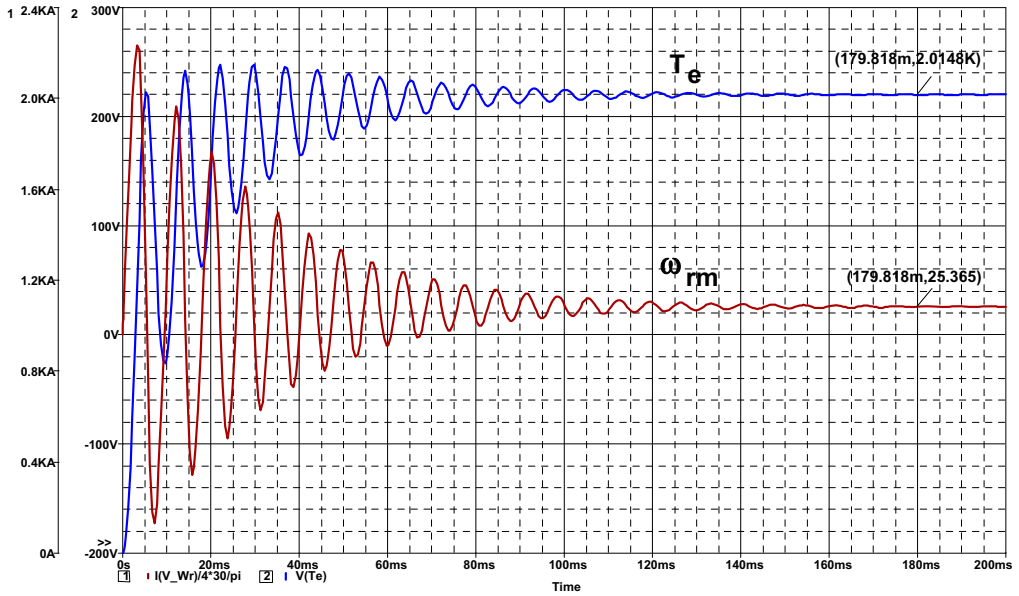
Rys. 8.30. Analog elektryczny silnika bezszczotkowego o magnesach trwałych z uzwojeniem 3-pasmowym (układ osi $as\ bs\ cs/qd'$) do sformułowania pliku wsadowego PSPICE'a

a) układ obliczania transformacji zmiennych $as\ bs\ cs/qd'$; b) obwód osi q stojana; c) obwody osi d stojana; d) układ obliczania położenia kąтового wirnika, e) analog elektryczny układu mechanicznego

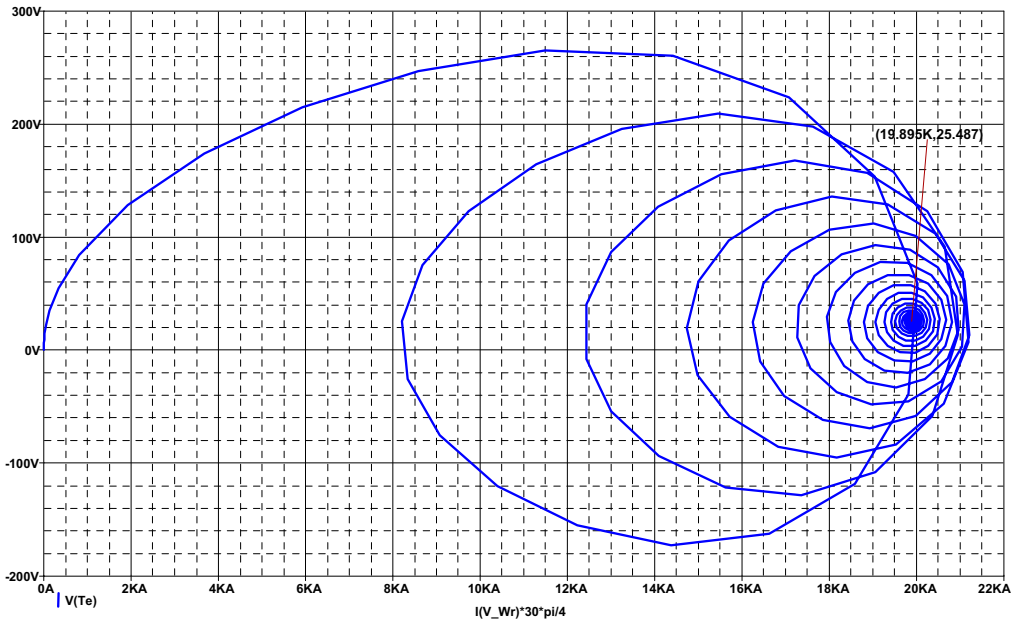
Stan nieustalony: zasilanie napięciem sinusoidalnym

Interesującymi charakterystykami stanu nieustalonego są charakterystyki rozruchowe. Wyznacza się je za pomocą analizy stanu nieustalonego **TRAN** symulatora PSPICE. Przykładowy przebieg pokazano na rys. 8.31.

a)



b)



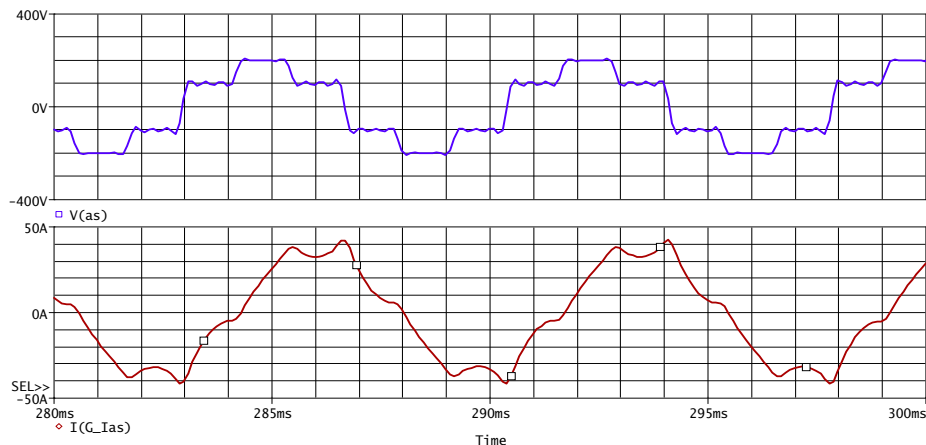
Rys. 8.31. Wyniki analizy **TRAN SBMT** z uzwojeniem 3-pasmowym – zasilanie napięciem sinusoidalnym: rozruch przy $U_{dn} = 300\text{V}$ $\theta_{esu}(0) = 0.1858$ rad; $\theta_r(0) = 0$; $T_L = k_{TL} \cdot \omega_m$; $k_{TL} = 0.12$ Nms/rad

- a) $T_e = T_e(t)$ – moment elektromagnetyczny; $\omega_m = \omega_m(t)$ – prędkość kątowa mechaniczna silnika
 b) dynamiczna charakterystyka mechaniczna $T_e = T_e(\omega_m)$

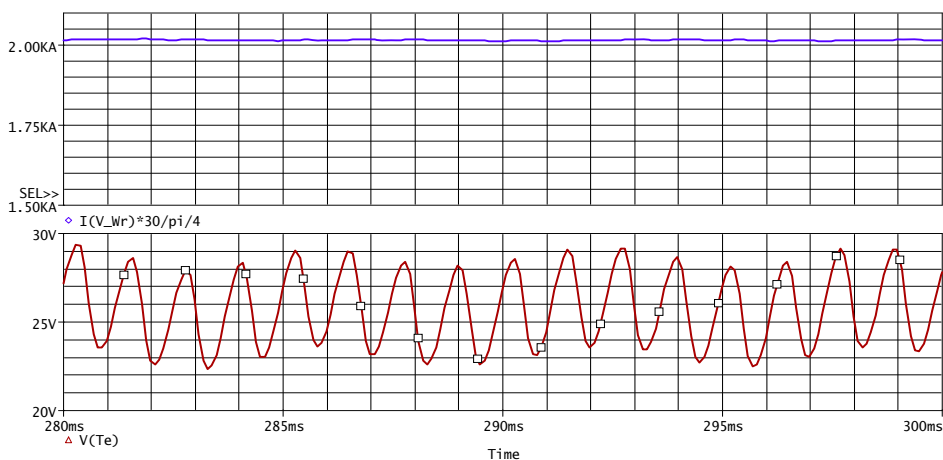
Stan nieustalony: zasilanie z falownika (napięciem odkształconym)

Charakterystyki stanu nieustalonego wyznaczono przy założeniu, że napięcie zasilania jest przedstawione za pomocą szeregu Fourier'a. Poniżej podano zależności na napięcia zasilania w konwencji programu PSPICE. Przyjęto odpowiednio harmoniczne rzędu: 1; 5; 7; 11; 13; 17 i 19. Przykładowe przebiegi w stanie ustalonym pracy silnika pokazano na rys. 8.32.

a)



b)



Rys. 8.32. Wyniki analizy .TRAN SBMT z uzwojeniem 3-pasmowym - zasilanie napięciem odkształconym (falownikowe): przebiegi w stanie ustalonym przy $U_{dn} = 300V$ $\theta_{esu}(0) = 0.1858$ rad; $\theta_r(0) = 0$; $T_L = k_{TL} * \omega_{rm}$; $k_{TL} = 0.12$ Nms/rad: a) napięcie u_{as} i prąd i_a pasmowy stojana, b) prędkość kątowna mechaniczna ω_{rm} i moment elektromagnetyczny T_e

8.2.6. Literatura

- [1] Antal L.: *Numeryczna analiza pól elektromagnetycznych*. Wykłady publikowane na stronie www.imne.pwr.wroc.pl
- [2] *CAD Package for Electromagnetic and Thermal Analysis Using Finite Elements*. Flux2d User's guide. CEDRAT, 2010
- [3] Chalmers B.J., Akmes L., Musaba L.: *Validation of Procedure for Prediction of Field-Weakening Performance of Brushless Synchronous Machine*. International Conference on Electrical Machines, 2–4 September 1998, Istanbul, Turkey, p. 320–323.

- [4] Dudzikowski I., Pawlaczyk L.: *Maszyny prądu stałego o magnesach trwałych i ich sterowanie – stan aktualny i perspektywy rozwoju*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Elektryka z. 176, 2001, s. 59–78.
- [5] Gieras J. F. : *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. 2nd edition. Springer 2008.
- [6] Gieras J.F., Bianchi N.: *Electric Motors for Light Traction*. 10th International Power Electronics and Motion Control Conference. EPE-PEMC 2002. 9-11 September 2002, Cavtat & Dubrovnik, Croatia. Proc. CD-ROM, p. 1-11
- [7] Jahns T.M., Soong W.L.: *Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives-A Review*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 43, no. 2, April 1996, p. 321–330.
- [8] Kaczmarek T., Zawirski K.: *Układy napędowe z silnikiem synchronicznym*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000.
- [9] Kosmol J.: *Serwonapędy obrabiarek sterowanych numerycznie*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.
- [10] Łukaniszyn M., Jagieła M., Wróbel R.: *Optymalizacja kształtu magnesów trwałych w bezszczotkowym silniku prądu stałego*. 39th International Symposium on Electrical Machines SME 2003, Gdańsk-Jurata 2003. Proceedings CD-ROM, p. 1–5.
- [11] Łyskawiński W., Szeląg W.: *Struktury obwodów magnetycznych maszyn synchronicznych magneto-elektrycznych*. XXXIII International Symposium on Electrical Machines, SME'97 Poznań, 9–12 June 1997, s. 67–72.
- [12] Mendrela E., Łukaniszyn M., Macek-Kamińska K.: *Tarczowe silniki prądu stałego z komutacją elektroniczną*. PAN Oddział w Katowicach. Komisja Elektroniki. Wydawnictwo Gnome, Katowice 2002.
- [13] Michna M., Ronkowski M.: *Koncepcja budowy silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi na bazie elementów seryjnie produkowanych silników indukcyjnych*, Przegląd Elektrotechniczny. R. 81, nr 10 (2005), s. 111–116.
- [14] Michna M.: *Wpływ struktury obwodów magnetycznych na wybrane parametry silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi*. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2004.
- [15] Mikiewicz R., Mrozek A.: *Właściwości silników synchronicznych z magnesami trwałymi rozmieszczonymi na powierzchni wirnika*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka 168, s. 137–146 (1999).
- [16] Miller T.J.E.: *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*, Clarendon Press, Oxford 1989.
- [17] Mizan M.: *Pomiary i estymacja kąta położenia wirnika silnika synchronicznego z magnesami trwałymi*. Zeszyty Naukowe Wydz. Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 15, 2000.
- [18] Novotny D.W., Lipo T.A.: *Vector Control and Dynamics of AC Drives*. Oxford Science Publications, Oxford 1996.
- [19] Orłowska-Kowalska T.: *Stan obecny i tendencje rozwojowe napędu elektrycznego*. Przegl. Elektrotechniczny R. 80, nr 3, 2004, s. 185-197.
- [20] Slemon G.R.: *Electrical machines for variable-frequency drives..* Proc. of the IEEE, vol. 82, no. 8, 1994, p. 1123–1139.
- [21] Wiak S., Dems M., Komeża K.: *Adaptacja profesjonalnych pakietów do modelowania zjawisk w przetwornikach elektromechanicznych*. IV Konferencja Naukowo-Techniczna "Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice" ZkW'99, Poznań/Kiekrz, 1999, s. 505-508.
- [22] Zhu Z. Q., Howe D., Ekkehard B., Ackermann B.: *Instantaneous Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent Magnet Motors, part I:Open-Circuit Field*. IEEE Transactions on Magnetics vol .29, no. 1 (Jan. 1993), p.124–34.
- [23] Zhu Z.Q., Xia Z.P., Howe D.: *Comparison of Halbach magnetized brushless machines based on discrete magnet segments or a single ring magnet*. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 38, no. 5, Sept. 2002, p. 2997–2999.
- [24] de Jong H.C.J.: *AC motor design. Rotating magnetic fields in a changing environment*. New York: Hemisphere Publishing Corp. 1989.

Ważniejsze adresy internetowe producentów/dystrybutorów

- [25] ABB Sp. z o.o., www.abb.pl/ProductGuide
- [26] Baldor Electric www.baldor.com

- [27] Hansen Corporation www.hansen-motor.com
 [28] KOMEL Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych www.komel.katowice.pl
 [29] Lynch Motor Company Ltd www.lemcoltd.com
 [30] Siemens www.automation.siemens.com
 [31] Leroy-Somer www.leroy-somer.com

8.3. Silniki indukcyjne wielofazowe

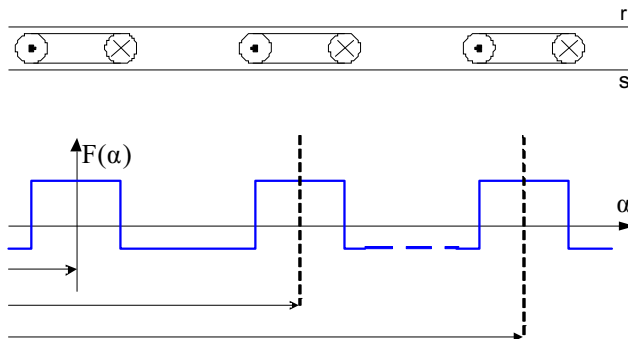
8.3.1. Formy budowy

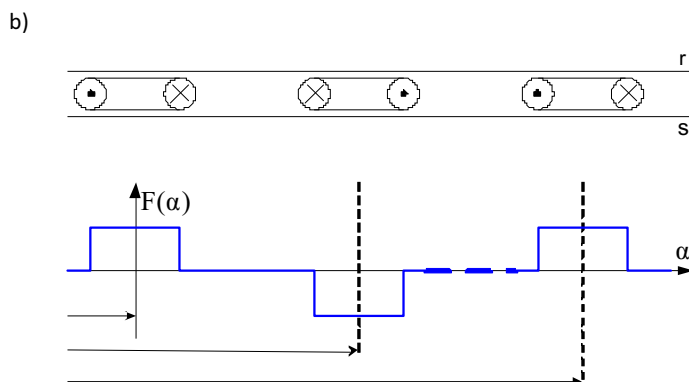
W rozdziale tym omówiono podstawowe właściwości silników indukcyjnych klatkowych z uzwojeniem stojana o liczbie pasm fazowych większej od trzech. Silniki indukcyjne wielofazowe w budowie różnią się od silników dwu- i trójfazowych jedynie liczbą pasm fazowych uzwojeń stojana. Posiadają one jednak dodatkowe cechy, których nie wykazują silniki dwu- i trójfazowe. Cechy te umożliwiają dodatkowe kształtowanie charakterystyk silników wielofazowych inne niż silników w wykonaniach standardowych. Do najistotniejszych cech decydujących o dodatkowym kształtowaniu charakterystyk silników tego rodzaju należą:

- możliwość zmiany liczby par biegunów wirującego pola magnetycznego poprzez odpowiednie przełączenie uzwojenia stojana względem źródła zasilającego – w tym przypadku występuje pojęcie kolejności zasilania oznaczanej symbolem m ;
- możliwość pracy, rozruchu i hamowania elektrycznego przy braku zasilania części pasm fazowych uzwojenia stojana.

Zmiana kolejności następstwa faz napięć zasilających uzwojenia stojana silnika wielofazowego umożliwia skokową zmianę prędkości obrotowej wirnika bez zmiany częstotliwości, podobnie jak w silnikach trójfazowych z uzwojeniem wielobiegowym [33, 36, 38]. Taka metoda regulacji prędkości jest szczególnie prosta do realizacji przy zasilaniu silnika z falownika (odpowiednie sterowanie zaworów falownika zasilającego silnik). Należy podkreślić fakt, że zmiana liczby par biegunów wypadkowego pola magnetycznego zależy od konfiguracji uzwojenia stojana, a w rezultacie od generowanego spektrum harmonicznych przestrzennych. Ze względu na generowane spektrum harmonicznych pola uzwojenia stojanów tych maszyn dzielą się na dwa rodzaje, uzwojenie niesymetryczne i uzwojenie symetryczne. W literaturze przedmiotu [34] uzwojenia te nazywane są też odpowiednio uzwojeniem pierwszego typu i uzwojeniem drugiego typu. Na rysunku 8.33 pokazano schematyczny rozkład siły magnetycznej (SMM) w funkcji kąta α uzwojenia fazowego pierwszego i drugiego typu.

a)



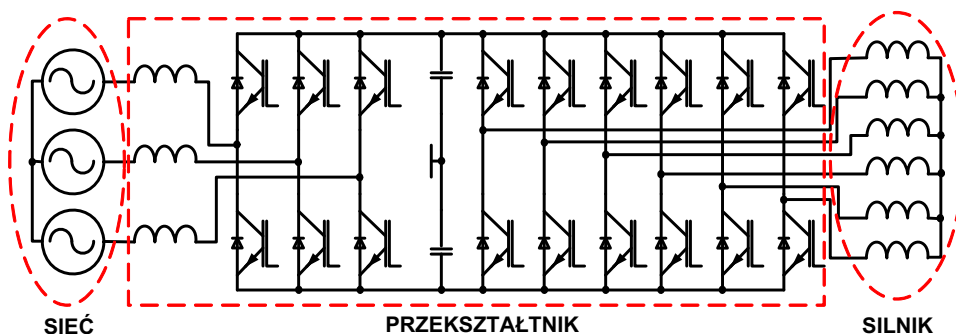


Rys. 8.33. Schematyczny rozkład SMM w funkcji kąta α :
a) uzwojenia pierwszego typu, b) uzwojenia drugiego typu

Jak widać z zamieszczonego rys. 8.33a SMM ($F(\alpha)$) jest niesymetryczna względem osi odciętych, z tego właśnie względu uzwojenie pierwszego typu nazywane jest niesymetrycznym, a uzwojenie którego SMM jest symetryczna względem osi odciętych uzwojeniem symetrycznym. Uzwojenia te umożliwiają różne kształtowanie charakterystyk silnika, prądy przepływające przez te uzwojenia wytwarzają pola magnetyczne o różnej liczbie par biegunów, a także o różnym kierunku wirowania dla każdej kolejności następstwa faz napięć zasilających.

