

Maszyny elektryczne

**SKRYPT DLA STUDENTOW POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
IM. TADEUSZA KOSCIUSZKI**

Spis treści

SPIS TRESCI	3
SPIS RYSUNKOW	7
WPROWADZENIE DO CWICZEN.....	11
OPRACOWANIE WYNIKOW POMIAROW	11
OGOLNE ZASADY ORGANIZACJI I BEZPIECZENSTWA PRACY	12
REGULAMIN CWICZEN.....	12
LITERATURA	13
CWICZENIE T1: TRANSFORMATOR JEDNOFAZOWY	15
WPROWADZENIE TEORETYCZNE	15
<i>Podstawowe zaleznosci.....</i>	<i>15</i>
<i>Uklad zastepczy i rownania napieciowo-pradowe.....</i>	<i>16</i>
<i>Stan jalowy, straty, prad jalowy i magnesujacy.....</i>	<i>16</i>
<i>Stan zwarcia, napiecie zwarcia, straty</i>	<i>18</i>
<i>Stan obciazenia, zmienosc napiecia, sprawnosc.....</i>	<i>19</i>
BADANIA LABORATORYJNE	20
<i>Ogledziny zewnetrzne</i>	<i>20</i>
<i>Sprawdzanie stanu izolacji</i>	<i>20</i>
<i>Pomiar rezystancji uzwojen</i>	<i>20</i>
<i>Wyznaczanie przekladni transformatora</i>	<i>20</i>
<i>Pomiary w stanie jalowym.....</i>	<i>21</i>
<i>Pomiary w stanie zwarcia.....</i>	<i>22</i>
<i>Pomiary w stanie obciazenia</i>	<i>23</i>
<i>Opracowanie sprawozdania</i>	<i>23</i>
PYTANIA I ZADANIA KONTROLNE	24
CWICZENIE T2: TRANSFORMATOR 3 – FAZOWY	25
WPROWADZENIE TEORETYCZNE	25
<i>Budowa i dzialanie</i>	<i>25</i>
<i>Uklady i grupy polaczen transformatorow trojfazowych.....</i>	<i>25</i>
<i>Przekladnia zwojowa i napieciowa.....</i>	<i>27</i>
<i>Stan obciazenia transformatora (uklad zastepczy).....</i>	<i>27</i>
BADANIA LABORATORYJNE	28
<i>Ogledziny zewnetrzne</i>	<i>28</i>
<i>Wyznaczenie poczatkow i koncow uzwojen.....</i>	<i>28</i>
<i>Pomiar przekladni znamionowej, transformatora</i>	<i>29</i>
<i>Wyznaczenie grupy polaczen transformatora</i>	<i>29</i>
<i>Wyznaczenie charakterystyki zewnetrznej</i>	<i>30</i>
<i>Obciazenie prostownikowe transformatora trojfazowego.....</i>	<i>30</i>
<i>Obserwacja na oscyloskopie przebiegu pradu magnesujacego transformatora 3- kolumnowego i 5-kolumnowego.....</i>	<i>31</i>
PYTANIA I ZADANIA KONTROLNE	31
CWICZENIE T3: PRACA ROWNOLEGŁA TRANSFORMATOROW	33
WPROWADZENIE TEORETYCZNE	33
<i>Przetwarzanie energii w układzie pracy rownoleglej.....</i>	<i>33</i>
<i>Warunki pracy rownoleglej</i>	<i>34</i>
BADANIA LABORATORYJNE	36
<i>Badania wstepne.....</i>	<i>36</i>
<i>Wyznaczenie poczatkow i koncow uzwojen.....</i>	<i>36</i>
<i>Wyznaczenie przekladni.....</i>	<i>37</i>
<i>Pomiar napiecia zwarcia oraz wyznaczenie rezystancji i impedancji zwarciowej.....</i>	<i>37</i>
<i>Wyznaczenie rozkladu pradow transformatorow w układzie pracy rownoleglej.....</i>	<i>38</i>
PYTANIA I ZADANIA KONTROLNE	38
CWICZENIE A1: SILNIK INDUKCYJNY PIERSCIENIOWY	39
WPROWADZENIE TEORETYCZNE	39
<i>Zarys budowy i zasada dzialania.....</i>	<i>39</i>
<i>Uklad zastepczy silnika indukcyjnego pierscieniowego.....</i>	<i>40</i>

<i>Rozruch oporowy</i>	41
<i>Wykreskołowy</i>	43
BADANIA LABORATORYJNE.....	45
<i>Badania wstępne</i>	45
<i>Pomiary rezystancji uzwojen</i>	45
<i>Pomiary stanu pracy transformatorowej</i>	45
<i>Pomiary zwarcia</i>	46
<i>Rozruch oporowy, rejestracja przebiegów czasowych</i>	46
<i>Pomiary biegu jałowego</i>	47
<i>Pomiary obciążenia</i>	47
<i>Uwagi do opracowania sprawozdania</i>	47
PYTANIA I ZADANIA KONTROLNE	48
CWICZENIE A2: SILNIK INDUKCYJNY KLATKOWY.....	49
WPROWADZENIE TEORETYCZNE.....	49
<i>Budowa i zasada działania</i>	49
<i>Metody rozruchu</i>	51
BADANIA LABORATORYJNE.....	53
<i>Pomiar parametrów uzwojenia stojana</i>	53
<i>Pomiar w stanie zwarcia</i>	55
<i>Pomiar biegu jałowego</i>	57
<i>Pomiary w stanie obciążenia</i>	58
<i>Wyznaczanie sprawności metoda strat poszczególnych</i>	59
<i>Wyznaczanie parametrów układu zastępczego dla stanu znamionowego /bez uwzględnienia wypierania prądu w klatce/</i>	59
PYTANIA I ZADANIA KONTROLNE	62
CWICZENIE A3: DYNAMIKA SILNIKA INDUKCYJNEGO.....	63
WPROWADZENIE TEORETYCZNE.....	63
<i>Wstęp</i>	63
<i>Model matematyczny i układ zastępczy silnika</i>	63
<i>Układ równań stanu</i>	65
<i>Dobór parametrów układu zastępczego</i>	66
POMIARY LABORATORYJNE.....	67
<i>Oględziny i pomiar rezystancji uzwojen</i>	67
<i>Pomiar biegu jałowego i rozdzielenie strat</i>	67
<i>Pomiary w stanie zwarcia</i>	68
<i>Wyznaczenie momentu bezwładności wirnika</i>	68
<i>Rejestracja dynamicznego przebiegu</i>	70
PYTANIA KONTROLNE	71
CWICZENIE S1: PRACA SAMOTNA PRADNICY SYNCHRONICZNEJ.....	73
WPROWADZENIE TEORETYCZNE.....	73
<i>Układ zastępczy i wykres wskazowy</i>	73
POMIARY LABORATORYJNE.....	75
<i>Pomiary w stanie jałowym</i>	75
<i>Pomiary w starcie zwarcia symetrycznego</i>	75
<i>Pomiary wstanie obciążenia</i>	77
<i>Pomiar reaktancji synchronicznych X_d, X_q metoda małego poslizgu</i>	79
PYTANIA I ZADANIA KONTROLNE	81
CWICZENIE S2: SILNIK SYNCHRONICZNY JAWNOBIEGUNOWY.....	83
WPROWADZENIE TEORETYCZNE.....	83
<i>Powstawanie momentu elektromechanicznego</i>	83
<i>Rozruch asynchroniczny</i>	86
POMIARY LABORATORYJNE.....	88
<i>Rozruch asynchroniczny silnika synchronicznego</i>	88
<i>Pomiary do wyznaczenia krzywych V</i>	89
<i>Wyznaczenie reaktancji synchronicznych X_d i X_q</i>	90
<i>Pomiary do wyznaczenia charakterystyk katowych $M = f(x)$</i>	91
<i>Wyznaczanie sprawności metoda strat poszczególnych</i>	92
PYTANIA I ZADANIA KONTROLNE	93

CWICZENIE P1: BADANIA OGOLNE PRADU STAŁEGO	95
WPROWADZENIE TEORETYCZNE	95
<i>Budowa maszyny prądu stałego</i>	95
<i>Oznaczenie graficzne maszyny prądu stałego</i>	95
<i>Kierunek wirowania maszyn prądu stałego</i>	95
<i>Oddziaływanie twornika</i>	95
<i>Komutacja</i>	96
BADANIA LABORATORYJNE	97
<i>Ogledziny zewnętrzne</i>	97
<i>Pomiar rezystancji izolacji i sprawdzenie ciągłości uzwojen</i>	97
<i>Pomiar rezystancji uzwojen stojana i wirnika w temperaturze otoczenia</i>	98
<i>Pomiar rezystancji przejścia między szczotką a komutatorem</i>	98
<i>Oznaczenie początków i końców uzwojen</i>	99
<i>Ustawienie szczotek w strefie neutralnej</i>	100
<i>Badanie komutacji</i>	100
<i>Pomiar indukcji magnetycznej w szczelinie między wirnikiem a stojanem</i>	102
<i>Pomiar rozkładu napięcia na komutatorze</i>	103
PYTANIA I ZADANIA KONTROLNE	104
CWICZENIE P2: PRADNICA PRADU STAŁEGO.....	105
WPROWADZENIE TEORETYCZNE	105
<i>Budowa i zasada działania</i>	105
<i>Równania statycznego stanu pracy</i>	105
<i>Warunki samowzbudzenia się prądnicy boczniowej prądu stałego</i>	105
BADANIA LABORATORYJNE	106
<i>Pomiary i badania wstępne</i>	106
<i>Charakterystyka magnesowania</i>	106
<i>Znamionowa wartość prądu wzbudzenia</i>	107
<i>Charakterystyka zewnętrzna</i>	107
<i>Charakterystyka regulacyjna</i>	109
<i>Straty i sprawność</i>	109
<i>Wyznaczanie strat w rezystancji szeregowej R_a</i>	110
<i>Wyznaczanie strat wzbudzenia</i>	110
<i>Sprawdzenie zasobów wzbudzenia przy bezpośrednim obciążeniu i $\omega = \omega_N = \text{const}$</i>	111
PYTANIA I ZADANIA KONTROLNE	111
CWICZENIE P3: SILNIK BOCZNIKOWY PRADU STAŁEGO	113
WPROWADZENIE TEORETYCZNE	113
<i>Budowa i zasada działania</i>	113
<i>Równania statycznego stanu pracy (tabela 1)</i>	113
BADANIA LABORATORYJNE	113
<i>Pomiary i badania wstępne</i>	113
<i>Początkowy moment rozruchowy</i>	113
<i>Charakterystyka mechaniczna (zewnętrzna)</i>	114
<i>Charakterystyka regulacyjna</i>	117
<i>Charakterystyka prędkości obrotowej przy zmianie prądu wzbudzenia</i>	117
<i>Sprawność silnika</i>	118
PYTANIA I ZADANIA KONTROLNE	118
CWICZENIE P4: SILNIK SZEREGOWY PRADU STAŁEGO	121
WPROWADZENIE TEORETYCZNE	121
<i>Budowa i zasada działania</i>	121
BADANIA LABORATORYJNE	121
<i>Pomiary i badania wstępne</i>	121
<i>Charakterystyka magnesowania (biegu jałowego)</i>	121
<i>Charakterystyka początkowego momentu rozruchowego</i>	122
<i>Charakterystyka mechaniczna (zewnętrzna)</i>	122
<i>Charakterystyka regulacji</i>	123
<i>Regulacja prędkości obrotowej silnika poprzez zmianę napięcia zasilającego przy stałym momencie (prądzie) obciążenia</i>	124
<i>Sprawność silnika</i>	124

PYTANIA I ZADANIA KONTROLNE 125

Spis rysunków

RYSUNEK 1 UKŁAD TRANSFORMATORA JEDNOFAZOWEGO	15
RYSUNEK 2 UKŁAD ZASTĘPCZY TRANSFORMATORA: A) SZCZEGÓŁOWY, B) WYRAZONY TRZEMA IMPEDANCJAMI.....	16
RYSUNEK 3 UKŁAD ZASTĘPCZY DLA STANU JAŁOWEGO TRANSFORMATORA	16
RYSUNEK 4 PRZEBIEGI STRUMIENIA I PRADU JAŁOWEGO ORAZ MAGNESUJĄCEGO Z UWZGLĘDNIENIEM PETLI HISTEREZY	18
RYSUNEK 5 UKŁAD ZASTĘPCZY DLA STANU ZWARCIA TRANSFORMATORA.....	18
RYSUNEK 6 PRZEBIEG SPRAWNOŚCI W FUNKCJI MOCY ODDANEJ	20
RYSUNEK 7 UKŁAD DO POMIARU REZYSTANCJI UZWOJEN.....	20
RYSUNEK 8 WYZNACZENIE PRZEKŁADNI TRANSFORMATORA: A) METODA KOMPENSACYJNA, B) ZA POMOCA DWOCH WOLTOMIERZY.....	21
RYSUNEK 9 UKŁAD POŁĄCZEN DO POMIARÓW TRANSFORMATORA W STANIE JAŁOWYM, ZWARCIA I OBCIĄŻENIA	21
RYSUNEK 10 CHARAKTERYSTYKI STANU JAŁOWEGO TRANSFORMATORA	21
RYSUNEK 11 CHARAKTERYSTYKI STANU ZWARCIA	22
RYSUNEK 12 CHARAKTERYSTYKI ZEWNĘTRZE TRANSFORMATORA	23
RYSUNEK 13 CHARAKTERYSTYKI OBCIĄŻENIOWE TRANSFORMATORA (DLA OBCIĄŻENIA REZYSTANCYJNEGO).....	23
RYSUNEK 14 TRANSFORMATOR TROJFAZOWY: A) ZŁOŻONY Z TRZECH TRANSFORMATORÓW 1 – FAZOWYCH, B) TROJKOLUMNOWY, C) PIECIOKOLUMNOWY	25
RYSUNEK 15 UKŁADY POŁĄCZEN TRANSFORMATORÓW TROJFAZOWYCH: A, B) GWIAZDA; C, D) TROJKĄT; E, F) ZYGZAK – STOSUJE SIĘ DLA UZWOJEN DN	26
RYSUNEK 16 GRAFICZNY SPOSOB WYZNACZENIA PRZESUNIĘCIA GODZINOWEGO: A) UKŁAD POŁĄCZEN TRANSFORMATORA, B) WYKRES WEKTOROWY	26
RYSUNEK 17 UKŁAD ZASTĘPCZY TRANSFORMATORA TROJFAZOWEGO.....	27
RYSUNEK 18 CHARAKTERYSTYKI ZEWNĘTRZNE TRANSFORMATORA: A) OBCIĄŻENIE INDUKCYJNE L, OBCIĄŻENIE POJEMNOSCIOWE C, OBCIĄŻENIE REZYSTANCYJNE R, OBCIĄŻENIE MIESZANE CR, LR; B) PROSTOWNIKOWE: 1 – PROSTOWNIK W UKŁADZIE MOSTKOWYM, 2 – PROSTOWNIK W UKŁADZIE GWIAZDOWYM.....	28
RYSUNEK 19 UKŁAD POŁĄCZEN DO WYZNACZANIA POCZĄTKÓW I KONCÓW UZWOJEN	29
RYSUNEK 20 UKŁAD POŁĄCZEN DO WYZNACZENIA POCZĄTKÓW I KONCÓW UZWOJEN USYTUOWANYCH NA TEJ SAMEJ KOLUMNIE	29
RYSUNEK 21 UKŁAD DO WYZNACZENIA GRUPY POŁĄCZEN TRANSFORMATORA TROJFAZOWEGO	29
RYSUNEK 22 KONSTRUKCJA WYKRESU TOPOGRAFICZNEGO	30
RYSUNEK 23 UKŁAD POMIAROWY DO WYZNACZENIA CHARAKTERYSTYKI ZEWNĘTRZNEJ TRANSFORMATORA TROJFAZOWEGO PRZY OBCIĄŻENIU REZYSTANCYJNYM, INDUKCYJNYM, POJEMNOSCIOWYM I MIESZANYM.	30
RYSUNEK 24 UKŁAD DO POMIARU OBCIĄŻENIA PROSTOWNIKOWEGO	31
RYSUNEK 25 GRUPA TRANSFORMATORÓW W UKŁADZIE PRACY RÓWNOLEGŁEJ	33
RYSUNEK 26 PRZEKSZTAŁCENIE UKŁADU ZASTĘPCZEGO FAZY TRANSFORMATORA DO POSTACI DWOJNIKA AKTYWNEGO	33
RYSUNEK 27 UKŁAD TRANSFORMATORÓW POŁĄCZONYCH RÓWNOLEGŁE (PO PRZEKSZTAŁCENIU UKŁADU ZASTĘPCZEGO).....	34
RYSUNEK 28 A) PRACA RÓWNOLEGŁA DWOCH TRANSFORMATORÓW PRZY RÓŻNYCH PRZEKŁADNIACH (PRĄD OBCIĄŻENIA RÓWNY ZERU), B) ROZKŁAD PRĄDÓW TRANSFORMATORÓW O RÓŻNYCH PRZEKŁADNIACH.....	35
RYSUNEK 29 A) PRACA RÓWNOLEGŁA TRANSFORMATORÓW O RÓŻNYCH NAPIĘCIACH ZWARCIA, B) ROZKŁAD PRĄDÓW TRANSFORMATORÓW.....	36
RYSUNEK 30 WYZNACZENIE KĄTA PRZESUNIĘCIA FAZOWEGO METODĄ WOLTOMIERZOWĄ	37
RYSUNEK 31 UKŁAD DO WYZNACZANIA KĄTA PRZESUNIĘCIA FAZOWEGO METODĄ IMPULSÓW PRĄDU STAŁEGO	37
RYSUNEK 32 UKŁAD POMIAROWY DO WYZNACZENIA PRZEKŁADNI, NAPIĘCIA ZWARCIA ORAZ REZYSTANCJI ZWARCIOWEJ.....	37
RYSUNEK 33 UKŁAD DO WYZNACZANIA ROZKŁADU PRĄDÓW TRANSFORMATORÓW W UKŁADZIE PRACY RÓWNOLEGŁEJ	38
RYSUNEK 34 UKŁAD ZASTĘPCZY NIESKOJARZONY SILNIKA PIERSCIENIOWEGO	40
RYSUNEK 35 UKŁAD ZASTĘPCZY SILNIKA PIERSCIENIOWEGO ZE SPROWADZONĄ STRONĄ WTORNA	41
RYSUNEK 36 CHARAKTERYSTYKI ROZRUCHOWE $M(N)$ I $I_s(N)$ SILNIKA PIERSCIENIOWEGO	41

RYSUNEK 37 UKŁAD ZASTĘPCZY I WYKRES WSKAZOWY SILNIKA W STANIE PRACY TRANSFORMATOROWEJ	41
RYSUNEK 38 WPŁYW STRAT MECHANICZNYCH NA PRAD BIEGU JAŁOWEGO	42
RYSUNEK 39 UKŁAD ZASTĘPCZY I WYKRES WSKAZOWY STANU ZWARCIA.....	42
RYSUNEK 40 CHARAKTERYSTYKI MECHANICZNE DLA ROZNYCH REZYSTANCJI W OBWODZIE WIRNIKA	43
RYSUNEK 41 CHARAKTERYSTYKA $I_{sk}=f(U)$	44
RYSUNEK 42 CHARAKTERYSTYKA $M_k=f(U)$	44
RYSUNEK 43 WYKRES KOŁOWY SILNIKA PIERSCIENIOWEGO.....	45
RYSUNEK 44 UKŁAD POMIAROWY DO BADAN SILNIKA PIERSCIENIOWEGO.....	46
RYSUNEK 45 UKŁAD DO REJESTRACJI MOMENTU I PRĘDKOŚCI SILNIKA	47
RYSUNEK 46 WYZNACZANIE ΔP_{Fe} I ΔP_{MECH}	47
RYSUNEK 47 TYPY UZWOJEN KŁATKOWYCH.....	49
RYSUNEK 48 STRUMIENIE ROZPROSZENIA W WIRNIKU DWUKŁATKOWYM	49
RYSUNEK 49 CHARAKTERYSTYKA MECHANICZNA SILNIKA DWUKŁATKOWEGO: M_1 – MOMENT OD KŁATKI ROZRUCHOWEJ, M_2 – MOMENT OD KŁATKI PRACY	50
RYSUNEK 50 STRUMIEN ROZPROSZENIA W SILNIKU GŁĘBOKOZŁÓBKOWYM ORAZ ROZKŁAD GĘSTOŚCI PRADU W FUNKCJI WYSOKOŚCI PRETA PRZY POSLIZGU $s=1$	50
RYSUNEK 51 CHARAKTERYSTYKA MECHANICZNA SILNIKA INDUKCYJNEGO: A – Z KŁATKA PRETOWA, B – Z KŁATKA GŁĘBOKOZŁÓBKOWA	50
RYSUNEK 52 ODCHYLENIE NAPIĘCIA OD REGULACJI PROPORCJONALNEJ.....	52
RYSUNEK 53 CHARAKTERYSTYKI MECHANICZNE PRZY ROZRUCHU CZĘSTOTLIWOŚCIOWYM.....	52
RYSUNEK 54 ROZRUCH SILNIKA KŁATKOWEGO Z ZASTOSOWANIEM PRZEŁACZNIKA Y/Δ	53
RYSUNEK 55 MOMENT DYNAMICZNY ROZWIJANY PRZEZ SILNIK INDUKCYJNY PODCZAS ROZRUCHU BEZPOŚREDNIEGO	53
RYSUNEK 56 RZECZYWISTA CHARAKTERYSTYKA MECHANICZNA SILNIKA KŁATKOWEGO.....	53
RYSUNEK 57 POŁĄCZENIE UZWOJENIA STOJANA W TABLICZCE ZACISKOWEJ	54
RYSUNEK 58 WYZNACZANIE POZATKÓW I KONCÓW UZWOJEN METODĄ IMPULSÓW PRADU STAŁEGO	55
RYSUNEK 59 SCHEMAT UKŁADU POMIAROWEGO DO BADANIA SILNIKA INDUKCYJNEGO	55
RYSUNEK 60 56	
RYSUNEK 61 56	
RYSUNEK 62 CHARAKTERYSTYKI ZWARCIA SILNIKA INDUKCYJNEGO.....	57
RYSUNEK 63 CHARAKTERYSTYKI BIEGU JAŁOWEGO.....	58
RYSUNEK 64 PODZIAŁ STRAT JAŁOWYCH.....	58
RYSUNEK 65 CHARAKTERYSTYKI OBCIĄŻENIA SILNIKA KŁATKOWEGO	58
RYSUNEK 66 CHARAKTERYSTYKA MECHANICZNA.....	59
RYSUNEK 67 UKŁAD ZASTĘPCZY SILNIKA KŁATKOWEGO DLA $s=1$	60
RYSUNEK 68 ZMODYFIKOWANY UKŁAD ZASTĘPCZY DLA $s=1$ Z UWZGLĘDNIENIEM GAŁĘZI POPRZECZNEJ	60
RYSUNEK 69 UKŁAD ZASTĘPCZY DLA $s=0$, $U=U_{KN}$, $\Delta P_{Fe}=0$	61
RYSUNEK 70 UKŁAD ZASTĘPCZY DLA $s=0$, $U=U_N$	61
RYSUNEK 71 64	
RYSUNEK 72 64	
RYSUNEK 73 64	
RYSUNEK 74 67	
RYSUNEK 75 69	
RYSUNEK 76 70	
RYSUNEK 77 70	
RYSUNEK 78 PRZEPIŁY W MASZYNIE JAWNOBIEGUNOWEJ: θ_F - PRZEPIŁY WZBUDZENIA, θ_A – PRZEPIŁY TWORNIKA	73
RYSUNEK 79 UKŁAD ZASTĘPCZY MASZYNY JAWNOBIEGUNOWEJ.....	74
RYSUNEK 80 WYKRES WSKAZOWY PRADNICY JAWNOBIEGUNOWEJ PRZY OBCIĄŻENIU REZYSTANCYJNO - INDUKCYJNYM	74
RYSUNEK 81 UKŁAD ZASTĘPCZY PRADNICY CYLINDRYCZNEJ ORAZ JEJ WYKRES WSKAZOWY PRZY OBCIĄŻENIU REZYSTANCYJNO-INDUKCYJNYM	75
RYSUNEK 82 CHARAKTERYSTYKA BIEGU JAŁOWEGO.....	75
RYSUNEK 83 CHARAKTERYSTYKA ZWARCIA	76
RYSUNEK 84 CHARAKTERYSTYKI BIEGU JAŁOWEGO ZWARCIA W JEDNOSTKACH WZGLĘDNYCH.....	76
RYSUNEK 85 WYKRES WSKAZOWY W STANIE ZWARCIA.....	76

RYSUNEK 86 UKŁAD ZASTĘPCZY PRADNICY W STANIE ZWARCIA.....	77
RYSUNEK 87 RODZINY CHARAKTERYSTYK ZEWNĘTRZNYCH: A - DLA ROZNYCH WARTOSCI PRADU WZBUDZENIA PRZY STAŁYM WSPÓLCZYNNIKU MOCY, B - DLA ROZNYCH WSPÓLCZYNNIKÓW MOCY PRZY STAŁYM PRADZIE WZBUDZENIA RÓWNYM I_{F0} , C - DLA ROZNYCH WSPÓLCZYNNIKÓW MOCY I ROZNYCH WARTOSCI PRADU WZBUDZENIA ZAPEWNIAJĄCYCH ZNAMIONOWE NAPIECIE PRADNICY PRZY ZNAMIONOWYM PRADZIE OBCIĄZENIA	78
RYSUNEK 88 WYKRESY WSKAZOWE ILUSTRUJĄCE POSZCZEGÓLNE PUNKTY PRACY PRADNICY CYLINDRYCZNEJ PRZY WYZNACZANIU CHARAKTERYSTYK ZEWNĘTRZNYCH: A - PRZY OBCIĄZENIU REZYSTANCYJNO-INDUKCYJNYM, B - PRZY OBCIĄZENIU REZYSTANCYJNO-POJEMNOSCIOWYM.....	78
RYSUNEK 89 RODZINA CHARAKTERYSTYK REGULACJI DLA ROZNYCH WSPÓLCZYNNIKÓW MOCY OBCIĄZENIA	79
RYSUNEK 90 WYKRESY WSKAZOWE ILUSTRUJĄCE POSZCZEGÓLNE PUNKTY PRACY PRADNICY CYLINDRYCZNEJ PRZY WYZNACZANIU CHARAKTERYSTYK REGULACJI: A - PRZY OBCIĄZENIU REZYSTANCYJNO-INDUKCYJNYM, B - PRZY OBCIĄZENIU REZYSTANCYJNO-POJEMNOSCIOWYM.....	79
RYSUNEK 91 SCHEMAT UKŁADU POMIAROWEGO DO BADANIA PRADNICY SYNCHRONICZNEJ, PS - PRADNICA SYNCHRONICZNA, SP- SILNIK NAPĘDZAJĄCY	79
RYSUNEK 92 PRZEBIEG PRADU I NAPIECIA PRZY POMIARZE X_d , X_q METODĄ MAŁEGO POSLIZGU, U - NAPIECIE INDUKOWANE W UZWOJENIU WZBUDZENIA	80
RYSUNEK 93 SCHEMAT UKŁADU POMIAROWEGO DO POMIARU X_d , X_q	81
RYSUNEK 94: WYKRES WSKAZOWY SILNIKA CYLINDRYCZNEGO W STANIE JAŁOWYM.....	83
RYSUNEK 95: WYKRES WSKAZOWY I TROJKĄT MOCY SILNIKA CYLINDRYCZNEGO OBCIĄZONEGO MOMENTEM MECHANICZNYM.....	83
RYSUNEK 96: CHARAKTERYSTYKI KATOWE SILNIKA CYLINDRYCZNEGO	84
RYSUNEK 97: WYKRESY WSKAZOWE SILNIKA - PRZY $I_f = \text{CONST}$, $P = \text{VAR}$	84
RYSUNEK 98: WYKRES WSKAZOWY SILNIKA JAWNOBIEGUNOWEGO PRZE WZBUDZONEGO	85
RYSUNEK 99: CHARAKTERYSTYKI KATOWE SILNIKA JAWNOBIEGUNOWEGO	85
RYSUNEK 100: MOMENT SYNCHRONICZNY WYTWARZANY W MOMENCIE ZAŁĄCZENIA SILNIKA	86
RYSUNEK 101: CHARAKTERYSTYKI STATYCZNE MOMENTÓW WYTWARZANYCH PODCZAS ROZRUCHU ASYNCHRONICZNEGO.....	87
RYSUNEK 102: CHARAKTERYSTYKA DYNAMICZNA ROZRUCHU ASYNCHRONICZNEGO.....	88
RYSUNEK 103: SCHEMAT UKŁADU POMIAROWEGO.....	88
RYSUNEK 104: KRZYWE V SILNIKA JAWNOBIEGUNOWEGO	89
RYSUNEK 105: WYKRESY WSKAZOWE SILNIKA CYLINDRYCZNEGO SILNIKA PRZY $P = \text{CONST}$ $I_f = \text{VAR}$	90
RYSUNEK 106: CHARAKTERYSTYKI SILNIKA SYNCHRONICZNEGO	90
RYSUNEK 107: WYKRESY WSKAZOWE SILNIKA JAWNOBIEGUNOWEGO NA BIEGU JAŁOWYM PRZY $I_f = 0$ I $\varphi = 90^\circ$, DLA $I = I_p$ ORAZ DLA $I = I_q$	91
RYSUNEK 108:	91
RYSUNEK 109: ROZDZIAŁ STRAT P_m I P_{fe}	92
RYSUNEK 110: ROZDZIAŁ STRAT P_m , P_{fe} I P_{obc}	93
RYSUNEK 111 SZKIC PRZEKROJU POPRZECZNEGO 4-BIEGUNOWEJ MASZYNY PRADU STAŁEGO.....	95
RYSUNEK 112.....	95
RYSUNEK 113 ODDZIAŁYWANIE TWORNIKA: A) PRZEPIŁY SKŁADOWE; B) PRZEPIŁY WYPADKOWY, α - KĄT SKREĆCENIA OSO NEUTRALNEJ.....	96
RYSUNEK 114 WYZNACZENIE BIEGUNOWOŚCI BIEGUNÓW POMOCNICZYCH	96
RYSUNEK 115 UKŁAD POMIAROWY DO POMIARU REZYSTANCJI UZWOJENIA TWORNIKA	98
RYSUNEK 116 ZALEŻNOŚĆ SPADKU NAPIECIA NA REZYSTANCJI PRZEJŚCIA MIĘDZY SZCZOTKĄ A KOMUTATOREM OD PRADU WIRNIKA.....	98
RYSUNEK 117 UKŁAD DO POMIARU REZYSTANCJI PRZEJŚCIA	99
RYSUNEK 118 ZALEŻNOŚĆ REZYSTANCJI PRZEJŚCIA OD PRADU.....	99
RYSUNEK 119 POŁĄCZENIE BIEGUNÓW KOMUTACYJNYCH Z TWORNIKIEM: A) PRAWIDŁOWE; B) NIEPRAWIDŁOWE.....	99
RYSUNEK 120 UKŁAD POMIAROWY DO USTAWIENIA SZCZOTEK W STREFIE NEUTRALNEJ.....	100
RYSUNEK 121 UKŁAD POŁĄCZEŃ DO WYZNACZENIA KOMUTACJI BEZISKROWEJ: P_o – PRADNICA BADANA, S_N – SILNIK NAPĘDZAJĄCY, U_d – ŹRÓDŁO REGULOWANE POMOCNICZEGO NAPIECIA DODATKOWEGO.....	101

RYSUNEK 122	OBZAR KOMUTACJI BEZISKROWEJ MASZYNY O PRZEPLYWIE UZWOJENIA BIEGUNOW KOMUTACYJNYCH: A) NIWYSTARCZAJACYM, B) NADMIERNYM, C) PRAWIDLOWYM (LINIA PRZERYWANA - OBZAR ZBYT KROTKI); I_D – PRAD DODATKOWY, I_T – PRAD TWORNIKA, o – PUNKT POJAWIENIA SIE PIERWSZEJ ISKRY, X- PUNKT ZNIKANIA ISKRZENIA	102
RYSUNEK 123	UKLAD POLACZEN TESLOMIERZA	102
RYSUNEK 124	TEORETYCZNY ROZKLAD INDUKCJI MAGNETYCZNEJ W MASZYNIE PRADU STALEGO: A) OD BIEGUNOW GLOWNYCH, B) OD UZWOJEN TWORNIKA, C) OD BIEGUNOW POMOCNICZYCH	103
RYSUNEK 125	POMIAR ROZKLADU NAPIECIA NA KOMUTATORZE	103
RYSUNEK 126	KRZYWA A) ROZKLADU NAPIECIA NA KOMUTATORZE I B) POLA POD BIEGUNEM	104
RYSUNEK 127	UKLAD POLACZEN PRADNICY PRADU STALEGO: A) OBCOWZBUDNEJ; B) BOCZNIKOWEJ	105
RYSUNEK 128	SAMOWZBUDZENIE SIE PRADNICY BOCZNIKOWEJ: A) WYZNACZENIE REZYSTANCJI KRYTYCZNEJ OBWODU WZBUDZENIA; B) WYZNACZENIE PREDKOSCI KRYTYCZNEJ	106
RYSUNEK 129	UKLAD POMIAROWY DO WYZNACZENIA CHARAKTERYSTYKI MAGNESOWANIA $U=F(I_F)$ PRZY $N=N_N=CONST$ I $I=0$	106
RYSUNEK 130	CHARAKTERYSTYKA MAGNESOWANIA	107
RYSUNEK 131	UKLADY POMIAROWE DO WYZNACZENIA CHARAKTERYSTYKI ZEWNETRZNEJ PRADNICY PRZY WZBUDZENIU: A) OBCYM; B) BOCZNIKOWYM; C) BOCZNIKOWO-SZEREGOWYM ZGODNYM; D) BOCZNIKOWO-SZEREGOWYM PRZECIWNYM	108
RYSUNEK 132	CHARAKTERYSTYKI ZEWNETRZNE PRADNICY: A) SZEREGOWEJ; B) OBCOWZBUDNEJ; C) BOCZNIKOWEJ; D) BOCZNIKOWEJ Z DOZWOJENIEM SZEREGOWYM ZGODNYM; E) BOCZNIKOWEJ Z DOZWOJENIEM SZEREGOWYM PRZECIWNYM	108
RYSUNEK 133	CHARAKTERYSTYKI REGULACJI PRADNICY BOCZNIKOWEJ: A) NATURALNA (NORMALNA); B) Z DOZWOJENIEM SZEREGOWYM ZGODNYM; C) Z DOZWOJENIEM SZEREGOWYM PRZECIWNYM	109
RYSUNEK 134	UKLAD POMIAROWY DO WYZNACZENIA STRAT JALOWYCH METODA SILNIKOWA	110
RYSUNEK 135	ZALEZNOSC STRAT JALOWYCH OD NAPIECIA INDUKOWANEGO W TWORNIKU	110
RYSUNEK 136	POMIAR POCZATKOWEGO MOMENTU ROZRUCHOWEGO	114
RYSUNEK 137	POCZATKOWY MOMENT ROZRUCHOWY W FUNKCJI PRADU SILNIKA: A) DLA ROZNYCH PRADOW WZBUDZENIA; B) 1- SILNIK BOCZNIKOWY, 2 - SILNIK BOCZNIKOWY Z UZWOJENIEM KOMPENSACYJNYM, 3 - SILNIK BOCZNIKOWY Z DOZWOJENIEM SZEREGOWYM ZGODNYM, 4 - SILNIK BOCZNIKOWY Z DOZWOJENIEM SZEREGOWYM PRZECIWNYM	114
RYSUNEK 138	UKLADY POMIAROWE DO WYZNACZENIA CHARAKTERYSTYKI MECHANICZNEJ SILNIKA: A) OBCOWZBUDNEGO, B) BOCZNIKOWEGO, C) BOCZNIKOWO-SZEREGOWEGO ZGODNEGO, D) BOCZNIKOWO-SZEREGOWEGO PRZECIWNEGO	116
RYSUNEK 139	OBCIAZENIE SILNIKA: A) CHARAKTERYSTYKI OBCIAZENIOWE B) CHARAKTERYSTYKI MECHANICZNE: 1- SILNIK BOCZNIKOWY, 2 - SILNIK BOCZNIKOWO-SZEREGOWY ZGODNY, 3 - SILNIK BOCZNIKOWO-SZEREGOWY PRZECIWNY, 4 - SILNIK OBCOWZBUDNY	117
RYSUNEK 140	CHARAKTERYSTYKI REGULACYJNE $I_F=F(I)$ SILNIKA: 1- BOCZNIKOWEGO, 2 – BOCZNIKOWO-SZEREGOWEGO ZGODNEGO, 3 – BOCZNIKOWO SZEREGOWEGO PRZECIWNEGO	117
RYSUNEK 141	HARAKTERYSTYKA PREDKOSCI OBROTOWEJ W FUNKCJI PRADU WZBUDZENIA $\omega=F(I_F)$	118
RYSUNEK 142	UKLAD POLACZEN SILNIKA SZEREGOWEGO	121
RYSUNEK 143	UKLAD DO POMIARU CHARAKTERYSTYKI MAGNESOWANIA	121
RYSUNEK 144	POCZATKOWY MOMENT ROZRUCHOWY W FUNKCJI PRADU SILNIKA: A) CHARAKTERYSTYKA NATURALNA, B) CHARAKTERYSTYKA PRZY ZBOCZNIKOWANYM UZWOJENIU WZBUDZENIA	122
RYSUNEK 145	UKLAD DO POMIARU CHARAKTERYSTYKI MECHANICZNEJ SILNIKA SZEREGOWEGO	122
RYSUNEK 146	PRZYKLADOWE PRZEBIEGI CHARAKTERYSTYK MECHANICZNYCH SILNIKA SZEREGOWEGO: A) CHARAKTERYSTYKA NATURALNA W JEDNOSTKACH WZGLEDNYCH, B) 1 –NATURALNA, 2-ZOPOREM DODATKOWYM, 3-ZE ZBOCZNIKOWANYM UZWOJENIEM WZBUDZENIA, 4-PRZY OBNIZONYM NAPIECIU	123
RYSUNEK 147	PRZYKLADOWE PRZEBIEGI CHARAKTERYSTYK OBCIAZENIOWYCH SILNIKA SZEREGOWEGO	123
RYSUNEK 148	CHARAKTERYSTYKA REGULACJI: A) $w=F(I)$ PRZY $U=CONST$, B) $U_F(I)$ PRZY $w=CONST$	124
RYSUNEK 149	CHARAKTERYSTYKA $\omega=F(U)$ PRZY $M=CONST$	124

Wprowadzenie do cwiczen

Program badan i wiadomosci teoretyczne nalezy przyswoic sobie wg instrukcji lub literatury uzupealnijacej przed przystapieniem do cwiczenia. Pierwszymi czynnościami przy cwiczeniu sa:

- zapoznanie sie z obiektami badan – oględziny techniczne,
- analiza celu i programu wykonywania badan,
- analiza mozliwosci wykonania istniejacymi przyrzadami i miernikami.

Kazda cwiczaca grupa laboratoryjna wybiera w swym skladzie:

- kierujacego caloscia realizowanego cwiczenia,
- prowadzacego notatki z pomiarow i badan w zeszytie specjalnie do tego celu przeznaczonym.

Funkcje te pelnia kolejno wszyscy członkowie grupy. Przed rozpoczeciem cwiczenia grupa przedstawia prowadzaczemu opracowany plan badan.

Na wstepie nalezy zaprojektowac układ pomiarowy, dobrac aparature o odpowiednich zakresach pomiarowych i klasie, urzadzenia regulacyjne i przewidywany zakres napieciowy.

W celu unikniecia pomyłek w montazu układu pomiarowego nalezy przestrzegac zasady, ze w pierwszej kolejnosci łączy sie obwody glowne, w których plynie prad roboczy, a nastepnie dopiero obwody pomiarowe.

Przy montazu nalezy zwracac uwage na wlasciwe dokrecenie zaciskow, bowiem złe styki zmniejszaja dokladnosc pomiaru, moga byc przyczyna uszkodzenia przyrzadow, wywołania zwarc w obwodach oraz rozbiegania sie maszyn. Regulatory i przyrzady stosowane w układcie pomiarowym nalezy ustawic w pozycji rozruchowej przed kazdym wlaczeniem napiecia do układu.

Po zmontowaniu i sprawdzeniu układu przez cwiczacych nalezy go zglosic do sprawdzenia prowadzaczemu cwiczenie i po wyrazeniu zgody przystapic do realizacji cwiczenia zgodnie z obowiazujacym programem, regulaminem i instrukcjami dodatkowymi.

Kolejnosc poszczegolnych pomiarow ustala sie wg zasady, ze w pierwszej kolejnosci wykonuje sie pomiary na maszynie nie nagrzaney (w temp. otoczenia), oraz te, których wyniki sa niezbedne do wykonania dalszych badan.

Pomiary do wyznaczania zaleznosci miedzy dwoma wielkosciami przeprowadza sie przy scisle okreslonych pozostalych parametrach, które przez cały czas pomiaru nalezy kontrolowac.

Do wyznaczenia charakterystyk potrzeba od 6 do 10 punktow pomiarowych zaleznie od nieregularnosci przebiegu. W czasie kazdego cwiczenia nalezy stworzyc atmosfere, która sprzyjalaby przetworzenia banalnego obowiazku w probe pracy badawczej opartej na naukowych podstawach.

Opracowanie wynikow pomiarow

Prowadzacy notatki w czasie cwiczenia powinien starannie zapisac nastepujace pozycje:

- tytuł cwiczenia i date wykonania,
- skład imienny grupy wraz z podziałem funkcji (kierujacy i prowadzacy notatki),
- przedmiot badan, dane znamionowe i opis budowy,
- spis przyrzadow majacy wpływ na wyniki pomiarow,
- wyniki pomiarow zamieszczone w tabelach,
- uwagi o pomiarach w czasie cwiczenia.

Tak sporzadzone notatki w zeszytie, zatwierdzone podpisem przez prowadzacego cwiczenia, stanowią podstawe do opracowania sprawozdania z cwiczenia. Sprawozdanie powinno dodatkowo zawierac zestawienie stosownych obliczen, przebiegi charakterystyk i wynikajace z cwiczenia wnioski i uwagi. Sprawozdanie powinno byc opracowane na papierze kratkowanym formatu A3, zaopatrzonym w dokladnie wypełniona piecátke nagławkowa, a wykresy charakterystyk na papierze milimetrowym formatu A4 z wyraźnie

zaznaczonymi punktami pomiarowymi. Wszystkie kartki sprawozdania należy w sposób trwały spiąć lub skleić.

Przy wykreslaniu charakterystyk znajomość teoretycznego przebiegu w określonej zależności umożliwi wykonanie prawidłowej interpretacji lub ekstrapolacji charakterystyki w wypadku dużego rozrzutu punktów pomiaru lub niemożności wykonania całego zakresu zależności.

Dla umożliwienia bezpośredniego porównania właściwości maszyn o różnych wielkościach wygodnie jest wyrazić skale charakterystyk w jednostkach względnych. Jednostki względne są liczbami niemianowanymi i określają krotności danej wielkości w odniesieniu do jej znamionowej wartości.

Za podstawową wartość odniesienia przyjmuje się np. znamionowe napięcie U_N , znamionowy prąd I_N , moc znamionowa S_N , znamionowa prędkość obrotowa n_N , znamionowy prąd przy biegu jałowym I_{wo} , impedancje znamionowa $Z_N = U_N / I_N$ (fazowo), itp.

Wnioski i uwagi powinny dotyczyć pomiarów, porównania wyników z wymaganiami norm oraz przydatności danej maszyny do pracy w określonych warunkach.

Sprawozdania powinny mieć jednolity wygląd i być sporządzone wg następujących punktów:

- temat ćwiczenia i data realizacji,
- przedmiot badań ze szczegółowymi danymi znamionowymi,
- program badań,
- opis stosowanych metod pomiarowych (nie podanych w instrukcji),
- układy połączeń stosowane w czasie pomiarów,
- spis przyrządów pomiarowych,
- tabele z wynikami pomiarów i obliczeń,
- stosowane wzory i przykłady obliczeń,
- wykresy charakterystyk w jednostkach względnych,
- uwagi i wnioski.