8.3.2. Układy zasilania i zasada sterowania

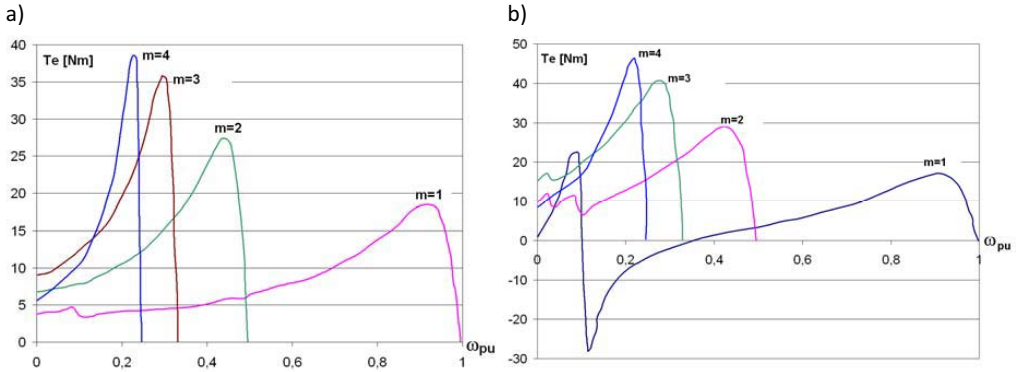
Silniki indukcyjne wielofazowe wymagają do zasilania odpowiedniego źródła. Dawniej, kiedy energoelektronika nie była tak rozwinięta jak obecnie, silniki te wykonywano z uzwojeniem o liczbie faz będącej wielokrotnością liczby 3. Do zasilania tych silników stosowano wówczas specjalne transformatory z kombinacjami połączeń uzwojeń po stronie wtórnej umożliwiającymi uzyskanie odpowiedniego układu napięć (transformatory te zasilane były napięciem trójfazowym, natomiast po stronie wtórnej możliwe było uzyskanie układu sześć-, dziewięcio- i dwunastofazowego). Obecnie zbudowanie wielofazowego układu zasilającego (o dowolnej liczbie faz, o dowolnym rozmieszczeniu wektorów napięć, niekoniecznie symetrycznym) jest zdecydowanie prostsze. Do zasilania silników wielofazowych stosowane są falowniki o odpowiedniej liczbie gałęzi w module mocy i stosownym dla tej liczby gałęzi układzie sterowania. Na rysunku 8.34 pokazano schemat przykładowego układu zasilania silnika sześćfazowego.



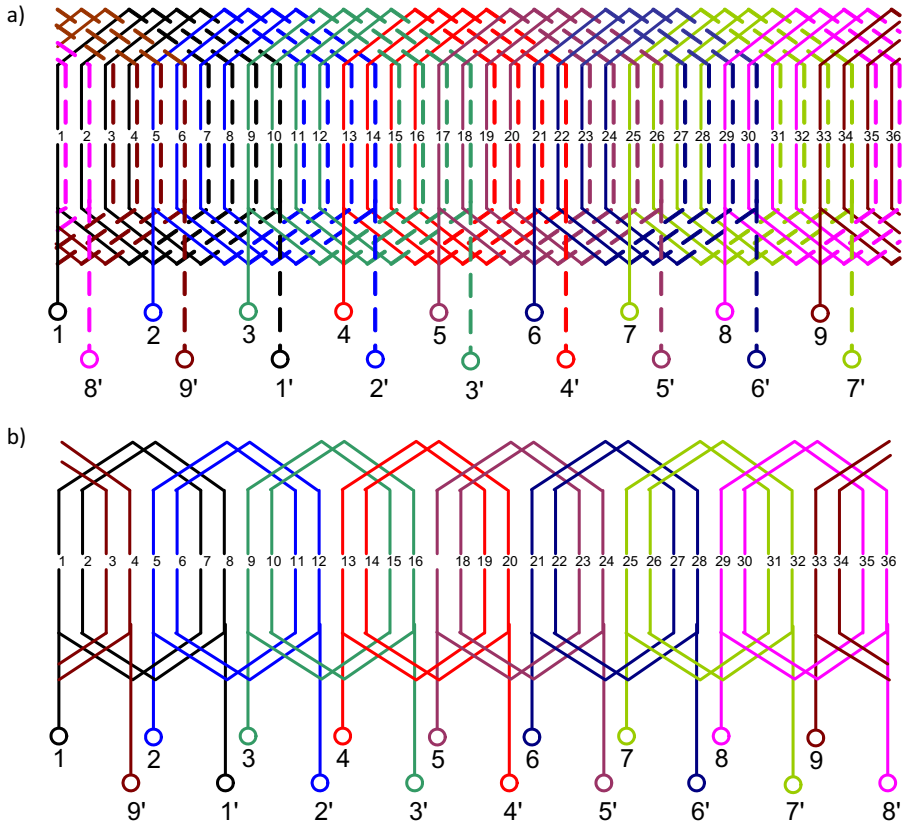
Rys. 8.34. Schemat układu zasilania silnika sześćfazowego [32]

8.3.3. Charakterystyki ruchowe i sterowanie prędkością obrotową

Jak wspomniano wyżej, zmiana sekwencji napięć zasilających uzwojenia stojana silnika indukcyjnego wielofazowego umożliwia zmianę liczby par biegunów wirującego pola magnetycznego, a tym samym skokową zmianę prędkości obrotowej wirnika. Na rysunku 8.35 przedstawiono charakterystyki mechaniczne silnika dziewięciofazowego dla dwóch wariantów uzwojeń stojana (rys. 8.36).

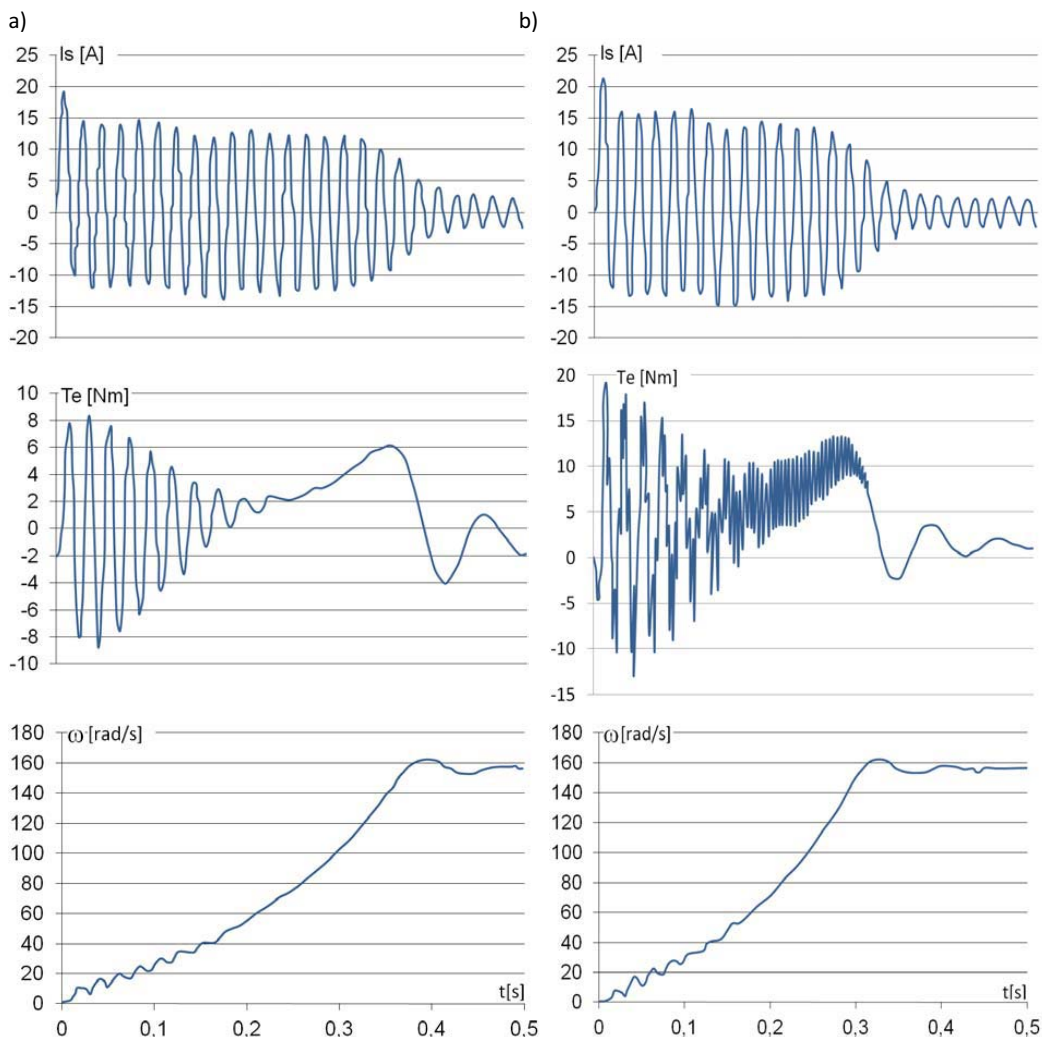


Rys. 8.35. Charakterystyki mechaniczne dziewięciofazowego silnika przy kolejności zasilania $m = 1, m = 2, m = 3, m = 4$ dla: a) uzwojenia z rys. 8.35a, b) uzwojenia z rys. 8.35b [35]



Rys. 8.36. Uzwojenia silnika dziewięciofazowego [35]

Jak widać z zamieszczonych charakterystyk, nie zawsze jest możliwa praca silnika wielofazowego przy wszystkich kolejnościach zasilania. Dla silnika z uzwojeniem z rys. 8.36b nie jest możliwe wykorzystanie kolejności zasilania $m = 1$ ze względu na zerową wartość momentu rozruchowego, oraz ze względu na zmianę znaku momentu elektromagnetycznego. Spowodowane jest to dużą zawartością wyższych harmonicznych w przebiegu momentu elektromagnetycznego. Zatem istotnym problemem w tego typu maszynach, podobnie jak w maszynach trójfazowych, jest problem odpowiedniego doboru uzwojenia stojana w celu uzyskania właściwych charakterystyk mechanicznych (ograniczenia wyższych harmonicznych momentu elektromagnetycznego). Jednym ze sposobów ograniczania pasożytniczych harmonicznych momentu oprócz odpowiedniego doboru uzwojeń stojana jest stosowanie skosu żłobków w wirniku. Przykładowe przebiegi, prądu fazowego stojana, momentu elektromagnetycznego i prędkości kątovej wirnika dla silnika z uzwojeniem z rys. 8.36a przy rozruchu bezpośrednim przedstawiono na rys. 8.37.



Rys. 8.37. Przebiegi prądu, momentu elektromagnetycznego i prędkości kątovej wyznaczone podczas rozruchu bezpośredniego silnika dziewięciofazowego z uzwojeniem z rys. 8.34a:

a) ze skosem żłobków w wirniku, b) bez skosu żłobków w wirniku przy kolejności zasilania $m = 2$ [35]

8.3.4. Podsumowanie

Zalety silników wielofazowych:

- mniejsza zawartość harmonicznych w rozkładzie indukcji magnetycznej w szczelinie roboczej (rozkład indukcji zbliżony bardziej do sinusoidalnego),
- możliwość stosowania uzwojeń jednowarstwowych o poskoku średnicowym zamiast droższych uzwojeń dwuwarstwowych,
- zastosowanie do budowy falowników kluczy o mniejszych prądach znamionowych (większa liczba faz) – zastosowanie większej liczby kluczy na mniejsze prądy powoduje obniżenie kosztów budowy falownika,
- zastosowanie kluczy o największych wartościach prądów znamionowych umożliwia wykonanie układu napędowego o zdecydowanie większej mocy niż w przypadku tradycyjnych maszyn trójfazowych,
- możliwość pracy, rozruchu i hamowania elektrycznego przy braku zasilania części pasm fazowych uzwojenia stojana,
- możliwość zmiany liczby par biegunów – regulacja prędkości kątowej wirnika bez zmiany częstotliwości napięcia zasilającego.

Wydaje się, że jedyną i największą wadą silników indukcyjnych wielofazowych jest konieczność stosowania specjalnych układów zasilających (specjalnych falowników lub transformatorów w przypadku silników o liczbie faz będącej wielokrotnością 3). Nie jest możliwe bezpośrednie zasilanie silnika z powszechnie stosowanych sieci trójfazowych.

8.3.5. Literatura

- [32] Cursino Brandão Jacobina, Isaac Soares de Freitas, Clayton Ricarte da Silva, Maurício Beltrão de Rositer Corrêa, Edison Roberto Cabral da Silva.: *Reduced Switch-Count Six-Phase AC Motor Drive Systems Without Input Reactor*. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 55, NO. 5, MAY 2008.
- [33] Dąbrowski M.: Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego. Wyd. II. WNT, Warszawa 1994.
- [34] Drozdowski P.: Kształtowanie charakterystyk i własności ruchowych wielofazowych silników indukcyjnych klatkowych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2000.
- [35] Drozdowski P.: *Parasitic effects of polyphase cage induction motors fed by a voltage source inverter*. Prace naukowe instytutu maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 50, 2000.
- [36] Kamiński G., Przyborowski W.: *Uzwojenia i parametry maszyn elektrycznych*. Ofic. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
- [37] Rogalski A., Pochanke A., Bieńkowski K.: *Rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej silnika indukcyjnego wielofazowego*. XL Sympozjum Maszyn Elektrycznych, SME 2004, 15–18 czerwiec, Hajnówka.
- [38] Zawilak J.: *Uzwojenia zmiennobiegunowe maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Prace naukowe Instytutu układów Elektromaszynowych Politechniki Wrocławskiej, nr 37, seria M nr 7, Wrocław 1986.

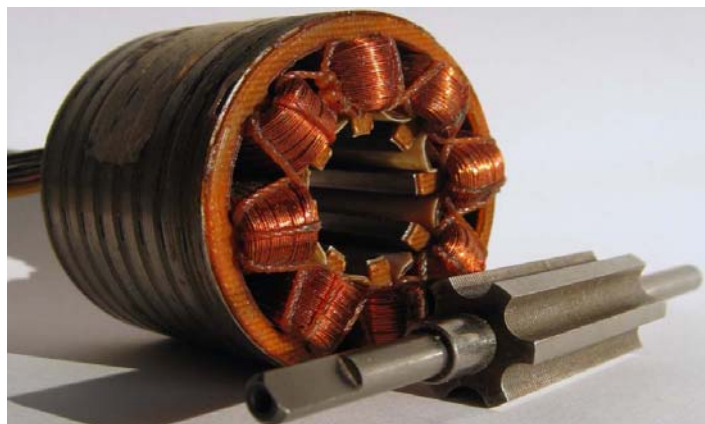
8.4. Silniki reluktancyjne przełączalne

Koncepcja przełączalnego silnika reluktancyjnego (ang. *Switched Reluctance Motor* – SRM) została opracowana w 1838 roku. Kolejne pasma silnika SRM zasilane są ze źródła napięcia stałego w funkcji położenia wirnika. Wymaga to zastosowania bardzo szybkich kluczy energoelektronicznych (MOSFET, IGBT). Dopiero postęp, jaki dokonał się w dziedzinie elektroniki i energoelektroniki, pozwolił na częstsze wykorzystywanie SRM w przemyśle i urządzeniach gospodarstwa domowego. Sterowanie silnika SRM wymaga odpowiednich układów mikroprocesorowych lub sterowników. Rozwój w zakresie techniki mikroprocesorowej i metod sterowania pozwolił w pełni wykorzystać możliwości przełączalnego silnika reluktancyjnego [40].

Głównymi zaletami SRM są: duża niezawodność, niski koszt produkcji, prosta budowa, mały moment bezwładności wirnika, wyższa sprawność w porównaniu np. z silnikami indukcyjnymi oraz dokładna regulacja prędkości obrotowej, uzyskiwana tanim kosztem przez zastosowanie układów bezczujnikowych. Główne wady silników reluktancyjnych to hałas akustyczny i tętnienia momentu obrotowego.

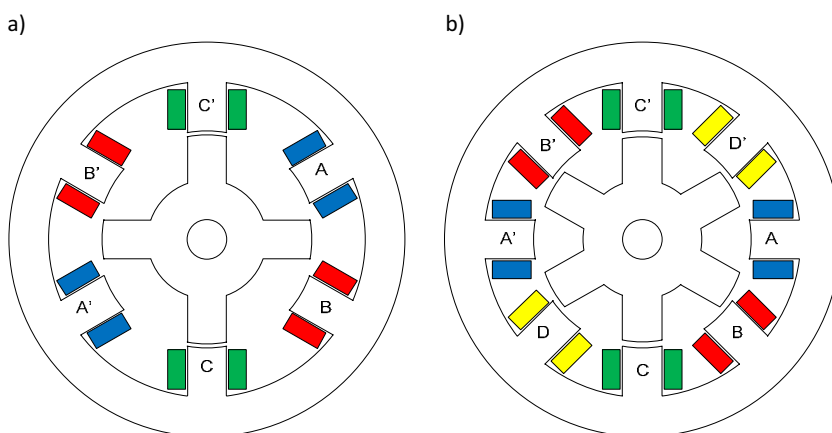
8.4.1. Formy budowy

Silnik reluktancyjny przełączalny ma bardzo prostą budowę. Zarówno stojan jak i wirnik silnika SRM wykonane są z pakietu blach stalowych (prądnicowych) wyciętych tak, by utworzyły bieguny wydane na obwodzie stojana i wirnika. Dla zdecydowanej większości konstrukcji liczba biegunów stojana jest różna od liczby biegunów wirnika. Na biegunach stojana są nawinięte pasma uzwojenia, natomiast wirnik nie posiada żadnych uzwojeń ani też magnesów trwałych (rys. 8.38).



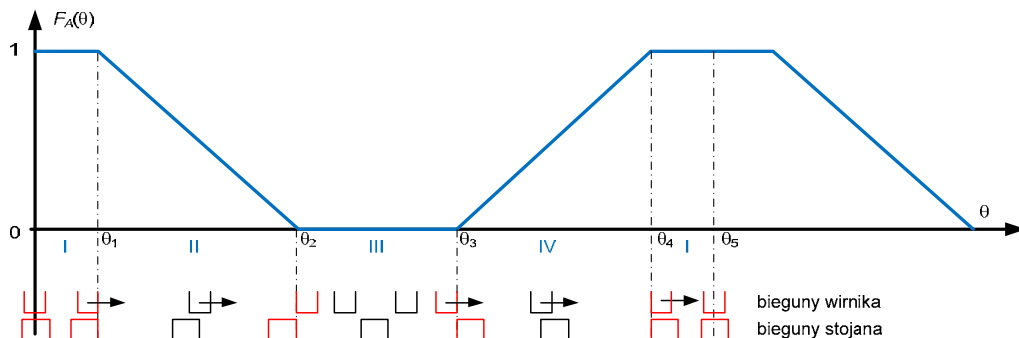
Rys. 8.38. Silnik reluktancyjny przełączalny, stojan i wirnik

Obszerny przegląd konstrukcji silników SRM przedstawiono w pracach [42, 43]. W układach napędowych o regulowanej prędkości najczęściej stosuje się silniki SRM z jedną (3-pasmowe typu 6/4 i 4-pasmowe typu 8/6) lub dwoma (3-pasmowe typu 12/8 i 4-pasmowe typu 16/12) parami biegunów na fazę (rys. 8.39). Uzwojenie każdego z pasm tego silnika składa się z dwóch cewek nawiniętych na przeciwległych biegunach i połączonych szeregowo.