Sprawozdania należy wykonać starannie i czysto, w przeciwnym wypadku zostaną one zwrócone do poprawy i powtórzonego wykonania w terminie jednego tygodnia.

Ogólne zasady organizacji i bezpieczeństwa pracy

Obecność dużej ilości maszyn elektrycznych, aparatury łączeniowej, pomocniczej i pomiarowej w laboratorium, będącej pod napięciem, zmusza do zachowania szczególnej ostrożności ze względu na niebezpieczeństwo porażenia prądem elektrycznym oraz możliwość obrażenia ciała przez wirujące elementy maszyn. Dlatego każdy student powinien przestrzegać poleceń i wskazówek prowadzącego ćwiczenia oraz stosować się do ogólnie przyjętych przepisów BHP przy obsłudze urządzeń elektrycznych. Dla zapewnienia sprawnego przebiegu ćwiczeń i ich zaliczenia w laboratorium obowiązuje niżej podany regulamin.

Regulamin ćwiczeń

1. Ćwiczenia rozpoczynają się punktualnie o godzinie podanej w rozkładzie godzin. Pięciominutowe spóźnienie może spowodować niedopuszczenie do odrabiania ćwiczenia.
2. Każdy student przychodzi przygotowany z materiału obejmującego aktualne ćwiczenie. W przypadku niedostatecznego przygotowania nie będzie dopuszczony do odrabiania danego ćwiczenia.
3. W ćwiczeniu może brać udział równocześnie najwyżej czterech studentów.
4. Każdy układ pomiarowy po połączeniu zestawu aparatury musi być przed włączeniem napięcia sprawdzony przez prowadzącego ćwiczenia.
5. Włączenie napięcia na tablicy rozdzielczej, jak również do obwodu układu pomiarowego, dokonuje prowadzący ćwiczenie.
6. Dotykanie niez izolowanych punktów obwodu lub przełączanie zacisków przewodów pod napięciem jest niedozwolone.
7. Opieranie się o maszyny będące w ruchu lub dotykanie wirujących elementów maszyn jest zabronione.

8. Przesławianie lub przenoszenie aparatury, jak również manipulowanie przy urządzeniach należących do innych stanowisk pomiarowych, jest niedozwolone.
9. Za wypadki wynikłe w czasie ćwiczenia, a spowodowane nieostrożnością studenta, Instytut nie ponosi żadnej odpowiedzialności.
10. W przypadku uszkodzenia względnie zniszczenia mierników pomiarowych, aparatury lub maszyny z winy studentów odpowiedzialność materialną ponosi cała grupa ćwiczeniowa.
11. Po zakończeniu ćwiczenia studenci porządkują stanowisko i zdają go prowadzącemu, a w terminie jednego tygodnia oddają i zaliczają sprawozdanie. Brak sprawozdania z poprzedniego ćwiczenia uniemożliwia odrabianie następnego ćwiczenia.
12. W przypadku otrzymania niedostatecznej oceny z zaliczenia ćwiczenia student jest zobowiązany do poprawienia oceny w ciągu najbliższego tygodnia dla uzyskania zaliczenia.

Literatura

1. Z. Bajorek: „Teoria maszyn elektrycznych – laboratorium. Cz. I. Instrukcje do ćwiczeń. Skrypt Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1979”
2. Z. Bajorek: „Maszyny elektryczne. WNT, Warszawa 1977”
3. M. Dąbrowski: „Pola i obwody magnetyczne maszyn elektrycznych. WNT, Warszawa 1971”
4. B. Dubicki: „Maszyny elektryczne. Tom I, II, III. PWN, Warszawa 1958 – 1964”
5. T. Glinka, A. Żywiec i inni: „Laboratorium maszyn elektrycznych. Cz. II, III, IV. Skrypt uczelniany nr 709 i 711. Gliwice 1977, 1978, 1979.”
6. W. Krawacki: „Teoria elektromechanicznego przetwarzania energii. Cz. I. Skrypt Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1979.”
7. A. Kostowski: „Teoria elektromechanicznego przetwarzania energii. Cz. II. Ćwiczenia laboratoryjne. Skrypt Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1979.”
8. W. Latek: „Badania maszyn elektrycznych. WNT, Warszawa 1979.”
9. W. Latek: „Zarys maszyn elektrycznych. WNT, Warszawa 1978.”
10. A. Plamitzer: „Maszyny elektryczne. PWN, Warszawa 1977.”
11. J. Skwarczynski, Z. Tertel: „Wprowadzenie do laboratorium maszyn elektrycznych. Skrypt AGH, Kraków 1979.”
12. Z. Tertel, J. Skwarczynski: „Maszyny elektryczne. Skrypt AGH, Kraków 1979”

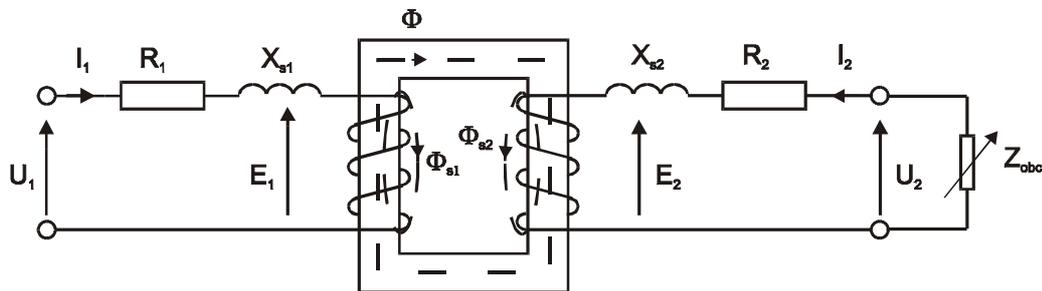
Cwiczenie T1: Transformator jednofazowy

Wprowadzenie teoretyczne

Podstawowe zależności

Transformator jest to stateczny przetwornik energii, w którym za pośrednictwem strumienia elektromagnetycznego następuje zmiana wartości napięcia i prądu energii elektrycznej doprowadzonej do uzwojenia pierwotnego na inne wielkości napięcia i prądu w uzwojeniu wtornym.

Zasadniczymi elementami transformatora są: pakietowy rdzeń i izolowane uzwojenia (Rysunek 1). Rdzeń składa się z kolumn (słupów) połączonych jarzmem. Na kolumnach umieszczone jest uzwojenie w układzie współśrodkowym (cylindrycznym) lub krążkowym. Uzwojenie o większej liczbie zwojów nazywa się uzwojeniem górnego napięcia (GN), a uzwojenie o mniejszej liczbie zwojów – uzwojeniem dolnego napięcia (DN). Po przyłożeniu do zacisków uzwojenia pierwotnego napięcia przemiennego $U_1(t) = U_m \cos \omega t$ popłynie prąd $i_1(t)$, który wzbudzi w rdzeniu strumień magnetyczny przemienny $\Phi(t) = -\Phi_m \sin \omega t$.



Rysunek 1 Układ transformatora jednofazowego

Strumień magnetyczny $\Phi(t)$ skojarzony ze wszystkimi uzwojeniami umieszczonymi na kolumnie indukuje w nich napięcie transformacji zgodnie z prawem indukcji elektromagnetycznej:

$$e_t = -w \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt} = \omega \cdot w \cdot \Phi_m \cdot \cos \omega t \quad (1.1)$$

Wartość skuteczna tych napięć indukowanych w uzwojeniu pierwotnym i wtornym będzie:

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \cdot w_1 \cdot \Phi = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi \quad (1.2a)$$

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi \quad (1.2b)$$

Iloraz indukowanego napięcia pierwotnego i napięcia wtornego określa się przekładnią napięciową ϑ_u , równą przekładni zwojowej ϑ_z :

$$\vartheta_u = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = \vartheta_z = \vartheta \quad (1.3)$$

Podczas pracy transformatora prądy i_1 i i_2 wywołują wokół swych uzwojeń strumienie rozproszone Φ_{s1} i Φ_{s2} , które zamykają się przez powietrze. Strumień rozproszenia skojarzony z "w" zwojami uzwojenia wynosi:

$\Psi_s = w\Phi_s = L_s i$. Linie Φ_s zamykają się wokół tego uzwojenia, indukując w nim napięcie rozproszenia:

$$e_s(t) = w \cdot \frac{d\Phi_s(t)}{dt} = \omega \cdot w \cdot \Phi_s \cdot \cos \omega t \quad (1.4)$$

Przyjmując sinusoidalnie zmienne napięcia i prądy, można wyrazić w postaci symbolicznej dla obu uzwojeń transformatora napięcie rozproszenia jako spadki napięcia na reaktancji rozproszenia X_s .

$$E_{s1} = \omega \cdot w \cdot \Phi_{s1} = j\omega \cdot L_{s1} \cdot I_1 = jX_{s1} \cdot I_1 \quad (1.4a)$$

$$E_{s2} = \omega \cdot w \cdot \Phi_{s2} = j\omega \cdot L_{s2} \cdot I_2 = jX_{s2} \cdot I_2 \quad (1.4b)$$

Równocześnie na skutek przepływu prądu w obydwóch uzwojeniach występują spadki napięć $R_1 I_1$ i $R_2 I_2$ spowodowane istnieniem rezystancji uzwojenia pierwotnego R_1 i wtornego R_2 .

Układ zastępczy i równania napięciowo-prądowe

Analizę pracy transformatora można przeprowadzić na podstawie układu zastępczego (Rysunek 2), wynikającego z równań napięciowo-prądowych.

Układ zastępczy jest czwornikiem typu T z trzema impedancjami:

$Z_1 = R_1 + jX_{s1}$ – impedancja uzwojenia pierwotnego,

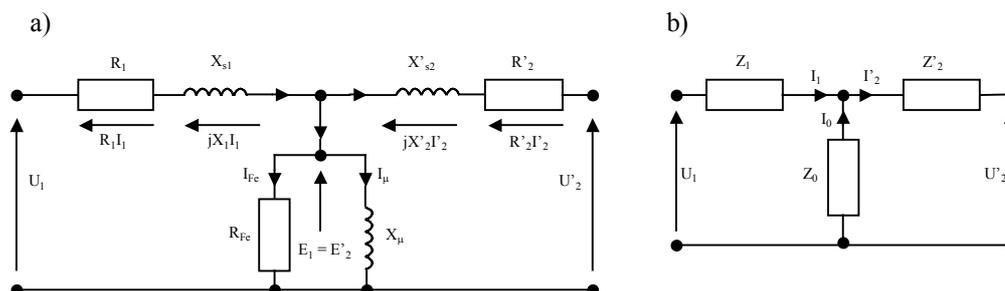
$Z_2' = R_2' + jX_{s2}'$ – impedancja uzwojenia wtórnego "sprowadzona" na stronę pierwotną,

$Z_0 = \frac{jR_{Fe} \cdot X_{\mu}}{R_{Fe} + jX_{\mu}}$ – impedancja gałęzi poprzecznej.

Parametry uzwojenia wtórnego "sprowadza" się na stronę pierwotną zgodnie z zasadą równości mocy, za pomocą przekładni zwojowej wg zależności:

$$R_2' = g^2 \cdot R_2, \quad X_{s2}' = g^2 \cdot X_{s2}, \quad Z_2' = g^2 \cdot Z_2,$$

$$U_2' = g \cdot U_2, \quad I_2' = \frac{1}{g} \cdot I_2$$



Rysunek 2 Układ zastępczy transformatora: a) szczegółowy, b) wyrażony trzema impedancjami

Dla przyjętych warunków w układzie zastępczym, stosując równania Kirchoffa dla napięć i prądów, otrzymuje się:

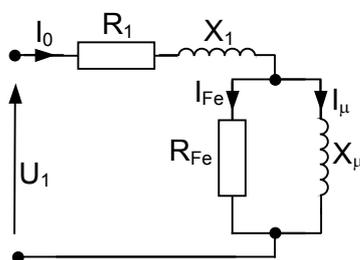
$$U_1 = R_1 \cdot I_1 + jX_{s1} \cdot I_1 + E_1$$

$$U_2' = E_1' - R_2' \cdot I_2' - jX_{s2}' \cdot I_2' \quad (1.5)$$

$$I_1 = I_0 + I_2'$$

Stan jałowy, straty, prąd jałowy i magnesujący

Stan jałowy transformatora polega na zasilaniu jednego z uzwojeń transformatora przy rozwartych zaciskach drugiego uzwojenia ($I_2 = 0$). W normalnych transformatorach energetycznych prąd jałowy I_0 wynosi kilka procent prądu znamionowego ($2 \div 12\%$) I_N . O jego wartości decyduje przede wszystkim wielkość impedancji gałęzi poprzecznej Z_0 , wielokrotnie większej od impedancji uzwojenia pierwotnego Z_1 . Układ zastępczy upraszcza się dla stanu jałowego do postaci przedstawionej poniżej (Rysunek 3).



Rysunek 3 Układ zastępczy dla stanu jałowego transformatora

W stanie jałowym straty ΔP_{Cu0} w uzwojeniu pierwotnym, zależne od kwadratu prądu I_0 , są pomijalnie małe i praktycznie całkowita moc czynna ΔP_0 pobrana przez transformator pokrywa straty w rdzeniu ΔP_{Fe} , na które składają się straty spowodowane histerezą ΔP_h ($\Delta P_h \sim B^2$, $\Delta P_h \sim f$) i prądami wirowymi ΔP_w ($\Delta P_w \sim B^2$, $\Delta P_w \sim f^2$). Ponieważ straty mocy w rdzeniu zależą od kwadratu indukcji B , zależy więc również od kwadratu napięcia zasilania U_1 .

Osobnym zagadnieniem jest kształt prądu jałowego transformatora (Rysunek 4). Przy sinusoidalnym napięciu zasilania $U_1 = U_m \sin \omega t$, przebieg czasowy prądu jałowego $i_0(t)$ będzie odkształcony, jeżeli magnesowanie rdzenia odbywa się powyżej linowej części

charakterystyki magnesowania. Straty jałowe w rdzeniu, reprezentowane zasadniczo przez rewersyjną petle histerezy, powodują dodatkowe zniekształcenie prądu jałowego. Prąd I_0 jest sumą składowej czynnej I_{Fe} i biernej I_μ zgodnie z zależnością:

$$I_0 = \sqrt{I_{Fe}^2 + I_\mu^2} \quad (1.6)$$

Składowa czynna I_{Fe} ma przebieg cosinusoidalny i jest w fazie z napięciem:

$$i_{Fe}(t) = \frac{U}{R_{Fe}} \cdot \cos \omega t \quad (1.7)$$

Składowa bierna I_μ jest opóźniona w odniesieniu do napięcia o kąt $(\pi/2)$, a jej przebieg czasowy jest krzywa antysymetryczna, tzn. że w rozwinięciu na szereg Fouriera nie występuje składowa stała (zerowa) i harmoniczne parzyste. W szeregu występują tylko wyrazy z przemiennymi znakami poszczególnych harmonicznych sinusów nieparzystych rzędów, tak aby krzywa prądu była zaokrąglona jak na rysunku (Rysunek 4).

$$i_\mu(t) = \sqrt{2} \cdot (I_{\mu 1} \cdot \sin \omega t - I_{\mu 3} \cdot \sin 3\omega t + I_{\mu 5} \cdot \sin \omega t - \dots) \quad (1.7a)$$

Amplituda prądu magnesującego wynosi:

$$I_{\mu \max} = \sqrt{2} \cdot (I_{\mu 1} + I_{\mu 3} + I_{\mu 5} + \dots) \quad (1.7b)$$

Wartość skuteczna jest określona wzorem:

$$I_\mu = \sqrt{I_{\mu 1}^2 + I_{\mu 3}^2 + I_{\mu 5}^2 + \dots} \quad (1.7c)$$

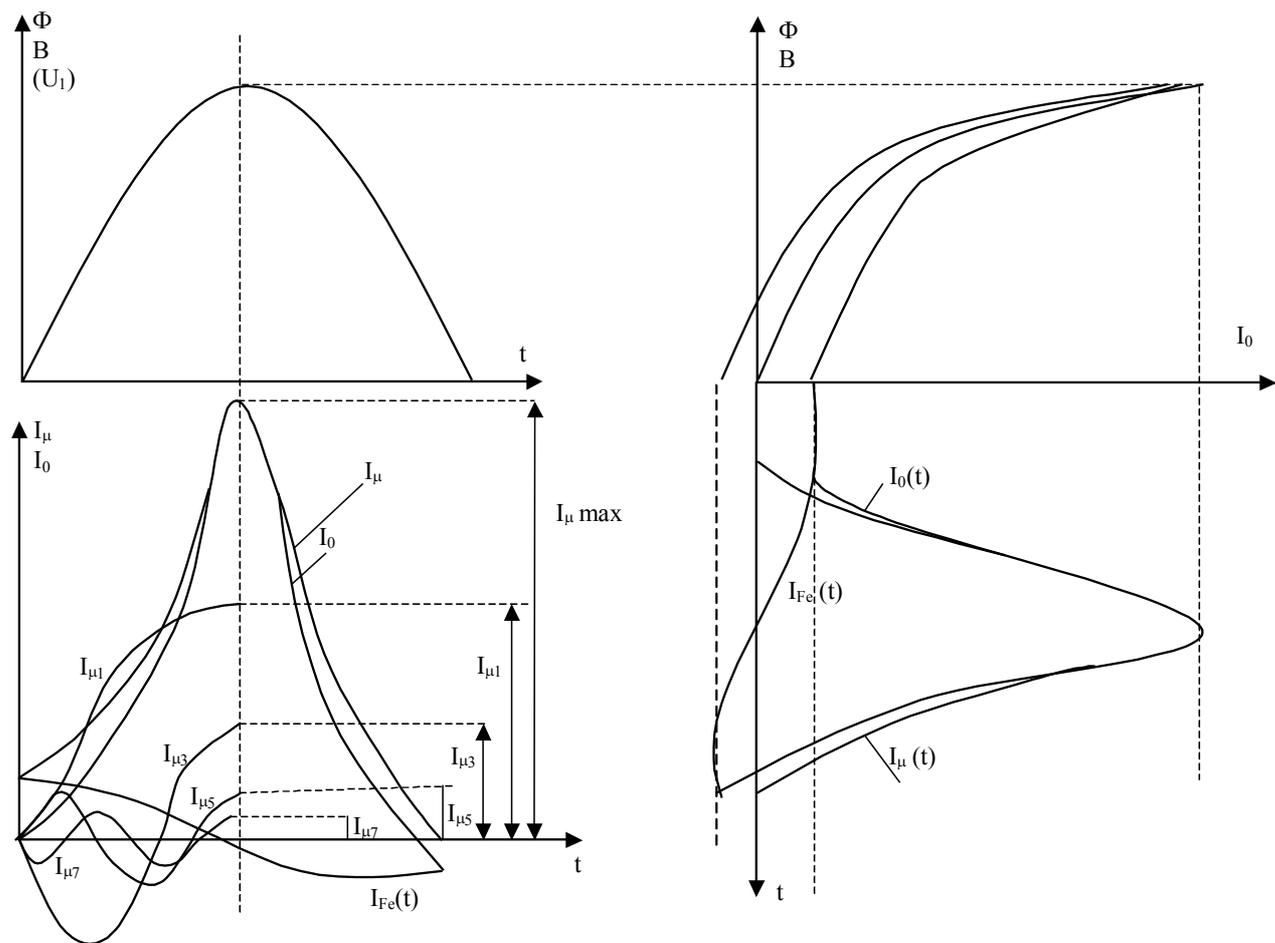
Amplituda prądu magnesującego zależy w największym stopniu od pierwszej, trzeciej i piątej harmonicznej.

Na podstawie uzyskanego przebiegu $i_\mu(t)$ można wyznaczyć:

$$K_s = \frac{I_{\mu \max}}{I_\mu} \quad - \text{współczynnik szczytu,}$$

$$K_{od} = \frac{I_{\mu 1}}{I_\mu} \quad - \text{współczynnik odkształcenia,}$$

$$K_k = \frac{I_\mu}{I_{\mu \text{stp}}} \quad - \text{współczynnik kształtu}$$

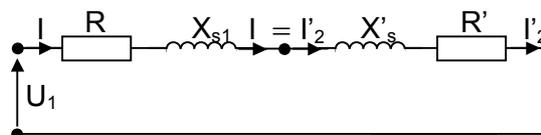


Rysunek 4 Przebiegi strumienia i prądu jałowego oraz magnesującego z uwzględnieniem petli histerezy

Stan zwarcia, napięcie zwarcia, straty

Stan zwarcia pomiarowego przy zasilaniu jednego z uzwojen transformatora występuje przy zwartych zaciskach drugiego uzwojenia ($U_2 = 0$). Już przy zasilaniu transformatora niewielkim napięciem w uzwojeniach popłyną prądy znamionowe. Napięcie to nazywa się napięciem zwarcia U_k , a stan ten określa się jako normalny stan zwarcia. Napięcie zwarcia podaje się zazwyczaj w procentach napięcia znamionowego i wynosi ono 3 – 6% U_N dla transformatorów małej mocy, a 10 – 15% U_N dla transformatorów dużych mocy. Transformatory specjalne np. do zasilania neonów, pieców łukowych i spawarek elektrycznych mają zwiększone napięcie zwarcia poprzez zwiększenie strumieni rozproszenia.

W stanie zwarcia normalnego ($U_1 = U_k$) prąd magnesujący I_μ zmieniający się w funkcji napięcia U_1 zgodnie z krzywą magnesowania osiąga małą wartość względem prądu znamionowego I_N . Jednocześnie straty w rdzeniu ΔP_{Fe} , zależące od kwadratu napięcia zasilania U_1 , są pomijalnie małe ($I_{Fe} \approx 0$), tak więc w układzie zastępczym dla stanu zwarcia można pominąć gałąź poprzeczna (Rysunek 5).



Rysunek 5 Układ zastępczy dla stanu zwarcia transformatora

Sumę rezystancji R_1 i R_2' określa się jako rezystancję zwarcia R_k :

$$R_k = R_1 + R_2' \quad (1.8a)$$

Sume reaktancji X_{s1} i X_{s2}' określa się jako reaktancje zwarcia X_k :

$$X_k = X_{s1} + X_{s2}' \quad (1.8b)$$

Zespolona suma rezystancji i reaktancji zwarcia jest tzw. Impedancja zwarcia:

$$Z_k = R_k + jX_k \quad (1.8c)$$

Znając napięcie zwarcia U_k oraz jego składowe $U_{kR} = R_k I_N$ i $U_{kX} = X_k I_N$ można określić:

- zakres zmian napięcia strony wtórnej transformatora,
- przydatność transformatora do pracy równoległej,
- wartość prądu zwarciovego I_z , przy zasilaniu napięciem znamionowym

$$I_z = I_N \cdot \frac{U_N}{U_k} \quad (1.9)$$

W stanie zwarcia normalnego straty mocy w rdzeniu transformatora są pomijalnie małe i praktycznie całkowita moc czynna ΔP_k pobrana przez transformator pokrywa straty mocy w uzwojeniach ΔP_{Cu} . Straty te, zwane stratami zwarciovymi, równe są tzw. stratom obciążeniowym w uzwojeniach, ponieważ prąd w stanie normalnego zwarcia równy jest prądowi znamionowemu. Straty obciążeniowe w uzwojeniach można rozdzielić na straty podstawowe ΔP_{Cup} i straty dodatkowe ΔP_d . Straty podstawowe ΔP_{Cup} równe są mocy wydzielonej na rezystancjach uzwojeń, mierzonych prądem stałym. Straty dodatkowe ΔP_d powstają na skutek nierównomiernego rozkładu prądu w uzwojeniach i wywoływane są również wewnątrz przewodów i konstrukcji prądami wirowymi od strumieni rozproszonych.

Stan obciążenia, zmienność napięcia, sprawność

W stanie obciążenia do zacisków strony wtórnej transformatora dołączona jest impedancja Z_{obc} . Analizę pracy transformatora w stanie obciążenia można przeprowadzić, korzystając z układu zastępczego przedstawionego na rysunku (Rysunek 2). W zależności od charakteru impedancji obciążenia Z_{obc} (rezystancyjny, indukcyjny, pojemnościowy) napięcie na zaciskach strony wtórnej U_2 zmienia się w funkcji prądu obciążenia I_2 (prądu strony wtórnej transformatora), zależnie od współczynnika mocy obciążenia $\cos \varphi_2$. Zmianę napięcia U_2 względem strony wtórnej w stanie jałowym U_{20} określa się poprzez tzw. zmienność napięcia δU . Zmienność napięcia transformatora jest to różnica między napięciem strony wtórnej w stanie jałowym U_{20} a napięciem U_2 w danym stanie obciążenia, odniesiona do napięcia U_{20} :

$$\delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\% \quad (1.10)$$

Sprawność transformatora η nazywa się ilorazem mocy czynnej P_2 oddanej przez transformator do mocy czynnej P_1 , pobranej z sieci zasilającej:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (1.11a)$$

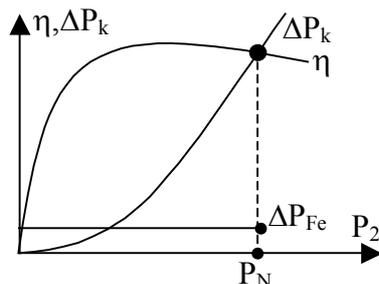
Różnica między mocą pobraną P_1 a oddaną P_2 stanowi straty mocy w transformatorze ΔP , będące superpozycją strat jałowych ΔP_0 i strat zwarciovych ΔP_k :

$$P_1 - P_2 = \Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_k$$

Sprawność można więc określić jako:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P_0 + \Delta P_k}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P_0 + \Delta P_k}{P_2 + \Delta P_0 + \Delta P_k} \quad (1.11b)$$

Przebieg sprawności w funkcji mocy oddanej P_2 przedstawiono poniżej (Rysunek 6). Maksymalna sprawność transformatora znajduje się w zakresie 50 – 70% mocy znamionowej i wówczas straty zwarciove ΔP_k są w przybliżeniu równe stratom jałowym ΔP_0 . W warunkach znamionowych straty zwarciove (straty obciążeniowe w uzwojeniach) są 2÷4 razy większe od strat jałowych.



Rysunek 6 Przebieg sprawności w funkcji mocy oddanej

Badania laboratoryjne

Ogledziny zewnętrzne

Dla danego transformatora należy rozróżnić obwody elektryczne i magnetyczne, rodzaj izolacji uzwojeń, obudowę, sposób chłodzenia. Na podstawie danych znamionowych należy wyznaczyć znamionowe prądy strony pierwotnej i wtórnej.

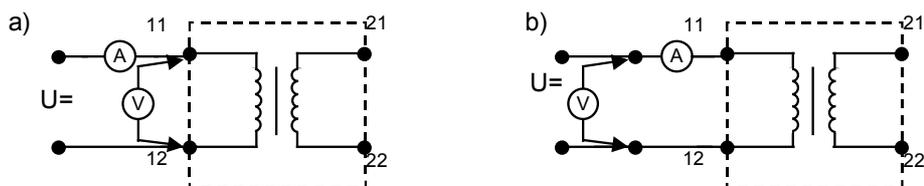
Sprawdzanie stanu izolacji

Pomiaru stanu izolacji dokonuje się megaomierzem indukcyjnym 2,5kV. Należy zmierzyć rezystancje izolacji uzwojenia pierwotnego i wtórnej względem rdzenia i rezystancje między uzwojeniami.

Pomiar rezystancji uzwojeń

Pomiaru dokonuje się w temperaturze otoczenia metoda mostkowa lub techniczna. Pomiar rezystancji rzędu $0,0001\Omega$ do około 2Ω wykonuje się za pomocą mostka Thomsona. Dla rezystancji większych od 1Ω należy stosować mostek Wheatstone'a. Do pomiaru metoda techniczna rezystancji rzędu kilku Ω i mniejszych wykorzystuje się układ połączeń pokazany na rysunku (Rysunek 7a).. Jeżeli rezystancja woltomierza RV jest większa od 1000 – krotnej rezystancji mierzonej R, to R wyznacza się z zależności $R = U/I$. W przeciwnym przypadku rezystancje R wyznacza się z uwzględnieniem poprawki wg wzoru:

$$R = \frac{U}{I - \frac{U}{R_v}}$$



Rysunek 7 Układ do pomiaru rezystancji uzwojeń

Do pomiaru rezystancji rzędu kilku Ω i większych stosuje się drugi układ (Rysunek 7b). Jeżeli rezystancja amperomierza R_A jest mniejsza od 0,001 rezystancji mierzonej R, to R wyznacza się ze wzoru $R = U/I$. W przeciwnym wypadku R oblicza się wg zależności:

$$R = \frac{U}{I} - R_A$$

Zmierzone w temperaturze otoczenia t_0 wartości rezystancji R należy przeliczyć na temperaturę umowną $t = 20^\circ\text{C}$ oraz temperaturę odniesienia $t = 75^\circ\text{C}$ dla uzwojeń izolacji klasy A,B,E lub $t = 115^\circ\text{C}$ dla klasy F,H wg zależności:

$$R_t = R_w [1 + \alpha(t - t_0)]$$

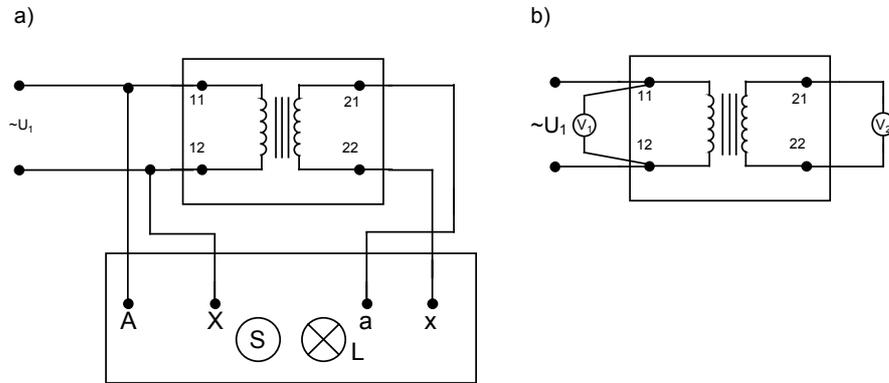
Przy czym α wynosi 0,004 dla miedzi i 0,0038 dla aluminium.

Wyznaczanie przekładni transformatora

Wyznaczenie przekładni transformatora przeprowadza się jedną z następujących metod:

- metoda kompensacyjna, np. kompensatorem Kellera lub Goldschmidta,

- metoda prądu przemiennego za pomocą dwóch woltomierzy.
- Pomiaru przekładni metoda kompensacyjna dokonuje się za pomocą specjalnego miernika wg układu połączeń pokazanego na rysunku (Rysunek 8). Napięcie zasilające należy tak dobrać, aby nie przekroczyć napięcia znamionowego kompensatora lub transformatora. Po skompensowaniu kompensatora odczytuje się zmierzona przekładnię lub w przypadku innego typu kompensatora uchyb po nastawieniu obliczonej przekładni.



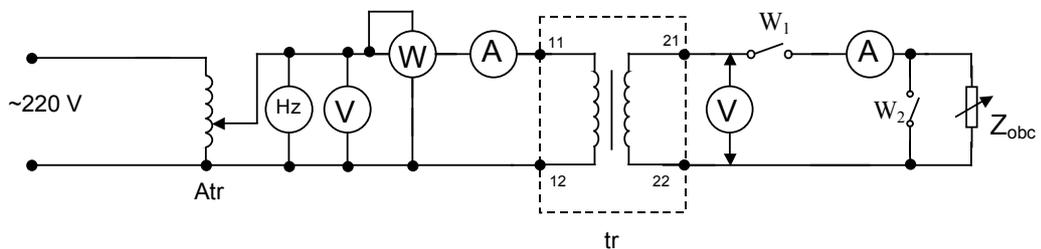
Rysunek 8 Wyznaczenie przekładni transformatora: a) metoda kompensacyjna, b) za pomocą dwóch woltomierzy

Wyznaczanie przekładni metoda prądu przemiennego dokonuje się za pomocą woltomierzy połączonych jak na schemacie (Rysunek 8b). Jednocześnie mierzy się napięcie zasilające U_1 i indukowane U_2 , a przekładnię oblicza się ze wzoru:

$$g_u = \frac{U_1}{U_2}$$

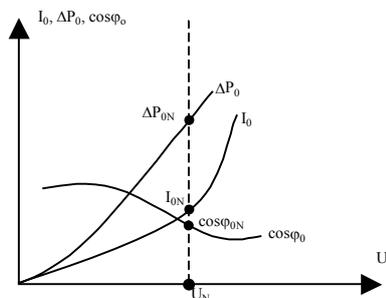
Pomiary w stanie jałowym

Pomiary w stanie jałowym przeprowadza się wg układu połączeń przedstawionego poniżej - Rysunek 9 - (łącznik W_1 otwarty).



Rysunek 9 Układ połączeń do pomiarów transformatora w stanie jałowym, zwarcia i obciążenia

Regulując napięcie zasilania U_1 od wartości $1,25U_N$ do zera należy wyznaczyć charakterystyki stanu jałowego ΔP_0 , I_0 , $\cos\varphi_0 = f(U_1)$. Ich typowy przebieg przedstawiono na rysunku poniżej (Rysunek 10).



Rysunek 10 Charakterystyki stanu jałowego transformatora

Jeżeli w czasie pomiaru częstotliwość f różni się od znamionowej f_N nie więcej niż $\pm 2\%$, to badany transformator należy zasilic napięciem U_1 równym:

$$U_1 = U_N \cdot \frac{f}{f_N}$$

a straty jałowe ΔP_0 przeliczyć w odniesieniu do częstotliwości znamionowej wg wzoru:

$$\Delta P_{ON} = \frac{\Delta P_0}{p_h \frac{f}{f_N} + p_w \left(\frac{f}{f_N}\right)^2}$$

gdzie:

p_h i $p_w = 0,5$ – dla blach zimno walcowanej,

$p_h = 0,8$ i $p_w = 0,2$ – dla stali krzemowej,

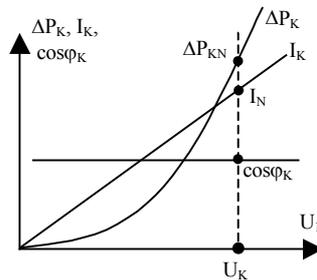
p_h, p_w – straty składowe na histerezie i prądy wirowe w odniesieniu do strat całkowitych w żelazie.

Znając z pomiarów stanu jałowego przy napięciu zasilania $U_1 = U_N$ wartości mocy czynnej P_{ON} i prądu jałowego I_{0N} można wyznaczyć parametry R_{Fe} i X_μ gałęzi poprzecznej układu zastępczego transformatora. Pomijając straty w miedzi uzwojenia pierwotnego oraz spadki napięcia na rezystancji R_1 i reaktancji X_{s1} otrzymuje się:

$$R_{Fe} = \frac{U_N^2}{\Delta P_{ON}}, \quad I_{Fe} = \frac{\Delta P_{ON}}{U_N}, \quad I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_{Fe}^2}, \quad X_\mu = \frac{U_N}{I_\mu}$$

Pomiary w stanie zwarcia

Pomiary w stanie zwarcia transformatora przeprowadza się wg układu - Rysunek 9 - (łącznik W1, W2 zamknięte). Regulując napięcie zasilania od wartości, przy której w uzwojeniu pierwotnym płynie prąd $1,1 I_N$, do zera należy wyznaczyć charakterystyki stanu zwarcia $\Delta P_k, I_k, \cos \varphi_k = f(U)$. Typowy przebieg charakterystyk zwarcia przedstawia poniżej (Rysunek 11).



Rysunek 11 Charakterystyki stanu zwarcia

Jeżeli nie wykonano pomiarów przy prądzie znamionowym, to straty zwarcia ΔP_k i napięcie U_k należy przeliczyć na wartości znamionowe:

$$\Delta P_{kN} = \Delta P_k \left(\frac{I_N}{I_k}\right)^2$$

$$U_{kN} = U_k \frac{I_N}{I_k}$$

Składowa czynna napięcia zwarcia U_{kR} i bierna U_{kX} można wyznaczyć z zależności:

$$U_{kR} = \frac{\Delta P_{kN}}{I_N}, \quad U_{kX} = \sqrt{U_k^2 - U_{kR}^2}$$

Jeżeli w czasie pomiaru częstotliwość różni się nie więcej niż $\pm 2\%$ częstotliwości znamionowej f_N , to napięcie zwarcia należy przeliczyć na f_N wg wzoru:

$$U_k = \sqrt{U_{kX}^2 \cdot \left(\frac{f_N}{f}\right)^2 + U_{kR}^2}$$

a straty dodatkowe ΔP_d wg:

$$\Delta P_{dN} = \Delta P_d \cdot \left(\frac{f_N}{f}\right)^2$$

Na podstawie pomiarów normalnego stanu zwarcia można wyznaczyć impedancje zwarcia Z_k , rezystancje zwarcia R_k i reaktancje zwarcia X_k :

$$Z_k = \frac{U_{kN}}{I_N}, \quad R_k = \frac{\Delta P_{kN}}{I_N^2}, \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

Rezystancje R_1 i R_2' można wyznaczyć z zależności:

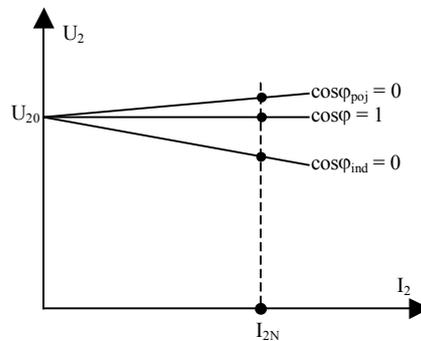
$$R_1 = R_k \cdot \frac{k}{k + \vartheta_z^2}, \quad R_2' = R_k \cdot \frac{\vartheta_z^2}{k + \vartheta_z^2}, \quad k = \frac{R_{1st}}{R_{2st}}$$

Gdzie: R_{1st} , R_{2st} oznaczają rezystancje uzwojen mierzonych prądem stałym. Zwykle w transformatorach energetycznych przyjmuje się:

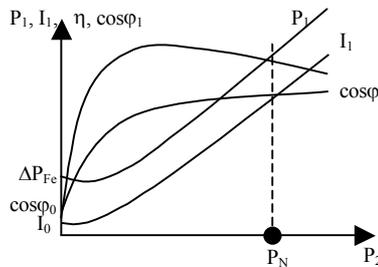
$$R_1 \cong R_2' = \frac{R_k}{2}, \quad X_{s1} \cong X_2' = \frac{X_k}{2}$$

Pomiary w stanie obciążenia

Pomiary wykonuje się wg układu połączeń z - Rysunek 9 - (łącznik W1 zamknięty, W2 otwarty) przy znamionowym napięciu zasilania i znamionowej częstotliwości. Zmieniając obciążenie transformatora od stanu jałowego do obciążenia prądem $I_2 = 1,2 I_{2N}$ przy $\cos\varphi_2 = \text{const.}$, należy wyznaczyć charakterystyki zewnętrzne $U_2 = f(I_2)$ i obciążeniowe P_1 , I_1 , η , $\cos\varphi_1 = f(P_2)$. Ich typowe przebiegi zilustrowano poniżej (Rysunek 12, Rysunek 13).



Rysunek 12 Charakterystyki zewnętrzne transformatora



Rysunek 13 Charakterystyki obciążeniowe transformatora (dla obciążenia rezystancyjnego)

Wyznaczanie sprawności metoda bezpośredniego pomiaru mocy oddanej i pobranej jest obciążone znacznym uchybem. Nawet przy pomiarach mocy miernikami klasy 0,5 sprawność określona wzorem (1.11a) będzie obciążona błędem rzędu 1%, co przy wysokiej sprawności transformatora (95 ÷ 98%) daje błędy rzędu 20 ÷ 50%. Dlatego najczęściej stosuje się do wyznaczania sprawności metodę strat poszczególnych, korzystając z wyrażenia (1.11b).

Opracowanie sprawozdania

1. Na podstawie wyznaczonych w ćwiczeniu charakterystyk stanu jałowego, zwarcia i obciążenia wyznaczyć współczynnik mocy stanu jałowego $\cos\varphi_0$, stanu zwarcia $\cos\varphi_k$, napięcie zwarcia, znamionową zmienność napięcia δU , straty jałowe i obciążeniowe, przekładnię transformatora oraz sprawność maksymalną η_{\max} .
2. Na podstawie wyników z pomiarów wyznaczyć wartości parametrów układu zastępczego, wykreślić wykres wskazowy dla znamionowego stanu pracy.

Pytania i zadania kontrolne

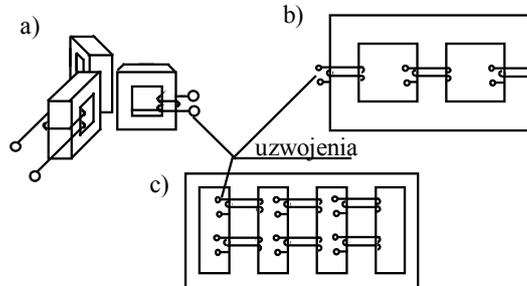
1. Uzasadnic kształt charakterystyk stanu jałowego i zwarcia transformatora.
2. Naszkicowac przebieg czasowy prądu magnesującego oraz podac przyczyny powstawania wyższych harmonicznych.
3. Omowic zależność poszczególnych strat w transformatorze od częstotliwości i napięcia zasilania.
4. Podac sposób wyznaczania parametrów układu zastępczego.
5. Transformator jednofazowy o mocy znamionowej $S_N = 440 \text{ VA}$ i przekładni 220/24 pobiera w stanie jałowym przy napięciu zasilania 110 V moc czynną o wartości 4 W oraz w stanie zwarcia przy prądzie strony pierwotnej równym 1 A – moc czynną o wartości 10 W. Obliczyć znamionową sprawność transformatora przy obciążeniu rezystancyjnym.
6. Dla transformatora jednofazowego podano: moc znamionowa $S_N = 1 \text{ kVA}$, przekładnię 220/110 V, straty jałowe $\Delta P_{\text{obc}} = 28 \text{ W}$, napięcie zwarcia $u_k = 4,5\%$, oraz prąd jałowy $I_{0N} = 0,11 \text{ A}$. Obliczyć parametry układu zastępczego.

Cwiczenie T2: Transformator 3 – fazowy

Wprowadzenie teoretyczne

Budowa i działanie

Do transformacji układów trójfazowych napięć i prądów stosuje się transformatory trójfazowe. Mogą być one złożone z trzech transformatorów jednofazowych lub budowane jako samodzielne jednostki o trzech lub pięciu kolumnach.



Rysunek 14 Transformator trójfazowy: a) złożony z trzech transformatorów 1 – fazowych, b) trójkolumnowy, c) pięciokolumnowy

Uzwojenie pierwotne górnego napięcia GN transformatora zasila się symetrycznym układem napięć trójfazowych \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C przesuniętych w czasie względem siebie o kąt $2\pi/3$. Strumienie magnetyczne poszczególnych transformatorów Φ_A , Φ_B , Φ_C są przesunięte w stosunku do napięcia danej fazy o kąt $\pi/2$ i tworzą także symetryczny układ trójfazowy. Wynika to ze związku zależności strumienia od napięcia go wywołującego $u(t) = d\Phi(t)/dt$. Jeśli przebieg $u(t)$ jest sinusoida, to przebieg $\Phi(t)$ jest cosinusoida. Pomiedzy strumieniami zachodzi związek $\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$.

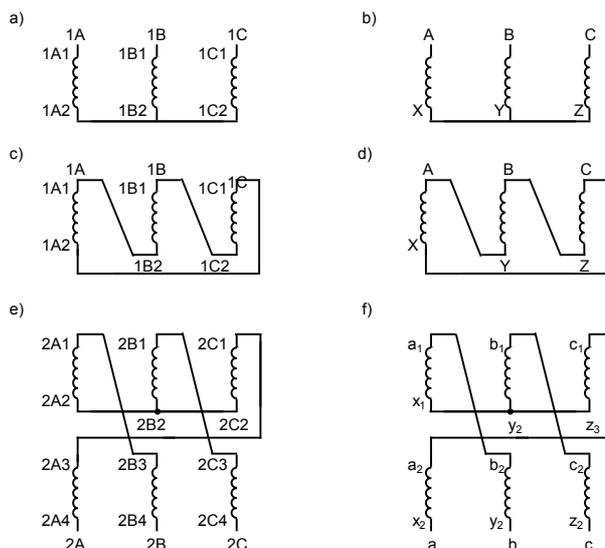
Kształt przebiegu strumienia magnetycznego i napięcia indukowanego w uzwojeniu wtornym (dolnego napięcia DN) transformatora trójfazowego zależy głównie od budowy rdzenia i materiału, z jakiego jest wykonany oraz od układu połączeń uzwojeń fazowych obu stron transformatora.