Rys. 8.39. Przekroje silników SRM (z zaznaczonymi początkami i końcami uzwojeń fazowych):
a) trójfazowego 6/4, b) czterofazowego 8/6 [41, 48]

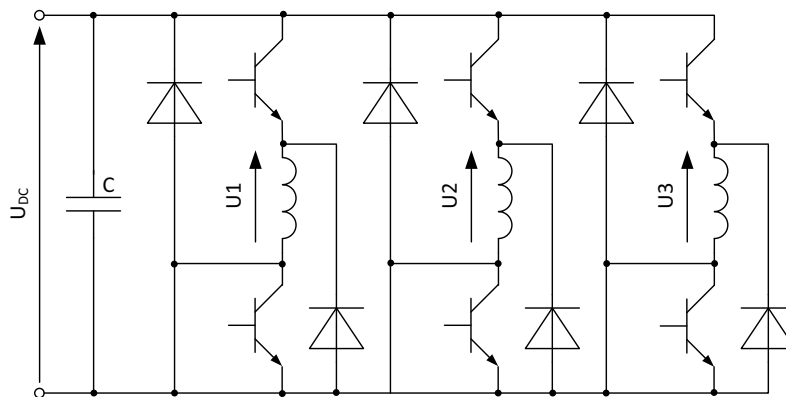
Z budowy silnika SRM wynika, że indukcyjność pasma uzwojenia stojana zmienia się okresowo wraz ze zmianą położenia wirnika. Okres tych zmian (w radianach) jest równy $2\pi/N_r$, gdzie N_r jest liczbą biegunów wirnika. Zmiana położenia wirnika względem stojana w silniku SRM może być opisana za pomocą funkcji nachodzenia na siebie biegunów stojana i wirnika [40]. Przebieg tej funkcji $F_A(\theta)$ dla bieguna stojana należącego do pasma A silnika z przedstawiono na rys. 8.40. Funkcja ta określa względną wspólną powierzchnię przy szczelinie powietrznej bieguna stojana i nachodzącego na niego bieguna wirnika, odniesioną do powierzchni bieguna stojana.



Rys. 8.40. Funkcja nachodzenia na siebie $F_A(\theta)$ dla biegunów stojana pasma A [41, 45]

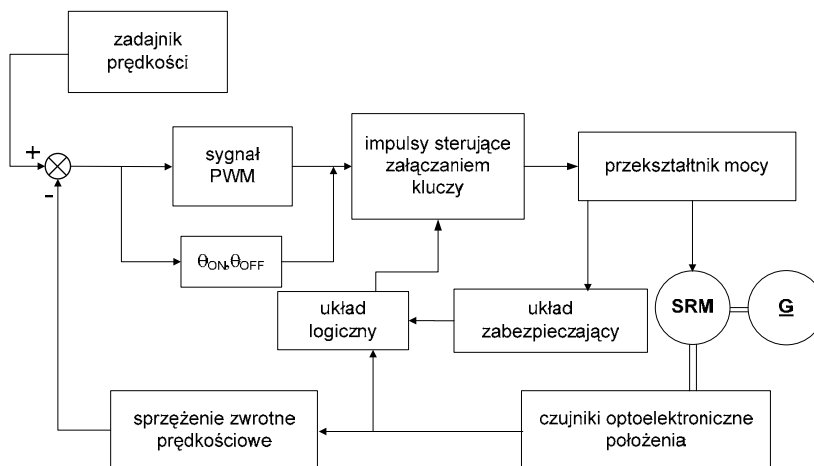
8.4.2. Układy zasilania i zasada sterowania

Silnik SRM jest zasilany impulsami prądowymi podawanymi kolejno na każde z pasm stojana. Załączanie i wyłączenie prądu w danym paśmie odbywa się wówczas, gdy wirnik znajduje się w dokładnie określonych położeniach (położenie biegunów wirnika względem biegunów stojana zasilanego pasma). Kąty załączenia i wyłączenia prądu zależą i zmieniają się wraz ze zmianą prędkości obrotowej silnika i momentu obciążenia.



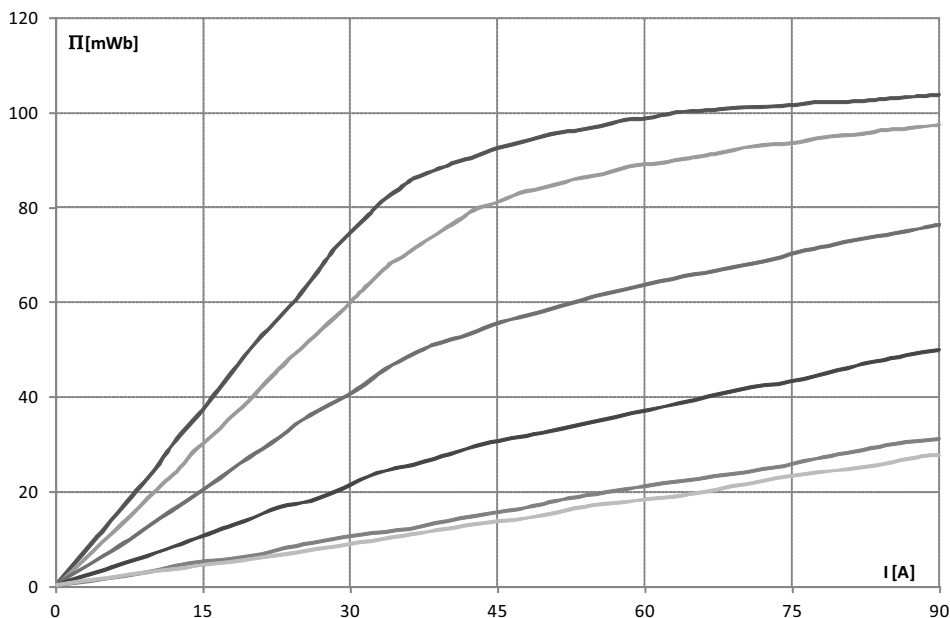
Rys. 8.41. Schemat układu zasilania uzwojeń SRM

W celu wyznaczenia kąta położenia wirnika stosuje się układy czujnikowe lub bezczujnikowe. Układy czujnikowe wykorzystują enkodery, resolwery lub czujniki Halla (rys. 8.42).



Rys. 8.42. Schemat blokowy układu sterowania silnika SRM [41, 45]

Metody bezczujnikowego wyznaczania kąta położenia wirnika polegają na chwilowym pomiarze napięcia u i prądu i uzwojenia fazowego, potrzebnego do obliczenia strumienia sprzężonego ψ , ściśle związanego z kątem θ położenia wirnika silnika. Zależności między tymi trzema wielkościami (i , ψ , θ) pokazują charakterystyki magnesowania silnika reluktancyjnego (rys. 8.43).

Rys. 8.43. Rodzina charakterystyk magnesowania $\psi = f(i, \theta)$ SRM [41, 45]

8.4.3. Modele fizyczne i obwodowe

Silnik reluktancyjny przełączalny (ang. *switched reluctance motor* (SRM)) jest przetwornikiem elektromechanicznym (rys. 8.17) o dwóch wrotach (parach zacisków), które fizycznie reprezentują: jedno „wejście elektryczne” – zaciski uzwojenia stojana „s”; jedno „wyjście mechaniczne” – koniec wału (sprzęgło). Moc elektryczna (dostarczana) P_s i moc mechaniczna (odbierana) P_m ulegają prze-

mianie elektromechanicznej za pośrednictwem pola magnetycznego wzbudzanego prądem płynącym w kolejnych pasmach uzwojenia stojana. Energia pola magnetycznego jest energią wewnętrzną silnika, gdyż przetwornik nie ma możliwości wymiany tej energii z otoczeniem.



Rys. 8.44. Silnik reluktancyjny przełączalny – dwuwrotowy przetwornik elektromechaniczny: wrota (zaciski) obwodu stojana „s” – dopływ energii elektrycznej przetwarzanej na energię mechaniczną, wrota układu (obwodu) mechanicznego „m” – odpływ energii mechanicznej

W danej chwili zasilane jest tylko uzwojenie jednego pasma i dla dobrze zaprojektowanych silników SRM można przyjąć, że sprzężenie wzajemne pomiędzy pasmami jest pomijalnie małe [42–44]. Biorąc pod uwagę powyższe założenie, równanie napięciowe dla jednego pasma może być zapisane jako:

$$u = R \cdot i + \frac{d\psi}{dt} \quad (8.22)$$

gdzie: u – napięcie przyłożone do zacisków uzwojenia,
 i – prąd pasma,
 R – rezystancja pasma,
 ψ – strumień magnetyczny sprzężony.

Ponieważ strumień magnetyczny sprzężony jest funkcją położenia wirnika i prądu pasma $\psi(\theta, i)$, prawa strona równania może być rozpisana do postaci:

$$u = R \cdot i + \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (8.23)$$

gdzie θ jest kątem położenia wirnika w radianach.

Ponieważ procesy elektromagnetyczne przebiegają znacznie szybciej niż mechaniczne, dla krótkiego przedziału czasu można przyjąć, że prędkość kątowa nie zmienia się. Dla stałej prędkości równanie (8.23) można zapisać w postaci:

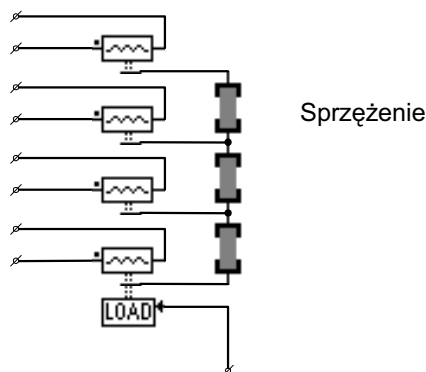
$$u = R \cdot i + \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial i} \frac{di}{dt} + \omega_m \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (8.24)$$

gdzie ω_m jest prędkością kątową w radianach na sekundę.

W modelowaniu silnika SRM, ze względu na dużą nieliniowość jego obwodu magnetycznego, bardzo ważny jest sposób modelowania charakterystyk magnesowania. Istotna jest również możliwość modelowania silników w różnych wykonaniach konstrukcyjnych i o różnej liczbie pasm.

Model n -pasmowego przełączalnego silnika reluktancyjnego jest tworzony z modeli pojedynczych pasm silnika SRM i składa się z n pojedynczych pasm z wirtualnymi wałami oraz $n-1$ sprzężeń mechanicznych łączących wirtualne wały poszczególnych pasm.

W takim modelu charakterystyki elektromagnetyczne silnika są obliczane oddzielnie dla każdego z pasm, a jego moment elektromagnetyczny jest otrzymywany poprzez złożenie składowych momentu generowanych przez poszczególne pasma. Graficzną reprezentację modelu 4-pasmowego silnika wraz z obciążeniem przedstawiono na rys. 8.45.



Rys. 8.45. Model 4-fazowego silnika SRM z dołączonym obciążeniem

Równanie napięciowe dla pojedynczego (k -tego) pasma może być zapisane analogicznie jak (8.24)

$$u_k = R_k \cdot i_k + \frac{\partial \psi_k}{\partial i_k} \frac{di_k}{dt} + \omega_m \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} \quad (8.25)$$

Moment elektromagnetyczny dla pojedynczego pasma jest obliczany jako pochodna po kącie z całki strumienia sprężonego względem prądu pasma. Tak więc, równanie na moment elektromagnetyczny generowany przez pojedyncze pasmo może być zapisane w postaci:

$$T_k = \frac{\partial K(\theta, i)}{\partial \theta} \cdot \left(\int_0^i \psi_a(\tau) d\tau - \frac{1}{2} L_{u0} \cdot i^2 \right) \quad (8.26)$$

gdzie τ jest formalnym parametrem całkowania.

Kompletny model silnika SRM uzyskuje się, uzupełniając n równań napięciowych dla n pasm silnika równaniami opisującymi ruch obrotowy:

$$\sum_{k=1}^m J_k \frac{d\omega_m}{dt} + \sum_{k=1}^m D_k \cdot \omega_m = \sum_{k=1}^n T_k - T_L \quad \text{i} \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_m \quad (8.27)$$

gdzie $\sum_{k=1}^m T_k = T_e$ to moment elektromagnetyczny silnika SRM.

Należy zauważyć, że obliczenia momentu (8.26) uwzględniają nieliniowość silnika.

8.4.4. Literatura

- [39] D'hulster F.: Switched reluctance motor (SRM) drive modeling using Flux to Simulink technology, Flux Magazine, No. 41, pp. 10–11, 2003.
- [40] Ghoneim W.A.M., Fletcher J.E., Williams B.W.: Matrix approach for the generalised theory of doubly salient reluctance machines. IEE Proc. – Electr. Power Appl., Vol. 149, No. 1, pp. 65–80, 2002.
- [41] Iwan K., Mosoń I.: Modelowanie układu napędowego z przełączalnym silnikiem reluktancyjnym, Przegląd Elektrotechniczny, R. LXXVIII, Nr 5s, s. 144–150, 2002.
- [42] Krishnan R.: Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications, CRC Press, Boca Raton 2001.
- [43] Miller T. J. E.: Switched reluctance motors and their control. Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford 1993.
- [44] Miller T.J.E., McGilp M.: Nonlinear theory of the switched reluctance motor for rapid computer-aided design, IEE Proc., Vol. 137, Pt. B, No. 6, pp. 337–347, 1990.

- [45] Mosoń I., Iwan K., Nieznański J.: Circuit-Oriented Model of the Switched Reluctance Motor for Drive Systems Simulation, Proc. of the 28th IECON Conf., Sevilla, CD-ROM, 2002.
- [46] Mosoń I.: Modelling of magnetisation characteristics for a circuit-oriented model of the switched reluctance motor, Proc. of the 39th International Symposium on Electrical Machines SME 2003, Gdańsk-Jurata, CD-ROM, 2003.
- [47] Phillips N.W., Bolton H.R., Lewis J.D., Pollock C., Barnes M.: Simulation of switched reluctance drive system using a commercially available simulation package, IEE Conference Publication Nr 412 „Electrical Machines and Drives”, pp. 257–260, 1995.
- [48] Prokop J: Kompleksowe modelowanie silników reluktancyjnych przełączalnych w systemie MATLAB/MAPLE, Przegląd Elektrotechniczny, R. LXXVII, Nr 7–8, s. 191–196, 2001.
- [49] Mosoń I., Ronkowski M., Iwan K.: Model Silnika O Przełączalnej Reluktancji Do Zastosowań W Symulacji Napędów Przekształtnikowych. "Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym", SENE 2003.
- [50] Hillar S.: Wyznaczanie i modelowanie charakterystyk magnesowania przełączalnego silnika reluktancyjnego. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Gdańska 2004.

Ważniejsze adresy internetowe producentów/dystrybutorów

- [51] Switched Reluctance Drives Ltd www.srdrives.com

8.5. Silniki o ruchu złożonym

8.5.1. Uwagi ogólne

W nowoczesnych rozwiązaniach konstrukcyjnych napędów robotów, żyroskopów, obrabiarek sterowanych numerycznie, a także manipulatorów poszukuje się rozwiązań z wykorzystaniem tzw. **napędów osobliwych**. Zasadnicze wymagania stawiane takim napędom są następujące: realizacja ruchu w kilku stopniach swobody, łatwość sterowania, szybkość działania, integralna i zarazem prosta struktura elektromechaniczna. Nie mniej ważne jest osiągnięcie stosunkowo dużej dokładności i niezawodności pracy, a przede wszystkim eliminacja przekładni mechanicznych w napędzie.

Większość dotąd opracowanych struktur elektromechanicznych silników opiera się na wytwarzaniu ruchu obrotowego przy wykorzystaniu znanych od dawna zalet kolistości.

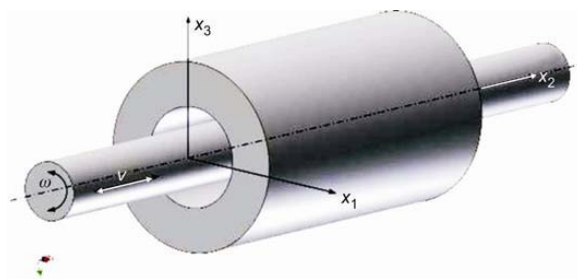
Do wymuszania ruchu liniowego, obrotowego lub złożonego wykorzystuje się siły elektromagnetyczne. Określony rodzaj ruchu jest wynikiem odpowiedniej transformacji topologicznej struktur geometrycznych maszyn elektrycznych oraz modyfikacji.

Aplikacja silników wymuszających wiele rodzajów ruchów prostych oraz złożonych eliminuje w napędach przekładnie mechaniczne. Efektem jest zwiększona precyzja oraz niezawodność działania zapewniająca jednocześnie mniejszą liczbę silników klasycznych. Zmniejszenie liczby silników w napędzie w znacznym stopniu upraszcza algorytm sterowania napędem o ruchy złożonym. Otwiera to zupełnie nowe możliwości realizacji rozwiązań konstrukcyjnych o cechach synergicznych – mechatronicznych, różnorodnych typów manipulatorów.

Głównymi przetwornikami realizującymi ruch złożony są silniki płaskie, cylindryczne oraz sferyczne. W klasie tej wyróżniają się niekonwencjonalne silniki elektryczne zawierające wirniki lub biegniki pozbawione więzów mechanicznych, a więc tzw. **tworniki swobodne**.

Osobliwą i dość liczną grupę stanowią silniki, w których wykorzystuje się zjawiska elektrodynamiczne oddziaływania prądów indukowanych z polem magnetycznym lub oddziaływania elektrodynamicznego elementów reluktancyjnych lub magnesów z czasowo-przestrzennym polem elektromagnetycznym. Więc buduje się zarówno silniki indukcyjne/asynchroniczne, skokowe oraz prądu stałego. Najchętniej wykorzystuje się silniki indukcyjne/asynchroniczne.

Ogólną strukturę silnika elektrycznego o ruchu złożonym, obiektu trójwymiarowego, przedstawia rys. 8.46.



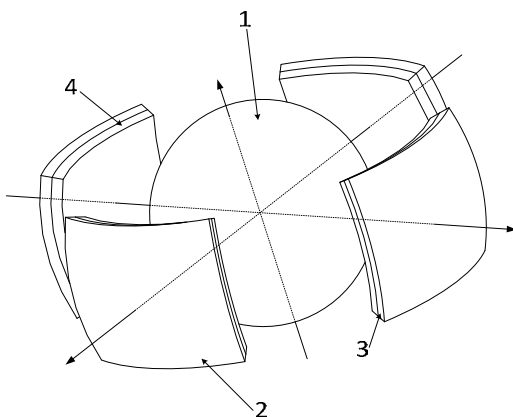
Rys. 8.46. Ogólny model silnika o ruchu złożonym [52]

W Polsce prace w tym obszarze prowadzi kilka ośrodków akademickich – największe osiągnięcia na tym polu ma zespół kierowany przez prof. G. Kamińskiego z Politechniki Warszawskiej. Poniżej podajemy dwa charakterystyczne rozwiązania silników o ruchu złożonym. Dalej podajemy jeden bardzo charakterystyczny przykład silnika o ruchu kulistym.

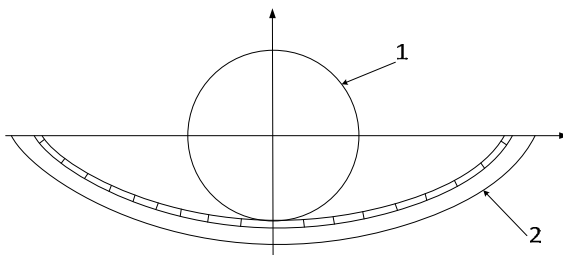
8.5.2. Formy budowy

Przykład struktur sferycznych silnika o ruchu złożonym pokazano na rys. 8.47.

a)



b)



Rys. 8.47. Struktury sferycznych silnika o ruchu złożonym [1]: a) wzбудniki modułowe: 1 – wirnik kulisty, 2 – wzбудnik modułowy, 3 – jarzmo wzbudnika, 4 – strefa żłobkowe-zębowa; b) wzбудnik z toczącym się wirnikiem: 1 – wirnik kulisty, 2 – wzbudnik [52]

8.5.3. Podsumowanie

Należy jednak pamiętać, że wszystkie omówione zalety maszyn specjalnych są okupione znacznym obniżeniem wskaźników energetycznych tych maszyn w stosunku do maszyn obrotowych w normalnym wykonaniu, tj. sprawności, stosunku siły do masy, prądu magnesującego itp.