Układy i grupy połączeń transformatorów trójfazowych

Zgodnie z obowiązującą normą PN/75/E-81003 dotyczącą transformatorów mocy uzwojenia transformatora oznacza się dużymi literami A, B, C a punkt gwiazdowy litera N. Strony transformatora oznacza się liczbami arabskimi 1, 2, ... przed oznaczeniem literowym, przy czym liczba 1 odpowiada stronie górnego napięcia (GN), a następnymi liczbami naturalnymi oznacza się kolejne strony napięć od wyższych do niższych (DN). Liczba 1 za oznaczeniem literowym oznacza konce uzwojeń wyprowadzone na tabliczkę zaciskową, a liczba 2 – tworzące układ gwiazdowy lub zamykające trójkąt. Kolejnymi liczbami 3, 4, ... oznacza się wewnętrzne konce grup (sekcji) uzwojeń. Metode oznaczania zacisków w transformatorach trójfazowych przedstawiono poniżej (Rysunek 15).

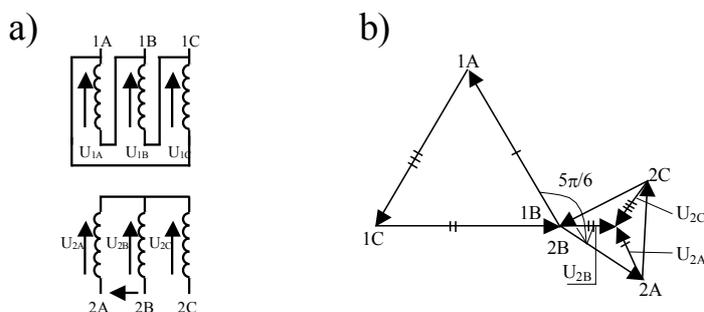
Zgodnie z PN – 76/E - 81003

Zgodnie z PN – 56/E - 81003



Rysunek 15 Układy połączeń transformatorów trójfazowych: a, b) gwiazda; c, d) trojkat; e, f) zygzak – stosuje się dla uzwojen DN

W zależności od sposobu połączenia obu uzwojen transformatora można otrzymać różne przesunięcia fazowe pomiędzy napięciami międzyprzewodowymi jednoimiennymi strony GN i DN (np. U_{1A1B} a U_{2A2B} , U_{1C1A} a U_{2C2A}). Dla każdego transformatora podaje się grupę połączeń, która zawiera symbol układu połączeń uzwojen oraz kąt przesunięcia fazowego liczony zgodnie z ruchem wskazówek zegara między napięciem międzyprzewodowym strony GN a odpowiadającym mu napięciem międzyprzewodowym strony DN. W układach gwiazda, trojkat, zygzak kąty przesunięcia fazowego są zawsze wielokrotnością kąta $\pi/6$ (30°), stąd wygodnie jest podawać jako tzw. kąty godzinowe – np. 5 oznacza przesunięcie fazowe o kąt $5\pi/6$ (150°), 8 oznacza przesunięcie o kąt $4\pi/3$ (240°). Uwaga: napięcia obu uzwojen na tych samych kolumnach są zawsze w fazie.



Rysunek 16 Graficzny sposób wyznaczenia przesunięcia godzinowego: a) układ połączeń transformatora, b) wykres wektorowy

Symbolicznie oznacza się Y, y – gwiazda; D, d – trojkat; z – zygzak. Powyższy układ (Rysunek 16) oznaczono Dy5 (duża litera – układ połączeń strony GN, mała litera – układ połączeń strony DN, liczba oznacza przesunięcie fazowe napięć między zaciskami tego samego typu w "godzinach").

Rozróżniamy następujące układy połączeń transformatorów trójfazowych:

- Yy, Dd, Dz – godziny parzyste,
- Yd, Dy, Yz – godziny nieparzyste.

Przekładnia zwojowa i napieciowa

Przekładnia napieciowa ϑ_n transformatora trójfazowego jest iloraz znamionowych napięć międzyprzewodowych strony GN U_1 i strony DN U_2 . Może to być wartość inna niż przekładnia zwojowa ϑ_z , określająca iloraz liczby zwojów, albo iloraz napięć fazowych strony GN i DN.

W zależności od układu połączeń uzwojen transformatora przekładnie napieciowa ϑ_n można wyrazić przez przekładnie zwojowa ϑ_z następująco:

$$\vartheta_n = k \cdot \vartheta_z \quad \text{gdzie} \quad \vartheta_z = \frac{w_1}{w_2} \quad \text{lub} \quad \vartheta_z = \frac{U_{f1}}{U_{f2}}$$

Wartości współczynników k dla różnych układów połączeń przedstawiono w tabl. 1.

Tabela 1

DN GN	k dla układu		
	d	y	z
D	1	$1/\sqrt{3}$	$2/3$
Y	$\sqrt{3}$	1	$2/\sqrt{3}$

Stan obciążenia transformatora (układ zastępczy)

W stanie ustalonym, w warunkach pełnej symetrii dla transformatora trójfazowego, stosuje się układ zastępczy transformatora jednofazowego, przy czym wielkości w nim występujące są wielkościami fazowymi. Korzystając z pomiaru w stanie jałowym i stanie zwarcia oraz z pomiaru rezystancji uzwojen prądem stałym, wyznacza się parametry układu zastępczego według zależności:

$$Z_{kf} = \frac{U_{kf}}{I_{kf}}, \quad R_{kf} = \frac{P_k}{3I_{kf}^2}, \quad X_{kf} = \sqrt{Z_{kf}^2 - R_{kf}^2},$$

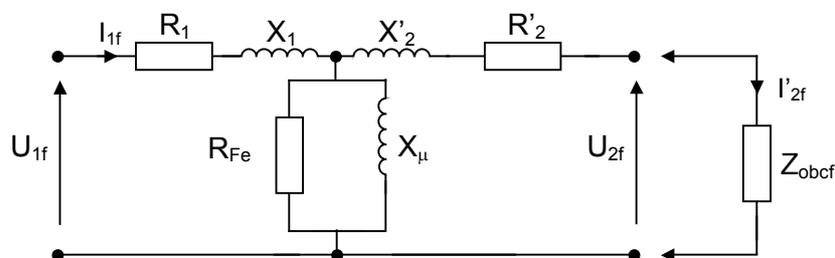
$$R_1 = \frac{m}{1+m} R_{kf}, \quad R_2' = \frac{R_{kf}}{1+m}, \quad R_{fe} = \frac{3U_{1fo}^2}{P_o},$$

$$X_{\mu} = \frac{U_{1fo}}{I_{\mu}}, \quad X_1 = X_2' = \frac{X_{kf}}{2}$$

gdzie:

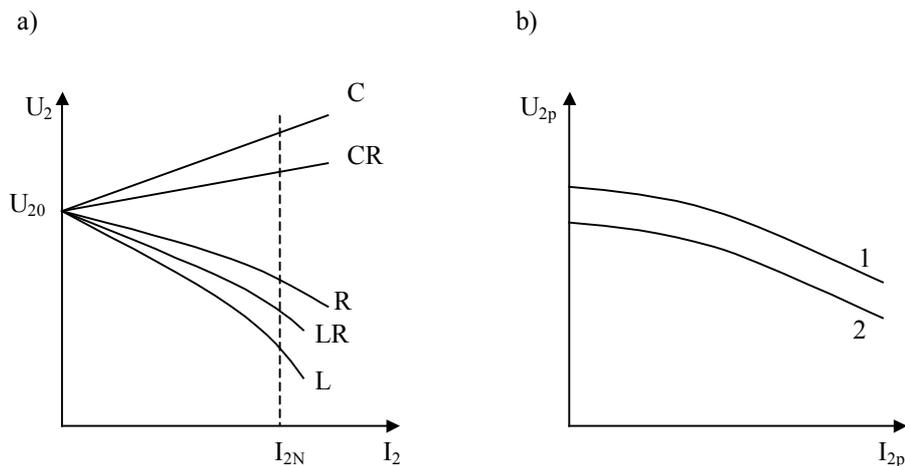
$$m = \frac{R_{1st}}{R_{2st} \vartheta_z^2}, \quad I_{Fe} = \frac{U_{1f}}{R_{Fe}}, \quad I_{\mu} = \sqrt{I_{of}^2 - I_{Fe}^2}, \quad \vartheta_z - \text{przekładnia zwojowa}$$

Indeks k – oznacza stan zwarcia, indeks 0 – stan jałowy, indeks f – wielkości fazowe. Uwaga – w oparciu o układ połączeń transformatora należy zwrócić uwagę na relacje pomiędzy wielkościami fazowymi a przewodowymi.



Rysunek 17 Układ zastępczy transformatora trójfazowego

Transformator trójfazowy może być obciążony odbiornikiem o charakterze rezystancyjnym, indukcyjnym, pojemnościowym lub mieszanym, a także innymi odbiornikami, np. prostownikiem. Stan obciążenia transformatora przedstawiają charakterystyki zewnętrzne – zależność napięcia po stronie odbioru energii obciążenia $U_2 = f(I_2)$ przy zachowaniu stałego współczynnika mocy $\cos\varphi_2$.



Rysunek 18 Charakterystyki zewnętrzne transformatora: a) obciążenie indukcyjne L, obciążenie pojemnościowe C, obciążenie rezystancyjne R, obciążenie mieszane CR, LR; b) prostownikowe: 1 – prostownik w układzie mostkowym, 2 – prostownik w układzie gwiazdowym

Przy zmianach obciążenia transformatora na zaciskach strony wtórnej występuje zmiana napięcia w wyniku spadków napięć na rezystancjach uzwojeń oraz reaktancjach rozproszonych. Do określenia zmian napięcia strony wtórnej używa się wielkości względnej δU zwanej zmiennością transformatora:

$$\delta U_{\%} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\%$$

gdzie:

U_{20} – napięcie stanu jałowego strony wtórnej,

U_2 – napięcie w danym stanie obciążenia.

Znamionowa zmienność napięcia, gdy U_2 jest mierzone dla $I_2 = I_{2N}$.

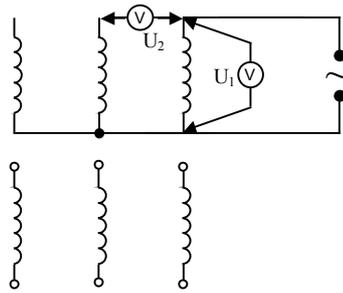
Badania laboratoryjne

Ogledziny zewnętrzne

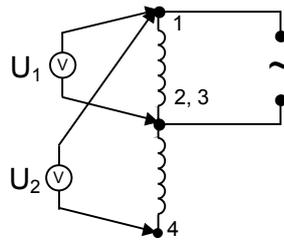
Budowa transformatora, rodzaje uzwojeń, układ połączeń, sposób chłodzenia, dane znamionowe, identyfikacja uzwojeń i sprawdzanie ciągłości, pomiar izolacji uzwojeń oraz izolacji uzwojenia – rdzeń.

Wyznaczenie początków i końców uzwojeń

Łączy się ze sobą po jednym zacisku każdej fazy GN i jedno z uzwojeń zasila się obniżonym napięciem przemiennym U_1 . Jeżeli napięcie U_2 między pozostałymi zaciskami jest większe od napięcia U_1 , to zwarte zostały zaciski jednoimienne, czyli wszystkie początki lub konce uzwojeń. W przypadku gdy $U_2 < U_1$, to zostały zwarte zaciski różnoimienne. Wyznaczenie początków i końców uzwojeń usytuowanych na tej samej kolumnie wykonuje się zasilając jedno z uzwojeń GN napięciem obniżonym. Największe z napięć strony DN wystąpi na uzwojeniu znajdującym się na tej samej kolumnie. Następnie należy połączyć po jednym zacisku uzwojenia stron GN i DN usytuowanych na tej samej kolumnie (Rysunek 20). Jeżeli napięcie U_2 zmierzone między wolnymi zaciskami tych uzwojeń jest większe od napięcia zasilania U_1 , to połączony został początek jednego uzwojenia z końcem drugiego; jeżeli natomiast jest mniejsze, to połączono zaciski jednoimienne. Pomiar ten przeprowadza się dla uzwojeń wszystkich trzech kolumn.



Rysunek 19 Układ połączeń do wyznaczenia początków i końców uzwojen



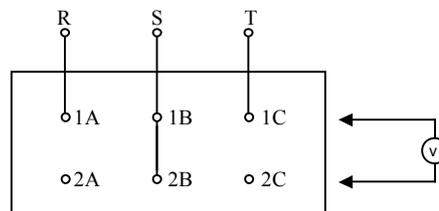
Rysunek 20 Układ połączeń do wyznaczenia początków i końców uzwojen usytuowanych na tej samej kolumnie

Pomiar przekładni znamionowej, transformatora

Pomiaru tego dokonuje się za pomocą mostka kompensacyjnego Kellera metoda Goldschmidta lub metoda bezpośredniego pomiaru woltmierzem napięć stron GN i DN. Pomiar może być wykonany przy obniżonym napięciu zasilania. Przy przekładniach $\vartheta_n > 10$ należy stosować metody mostkowe ze względu na niedokładność metody woltmierzowej w tym przypadku.

Wyznaczenie grupy połączeń transformatora

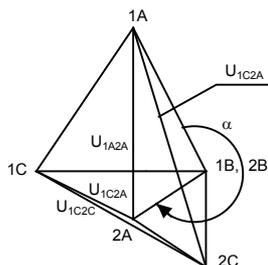
Na wyznaczenie grupy połączeń transformatora składa się określenie układu połączeń i kąta α przesunięcia "godzinowego" pomiędzy napięciem międzyprzewodowym strony GN a odpowiadającym mu napięciem strony DN. Praktycznie określenie grupy połączeń sprowadza się do wyznaczenia kąta α , przy posługiwaniu się różnymi metodami; z których najdogodniejsza wydaje się być metoda woltmierzowa. Zwykle w transformatorze są trzy (cztery) zaciski strony GN - 1A, 1B, 1C, (1N) i trzy (cztery) zaciski strony DN - 2A, 2B, 2C, (2N). Podczas pomiaru trójfazowy układ sinusoidalnych napięć zasilających winien być symetryczny. Należy zewrzeć dowolną, odpowiadającą sobie oznaczeniem literowym, parę zacisków strony GN i DN (np. zaciski 1B i 2B - Rysunek 21). Po włączeniu zasilania transformatora należy zmierzyć napięcia międzyprzewodowe U_{1A1B} , U_{1A1C} , U_{1B1C} , U_{2A2B} , U_{2A2C} , U_{2B2C} i napięcia boczne U_{1A2A} , U_{1C2C} oraz napięcia przekątne U_{1A2C} , U_{1C2A} . Jeżeli znana jest przekładnia napięciowa, pomiaru napięć strony DN można zaniechać i napięcia te wyliczyć rachunkowo.



Rysunek 21 Układ do wyznaczenia grupy połączeń transformatora trójfazowego

Znając wyżej wymienione napięcia przystępuje się do geometrycznego konstruowania wykresu topograficznego napięć międzyprzewodowych stron GN i DN (Rysunek 22). Rysuje się kolejno w odpowiedniej skali trójkąt napięć $1A1B1C$. Następnie cyrklem zakresła się łuki promieniami U_{1A2C} i U_{1C2C} , co daje w punkcie przecięcia zacisk 2C oraz zakresła się łuki

promieniami U_{1C2A} i U_{1A2A} , które daje w przecięciu zacisk 2A. Zacisk 2B jest zgodny z zaciskiem 1B i w ten sposób otrzymuje się trójkąt napięć 2A2B2C.



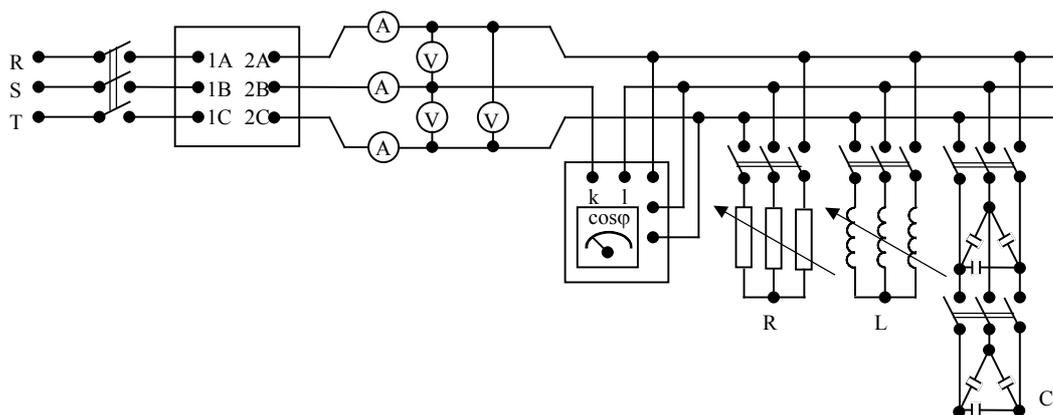
Rysunek 22 Konstrukcja wykresu topograficznego

Pozostaje jeszcze sprawdzenie prawoskrotnego obiegu zacisków stanowiących wierzchołki obu trójkątów (wektory napięć wirują lewoskrotnie) i czy długości boków wyznaczonych trójkątów odpowiadają zmierzonym napięciom międzyprzewodowym.

Szukany kąt godzinowy α mierzy się na przykład pomiędzy odcinkiem 1A1B a odcinkiem 2A2B w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara (prawoskrotnie). Po podzieleniu zmierzonego np. w stopniach kąta α przez 30° otrzymuje się kąt w "godzinach".

Wyznaczenie charakterystyki zewnętrznej

Należy połączyć układ pomiarowy wg schematu (Rysunek 23).

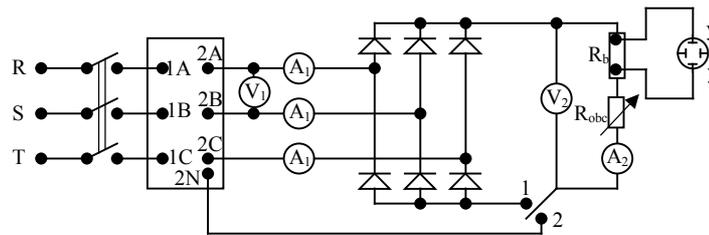


Rysunek 23 Układ pomiarowy do wyznaczenia charakterystyki zewnętrznej transformatora trójfazowego przy obciążeniu rezystancyjnym, indukcyjnym, pojemnościowym i mieszanym.

Pomiary do charakterystyki zewnętrznej rozpoczyna się od stanu jałowego transformatora, a następnie w miarę zwiększania obciążenia podaje się prąd obciążenia I_2 i napięcie międzyprzewodowe (fazowe) U_2 na zaciskach wtórnych, zachowując podczas pomiaru stały współczynnik mocy $\cos\varphi_2$. Obciążenie powinno być symetryczne, a prąd obciążenia I_2 należy zmieniać od wartości 0 do $I_2 = 1,1 I_{2N}$. Obciążenie rezystancyjne mogą stanowić trzy sprzężone rezystory, obciążeniem indukcyjnym może być stojan silnika indukcyjnego pierścieniowego z wysuwany wirnikiem, natomiast obciążenie pojemnościowe stanowią baterie kondensatorów trójfazowych włączane równolegle na zaciski transformatora.

Obciążenie prostownikowe transformatora trójfazowego

Należy połączyć układ pomiarowy wg poniższego schematu (Rysunek 24).



Rysunek 24 Układ do pomiaru obciążenia prostownikowego

W położeniu 1 przełącznika W transformator jest obciążony prostownikiem w układzie mostkowym, natomiast w położeniu 2 prostownikiem w układzie gwiazdowym. Obciążenie reguluje się rezystancją R_{obc} , odczytując napięcie i prąd przewodowy transformatora po stronie DN oraz napięcie i prąd obciążenia prostownika. Obserwacji prądu wyprostowanego dokonuje się za pomocą oscyloskopu (monitora), włączając wejście y-y na zaciski amperomierza A_2 lub specjalnego bocznika R_b włączonego szeregowo z obciążeniem prostownika.

A_1, V_1 - przyrządy elektromagnetyczne lub elektrodynamiczne,
 A_2, V_2 - przyrządy magnetoelektryczne.

Obserwacja na oscyloskopie przebiegu prądu magnesującego transformatora 3-kolumnowego i 5-kolumnowego

W zależności od układu połączeń strony GN transformatora sygnał prądu zdejmuje się z bocznika pomiarowego włączonego w przewód zasilający transformatora lub w obwód trójkąta strony GN.

Pytania i zadania kontrolne

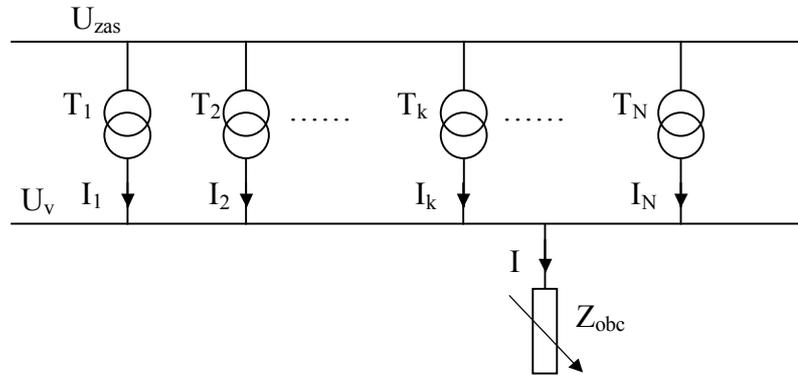
1. Dany jest transformator o grupie połączeń Dy5. Moc znamionowa $S_N = 480 \text{ VA}$, napięcie znamionowe $U_N = 220 \text{ V}$, przekładnia napięciowa $\vartheta_u = 9$. Obliczyć prądy znamionowe przewodowe stron GN i DN oraz przekładnie zwojowa.
2. Budowa, zasada działania i cechy charakterystyczne transformatora 3-kolumnowego i 5-kolumnowego.
3. Narysować, układy połączeń Dy5, Yd11, Dd4, Yy10, Dz8, Yz7.
4. Zasada wyznaczania przekładni napięciowej kompensatorem Kellera.
5. Znamionowa zmienność napięcia.
6. Wartość skuteczna, wartość średnia, współczynnik kształtu przebiegu wielkości elektrycznej w funkcji czasu.
7. Narysować układ połączeń 3-fazowego prostownika w układzie gwiazdowym i mostkowym oraz określić kolejność przewodzenia poszczególnych diod przy wymuszeniu 3-fazowym sinusoidalnym. Wyznaczyć zależności pomiędzy wartością skuteczną i średnią napięcia wyprostowanego a napięciem przewodowym zasilającym.

Cwiczenie T3: Praca równoległa transformatorów

Wprowadzenie teoretyczne

Przetwarzanie energii w układzie pracy równoległej

Praca równoległa transformatorów jest pracą kilku transformatorów, których uzwojenia pierwotne zasilane są ze wspólnej sieci, a uzwojenia wtórne przyłączone do wspólnych szyn zasilających odbiorniki (Rysunek 25).



Rysunek 25 Grupa transformatorów w układzie pracy równoległej

Układ transformatorów połączonych równolegle pozwala stosować jednostki o mniejszych mocach znamionowych, przy zachowaniu wymaganej mocy całego układu transformacji. Poszczególne transformatory mogą być załączane lub wyłączane w miarę zapotrzebowania na moc przez odbiorniki.

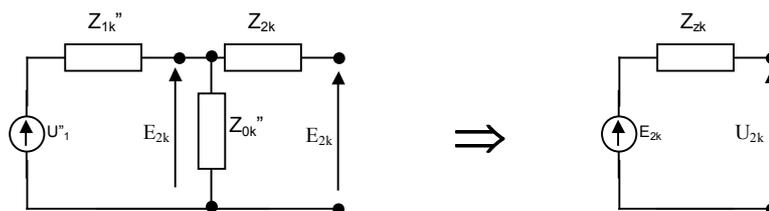
Napięcie indukowane w uzwojeniu wtórnym k-tego transformatora E_{2k} (Rysunek 26) wynosi:

$$E_{2k} = U_{zas} \frac{1}{g_k} k_T \quad (1.1)$$

gdzie:

$$k_T = \frac{Z_{ok}}{Z_{1k} + Z_{ok}} - \text{współczynnik Thevenina} \quad (1.2)$$

Sprowadzając parametry obwodu pierwotnego na obwód wtórny, układ zastępczy k-tego transformatora można przedstawić w postaci dwojnika aktywnego (Rysunek 26).

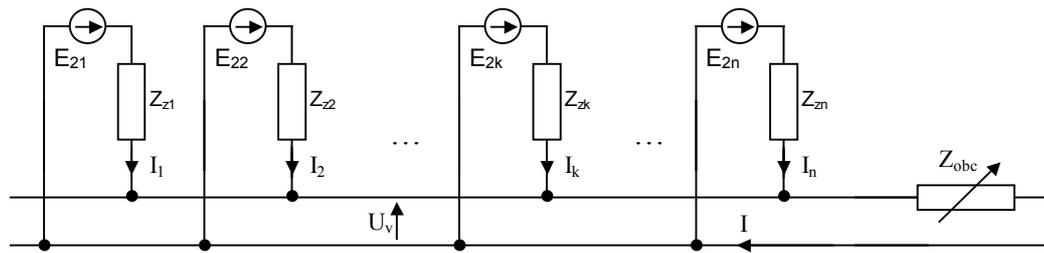


Rysunek 26 Przekształcenie układu zastępczego fazy transformatora do postaci dwojnika aktywnego

Z_{zk} oznacza impedancję zwarcia k-tego transformatora sprowadzoną do obwodu wtórnego i wynosi:

$$Z_{zk} = Z_{2k} + \frac{Z_{1k}^* Z_{ok}^*}{Z_{1k} + Z_{ok}^*} = Z_{2k} + Z_{1k}^* k_T = R_{zk} + jX_{zk} \quad (1.3)$$

Korzystając z podanego wyżej przekształcenia, układ transformatora (Rysunek 25) można przedstawić w postaci jak poniżej (Rysunek 27).



Rysunek 27 Układ transformatorów połączonych równolegle (po przekształceniu układu zastępczego)

Napiecia na zaciskach uzwojen wtórnych transformatorów w układzie pracy równoległej są jednakowe. Możemy więc zapisać:

$$U_v = E_{21} - I_1 Z_{z1} = E_{22} - I_2 Z_{z2} = \dots = E_{2n} - I_n Z_{zn} \quad (1.4)$$

Prąd obciążenia "I" jest sumą prądów transformatorów i jest równy sumie prądów odbiorców:

$$I = \sum_{k=1}^n \frac{E_{2k} - U_v}{Z_{zk}} \quad (1.5a)$$

oraz:

$$I = \frac{U_v}{Z_{obc}} \quad (1.5b)$$

Korzystając z wyrażen (1.5a) i (1.5b) możemy wyznaczyć napięcie na zaciskach szyn odbiorczych:

$$U_v = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{E_{2k}}{Z_{zk}}}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{Z_{zk}} + \frac{1}{Z_{obc}}} \quad (1.6a)$$

W przypadku dwóch transformatorów pracujących równoległe ($n = 2$):

$$U_v = \frac{\frac{E_{21}}{Z_{z1}} + \frac{E_{22}}{Z_{z2}}}{\frac{1}{Z_{z1}} + \frac{1}{Z_{z2}} + \frac{1}{Z_{obc}}} \quad (1.6b)$$

Prąd obciążenia można określić na podstawie wyrażenia:

$$I = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{E_{2k}}{Z_{zk}}}{1 + Z_{obc} \sum_{k=1}^n \frac{1}{Z_{zk}}} \quad (1.7a)$$

Dla dwóch transformatorów:

$$I = \frac{\frac{E_{21}}{Z_{z1}} + \frac{E_{22}}{Z_{z2}}}{1 + Z_{obc} \left(\frac{1}{Z_{z1}} + \frac{1}{Z_{z2}} \right)} \quad (1.7b)$$

W stanie jałowym napięcie na zaciskach szyn odbiorczych wynosi:

$$U_{vo} = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{E_{2k}}{Z_{zk}}}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{Z_{zk}}} \quad (1.6c)$$

Warunki pracy równoległej

W stanie jałowym ($Z_{obc} = \infty, I = 0$) prądy I_1, I_2, \dots, I_n są tzw. prądami wyrównawczymi, płynącymi w obwodach wtórnych transformatorów. Aby te prądy były równe zero, napięcia

na zaciskach uzwojen wtórnych powinny być jednakowe:

$$E_{21} = E_{22} = \dots = E_{2n} \quad (1.8)$$

Warunek niewystępowania prądów wyrównawczych sprowadza się do warunku równości przekładni napięciowych:

$$\vartheta_1 = \vartheta_2 = \dots = \vartheta_n \quad (1.9)$$

Jeżeli warunek ten nie jest spełniony, to w obwodach wtórnych płynie pewien prąd wyrównawczy. Wartość tego prądu determinowana jest wielkością różnicy napięć wtórnych oraz sumaryczną impedancją zwarcia. Jeżeli napięcie indukowane E_{2k} w uzwojeniu wtórnym k -tego transformatora jest większe od analogicznych napięć pozostałych transformatorów to przez uzwojenie wtórne tego transformatora popłynie prąd wyrównawczy równy:

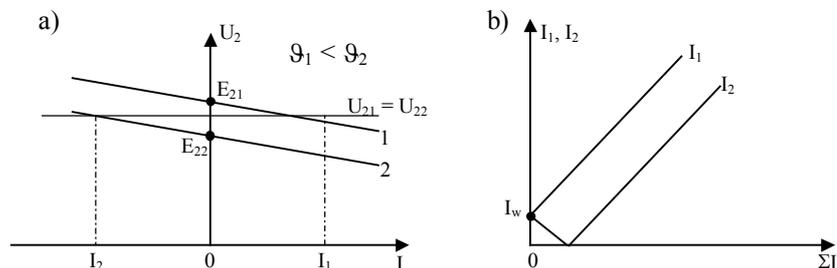
$$I_{wk} = \frac{E_{2k} \sum_{l=1, l \neq k}^n \frac{1}{Z_{z1l}} - \sum_{l=1, l \neq k}^n \frac{E_{2l}}{Z_{z1l}}}{1 + Z_{zk} \sum_{l=1, l \neq k}^n \frac{1}{Z_{zk}}} \quad (1.10)$$

W przypadku dwóch transformatorów:

$$I_w = \frac{E_{21} - E_{22}}{Z_{z1} - Z_{z2}} \quad (1.10 a)$$

Prąd wyrównawczy płynie niezależnie od prądu obciążenia. Może się zdarzyć, że dla pewnej wartości Z_{obc} prąd jednego z transformatorów (o przekładni napięciowej większej od przekładni pozostałych transformatorów) będzie równy zero, natomiast pozostałe transformatory przejmą całkowite obciążenie (Rysunek 28a,b). Warunek równości przekładni jest tzw. pierwszym warunkiem poprawnej pracy równoległej. Według PN-69/E-06040 przekładnie transformatorów przeznaczonych do pracy równoległej nie mogą się różnić więcej niż o 0,5% przekładni znamionowej. Korzystając z warunku równości przekładni i wyrażenia (1.4) możemy napisać:

$$Z_{z1}I_1 = Z_{z2}I_2 = \dots = Z_{zn}I_n \quad (1.11)$$



Rysunek 28 a) praca równoległa dwóch transformatorów przy różnych przekładniach (prąd obciążenia równy zero), b) rozkład prądów transformatorów o różnych przekładniach

Prądy I_1, I_2, \dots, I_n są proporcjonalne do mocy obciążenia S_1, S_2, \dots, S_n , poszczególnych transformatorów, czyli

$$S_1 : S_2 : S_3 : \dots : S_n = \frac{1}{Z_{z1}} : \frac{1}{Z_{z2}} : \frac{1}{Z_{z3}} : \dots : \frac{1}{Z_{zn}} \quad (1.12)$$

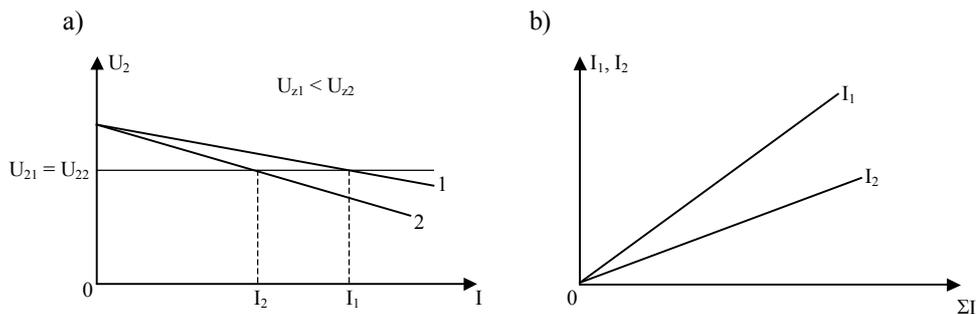
Napięcie zwarcia U_{zk} jest wprost proporcjonalne do impedancji zwarcia Z_{zk} transformatora:

$$U_{zk} = \frac{S_{Nk}}{U_N} Z_{zk} \quad (1.13)$$

Na podstawie (1.12) i (1.13) można zapisać:

$$S_1 : S_2 : \dots : S_n = \frac{S_{N1}}{U_{z1}} : \frac{S_{N2}}{U_{z2}} : \dots : \frac{S_{Nn}}{U_{zn}} \quad (1.14)$$

Wynika stąd, że transformatory będą obciążane proporcjonalnie do swoich mocy znamionowych, jeżeli napięcia zwarcia transformatorów będą jednakowe (drugi warunek poprawnej pracy równoległej). Jeżeli do pracy równoległej zastosowano transformatory o różnych napięciach zwarcia, to bardziej będą obciążone transformatory o mniejszych napięciach zwarcia (Rysunek 29a, b).



Rysunek 29 a) praca równoległa transformatorów o różnych napięciach zwarcia, b) rozkład prądów transformatorów

Norma PN-69/E - 06040 dopuszcza odchyłkę $\pm 10\%$ średniej wartości napięcia zwarcia. Wyrażenie (1.11), wynikające z warunku równości przekładni możemy zapisać w postaci:

$$I_1 |Z_{z1}| e^{j\varphi_{z1}} = I_2 |Z_{z2}| e^{j\varphi_{z2}} = \dots = I_n |Z_{zn}| e^{j\varphi_{zn}} \quad (1.15)$$

gdzie: $|Z_{zk}|$ - moduł impedancji zwarciowej,

φ_{zk} - argument impedancji zwarciowej.

Prądy obciążenia transformatorów I_1, I_2, \dots, I_n będą ze sobą w fazie (trzeci warunek poprawnej pracy równoległej), jeżeli:

$$\arg(Z_1) = \arg(Z_2) = \dots = \arg(Z_n) \quad (1.16)$$

co jest równoważne warunkowi:

$$\cos \varphi_{z1} = \cos \varphi_{z2} = \dots = \cos \varphi_{zn} \quad (1.16a)$$

lub:

$$\frac{X_{z1}}{R_{z1}} = \frac{X_{z2}}{R_{z2}} = \dots = \frac{X_{zn}}{R_{zn}} \quad (1.16b)$$

Wartość współczynnika mocy zależy od wielkości transformatora. Ze wzrostem mocy znamionowej rośnie względna wartość reaktancji zwarciowej względna wartość rezystancji zwarciowej pozostaje prawie stała; zatem w praktyce pokrywanie się prądów w fazie można uzyskać wówczas, gdy stosunek mocy znamionowych transformatorów nie jest większy od stosunku 1/3. Niewłaściwe podłączenie transformatorów do szyn zasilających odbiorniki może spowodować wystąpienie prądów zwarcia.

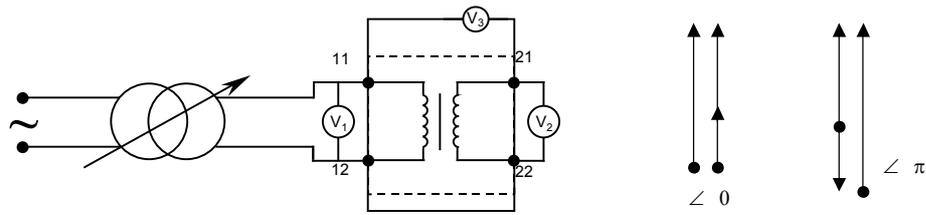
Badania laboratoryjne

Badania wstępne

Należy sprawdzić czy badany transformator nie posiada uszkodzeń mechanicznych, trzeba też sprawdzić prawidłowość wyprowadzenia końców uzwojeń. Należy dokonać kontroli stanu izolacji uzwojenie pierwotne - uzwojenie wtórne, uzwojenie pierwotne - rdzeń, uzwojenie wtórne - rdzeń za pomocą megaomierza indukcyjnego oraz sprawdzić ciągłość uzwojeń. Z danych znamionowych należy wyznaczyć znamionowe prądy uzwojenia pierwotnego i wtórnoego.

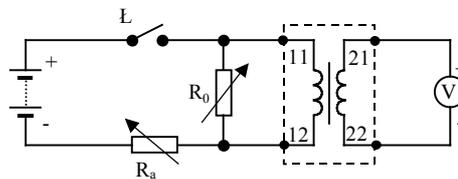
Wyznaczenie początków i końców uzwojeń

Zaciski transformatorów jednofazowych oznacza się liczbami 11 - 12 po stronie górnego napięcia i 21- 22 po stronie dolnego napięcia. Kąt przesunięcia fazowego wskazów napięcia górnego względem dolnego może wynosić "0" lub " π ", przy czym za normalny stosowany jest kąt równy zero. Dla sprawdzenia prawidłowości oznaczeń można przeprowadzić próbę dwiema metodami: woltomierzowa i impulsów prądu stałego. Metoda woltomierzowa polega na zasilaniu uzwojenia 11-12 napięciem przemiennym oraz pomiarze napięć U_1, U_2, U_3 (zaciski 12 i 22 zwarte) - Rysunek 30. Kąt przesunięcia wskazów napięć będzie równy "0", jeżeli napięcie U_1 będzie sumą napięć U_2 i U_3 .



Rysunek 30 Wyznaczenie kąta przesunięcia fazowego metoda woltmierzowa

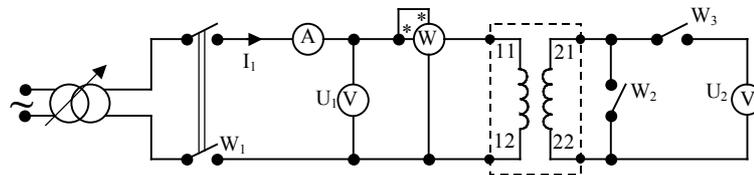
Stosując metodę impulsów prądu stałego, załącza się źródło napięcia stałego biegunem "+" do zacisku 11, a do zacisków 21-22 należy podpiąć woltmierz magnetoelektryczny (z zerem pośrodku skali). Jeżeli w chwili zamknięcia łącznika "Ł" w obwodzie prądu stałego woltmierz wychyli się w prawo, to zacisk "+" woltmierza przyłączony jest do zacisku 21 uzwojenia wtórnego. Przy wyłączeniu prądu wychylenie woltmierza jest przeciwne. Dla zabezpieczenia woltmierza probe należy zacząć przy maksymalnej wartości R_a i minimalnej R_b (Rysunek 31).



Rysunek 31 Układ do wyznaczania kąta przesunięcia fazowego metody impulsów prądu stałego

Wyznaczenie przekładni

W stanie jałowym transformatora (Rysunek 32 - łącznik W2 otwarty, W3 zamknięty) należy zmierzyć napięcie na zaciskach uzwojenia wtórnego przy napięciu zasilania $U_1 = U_{1N}$.



Rysunek 32 Układ pomiarowy do wyznaczenia przekładni, napięcia zwarcia oraz rezystancji zwarciowej

Przekładnia transformatora wynosi:

$$g = \frac{U_{1N}}{U_{20}}$$

Należy sprawdzić czy wyznaczone przekładnie mieszczą się w granicach tolerancji (0,5 % przekładni znamionowej).

Pomiar napięcia zwarcia oraz wyznaczenie rezystancji i impedancji zwarciowej

W stanie zwarcia transformatora (Rysunek 32 - łącznik W2 zamknięty) należy zmierzyć napięcie po stronie pierwotnej oraz moc czynną pobrana przez transformator, przy znamionowym prądzie strony pierwotnej. Napięcie na zaciskach uzwojenia pierwotnego jest napięciem zwarcia transformatora. Znajac napięcie zwarcia U_z , prąd znamionowy I_N i moc pobrana P_z w stanie zwarcia można wyznaczyć impedancję zwarciowa:

$$Z_z = \frac{U_z}{I_N}$$

oraz rezystancję zwarciowa:

$$R_z = \frac{P_z}{I_N^2}$$

Należy sprawdzić, czy odchyłki napięć zwarcia mieszczą się w granicach tolerancji oraz czy prądy transformatorów są w fazie.

Wyznaczenie rozkładu prądów transformatorów w układzie pracy równoległej

W układzie pracy równoległej przy załączonych odbiornikach należy wyznaczyć przebiegi prądów poszczególnych transformatorów w funkcji prądu obciążenia:

a) dla transformatorów o różnych przekładniach:

$$I_1, I_2 = f(I)$$

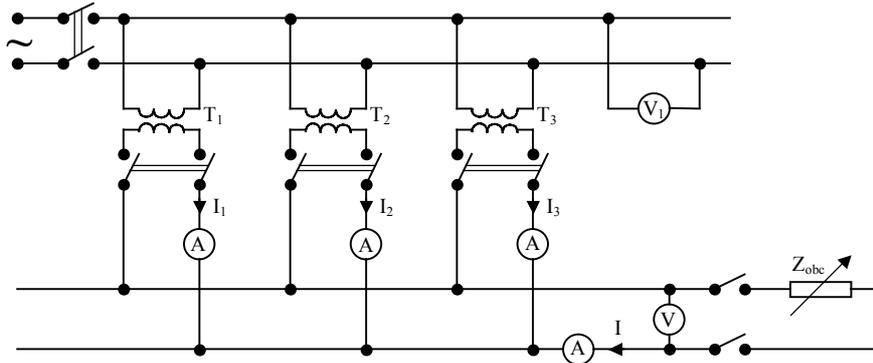
b) dla transformatorów o różnych napięciach zwarcia:

$$I_1, I_3 = f(I)$$

c) dla trzech transformatorów pracujących na wspólne obciążenie

$$I_1, I_2, I_3 = f(I)$$

Układ pomiarowy przedstawiono poniżej (Rysunek 33).



Rysunek 33 Układ do wyznaczania rozkładu prądów transformatorów w układzie pracy równoległej

Pytania i zadania kontrolne

1. Warunki poprawnej pracy równoległej.
2. Skutki podłączenia do pracy równoległej transformatorów o różnych: a) przekładniach, b) napięciach zwarcia.
3. Obciążenie 500 kVA rozkłada się na dwa transformatory pracujące równolegle o równych mocach znamionowych $S_{N1} = S_{N2} = 250$ kVA, ale o różnych napięciach zwarciovych: $U_{z1} = 7,0\%$ $U_{z2} = 4,0\%$. Wyznaczyć obciążenie każdego z transformatorów.

Cwiczenie A1: Silnik indukcyjny pierścieniowy

Wprowadzenie teoretyczne

Zarys budowy i zasada działania

Silnik indukcyjny pierścieniowy jest maszyną prądu przemiennego, w której złobkach wirnika umieszczone jest uzwojenie o liczbie faz i biegunów takiej samej jak w stojanie. Koncówki połączonego w gwiazde uzwojenia wirnika przyłączone są do pierścieni ślizgowych wirujących razem z wirnikiem i stąd przez szczotki wyprowadzone do tabliczki zaciskowej. Istnieje zatem możliwość włączenia w obwód wirnika zewnętrznej impedancji. Prędkość obrotowa pierwszej harmonicznej indukcji pola magnetycznego wirującego, wytworzonego w stojaniu, wynosi:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

gdzie:

f_1 – częstotliwość napięcia zasilającego,
 p – liczba par biegunów stojana

n_1 jest zwana prędkością synchroniczną. Prędkość synchroniczna katowa określa zależność:

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$$

Strumień wirujący indukuje napięcia:

- w stojaniu

$$E_s = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{u1}$$

- w wirniku

$$E_{w0} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot k_{u2}$$

gdzie:

$w_1(w_2)$ – liczba zwojów fazy stojana /wirnika/,
 $k_{u1}(k_{u2})$ – współczynnik uzwojenia stojana /wirnika/.
 Wielkość

$$g_u = \frac{E_s}{E_{w0}} = \frac{w_1}{w_2} \cdot \frac{k_{u1}}{k_{u2}}$$

zwana jest przekładnią napięciową.

Jeżeli obwód wirnika jest zamknięty, pod wpływem napięcia wydrukowanego w wirniku płynie prąd, a wywołany prąd strumień – współdziałając ze strumieniem stojana – wytwarza moment obrotowy.

Przy prędkości wirnika ω pole wiruje względem wirnika z prędkością:

$$\omega_2 = \omega_1 - \omega$$

Wielkość:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}$$

nazywamy poślizgiem.

Częstotliwość napięcia w wirniku określa zależność:

$$f_2 = \frac{p \cdot \omega_2}{2\pi} = f_1 \cdot s$$

Napiecie indukowane w wirniku przy jego predkosci ω wynosi:

$$E_w = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot k_{u2} = E_{w0} \cdot s$$

Oprocz strumienia głównego Φ w silniku występują także strumienie rozproszenia Φ_{δ_s} i Φ_{δ_w} , skojarzone jedynie z uzwojeniami odpowiednio stojana i wirnika. Indukują one napięcia, które związac można z prądami stojana i wirnika za pomocą reaktancji rozproszenia:

$$E_{\delta_s} = j \cdot X_{\delta_s} \cdot I_s$$

$$E_{\delta_w} = j \cdot X_{\delta_w} \cdot I_w$$

Wielkosc

$$X_{\delta_{w0}} = \frac{X_{\delta_w}}{s}$$

okresla reaktancje rozproszenia wirnika przy predkosci rownej zeru /wówczas $f_2=f_1/$.

Układ zastępczy silnika indukcyjnego pierścieniowego

Bilans napięć dla fazy stojana ma postać:

$$\underline{U}_s = \underline{E}_s + R_s \cdot \underline{I}_s + j \cdot X_{\delta_s} \cdot \underline{I}_w$$

zas dla fazy wirnika:

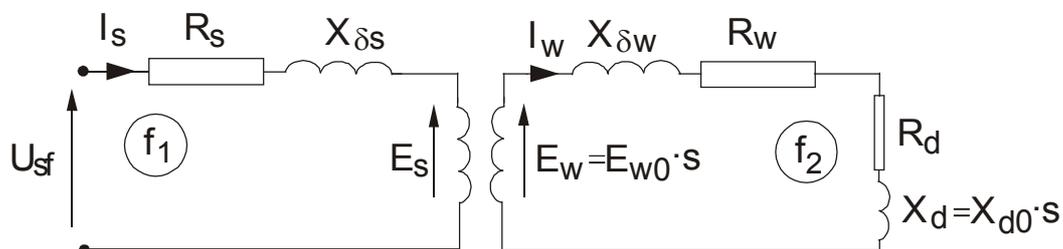
$$0 = \underline{E}_w - (R_w + R_d) \cdot \underline{I}_w - j \cdot (X_{\delta_s} + X_d) \cdot \underline{I}_w$$

gdzie:

$R_s(R_w)$ – rezystancja uzwojen stojana /wirnika/,

R_d, X_d – parametry dodatkowej impedancji włączanej w obwód wirnika.

Równania odpowiadają układowi zastępczemu wg poniższego rysunku (Rysunek 34).



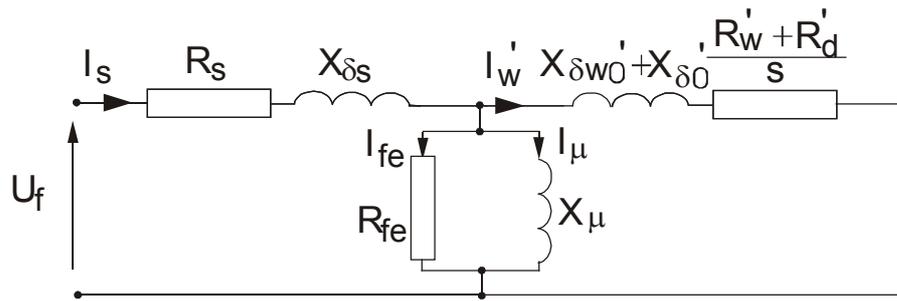
Rysunek 34 Układ zastępczy nieskojarzony silnika pierścieniowego

Po przeliczeniu parametrów wirnika na stronę stojana:

$$R'_w = R_w \cdot g_u^2 \quad R'_d = R_d \cdot g_u^2 \quad X'_{\delta_w} = X_{\delta_w} \cdot g_u^2$$

$$X'_d = X_d \cdot g_u^2 \quad I'_w = \frac{I_w}{g_u} \frac{m_2}{m_1} \quad E'_{w0} = E_{w0} \cdot g_u = E_s$$

oraz sprowadzeniu strony wirnika do częstotliwości f_1 , otrzymamy układ zastępczy w formie czwornika (Rysunek 35).

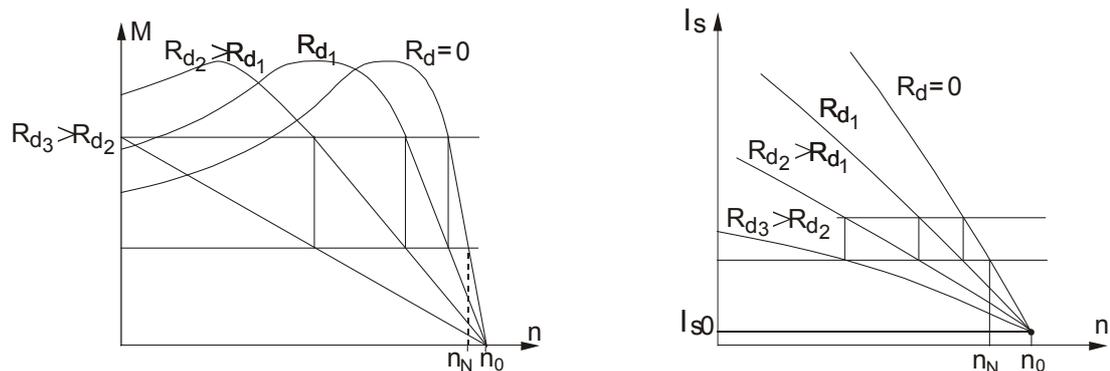


Rysunek 35 Układ zastępczy silnika pierścieniowego ze sprowadzoną stroną wtórna

Gałąź poprzeczna przedstawiono jako równoległy układ reaktancji X_{μ} odpowiadającej strumieniowi głównemu i rezystancji R_{fe} reprezentującej sumę strat w rdzeniu stojana i wirnika (pominięto straty mechaniczne).

Rozruch oporowy

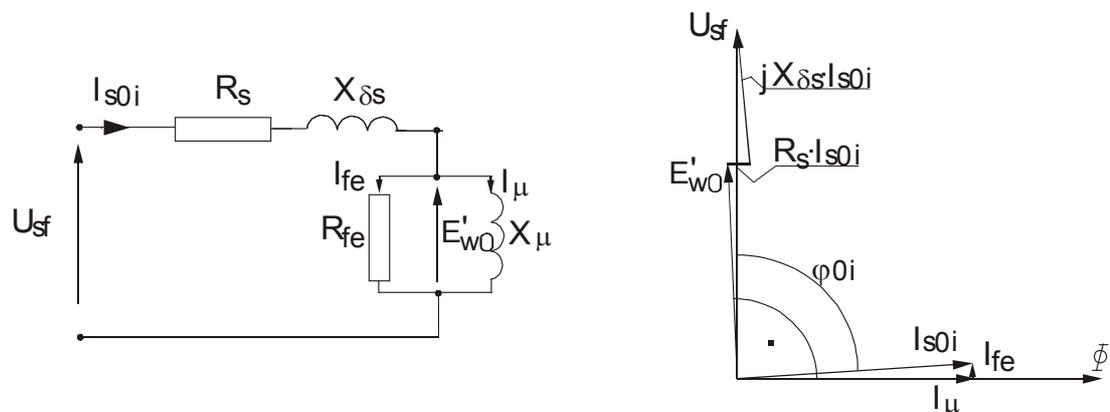
Rozruch silników pierścieniowych dokonuje się przez włączenie w obwód wirnika dodatkowej rezystancji m -fazowej i zmniejszanie jej wartości (ręcznie lub automatycznie) do zera w trakcie rozruchu. Zaletą tego rodzaju rozruchu jest wzrost momentu rozruchowego silnika przy jednoczesnym zmniejszaniu prądów rozruchowych. Charakterystyki rozruchowe przy skokowej zmianie R_d zostały przedstawione poniżej (Rysunek 36).



Rysunek 36 Charakterystyki rozruchowe $M(n)$ i $I_s(n)$ silnika pierścieniowego

Stany pracy transformatorowej

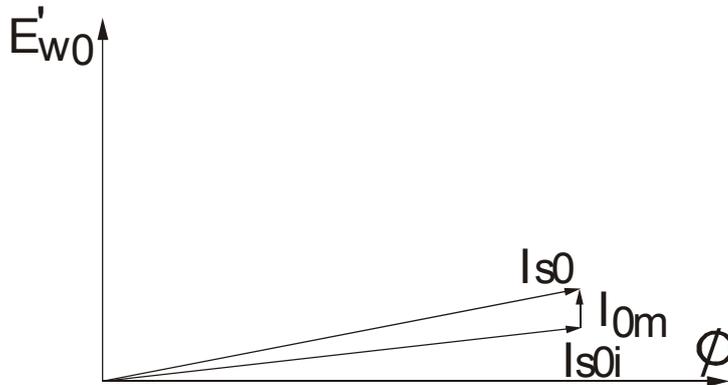
Z powyższym stanem pracy mamy do czynienia, gdy obwód wirnika jest rozarty ($R_d = \infty$, $s=1$). Poniżej przedstawiono układ zastępczy i wykres wskazowy silnika w tym stanie pracy.



Rysunek 37 Układ zastępczy i wykres wskazowy silnika w stanie pracy transformatorowej

Bieg jałowy

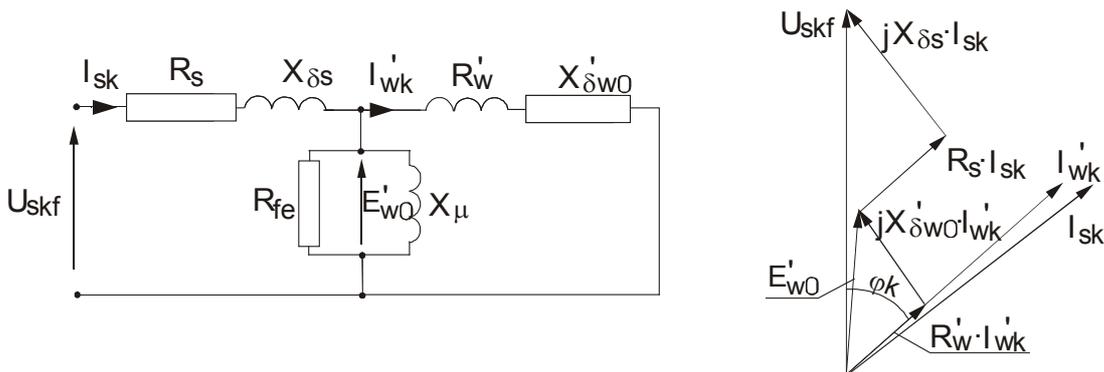
Gdy obwód wirnika jest zwarty na pierścieniach ($R_d=0$), a silnik nie jest obciążony momentem zewnętrznym, wirnik obraca się z prędkością bliską synchronicznej ($s=0$). Istnienie niewielkiej wartości poślizgu spowodowane jest koniecznością pokonania małym momentem strat mechanicznych silnika. Poniżej przedstawiono na wykresie wektorowym wpływ strat mechanicznych na prąd biegu jałowego.



Rysunek 38 Wpływ strat mechanicznych na prąd biegu jałowego

Stan zwarcia

Jest to stan pracy, w którym obwód wirnika jest elektrycznie zwarty, a sam wirnik mechanicznie zatrzymany ($s=1$). Poniżej przedstawiono układ zastępczy i wykres wektorowy w tym stanie pracy.



Rysunek 39 Układ zastępczy i wykres wskazowy stanu zwarcia

W praktyce można pominąć gałąź poprzeczna ze względu na jej bardzo dużą impedancję w porównaniu z gałęzią R'_w, X'_{w0} .

Stan obciążenia

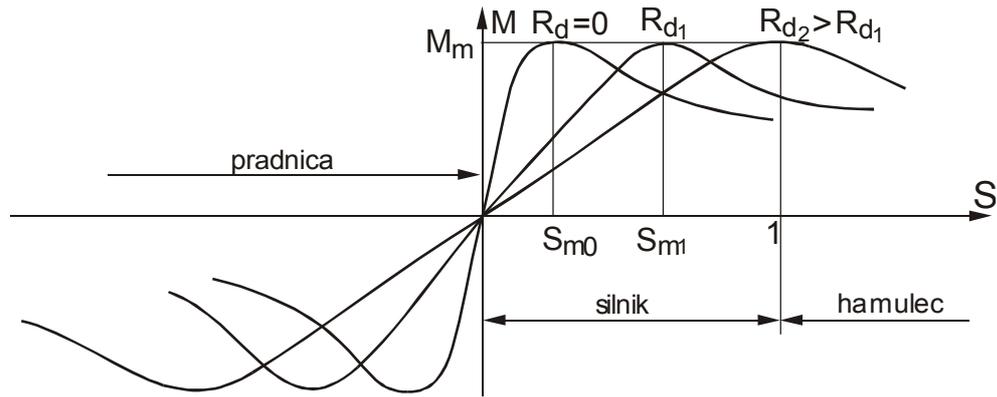
Funkcja opisująca charakterystykę $M=f(s)$ posiada postać:

$$M = \frac{m_1}{\omega_1} \frac{U_{sf}^2 \frac{R'_w + R'_d}{s}}{\left(R_s + c_1 \frac{R'_w + R'_d}{s} \right)^2 + \left[X_s + c_1 (X_{\delta w0} + X'_{d0}) \right]^2}$$

gdzie:

$$c_1 \cong 1 + \frac{X_{\delta s}}{X_{\mu}}$$

Na poniższym rysunku (Rysunek 40) przedstawiono rodzinę charakterystyk mechanicznych dla różnych rezystancji dodatkowych w wirniku.



Rysunek 40 Charakterystyki mechaniczne dla różnych rezystancji w obwodzie wirnika

Moment maksymalny i posłizg krytyczny określają zależności:

$$M_m = \pm \frac{m_1 U_{sf}^2}{2 \omega_1 c_1 \left[\pm R_s + \sqrt{R_s^2 + (X\delta_s + c_1 X\delta'_{w0})^2} \right]}$$

$$s_m = \pm \frac{c_1 R'_w + R'_d}{\sqrt{R_s^2 + (X\delta_s + c_1 X\delta'_{w0})^2}}$$

Zakładając rezystancje stojana jako pomijalnie mała, otrzymamy powyższe zależności w postaci:

$$M_m = \frac{m_1 U_{sf}^2}{2 \omega_1 X_k} \quad s_m \cong \pm \frac{R'_w + R'_d}{X_k}$$

gdzie: $X_k = X\delta_s + c_1 X\delta'_{w0} \cong X\delta_s + X\delta'_w$

Uprozczone równanie momentu:

$$M \cong \frac{2 M_m}{\frac{s_m}{s} + \frac{s}{s_m}}$$

jest zwane uproszczonym równaniem Klossa.

O stabilności charakterystyki mechanicznej decyduje wzajemne nachylenie krzywej momentu elektrycznego i krzywej momentu obciążenia. Warunkiem stabilności jest, aby:

$$\frac{dM_{el}}{ds} > \frac{dM_{obc}}{ds}$$

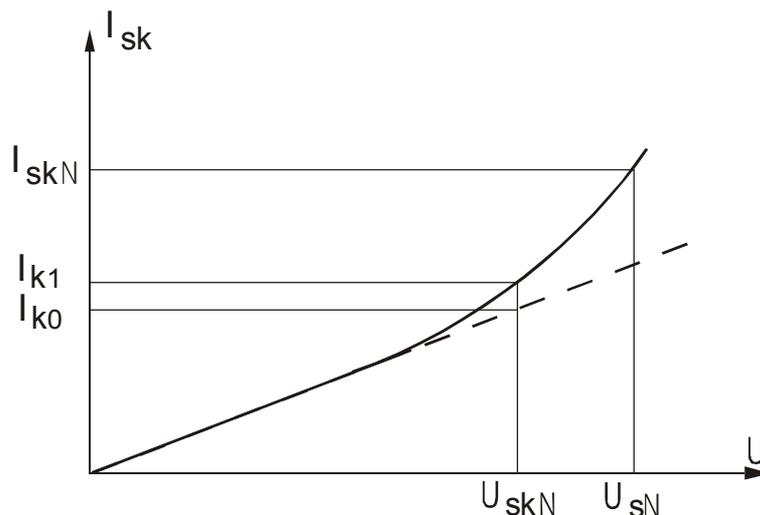
Dla $M_{obc} = \text{const.}$ stabilna jest część charakterystyki w zakresie $0 < s < s_m$.

Wykres kołowy

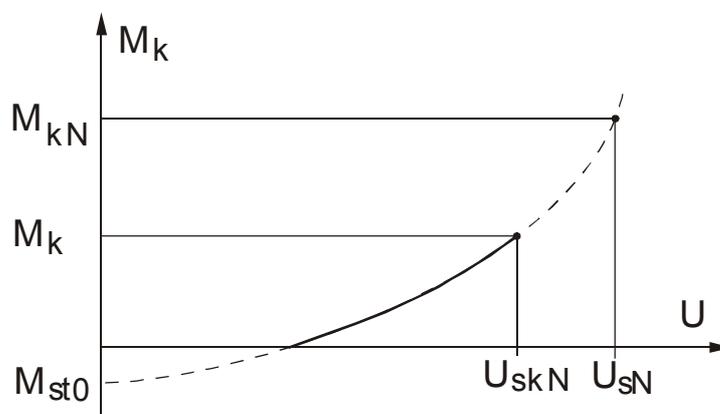
Konstrukcja wykresu kołowego, przedstawiającego ilościowo prąd stojana i wirnika, moment, posłizg oraz bilans mocy w dowolnym stanie pracy maszyny indukcyjnej, przeprowadzona jest w oparciu o pomiary poszczególnych stanów pracy silnika. Z pomiarów otrzymuje się następujące wielkości:

- stan pracy transformatorowej: U_{sN}, I_{0i}, P_{0i} ,
- stan biegu jałowego: U_{sN}, I_{s0}, P_0 ,
- stan zwarcia: $U_{skN}, I_{sk}, I_{sN}, P_k, M_k$.

Należy przeliczyć prąd, moc czynna i moment zwarcia na napięcie znamionowe. Prąd zwarcia rośnie początkowo liniowo z napięciem, a w miarę nasycania się obwodu magnetycznego strumieni rozproszenia $X\delta_s$ i $X\delta'_w$ maleją, pociągają za sobą szybszy wzrost prądu (Rysunek 41).



Rysunek 41 Charakterystyka $I_{sk}=f(U)$



Rysunek 42 Charakterystyka $M_k=f(U)$

Wartosc I_{skN} i P_{kN} przyblizaja ponizsze wzory:

$$I_{skN} \cong \frac{I_{k0}}{U_{skN}} U_{sN} + (I_{k1} - I_{k0}) \left(\frac{U_{sN}}{U_{skN}} \right)^{1,5}$$

$$P_{kN} = \left(\frac{I_{skN}}{I_{k1}} \right)^2 P_k$$

Wielkosc momentu zwarcia przy napieciu znamionowym okresla zaleznosc:

$$M_{kN} = (M_k + M_{st0}) \cdot \left(\frac{U_{sN}}{U_{skN}} \right)^2 - M_{st0}$$

gdzie: M_{st0} jest momentem spoczynkowym strat mechanicznych (Rysunek 42).

Na wykresie kołowym (Rysunek 43) odcinki l_{0i} i l_k oraz kąty:

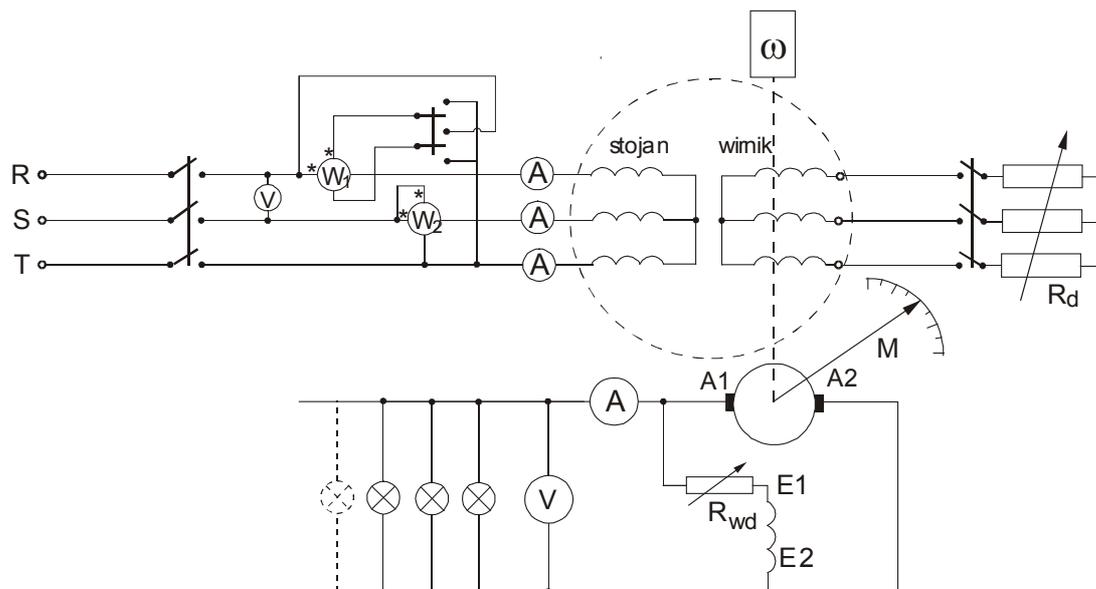
$$\varphi_{0i} = \arccos \frac{P_{0i}}{\sqrt{3} \cdot U_{sN} \cdot I_{0i}} \quad \varphi_k = \arccos \frac{P_{kN}}{\sqrt{3} \cdot U_{sN} \cdot I_{skN}}$$

okreslaja polozenie punktow A_0 i A_k . Srodek okregu /pkt.0/ lezy na symetrycznej odcinka A_0A_k wzniesiony o kat

$$\alpha = \arcsin \frac{2 \cdot I_0 \cdot R_s}{U_{sNf}}$$

ponad polprostą pozioma, wychodzaca z punktu A_0 .

Linia momentu /pola wirujacego/ przechodzi przez punkt N, wyznaczony z podziału odcinka A_kL w stosunku $A_kN : NL = R_s : R_w$,



Rysunek 44 Układ pomiarowy do badań silnika pierścieniowego

Pomiary stanu pracy transformatorowej wykonuje się przy rozwartym wirniku silnika ($I_w=0$, $M_{ei}=0$). Należy zmierzyć natężenie prądu I_{s0i} , moc czynną P_{oi} (metoda Arona), napięcie zasilania U_s oraz napięcie na rozwartym wirniku U_{w0} . Następnie zasilając wirnik napięciem U_w należy zmierzyć napięcie U_{s0} indukowane na rozwartym stojanie, przy czym U_w winno mieć taką wartość aby zachodziła zależność:

$$I_{w0i} = I_{s0i} \cdot \frac{U_{w0}}{U_s}$$

Wówczas obowiązuje zależność:

$$\vartheta_u = \frac{U_s + U_{s0}}{U_w + U_{w0}}$$

Można również obliczyć przekładnię jako średnia arytmetyczna ϑ_{u1} i ϑ_{u2} wyznaczonych przy zasilaniu stojana i wirnika:

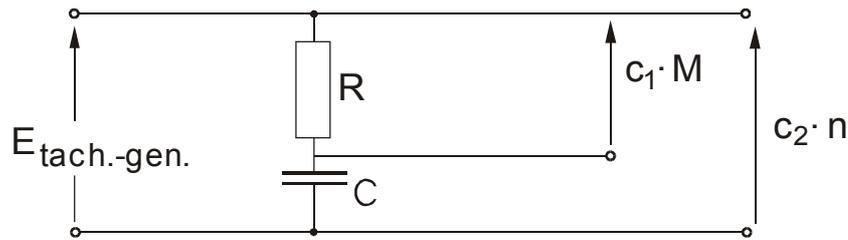
$$\vartheta_u = \frac{1}{2}(\vartheta_{u1} + \vartheta_{u2}) = \frac{1}{2} \left(\frac{U_s}{U_{w0}} + \frac{U_{s0}}{U_w} \right)$$

Pomiary zwarcia

Przy mechanicznie zatrzymanym wirniku dokonuje się pomiarów natężenia prądu I_{sk} , mocy czynnej P_k i momentu zwarcia M_k w funkcji napięcia zasilania. Przed należą silnik nagrzać, a w celu utrzymania w przybliżeniu ustalonej temperatury uzwojeń zaleca się wykonywanie pomiarów, rozpoczynając od napięcia, przy którym $I_s=1,2I_N$, a następnie dokonywać odczytu przy napięciu zmniejszonym szybko do zera. Moment elektryczny w stanie zwarcia wykazuje dużą zmienność z powodu harmonicznych zębów pola i dlatego należy usrednić jego wartość dla dwóch położenia wirnika, dla których posiada ekstremalne wartości. Należy wykresować charakterystyki zwarcia I_{sk} , P_k , $\cos\varphi_k=f(U)$ oraz $M_k=f(U)$ dla $R_d=0$ oraz dwóch wartości $R_d \neq 0$. Następnie wyznacza się wartości M_{kN} , I_{skN} i P_{kN} dla $U_s=U_{sN}$, korzystając z uwag zamieszczonych w części wstępnej.

Rozruch oporowy, rejestracja przebiegów czasowych

Rozruch oporowy dokonuje się po załączeniu napięcia zasilania, zwierając stopniowo opornicę rozruchową włączoną w obwód wirnika. Wielkości elektryczne, proporcjonalne do momentu elektrycznego oraz prędkości obrotowej, otrzymać można stosując element różniczkujący (Rysunek 45), zasilany napięciem tachogeneratora sprzężonego z silnikiem indukcyjnym.



Rysunek 45 Układ do rejestracji momentu i predkosci silnika

Rejestracji przy zastosowaniu rejestratora XY dokonuje się przy obniżonym napięciu zasilania silnika dla $R_d=0$ i kilku wartości $R_d \neq 0$.

Pomiary biegu jałowego

Dla silnika nieobciążonego na wale należy wyznaczyć charakterystyki I_{s0} , P_0 , $\cos\varphi_0=f(U)$ w zakresie od $1,1U_N$ w dół do napięcia, przy którym zaczyna maleć prędkość obrotowa. Należy zwrócić uwagę, że przy małych wartościach współczynnika mocy ($\varphi > 60^\circ$) jeden z watomierzy układu Arona wychyla się w stronę przeciwną. Należy przełączyć jego cewkę napięciową i uwzględnić wskazaną przez ten moc ze znakiem ujemnym.

Pomiary obciążenia

Przy napięciu znamionowym obciąża się silnik maszyną hamulcową, odczytując moc czynną pobieraną z sieci P_1 , natężenie prądu I_s , moment obciążenia M oraz prędkość obrotową n . Moment rozwijany przez silnik wskazuje momentomierz sprzężony z maszyną hamulcową bądź też, korzystając z charakterystyki cechowania strat maszyn hamulcowej prądu stałego, wyznacza się moc wydaną przez silnik i znając prędkość silnika oblicza się wartość momentu. Należy wykresić charakterystyki obciążenia P_1 , I_s , $\cos\varphi$, η , $n=f(P_2)$ oraz charakterystyki mechaniczne M , $I_s=f(\omega)$ dla $R_d=0$ i dwu wartości $R_d \neq 0$.

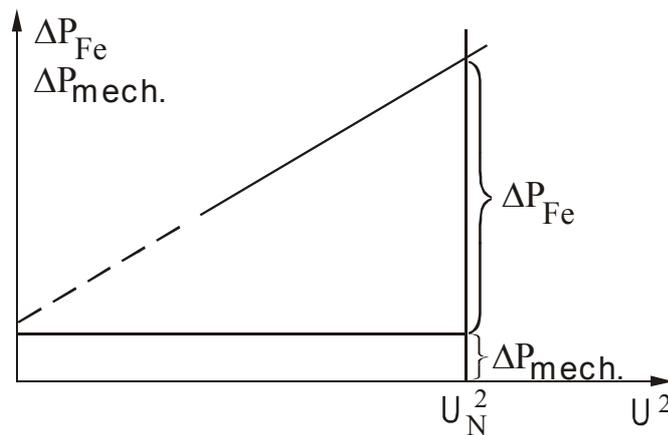
Uwagi do opracowania sprawozdania

W celu określenia parametrów układu zastępczego należy dokonać rozdziału strat jałowych. Wielkość strat w rdzeniu jest określona zależnością:

$$\Delta P_{Fe0} = P_0 - 3R_s \cdot I_{s0}^2 - \Delta P_{mech}$$

Straty mechaniczne ΔP_{mech} przyjmuje się jako równe $0,6 \div 1,5\% P_N$ lub dokonuje się rozdziału ΔP_{Fe} i ΔP_{mech} metodą wykreslną, wyznaczając funkcje

$\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = P_0 - \Delta P_{Cu0} = f(U^2)$ - przecięcie prostej z osią rzędnych wyznacza wielkość strat mechanicznych (Rysunek 46).

Rysunek 46 Wyznaczanie ΔP_{Fe} i ΔP_{mech}

Poniziej przedstawiono szczegółowe obliczenia parametrów układu zastępczego oparte na pomiarach stanów pracy silnika pierścieniowego.

$$k = \frac{R_s}{R_w}$$

$$Z_k = \frac{U_{skf}}{I_{skf}} \quad R_k = \frac{P_k}{3I_{skf}^2} \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

$$R_k = R_s + R'_w = R_s + R_w \cdot g_u^2 \cdot \frac{m_1}{m_2} = R_s \left(1 + \frac{1}{k} g_u^2 \frac{m_1}{m_2} \right)$$

$$R_s = R_k \frac{k}{k + g_u^2} \quad R_w = R_k \frac{1}{k + g_u^2}$$

$$R_{Fe} = \frac{3(U_{w0f} \cdot g_u)^2}{\Delta P_{Fe}} \quad I_{Fe} = \frac{U_{w0f} \cdot g_u}{R_{Fe}}$$

$$I_\mu = \sqrt{I_{s0f}^2 - I_{Fe}^2} \quad X_\mu = \frac{U_{w0f} \cdot g_u}{I_\mu}$$

$$X_{\delta s} = \frac{U_{sf} - U_{w0f} \cdot g_u}{I_{s0f}} \quad \text{jeses } X_{\delta s} \gg R_s$$

$$X_{\delta w} = \frac{X_k - X_{\delta s}}{g_u^2}$$

W sprawozdaniu należy zamieścić układ zastępczy silnika z wartościami poszczególnych parametrów.

Konstrukcję wykresu kołowego należy wykonać na papierze milimetrowym, korzystając ze wskazówek zamieszczonych w części teoretycznej, opierając się na wynikach pomiaru stanów pracy silnika przy $U_s = U_{sN}$. W oparciu o wykres kołowy należy wyznaczyć charakterystykę $M=f(s)$ i porównać jej przebieg z charakterystyką metodą bezpośredniego obciążenia oraz zarejestrowana dynamicznie.

Pytania i zadania kontrolne

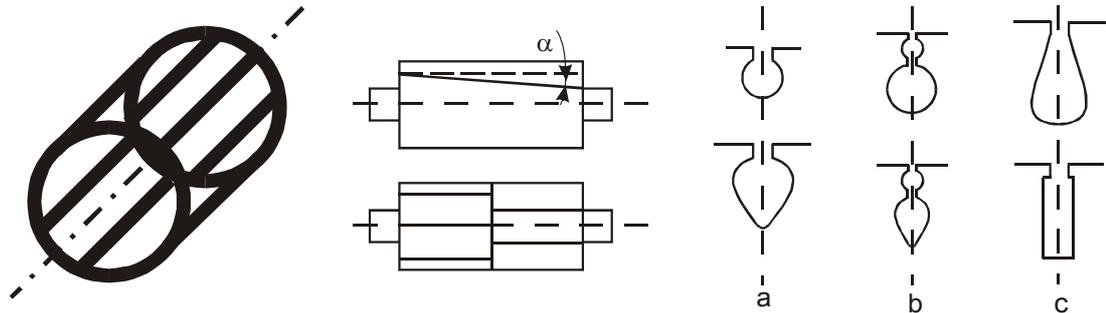
1. Budowa i zasada działania silnika indukcyjnego pierścieniowego.
2. Równania opisujące ustalony stan pracy silnika.
3. Układ zastępczy silnika, wyznaczenie jego parametrów.
4. Wykresy wektorowe stanów pracy silnika.
5. Równanie momentu, charakterystyki mechaniczne.
6. Różnica między stanem pracy transformatorowej a biegiem jałowym.
7. Charakterystyki rozruchowe przy skokowej zmianie rezystancji dodatkowej.
8. Charakterystyki zwarcia, przeliczenie parametrów zwarcia na znamionowe napięcie zasilania.
9. Układ pomiarowy i sposób przeprowadzania badań silnika.
10. Wykres kołowy – konstrukcja, reprezentacja mocy na wykresie kołowym, skala poślizgu.

Cwiczenie A2: Silnik indukcyjny klatkowy

Wprowadzenie teoretyczne

Budowa i zasada działania

Silnik indukcyjny klatkowy jest prostszą i tańszą odmianą silnika indukcyjnego. Zasada działania jest identyczna jak silnika pierścieniowego, a różnice w budowie sprowadzają się do innej konstrukcji wirnika. Dla wyeliminowania pierścieni ślizgowych i szczotek uzwojenie wirnika nie jest wyprowadzone na zewnątrz, lecz jest zwarte bezpośrednio na czołach wirnika pierścieniami zwierającymi. Zwoje mają postać niez izolowanych pretów ze stopu aluminium lub miedzi ułożonych w złobkach wykrojonych w pakiecie blach. Pretы te stanowią wraz z pierścieniami zwierającymi tzw. klatkę. Odstępu między pretami są jedną z przyczyn powstawania pulsacji w przebiegu momentu elektrycznego. Eliminuje się je przez skreślenie klatki wzdłuż osi wirnika lub przez dodanie trzeciego pierścienia zwierającego w połowie długości wirnika i częściowy obrót tak powstałych półklatek względem siebie.

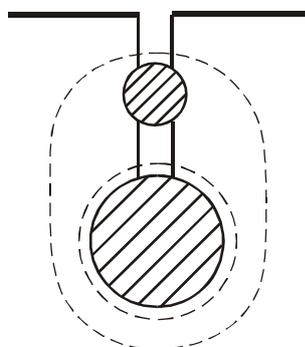


Rysunek 47 Typy uzwojeń klatkowych

Istotny wpływ na właściwości ruchowe silników klatkowych ma analogicznie jak w silniku pierścieniowym rezystancja uzwojeń wirnika, a więc rezystywność materiału klatki oraz wielkość i kształt przekroju jej pretów. W zależności od kształtu złobków wirnika rozróżnia się:

- wirniki z klatką pretową (Rysunek 47a),
- wirniki dwuklatkowe (Rysunek 47b),
- wirniki klatkowe głębokozłobkowe (Rysunek 47c).

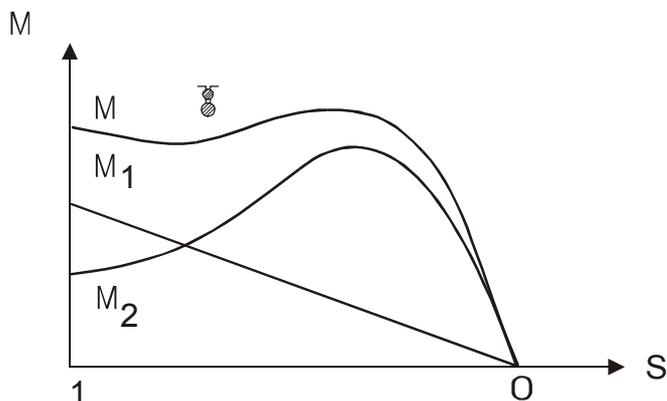
Silniki z klatką pretową wykazują własności podobne jak silniki pierścieniowe ze swartymi pierścieniami. Do ich analizy stosuje się układ zastępczy oraz równania podane w instrukcji A1. W silnikach dwuklatkowych i głębokozłobkowych wykorzystuje się wpływ zjawiska wypierania prądu w pretach klatki na wartość parametrów obwodu wirnika, a zatem i na własności ruchowe silnika. Wirnik silnika dwuklatkowego ma dwie klatki: zewnętrzną /rozruchową/ z pretów o małym przekroju oraz wewnętrzną /pracy/ z pretów o przekroju dużym. Prąd płynący w pretach obu klatek wytwarza strumień rozproszenia, którego linie sił zamykają się na drodze o najkrótszej reluktancji. Linie sił strumienia od klatki pracy zamykają się wokół pretów tej klatki.



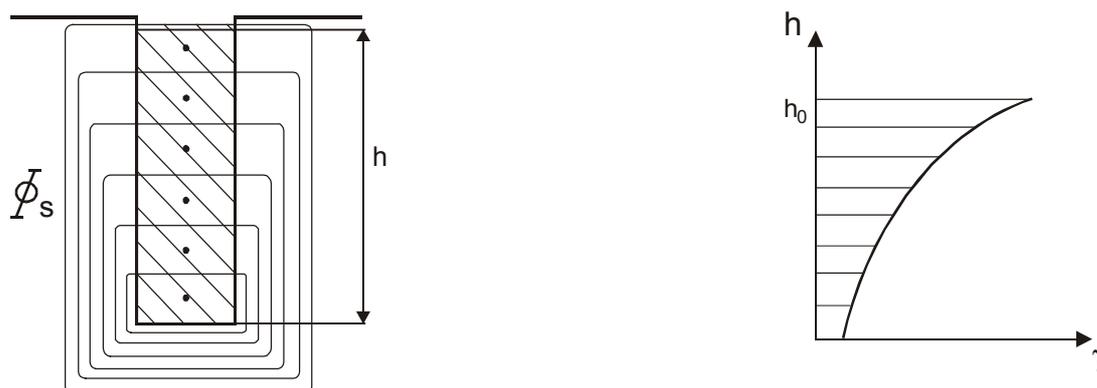
Rysunek 48 Strumień rozproszenia w wirniku dwuklatkowym

Linie sił strumienia od klatki pracy zamykają się wokół pretów tej klatki. Linie sił od klatki rozruchowej dzięki szczelinie między klatkami obejmują pretы obu klatek. W efekcie klatka

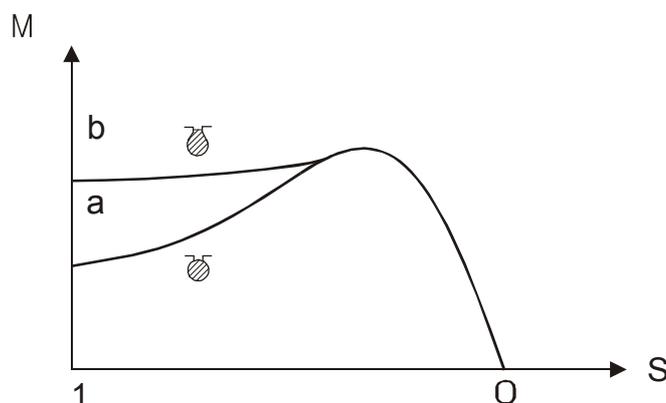
pracy znajduje się pod działaniem większego strumienia rozproszenia niż klatka rozruchowa, więc reaktancja rozproszenia klatki pracy jest większa od reaktancji rozproszenia klatki rozruchowej. Podczas rozruchu, gdy o rozptywie prądów decydują ich reaktancje, prąd płynie prawie wyłącznie w klatce rozruchowej o dużej rezystancji. Podczas pracy z niewielkim poślizgiem, gdy o rozptywie prądów decydują rezystancje, prąd płynie głównie w klatce pracy. Przedstawione zjawisko wypierania prądu powoduje wzrost wypadkowej rezystancji obu klatek w miarę zmniejszania się prędkości obrotowej silnika. Spełnia więc ono analogiczną rolę co regulowane oporniki rozruchowe w silniku pierścieniowym. Moment elektryczny rozwijany przez silnik z wirnikiem dwuklatkowym jest sumą momentów od klatki rozruchowej i od klatki pracy.



Rysunek 49 Charakterystyka mechaniczna silnika dwuklatkowego: M_1 – moment od klatki rozruchowej, M_2 – moment od klatki pracy



Rysunek 50 Strumień rozproszenia w silniku głębokożłobkowym oraz rozkład gęstości prądu w funkcji wysokości pretu przy poślizgu $s=1$



Rysunek 51 Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego: a – z klatki pretowa, b – z klatki głębokożłobkowa

W wirnikach z klatkami głębokożłobkowymi, analogicznie jak w dwuklatkowych, występuje przy dużym poślizgu zjawisko wypierania prądu z dolnych warstw pretów, co pozornie zmniejsza ich przekrój, a zwiększa rezystancję, jednak w mniejszym stopniu niż w silniku

dwuklatkowym. Podczas pracy z niewielkim przesłaniem prąd płynie w całym przekroju pretu. Różnorodność wykrójów zębów wirnika w silnikach indukcyjnych klatkowych pozwala kształtować ich charakterystyki mechaniczne odpowiednio do potrzeb.

Metody rozruchu

O jakości rozruchu decydują: wielkość prądu pobieranego z sieci zasilającej oraz moment elektryczny wytwarzany w czasie rozruchu w odniesieniu do ich wartości znamionowych. Określa to tzw. współczynnik dobroci rozruchu D , będący ilorazem względnym wartości momentu i prądu rozruchowego:

$$D = \frac{M_k}{M_N} \bigg/ \frac{I_k}{I_N} \quad (1)$$

gdzie:

$$M_k = \frac{3U^2 f}{\omega} \cdot \frac{R'_w}{(R_s + R'_w)^2 + (X\delta_s + X'\delta_w)^2} \quad (2)$$

$$I_k = \frac{U_f}{Z_k} = \frac{U_f}{\sqrt{(R_s + R'_w)^2 + (X\delta_s + X'\delta_w)^2}} \quad (2), (3)$$

Wzory (2) i (3) wynikają z uproszczonego układu zastępczego silnika w stanie zwarcia (patrz instrukcja A1). Wskazują one, które parametry silnika lub układu zasilającego należy zmieniać, aby uzyskać jak najlepszy współczynnik dobroci rozruchu.