Inżynier projektujący napędy specjalne, w szczególności osobliwe, powinien mieć na wadze zarówno wady i zalety silników o wykonaniu specjalnym: porównać je z klasycznymi silnikami wymagającymi zastosowania przekładni mechanicznych. Jednym z ważniejszych kryteriów oceny optymalności rozwiązania będzie koszt wykonania i eksploatacji napędu.

8.5.4. Literatura

- [52] Kamiński G., *Silniki elektryczne o ruchu złożonym*, Oficyna Wyd. Pol. Warszawskiej, Warszawa 1994.
- [53] Kamiński G., *Silniki elektryczne z toczącymi się wirnikami*, Oficyna Wyd. Pol. Warszawskiej, Warszawa 2003.

Ważniejsze adresy internetowe

- [54] Politechnika Warszawska. Zakład Maszyn Elektrycznych. Materiały dydaktyczne: wykłady, ćwiczenia rachunkowe, laboratoria, projektowanie www.ime.pw.edu.pl/zme/
- [55] DLR Institut für Robotik und Mechatronik www.dlr.de/rm/en/

9. Elementy projektowania maszyn elektrycznych.

Przykłady obliczeń

9.1. Uwagi wstępne

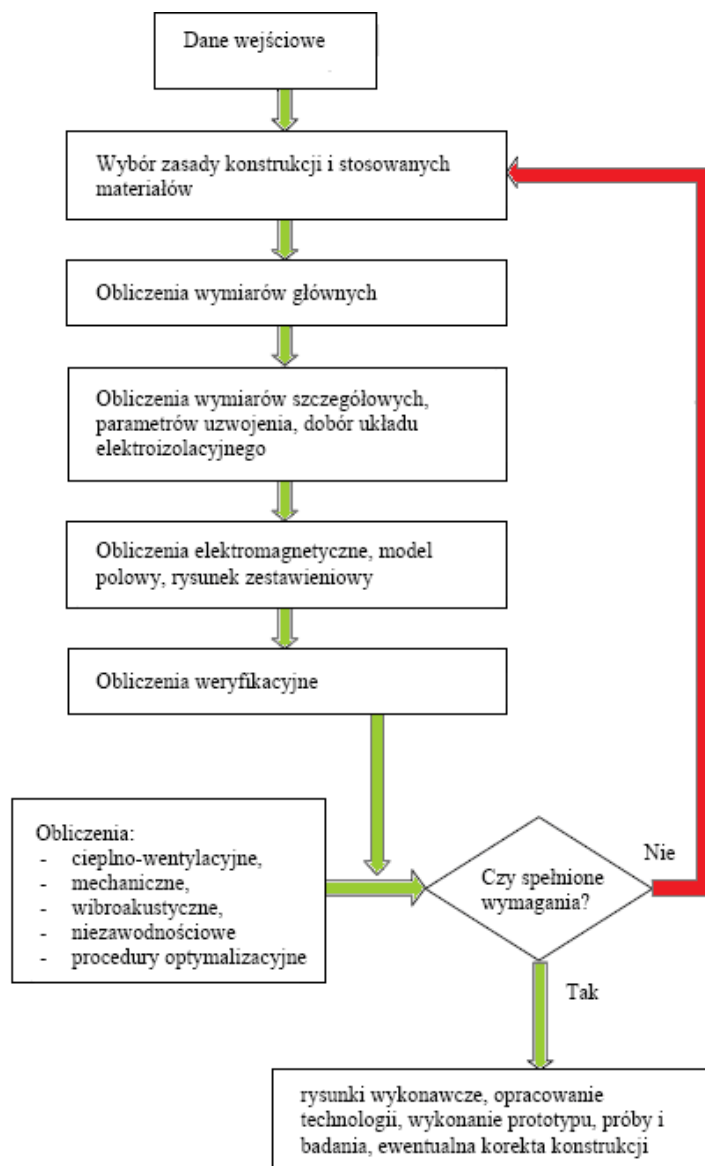
Projektowanie jest działaniem celowym, polegającym na uporządkowanym przygotowaniu zbioru informacji niezbędnych do budowy urządzenia lub realizacji procesu zaspokajającego określoną potrzebę. Procesy związane z rozwojem metod projektowania przyczyniły się do postępu technicznego, stały się również głównym elementem pośredniczącym między nauką i przemysłem.

Współczesne projektowanie polega na opracowywaniu nowych rozwiązań optymalnych pod względem przyjętych założeń z zastosowaniem odpowiednich metod i formuł matematycznych [1].

W procesie projektowania maszyn elektrycznych bardzo często napotykamy na różnego rodzaju problemy. Problemy te można podzielić na następujące rodzaje:

- Problem syntezy – jest podstawowym problemem w dziedzinie projektowania. Jego rozwiązanie polega na odpowiednim doborze materiałów, wymiarów, wzajemnego rozmieszczenia i połączenia elementów maszyny przy uwzględnieniu przyjętych założeń i spełnieniu postawionych wymagań dotyczących właściwości funkcjonalnych oraz warunków wzajemnego oddziaływania maszyny i środowiska. Problem syntezy nie ma jednoznacznego rozwiązania, dlatego też przy jego opracowaniu mogą być uwzględnione wymagania dodatkowe: optymalizacyjne, jak również wynikające z ograniczeń niektórych wielkości np. wymiarów gabarytowych czy ergonomicznych – dotyczących np. łatwości obsługi.
- Problem analizy – jego rozwiązanie związane jest z wyznaczeniem niektórych parametrów funkcjonalnych maszyny, a czasami również warunków środowiskowych, bazując na wszystkich znanych wymiarach oraz uwzględniając pozostałe parametry funkcjonalne wymagania środowiskowe. Problem analizy występuje w przypadku, gdy sprawdzamy możliwość zastosowania zaprojektowanej już maszyny bez dokonywania zmian konstrukcyjnych do: innych warunków zasilania, innego rodzaju obciążenia lub do innych warunków klimatycznych niż te, na które została ona zaprojektowana.
- Problem kompleksowy – jest sumą dwóch przytoczonych powyżej zagadnień: zagadnienia analizy i syntezy. Jego rozwiązanie polega na doborze niektórych materiałów i niektórych wymiarów oraz wprowadzeniu zmian w rozmieszczeniu i połączeniach elementów maszyny, a także na określeniu niektórych nowych parametrów funkcjonalnych na podstawie zadanych wymiarów części jej elementów, zadanych pozostałych wymagań funkcjonalnych oraz warunków wzajemnego oddziaływania maszyny i środowiska. Problem ten występuje np. przy wykorzystaniu w projekcie nowej maszyny elementów maszyn już zaprojektowanych.

Na rysunku 9.1 przedstawiono ogólny algorytm projektowania maszyn elektrycznych. Pokazano tu drogę, jaką musi przebyć każdy projektant maszyny, aby osiągnąć zamierzony efekt końcowy, tzn. zaprojektować maszynę elektryczną odpowiadającą określonym wymaganiom i założeniom projektowym.



Rys. 9.1. Ogólny algorytm postępowania w procesie projektowania maszyn elektrycznych (źródło [2]).

Jako przykład projektowania maszyn elektrycznych przedstawiono obliczenia:

- silnika indukcyjnego/asynchronicznego klatkowego;
- silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi.

9.2. Projekt silnika indukcyjnego klatkowego

Pierwszy generator prądu przemiennego został zbudowany w 1884 roku [1]. Maszyny prądu przemiennego, uznane za przydatne dopiero po około trzydziestu latach od ich wynalezienia, zajmują znaczącą pozycję we współczesnej cywilizacji. Największą grupą produkowanych maszyn elektrycznych na świecie są silniki indukcyjne, które stanowią niemal 80% ogółu produkcji, wśród nich prym

wiodą silniki indukcyjne klatkowe, które stanowią 74% światowej produkcji, tylko 6% stanowią silniki indukcyjne pierścieniowe, pozostałe 20% stanowią inne maszyny elektryczne [2].

Silniki indukcyjne klatkowe stanowią najliczniejszą grupę produkowanych obecnie silników elektrycznych na świecie. Zaletą tego typu silników jest ich stosunkowo niska cena (w porównaniu z innymi silnikami) prosta obsługa oraz to, że pracują przy zasilaniu z powszechnie dostępnej sieci prądu przemiennego [3, 5, 6, 8].

Rozwój energoelektroniki umożliwił zastosowanie silników asynchronicznych klatkowych do napędów wymagających zmiennej prędkości obrotowej. Ponadto zastosowanie falownika z odpowiednim algorytmem sterowania do zasilania silnika indukcyjnego klatkowego pozwala na kształtowanie jego charakterystyki mechanicznej i odpowiednie dopasowanie jej do potrzeb układu napędzanego.

Podstawą projektowania silnika indukcyjnego klatkowego jest algorytm postępowanie przedstawiony na rys. 9.1, który opracowano na podstawie książki prof. Mirosława Dąbrowskiego [1] i materiałów dydaktycznych dr inż. Krzysztofa Bieńkowskiego [2].

9.2.1. Dobór wymiarów głównych i szczegółowych silnika

Dane wejściowe (tab. 9.1) stanowią podstawę procesu obliczania wymiarów głównych i szczegółowych silnika (tab. 9.2). Obliczenia silnika asynchronicznego klatkowego wykonano w jednym kroku.

Ze względu na to, że we wzorach, które wykorzystywane są do wyznaczania wymiarów głównych maszyny jest więcej niewiadomych, niż wynika to z danych wejściowych część wartości należy dobrać z tabel lub wykresów (sporządzonych na podstawie wieloletnich doświadczeń projektowych) dostępnych w literaturze przedmiotu [1, 2, 4, 7]. Podstawą doboru brakujących wielkości jest moc i liczba par biegunów.

Tabela 9.1

Parametry wejściowe

Wielkość	Symbol	Jednostka	Wartość
Moc znamionowa	P_n	kW	2,2
Napięcie fazowe	U_{1n}	V	220
Częstotliwość	f_n	Hz	50
Liczba faz	m_s	–	3
Prędkość synchroniczna	n_s	1/min	1500
Liczba par biegunów	p	–	2
Uzwojenie stojana			jednowarstwowe

Tabela 9.2

Algorytm obliczeń silnika asynchronicznego

Lp.	Opis	Obliczenia	Wynik
Wymiary główne maszyny			
1.	Współczynnik napięcia indukowanego rotacji	$k_E = 0,985 - 0,005 \cdot p$	$k_E = 0,975$
2.	Napięcie indukowane rotacji	$E = k_E U_{1n} = 0,975 \cdot 220$	$E = 213,9 \text{ V}$

3.	Sprawność maszyny		$\eta_n = 0,8$ ¹⁾
4.	Moc elektryczna maszyny	$P_{el} = P_n / \eta_n = (2,2 \cdot 10^3) / 0,8$	$P_{el} = 2,75 \text{ kW}$
5.	Współczynnik mocy		$\cos \phi_n = 0,8$ ²⁾
6.	Prąd znamionowy maszyny	$I_{1n} = P_{el} / (m_s \cdot U_{1n} \cdot \cos \phi_n) = (2,75 \cdot 10^3) / (3 \cdot 220 \cdot 0,8)$	$I_{1n} = 5,22 \text{ A}$
7.	Moc pozorna wewnętrzna maszyny	$S_i = m_s \cdot E \cdot I_{1n} = 3 \cdot 213,9 \cdot 5,22$	$S_i = 3,35 \text{ kW}$
Liczba żłobków stojana			
8.	Liczba żłobków na biegun i fazę		$q = 3$ ³⁾
9.	Liczba żłobków stojana	$Q_s = 2 \cdot q \cdot p \cdot m_s = 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3$	$Q_s = 36$
Współczynnik uzwojenia stojana			
10.	Kąt elektryczny między sąsiednimi wektorami napięć żłobkowych	$\alpha = (2 \cdot \pi \cdot p) / Q_s = (2 \cdot 3,14 \cdot 2) / 36$	$\alpha = 0,349$
11.	Współczynnik grupy	$k_g = \sin[(q \cdot \alpha) / 2] / [q \cdot \sin(\alpha / 2)] = \sin[(3 \cdot 0,349) / 2] / [3 \cdot \sin(0,349 / 2)]$	$k_g = 0,96$
12.	Poskok średnicowy uzwojenia	$y_1 = Q_s / 2p = 36 / 2 \cdot 2$	$y_1 = 9$
13.	Podziałka biegunowa liczona w żłobkach	$\tau_p = Q_s / 2p = 36 / 2 \cdot 2$	$\tau_p = 9$
14.	Współczynnik skrótu	$k_s = \sin[(y_1 / \tau_p) \cdot (\pi / 2)] = \sin[(9 / 9) \cdot (\pi / 2)]$	$k_s = 1$
15.	Współczynnik uzwojenia	$k_u = k_g \cdot k_s = 0,96 \cdot 1$	$k_u = 0,96$
16.	Okład prądowy		$A_p = 25 \cdot 10^3 \text{ A/m}$ ⁴⁾
17.	Indukcja w szczelinie powietrznej		$B_p = 0,85 \text{ T}$ ⁵⁾
18.	Współczynnik wykorzystania podziałki biegunowej		$\alpha_i = 0,715$
19.	Współczynnik smukłości silnika		$\lambda = 1,3$ ⁶⁾
20.	Objętość obliczeniowa maszyny	$Y = (S_i \cdot 2 \cdot \sqrt{2}) / (\pi^3 \cdot A_p \cdot B_p \cdot \alpha_i \cdot n_s \cdot k_u) = (3352 \cdot 2 \cdot \sqrt{2}) / (\pi^3 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 0,715 \cdot 25 \cdot 0,96)$	$Y = 8,38 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$

¹⁾ M. Dąbrowski, Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Warszawa 1994, s. 212, (WNT).

²⁾ M. Dąbrowski, Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Warszawa 1994, s. 213, (WNT).

³⁾ M. Dąbrowski, Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Warszawa 1994, s. 238, (WNT).

⁴⁾ M. Dąbrowski, Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Warszawa 1994, s. 226, (WNT).

⁵⁾ M. Dąbrowski, Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Warszawa 1994, s. 226, (WNT).

⁶⁾ M. Dąbrowski, Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Warszawa 1994, s. 217 (WNT).

21.	Średnica obliczeniowa maszyny	$D = [(Y \cdot 2 \cdot p) / (\lambda \cdot \pi)]^{1/3} = [(8,38 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 2) / (1,3 \cdot \pi)]^{1/3}$	$D = 0,114 \text{ m}$
22.	Podziałka biegunowa maszyny	$\tau_{pz} = (\pi \cdot D) / (2 \cdot p)$	$\tau_{pz} = 73,55 \text{ mm}$
23.	Długość obliczeniowa maszyny	$l_i = \lambda \cdot \tau_{pz} = 1,3 \cdot 0,07355$	$l_i = 95,62 \text{ mm}$
Projekt uzwojenia stojana			
24.	Liczba zwojów pasma fazowego	$z = (\sqrt{2} \cdot E) / (2 \cdot \pi \cdot B_p \cdot f_n \cdot \tau_{pz} \cdot \alpha_i \cdot k_u) = (\sqrt{2} \cdot 213,9) / (2 \cdot \pi \cdot 0,85 \cdot 50 \cdot 0,0735 \cdot 0,0956 \cdot 0,715 \cdot 0,96)$	$z = 234,7$
25.	Liczba zwojów pasma fazowego		$z = 234^{7)}$
26.	Liczba zwojów pojedynczej cewki	$N_{c1} = (z \cdot m_s) / Q_s = (234 \cdot 3) / 36$	$N_{c1} = 39$
27.	Całkowita liczba przewodów	$N = 2 \cdot z \cdot m_s = 2 \cdot 234 \cdot 3$	$N = 1404$
28.	Liczba przewodów w żłobku	$N_s = (2 \cdot m_s \cdot z) / Q_s = (2 \cdot 3 \cdot 234) / 36$	$N_s = 39$
29.	Skorygowana wartość okładu prądowego	$A_p = (I_{1n} \cdot 2 \cdot z \cdot m_s) / (\pi \cdot D) = (5,22 \cdot 2 \cdot 234 \cdot 3) / (\pi \cdot 0,09365)$	$A_p = 2,492 \cdot 10^3 \text{ A/m}$
30.	Skorygowana wartość indukcji w szczeliny powietrznej	$B_p = (\sqrt{2} \cdot E) / (2 \cdot \pi \cdot z \cdot \tau_{pz} \cdot l_i \cdot \alpha_i \cdot k_u \cdot f_n) = (\sqrt{2} \cdot 213,9) / (2 \cdot \pi \cdot 234 \cdot 0,0735 \cdot 0,09562 \cdot 0,715 \cdot 0,96 \cdot 50)$	$B_p = 0,853 \text{ T}$
Dobór przewodu nawojowego			
31.	Gęstość prądu w uzwojeniach stojana		$j = 6 \text{ A/mm}^2 \text{ }^8)$
32.	Przekrój przewodu	$S_{Cu} = I_{1n} / j = 5,22 / 6$	$S_{Cu} = 0,87 \text{ mm}^2$
33.	Średnica przewodu	$d = \sqrt{(4 \cdot S_{Cu}) / \pi} = \sqrt{(4 \cdot 8,7 \cdot 10^{-7}) / \pi}$	$d = 1,05 \text{ mm}$
34.	Przyjęta średnica przewodu		$d = 1 \text{ mm} \text{ }^9)$
35.	Przekrój przewodu	$S_d = (\pi \cdot d^2) / 4 = (\pi \cdot 1 \cdot 10^{-6}) / 4$	$S_d = 0,78 \text{ mm}^2$
36.	Przekrój wszystkich przewodów w żłobku stojana	$S_{Cu\sum} = N_s \cdot S_d = 39 \cdot 7,8 \cdot 10^{-7}$	$S_{Cu\sum} = 30,63 \text{ mm}^2$

⁷⁾ K. Bieńkowski, Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn.

⁸⁾ K. Bieńkowski, Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn.

⁹⁾ K. Bieńkowski, Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn.

Wymiary żłobka stojana		
37.	Współczynnik wypełnienia żłobka	$k_z = 0,5^{10)}$
38.	Przekrój żłobka stojana	$S_{z1} = S_{CuZ} / k_z = (30,63 \cdot 10^{-6}) / 0,5$ $S_{z1} = 61,26 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
39.	Podziałka żłobkowa stojana	$\tau_z = (\pi \cdot D) / Q_s$ $\tau_z = 8,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
40.	Indukcja w zębie stojana	$B_{z1} = 1,4 \text{ T}^{11)}$
41.	Szerokość zęba stojana	$b_{z1} = (B_p \cdot \tau_s) / B_{z1} = (0,853 \cdot 8,17 \cdot 10^{-3}) / 1,4$ $b_{z1} = 4,98 \text{ mm}$
42.	Przyjęta szerokość zęba stojana	$b_{z1} = 5 \text{ mm}^{12)}$
43.	Szerokość rozwarcia żłobka	$b_{s1} = d + 1 \text{ mm} = 1,2 + 1$ $b_{s1} = 2,2 \text{ mm}$
44.	Kąt zbieżności ścianek bocznych żłobka	$\beta_{qs} = 2 \cdot \pi / Q_s = 2 \cdot \pi / 36$ $\beta_{qs} = 0,175$
45.	Grubość szczeliny powietrznej	$\delta = 0,00015 + 0,002 \cdot \sqrt{D \cdot I_i} =$ $= 0,00015 + 0,002 \cdot \sqrt{0,09365 \cdot 0,09562}$ $\delta = 0,339 \text{ mm}$
46.	Znormalizowane wymiary szczeliny powietrznej przyjmuje się co 0,05mm	$\delta = 0,35 \text{ mm}$
47.	Średnica wewnętrzna stojana	$D_s = 2 \cdot \delta + D = 2 \cdot 0,00035 + 0,09365$ $D_s = 94,35 \text{ mm}$
48.	Wysokość rozwarcia żłobka stojana	$h_{s1} = 1 \text{ mm}^{13)}$
49.	Promień dolnego (mniejszego) okręgu żłobka stojana	$R_{s1} = \{[(D_s + 2h_{s1}) \cdot \sin(\beta_{qs}/2)] - b_{z1}\} /$ $2 \cdot [1 - \sin(\beta_{qs}/2)] =$ $= \{[(0,09435 + 2 \cdot 0,001) \cdot \sin(0,175/2)] - 0,005\} /$ $2 \cdot [1 - \sin(0,175/2)]$ $R_{s1} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
50.	Równanie opisujące zależność pomiędzy promieniami i wysokością żłobka stojana	$R_{s2} = (R_{s1} + h_{s0}) \cdot (\sin(\beta_{qs}/2) / [1 + \sin(\beta_{qs}/2)])$
51.	Równanie na pole przekroju żłobka stojana	$S_{z1} = (R_{s1} + R_{s2}) \cdot h + \pi/2 (R_{s1}^2 + R_{s2}^2)$
52.	Wysokość części trapezowej żłobka stojana	$h_{s0} = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
53.	Promień górnego okręgu żłobka stojana	$R_{s2} = (R_{s1} + h_{s0}) \cdot (\sin(\beta_{qs}/2) / [1 + \sin(\beta_{qs}/2)]) =$ $= (1,9 \cdot 10^{-3} + 0,0095) \cdot (\sin(0,175/2) /$ $[1 + \sin(0,175/2)])$ $R_{s2} = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

¹⁰⁾ M. Dąbrowski, Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Warszawa 1994, s. 205 (WNT).