Rozruch bezpośredni

Przy rozruchu bezpośrednim (włączenie na pełne napięcie) silników z kłatkami pretowymi prąd rozruchowy jest 6-8-krotnie większy od znamionowego, a moment rozruchowy jest często mniejszy od znamionowego, co ogranicza tę metodę do silników o mocy kilku kilowatów nie obciążonych w czasie rozruchu. Dlatego obecnie produkowane silniki posiadają wirniki głębokozębne lub dwuklatkowe, zapewniające dzięki zjawisku wypierania prądu wysoki współczynnik jakości rozruchu.

$$\text{Dla silników z kłatkami pretowymi } D = \left(\frac{0,9}{6} + \frac{1,5}{8} \right)$$

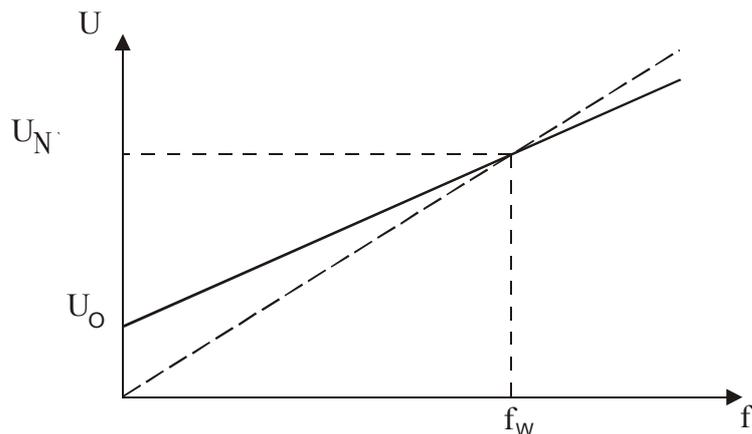
$$\text{Dla silników głębokozębkowych } D = \left(\frac{1}{4} + \frac{2}{6} \right)$$

$$\text{Dla silników dwuklatkowych } D = \left(\frac{1,6}{4} + \frac{2,5}{5} \right)$$

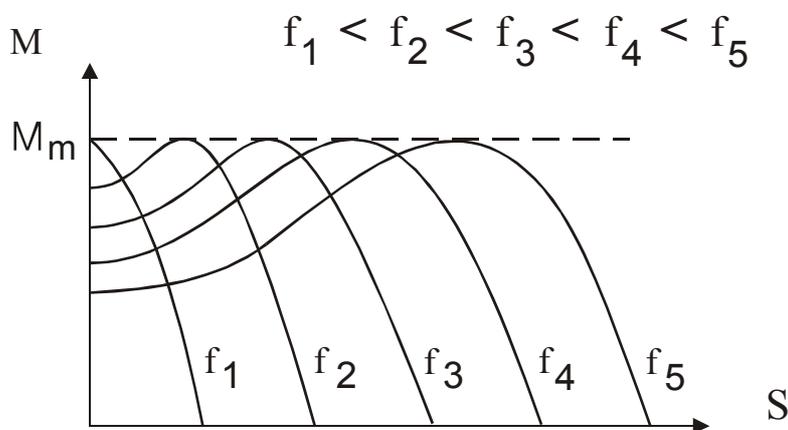
Pozwala to przy jednoczesnej sztywności sieci zasilającej na szerokie stosowanie rozruchu bezpośredniego nawet dla dużych silników.

Rozruch za pomocą regulowanego źródła zasilania

Podobne efekty można osiągnąć za pomocą źródeł zasilania o regulowanym napięciu i częstotliwości, np. falowników tyrystorowych, które coraz częściej są stosowane do regulacji prędkości obrotowej silników indukcyjnych. Zwiększając liniowo częstotliwość od 0 do f_N i jednocześnie w przybliżeniu proporcjonalnie napięcie od U_0 do U_N (Rysunek 52), otrzymuje się kolejne charakterystyki mechaniczne silnika przy utrzymaniu stałego momentu maksymalnego (Rysunek 53). Prąd rozruchowy nie przekracza wartości dopuszczalnych.



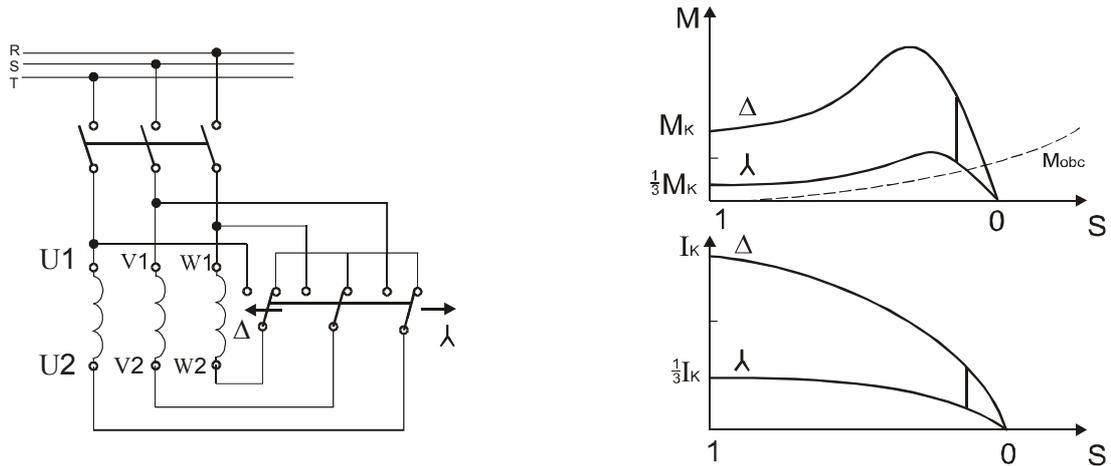
Rysunek 52 Odchylenie napięcia od regulacji proporcjonalnej



Rysunek 53 Charakterystyki mechaniczne przy rozruchu częstotliwościowym

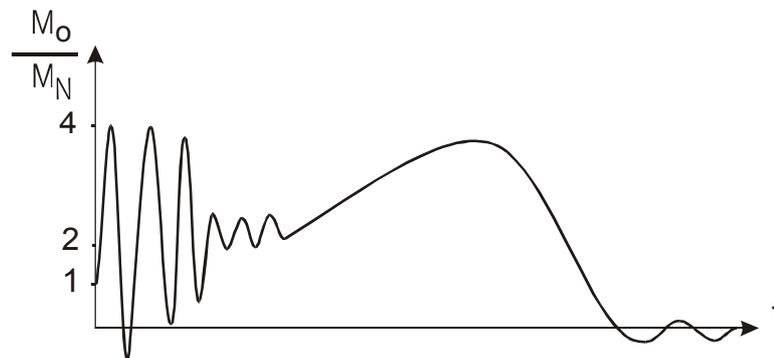
Rozruch napięciowy

Stosowane są jeszcze metody połowiczne ograniczające prąd rozruchowy przy jednoczesnym zmniejszeniu momentu rozruchowego, polegające na zmniejszeniu napięcia zasilającego autotransformatorem lub przełącznikiem Y/Δ albo powiększeniu R_s lub X_s poprzez szeregowe włączenie z silnikiem regulowanej rezystancji lub indukcyjności. Rozruch autotransformatorem o zmiennej przekładni v zmniejsza prąd silnika v razy oraz prąd pobierany z sieci i moment rozruchowy v^2 razy. Rozruch przełącznikiem Y/Δ jest możliwy tylko dla silników o uzwojeniach fazowych zaprojektowanych na napięcie przewodowe sieci zasilającej /pracujących normalnie przy połączeniu w trójkąt/. Na początku rozruchu przy połączeniu uzwojen w gwiazde napięcie fazowe jest $\sqrt{3}$ razy mniejsze od znamionowego, co zmniejsza $\sqrt{3}$ -krotnie prąd silnika, a 3-krotnie prąd pobierany z sieci i moment rozruchowy. Po ustaleniu się prędkości obrotowej, uzwojenia przełącza się w trójkąt (Rysunek 54).

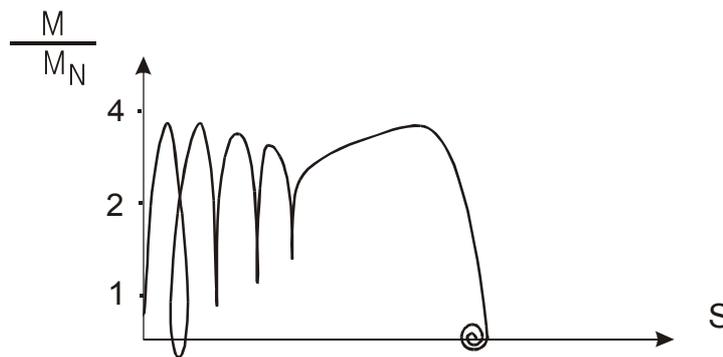


Rysunek 54 Rozruch silnika klatkowego z zastosowaniem przełącznika Y/Δ

Charakterystyki mechaniczne przedstawione wcześniej dotyczą stanów quasi-ustalonych silnika założeniu, że predkosć obrotowa zmienia się dużo wolniej niż wielkości elektryczne. Stanowią więc one tylko pewne usrednienie rzeczywistego przebiegu momentu elektrycznego podczas rozruchu, który jest typowym stanem dynamicznym. Wykazuje on bardzo silne oscylacje w początkowym okresie rozruchu o amplitudzie znacznie przekraczającej wartość znamionową.



Rysunek 55 Moment dynamiczny rozwijany przez silnik indukcyjny podczas rozruchu bezpośredniego

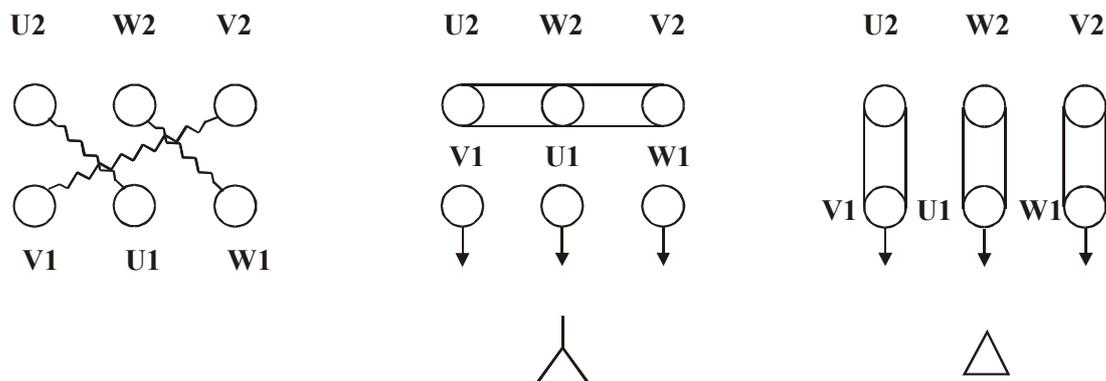


Rysunek 56 Rzeczywista charakterystyka mechaniczna silnika klatkowego

Badania laboratoryjne

Pomiar parametrów uzwojenia stojana

Trofazowe uzwojenie stojana jest z zasady wyprowadzone na szesciozaciskowa tabliczke umożliwiajaca połączenie uzwojen w gwiazde lub trojkat za pomoca blaszek zwierajajcych – Rysunek 57.



Rysunek 57 Połączenie uzwojenia stojana w tabliczce zaciskowej

Pomiar rezystancji izolacji

Przed przystąpieniem do pomiaru należy za pomocą omomierza dobrać parami zaciski odpowiadające poszczególnym fazom oraz określić ewentualne przerwy w uzwojeniach. Następnie megaomomierzem indukcyjnym o napięciu stałym przeprowadzić kolejno pomiar rezystancji między poszczególnymi uzwojeniami oraz między uzwojeniami a korpusem. Pozostałe uzwojenia powinny być w czasie pomiarów zwarte z masą. Rezystancja izolacji nie może być mniejsza niż $1\text{k}\Omega$ na 1V napięcia znamionowego. Odczytu dokonuje się po 15 i 60 sekundach od chwili przyłożenia napięcia. Iloraz R_{60}/R_{15} świadczy o stopniu zawilgocenia uzwojen. Dla suchej maszyny powinien być on większy od 1,5.

Pomiar rezystancji uzwojen

Pomiar przeprowadza się jedną z poniższych metod:

- metoda techniczna z łącznia napięciowa, gdy $R > \sqrt{R_A R_V}$
- metoda techniczna z łącznicą prądową, gdy $R < \sqrt{R_A R_V}$

R_A , R_V – rezystancja wewnętrzna amperomierza i woltomierza.

W obu przypadkach prąd pomiarowy nie może przekroczyć $0,2I_N$, by nie nagrzać uzwojen.

- mostkiem Wheatstone'a, gdy $R > 1\Omega$
- mostkiem Thomsona, gdy $R < 1\Omega$

zmierzone wartości rezystancji przelicza się na temperaturę 75°C dla izolacji uzwojen A,B,E lub na 115°C dla uzwojen z izolacją klasy F i H wg wzoru dla uzwojen miedzianych:

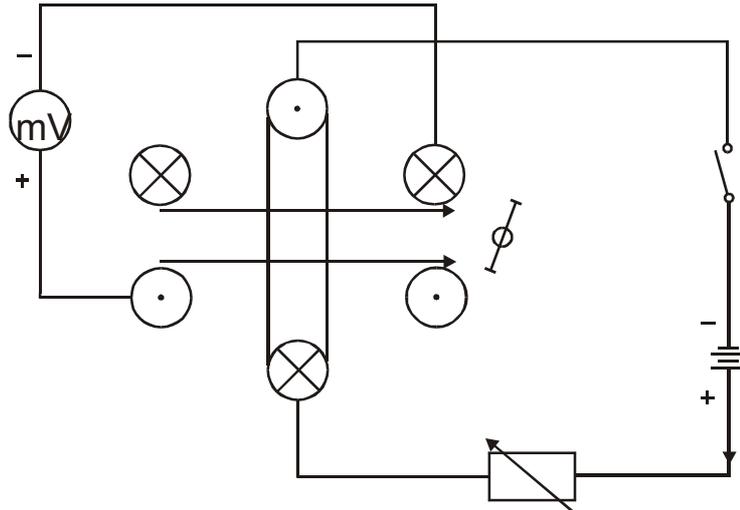
$$R_t = R_0 \frac{235 + t}{235 + t_0}$$

Wyznaczanie początków i końców uzwojen stojana

Przeprowadza się w przypadku nie oznaczonej tabliczki zaciskowej jedna z poniższych metod:

1. Metoda impulsów prądu stałego

Początek i koniec jednego z uzwojen przyjmuje się dowolnie, a następnie uzwojenie to zasila się niewielkim napięciem stałym. Do innego uzwojenia przyłącza się woltomierz i obserwuje jego wychylenie przy załączeniu napięcia (Rysunek 58). Jeżeli dodatni biegun źródła został przyłączony do zacisku przyjętego za początek uzwojenia to przy impulsowym załączeniu napięcia minus woltomierza wskazuje na początek drugiego uzwojenia, jeśli woltomierz wychyla się prawidłowo (Rysunek 58).



Rysunek 58 Wyznaczanie początków i końców uzwojen metoda impulsow prądu stałego

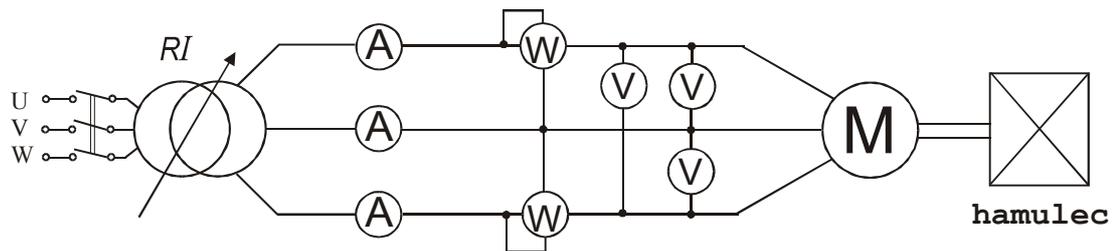
2. Metoda zasilania prądem stałym

Uzwojenia trójfazowe łączy się szeregowo i zasilą prądem stałym. Jeżeli kierunek płynięcia prądu we wszystkich uzwojeniach jest jednakowy (od początku do końca lub odwrotnie), to wypadkowy strumień w maszynie, będący sumą trzech strumieni przesuniętych w przestrzeni co 120° , jest bliski zeru. Obracając zwarty wirnik, nie odczuwa się wtedy oporu, gdyż w klatce nie indukują się żadne prądy. Gdy jedno z uzwojen połączono przeciwnie, to wypadkowy strumień będzie różny od zera. Przy obracaniu wirnika prądy wyindukowane w klatce wytworzą wyczuwalny reka moment hamujący.

3. Metoda prądu przemiennego do silników klatkowych nie nadaje się ze względu na tłumiące działanie klatki.

Pomiar w stanie zwarcia

W stanie zwarcia wirnik silnika jest zahamowany mechanicznie ($n=0, s=1$), a uzwojenie stojana jest zasilane symetrycznym regulowanym napięciem. Celem pomiarów jest wyznaczenie charakterystyk zwarcia silnika $P_k, I_k, \cos\phi_k=U$ i $M_k=f(U)$ oraz określenie znamionowych wartości względnych prądu i momentu rozruchowego I_{kN}, M_{kN} . Silnik uprzednio powinien być nagrany i dla utrzymania stałej temperatury pomiaru należy rozpocząć od napięcia najwyższego ograniczonego dopuszczalnym prądem silnika (około $1,2I_N$). Następnie zmniejsza się napięcie do zera, mierząc pobieraną moc czynną, prąd i moment rozruchowy w układzie wg poniższego rysunku (Rysunek 59).



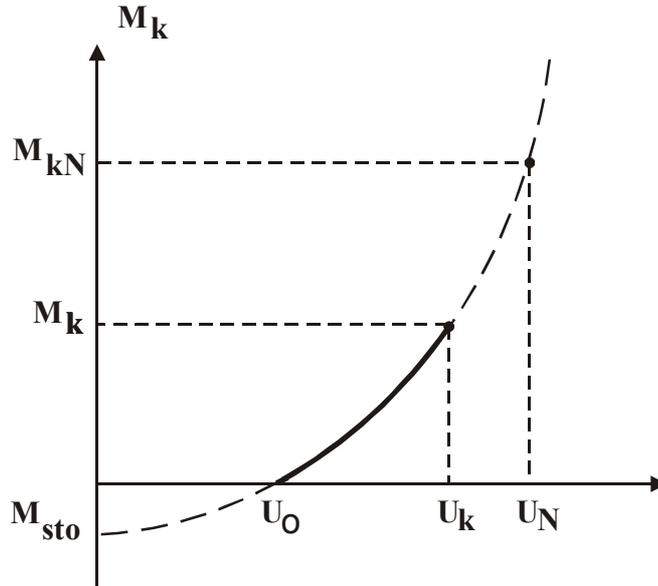
Rysunek 59 Schemat układu pomiarowego do badania silnika indukcyjnego

Moment elektryczny w stanie zwarcia wskazuje dużą zmienność z powodu harmonicznych złobkowych. Dlatego trzeba go określić jako średnią z wartości maksymalnej i minimalnej zmierzonych w różnych pozycjach wirnika. Zależność $M_k=f(U)$ jest w przybliżeniu funkcją kwadratową w całym zakresie zmian napięcia. Jednak w czasie pomiarów dla napięć mniejszych od pewnego U_0 moment mierzony znika, gdyż wtedy moment elektryczny jest mniejszy od momentu oporu spoczynkowych strat mechanicznych M_{sto} i nie daje się zmierzyć. Uzyskany z pomiarów odcinek paraboli $M_{ok}=f(U)$ (Rysunek 60) można jednak przedłużyć w oparciu o wzór (5), pozwalający obliczyć zarówno M_{kN} jak i M_{sto} .

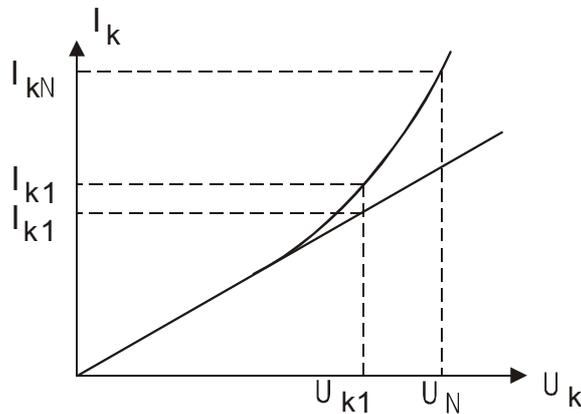
$$M_{kN} = (M_k + M_{sto}) \frac{U_N^2}{U_k^2} - M_{sto}$$

Prąd zwarcia rośnie liniowo z napięciem, lecz w miarę nasycania się obwodu magnetycznego strumienia rozproszenia, malejące reaktancje X_{δ_s} , X_{δ_w} powoduje jego szybszy wzrost w przybliżeniu wg zależności (6) (Rysunek 61).

$$I_k = I_{k1} \frac{U}{U_{k1}} + (I'_{k1} - I_{k1}) \left(\frac{U}{U_{k1}} \right)^{1,5}$$

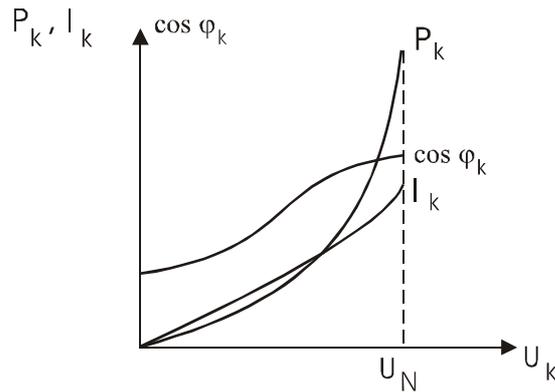


Rysunek 60



Rysunek 61

Z tego powodu rośnie współczynnik mocy silnika w stanie zwarcia – Rysunek 62.



Rysunek 62 Charakterystyki zwarcia silnika indukcyjnego

$$\cos \varphi_k = \frac{P}{\sqrt{3}UI_k}$$

$$P_{kN} = P_k \frac{I_N^2}{I_k^2}$$

Pomiar biegu jałowego

Silnik pracujący bez obciążenia znajduje się w stanie biegu jałowego. Prędkość obrotowa jest wówczas bliska synchronicznej ($s < 0,5\%$), a niewielki moment elektryczny równoważy tylko moment strat mechanicznych. Zmniejszając napięcie od $1,2U_N$ do wartości, przy której zacznie wyraźnie maleć prędkość obrotowa (około $15\%U_N$ do $30\%U_N$), mierzy się moc czynną i prąd w układzie pomiarowym wg schematu (Rysunek 58). Z uwagi na to, że silniki indukcyjne mają na biegu jałowym niski $\cos \varphi$ ($\varphi > 60^\circ$), jeden z watomierzy w układzie Arona wychyla się w stronę przeciwną. Należy wtedy przełączyć zaciski jego cewki napięciowej, biorąc wskazania ze znakiem minus. W przypadku wymaganej dużej dokładności w układzie trzeba zastosować watomierze specjalne na niski $\cos \varphi$. Wyniki pomiarów są podstawą do wykreślenia charakterystyki biegu jałowego (Rysunek 63).

Rozdział strat jałowych

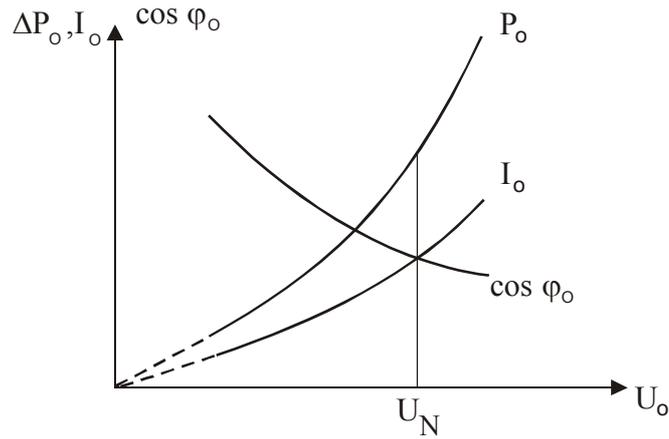
Moc czynna pobierana w czasie biegu jałowego jest sumą strat mocy w żelazie stojana ΔP_{Fe} , strat mechanicznych ΔP_m i niewielkich strat w uzwojeniu stojana ΔP_{Cus} , (9).

$$P_o = \Delta P_{Fe} + \Delta P_m + \Delta P_{Cus} \quad \text{gdzie} \quad \Delta P_{Cus} = 3R_s I_o^2$$

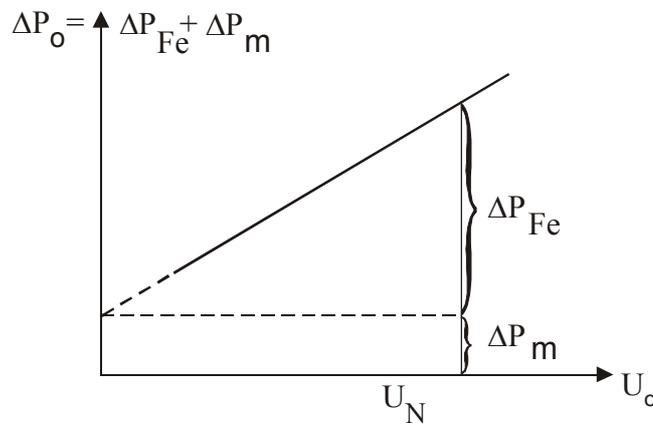
Ze względu na w przybliżeniu stałą prędkość obrotową w czasie pomiarów można przyjąć że $\Delta P_m = \text{const}$, natomiast straty w rdzeniu ΔP_{Fe} rosną z kwadratem napięcia. Rysując zależność (10) w funkcji kwadratu napięcia

$$\Delta P_o = P_o - \Delta P_{Cus} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_m = f(U)^2$$

otrzymuje się w przybliżeniu linię prostą (Rysunek 64). Punkt jej przecięcia z osią rzędnych określa straty mechaniczne silnika ΔP_m .



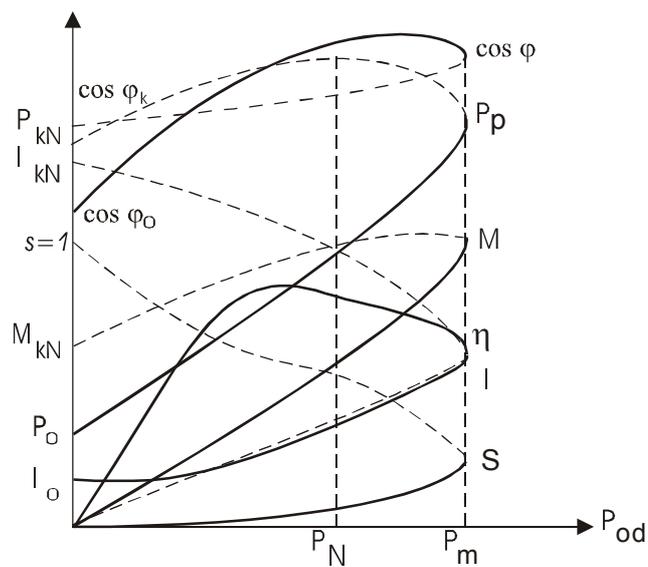
Rysunek 63 Charakterystyki biegu jałowego



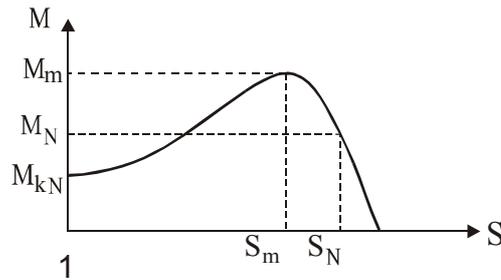
Rysunek 64 Podział strat jałowych

Pomiary w stanie obciążenia

Pomiary w stanie obciążenia służą do wyznaczania charakterystyki $P_p, I, M, s, \eta, \cos\varphi=f(P_{od})$ dla $0 < P_{od} < 1,2P_N$ – Rysunek 65 – oraz statycznej charakterystyki mechanicznej $M=f(s)$ (Rysunek 65), przy $U=const$ i $F=const$.



Rysunek 65 Charakterystyki obciążenia silnika klatkowego



Rysunek 66 Charakterystyka mechaniczna

Ze zmierzonych wartości P_p , I , U , M , n oblicza się pozostałe wg poniższych wzorów:

$$P_{od} = M\omega = M \frac{\pi n}{30}$$

$$\eta = \frac{P_{od}}{P_p}$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

$$n_s = \frac{60f}{p}$$

Aby uniknąć obliczeń związanych z przeliczaniem wyników na temperaturę pracy, pomiary należy wykonać na maszynie nagrzanej. Wyznaczenie M_m do charakterystyki mechanicznej jest często utrudnione ze względu na duży prąd płynący przy dużych poślizgach. Praktycznie można go zmierzyć przy odpowiednio niższym napięciu, a następnie przeliczyć na napięcie znamionowe wg wzoru

$$M_{mN} = M_m \frac{U_N^2}{U^2}$$

Wyznaczanie sprawności metoda strat poszczególnych

Pomiar sprawności metoda bezpośrednia jest zwykle obarczony dużym błędem, dlatego należy ją wyznaczyć metoda strat poszczególnych wg poniższych wzorów:

$$\eta = \frac{P_p - \sum \Delta P}{P_p}$$

$$\sum \Delta P = \Delta P_{Cus} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cuw} + \Delta P_m + \Delta P_{dod}$$

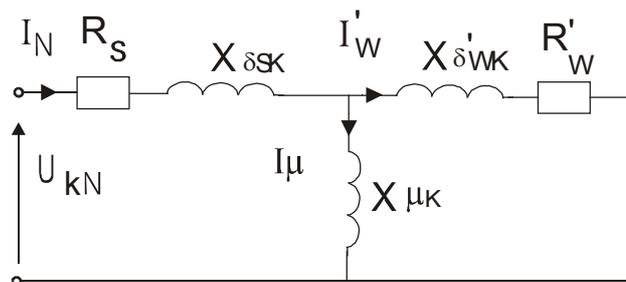
$$\Delta P_{Cus} = 3R_s I_s^2$$

$$\Delta P_{Cuw} = P\Psi \cdot s = (P_p - \Delta P_{Cus} - \Delta P_{Fe}) \cdot s$$

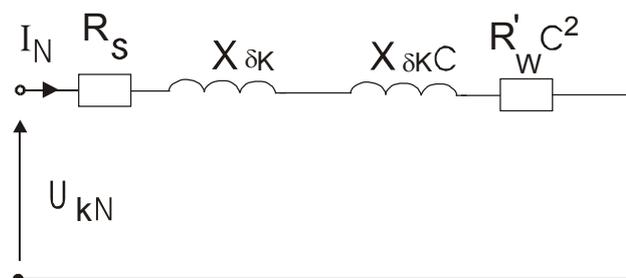
$$\Delta P_{dod} = 0,5\% \cdot P_N$$

Wyznaczanie parametrów układu zastępczego dla stanu znamionowego /bez uwzględnienia wypierania prądu w klatce/

Stan zwarcia silnika przy napięciu zasilania równym znamionowemu napięciu zwarcia U_{kN} można analizować w oparciu o układ zastępczy przedstawiony poniżej (Rysunek 67).



Rysunek 67 Układ zastępczy silnika klatkowego dla s=1



Rysunek 68 Zmodyfikowany układ zastępczy dla s=1 z uwzględnieniem gałęzi poprzecznej

gdzie:

R_s – rezystancja uzwojenia stojana,

R'_w – rezystancja klatki sprowadzona na stronę stojana,

$X_{\delta sk}$ – reaktancja rozproszenia stojana przy napięciu U_{kN} ,

$X'_{\delta wk}$ – reaktancja rozproszenia klatki przy napięciu U_{kN} sprowadzona na stronę stojana,

$X_{\mu k}$ – reaktancja magnesująca przy napięciu U_{kN} .

W silnikach indukcyjnych prąd płynący w stanie zwarcia w gałęzi poprzecznej jest porównywalny z prądem I'_w , nie może więc być pominięty. Dla uproszczenia układu można przyjąć $X_{\delta sk} = X'_{\delta wk} = X_{\delta k}$ oraz zastąpić impedancje gałęzi poprzecznej i wtórnej impedancją zastępczą Z.

$$Z = \frac{jX_{\mu k} (R'_w + jX_{\delta k})}{R'_w + j(X_{\delta k} + X_{\mu k})} = R'_w C^2 + jX_{\delta k} C \quad \text{gdzie} \quad C = \frac{X_{\mu k}}{X_{\delta k} + X_{\mu k}} \quad (21)$$

przy założeniu

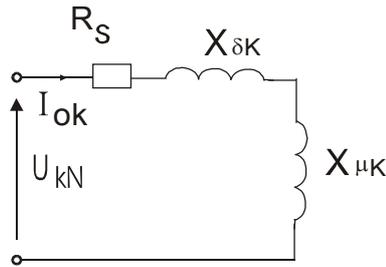
$$R'_w / X_{\mu k} \approx 0$$

Teraz układ zastępczy silnika w stanie zwarcia z uwzględnieniem gałęzi poprzecznej ma postać wg - Rysunek 68. Wynikają z niego poniższe wzory na X_{δ} i R'_w .

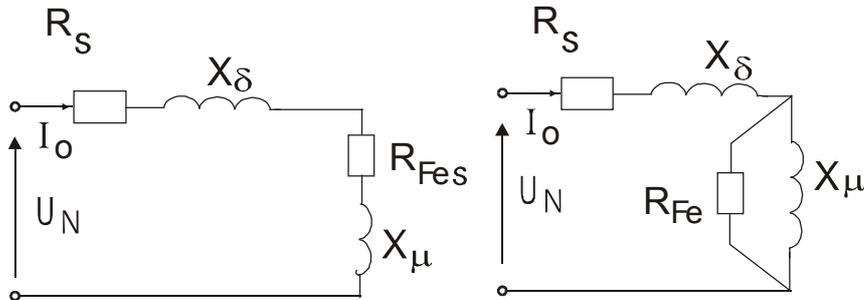
$$R'_w = \frac{1}{C^2} \left(\frac{U_{kN}}{I_N} \cos \varphi - R_s \right) = R_k - R_s \quad (22), (23)$$

$$X_{\delta k} = \frac{1}{C+1} \frac{U_{kN}}{I_N} \sin \varphi_k = \frac{X_k}{C+1}$$

Wartości $\cos \varphi_k$, $\sin \varphi_k$ można określić z pomiaru napięcia, prądu i mocy czynnej pobranej w stanie zwarcia. Natomiast stała C należy wyznaczyć z dodatkowych pomiarów w idealnym stanie jałowym przy napięciu zasilania równym U_{kN} , co pozwala pominąć ΔP_{Fe} , a więc R_{Fe} w układzie zastępczym. Dla zapewnienia $s=0$ silnik powinien być napędzany z zewnątrz. Układ zastępczy dla tak określonego stanu jałowego został przedstawiony poniżej (Rysunek 69).



Rysunek 69 Układ zastępczy dla $s=0$, $U=U_{kN}$, $\Delta P_{Fe}=0$



Rysunek 70 Układ zastępczy dla $s=0$, $U=U_N$

Na tej podstawie:

$$X_{\delta k} + X_{\mu k} = \frac{U_{kN}}{I_{ok}} \sin \varphi_{ok} = X_{ok} \quad (24)$$

z tego:

$$X_{\mu k} = C \frac{U_{kN}}{I_{ok}} \sin \varphi_{ok} = CX_{ok} \quad (25)$$

wstawiając (23) i (25) do (24), otrzymuje się:

$$C = \sqrt{1 - \frac{X_k}{X_{ok}}} \quad (26)$$

co pozwala z tego obliczyć wartości R_w' i $X_{\delta k}$ w oparciu o podane wcześniej wzory. Obliczenie $X_{\mu k}$ nie jest konieczne, bo różni się znacznie od X_{μ} przy napięciu znamionowym. Chcąc określić parametry układu zastępczego dla napięcia znamionowego, należy przyjąć dalsze założenia upraszczające. Reaktancja rozproszenia $X_{\delta k}$ praktycznie nie zależy od napięcia, gdyż strumień rozproszenia w znacznej części zamyka się w powietrzu, co ogranicza wpływ zjawiska nasycenia. Zatem można przyjąć przy $U=U_N$, $X_{\delta}=X_{\delta k}$. Natomiast reaktancja magnesująca X_{μ} maleje ze wzrostem napięcia w skutek nasycenia głównego obwodu magnetycznego i przy napięciu znamionowym jest mniejsza od $X_{\mu k}$. Oblicza się ją w oparciu o pomiary w idealnym stanie jałowym przy znamionowym napięciu U_N . Należy przy tym założyć niezmienną stałą C , co jest uzasadnione relacją $X_{\mu k} \gg X_{\delta k}$. Na podstawie układu zastępczego (Rysunek 70) z szeregową gałęzią poprzeczną dla ułatwienia obliczeń trzymuje się:

$$R_{Fes} = \frac{U_N}{I_o} \cos \varphi_o - R_s$$

$$X_{\mu s} = \frac{U_N}{I_o} \sin \varphi_o - X_o$$

a po przejściu na układ równoległy (Rysunek 70)

$$R_{Fe} = \frac{R_{Fes}^2 + X_{\mu s}^2}{R_{Fes}}$$

$$X_{\mu} = \frac{R_{Fes}^2 + X_{\mu s}^2}{X_{\mu s}}$$

Pytania i zadania kontrolne

1. Zasada działania silnika indukcyjnego klatkowego.
2. Metody kształtowania charakterystyki mechanicznej silnika klatkowego.
3. Zjawisko wypierania prądu.
4. Zalety i wady różnych metod rozruchu silników klatkowych.
5. Metody wyznaczania początków i końców uzwojeń trójfazowych silników klatkowych.
6. Metoda rozdziału strat jałowych silnika.
7. Metody wyznaczania znamionowych wartości momentu rozruchowego i maksymalnego oraz poślizgu krytycznego.
8. Pomiary do wyznaczania parametrów schematu zastępczego silnika klatkowego.
9. Silnik indukcyjny klatkowy o danych: $U_N=380\text{ V}\Delta$, przeciążalność $b_N=2$, $s_N=0,05$, $n_s \cdot 3000\text{ obr/min}$, zasilono napięciem znamionowym przy uzwojeniach połączonych w Y. Obliczyć prędkość silnika, jeśli pracuje on obciążony momentem $M_{ob}=2/3M_N$.

Cwiczenie A3: Dynamika silnika indukcyjnego

Wprowadzenie teoretyczne

Wstęp

Celem ćwiczenia jest poznanie dynamicznych przebiegów indukcyjnych maszyn w stanach nieustalonych. Współczesne silniki indukcyjne stosowane są w napędzie elektrycznym o dużej częstotliwości rozruchów, nawrotów lub włączania powrotnego do sieci, a także różnego rodzaju hamowania, nawet z dokładnie określonym miejscem zatrzymania się wirujących elementów maszyny roboczej.

W stanach dynamicznych silnika wytwarzają się oscylacyjne momenty elektromagnetyczne, przewyższające wartości momentu znamionowego, a nawet momentu maksymalnego - jak pokazano na rysunkach (Rysunek 71, Rysunek 72). Wywołują one niebezpieczne naprężenia mechaniczne w poszczególnych członach kinetycznego układu napędowego. Rozpoznanie stanów dynamicznych pozwala wpływać przy projektowaniu i budowie na lepszą konstrukcję maszyny i układu elektromechanicznego oraz na lepsze jej sterowanie. Prowadzi to w konsekwencji do zapewnienia wyższej niezawodności pracy napędu i do bardziej ekonomicznej jego eksploatacji.

Badania procesów przejściowych w indukcyjnych maszynach prowadzi się dwiema wzajemnie uzupełniającymi się metodami: analityczną i eksperymentalną. Analityczna metoda badań polega na rozwiązywaniu różniczkowych równań silnika przy określonych założeniach upraszczających. Umożliwia ona jakościową analizę elektromagnetycznych i dynamicznych przebiegów nieustalonych. Natomiast badania doświadczalne przebiegu prądu momentu i prędkości obrotowej w stanach dynamicznych są przeważnie prostsze w realizacji i przy dokładnych pomiarach w pełni miarodajne, ale możliwe dopiero po zbudowaniu rzeczywistego układu napędowego.

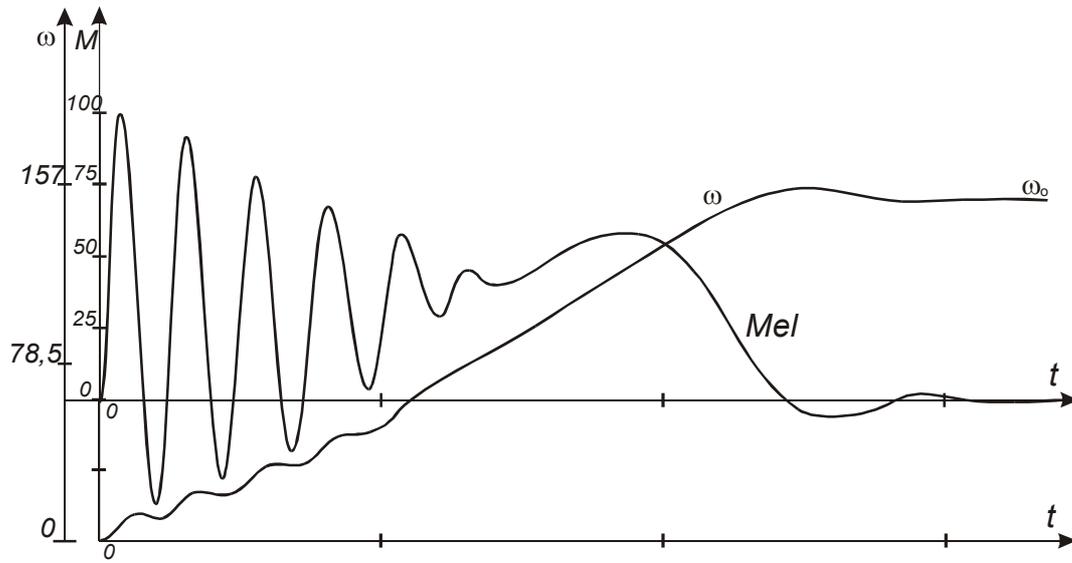
Poznana w poprzednich ćwiczeniach A1 i A2 statyczna charakterystyka momentu silnika indukcyjnego wg równania Klossa jest tylko jedna i zależy od własnych parametrów rezystancji i reaktancji obwodów uzwojeń stojana i wirnika.

Dynamiczną charakterystykę momentu indukcyjnego silnika określają nie tylko parametry jego uzwojeń, lecz również warunki załączania do sieci, charakter procesu przejściowego (rozruch, nawrot itp.) oraz parametry układu napędowego, tj. moment bezwładności, moment oporowy i obciążenia. Zmiana któregokolwiek z tych czynników powoduje zmiany dynamicznej charakterystyki silnika. Wynika stąd, że indukcyjny silnik o danych parametrach uzwojeń ma jedną statyczną i nieskończenie wiele dynamicznych charakterystyk momentu.

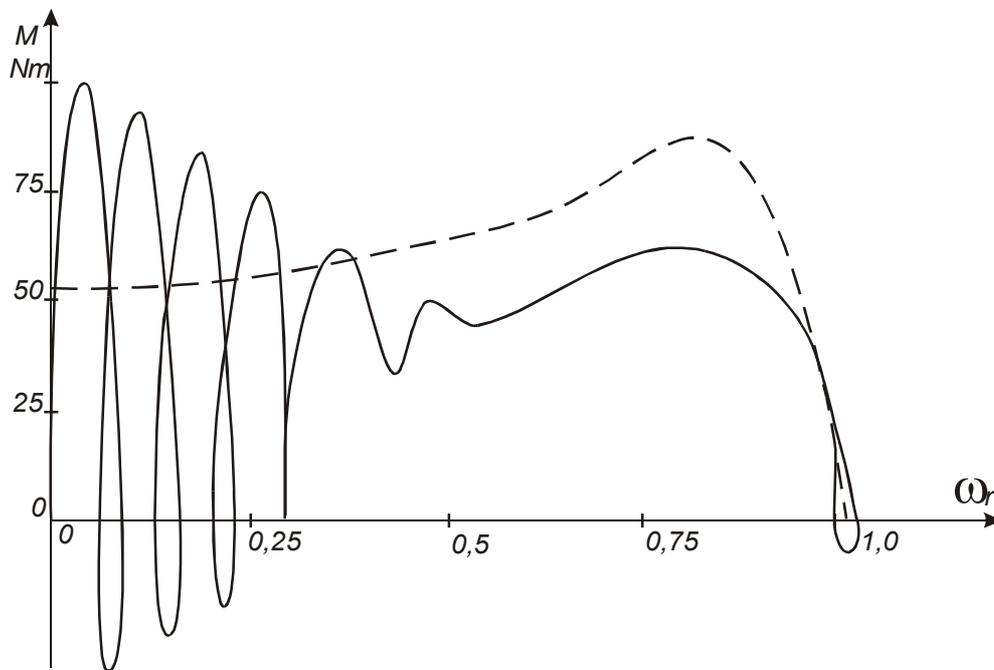
Model matematyczny i układ zastępczy silnika

Najdogodniejszą metodą badań właściwości dynamicznych silnika indukcyjnego jest wektorowa metoda opisana przez Kovaca i Racza, która wspólnie działanie wszystkich trzech faz: A, B, C wyraża jednym wektorem określonym w prostokątnym układzie współrzędnych x , y i wirującym z prędkością pola magnetycznego stojana ω_s .

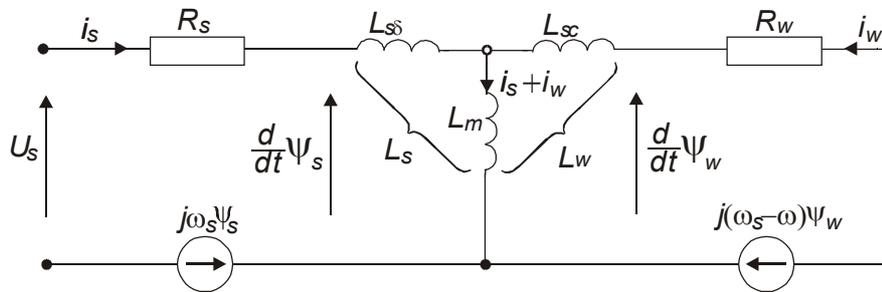
Model matematyczny silnika indukcyjnego przedstawiony jest za pomocą równań:



Rysunek 71



Rysunek 72



Rysunek 73

$$U_s = R_s \cdot I_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j \cdot \omega_s \cdot \psi_s$$

$$U_w = R_w \cdot i_w + \frac{d\psi_w}{dt} + j(\omega_s - \omega) \cdot \psi_w$$

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} p(\psi_s \cdot i_s) - M_o$$

$$\psi_s = L_s \cdot i_s + L_m \cdot i_w$$

$$\psi_w = L_m \cdot i_s + L_w \cdot i_w$$

Równaniom tym odpowiada układ zastępczy silnika indukcyjnego dla stanów dynamicznych, przedstawiony na rysunku (Rysunek 73). W równaniach powyższych oznaczają:

$$U_s = U_{sx} + jU_{sy} = \frac{2}{3}(U_{sa} + a \cdot U_{sb} + a^2 \cdot U_{sc})$$

to jest wektor przestrzenny napięcia stojana

$$i_s = i_{sx} + ji_{sy} = \frac{2}{3}(i_{sa} + a \cdot i_{sb} + a^2 \cdot i_{sc})$$

to jest wektor przestrzenny prądu stojana

$$\psi_s = \psi_{sx} + j\psi_{sy} = \frac{2}{3}(\psi_{sa} + a \cdot \psi_{sb} + a^2 \cdot \psi_{sc})$$

to jest wektor przestrzenny skojarzonego strumienia stojana oraz podobne wektory dla wirnika (indeksy w).

R_s, R_w – rezystancja stojana i wirnika,

L_s, L_w – indukcyjność stojana i wirnika,

L_m – indukcyjność wzajemna stojana i wirnika,

J, M_o – moment bezwładności, moment oporowy i obciążenia zewnętrznego,

ω_s – prędkość wirowania pola stojana,

ω – prędkość wirowania wirnika sprowadzona do $p=1$).

Jako zmienne stanu dostępne do pomiaru w silniku klatkowym przyjęto składowe wektora strumienia ψ_s i prądu i_s stojana. W tym celu z równania (4) i (5) wyznaczono:

$$i_w = -\frac{L_s}{L_m} \cdot i_s + \frac{1}{L_m} \cdot \psi_s$$

$$\psi_w = \frac{L_m^2 - L_w \cdot L_s}{L_m} \cdot i_s + \frac{L_w}{L_m} \cdot \psi_s$$

i podstawiono do równania (2).

Przy obliczeniach dynamicznych przebiegów dogodniej jest posługiwać się parametrami silnika wyrażonymi w jednostkach względnych (relatywnych), przy czym czas $t_r = \omega_s \cdot t$, oraz mechaniczna stała czasowa:

$$T_{mr} = \frac{2J \cdot \omega_s^2}{3 \cdot p \cdot U_n \cdot I_n}$$

wyrażone są w radianach.

Należy zwrócić uwagę na występowanie identyczności indukcyjnych parametrów w jednostkach relatywnych $L_r = X_r$. W dalszych równaniach zostanie pominięty indeks r /relatywny/ pamiętając, że parametry wirnika są sprowadzone do obwodu stojana i całość wyrażona jest w jednostkach względnych.

Układ równań stanu

W celu uproszczenia zapisu układ równań start dla wektorów stojana: strumieni ψ_s i prądu i_s przedstawiono w postaci macierzowej:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_s \\ i_s \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \psi_s \\ i_s \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} U_s \\ U_w \end{bmatrix}$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{T_m} [(\psi_s \bullet i_s) - M_o]$$

a w postaci skalarnej układ równan, na płaszczyźnie x - y dla silnika klatkowego otrzymuje się:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sx} \\ \psi_{sy} \\ i_{sx} \\ i_{sy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -R_s & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -R_s \\ \frac{R_w}{W} & V \frac{X_w}{W} & -G & -s \\ -V \frac{X_w}{W} & \frac{R_w}{W} & -s & -G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{sx} \\ \psi_{sy} \\ i_{sx} \\ i_{sy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{X_w}{W} & 0 & -\frac{X_w}{W} & 0 \\ 0 & \frac{X_w}{W} & 0 & -\frac{X_w}{W} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} U_{sx} \\ U_{sy} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} V = \frac{1}{T_m} [(\psi_{sx} \bullet i_{sy} - \psi_{sy} \bullet i_{sx}) - M_o]$$

Przejście z wielkości wektorowych /zespolonych/ we współrzędnych prostokątnych x - y do postaci skalarnej równan zilustrowano na przykładzie równania napięciowego (1)

$$U_{sx} + jU_{sy} = R_s(i_{sx} + ji_{sy}) + \frac{d}{dt}(\psi_{sx} + j\psi_{sy}) + j\omega_s(\psi_{sx} + j\psi_{sy})$$

Przyjęto oznaczenia:

$$G = R_s \bullet X_w + R_w \bullet X_s$$

$$W = X_x \bullet X_w - X_m^2$$

- względna predkosc

$$V = \frac{\omega}{\omega_s} = 1 - s$$

- poslizg

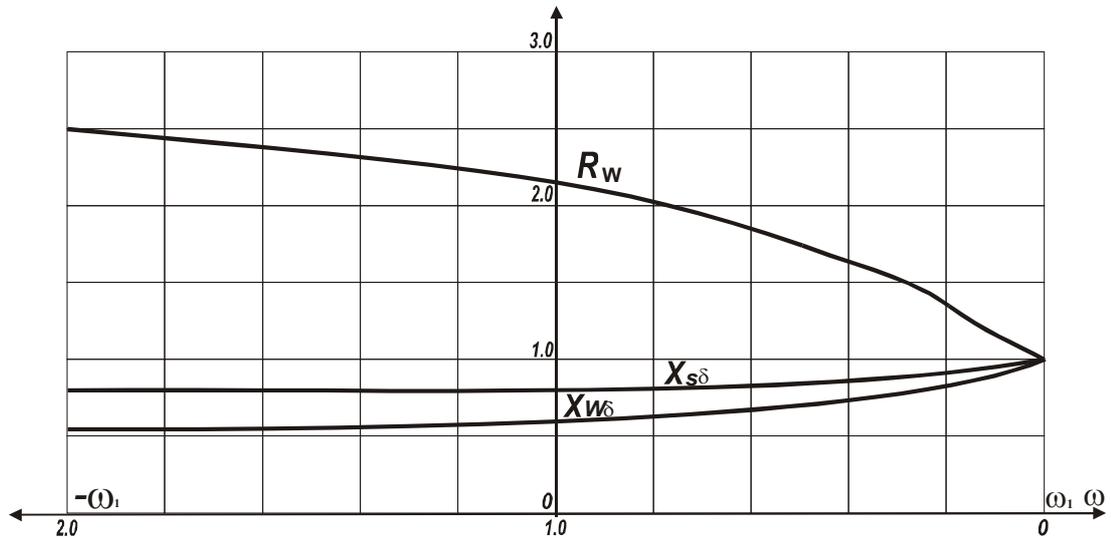
$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$$

Rozwiązanie układu równan stanu (14), (15) realizuje się przez całkowanie za pomocą maszyn cyfrowych, stosując np. zmiennokrokowa metode Runde'go-Kuttaya z modyfikacją Maultona.

Dobór parametrów układu zastępczego

Podczas przebiegów dynamicznych parametry indukcyjnych silników klatkowych R_w , X_w , X_s zmieniają się wraz ze zmianą poslizgu, na skutek wypierania prądu w pretach klatki i magnetycznego nasycania się nadzłobkowych części zębów (Rysunek 74).

Dla uzyskania dobrej zgodności pomierzonej oscylograficznie charakterystyki dynamicznej z obliczoną charakterystyką na FMC najwłaściwiej byłoby przyjmować do obliczeń parametry zmienne, zależne od poslizgu i prądu wirnika. Komplikuje to jednak znacznie realizację obliczeń. W praktyce przyjmuje się w związku z tym znaczne uproszczenia, zakładając stałe parametry silnika. Powstaje wówczas pytanie, które dobrać? - czy wartości parametrów odpowiadające początkowemu, końcowemu, czy też pośredniemu poslizgowi wirnika.



Rysunek 74

Przy obliczeniach statycznej charakterystyki momentu przyjmuje się stałe parametry odpowiadające poslizgowi i prądom znamionowym, gdyż dokładność tej części charakterystyki jest najmniej istotna w zakresie znamionowego obciążenia.

Dla dynamicznych przebiegów najlepszą zgodność w zakresie oscylacyjnych przebiegów momentu - pomiędzy mierzonymi oscylograficznie, a obliczonymi na EMC charakterystykami - uzyskuje się przy wartościach silnika odpowiadających zakresowi poslizgu, który przyjęto do obliczeń. Dlatego też w celu poznania oscylacyjnych przebiegów towarzyszących początkowej części stanu nieustalonego należy dobrać wartości parametrów silnika R_w , X_w' , X_s dla poslizgu odpowiadającego początkowej części dynamiki, tzn., że przy rozruchu dobiera się wartości parametrów przy poslizgu $s=1$, a przy nawrocie - wartości parametrów odpowiadające poslizgowi $s=2$.

Pomiary laboratoryjne

Ogledziny i pomiar rezystancji uzwojen

Przystępując do ćwiczenia należy zapoznać się z zespołem maszyn, ich danymi znamionowymi, układem połączeń uzwojen oraz dobrać aparaturę pomiarową i regulacyjną. Pomiar rezystancji uzwojen stojana wykonuje się prądem stałym, najczęściej metodą techniczną (woltomierza i amperomierza) lub metodą mostkową (Wheatstone'a albo Thomsona). Dla małych rezystancji stosuje się odpowiedni układ pomiarowy amperomierza i woltomierza lub mostek Thomsona.

Z kilku pomiarów przy różnych natężeniach prądu oblicza się wartość średnią fazowej rezystancji w temperaturze pomiaru t_p , a następnie przelicza się do temp. 75°C wg zależności oraz powiększa o 5% dla prądu przemiennego:

$$R_{s75} = 1,05 \cdot R_{sss} \frac{235 + 75}{235 + t_p}$$

Mozna też wyznaczyć z odpowiedniego pomiaru mocy i prądu silnika przy wyjętym wirniku i zasilaniu 3-faz. uzwojenia stojana małym napięciem przemiennym z prawie znamionowym prądem.

Do obliczeń dynamicznych w równaniach stanu podaje się rezystancje stojana R_s , wyrażoną w jednostkach względnych, tj. odniesioną do fazowej impedancji znamionowej Z_n wg założeń:

$$R_s = R_{s75} / Z_n$$

Pomiar biegu jałowego i rozdzielanie strat

Pomiar ten wykonuje się w celu określenia reaktancji uzwojenia stojana X_s jako równej reaktancji wejściowej maszyny oraz strat mechanicznych jako różnicy strat jałowych, strat w żelazie i strat w miedzi (jak w ćwiczeniach A1 i A2).

Reaktancje uzwojenia stojana $X_{so} = X_{s\delta} + X_m$ wyznacza się z pomiaru przy idealnym biegu jałowym lub mniej dokładnie przy normalnym biegu jałowym wg wzoru:

$$X_{so} = \sqrt{Z_o^2 - R_o^2} = \sqrt{\left(\frac{U_{Nf}}{J_{of}}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_o}{m_s \cdot J_{of}^2}\right)^2}$$

oraz wyraża się w jednostkach względnych (rowna współczynnikowi indukcyjności L_s)

$$X_s = X_{so} / Z_N$$

Nieznaczna zmiana reaktancji X_s w czasie rozruchu lub nawrotu nie ma istotnego wpływu na dokładność obliczeń charakterystyki dynamicznej silnika

Pomiary w stanie zwarcia

Parametry obwodu wirnika klatkowego najodpowiedniej byłoby wyznaczyć metodą rejestracji zanikającego prądu w obwodzie stojana przy nieruchomym wirniku i nienasyconym obwodzie magnetycznym silnika. Mniej dokładnie, ale prościej, wyznacza się parametry wirnika przy poślizgu $s=1$ z pomiaru w stanie zwarcia przy zahamowanym wirniku. Uzwojenie stojana zasilane jest obniżonym napięciem U_z tak, aby prądy I_z były prawie znamionowe $I_z \approx I_N$. Pomiar wykonuje się przy kilku skrajnych położeniach wirnika, przyjmując do obliczeń wartości średnie prądów i mocy. Przyjmując pewne uproszczenia ($R_{Fe} \approx 0$, $X_{s\delta} = X_s$) można posłużyć się uproszczonym układem zastępczym stanu zwarcia i określić impedancję zwarcia:

$$Z_z = R_z + jX_z = R_s + k^2 \cdot R_w + j(X_{s\delta} + k \cdot X_{w\delta})$$

oraz straty zwarcia:

$$P_z = m(R_s + k^2 \cdot R_w) \cdot I_{zf}^2$$

gdzie:

$$k = \frac{X_m}{X_s} = \frac{X_m}{X_{s\delta} + X_m}$$

Reaktancje zwarcia oblicza się z wzoru:

$$X_z = X\delta(1+k) = \sqrt{Z_z^2 - R_z^2} = \sqrt{\left(\frac{U_{zf}}{I_{zf}}\right)^2 - \left(\frac{P_z}{m_s \cdot I_{zf}^2}\right)^2}$$

oraz sprowadzona rezystancja wirnika przy $s=1$

$$R_w' = \frac{1}{k^2} \sqrt{Z_z^2 - X_{s\delta}^2(1+k)^2} - R_s$$

a w jednostkach względnych:

$$R_w = R_w' / Z_n$$

$$X_w = (X_{w\delta}' + X_m) / Z_n \cong (X_{s\delta} + X_m) / Z_n$$

Przy pomiarach w stanie zwarcia występuje bardzo szybkie nagrzewanie uzwojen ze względu na złe warunki chłodzenia silnika przy nieruchomym wirniku. Celem wykonania pomiarów w przybliżeniu, w tej samej temperaturze należy zacząć pomiary od wyższego zakresu napięć zasilających, a następnie przy niższych, odczekując pewien czas po każdym pomiarze. Czas odczytu nie powinien przekraczać kilku sekund.

Wyznaczenie momentu bezwładności wirnika

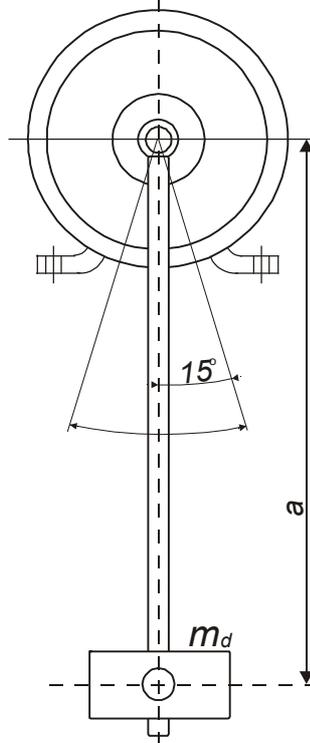
Moment bezwładności wirnika J maszyn elektrycznych wyznacza się w drodze obliczeń z wymiarów geometrycznych kształtu wirnika wg wzorów podanych w różnych poradnikach lub przez pomiar wg jednej z metod podanych, w normie PN-78/E-04252.

W praktyce pomiarów laboratoryjnych dla średnich i większych maszyn z łożyskami tocznymi korzysta się z dwóch metod:

- pomocniczego wahadła,
- rejestracji wybiegu.

Metoda pomocniczego wahadła polega na przymocowaniu do czołowej powierzchni wałka wirnika lub do pół-sprzęgła sztywniej nieważkiej dźwigni o długości "a" z dodatkową masą m_d o wielkości ca 1% masy wirnika (Rysunek 75). Długość dźwigni a i dodatkowa masa m_d pomocniczego wahadła powinny być tak dobrane, aby okres wahan T wynosił 2-6s.

Pomiary okresu wahan T wirnika wraz z pomocniczym wahadłem oraz oddzielnie samego wahadła pomocniczego T_o względem tej samej osi wykonuje się przy wychyleniu katowym w jedną stronę od pionu, nie przekraczającym 15° . W przypadku maszyn z pierścieniami ślizgowymi lub komutatorem należy podnieść szczotki w czasie pomiaru. Dla zapewnienia większej dokładności pomiaru okres wahan należy mierzyć przy przejściu dzwigni wahadła przez położenie pośrednie /rownowagi/, gdy jej prędkość jest największa.



Rysunek 75

Moment bezwładności wirujących części maszyny J oblicza się wg wzoru:

$$J = \frac{g \cdot a}{4 \cdot \pi^2} m_d (T - T_o) \cong \frac{a \cdot m_d}{4} (T - T_o)$$

lub bez dodatkowego pomiaru okresu oddzielnego wahadła pomocniczego:

$$J = a \cdot m_d \left(\frac{gT^2}{4 \cdot \pi^2} - a \right)$$

Metoda rejestracji wybiegu jest stosowana przy wyznaczaniu momentu bezwładności wirujących części maszyn elektrycznych bez konieczności ich demontażu. Maszyny rozpedza się do prędkości obrotowej nieco większej, około 10% od prędkości biegu jałowego, dla której wyznaczono wcześniej straty mechaniczne ΔP_{mech} przy ustalonej temperaturze łożysk.

Krzywa wybiegu $n=f(t)$ rejestruje się za pomocą tachoprądnicy jako krzywa jej napięcia $U=f(t)$ przy odłączeniu badanej maszyny od źródła zasilania. Na zarejestrowanym przebiegu, (Rysunek 76) kresli się styczna do krzywej w punkcie $n=n_o$ i odczytuje się długość podstycznej $T=t_k-t_o$ w s.

Moment bezwładności wirnika maszyny /nie wzbudzonej/ wyznacza się wg wzoru:

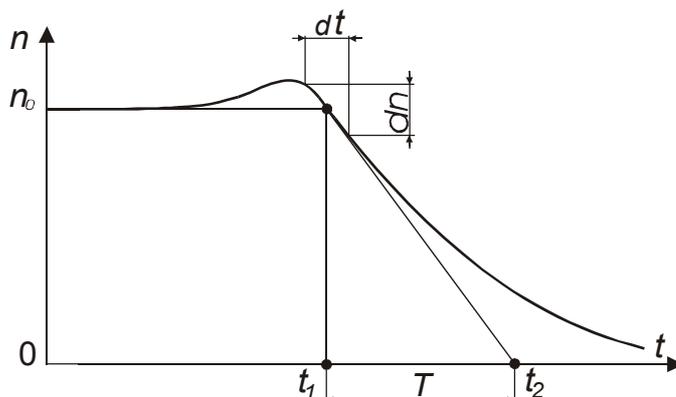
$$J = \frac{\Delta P_{mech}}{\omega_o} \cdot \frac{d}{d\omega} \cong \left(\frac{30}{\pi} \right)^2 \frac{\Delta P_{mech}}{n_o} \cdot \frac{dn}{dn}$$

lub praktycznie:

$$J = \Delta P_{mech} \cdot \frac{T}{\omega_o^2} = \left(\frac{30}{\pi} \right)^2 \frac{T}{n_o^2} \cdot \Delta P_{mech} \cong 91,2 \cdot \Delta P_{mech} \frac{T}{n_o^2}$$

którym:

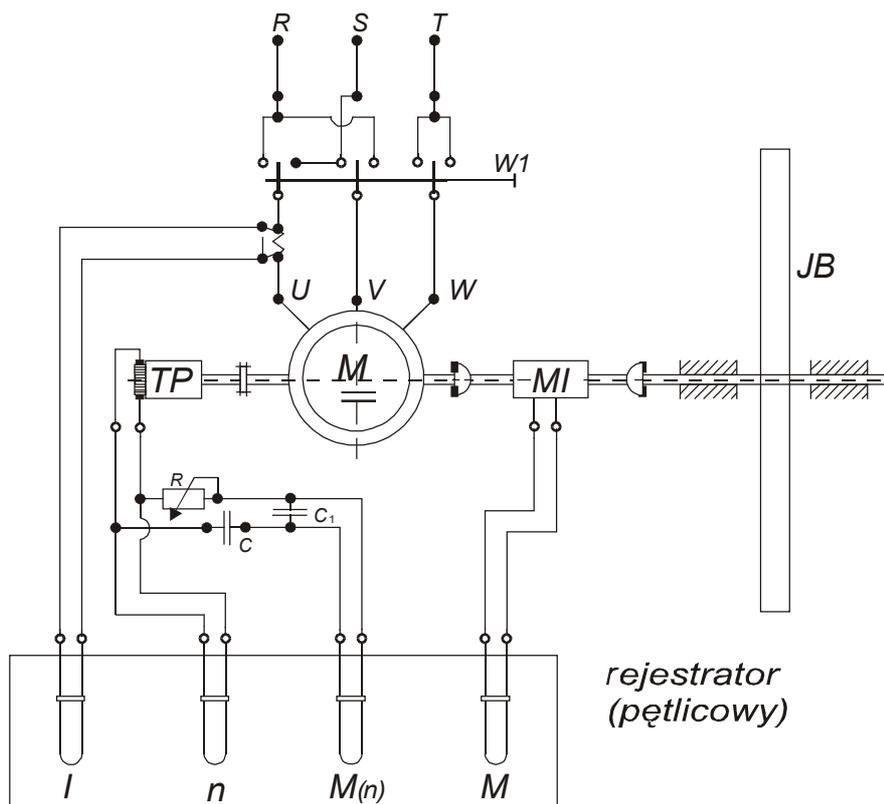
ΔP_{mech} - straty mechaniczne wraz z wentylacyjnymi, określone dla silników indukcyjnych wcześniej, ćwiczenie A1, przy prędkości n_0 ,
 $T=t_2-t_1$ - czas wybiegu odczytany z wykresu (Rysunek 76),
 ω_0, η_0 - prędkość katowa lub obrotowa silnika na biegu jałowym.



Rysunek 76

Rejestracja dynamicznego przebiegu

Układ połączeń przedstawiony poniżej (Rysunek 77) obejmuje indukcyjny silnik klatkowy M, do którego z lewej strony przyłączono tachoprądnice, a z prawej dwa wahliwe sprzęgła Cardana z miernikiem momentu MI posrodku oraz na końcu obciążeniowe koło bezwładności JB.



Rysunek 77

W czasie rozruchu lub nawrotu silnika rejestruje się za pomocą oscylografu pętlicowego lub innego rejestratora następujące przebiegi:

- J - przebieg prądu $J_s=f(t)$ w jednej z faz stojana,
- n - przebieg prędkości obrotowej $n=f(t)$ jako przebieg napięcia $U_{ip}=f(t)$ ze specjalnej tachoprądnicy TP,
- M_n - przebieg prądu ładowania kondensatora C w obwodzie różniczkującym, który odpowiada przebiegowi przyspieszenia silnika, a- przy stałym momencie bezwładności

odpowiada momentowi elektromagnetycznemu silnika $M_{el}=f(t)$. Pojemność kondensatora C w układzie różniczkującym powinna być tak dobrana, aby stała czasowa obwodu była rzędu 10^{-3} s oraz częstotliwość drgań własnych zastosowanej petlicy nie była mniejsza od 1,2 kHz, M - przebieg momentu obrotowego silnika $M=f(t)$ uzyskany z momentomierza indukcyjnego typu MI-5.

Oba przebiegi momentu otrzymano z dwóch różnych metod pomiarowych, które umożliwiają porównanie i zwiększają niezawodność pomiarową

Rozruch silnika następuje po załączeniu wyłącznika $W1$, a nawrot, po przełączeniu tegoż wyłącznika przy wirującym silniku. Dla ustalenia wartości amplitudy sygnałów rejestrowanych przebiegów prądu należy wykonać kilka wstępnych rozruchów badanego silnika, mierząc prąd J_r , J_o i czas rozruchu t_r , a na matowce oscylografu winno być określone dopuszczalne wychylenie plamki świetlnej.

Również podobnie należy ustalić zakresy wychylenia petlic rejestrowanych przebiegów M , i $n=f(t)$. Przesuw taśmy oscylografu V_p należy tak dobrać, aby długość całego oscylogramu zawierała się w granicach 150-200 mm /tj. $1=V_p*t_r$ /. Rejestrator należy włączyć tuż przed włączeniem silnika do sieci.

Pytania kontrolne.

1. Wyjaśnić pojęcie dynamicznego przebiegu silnika indukcyjnego.
2. Jaki wpływ mają zmiany parametrów silnika i układu napędowego na przebieg dynamicznej charakterystyki.
3. Porównać układy zastępcze stanu ustalonego i dynamicznego.
4. Jak wyznacza się parametry układu zastępczego silnika indukcyjnego.
5. Określić elektromagnetyczną i elektromechaniczną stałą czasową oraz podać występujące w praktyce ich wielkości.
6. Podać sposoby wyznaczenia momentu bezwładności wirnika i układu.
7. Wyjaśnić wpływ zmiany parametrów wirnika i momentu bezwładności na przebiegi oscylacyjne charakterystyki dynamicznej.

Cwiczenie S1: Praca samotna prądnicy synchronicznej

Wprowadzenie teoretyczne

Układ zastępczy i wykres wskazowy

Wirnik prądnicy synchronicznej wzbudzony i napędzany z prędkością obrotową n wytwarza wirujące pole magnetyczne, które w trójfazowych uzwojeniach twornika indukuje symetryczne napięcia o częstotliwości $f = np/60$ i wartości skutecznej:

$$E_f = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w k_u \Phi_{\max}$$

gdzie:

w - ilość zwojów uzwojenia twornika,

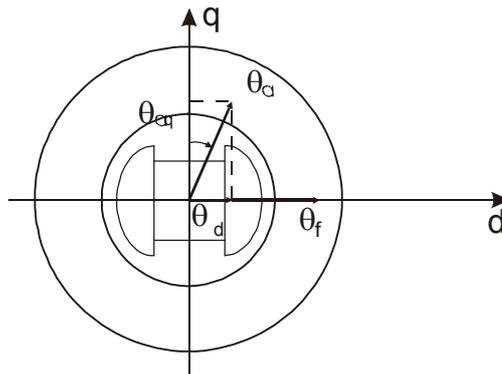
k_u - współczynnik uzwojenia,

Φ_{\max} - maksymalna wartość strumienia skojarzonego z twornikiem, wytworzonego przez uzwojenie wzbudzenia.

Wektor tego napięcia na wykresie wskazowym leży na osi q .

Po obciążeniu prądnicy prąd płynący w tworniku wywołuje przepływ Φ_a wirujący synchronicznie z wirnikiem (Rysunek 78).

Strumień wytworzony tym przepływem, nazywany oddziaływaniem twornika, rozpatruje się w maszynach jawnobiegunowych oddzielnie w osi podłużnej d i osi poprzecznej q ze względu na niesymetrię obwodu magnetycznego.



Rysunek 78 Przepływy w maszynie jawnobiegunowej: θ_f - przepływ wzbudzenia, θ_a - przepływ twornika

$$\Phi_{ad} = \Theta_{ad} \cdot \lambda_d = \Theta_a \cdot \lambda_d \cdot \sin \psi$$

$$\Phi_{aq} = \Theta_{aq} \cdot \lambda_q = \Theta_a \cdot \lambda_q \cdot \cos \psi$$

gdzie:

λ_d - przewodność obwodu magnetycznego w osi d ,

λ_q - przewodność obwodu magnetycznego w osi q ,

ψ - kąt pomiędzy osi q a wektorem przepływu twornika Θ . Jego wartość zależy od charakteru i wielkości obciążenia maszyny.

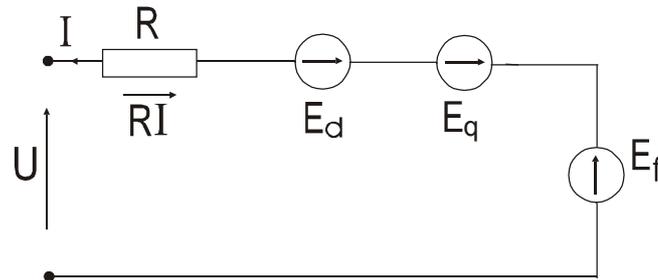
Strumień Φ_{ad} indukuje w osi q (opóźnienie o 90°) napięcie E_{ad} . Analogicznie strumień Φ_{aq} indukuje w osi d napięcie E_{aq} .

$$\begin{aligned} E_{ad} &= jX_{ad}I_d & I_d &= I \sin \psi \\ E_{aq} &= jX_{aq}I_q & I_q &= I \cos \psi \end{aligned} \quad \text{gdzie:}$$

X_{ad} i X_{aq} są reaktancjami oddziaływania twornika odpowiadającymi przewodnościom magnetycznym λ_d i λ_q . Po powiększeniu ich wartości o reaktancje rozproszenia twornika X_δ , wynikająca z istnienia strumieni rozproszenia wokół zębów twornika, otrzymuje się tzw. reaktancje synchroniczne maszyny: podłużną X_d i poprzeczną X_q . Zatem całkowite napięcie indukowane wskutek przepływu prądu w tworniku wynosi:

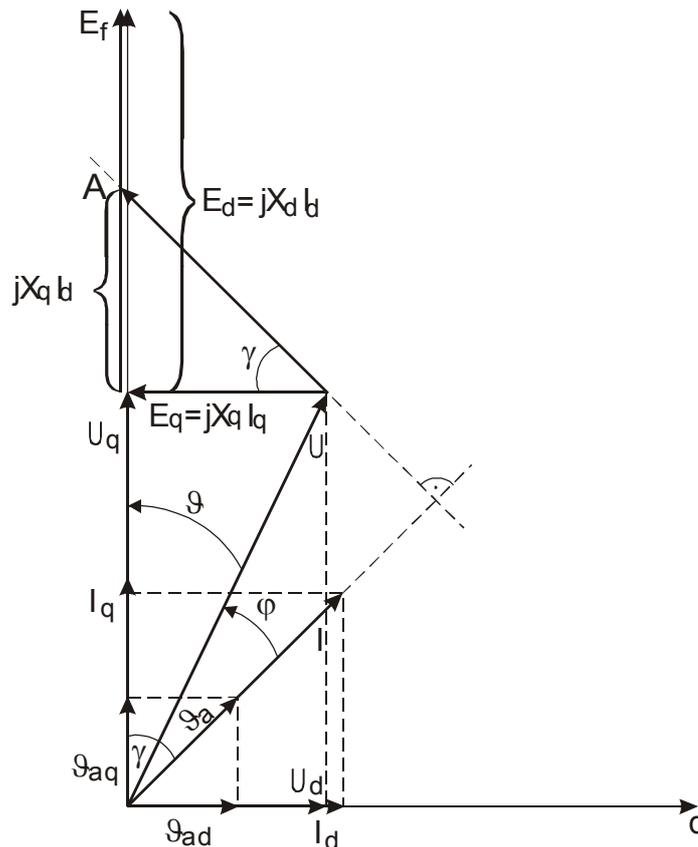
- w osi poprzecznej q $E_d = jX_d I_d$
- w osi podłużnej d $E_q = jX_q I_q$

W maszynach jawnobiegunowych $X_d \sim X_q$, w maszynach cylindrycznych $X_d = X_q$.



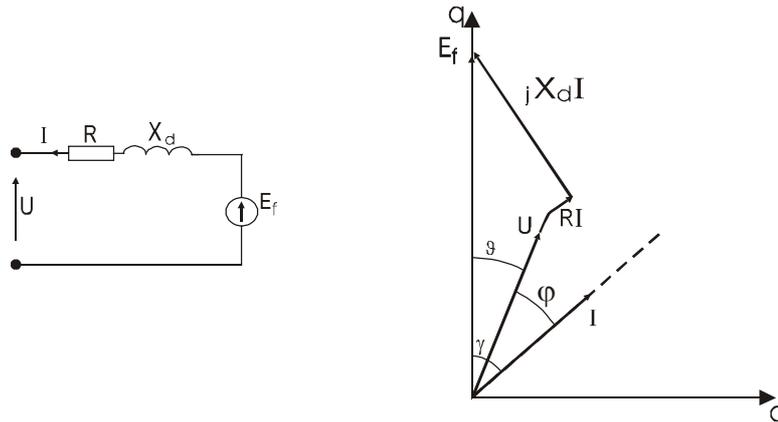
Rysunek 79 Układ zastępczy maszyny jawnobiegunowej

Układ zastępczy prądnicy jest podstawą do budowy jej wykresu wskazowego przy znanych wartościach $U, I, \cos\phi, X_d, X_q$ /Rysunek 80/. Jego konstrukcję należy rozpocząć od wektorów U oraz I tworzących znany kąt ϕ . Następnie na prostej prostopadłej do przechodzącej przez koniec wektora U , odmierza się wektor $jX_q I$ wyznaczający punkt A , a tym samym kierunek wektora E_f oraz kąt mocy ϑ i kąt ψ . Jego znajomość pozwala na rozkład wektora I na składowe I_d, I_q , a to z kolei na wykreślenie pozostałych elementów wykresu. Dla ułatwienia pomija się w konstrukcji rezystancje twornika R .



Rysunek 80 Wykres wskazowy prądnicy jawnobiegunowej przy obciążeniu rezystancyjno - indukcyjnym

Konstrukcja wykresu wskazowego prądnicy cylindrycznej jest łatwiejsza dzięki równości reaktancji synchronicznych i nie wymaga objaśnienia.

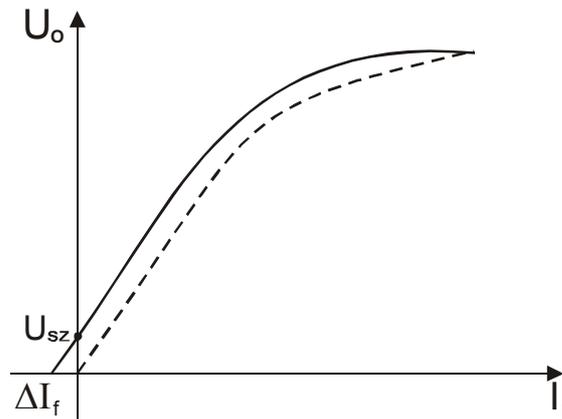


Rysunek 81 Układ zastępczy prądnicy cylindrycznej oraz jej wykres wskazowy przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym

Pomiary laboratoryjne

Pomiary w stanie jałowym

Pomiary stanu jałowego służy do wyznaczenia tzw. charakterystyki stanu jałowego. Jest to zależność napięcia międzyprzewodowego twornika od prądu wzbudzenia nieobciążonej prądnicy napędzanej znamionową prędkością obrotową $U_o = f(I_f)$ przy $n = n_N$.



Rysunek 82 Charakterystyka biegu jałowego

Pomiar rozpoczyna się od prądu wzbudzenia, przy którym napięcie wynosi $1,3 U_N$. Następnie zmniejsza się go do zera, mierząc napięcie twornika. Otrzymana krzywa jest w przybliżeniu zgodna z charakterystyką magnesowania obwodu magnetycznego. Napięcie U_{sz} przy przerwaniu obwodu wzbudzenia jest wywołane magnetyzmem szczątkowym. Właściwą charakterystykę stanu jałowego otrzymuje się, przesuwając charakterystykę zmierzona, w prawo o wartości ΔI_f / Rysunek 82/. Gdy z różnych względów trzeba wykonać pomiary przy prędkości różnej od znamionowej, zmierzone napięcie U_o przelicza się na właściwe wg proporcji:

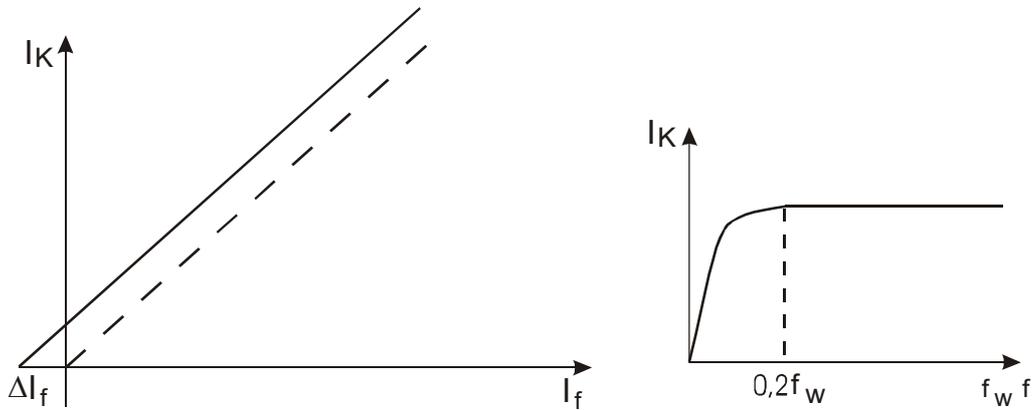
$$U_o = U'_o \frac{n_N}{n} = U'_o \frac{f_N}{f}$$

Pomiary w starcie zwarcia symetrycznego

Pomiary te służy do wyznaczenia charakterystyki zwarcia ustalonego prądnicy. Jest to zależność ustalonego prądu płynącego w zwartych uzwojeniach twornika od prądu wzbudzenia $I_k = f(I_f)$ przy stałej prędkości obrotowej $n > 0,2 n_N$.

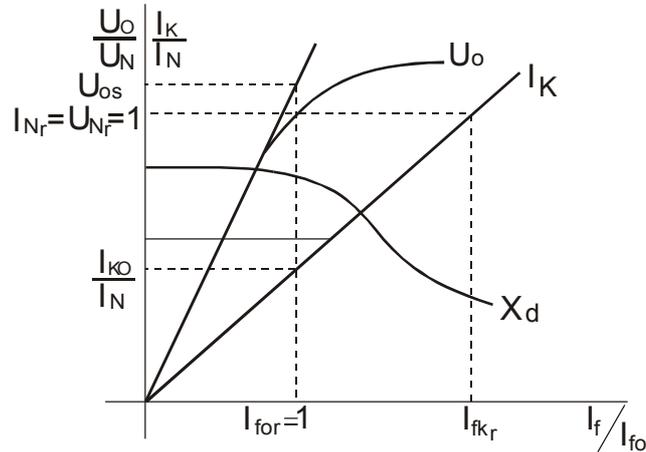
Zaciski twornika niewzbudzonej maszyny zwiera się przewodami o jednakowej, jak najmniejszej rezystancji. Amperomierze wpięte w każdą fazę powinny być identyczne, gdyż niesymetria zwarcia pociąga za sobą pojawienie się składowej przeciwnej prądu zwarcia, której strumień przemagnesowuje wirnik z częstotliwością $2f$, powodując jego przegrzanie. Po uruchomieniu prądnicy pomiary rozpoczyna się od prądu wzbudzenia, przy którym prąd

twornika przekracza nieco wartość znamionową; po czym ze względu na liniowość charakterystyki wystarczy przeprowadzić pomiary dla 3 - 5 punktów. Wyznaczona charakterystyka na skutek magnetyzmu szczałkowego nie przechodzi przez początek układu. Właściwą charakterystykę otrzymuje się, przesuwając zmierzona w prawo o ΔI_f .

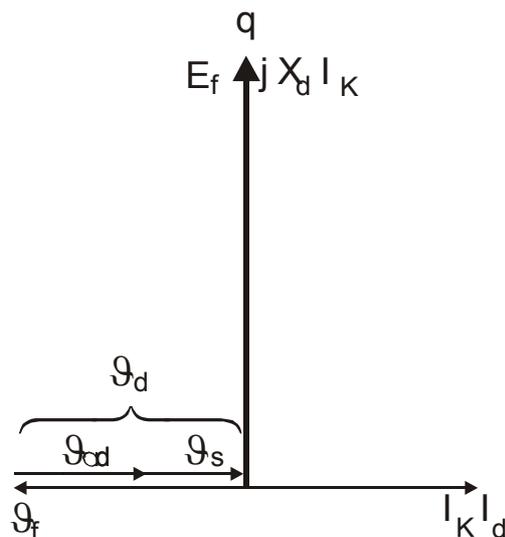


Rysunek 83 Charakterystyka zwarcia

Charakterystyki biegu jałowego i zwarcia rysuje się zwykle w jednym układzie współrzędnych w jednostkach względnych.



Rysunek 84 Charakterystyki biegu jałowego zwarcia w jednostkach względnych



Rysunek 85 Wykres wskazowy w stanie zwarcia

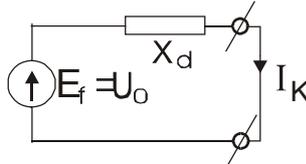
I_{fo} - znamionowy prąd wzbudzenia biegu jałowego, czyli taki prąd wzbudzenia, przy którym na biegu jałowym napięcie jest znamionowe,

I_{fk} - znamionowy prąd wzbudzenia przy zwarcu, czyli taki prąd wzbudzenia, przy którym w stanie zwarcia prąd twornika jest znamionowy.

Iloraz znamionowego prądu wzbudzenia biegu jałowego i znamionowego prądu wzbudzenia przy zwarcu nazywa się stosunkiem zwarcia:

$$k_k = \frac{I_{f0}}{I_{fk}} = \frac{I_{ko}}{I_N} = \frac{1}{I_{fk_r}} - I_{ko_r}$$

Im jest on większy, tym większa jest przeciążalność prądnicy. Praktycznie $k_k = 0,45 \div 1,4$, przyjmując wartości mniejsze dla maszyn dużych. W oparciu o powyższe charakterystyki można również wyznaczyć reaktancję synchroniczną X_d . Zgodnie z rysunkiem 86:



Rysunek 86 Układ zastępczy prądnicy w stanie zwarcia

$$I_k = \frac{U_o}{X_d}, \quad X_d = \frac{U_o}{I_k}$$

gdzie:

U_o , I_k - wartości napięcia biegu jałowego i prądu zwarcia odczytane z charakterystyk przy tym samym prądzie wzbudzenia.

Należy zwrócić uwagę, że wskutek nasycenia się obwodu magnetycznego wartość X_d maleje w miarę wzrostu prądu wzbudzenia /Rysunek 84/. Dlatego też dla obliczenia jej wartości ekstrapoluje się liniowo charakterystykę biegu jałowego, rysując styczną, wg której narastałoby napięcie gdyby nie występowało zjawisko nasycenia. Wtedy:

$$X_d = \frac{U_{os}}{I_{ko}} = \frac{U_{os}}{k_k I_N}$$

Natomiast wartość X_d przy nasyceniu odpowiadającym napięciu znamionowemu nazywa się reaktancją synchroniczną nasyconą X_{dn} .

$$X_{dn} = \frac{U_N}{I_{ko}}, \text{ a w jednostkach względnych } X_{dn_r} = \frac{1}{I_{ko_r}} = I_{fk_r} = \frac{1}{k_k}$$

Pomiary w stanie obciążenia

Wyznaczenie charakterystyk zewnętrznych.