¹¹⁾ K. Bieńkowski, Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn.

¹²⁾ K. Bieńkowski, Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn.

¹³⁾ K. Bieńkowski, Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn.

54.	Całkowita wysokość żłóbka stojana	$h_{qs} = h_{s1} + R_{s1} + R_{s2} + h_{s0} =$ $= 1 \cdot 10^{-3} + 1,9 \cdot 10^{-3} + 2,8 \cdot 10^{-3} + 9,5 \cdot 10^{-3}$	$h_{qs} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
55.	Przekrój żłóbka stojana	$S_{z1} = (R_{s1} + R_{s2}) \cdot h_{s0} + \pi/2 (R_{s1}^2 + R_{s2}^2) =$ $= (1,9 \cdot 10^{-3} + 2,8 \cdot 10^{-3}) \cdot 9,5 \cdot 10^{-3}$ $+ \pi/2 [(1,9 \cdot 10^{-3})^2 + (2,8 \cdot 10^{-3})^2]$	$S_{z1} = 61,26 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
Indukcja w zębie i jarzmie stojana			
56.	Skorygowana wartość indukcji w zębie stojana	$B_{z1} = (B_p \cdot \tau_s) / b_{z1} =$ $= (0,853 \cdot 8,17 \cdot 10^{-3}) / 5 \cdot 10^{-3}$	$B_{z1} = 1,39 \text{ T}$
57.	Indukcja w jarzmie	$B_{j1} = 2 \cdot B_p = 2 \cdot 0,853$	$B_{j1} = 1,7 \text{ T}$
58.	Strumień główny	$\phi_1 = B_p \cdot \tau_{pz} \cdot l_i \cdot \alpha_i =$ $= 0,853 \cdot 0,074 \cdot 0,175 \cdot 0,7$	$\phi_1 = 4,287 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$
59.	Wysokość jarzma stojana	$h_{j1} = \phi_1 / (l_i \cdot 2 \cdot B_{j1}) =$ $= 4,287 \cdot 10^{-3} / (0,09562 \cdot 2 \cdot 1,7)$	$h_{j1} = 13,19 \text{ mm}$
60.	Przyjęta skorygowana wartość jarzma stojana		$h_{j1} = 14 \text{ mm}^{14)}$
61.	Skorygowana wartość indukcji w jarzmie stojana	$B_{j1} = \phi_1 / (l_i \cdot 2 \cdot h_{j1}) =$ $= 4,287 \cdot 10^{-3} / (0,175 \cdot 2 \cdot 0,014)$	$B_{j1} = 1,6 \text{ T}$
62.	Średnica zewnętrzna stojana	$D_e = D + 2 \cdot \delta + 2h_{qs} + 2h_{j1} =$ $= 0,09365 + 2 \cdot 35 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 0,015 + 2 \cdot 0,014$	$D_e = 153 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Prąd w wirniku			
63.	Liczba żłobków wirnika		$Q_r = 28^{15)}$
64.	Podziałka żłobkowa wirnika	$\tau_r = (\pi \cdot D) / Q_r = (\pi \cdot 0,09365) / 28$	$\tau_r = 10,51 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
65.	Współczynnik długości pręta		$k_l = 0,9^{16)}$
66.	Prąd w przecie wirnika	$I_{pr} = I_{1n} \cdot k_l \cdot (m_s \cdot z \cdot k_u) / (0,5 \cdot Q_r \cdot k_{ur}) =$ $= 5,22 \cdot 0,9 \cdot (3 \cdot 234 \cdot 0,96) / (0,5 \cdot 28 \cdot 1)$	$I_{pr} = 226,22 \text{ A}$
67.	Prąd w pierścieniu zwierającym wirnika	$I_{pn} = (0,5 \cdot I_{pr}) / \sin(2\pi/Q_r z) =$ $= (0,5 \cdot 226,22) / \sin(2\pi/28)$	$I_{pn} = 508,31 \text{ A}$
68.	Gęstość prądu w przecie wirnika		$j_{pr} = 5 \text{ A/mm}^2^{17)}$
69.	Przekrój pręta klatki wirnika	$S_{pr} = I_{pr} / j_{pr} = 226,22 / 5$	$S_{pr} = 45,24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
70.	Gęstość prądu w pierścieniu zwierającym		$j_{pn} = 5 \text{ A/mm}^2^{18)}$
71.	Przekrój pierścienia zwierającego	$S_{pn} = I_{pn} / j_{pn} = 508,31 / 5$	$S_{pn} = 101,66 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$

¹⁴⁾ K. Bieńkowski, Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn.

¹⁵⁾ M. Dąbrowski, Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Warszawa 1994, s. 243, (WNT).

¹⁶⁾ K. Bieńkowski, Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn.

¹⁷⁾ M. Dąbrowski, Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Warszawa 1994, s. 228, (WNT).

¹⁸⁾ M. Dąbrowski, Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Warszawa 1994, s. 228, (WNT).

Wymiary pierścienia zwierającego			
72.	Szerokość pierścienia zwierającego	$l_{pn} = \sqrt{0,5 \cdot S_{pn}} = \sqrt{101,66 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5}$	$l_{pn} = 7,13 \cdot 10^{-3}$ m
73.	Wysokość pierścienia zwierającego	$h_{pn} = 2 \cdot l_{pn} = 2 \cdot 7,13 \cdot 10^{-3}$	$h_{pn} = 14,26 \cdot 10^{-3}$ m
Wymiary żłobka w wirniku			
74.	Kąt zbieżności ścianek bocznych	$\beta_{qr} = 2 \cdot \pi / Q_r = 2 \cdot \pi / 28$	$\beta_{qr} = 0,224$
75.	Szerokość rozwarcia żłobka wirnika		$h_{r1} = 0,3 \cdot 10^{-3}$ m
76.	Wysokość rozwarcia żłobka wirnika		$b_{r1} = 2 \cdot 10^{-3}$ m
77.	Indukcja w zębie wirnika		$B_{z2} = 1,5$ T
78.	Szerokość zęba wirnika	$b_{z2} = (B_p \cdot \tau_r) / B_{z2}$	$b_{z2} = 5,97 \cdot 10^{-3}$ m
79.	Przyjęta szerokość zęba wirnika		$b_{z2} = 6 \cdot 10^{-3}$ m
80.	Promień górnego okręgu żłobka wirnika	$R_{r1} = [(D - 2h_{r1}) \cdot (\sin(\beta_{qr}/2) - b_{z2}) / 2[1 + \sin(\beta_{qr}/2)] = (0,09365 - 2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3}) \cdot (\sin(0,224/2) - 6 \cdot 1 / 2 \cdot [1 + \sin(0,224/2)]$	$R_{r1} = 2 \cdot 10^{-3}$ m
81.	Obliczony promień dolnego okręgu żłobka wirnika	$R_{r2} = \sqrt{R_{r1}^2 \cdot [(Q_r/\pi + \pi/2) - S_{pr}] / (Q_r/\pi - \pi/2)} = \sqrt{(2 \cdot 10^{-3})^2 [(28/\pi + \pi/2) - 45,24 \cdot 10^{-6}] / (28/\pi - \pi/2)}$	$R_{r2} = 0,7 \cdot 10^{-3}$ m
82.	Wysokość części trapezowej żłobka wirnika	$h_{r0} = (R_{r1} - R_{r2}) / \sin(\beta_{qr}/2) = (2 \cdot 10^{-3} - 0,7 \cdot 10^{-3}) / \sin(0,224/2)$	$h_{r0} = 14 \cdot 10^{-3}$ m
83.	Całkowitą wysokość żłobka wirnika	$h_{qr} = h_{r0} + R_{r1} - R_{r2} + h_{r1} = 14 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3} + 0,7 \cdot 10^{-3} + 0,3 \cdot 10^{-3}$	$h_{qr} = 17 \cdot 10^{-3}$ m
Wznios i średnice wału			
84.	Wznios osi wału, przyjęto wartość		$H = 100$ mm ¹⁹⁾
85.	Średnica wału pod rdzeń wirnika	$d_{ri} = 0,35 \cdot D_z = 0,35 \cdot 0,09365$	$d_{ri} = 0,033$ m
86.	Przyjęta wartość znormalizowaną średnicy wału pod czop łożyskowy, która mieści się w przedziale	$d_2 = 0,7 \div 0,85 d_{ri}$	$d_2 = 30$ mm ²⁰⁾

¹⁹⁾ M. Dąbrowski, Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Warszawa 1994, s. 219, (WNT).

²⁰⁾ K. Bieńkowski, Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn.

87.	Wartość znormalizowana średnicy wału pod czop końcowy	$d_3 = 0,9 \pm 0,95 d_2$	$d_3 = 28 \text{ mm}$ ²¹⁾
88.	Wartość znormalizowana długości wału pod czop końcowy		$l_{czk} = 0,06 \text{ m}$ ²²⁾
Współczynnik powiększenia szczeliny (Cartera)			
89.	Współczynnik powiększenia szczeliny dla stojana	$k_{c1} = (\tau_s + 10 \cdot \delta) / (\tau_s + 10 \cdot \delta - b_{s1}) =$ $= (8,17 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 35 \cdot 10^{-4}) /$ $8,17 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 35 \cdot 10^{-4} - 2,2 \cdot 10^{-3}$	$k_{c1} = 1,232$
90.	Współczynnik powiększenia szczeliny dla wirnika	$k_{c2} = (\tau_r + 10 \cdot \delta) / (\tau_r + 10 \cdot \delta - b_{r1}) =$ $= (10,51 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 35 \cdot 10^{-4}) /$ $10,51 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 35 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$	$k_{c2} = 1,167$
91.	Wypadkowy współczynnik Cartera	$k_c = k_{c1} \cdot k_{c2} = 1,232 \cdot 1,167$	$k_c = 1,437$

9.2.2. Wizualizacja wyników obliczeń silnika

Na podstawie przeprowadzonych w poprzednim rozdziale obliczeń wykonano rysunki poszczególnych elementów silnika asynchronicznego, takich jak żłobki stojana i wirnika, wał oraz zarysy przekrojów poprzecznych stojana i wirnika.

9.2.3. Wymiary żłobków stojana i wirnika

Tabela 9.3 zawiera wymiary żłobka i zęba stojana.

Tabela 9.3

Zestawienie wymiarów żłobka i zęba stojana

Wielkość	Symbol	Jednostka	Wartość
Kąt zbieżności ścianek bocznych żłobka	β_{qs}		0,175
Wysokość otwarcia żłobka stojana	h_{s1}	m	$1 \cdot 10^{-3}$
Szerokość otwarcia żłobka	b_{s1}	m	$2,2 \cdot 10^{-3}$
Promień dolnego (mniejszego) okręgu żłobka stojana	R_{s1}	m	$1,9 \cdot 10^{-3}$
Promień górnego okręgu żłobka stojana	R_{s2}	m	$2,8 \cdot 10^{-3}$
Wysokość części trapezowej żłobka	h_{s0}	m	$9,5 \cdot 10^{-3}$
Całkowita wysokość żłobka stojana	h_{qr}	m	$15 \cdot 10^{-3}$
Szerokość zęba stojana	b_{z1}	m	$5 \cdot 10^{-3}$

Na podstawie obliczonych wymiarów żłobka stojana (tab. 9.3) wykonano rysunek zarysu żłobka stojana (rys. 9.2). Wszystkie wymiary na rysunku podano w mm.

Tabela 9.4 zawiera wymiary żłobka i zęba wirnika.

²¹⁾ K. Bieńkowski, Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn.

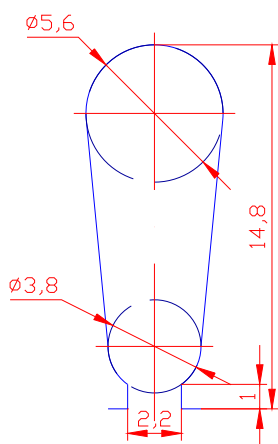
²²⁾ K. Bieńkowski, Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn.

Tabela 9.4

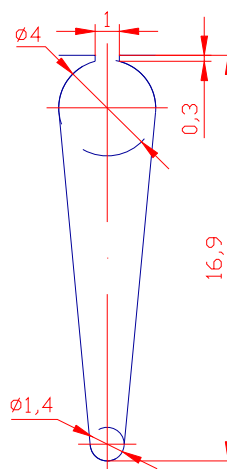
Zestawienie wymiarów żłobka i zęba wirnika

Wielkość	Symbol	Jednostka	Wartość
Kąt zbieżności ścianek bocznych	β_{qr}		0,224
Promień górnego okręgu żłobka	h_{r1}	m	$2 \cdot 10^{-3}$
Promień dolnego okręgu żłobka	b_{r1}	m	$0,7 \cdot 10^{-3}$
Szerokość zęba wirnika	R_{r1}	m	$6 \cdot 10^{-3}$
Szerokość otwarcia żłobka	R_{r2}	m	$2 \cdot 10^{-3}$
Wysokość części trapezowej żłobka	h_{r0}	m	$14 \cdot 10^{-3}$
Wysokość otwarcia żłobka	h_{r1}	m	$0,3 \cdot 10^{-3}$
Całkowita wysokość żłobka wirnika	h_{qr}	m	$17,0 \cdot 10^{-3}$

Na podstawie obliczonych wymiarów żłobka wirnika (tab 9.4) wykreślono zarys żłobka wirnika (rys. 9.3). Wszystkie wymiary na rysunku podano w mm.



Rys. 9.2. Widok zarysu żłobka stojana



Rys. 9.3. Widok zarysu żłobka wirnika

9.2.4. Wymiary główne maszyny

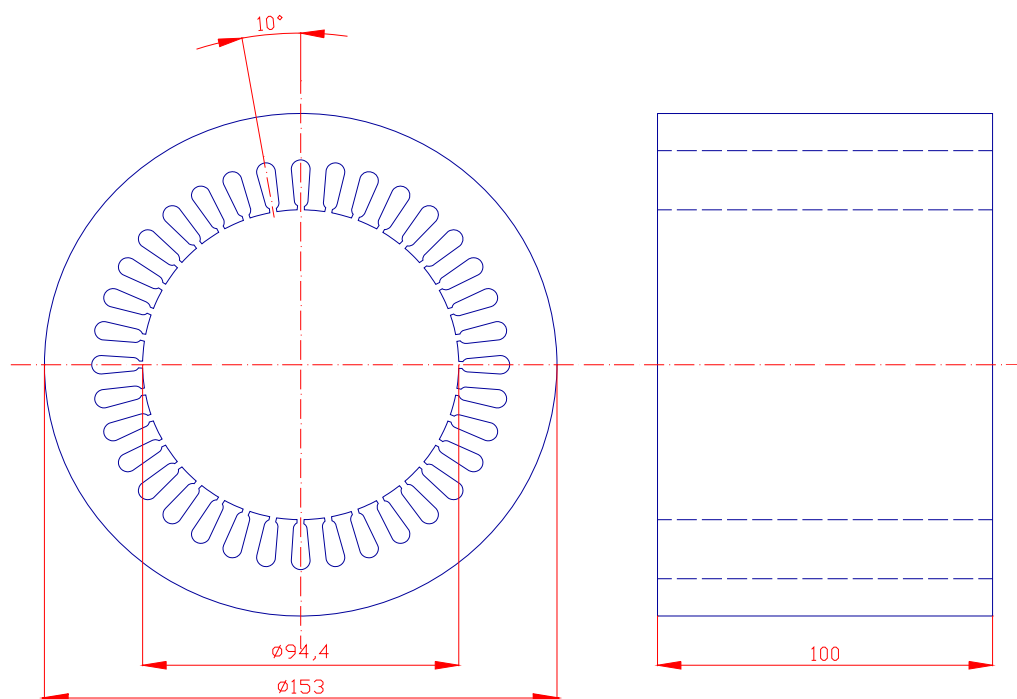
Tabela 9.5 zawiera wymiary główne maszyny.

Tabela 9.5

Zestawienie wymiarów głównych maszyny

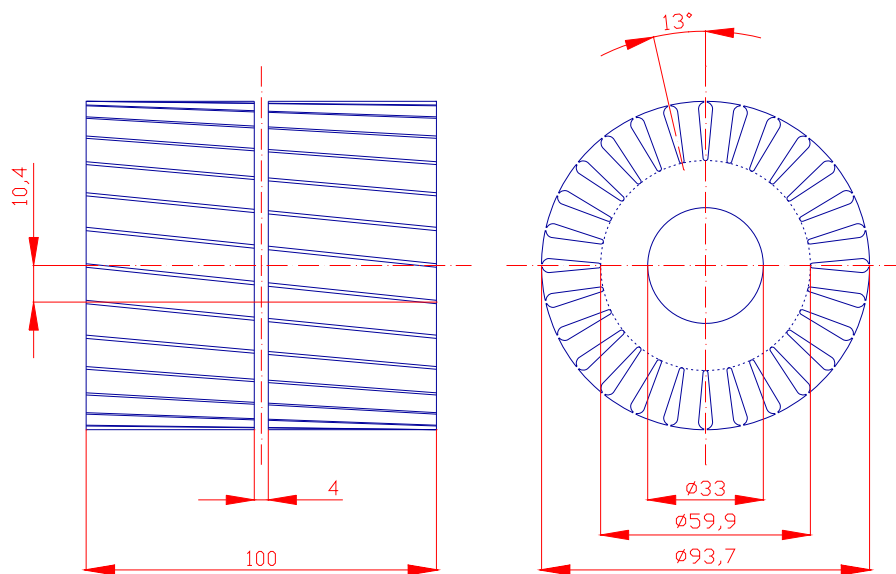
Wielkość	Symbol	Jednostka	Wartość
Całkowita długość obliczeniowa maszyny	l_i	m	0,095562
Szczelina powietrzna	δ	mm	0,35
Średnica wewnętrzna stojana	D_s	m	0,09435
Średnica zewnętrzna stojana	D_e	m	0,153
Średnica wału pod rdzeń wirnika	d_{ri}	m	0,0328
Liczba żłobków stojana	Q_s		36
Liczba żłobków wirnika	Q_r		28

Na rysunku 9.4 pokazano zarys stojana zaprojektowanej maszyny. Wszystkie wymiary na rysunku podano w mm.



Rys. 9.4. Widok zarysu stojana maszyny

Na rys. 9.5 przedstawiono zarys wirnika. Wszystkie wymiary na rysunku podano w mm.



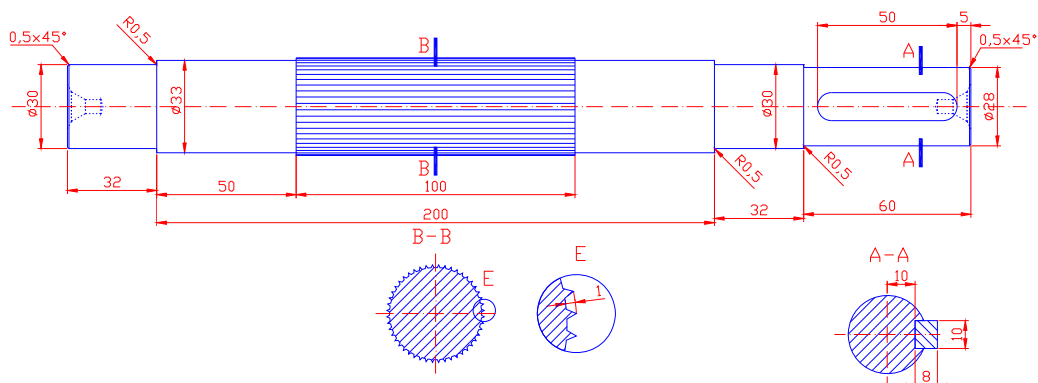
Rys. 9.5. Widok zarysu wirnika maszyny

Tabela 9.6 zawiera wymiary wału maszyny.

Zestawienie wymiarów wału maszyny

Wielkość	Symbol	Jednostka	Wartość
Średnica wału pod rdzeń wirnika	d_{ri}	mm	33
Średnica wału pod czop łożyskowy	d_2	mm	30
Średnica wału pod czop końcowy	d_3	mm	28
Wznios wału	H	mm	100
Długość wału pod czop końcowy	l_{czk}	mm	60
Całkowita długość wału maszyny	l	mm	304

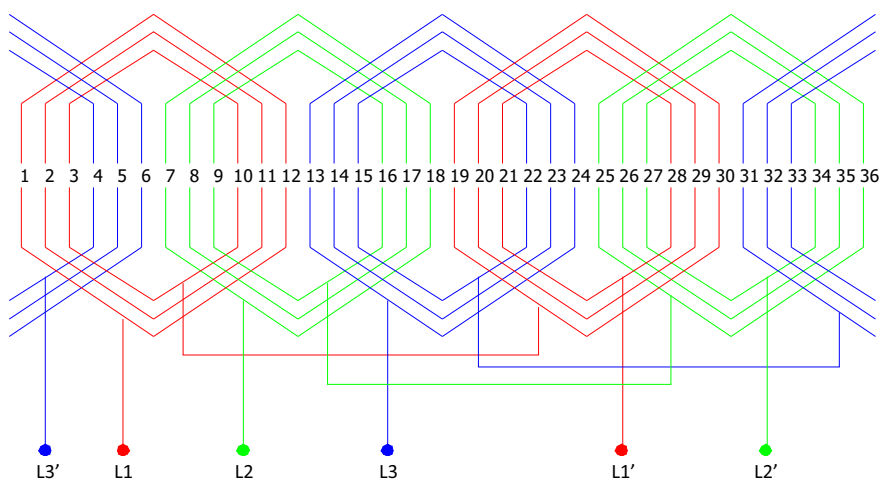
Na rysunku 9.6 pokazano zarys przekroju podłużnego wału maszyny. Wszystkie wymiary podane na rysunku są w [mm].



Rys. 9.6. Widok zarysu przekroju podłużnego wału maszyny

9.2.5. Uzwojenie stojana silnika

Na podstawie założeń przyjętych w obliczeniach i literatury dotyczącej uzwojeń silników indukcyjnych [9] przyjęto schemat uzwojenia silnika przedstawiony na rysunku (rys. 9.7)

Rys. 9.7. Schemat uzwojenia stojana rozważanego silnika: $p = 2$, $y_1 = 11$, $y_2 = 9$, $y_3 = 7$, $Q_s = 36$, $q = 3$

9.2.6. Podsumowanie wyników obliczeń silnika

Powyższa procedura obliczeń prowadzi do wyznaczenia wymiarów silnika indukcyjnego klatkowego. Uzyskane tą metodą wymiary należy traktować jako dane wejściowe do analizy z zastosowaniem bardziej zaawansowanych narzędzi CAD, np. programów do obliczeń pól elektromagnetycznych, termicznych i naprężeń mechanicznych. Dopiero tak zweryfikowane dane mogą stanowić podstawę do budowy prototypu i badań laboratoryjnych.

9.2.7. Literatura

- [1] Dąbrowski M.: Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, WNT, Warszawa 1988.
- [2] Bieńkowski K.: Materiały dydaktyczne. <http://www.ime.pw.edu.pl/zme/dyd/mater/kme/>
- [3] Kenig E.: Maszyny elektryczne, PWN, Warszawa; Poznań 1970.
- [4] Koczyński W.: Obliczenia silników asynchronicznych, Wyd. Sp. Akc. „ELEKTROBUDOWA”, Łódź 1938.
- [5] Latek W.: Teoria maszyn elektrycznych, WNT, Warszawa 1987.
- [6] Plamitzer A. M.: Maszyny elektryczne, WNT, Warszawa 1982.
- [7] Postnikov E. M.: Projektirovanije elektricskich Masin, Gos. Izd. Techniceskoj Literatury USSR, 1 izdaniye Kijev 1952, 2 izdaniye, Kijev 1960.
- [8] Węglarz J.: Maszyny elektryczne, WNT, Warszawa 1968.
- [9] Zembrzusi J.: Atlas uzwojeń silników indukcyjnych, WNT, Warszawa 1988.

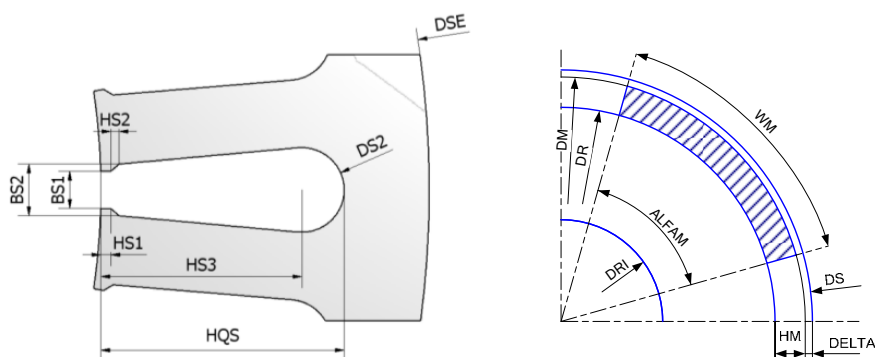
9.3. Projekt silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi

Projekt silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi wykonano, odpowiednio modyfikując silnik indukcyjny. Założono, że stojan silnika indukcyjnego wraz z uzwojeniami pozostawiony zostanie bez zmian. Główna modyfikacja konstrukcji silnika będzie polegała na wymianie wirnika klatkowego na wirnik z powierzchniowo zamocowanymi magnesami trwałymi. Zastosowano wysokoenergetyczne (neodymowe NdFe lub samarowo-kobaltowe SmCo) magnesy trwałe w kształcie wycinków pierścienia. Magnesy zostaną przyklejone do powierzchni zewnętrznej wirnika i w razie konieczności zabezpieczone pierścieniem lub bandażem przed działaniem sił odśrodkowych.

Podstawowym zadaniem jest zaprojektowanie silnika z magnesami trwałymi o parametrach eksploatacyjnych nie gorszych niż silnika indukcyjnego. W związku z tym dobór struktury obwodu magnetycznego wirnika ma na celu uzyskanie wartości amplitudy pierwszej harmonicznej rozkładu indukcji w szczelnie powietrznej na poziomie indukcji uzyskanej w silniku indukcyjnym.

9.3.1. Dane wejściowe do obliczeń silnika

Punktem wyjścia do obliczeń silnika z magnesami trwałymi są dane katalogowe, konstrukcyjne oraz materiałowe silnika indukcyjnego TAMEL SG100L4A (tab. 9.7).



Rys. 9.8. Oznaczenie wymiarów żłobka stojana oraz wymiarów wirnika silnika z magnesami trwałymi

Tabela 9.7

Dane katalogowe silnika TAMEL SG100L4A

Typ silnika	Sg100L-4A
Częstotliwość (Hz)	50
Liczba faz	3
Moc (kW)	2,20
Prędkość obrotowa	1420
Prąd (A) przy 380V	5,00
Sprawność	81,00
Współczynnik mocy	0,82
Krotność momentu rozruchowego	2,20
Krotność prądu rozruchowego	5,50
Stosunek mocy maks. do min.	2,60
Liczba biegunów	4
Moment bezwładności (kgm^2)	0,00670

Wymiary stojana pozostały takie same jak w przypadku projektu silnika indukcyjnego (rys. 9.8). Przyjęto następujące dane wejściowe do obliczeń:

Tabela 9.8

Dane wejściowe do obliczeń

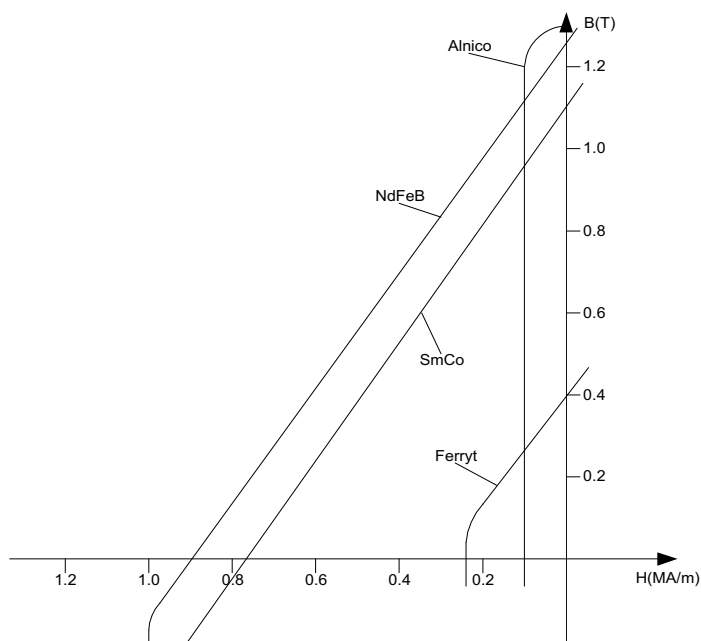
Wielkość	Symbol	Wartość	Jednostka
Moc znamionowa	P_n	2,2	kW
Napięcie fazowe	U_{1n}	380	V
Częstotliwość	f_n	50	Hz
Liczba faz	m_s	3	-
Prędkość synchroniczna	n_s	1500	1/min
Liczba par biegunów	p	2	-
Średnica zewnętrzna stojana	D_{se}	153	mm
Średnica wewnętrzna stojana	D_s	94	mm
Średnica wewnętrzna wirnika	D_{ri}	33	mm
Długość stojana	l_s	96	mm
Liczba żłobków stojana	Q_s	36	-
Szerokość otwarcia żłobka	b_{s1}	2,2	mm
Szerokość żłobka	b_{s2}	3,9	mm
Wysokość otwarcia żłobka	h_{s1}	2,0	mm

9.3.2. Materiały magnetyczne trwałe

Stosowane najczęściej w maszynach elektrycznych magnesy trwałe można podzielić na kilka podstawowych grup, w zależności od rodzaju zastosowanego materiału magnetycznie trwałego oraz technologii ich wykonania (odlewanie, spiekanie, spajanie tworzywem). Wśród materiałów wykorzystywanych do budowy magnesów można wyróżnić:

- magnesy ceramiczne: ferryty baru ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) oraz ferryty strontu ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$),
- magnesy z domieszkami pierwiastków ziem rzadkich: samorowo-kobaltowe (SmCo_2) oraz neodymowe ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$).

Podstawowe właściwości fizyczne magnesu, takie jak indukcja remanencji (B_r) czy natężenie pola koercji (H_c) można odczytać z części pętli histerezy $B = f(H)$ leżącej w drugiej ćwiartce nazywanej charakterystyką odmagiesowania (rys. 9.9).



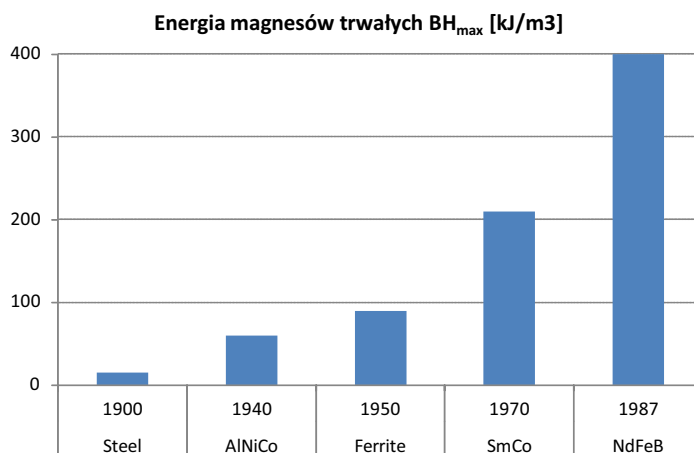
Rys. 9.9. Charakterystyki odmagiesowania magnesów trwałych

Wartość gęstości energii pola magnetycznego wzbudzonej magnesami trwałymi przedstawia iloczyn BH – w katalogach podawana jest wartość maksymalna energii na jednostkę objętości $(BH)_{\max}$ (tab. 9.9).

Tabela 9.9

Właściwości materiałów magnetycznych stosowanych do budowy magnesów trwałych

			SmCo5	NdFeB	ferryt	AlNiCo
Indukcja remanencji	B_r	[T]	0,85–1	1–1,41	0,3–0,45	1,25
Gęstość energii	$(BH)_{\max}$	[kJ/m ³]	145–200	200–420	20–40	50
Natężenie koercji	BH_c	[kA/m]	>1600	1040–3000	240–320	55
Dopuszczalna temp.	T_{\max}	[°C]	250	80–200	150–200	450–500
Cena	-	[€/kg]	120	50 €/kg	15–20 €/kg	



Rys. 9.10. Gęstości energii magnesów trwałych [14]

Z punktu widzenia projektowania maszyn elektrycznych najbardziej interesującymi parametrami charakteryzującymi magnesy wykonane z domieszkami pierwiastków z ziem rzadkich. Posiadają one największą wartość gęstości energii (BH_{max}), co oznacza, że stosując takie magnesy, można zasadniczo zmniejszyć rozmiar magnesu, a więc i gabaryty maszyny. Duże wartości natężenia pola koercji zapewniają odpowiednią wytrzymałość w przypadku oddziaływania odmagnesowującego (zwarcia). Wartości indukcji w szczelnie maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi mogą osiągnąć wartości rzędu 0,8–1 T i ograniczone są maksymalnymi wartościami indukcji w zębach stojana. Magnesy wykonane z tych materiałów są jednak stosunkowo kruche, ograniczony jest również zakres dopuszczalnych temperatur pracy.

Do obliczeń przyjęto parametry magnesu samarowo-kobaltowego SmCo o oznaczeniu S18 [13]

Tabela 9.10

Parametry magnesów trwałych

LP	Wielkość	Symbol	Wyrażenie	Wartość	Jednostka
1	Dobrano magnes trwały			SmCo S18	
2	Indukcja remanencji	B_r		0,95	T
3	Natężenie koercji	H_c		670	kA/m
4	Przenikalność magnetyczna względna	μ_r	$B_r/(\mu_0 H_c)$	1,13	–

9.3.3. Szczelina powietrzna/robocza silnika

Dobór wysokości szczeliny powietrznej i wysokości magnesu trwałego jest ze sobą związany w procesie wyznaczania punktu pracy magnesu trwałego. Przenikalność magnetyczna magnesów trwałych (neodymowych) jest w przybliżeniu równa przenikalności powietrza, co oznacza, że wysokość magnesu trwałego powiększa efektywną szczelinę powietrzną. Większa szczelina powietrzna wymaga zastosowania wyższych magnesów trwałych w celu uzyskania oczekiwanej wartości amplitudy pierwszej harmonicznej indukcji w szczelnie. Oznacza to zarówno zwiększenie całkowitych kosztów maszyny, jak i zmniejszenie indukcyjności magnesowania. Z drugiej strony zwiększenie szczeliny powietrznej skutkuje bardziej sinusoidalnym rozkładem indukcji w szczelnie i zmniejszeniem strat z uwagi na prądy wirowe, zmniejszeniem rozmagnesowującego oddziaływania twornika oraz ograniczeniem momentu zaczepowego.

Rzeczywista szczelina powietrzna w maszynach z magnesami trwałymi wynosi od 1 do 3 mm (z uwzględnieniem pierścienia lub bandaża mocującego). Przyjęto wysokość szczeliny powietrznej:

Tabela 9.11

Wysokość szczeliny powietrznej

LP	Wielkość	Symbol	Wyrażenie	Wartość	Jednostka
5	Wysokość szczeliny powietrznej	δ	–	1,0	mm

W dalszych obliczeniach uwzględnia się użłobkowanie stojana przez wprowadzenie współczynnika Carter'a, o który powiększa się szczelinę powietrzną.

Tabela 9.12

Obliczenia współczynnika Cartera i zastępczej szczeliny powietrznej

LP	Wielkość	Symbol	Wyrażenie	Wartość	Jednostka
6	Podziałka żłobkowa	τ_s	$\pi D_s / Q_s$	8,2	mm
7	Wsp. otwarcia żłobka	k_{open}	b_{s1} / b_{s2}	0,56	–
8		γ_s	$b_{s2} k_{open} / 2 \delta$	1,1	–
9		κ	$4 / \pi [\gamma_s \arctg(\gamma_s) - \ln(\sqrt{1 + \gamma_s^2})]$	0,66	–
10	Wsp. Carter'a	k_{Carter}	$\tau_s / (\tau_s - \kappa \delta)$	1,1	–
11	Szczelina zastępcza	δ_e	$k_{Carter} \delta$	1,1	mm

9.3.4. Punkt pracy magnesów trwałych silnika

W celu wyznaczenia punktu pracy magnesu trwałego przyjęto następujące założenia upraszczające:

- jarzmo stojana i jarzmo wirnika posiadają nieskończenie wielką przenikalność względną,
- szczelina robocza ma stałą długość na całej szerokości magnesu,
- prostokątny przebieg indukcji w szczelinie,
- jednorodny rozkład indukcji w magnesie.