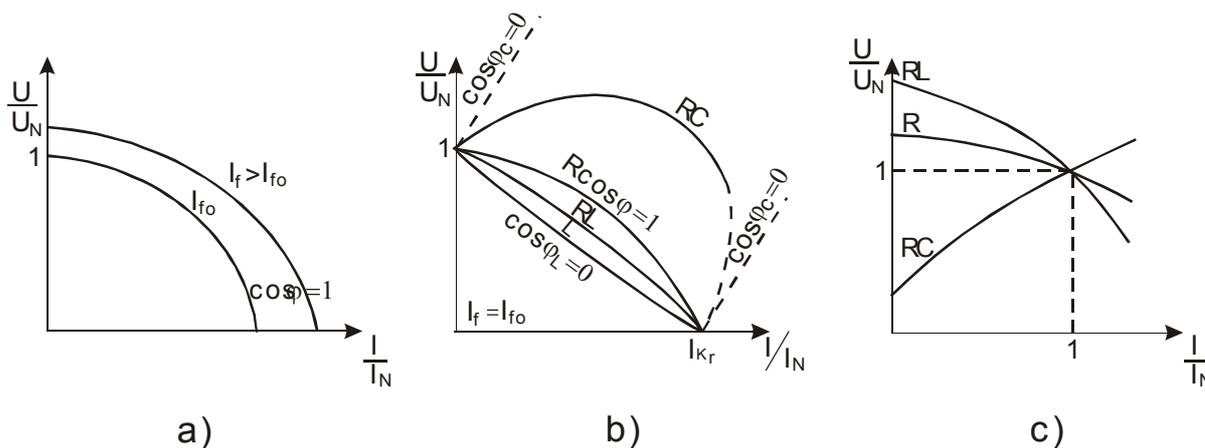
Charakterystyki zewnętrzne prądnicy synchronicznej służą do oszacowania wielkości zmian napięcia prądnicy przy przejściu od stanu jałowego do określonego obciążenia przy stałym prądzie wzbudzenia i stałym współczynniku mocy oraz znamionowej prędkości obrotowej.

$$U = f(I) \text{ przy } I_f, \cos\varphi = \text{const.}, n = n_N$$

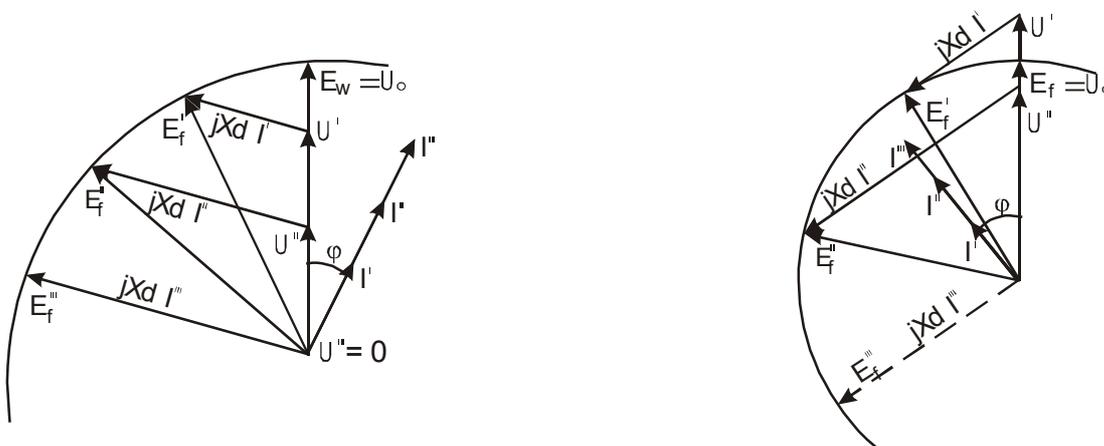
W zależności od sposobu wykonywania pomiarów otrzymuje się trzy różne rodzaje charakterystyk zewnętrznych /Rysunek 87/.

Poszczególne punkty pracy prądnicy w trakcie pomiarów ilustrują wykresy wskazowe podane dla uproszczenia dla maszyny cylindrycznej.

Indeksem '''' oznaczono stan zwarcia prądnicy /Rysunek 88/.



Rysunek 87 Rodziny charakterystyk zewnętrznych: a - dla różnych wartości prądu wzbudzenia przy stałym współczynniku mocy, b - dla różnych współczynników mocy przy stałym prądzie wzbudzenia równym I_{f0} , c - dla różnych współczynników mocy i różnych wartości prądu wzbudzenia zapewniających znamionowe napięcie prądnicy przy znamionowym prądzie obciążenia



Rysunek 88 Wykresy wskazowe ilustrujące poszczególne punkty pracy prądnicy cylindrycznej przy wyznaczaniu charakterystyk zewnętrznych: a - przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym, b - przy obciążeniu rezystancyjno-pojemnościowym

Wielkość określona wzorem:

$$\delta_U\% = \frac{U_o - U_N}{U_N} 100\%$$

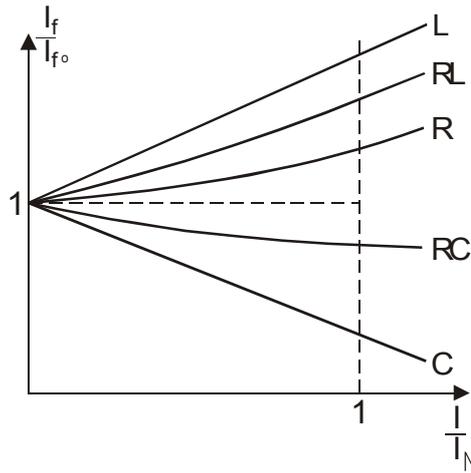
gdzie:

U_o - napięcie przy $I = 0$ i $I_f = I_{fN}$ nazywa się znamionową zmiennością napięcia. Informuje ona o wielkości zmiany napięcia występującej przy odciążeniu prądnicy, od obciążenia znamionowego do stanu jałowego. Jej wartość wynosi około $40 \div 50\%$ i jest większa dla maszyn cylindrycznych.

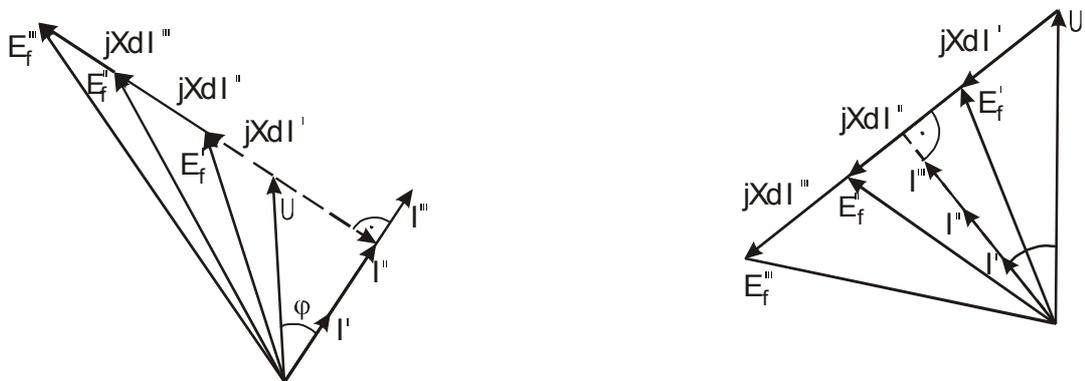
Wyznaczenie charakterystyk regulacji.

Charakterystyki regulacji, określają jak należy regulować prąd wzbudzenia przy zmianach obciążenia prądnicy, aby utrzymać stałą wartość napięcia na jej zaciskach.

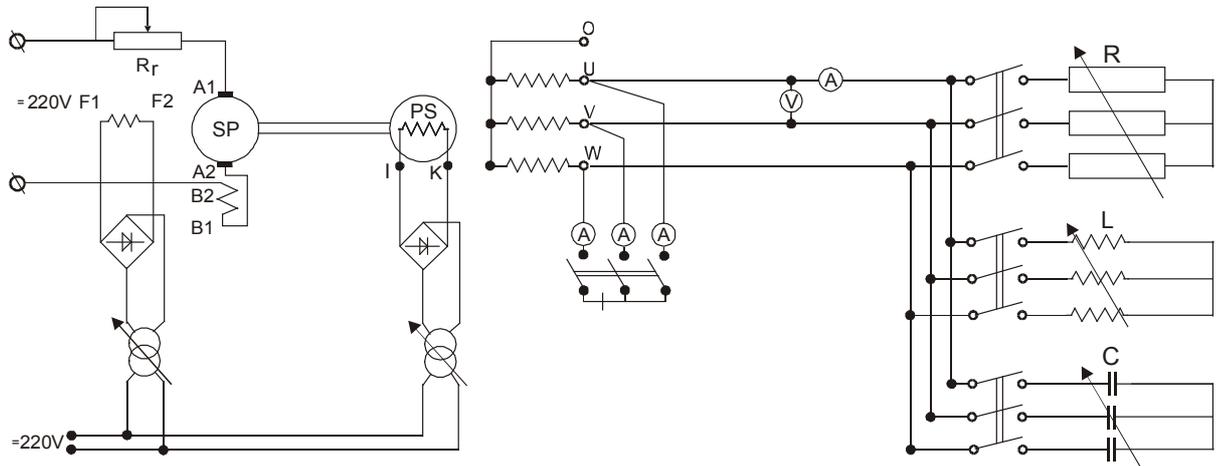
$$I_f = f(I) \text{ przy } U, \cos\phi = \text{const.}, n = n_N$$



Rysunek 89 Rodzina charakterystyk regulacji dla różnych współczynników mocy obciążenia



Rysunek 90 Wykresy wskazowe ilustrujące poszczególne punkty pracy prądnicy cylindrycznej przy wyznaczaniu charakterystyk regulacji: a - przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym, b - przy obciążeniu rezystancyjno-pojemnościowym

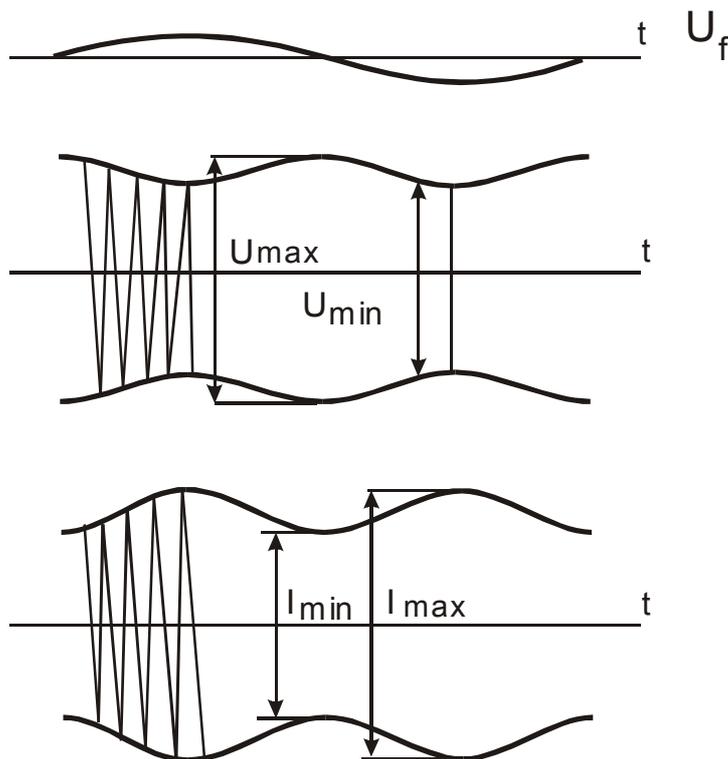


Rysunek 91 Schemat układu pomiarowego do badania prądnicy synchronicznej, PS - prądnica synchroniczna, SP- silnik napędzający

Pomiar reaktancji synchronicznych X_d , X_q metoda małego poslizgu

Reaktancje X_d , X_q wyznacza się najczęściej metoda małego poslizgu. Pomiar wykonuje się w stanie, w którym wirnik wiruje z niewielkim poslizgiem względem pola wirującego twornika. Jest to osiągnięte przy zasilaniu twornika, napięciem symetrycznym trójfazowym i napędzaniu wirnika prędkością podsynchroniczną. Wtedy przy rozwartym uzwojeniu wzbudzenia $I_E=0$ sinusoidalny prąd twornika o częstotliwości f jest modulowany przebiegiem sinusoidalnym o częstotliwości $2sf$, wywołanym niesymetrią obwodu magnetycznego. W momencie, gdy os

pola wirującego pokrywa się z osią podłuzą wirnika, wartość skuteczna tego prądu osiąga minimum, a w momencie, gdy osł pola wirującego pokrywa się z osią poprzeczną maximum.



Rysunek 92 Przebieg prądu i napięcia przy pomiarze X_d , X_q metoda małego poslizgu, U - napięcie indukowane w uzwojeniu wzbudzenia

Znajomość tych maksymalnych i minimalnych wartości skutecznych prądu pozwala obliczyć szukane reaktancje na podstawie następujących zależności wynikających z wykresów wskazowych dla $\psi = 90^\circ$ i $\psi = 0^\circ$.

$$X_d = \frac{U_{f \max}}{I_{\min}}$$

$$X_q = \frac{U_{f \min}}{I_{\max}}$$

$U_{f \max}$ - wartość skuteczna napięcia fazowego w chwili, gdy prąd osiąga minimum,

$U_{f \min}$ - wartość skuteczna napięcia fazowego w chwili, gdy prąd osiąga maximum.

Poprawne wyznaczenie wartości I_{\min} , I_{\max} jest z reguły utrudnione z powodu dwóch różnych wartości następujących po sobie maksimum i minimum prądu.

Pierwszym czynnikiem wywołującym te różnice są prądy indukowane w klatce tłumiącej i litych elementach wirnika. Są one przyczyną modulacji prądu twornika przebiegu o częstotliwości f_s , zanikającym przy poslizgu dążącym do zera. Jego wpływ eliminuje się poprzez przeprowadzanie pomiarów przy możliwie najmniejszym poslizgu, $s < 1\%$.

Drugim czynnikiem jest wpływ napięcia remanentu $E = E_o \neq 0$. Jeśli $E_o > 0,3 U_f$, to konieczne jest rozmagnesowanie wirnika prądem o niskiej częstotliwości. Jeśli $E_o < 0,3 U_f$, wystarczy uwzględnić poprawkę w sposób następujący:

$$X_d = \frac{U_{f \max}}{I_{\min sr}} \quad \text{gdzie} \quad I_{\min sr} = \frac{I_{\min 1} + I_{\min 2}}{2}$$

$$X_q = \frac{U_{f \min}}{I_{\max sr}} \quad \text{gdzie} \quad I_{\max sr} = \sqrt{\left(\frac{I_{\max 1} + I_{\max 2}}{2}\right)^2 - \left(\frac{E_o}{X_d}\right)^2}$$

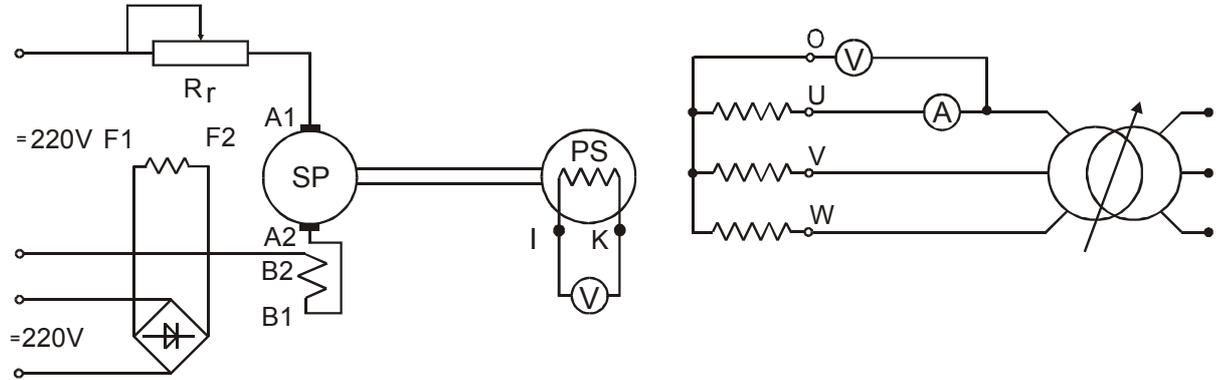
E_o - napięcie fazowe remanentu.

W przypadku, gdy otrzymana wartość X_d różni się od wartości X_d wyznaczonej z charakterystyk biegu jałowego i zwarcia, należy przyjąć, że pomiar metodą małego poslizgu jest obciążony błędem, a X_q określić wg proporcji:

$$X_q = X_{q1} \frac{X_d}{X_{d1}}$$

X_{d1}, X_{q1} - wartości z pomiaru metody małego poslizgu,

X_d - wartość otrzymana z charakterystyk biegu jałowego i zwarcia.



Rysunek 93 Schemat układu pomiarowego do pomiaru X_d, X_q

Kolejność czynności podczas pomiarów jest następująca:

- zasilic twornik napięciem symetrycznym trójfazowym o częstotliwości znamionowej i wartości skutecznej rzędu $1/10 \pm 20\% U_N$, tak aby prąd nie przekraczał wartości znamionowej;
- rozpedzac powoli wirnik, kontrolując wskazania woltomierza wpiętego w obwód uzwojenia wzbudzenia. Wzrost napięcia indukowanego w uzwojeniu wzbudzenia ze wzrostem prędkości obrotowej świadczy o przeciwnym kierunku wirowania wirnika względem pola wirującego. Należy wtedy zmienić kierunek obrotów wirnika lub zmienić kolejność faz twornika, Jeśli wskazania woltomierza maleją, kierunki wirowania są zgodne;
- doprowadzić wirnik do prędkości podsynchronicznej $f/s \leq 0,01$;
- zmierzyć $I_{max1}, I_{max2}, I_{min1}, I_{min2}, U_{fmax}, U_{fmin}$;
- odłączyć zasilanie twornika i zmierzyć wartość napięcia remanentu;
- przeprowadzić obliczenia wg podanych wzorów.

Pytania i zadania kontrolne

1. Wykresy wskazowe prądnicy jawnobiegunowej dla obciążeń o różnym charakterze.
2. Metoda wyznaczania reaktancji X_d i stosunku zwarcia ich z charakterystyk biegu jałowego i zwarcia.
3. Zależność reaktancji X_d od prądu wzbudzenia I_f , czyli od stopnia nasycenia obwodu magnetycznego maszyny.
4. Trzy metody pomiarowego wyznaczania charakterystyk zewnętrznych.
5. Uzasadnienie za pomocą wykresów wskazowych kształtu charakterystyk zewnętrznych i regulacji.
6. Zasada pomiaru reaktancji X_d, X_q metodą małego poslizgu.
7. Czynniki mające wpływ na dokładność metody małego poslizgu oraz sposoby ich eliminacji.
8. Wykresy wskazowe maszyny jawnobiegunowej przy poprzecznym i podłużnym położeniu wirnika.
9. Dla prądnicy synchronicznej jawnobiegunowej o danych: $S_N = 30\text{kVA}, U_N = 400\text{V}, f_N = 50\text{Hz}, \cos\phi_N = 0,8, X_d = 8,8, X_q = 4,8\Omega, I_{fN} = 16,6\text{A}$ obliczyć prąd wzbudzenia biegu jałowego I_{fo} .

Cwiczenie S2: Silnik synchroniczny jawnobiegunowy

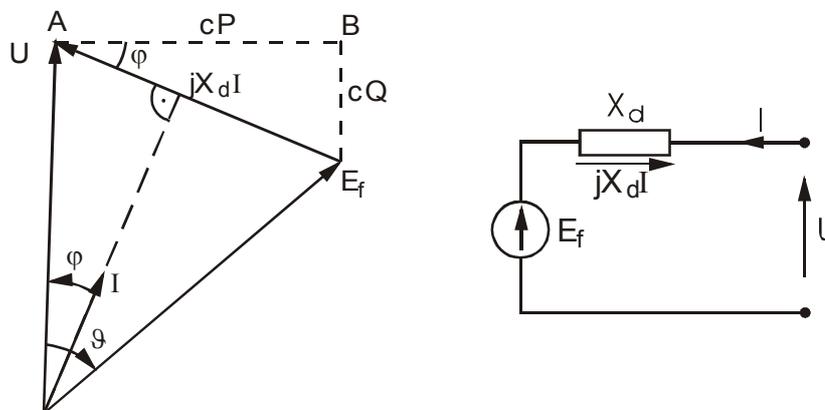
Wprowadzenie teoretyczne

Powstawanie momentu elektromechanicznego

Za punkt wyjścia zostaje przyjęty silnik cylindryczny bezstratny w stanie biegu jałowego. Uzwojenia twornika wytwarzają wtedy wirujące pole magnetyczne, a wzbudzany i napędzony wcześniej wirnik wiruje synchronicznie z tym polem. Kat między wektorem napięcia zasilającego \vec{U} a indukowanego \vec{E} wynosi 0. Jeżeli prąd wzbudzenia jest wtedy równy prądowi wzbudzenia biegu jałowego I_{f0} , to wektory \vec{U} i \vec{E} są równe, a między maszyną i siecią zasilającą nie płynie prąd (Rysunek 94).



Rysunek 94: Wykres wskazowy silnika cylindrycznego w stanie jałowym



Rysunek 95: Wykres wskazowy i trójkąt mocy silnika cylindrycznego obciążonego momentem mechanicznym

Obciążenie silnika momentem mechanicznym spowoduje przyhamowanie wirnika względem wirującego pola stojana. Kat między osią tego pola a osią poprzeczną wirnika nie będzie już równy zero, a zatem i wektor napięcia indukowanego \vec{E}_f opóźni się względem wektora \vec{U} o pewien kat ϑ (Rysunek 95). Pod wpływem wektorowej różnicy tych napięć popłynie prąd I taki, aby był spełniony warunek $\vec{E}_f + jX_d \vec{I} \sim \vec{U}$, a jednocześnie, aby moc czynna pobierana przez silnik zrownała się z mocą obciążenia. Moc tę określa się z tak zwanego trójkąta mocy ΔABC , którego boki są proporcjonalne do mocy czynnej, biernej i pozornej (Rysunek 95). Na jego podstawie moment elektryczny wytworzony przez silnik, wynosi:

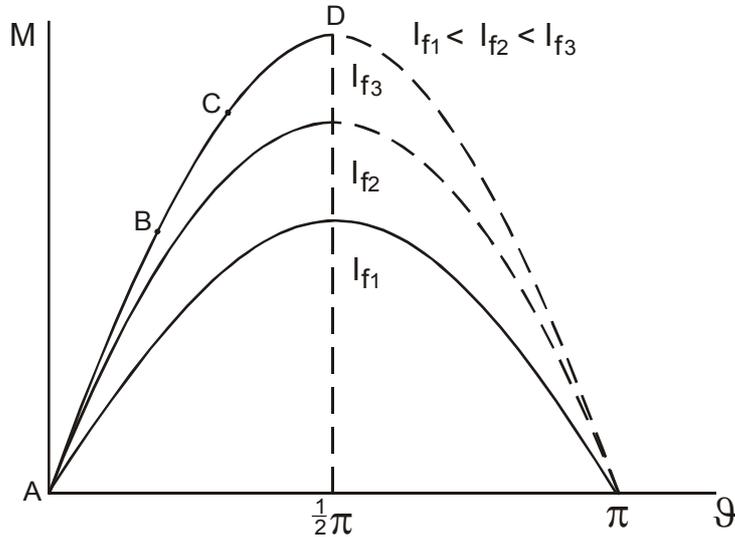
$$M = \frac{P_{od}}{\omega} \cong \frac{P_p}{\omega} = \frac{3UI \cos \varphi}{\omega} = \frac{3U}{X_d \omega} X_d I \cos \varphi = \frac{3U}{\omega X_d} \sin \vartheta$$

gdzie:

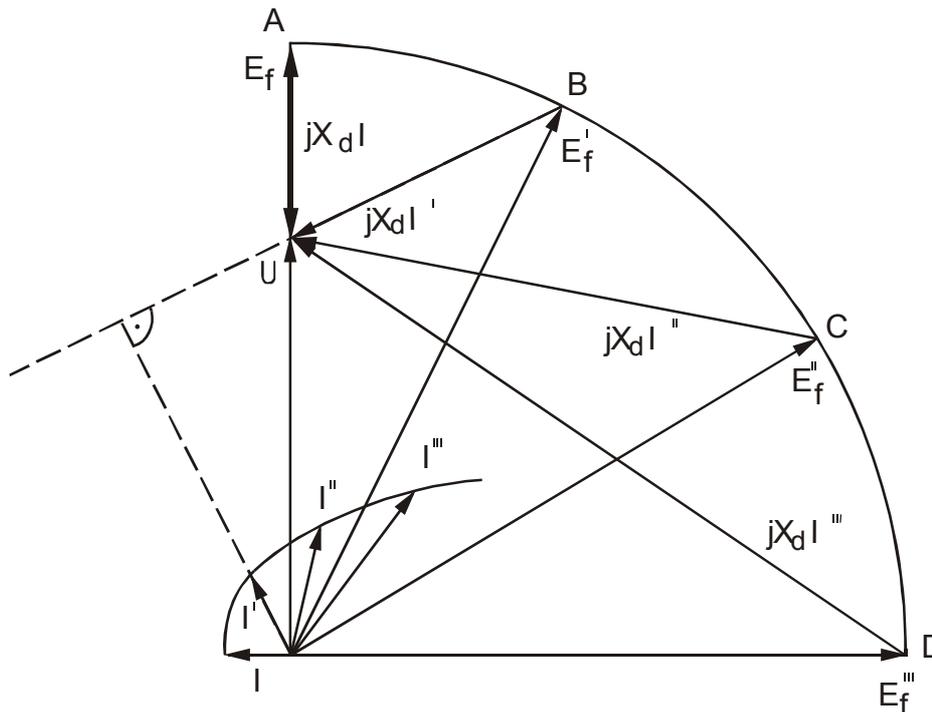
ω - katowa prędkość synchroniczna,

U- napięcie fazowe, I - prąd fazowy,
 P_{od} - moc mechaniczna oddana;
 P_p - moc czynna pobrana.

Wykres zależności (1) jest charakterystyka katowa silnika. Ich rodzinę dla różnych prądów wzbudzenia przedstawia - Rysunek 96 - . Wpływ zmian mocy obciążenia przy $I_f = \text{const}$. na wykres wskazowy silnika ilustruje - Rysunek 97 - .



Rysunek 96: Charakterystyki katowe silnika cylindrycznego



Rysunek 97: Wykresy wskazowe silnika - przy $I_f = \text{const}$, $P = \text{var}$

Dla $\vartheta = 90^\circ$ moment osiąga wartość maksymalną:

$$M_{\max} = \frac{3UE_f}{\omega X_d}$$

wobec tego przeciążalność:

$$b_N = \frac{M_{\max}}{M_N} = \frac{1}{\sin \vartheta_N} = \frac{I_{fN} U_N}{I_{fo} X_d I_d \cos \varphi_N}$$

Dotychczasowe rozważania dotyczyły maszyny cylindrycznej. W maszynach jawnobiegunowych oprócz momentu synchronicznego M_s występuje jeszcze moment reluktancyjny M_r , wywołany różnicą reluktancji obwodu magnetycznego w osi podłużnej i poprzecznej. W oparciu o zależności wynikające z rysunku (Rysunek 98):

$$I \cos \varphi = I_q \cos \vartheta + I_d \sin \vartheta$$

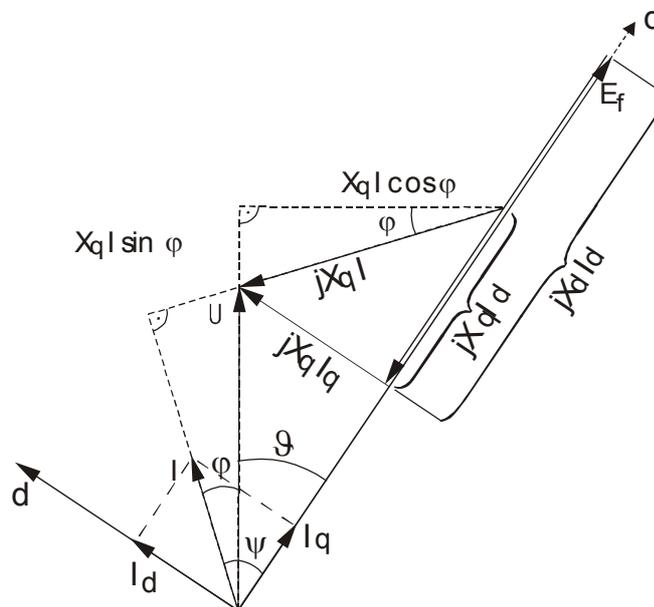
$$x_q I_q = U \sin \vartheta$$

$$x_d I_d = E_f - U \cos \vartheta$$

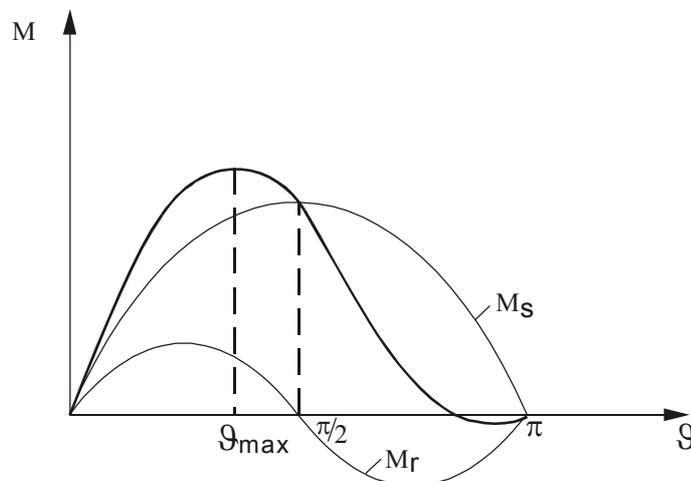
otrzymuje się następujące wyrażenia na całkowity moment silnika jawnobiegunowego:

$$M = 3 \frac{UI}{\omega} \cos \varphi = \frac{3UE_f}{\omega X_d} \sin \vartheta + \frac{3U^2}{2\omega} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\vartheta$$

Moment reluktancyjny stanowi około (15 - 25 %) całkowitego momentu i zwiększa przeciążalność silnika o około 20 % (Rysunek 99).



Rysunek 98: Wykres wskazowy silnika jawnobiegunowego prze wzbudzonego



Rysunek 99: Charakterystyki katowe silnika jawnobiegunowego

Przeciążalność:

$$b_N = \frac{M_{\max}}{M_N} = \frac{E_{fN} \sin \vartheta_{\max}}{I_N X_d \cos \varphi_N} + \frac{x_d - x_q}{2x_d \cos \varphi_N} \sin 2\vartheta_{\max}$$

gdzie:

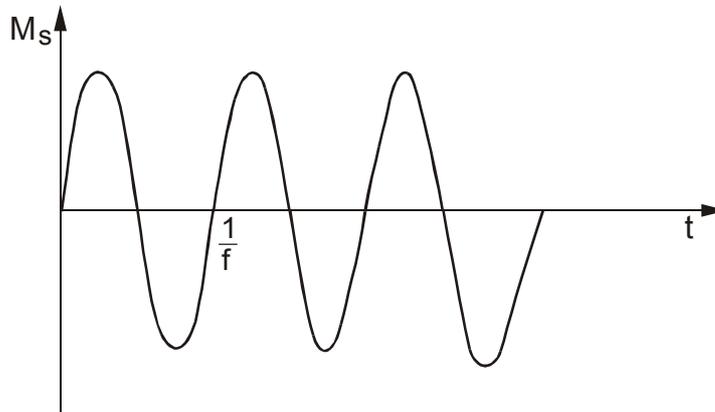
$$\vartheta_{\max} = \arccos \frac{X_q E_{fN} + \sqrt{(U_N X_q)^2 + 8U_N^2 (x_d - x_q)^2}}{4U_N [x_d - x_q]}$$

a

$$E_{fN} = \frac{I_{fN}}{I_{f0}} \cdot U_N$$

Rozruch asynchroniczny

Z zasady działania silnika synchronicznego wynika jego niezdolność do samodzielnego rozruchu. Przy nieruchomym wirniku zasilanie uzwojen stojana napięciem trójfazowym, a uzwojenia wzbudzenia napięciem stałym powoduje powstanie dwóch pól magnetycznych - jednego wirującego z prędkością synchroniczną, a drugiego nieruchomego. W wyniku ich oddziaływania powstaje przemienny moment obrotowy o częstotliwości napięcia zasilania i wartości średniej równej zero (Rysunek 100)



Rysunek 100: Moment synchroniczny wytwarzany w momencie załączenia silnika

Przy tak znacznej częstotliwości zmian momentu wirnik nie może ruszyć ze względu na swą bezwładność. Zwiększanie amplitudy momentu przez podnoszenie prądu wzbudzenia doprowadza tylko do przeciążenia zmeczeniowego wału poddanego działaniu momentu oscylacyjnego. Wobec tego wirniki silników synchronicznych wyposaża się dodatkowo w klatkę podobną do stosowanych w silnikach indukcyjnych. W wirnikach jawnobiegunowych jej rolę spełniają czasem lite nabiegunki, w których mogą płynąć prądy wirów. Umożliwiają one rozruch asynchroniczny silnika synchronicznego do prędkości podsynchronicznej. Osiągnięcie prędkości synchronicznej zależy od budowy wirnika. Gdy wirnik jest cylindryczny, należy poprzez zasilanie uzwojenia wzbudzenia wytworzyć moment synchroniczny, którego częstotliwość wynosi już tylko f_s , tzn. około 0,25 Hz przy $s = 0,005$.

Czas narastania momentu rzędu 1 s jest już wystarczający dla przyspieszenia wirnika do prędkości synchronicznej. W silnikach jawnobiegunowych rolę momentu synchronicznego spełnia moment reluktancyjny, dlatego też zasilanie wzbudzenia dla wciągnięcia wirnika w synchronizm jest zbyt cenne chyba, że silnik jest obciążony momentem większym od M_r . Po włączeniu do sieci silnik osiąga prędkość synchroniczną. Jednakże z uwagi na podwójną częstotliwość momentu reluktancyjnego klatka rozruchowa musi być tak zaprojektowana, aby końcowy poslizg był jak najmniejszy.

Uzwojenie wzbudzenia podczas rozruchu powinno być rozwarne. Praktycznie nie jest to dopuszczalne z uwagi na wysokie napięcie indukujące się w tym uzwojeniu początkowym okresie rozruchu, z powodu dużej ilości zwojów. Aby je ograniczyć, należy zwierać uzwojenie wzbudzenia na czas rozruchu odpowiednio dobraną opornością. Jednak prąd zmienny o częstotliwości f_s , płynący wtedy w uzwojeniu, oddziałuje niekorzystnie na przebieg rozruchu poprzez tzw. zjawisko Gorgesa. Wytwarza on, bowiem przemiennie pole magnetyczne, nieruchome względem wirnika, które rozkłada się na dwa składowe pola

kołowe: współbieżne, wirujące zgodnie z wirnikiem z predkoscia n w wzgledem niego i przeciwbieżne, wirujące w kierunku przeciwnym z predkoscia n_{2W} .

$$n_{W1} = \frac{60fs}{p} = n_s \cdot s$$

$$n_{W2} = \frac{-60fs}{p} = -n_s \cdot s$$

Ich predkosci wzgledem stojana wynosza:

$$n_{1S} = n_{1W} + n = n_s$$

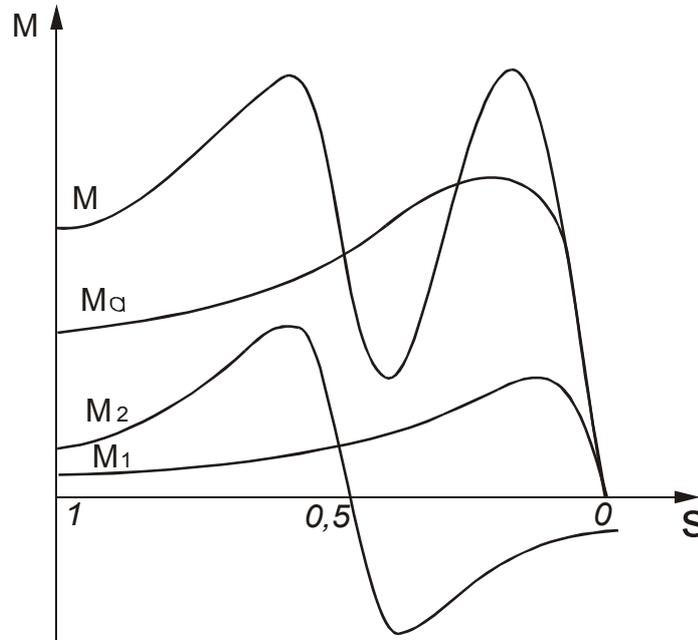
$$n_{2S} = n_{2W} - n = n_s(1 - 2s)$$

gdzie: s - polizg,

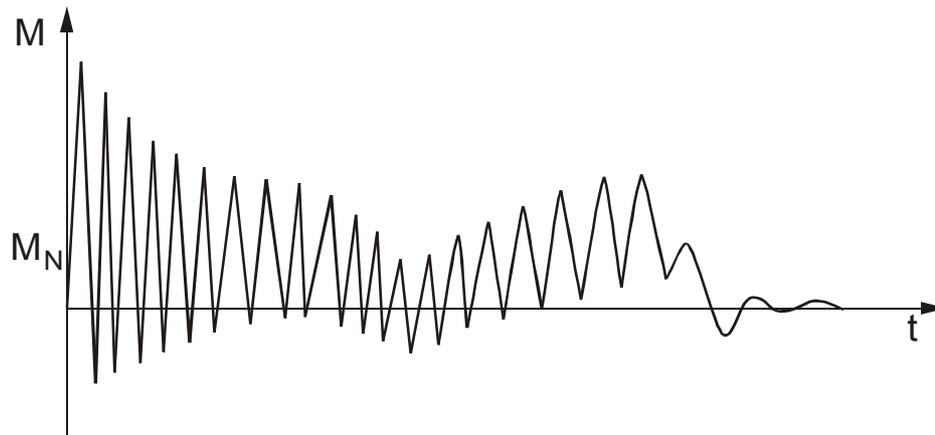
n - chwilowa predkosc wirnika,

n_s - predkosc synchroniczna.

Pola te sa przyczyna powstawania dodatkowych momentow w czasie rozruchu przedstawionych na - Rysunek 101 -. Moment od pola współbieżnego M_1 dodaje sie do momentu asynchronicznego M_a , natomiast moment od pola przeciwbieżnego M_2 wywołuje siodło w charakterystyce momentu, ktore moze spowodowac utkniecie silnika przy $s = 0,5$. W związku z tym prad pływacy w uzwojeniu wzbudzenia podczas rozruchu nie moze byc zbyt duzy, co determinuje wartosc opornosci zwierajacej, ktora powinna byc 8 - 10, razy wieksza od opornosci uzwojenia wzbudzenia.



Rysunek 101: Charakterystyki statyczne momentow wytwarzanych podczas rozruchu asynchronicznego



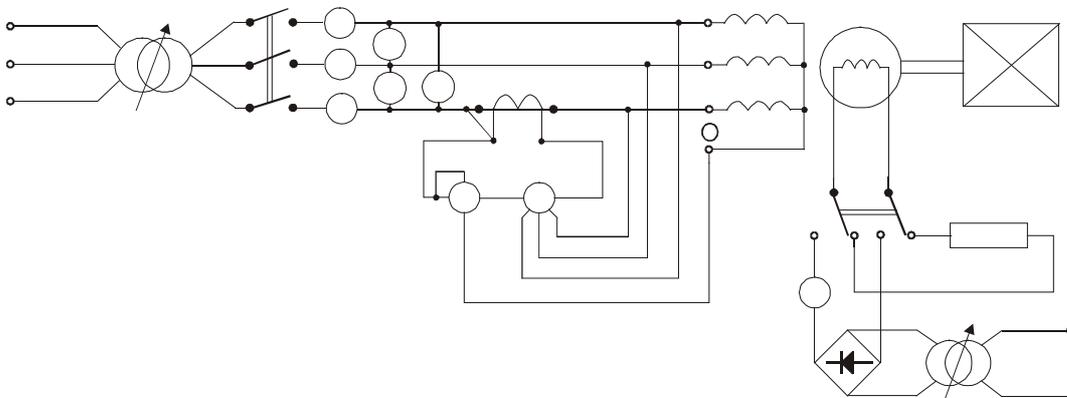
Rysunek 102: Charakterystyka dynamiczna rozruchu asynchronicznego

Wypadkowa charakterystyka momentu M jest prawdziwa tylko dla stanów ustalonych, tak jakby narastanie predkosci odbywało sie nieskonczenie powoli. Stanowi wiec tylko usrednienie przebiegu rzeczywistego podczas rozruchu, który jest typowym stanem dynamicznym i przebiega bardzo szybko (Rysunek 102). Czesotliwosc oscylacji momentu jest dwukrotnie wieksza od analogicznych w silnikach indukcyjnych i wynosi $2f_s$. Zmienia sie wiec w zakresie $(100 - 0)$ Hz: W połowie przebiegu daje sie zauwazyc wpływ zjawiska Gorgesa.

Pomiary laboratoryjne

Rozruch asynchroniczny silnika synchronicznego

Rozruch asynchroniczny silnika synchronicznego przedstawiono dokladnie w czesci teoretycznej. Do jego przeprowadzenia nalezy polaczyc układ pomiarowy wg schematu (Rysunek 103).



Rysunek 103: Schemat układu pomiarowego

Na czas rozruchu amperomierze i cewki pradowe watomierzy musza byc zwarte dla zabezpieczenia przed pradem rozruchowym. Mozna go ewentualnie zmniejszyc, stosujac jedna z metod podanych dla silnikow indukcyjnych. Uzwojenie wzbudzenia zwiera sie przez rezystancje $R_d = 10 R_f = 10U_{fN}/I_{fN}$. Po zasileniu silnik jawnobiegunowy od razu osiagnie predkosc synchroniczna, o ile nie jest obciazony momentem wiekszym od reluktancyjnego. Silnik cylindryczny zakonczy rozruch przy predkosci podsynchronicznej. Nalezy wtedy szybko przełaczyc wzbudzenie na zasilanie i tak zwiekszyc prad wzbudzenia, by moment synchroniczny przyspieszył wirnik do predkosci asynchronicznej.

Wirnik silnika jawnobiegunowego po wejsci u synchronizm moze zajac dwa przeciwne polozenia wzgledem wirujacego pola stojana polozenie stabilne, w którym po zasileniu wzbudzenia strumien wirnika jest zgodny ze strumieniem stojana, lub niestabilne, gdy te strumienie sa przeciwne. W drugim przypadku zwiekszenie pradu wzbudzenia powoduje przeskok wirnika o 180° elektrycznych w nowe, juz stabilne, polozenie. Towarzyszy temu udar pradu stojana. Z tego wzgledu po zakonczeniu rozruchu silnika jawnobiegunowego nalezy najpierw zwiekszyc prad wzbudzenia, by wirnik mogł zajac polozenie stabilne, a

dopiero potem rozewrzec cewki prądowe przyrządów. Przeskok wirnika można obserwować w świetle stroboskopu na wale silnika.

a. Pomiar momentu i prądu rozruchowego

Przeprowadza się go tak jak w silnikach indukcyjnych przy obniżonym napięciu zasilania i zwartym wzbudzeniu.

b. Pomiar momentu podsynchronicznego

Jest to moment przy poslizgu $s = 0,05$. Mierzy się go bezpośrednio, obciążając silnik od biegu jałowego aż do wypadnięcia z synchronizmu i osiągnięcia zadanego poslizgu.

c. Pomiar momentu wpadu

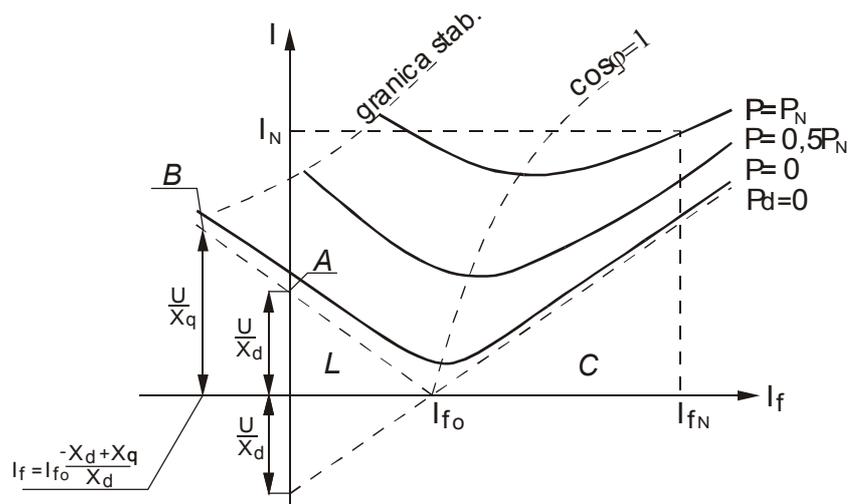
Jest to maksymalna wartość momentu obciążenia, przy której silnik wchodzi jeszcze w synchronizm, jeżeli w stanie podsynchronicznym zasilono wzbudzenie prądem znamionowym. By go wyznaczyć należy kolejno uruchamiać silnik do prędkości podsynchronicznej i zwiększając za każdym razem moment obciążenia załączając znamionowy prąd wzbudzenia. Moment, przy którym silnik nie będzie w stanie osiągnąć prędkości synchronicznej, jest przybliżoną wartością momentu wpadu.