Charakterystykę odmagnesowania magnesów trwałych można aproksymować prostą o równaniu:

$$B_m(H_m) = B_r \left(1 + \frac{H_m}{H_c} \right) \quad (9.1)$$

Równanie przepływu dla uproszczonego modelu obwodu magnetycznego szczelina-magnes:

$$H_m h_m + H_\delta = 0 \quad (9.2)$$

Uwzględniając zależność na indukcję magnetyczną w szczelinie

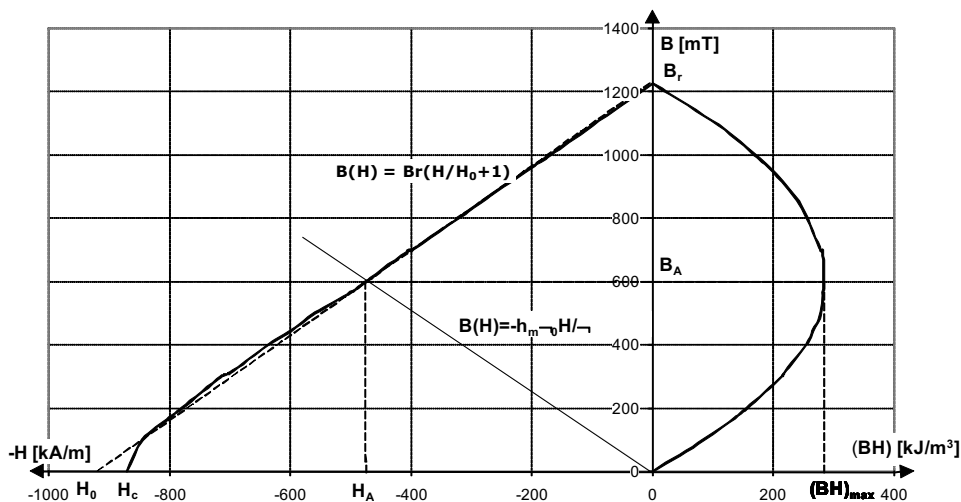
$$B_\delta = H_\delta \delta \quad (9.3)$$

oraz zakładając stałość strumienia przenikającego magnes i szczelinę, można wyznaczyć zależności opisujące punkt pracy magnesu trwałego:

$$B_m = \frac{B_r}{1 + \sigma_{lm} \mu_r \frac{\delta_e}{h_m}} \quad (9.4)$$

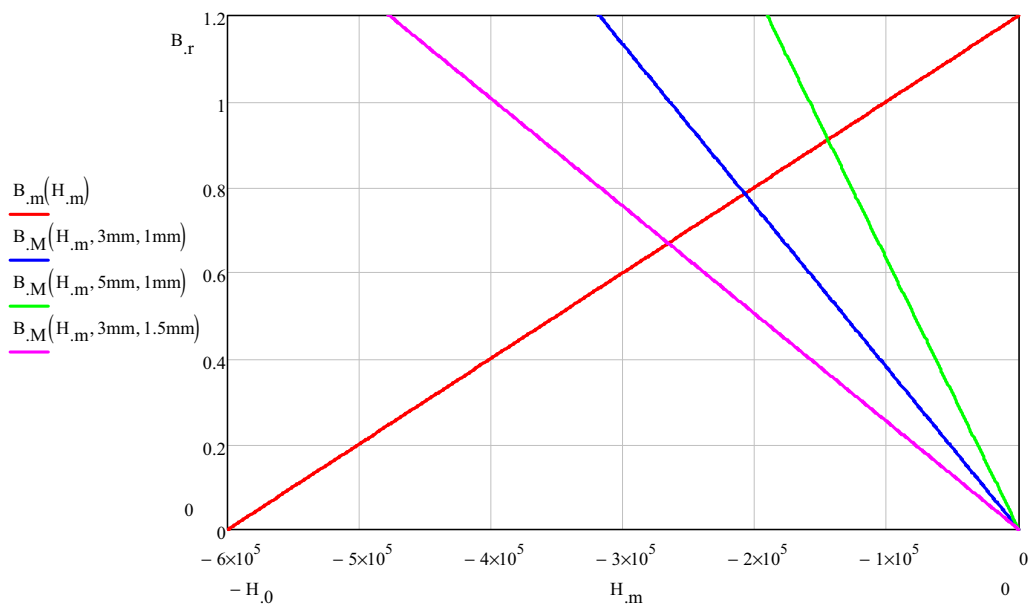
$$H_m = \frac{H_c}{1 + \frac{h_m}{\sigma_{lm} \mu_r \delta_e}} \quad (9.5)$$

Wartość indukcji w szczelnie wyznacza punkt przecięcia charakterystyki od magnesowania i prostej szczeliny (rys. 9.11).



Rys. 9.11. Graficzne wyznaczenie punktu pracy magnesu trwałego

Punkt pracy magnesu trwałego zależy od stosunku wysokości szczeliny powietrznej do wysokości magnesu trwałego (rys. 9.12)



Rys. 9.12. Wpływ wysokości magnesu trwałego i szczeliny powietrznej na punkt pracy magnesu trwałego

9.3.5. Dobór wysokości magnesów trwałych silnika

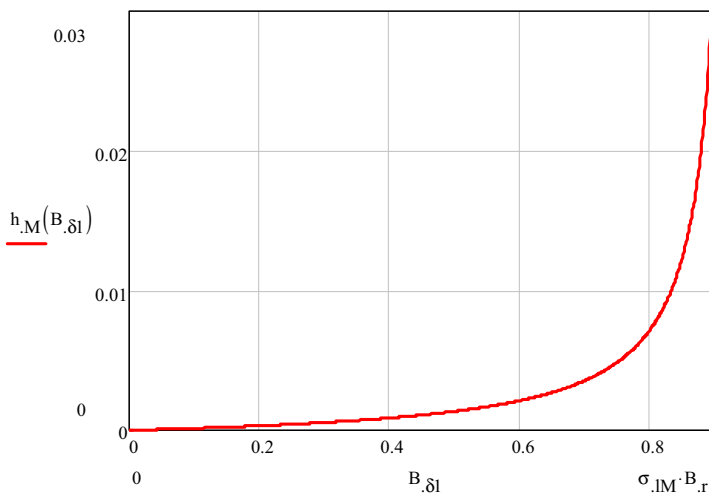
Proces doboru wysokości magnesów trwałych pokazano poniżej (tab. 9.13).

Tabela 9.13

Dobór wysokości magnesu trwałego

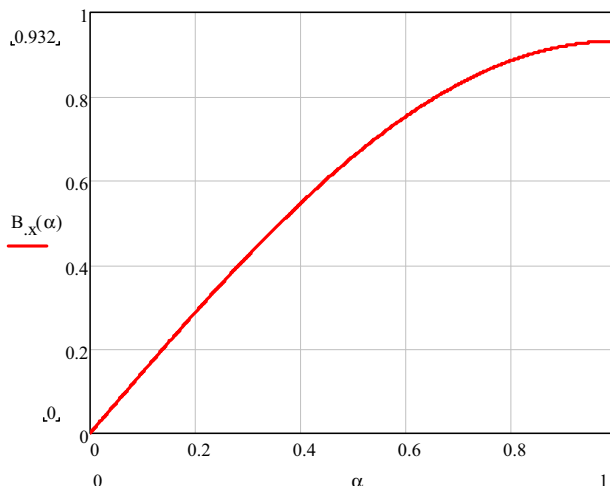
LP	Wielkość	Symbol	Wyrażenie	Wartość	Jednostka
12	Średnica zewnętrzna magnesów trwałych	D_m	$D_s - 2\delta$	92	mm
13	Podziałka biegunowa magnesów	τ_m	$(\pi D_m)/2p$	72,3	mm
14	Wsp. wypełnienia podziałki biegunowej	α_m		0,6	–
15	Szerokość magnesu trwałego	w_m	$\tau_m \alpha_m$	43,4	mm
16	Wsp. rozproszenia magnesów trwałych	σ_{lm}		0,95	–
17	Amplituda 1 harmonicznej indukcji	$B_{\delta 1}$		0,76	T
18	Wysokość magnesu trwałego	h_m	$\frac{(\mu_r \delta_e \sigma_{lm}) / \{ [4\sigma_{lm} B_r \sin(\pi\alpha_m/2) - 1] / \pi B_{\delta 1} \}}$	5,2	mm
19	Dobrano wysokość magnesu trwałego	h_m		5	mm
20	Indukcja w magnesie	B_m	$B_r / (1 + \sigma_{lm} \mu_r \delta_e / h_m)$	0,77	T
21	Strumień wzbudzony przez magnes	Φ_m	$B_m w_m l_s$	3,23e-3	Wb

Wpływ zależności wysokości magnesu trwałego (h_m) od przyjętej wartości amplitudy pierwszej harmonicznej indukcji w szczelnie pokazano na rys. 9.13.



Rys. 9.13. Zależność pomiędzy wysokością magnesu trwałego i wartością amplitudy pierwszej harmonicznej indukcji w szczelnie

Zwiększając szerokość magnesu trwałego, tak by zajmował całą podziałkę biegunową ($\alpha_m = 1$), uzyskamy jedynie 24% wzrost amplitudy pierwszej harmonicznej rozkładu indukcji (rys. 9.14). Jednocześnie całkowita objętość magnesów trwałych jak i ich cena wzrosną o 67% ($1/\alpha_m$).



Rys. 9.14. Wpływ szerokości magnesu trwałego na wartość amplitudy pierwszej harmonicznej indukcji w szczelnie

9.3.6. Wysokość jarzma wirnika

Minimalna wysokość jarzma wirnika została wyznaczona przy założeniu, że strumień wzbudzony przez magnes trwały zamknie się przez jarzmo wirnika.

Tabela 9.14

Wysokość jarzma wirnika

LP	Wielkość	Symbol	Wyrażenie	Wartość	Jednostka
22	Współczynnik zapętnienia pakietu wirnika	k_{fe}		0,95	-
23	Długość obliczeniowa pakietu wirnika	l_{fe}	$k_{fe} l_s$	91	mm
24	Maksymalna wartość strumienia w jarzmie wirnika	Φ_{yr}	$\Phi_m/2$	1,6e-3	Wb
25	Maksymalna wartość indukcji w jarzmie wirnika	B_{yr}		1,3	T
26	Minimalna wysokość jarzma wirnika	h_{yr}	$\Phi_{yr}/B_{yr} l_{fe}$	14	mm

9.3.7. Sprawdzenie wymiarów wirnika

Z założeń projektu wynika, że wymiary wirnika ograniczone są przez średnicę wewnętrzną stojana (D_s) oraz średnicę wałka (D_{ri}). W przestrzeni tej powinny znaleźć się szczelina powietrzna, magnes trwały oraz jarzmo wirnika, czyli powinna być spełniona nierówność:

$$\frac{D_s - D_{ri}}{2} \geq \delta + h_m + h_{yr} \quad (9.6)$$

Sprawdzenie dla obliczonych wymiarów:

$$\frac{D_s - D_{ri}}{2} = \frac{94 - 33}{2} = 31 \text{ mm}$$

$$\delta + h_m + h_{yr} = 1 + 5 + 14 = 20 \text{ mm}$$

Nierówność (9.6) jest spełniona.

9.3.8. Podsumowanie wyników obliczeń silnika

Przedstawione wyniki potwierdzają możliwość budowania maszyn z magnesami trwałymi w oparciu o elementy seryjnie produkowanych maszyn indukcyjnych. Za takim rozwiązaniem przemawia możliwość szybkiego przestawienia produkcji przy wykorzystaniu istniejącego parku maszynowego oraz opracowanych technologii wytwarzania części silników indukcyjnych.

Wirnik silnika indukcyjnego składa się z uzwojeń klatki oraz jarzma wirnika i powinien teoretycznie zajmować więcej miejsca niż wzbudzenie silnika z magnesami trwałymi. Projektując silnik bezszczotkowy z magnesami trwałymi z wykorzystaniem części konstrukcyjnych silnika indukcyjnego, tracimy atut możliwości zmniejszenia objętości wirnika. Wymiary wirnika określa średnica wewnętrzna stojana, wysokość szczeliny powietrznej oraz magnesów trwałych. W konsekwencji znaczna część wirnika jest niewykorzystana. Przy takim podejściu do projektowania, gdzie głównym priorytetem jest minimalizacja kosztów, można rozważyć zastosowanie tańszych magnesów trwałych o gorszych parametrach (ferytowych).

9.3.9. Literatura

- [10] Gieras J.F.: Mitchell Wing, Permanent Magnet Motor Technology, 2nd ed. Marcel Dekker, Inc, 2002.
- [11] Hendershot J.R., Miller T.J.E. : Design of brushless permanent-magnet motors. Hillsboro, OH:Magna Pysics Pub. ; Clarendon Press, Oxford 1994.
- [12] Hanselman D.: Brushless Permanent Magnet Motor Design, 2nd ed. McGraw-Hill, New York 1994.
- [13] MMC Magnetics Mateirals and Components www.mmcmagnetics.com
- [14] Arnold Magnetics www.arnoldmagnetics.com

9.4. Podsumowanie

Silniki indukcyjne klatkowe i silniki bezszczotkowe z magnesami trwałymi (BMT) są obecnie najchętniej stosowanymi silnikami w zaawansowanych układach napędowych. Z uwagi na brak elektrycznych styków ruchomych (komutatora, pierścieni, szczotek) mogą być uważane za silniki niezawodne. Silnik BMT umożliwia osiągnięcie większej mocy przy zadanej objętości oraz wyższej sprawności. Głównym ograniczeniem rozpowszechnienia się tego typu silników jest ich wysoka cena związana z zastosowaniem drogich magnesów neodymowych (tab. 9.15).

Tabela 9.15

Porównanie cech silników indukcyjnych klatkowych i silników bezszczotkowych z magnesami trwałymi

	Silnik indukcyjny	Silnik BMT
Sprawność	średnia (70–96%)	wysoka (93–95%)
Współczynnik mocy	0,7–0,86	>0,94
Straty mocy	stojan i wirnik	stojan
Szczelina powietrzna	mała, harmoniczne żłobkowe, hałas	duża
Współczynnik moc/masa	średni (75W/kg)	duży (160W/kg)
Konstrukcja wirnika	prosta, wytrzymała	prosta lub złożona, podatność MT na siły odśrodkowe
Cena	niska	wysoka

Literatura

Wykaz literatury podano również w każdym rozdziale, ograniczając się do najważniejszych pozycji niezbędnych do poszerzenia wiedzy obejmującej rozważany materiał.

Literatura przedmiotu maszyny elektryczne jest bardzo obszerna – ma ponad stuletnią tradycję. Podzielono ją umownie na: **książki/podręczniki, skrypty i artykuły/referaty, ważniejsze normy, materiały do nauczania interaktywnego (e-learning)**. Dodano także wybrane adresy **stron internetowych**.

Książki/podręczniki

- [1] Adkins B., *The general theory of electrical machines*, Chapman and Hall, London 1957.
- [2] Anuszczyk J., *Maszyny elektryczne w energetyce: zagadnienia wybrane*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
- [3] Beaty W. H., Kirtley J. L. Jr., *Electric motor handbook*, McGraw-Hill, 1998.
- [4] Cichy M., *Modelowanie systemów energetycznych*, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 2001.
- [5] Chapman S. J., *Electric Machinery Fundamentals*, 4th ed., McGraw Hill Book Co (Education), 2004.
- [6] Chapman S. J., *Electric Machinery and Power System Fundamentals*, McGraw Hill Book Co (Professional), 2001.
- [7] Chiasson J., *Modeling and High Performance Control of Electric Machines*, IEEE Press Series on Power Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York 2005.
- [8] Dąbrowski M., *Konstrukcja maszyn elektrycznych*, WNT, Warszawa 1977.
- [9] Dąbrowski M., *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, WNT, Warszawa 1994.
- [10] Demenko A., *Obwodowe modele układów z polem elektromagnetycznym*, Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań 2004.
- [11] Dubicki B., *Maszyny elektryczne. Maszyny prądu stałego*, t. 1, PWN, Warszawa 1958.
- [12] Dubicki B., *Maszyny elektryczne. Uzwojenia prądu przemiennego*, t. 2, PWN, Warszawa 1958.
- [13] Dubicki B., *Maszyny elektryczne. Silniki indukcyjne*, t. 3, PWN, Warszawa 1964.
- [14] Fitzgerald A. E., Kingsley Ch., Jr., Umans. S. D., *Electric Machinery*, 6th ed., McGraw-Hill 2003.
- [15] Gieras J.F., *Advancements in Electric Machines*, Springer, Heidelberg 2009.
- [16] Gieras J.F., Gieras I.A.A., *Electrical energy utilization*, wyd. Adam Marszałek, Toruń 1998.
- [17] Glinka T., *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2002.
- [18] Glinka T., Mizia W., Żywiec A., Hickiewicz J., *Zadania z maszyn elektrycznych*, WNT, Warszawa 1973.
- [19] Hamnod P. (tłumaczenie Krawczyk A.) *Od Gilberta do Einsteina. Krótka historia elektromagnetyzmu*, Wyd. Pol. Częstochowskiej, Częstochowa 1999.
- [20] Jezierski E., *Transformatory*, WNT, Warszawa 1975.
- [21] Kamiński G., Przyborowski W., *Uzwojenia i parametry maszyn elektrycznych*, OWPW, Warszawa 2005.
- [22] Karnopp D.C., Margolis D. L., Rosenberg R.C.: System dynamics. *Modeling and simulation of mechatronic systems*, 3rd ed, John Wiley & Sons Inc., New York 2000.
- [23] Kaźmierkowski M.P., Tunia H., *Automatic control of converter-fed drives*. Elsevier, Amsterdam 1994.
- [24] Kittler E., Handbuch der Elektrotechnik, Stuttgart, *Yerlag von Ferdinand Enke*, I Band 1886, II Band 1890.
- [25] Koczara W., *Odsprężone wytwarzanie energii elektrycznej w układach z maszynami wirującymi*, Przegląd Elektrotechniczny, 2004, R. 80, nr 1, s. 1–6.
- [26] Koter T., Pełczewski W., *Maszyny elektryczne w zadaniach*, Wydaw. Nauk.-Tech., Warszawa 1975.
- [27] Krause P.C., *Analysis of electric machinery*. McGraw-Hill, New York 1986.

- [28] Kron G., *Equivalent circuit of electric machinery*. John Wiley and Sons, New York 1951.
- [29] Królikowski L., *Rozwój konstrukcji maszyn elektrycznych do końca XIX wieku*, Zakł. Nar. im. Ossolińskich, Wrocław 1986.
- [30] Latek W., *Zarys maszyn elektrycznych*. WNT, Warszawa 1974.
- [31] Latek W., *Teoria maszyn elektrycznych*. Wyd. 2. WNT, Warszawa 1987.
- [32] Latek W., *Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach*, Wydaw. Nauk.-Tech., Warszawa 1994.
- [33] Latek W., *Turbogenerator*, Wydaw. Nauk.-Tech., Warszawa 1973.
- [34] Levi E., Panzer M., *Electromechanical power conversion: low-frequency, low-velocity conversion processes*, McGraw-Hill 1966.
- [35] Lyshevski S. E., *Electromechanical systems, electric machines, and applied mechatronics*. CRC Press, Boca Raton 1999.
- [36] Lyshevski S. E., *Nano- and Micro-Electromechanical Systems: Fundamentals of Nano- and Microengineering*, 2nd Ed., CRC Press, Boca Raton 2005.
- [37] Commerford M. T., Tesla N., *The Inventions, Researches and Writings of Nikola Tesla: With Special Reference to His Work in Polyphase Currents and High Potential Lighting (1894)*, New York: The Electrical Engineer, 1984. Identifier-access: <http://www.archive.org/details/inventionsresear00martiala>
- [38] Commerford M. T., Tesla N., *The Inventions, Researches and Writings of Nikola Tesla: With Special Reference to His Work in Polyphase Currents and High Potential Lighting (1894)*, 2nd ed., The Electrical Engineer, 1984. Identifier-access: <http://www.archive.org/details/inventionsresea00teslgoog>
- [39] Nogarède B., *Électrodynamique appliquée. Bases et principes physiques de l'électrotechnique*, Dynod, Paris 2005
- [40] Mohan N.: *Electric drives. An integrative approach*. MNPERE, Minneapolis 2000.
- [41] Miesel J., *Zasady elektromechanicznego przetwarzania energii*. WNT, Warszawa 1970.
- [42] O'Kelly D., *Performance and control of electrical machines*, London, McGraw-Hill 1991.
- [43] Paska J., *Wytwarzanie energii elektrycznej*, Oficyna Wyd. Pol. Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [44] Paszek W., *Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Helion, Gliwice 1998.
- [45] Paszek W., *Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Wydanie WNT, Warszawa 1986.
- [46] Plamitzer A. M., *Maszyny elektryczne*. Wyd. 7. WNT, Warszawa 1982.
- [47] Puchała A., *Dynamika maszyn i układów elektromechanicznych*. PWN, Warszawa 1977.
- [48] Puchała A., *Elektromechaniczne przetworniki energii. Monografia wykładów*. BOBR Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice 2002.
- [49] Pustoła J., *Analiza działania szybko reagujących silników komutatorowych i impulsowych*. (Publikacja nr 10 serii wydawniczej Komitetu Elektrotechniki PAN: Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki). PWN, Warszawa 1971.
- [50] Rehniewski W. K., *Etude sur les machines dynamos, La Lumiere Electrique*, 1886, Vol. 20, s. 391–395.
- [51] Rothert A., *Teoria i konstrukcja maszyn elektrycznych*, Lwów 1910.
- [52] Roszczyk S., *Teoria maszyn elektrycznych*, WNT, Warszawa 1979.
- [53] Śliwiński T., *Metody obliczania silników indukcyjnych*, PWN, Warszawa 2008.
- [54] Sobczyk T.J., *Metodyczne aspekty modelowania matematycznego maszyn indukcyjnych*. WNT, Warszawa 2004.
- [55] Staszewski P., Urbański W., *Zagadnienia obliczeniowe w eksploatacji maszyn elektrycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [56] Steinmetz Charles Proteus, *General Lectures on Electrical Engineering (1908)*, Robson & Adey, 1908. Identifier-access: <http://www.archive.org/details/generallectures00haydgoog>
- [57] Steinmetz Charles Proteus, *General Lectures on Electrical Engineering (1918)*, 5th ed., McGraw-Hill, 1918. Identifier-acce3qwass: <http://www.archive.org/details/generallectures00steigoog>
- [58] Thompson Silvanus Phillips, Tesla Nikola, *Polyphase electric currents and alternate-current motors (1902)*, P. F. Collier & Son, 1902. Identifier-access: <http://www.archive.org/details/polyphaseelectr00teslgoog>
- [59] Toliyat H. A., Kliman G. B. (edited), *Handbook of electric motors*, 2nd ed., CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton 2004.

- [60] Turowski J., *Elektrodynamika techniczna*, Wyd. 2 (zmienione). WNT, Warszawa 1993.
- [61] Turowski J., *Podstawy mechatroniki*, Wydawnictwo WSHE, Łódź 2008.
- [62] Uchino, K., *Piezoelectric actuators and ultrasonic motors*, Kluwer Academic Publishers, MA, 1997.
- [63] Vas P., *Electrical machines and drives. A space-vector theory approach*. Oxford Science Publications, Oxford 1992.
- [64] White D.C., Woodson H.H., *Electromechanical Energy Conversion*. J. Wiley, New York 1959.
- [65] Woodson H.H., Melcher J.R., *Electromechanical dynamics*. Part1: Discrete systems. Part2: Fields, forces, and motion. Part3: Elastic and Fluid media. J. Wiley, New York 1968.
- [66] Zembrzuski J., *Atlas uzwojeń silników indukcyjnych*, WNT, Warszawa 1991.
- [67] Zembrzuski J., *Poradnik przewajania silników indukcyjnych*, WNT, Warszawa 1990.
- [68] Życzyński W., *Zasady projektowania maszyn elektrycznych*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1986.

Skrypty

- [69] Hebenstreit J., Gientkowski Z., *Maszyny elektryczne w zadaniach*, Wyd. Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 2003.
- [70] Kamiński G., Kosk J., Przyborowski W., *Laboratorium maszyn elektrycznych*, OWPW, Warszawa 2005.
- [71] Karwacki W., *Maszyny elektryczne*. Oficyna Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław 1994.
- [72] Manitius Z., *Transformatory*, wyd. 2, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 1974.
- [73] Manitius Z., *Maszyny prądu stałego*, wyd. 2, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 1977.
- [74] Manitius Z., *Maszyny synchroniczne*, wyd. 2, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 1978.
- [75] Manitius Z., *Maszyny asynchroniczne*, wyd. 2, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 1975.
- [76] Manitius Z., *Maszyny elektryczne, Cz.1*, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 1982.
- [77] Manitius Z., *Maszyny elektryczne, Cz.2*, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 1984.
- [78] Matulewicz W., *Maszyny elektryczne. Podstawy*, wyd.3, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 2008.
- [79] Miksiewicz R., *Maszyny elektryczne. Zagadnienia obliczeniowa z wykorzystaniem programu MATHCAD*, Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2000.
- [80] Miksiewicz R., *Zastosowanie programu Mathcad do rozwiązywania statycznych zagadnień obliczeniowych maszyn elektrycznych i transformatorów*, Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2007.
- [81] Rafalski W., Ronkowski M., *Zadania z maszyn elektrycznych, Cz. I: Transformatory i maszyny asynchroniczne*, wyd. 4, Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1994.
- [82] Rafalski W., Ronkowski M., *Zadania z maszyn elektrycznych, Cz. II: Maszyny synchroniczne i maszyny prądu stałego*, wyd. 3, Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1994.
- [83] Roszczyk S., Witkowski J., *Elektromechaniczne przetworniki energii w zadaniach*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1982.
- [84] Skwarczyński J., Tertil Z., *Maszyny elektryczne. Teoria. Cz. 1, 2*. Wyd. AGH, Kraków 1995 (Cz. 1), 1997 (Cz. 2).
- [85] Skwarczyński J., Tertil Z., *Elektromechaniczne przetwarzanie energii*. Uczelniane Wyd. Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2000.
- [86] Zimny P., SPICE. *Klucz do elektrotechniki*, Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 1993.

Artykuły/referaty

- [87] Bassi E., Benzi F., Petrecca G., A new course on the unified theory of electric drives. Proc. International Conference on Electrical Machines. ICEM'1990. Cambridge, vol. 1, 1990, pp.298–304.
- [88] Büchner P., Higher engineering education in Germany– the Bologna process and electrical engineering education. EPE'2003, Toulouse 2003, Proc.-CD-ROM, pp. 1–10.
- [89] Chalmers B.J., A century of teaching and research in Electrical Machines. Proc. Inter. Conference on Electrical Machines. ICEM'2000. Finland, vol. 3, pp. 1200–1204.
- [90] Ciok Z., Królikowski L., Nowakowski R., Szymczak P., Michał Doliwo-Dobrowolski – współtwórca cywilizacji technicznej XX wieku, Wiadomości Elektrotechniczne, Rok LXXVII, 2009, nr 1, s. 38–49. <http://bezel.com.pl/index.php/micha-doliwo-dobrowolski-cz-i.html> ; <http://bezel.com.pl/index.php/micha-doliwo-dobrowolski-czii.html>
- [91] Cocks F.D., Why the generalized electrical machine theory not been universally accepted? Int. J. Elect. Engng. Educ. vol. 4, 1966, pp 269–272.

-
- [92] Daniels M.W., Shaffer R.A., Re-inventing the electrical machines curriculum. *IEEE Trans. on Education*, 1998, vol. 41, nr 2, pp. 92–100.
- [93] Dąbrowski M., Kierunki rozwoju maszyn elektrycznych i transformatorów, *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Elektryka*, Nr 49, 2005, s. 61–77.
- [94] Dąbrowski M., Początki rozwoju transformatorów, wyd. 2, Poznań Ośrodek Wydawnictw Naukowych, PAN Oddział w Poznaniu 2008.
- [95] Dąbrowski M., Projektowanie maszyn elektrycznych – zarys rozwoju, *Wiadomości Elektrotechniczne*, Rok LXX, 2002, nr 1–2, s. 3–15.
- [96] Dąbrowski M., Zarys rozwoju projektowania maszyn elektrycznych, *Prace Naukowe Instytutu Elektrotechniki*, zeszyt 217, 2003, s. 5–38.
- [97] Demenko A., Polowe metody analizy maszyn elektrycznych, *Z.N. Pol. Śląskiej, Elektryka*, z. 176, 2001, pp. 41–58.
- [98] Dolivo-Dobrowolsky M., *Aus Geschichte des Drehstromes*, ETZ, 1917, s. 341–344; 354–57; 366–69; 376–77.
- [99] Dyk-Majewska E., Śladami geniuszy. Zwykły pan Faraday, czy pierwszy fizyk atomowy?, *Pismo PG*, nr 8, 2008, s. 38–42 (<http://www.pg.gda.pl/pismo/?y=2008&n=08>).
- [100] Fiett J., Mangel K., Nikola Tesla – człowiek, wynalazca, wizjoner, *Spektrum*, nr 10–11, 2007, s. 30–46 (www.spektrumsep.eu/spektrum_07_10-11.pdf).
- [101] Heydt G.T., Vittal V., Feeding our profession, *IEEE Power & Energy Magazine*, no 1, 2003, pp. 38–45.
- [102] Krajowa Konferencja Nauczanie w Zakresie Maszyn Elektrycznych, Inst. Maszyn Elektrycznych i Transformatorów, Pol. Łódzka, Łódź 1987.
- [103] Materiały Konferencji Szkoleniowej „Metodyka Badań i Nauczania Maszyn Elektrycznych”, Kraków 1977,
- [104] Z. N. AGH nr 662, *Elektryfikacja i Mechanizacja Górnictwa i Hutnictwa*, z. 99.
- [105] Ochab-Marcinek A., Geniusz z Wrocławia, *Tygodnik Powszechny*, 2009, nr 1–2, s. 39 (http://tygodnik.onet.pl/36,0,19144,geniusz_zwroclawia,artykul.html).
- [106] Ritchie E., et al, A New First Course in Electrical Machines, *Proc. of the Third Chinese International Conference on Electrical Machines, CICEM'1999*, P.R. of China, vol. 2, pp. 973–976.
- [107] Ronkowski M., Electrical machine – a dynamic system: didactical aspects. *Proc. of Seminar on Electrical Engineering. Beskidy'99*. Polish Scientific Society for Theoretical and Applied Electrical Engineering. Conference Archives, vol. 8, 1999, pp. 223–232.
- [108] Ronkowski M., Nieznański J., Electrical machines modelling – teaching aspects, *Proc. Inter. Conference on Electrical Machines, ICEM'2000*. Helsinki 2000, vol. 3, pp. 1256–1260.
- [109] Ronkowski M., Theory of electrical machines for power electronics and electrical drives applications — didactic approach, *EPE-PEMC'2002*, Inter. Power Electronics and Motion Control Conference, Cavtat & Dubrovnik 2002, Proc. – CD-ROM, pp. 1–12.
- [110] Ronkowski M., A unified approach to teaching the modelling of electrical machines for power electronics and electrical drives applications, *Inter. Symposium on Electrical Machines. SME 2003*, Gdańsk – Jurata 2003, Proc. – summaries, pp. 143–144, Proc. – CD-ROM pp. 1–13.
- [111] Ronkowski M., Maszyny elektryczne – przedmiot dla potrzeb energoelektroniki i napędu elektrycznego, *Inter. Symposium on Electrical Machines. SME 2003*, Gdańsk – Jurata, Poland, 2003, Proc. – summaries, pp. 108, Proc. – CD-ROM pp. 1–5.
- [112] Ronkowski M., Modelowanie i symulacja maszyn elektrycznych metodą grafów wiązań, *Przegl. Elektrotechniczny*, R. 80, nr 10, 2004, s. 944–947.
- [113] Ropela R., Wpływ metod nauczania stosowanych w procesie dydaktycznym na efekty kształcenia, *PISMO PG. Pismo pracowników i studentów Pol. Gdańskiej*. Nr 4, 2003, pp. 26–28.
- [114] Rothert A., Beitrag zur Theorie der asynchronen Drehfeldmotoren, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1895, H. 45, s. 705–708.
- [115] Rovolis P.G., Kladas A.G., Tegopoulos J.A., Advanced methods for teaching Electrical Machines based on virtual laboratories, *Inter. Conference on Electrical Machines. ICEM'2004*. Kraków 2004, Proc. – CD-ROM, pp. 1–6.
- [116] Saniter Ch., Sadowski T., Hanitsch R., Implementation of a motivating learning environment for electrical drive engineers at the Technical University of Berlin, *Power Electronics and Applications Conference, EPE'2003*, Toulouse 2003, Proc. – CD-ROM, pp. 1–8.

- [117] Sobczyk T.J., Obwodowe modele matematyczne maszyn elektrycznych – stan aktualny i perspektywy, Z. N. Pol. Śląskiej, Elektryka, z. 176, Gliwice 2001, pp. 31–40.
- [118] Turowski J., W kształceniu ważne jest trafne wyodrębnienie jego etapów, Przegląd Elektrotechniczny, nr 3, 1974, pp. 102–103.
- [119] Turowski J., Mechatronika a maszyny elektryczne, Inter. Symposium on Electrical Machines. SME'2003, Gdańsk – Jurata, 2003, Proc. – summaries, pp. 13–14, Proc. – CD-ROM, pp. 1–8.
- [120] Turski Ł.A., Człowiek z energii, Wprost, nr 1073, 22 czerwiec 2003 (<http://www.wprost.pl/ar/?O=45467>)
- [121] Undeland T.M., Mohan N., Teaching electric machines and drives: a re-examination for the new millennium, Inter. Power Electronics and Motion Control Conference. EPE-PEMC'2002. Cavtat & Dubrovnik 2002, Proc. – CD-ROM, pp. 1–7.
- [122] Wilk A., Kostro G., Dobrowolski P, Michna M, Ronkowski M., Matulewicz M., Nauczanie maszyn elektrycznych z wykorzystaniem technik CAD, Inter. Symposium on Electrical Machines. SME'2003, Gdańsk – Jurata 2003, Proc. – summaries, pp. 109, Proc. – CD-ROM pp. 1–5.

Ważniejsze normy

- [123] PN-EN 60076-1:2002 Transformatory. Wymagania ogólne.
- [124] PN-IEC 60076-8:2002 Transformatory. Część 8: Przewodnik stosowania.
- [125] PN-E-81003:1996 Transformatory. Oznaczenia zacisków i zaczepów uzwojeń, rozmieszczenie zacisków.
- [126] PN-EN 50464-1:2007 Trójfazowe olejowe transformatory rozdzielcze 50 Hz od 50 kVA do 2500 kVA o najwyższym napięciu urządzenia nie przekraczającym 36 kV. Część 1: Wymagania ogólne.
- [127] PN-EN 60076-1:2002 Transformatory. Wymagania ogólne.
- [128] PN-IEC 60076-8:2002 Transformatory. Część 8: Przewodnik stosowania.
- [129] PN-E-81003:1996 Transformatory. Oznaczenia zacisków i zaczepów uzwojeń, rozmieszczenie zacisków.
- [130] PN-EN 60076-11:2006 Transformatory. Część 11: Transformatory suche.
- [131] PN-EN 61378-1:2000 Transformatory przekształtnikowe. Transformatory do zastosowań przemysłowych.
- [132] PN-EN 60076-2:2001 Transformatory. Przyrosty temperatury.
- [133] PN-EN 60034-1:2005 Maszyny elektryczne wirujące. Część 1: Dane znamionowe i parametry.
- [134] PN-EN 60034-5:2004/A 1:2007 Maszyny elektryczne wirujące. Część 5: Stopnie ochrony zapewniane przez rozwiązania konstrukcyjne maszyn elektrycznych wirujących (kod IP). Klasyfikacja.
- [135] PN-EN 60034-7:2005 Maszyny elektryczne wirujące. Klasyfikacja form wykonania i sposobów montażu (kod IM).
- [136] PN-EN 60034-6:1999 Maszyny elektryczne wirujące. Sposoby chłodzenia (kod IC).
- [137] PN-IEC 72-1:1996 Maszyny elektryczne wirujące. Wymiary i ciągi mocy maszyn elektrycznych wirujących. Rozmiar obudowy od 56 do 400 i rozmiar kołnierza od 55 do 1080.
- [138] PN-IEC 60038:1999 Napięcia znormalizowane IEC (projekt nowej edycji normy opracowywany jest obecnie przez IEC).
- [139] PN-E-06700:1991 Maszyny elektryczne wirujące. Terminologia.
- [140] PN-EN 60027-4:2007 Oznaczenia wielkości i jednostek miar używanych w elektryce. Maszyny elektryczne wirujące.

Adresy internetowe

- [141] Ronkowski M. (red.), Laboratorium maszyn elektrycznych, Pol. Gdańska, Gdańsk 2009 (<http://www.ely.pg.gda.pl/e-mechatronika/>)
- [142] Kalendarium. Część pierwsza (–1900) Elektryczność i magnetyzm <http://www.historiaradia.neostrada.pl/kalendarium.htm>
- [143] Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Electrical Engineering and Computer Science. <http://www.eecs.mit.edu/>
- [144] 6.061 / 6.690 Introduction to Electric Power Systems (Undergraduate Courses/ Graduate Courses) <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Electrical-Engineering-and-Computer-Science/6-061Spring-2007/CourseHome/index.htm>

-
- [145] 6.685 Electric Machines (Graduate Courses) <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Electrical-Engineering-and-Computer-Science/6-685Fall-2005/CourseHome/index.htm>
- [146] Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Physics. <http://web.mit.edu/physics/>
- [147] 8.02 Electricity and Magnetism (freshman physics class in electromagnetism, complete set of videotaped lectures) <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Physics/8-02Electricity-and-MagnetismSpring2002/CourseHome/index.htm>
- [148] 8.02T Electricity and Magnetism (freshman-level course in electromagnetism, using the TEAL (Technology Enabled Active Learning)) <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Physics/8-02TSpring-2005/CourseHome/index.htm>
- [149] Politechnika Warszawska. Zakład Maszyn Elektrycznych. Materiały dydaktyczne: wykłady, ćwiczenia rachunkowe, laboratoria, projektowanie <http://www.ime.pw.edu.pl/zme/>

Materiały do nauczania interaktywnego (e-learning)

- [150] Interactive and Unified E-Based Education and Training for Electrical Engineering. INETELE Consortium. Project Leonardo da Vinci No: CZ/02/B/F/PP/134009, 2002–2005. <http://www.tuke.sk/inetele/>

Załączniki

- [1] Modelowanie i symulacja maszyn elektrycznych metodą grafów wiązań
[Ronkowsk - Modelowanie i symulacja PE.pdf](#)
- [2] Budowa i działanie modelu prymitywnej maszyny elektrycznej prądu stałego [model_mps_1.avi](#)
[model_mps_2.avi](#)
- [3] Projektowanie silnika asynchronicznego klatkowego
[Kostro - Projekt SAK.pdf](#)
- [4] Projektowanie silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi
[Michna - Projekt silnika z magnesami trwałymi.pdf](#)
[Michna - Projekt silnika z magnesami trwałymi - punkt pracy.pdf](#)

Wykaz ważniejszych oznaczeń

A	– powierzchnia
B	– indukcja pola magnetycznego
E	– natężenie pola elektrycznego
E, e	– siła elektromotoryczna (SEM): wartość stała, chwilowa
F	– siła, siła magnetomotoryczna
f, f_e	– częstotliwość, częstotliwość elektryczna
H	– natężenia pola magnetycznego
I, i	– natężenie prądu elektrycznego: wartość stała, chwilowa
j	– gęstość prądu elektrycznego
J	– moment bezwładności
k_e, k_T	– stała napięcia, stała momentu
L	– indukcyjność, długość
n	– prędkość obrotowa [obr/min]
p	– liczba par biegunów
P_a, P_f, P_e, P_m	– moc: twornika, wzbudzenia, elektryczna, mechaniczna
Q, q	– ładunek: całkowity, chwilowy
r	– promień
R	– rezystancja uzwojeń
S	– moc pozorna, powierzchnia rozpięta na konturze S
t	– czas
T_e, T_m, T_L	– moment: elektromagnetyczny, mechaniczny, obciążenia
U, u	– napięcie: wartość ustalona, chwilowa
v	– prędkość ładunku
W_e, W_c	– energia, koenergia pola magnetycznego
X	– reaktancja
z	– liczba zwojów

oznaczenia greckie

ΔP	– straty mocy
Φ, φ	– strumień magnetyczny: wartość stała, chwilowa
η	– sprawność
μ	– przenikalność magnetyczna
θ	– przepływ
τ_a, τ_m	– stała czasowa: elektromagnetyczna, mechaniczna
ϑ_z, ϑ_u	– przekładania zwojowa, napięciowa
Ω, ω	– prędkość kątowna (rad/s) P stała, chwilowa
ω_e	– pulsacja elektryczna
Ψ, ψ	– strumień skojarzony: wartość stała, chwilowa

indeksy

1, 2	– strona pierwotna, strona wtórna
m, e	– wielkość mechaniczna, elektryczna
s, r	– stojan, wirnik
a, f	– twornik, wzbudzenie (magneśnica)