Pomiary do wyznaczenia krzywych V

Krzywe te, zwane tak z racji swojego kształtu, są rodziną zależności prądu stojana od prądu wzbudzenia $I = f(I_f)$ dla różnych wartości mocy obciążenia przy $f, U = \text{const.}$ (Rysunek 104).

Z wykresu wektorowego, podanego dla uproszczenia, dla silnika cylindrycznego (Rysunek 105) wynika, że zmiany prądu wzbudzenia przy stałej mocy obciążenia powodują przesuwanie końca wektora \vec{E} po linii równoległej do wektora \vec{U} . Jednocześnie zmienia się odpowiednio amplituda i faza prądu stojana. Jego wartość jest najmniejsza przy współczynniku mocy $\cos \varphi = 1$, Lewa gałąź dotyczy stanów, w których silnik pobiera moc bierną indukcyjną /silnik niedowzbudzony/, prawa gałąź odnosi się do stanów przewzbudzonych, w których silnik pobiera bierną pojemnościową. Wraz ze zmniejszaniem prądu wzbudzenia narasta kąt między \vec{E} a \vec{U} , czyli kąt mocy ϑ tak, aby była zachowana stałość mocy czynnej P .

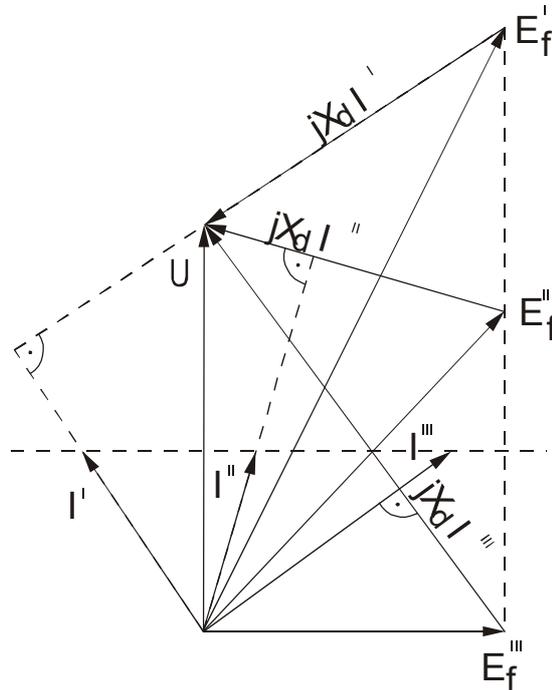
Po osiągnięciu przez ϑ wartości 90° przy dalszym zmniejszaniu I_f zacznie maleć moc czynna, co wobec stałego momentu obciążenia spowoduje wypadnięcie maszyny z synchronizmu. Stan ten określa granicę stabilnej pracy silnika, która ogranicza krzywe V od lewej strony. Z prawej strony i od góry ograniczają je natomiast znamionowe wartości prądu stojana i wzbudzenia.



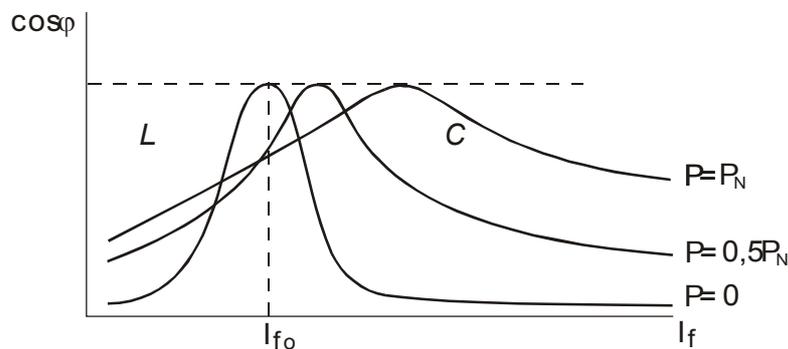
Rysunek 104: Krzywe V silnika jawnobiegunowego

Pomiary przeprowadza się dla mocy obciążenia równych kolejno 0, 1/2, 1, P_N , rozpoczynając od prądu wzbudzenia, przy którym silnik jest przewzbudzony i prąd stojana wynosi 1/2 I_N . Zmniejszając I_f otrzymuje się kolejne punkty pomiarowe. Dużo uwagi trzeba zwrócić na dokładne określenie współrzędnych minimów poszczególnych krzywych oraz na określenie ich granic stabilności. Regulacja prądu I_f przy niedowzbudzeniu musi być bardzo

precyzyjna, by silnik nie utracił stabilności. Ewentualne wypadnięcie z synchronizmu jest sygnalizowane nagłym wzrostem prądu stojana. Należy wtedy szybko zwiększyć prąd wzbudzenia lub obciążyć silnik. Ze zmierzonych wartości P, U, I oblicza się zwykle współczynnik mocy wg wzoru (6) i przedstawia w postaci charakterystyk w funkcji prądu wzbudzenia.



Rysunek 105: Wykresy wskazowe silnika cylindrycznego silnika przy $P = \text{const}$ $I_f = \text{var}$

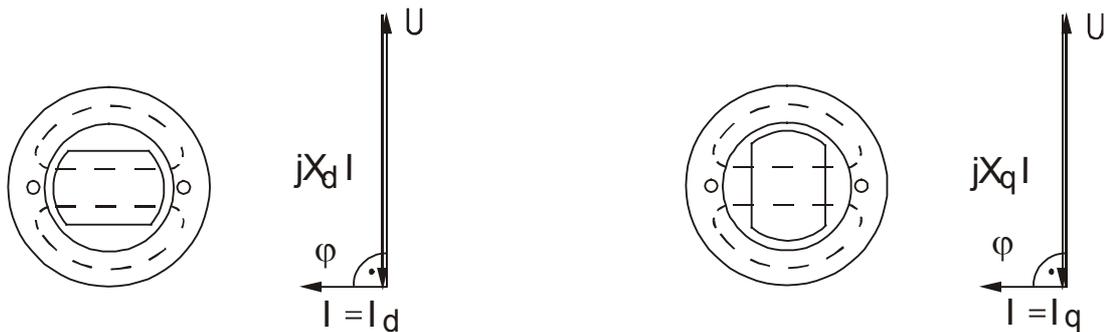


Rysunek 106: Charakterystyki silnika synchronicznego

$$\cos \vartheta = f(I_f), \cos \vartheta = P/3UI$$

Wyznaczenie reaktancji synchronicznych X_d i X_q

Duże znaczenie ma krzywa V dla mocy obciążenia równej zero. Pomijając straty można przyjąć, że pokrywa się ona z krzywą dla zerowej mocy elektrycznej ($P_{el} = 0$ na Rysunek 104). Pozwala to wyznaczyć z pomiarów przy pracy silnikowej I_f , X_d , X_q , potrzebne między innymi do obliczenia przeciążalności silnika. X_d oblicza się z pomiaru prądu i napięcia stojana w stanie jałowym przy $I_f = 0$ (punkt A, Rysunek 104). Dla określenia X_q trzeba osiągnąć granice stabilności. W tym celu należy zmienić biegunowość zasilania wzbudzenia i odpowiednio zwiększyć prąd wzbudzenia aż do osiągnięcia stanu odpowiadającego punktowi B (Rysunek 104). Prąd i napięcie stojana odczytuje się w momencie bezpośrednio poprzedzającym wypadnięcie silnika z synchronizmu ($\vartheta = \vartheta_{\text{max}}$), kontrolując w tym celu zmiany kąta mocy w świetle stroboskopu. Ewentualna utrata stabilności spowoduje tylko opisany wcześniej przeskok wirnika o 180° stopni elektrycznych, po którym silnik zajmie z powrotem położenie stabilne. Wykresy wskazowe (Rysunek 107) są ilustracją stanów silnika w punktach A i B.



Rysunek 107: Wykresy wskazowe silnika jawnobiegunowego na biegu jałowym przy $I_f = 0$ i $\varphi = 90^\circ$, dla $I = I_d$ oraz dla $I = I_q$

Reaktancje X_d i X_q można również wyznaczyć metodą małego poslizgu. W stanie silnikowym mały poslizg osiąga się, obniżając napięcie zasilania nieobciążonego silnika przy $I_f = 0$ aż do wypadnięcia z synchronizmu i ustalenia się prędkości podsynchronicznej.

Pomiary do wyznaczenia charakterystyk katowych $M = f(\alpha)$

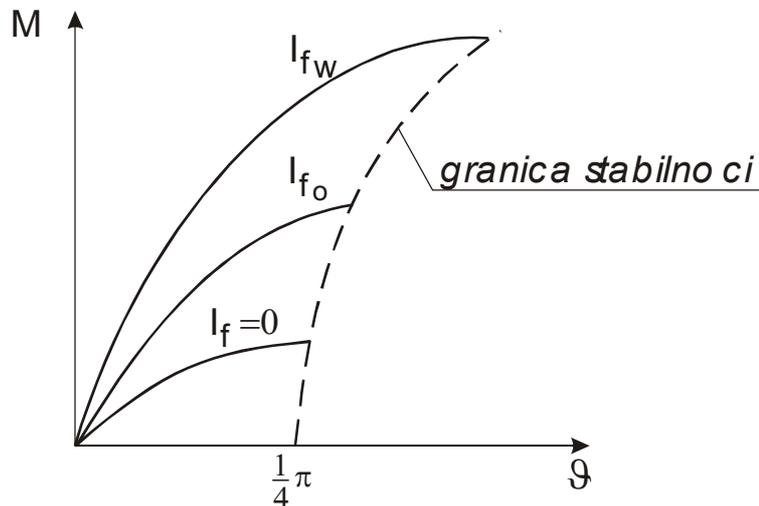
Pomiary te wykonuje się przy stałym prądzie wzbudzenia równym kolejno 0, I_{fN} . Moment obciążenia palety zwiększając od zera aż do wypadnięcia silnika z synchronizmu, co pozwoli wyznaczyć M_{max} i α_{max} . Dla $I_f = 0$ otrzymuje się charakterystykę momentu reluktancyjnego. Dla $I_f = I_{fN}$ pomiary należy zakończyć przy $I = 1,2 \cdot 1,2 I_N$, a moment maksymalny i przeciążalność obliczyć ze wzorów (4), (5),

Moment obciążenia odczytuje się bezpośrednio z momentomierza, natomiast kąt mocy obserwuje się w świetle stroboskopu na tarczy osadzonej na wale silnika. Na biegu jałowym położenie kreski zaznaczonej na tarczy odpowiada zerowemu kątowi mocy. W trakcie obciążania zmienia ona swoje położenie o kąt ϑ_m , który jest związany z kątem mocy zależnością:

$$\vartheta_m = \vartheta/p$$

gdzie:

p - ilość par biegunów.



Rysunek 108:

Kąt mocy można również obliczyć z zależności wynikającej z wykresu wektorowego,

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{IX_q \cos \varphi}{U \mp IX_q \sin \varphi}$$

gdzie:

+ dla silnika przewzbudzonego $/\cos \varphi_c/$,

- dla silnika niedowzbudzonego $/\cos \varphi_L/$

W przypadku silnika cylindrycznego w miejsce X_q należy wstawić X_d . Typowy przebieg wyznaczonych charakterystyk podano na - Rysunek 108 -.

Wyznaczanie sprawności metoda strat poszczególnych

Sprawność silnika synchronicznego oblicza się ze wzoru:

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_N + \sum \Delta P}$$

gdzie:

$$\sum \Delta P = \Delta P_m + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{ob} + \Delta P_f$$

gdzie:

ΔP_m - straty mechaniczne, stałe ze względu na stałą prędkość obrotową,

ΔP_{Fe} - straty w żelazie, zależą od kwadratu indukcji w szczeliny,

ΔP_{ob} - straty obciążeniowe, rosną z kwadratem prądu stojana,

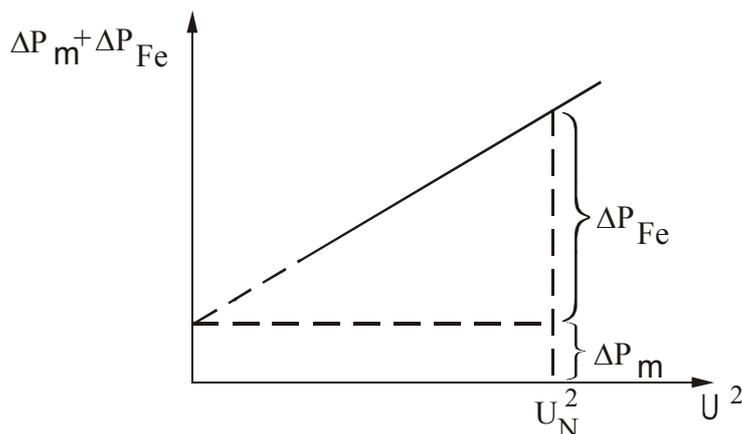
ΔP_f - straty wzbudzenia, przy wzbudzeniu z obcego źródła są to tylko straty wywołane przepływem prądu stałego w uzwojeniu wzbudzenia.

Straty mechaniczne i w żelazie wyznacza się metodą mocy pobranej na biegu jałowym. W tym celu zasilają się nieobciążony silnik regulowanym napięciem, zmniejszając go od $1,3 U_N$ aż do wypadnięcia silnika z synchronizmu. Po każdej zmianie napięcia należy tak zmieniać prąd wzbudzenia, by prąd pobierany przez silnik był minimalny ($\cos \varphi = 1$). Wtedy można przyjąć, że moc pobrana przez silnik jest równa sumie strat ΔP_m i ΔP_{Fe} . Rozdziału ich dokonuje się graficznie, rysując zależność $\Delta P_m + \Delta P_{Fe}$ - Rysunek 109 - analogicznie jak dla silników indukcyjnych.

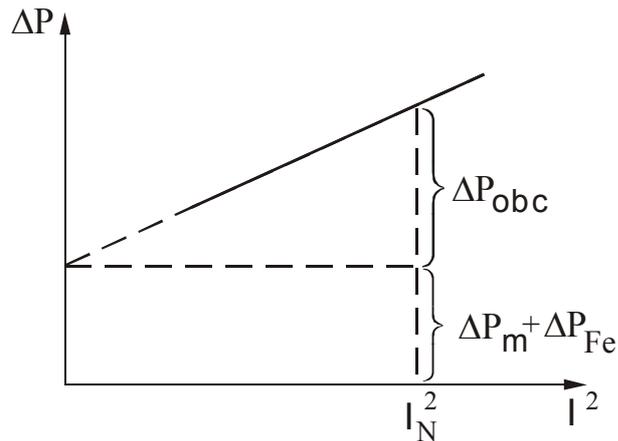
Straty obciążeniowe P_{ob} małych maszyn, w których można pominąć zjawisko wypierania prądu, można obliczać ze wzoru $3R_S I_N^2$, gdzie R_S jest rezystancją fazową uzwojenia stojana zmierzona prądem stałym. W maszynach dużych straty obciążeniowe wyznacza się pomiarowo przy biegu jałowym silnika zasilanego napięciem możliwie najniższym, przy którym nie wypada on jeszcze z synchronizmu. Utrzymując stałe napięcie należy zwiększać prąd wzbudzenia, mierząc rosnący prąd stojana i moc czynną pobraną. Jest ona sumą strat obciążeniowych, mechanicznych i w żelazie. Można przy tym założyć, że ostatnie nie zależą od prądu wzbudzenia. Rysując charakterystykę $P = f(I_N^2)$ dokonuje się rozdziału strat, odczytując P_{ob} dla $I = I_N$ (Rysunek 110).

Straty wzbudzenia P_f oblicza się ze wzoru:

$$\Delta P_f = U_{fN} I_{fN}$$



Rysunek 109: Rozdział strat P_m i P_{Fe}

Rysunek 110: Rozdział strat P_m , P_{Fe} i P_{obc}

Pytania i zadania kontrolne

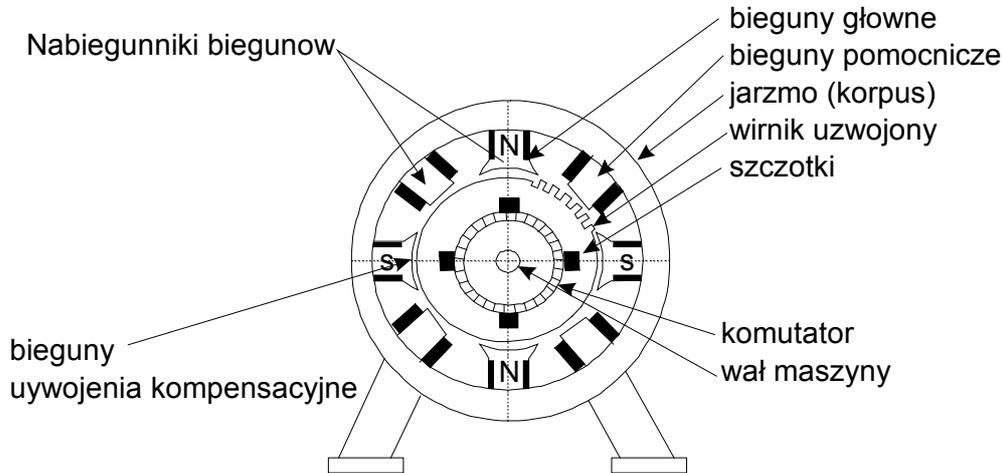
1. Wykresy wskazowe silnika synchronicznego cylindrycznego i jawnobiegunowego.
2. Wyprowadzenie wzorów na charakterystykę katowa silnika jawnobiegunowego.
3. Za pomocą wykresu wskazowego przedstawić wpływ zmian momentu obciążenia na pracę silnika cylindrycznego przy stałym prądzie wzbudzenia.
4. Za pomocą wykresu wskazowego przedstawić wpływ zmian prądu wzbudzenia na pracę silnika cylindrycznego przy stałym momencie obciążenia.
5. Istota zjawiska Gorgesa i jego wpływ na przebieg asynchronicznego rozruchu silnika.
6. Metody pomiaru momentu i prądu rozruchowego, momentu podsynchronicznego i momentu wpadu.
7. Pomiar krzywych V oraz ich przebieg.
8. Pomiarowa metoda wyznaczania reaktancji synchronicznych X_d , X_q przy pracy silnikowej maszyny synchronicznej.
9. Definicja pojęć: kat mocy, granica stabilności, stan przewzbudzony i niedowzbudzony, przeciążalność.
10. Pomiar charakterystyk katowych silnika oraz ich przebieg.

Cwiczenie P1: Badania ogólne prądu stałego

Wprowadzenie teoretyczne

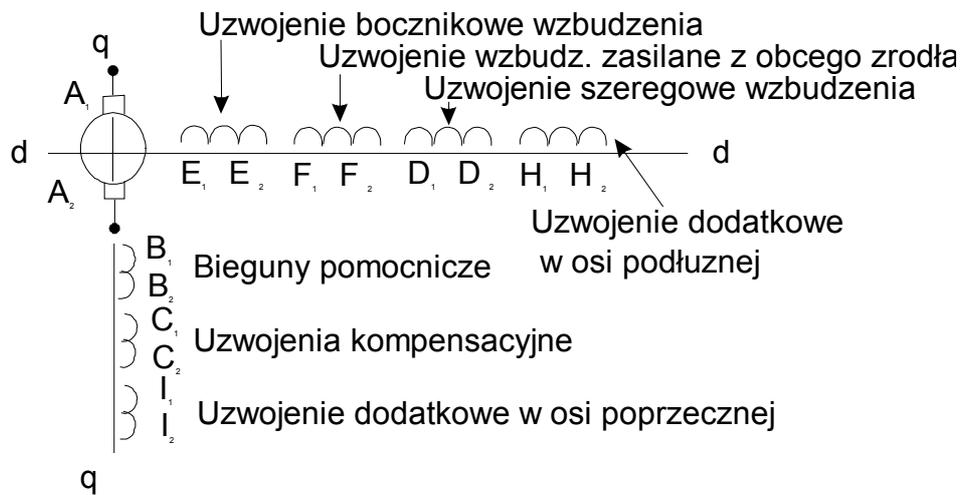
Budowa maszyny prądu stałego

Ogólny schemat budowy maszyny prądu stałego został przedstawiony poniżej.



Rysunek 111 Szkic przekroju poprzecznego 4-biegunowej maszyny prądu stałego

Oznaczenie graficzne maszyny prądu stałego.



Rysunek 112

Kierunek wirowania maszyn prądu stałego

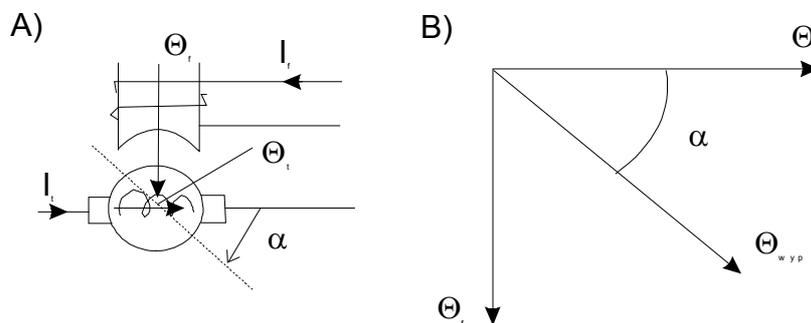
Jako prawy określa się kierunek prędkości zgodny z ruchem wskazówek zegara, jeżeli patrzy się na wirnik od strony wału napędowego. W silniku wirującym w prawo prąd płynie we wszystkich uzwojeniach w kierunku zgodnym z kolejnością wskaźników cyfrowych.

W prądnicie wirującej w prawo prąd w obwodach wzbudzenia płynie w kierunku zgodnym z kolejnością wskaźników, natomiast w tworniku i uzwojeniach biegunów pomocniczych (ewentualnie kompensacyjnych) w kierunku przeciwnym niż kolejność wskaźników.

Oddziaływanie twornika

Po obciążeniu maszyn prądu stałego prąd płynący w uzwojeniu twornika wytwarza przepływ Φ_t , który oddziałując na przepływ Φ_f biegunów głównych powoduje wzrost indukcji magnetycznej w jednej części nabiegunka przy równoczesnym zmniejszeniu indukcji w pozostałej części. Ze względu na nieliniowość krzywej magnesowania obwodu magnetycznego przyrost jest mniejszy

niz ubytek i dlatego oddziaływanie twornika powoduje zmniejszenie się strumienia głównego Φ w porównaniu z wartością, którą osiąga on przy takim samym prądzie wzbudzenia, lecz w stanie jałowym.



Rysunek 113 Oddziaływanie twornika: a) przepływy składowe; b) przepływ wypadkowy, α - kąt skreślenia osi neutralnej

Skutki oddziaływania twornika

- Zmiana rozkładu indukcji magnetycznej pod biegunami
- Obrośenie rzeczywistej osi neutralnej o kąt α względem geometrycznej osi neutralnej (istnienie pewnej indukcji pola w osi poprzecznej)
- Zmniejszenie strumienia wypadkowego w maszynie nasyconej
- Pogorszenie komutacji

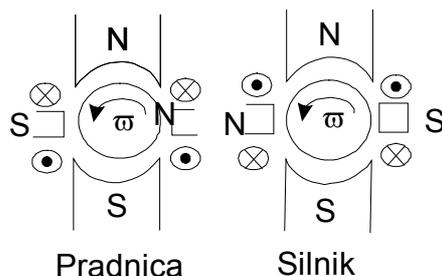
Przeciwdziałanie skutkom oddziaływania twornika

- Umieszczenie biegunów pomocniczych (komutacyjnych) w strefie działania szczotek, co przeciwdziałają wytworzeniu indukcji pola w osi poprzecznej
- Umieszczenie w małych maszynach dozwojenia szeregowego, wzmacniającego strumień biegunów głównych
- Umieszczenie uzwojen kompensacyjnych w nabiegunnikach biegunów głównych, co likwiduje zniekształcenie pola pod biegunami (indukcja pozostaje stała)
- Zwiększenie szczeliny powietrznej na brzegach nabiegunnika (najmniejsza szczelina w osi biegunów)

Komutacja

Komutacja nazywamy zespół zjawisk, które w maszynie komutatorowej towarzyszą zmianie kierunku prądu w zezwoju zwartym przez szczotkę. Są to współzależne od siebie zjawiska mechaniczne, elektromagnetyczne, elektromechaniczne i termiczne.

Iskrzenie szczotek będące zjawiskiem niepożadnym może mieć przyczyny mechaniczne (niecyldryczność komutatora, nierówności lub zanieczyszczenie jego powierzchni, wystawanie izolacji międzywycinkowej, nieodpowiednie szczotki, zły docisk szczotek do komutatora, nieprawidłowe ich dotarcie) lub elektryczne (niewłaściwe działanie biegunów komutacyjnych). Przy położeniu szczotek w strefie neutralnej napięcie indukowane w uzwojeniu twornika przy pracy prądnicowej na biegu jałowym jest największe.



Rysunek 114 Wyznaczenie biegunowości biegunów pomocniczych

Aby poprawić komutację należy umieścić szczotki w strefie działania pola biegunów pomocniczych, których przepływ powinien być nieco większy niż to wynika z warunku zniesienia oddziaływania wirnika w osi poprzecznej.

Dla poprawy warunków komutacji stosuje się również szczotki o znacznej rezystancji przejścia. Dla szczotek węglowo-grafitowych spadek napięcia na jednej szczotce wynosi ok. 1V, natomiast szczotki miedziano-grafitowe mają spadek napięcia w granicach 0,1 – 0,9V na jedną szczotkę i stosuje się je w maszynach niskonapięciowych.

Normy przewidują następujące stopnie iskrzenia występującego między szczotką a komutatorem:

Stopień 1 – komutacja beziskrowa

Stopień $1\frac{1}{4}$ – nieznaczne iskrzenie na niedużej części krawędzi szczotki

Stopień $1\frac{1}{2}$ – iskrzenie na większej części krawędzi szczotki, stwierdza się ślady poczernienia

stykającej się ze szczotkami części komutatora i ślady opalen na szczotkach

Stopień 2 – znaczne iskrzenie na całej krawędzi szczotki, wyraźne ślady poczernienia komutatora i opalen szczotek

Stopień 3 – znaczne iskrzenie na całej krawędzi szczotki, stwierdza się znaczne poczernienie powierzchni komutatora i szczotki zaczynają ulegać zniszczeniu

W warunkach znamionowych dopuszcza się jedynie stopień $1\frac{1}{2}$, a przy przeciążeniach nie większy niż 2.

Badania laboratoryjne

Ogledziny zewnętrzne

- Zaznajomienie się z budową badanej maszyny;
- Liczba biegunów głównych i pomocniczych, liczba szczotek i możliwość przesuwania ich po komutatorze, możliwość kompensacji oddziaływania twornika, określenie kierunku wirowania maszyny;
- Rozeznanie sposobu chłodzenia maszyny (chłodzenie naturalne, własne, obce, wewnętrzne, zewnętrzne, podwójne);
- Sprawdzenie stanu komutatora i szczotek;
- Komutator powinien być gładki, lśniący, nie porysowany, bez zadziórów i zanieczyszczeń z odpowiednio głęboko wypitowana izolacja międzywycinkowa bez zanieczyszczeń w rowkach
- Szczotki ustawione zgodnie z dokumentacją techniczną, prawidłowo i równomiernie docisnięte do komutatora nie zakleszczające się w obwodach, luzy między szczotkami a obsadami powinny być odpowiednie, dotarcie szczotek do powierzchni komutatora co najmniej w 80%, zgodnie z dokumentacją techniczną odstęp między dolnymi krawędziami obsad szczotkowych a ślizgowa powierzchnia komutatora;
- Pomiar nacisku szczotek dokonuje się dynamometrem, mierząc siłę nacisku sprężyn dociskowych. Szczotki powinny mieć jednakowy docisk do powierzchni komutatora (około 150 – 200 G/cm²)
- Rozeznanie tabliczki zaciskowej i oznaczeń poszczególnych zacisków (identyfikacja poszczególnych uzwojeń)
Odczyt danych znamionowych badanej maszyny i podzespołów współpracujących z nią

Pomiar rezystancji izolacji i sprawdzenie ciągłości uzwojeń

Jakość izolacji uzwojeń między poszczególnymi uzwojeniami oraz między tymi uzwojeniami a obudową maszyny dokonuje się megaomierzem (induktorem) 500V.

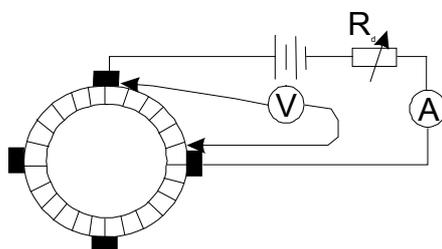
Sprawdzenie ciągłości uzwojeń można dokonać, mierząc oporność poszczególnych uzwojeń dowolną metodą, lecz nie przekraczając wartości prądów dopuszczalnych. Najszybsza metoda jest jednak metoda sprawdzenia ciągłości megaomierzem. Gdy uzwojenie zachowuje ciągłość, to wskazanie megaomierza jest bliskie zeru.

Pomiar rezystancji uzwojen stojana i wirnika w temperaturze otoczenia

- Rezystancje uzwojenia stojana mierzy się między odpowiednimi zaciskami tabliczki zaciskowej.
- Pomiar rezystancji uzwojenia twornika należy wykonać ze szczotkami podniesionymi lub izolowanymi od komutatora. Pomiar rezystancji dla uzwojenia falistego i petlicowego z pełną liczbą połączeń wyrównawczych należy wykonać, łącząc przyrządy pomiarowe z wycinkami komutatora odległymi od siebie o $\frac{k}{2p}$ wycinków (gdzie: K – całkowita liczba

wycinków komutatora, p – liczba par biegunów). Jeśli $\frac{k}{2p}$ będzie liczbą ułamkową, to

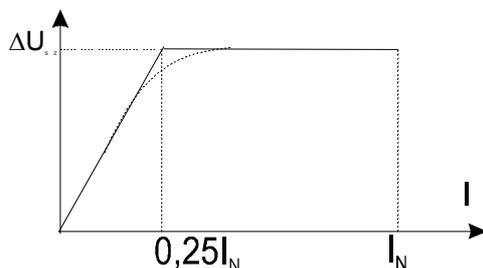
wartość tę należy zaokrąglić do liczby całkowitej. Jeżeli podniesienie lub izolowanie szczotek od komutatora sprawia duże trudności lub nie może być szybko wykonane, to dopuszcza się pomiar rezystancji uzwojenia twornika ze szczotkami przylegającymi do komutatora.



Rysunek 115 Układ pomiarowy do pomiaru rezystancji uzwojenia twornika

Jeżeli pomiar jest wykonany metodą techniczną, to prąd doprowadza się do twornika za pośrednictwem szczotek. Woltomierz (miliwoltomierz) łączy się z wycinkami oddalonymi od siebie o $\frac{k}{2p}$ wycinków, znajdującymi się pod szczotkami w pobliżu osi szczotek. Pomiar należy powtórzyć dla trzech różnych położen wirnika. Za wartość rezystancji przyjmuje się średnią arytmetyczną zmierzonych wartości.

Pomiar rezystancji przejścia między szczotką a komutatorem



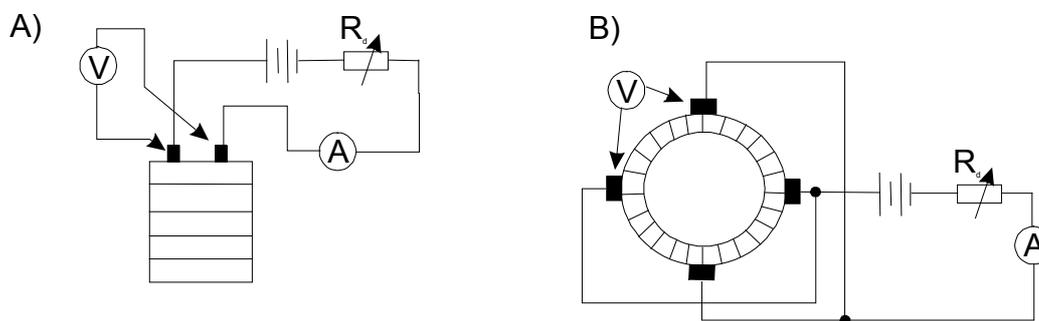
Rysunek 116 Zależność spadku napięcia na rezystancji przejścia między szczotką a komutatorem od prądu wirnika

Rezystancja przejścia między szczotką a komutatorem zależy od wartości prądu. Szacunkowo przyjmuje się, że spadek napięcia na rezystancji dla jednej szczotki w warunkach znamionowych wynosi dla szczotek węglowo-grafitowych $\Delta U_{szcz} = 1V$, dla szczotek węglowo-metalowych $\Delta U_{szcz} = 0,3V$

Pomiaru oporności przejścia można dokonać bezpośrednio na pojedynczej szczotce lub na dwóch szczotkach ustawionych na tym samym wycinku komutatora przy maszynie nieruchomej lub napędzanej z określoną prędkością obrotową, lecz pomiar ten jest obciążony uchybem zależnym od rodzaju uzwojenia (petlicowe, faliste), kierunku płynącego prądu (od szczotki do komutatora lub odwrotnie), od temperatury styku między szczotką a komutatorem (Rysunek

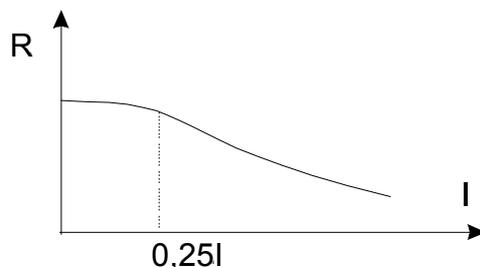
117a). Korzystniejszy jest pomiar w oparciu o układ połączeń przedstawiony na rysunku (Rysunek 117b).

Komutator owija się ściśle miedziana tasma tak, że wszystkie działki jego są zwarte przez bardzo małą rezystancję, pomijalną w porównaniu z rezystancją przejścia.



Rysunek 117 Układ do pomiaru rezystancji przejścia

Maszynę napędza się ze stałą prędkością, różnoidalne szczotki zasilają się jak przy pracy silnikowej, a obwód wzbudzenia rozkłada się, pozbawiając uprzednio maszynę magnetyzmu szczotkowego. Dokonuje się pomiaru napięcia między szczotkami przy prądzie zmieniającym w zakresie $0,25$ do $1,25 I_N$



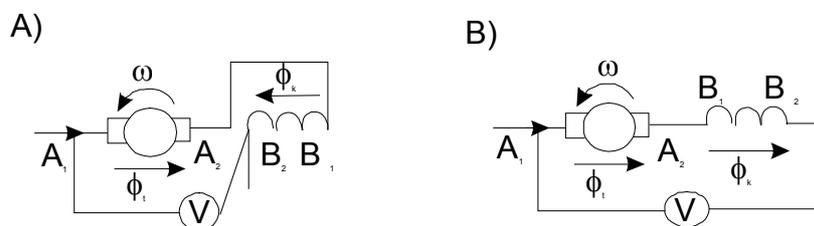
Rysunek 118 Zależność rezystancji przejścia od prądu

Oznaczenie początków i końców uzwojeń

Prawidłowe oznaczenie początków i końców uzwojeń określa się wg kierunku wirowania i kierunku przepływu prądu w uzwojeniach maszyny prądu stałego

a) Oznaczenie zacisków uzwojenia biegunów komutacyjnych

Zaciski biegunów komutacyjnych są tak oznaczone (B_1 , B_2), aby prąd płynący przez szeregowo połączony wirnik i uzwojenie biegunów komutacyjnych dawał przeciwne amperozwoje.



Rysunek 119 Połączenie biegunów komutacyjnych z twornikiem: a) prawidłowe; b) nieprawidłowe

Zasilając niskim napięciem przemiennym szeregowo połączone uzwojenia wirnika i biegunów pomocniczych, mierzy się przy tym samym prądzie spadek napięcia na impedancji obu szeregowo połączonych uzwojeń.

Przy połączeniu prawidłowym (przeciwdziałanie strumieni) impedancja będzie mniejsza. Ten sam efekt ujemnego sprzężenia magnetycznego przy połączeniu prawidłowym uzyskuje się, zasilając

jedno z uzwojen impulsowo przerywanym napięciem stałym. w drugim uwojeniu wyindukuje się napięcie o odpowiedniej biegunowości.

b) Oznaczenie zacisków uzwojenia wzbudzenia bocznikowego

Oznaczenie końców uzwojenia bocznikowego można łatwo sprawdzić, łącząc je dowolnie do zacisków A1 i B2 (przy pracy silnikowej maszyny). Jeżeli silnik obraca się w prawo to zacisk połączony z A1 oznacza się jako E1 a drugi E2. Przy obrocie w lewo oznaczenia są odwrotne.

Przy pracy prądnicowej prądnicy bocznikowej i obrocie maszyny w prawo zaciski, na których indukuje się napięcie dodatnie, oznacza się A1 i E1, a pozostałe B2 i E2.

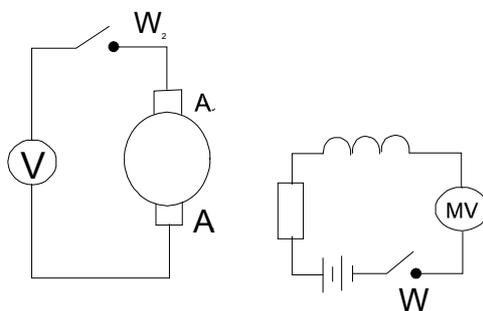
c) Oznaczenie zacisków uzwojenia wzbudzenia szeregowego D1, D2 w prądnicę bocznikowo–szeregową lub silniku bocznikowo–szeregowym

Można je wykonać zwierając to uzwojenie w czasie pracy maszyny. Jeżeli przy zwarciu prędkość silnika rośnie, a w prądnicę napięcie maleje, wówczas uzwojenia E1, E2 i D1, D2 dają strumienie wzbudzenia zgodne. Uzwojenie D1, D2 można zasilac również z obcego źródła zasilania. W silniku szeregowym postępuje się analogicznie, łącząc dowolnie uzwojenie wzbudzenia szeregowo z zaciskiem B2. Jeżeli silnik obraca się w prawo, to zacisk uzwojenia wzbudzenia połączony z zaciskiem B2 oznacza się przez D1, a drugi przez D2.

Początki i konce uzwojen można również wyznaczyć metodą impulsów prądu stałego. W chwili załączenia do jednego uwojenia prądu, płynącego zgodnie z kolejnością wskaźników cyfrowych, potencjały dodatnie napięć wyindukowanych w pozostałych uzwojeniach wskazują na "2" (koniec uzwojenia) oznaczenia danego uzwojenia, a ujemne na "1" (początek uzwojenia).

Ustawienie szczotek w strefie neutralnej

Przy wirniku nieruchomym zasilane uzwojenie wzbudzenia prądem nie przekraczającym $0,1I_{FN}$, zaś do różniamiennych szczotek przyłącza się czuły miernik magnetoelektryczny, najlepiej z zerem pośrodku skali (Rysunek 120).



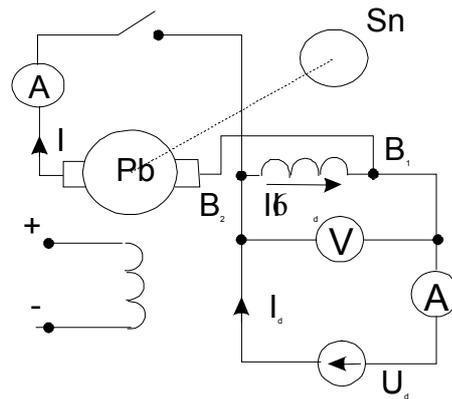
Rysunek 120 Układ pomiarowy do ustawienia szczotek w strefie neutralnej

Szczotki będą ustawione w strefie neutralnej, jeżeli dla różnych położeni wirnika, obracanego w tym samym kierunku, wskazówka miernika przy przerywaniu prądu w obwodzie wzbudzenia wyłącznikiem W1 nie wychyla się lub wychyla się minimalnie jednakowo w dwie strony, a średnia arytmetyczna tych wychyleń wynosi zero. W czasie obracania wirnika obwód miernika powinien być przerywany wyłącznikiem W2.

Można również zasilac uzwojenie wzbudzenia prądem przemiennym, lecz wówczas prąd w obwodzie wzbudzenia nie przerywa się. Szczotki są ustawione w strefie neutralnej, jeżeli wskazania czułego woltomierza prądu przemiennego, przyłączonego do różniamiennych zacisków szczotek, są minimalne przy różnych położeniach wirnika.

Badanie komutacji

Dla maszyn z biegunami komutacyjnymi najbardziej rozpowszechniona jest metoda wyznaczania obszaru komutacji beziskrowej. Dokonuje się tego poprzez zmianę przepływu uzwojenia biegunów komutacyjnych. Zmianę przepływu biegunów komutacyjnych można uzyskać przyłączając pomocnicze źródło U_d prądu stałego I_d do zacisków uzwojenia biegunów komutacyjnych, które znajduje się w głównym obwodzie badanej maszyny (Rysunek 121).



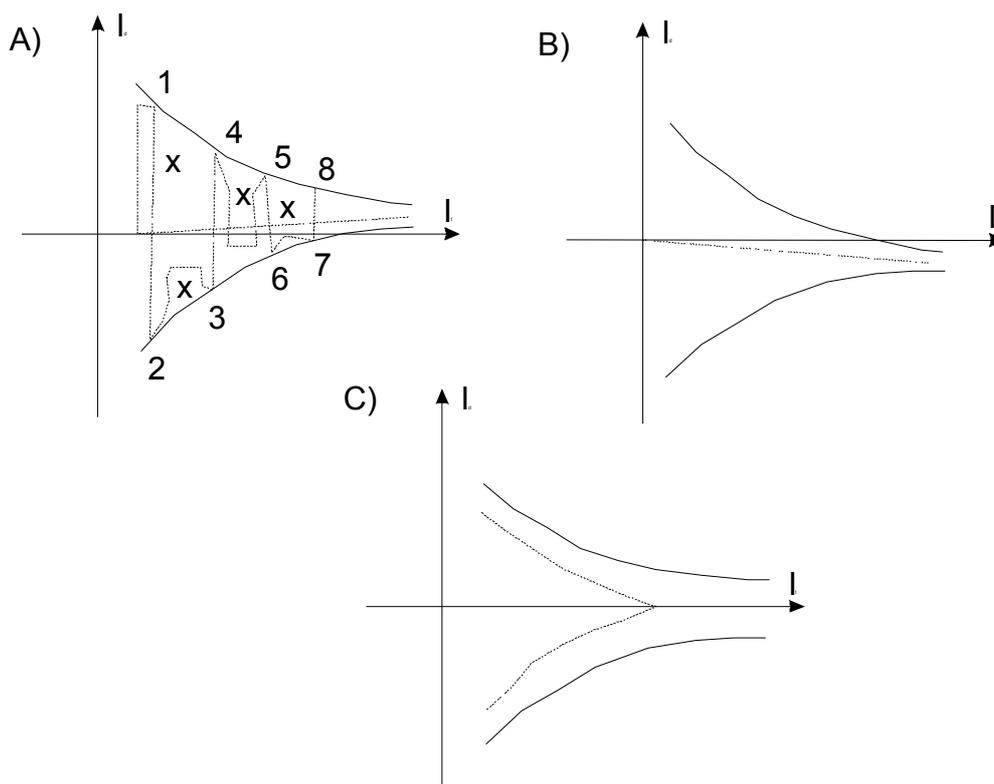
Rysunek 121 Układ połączeń do wyznaczenia komutacji beziskrowej: P_o – prądnicza badana, S_n – silnik napędzający, U_d – źródło regulowane pomocniczego napięcia dodatkowego

W tym układzie pomocnicze źródło zasila uzwojenie biegunów komutacyjnych tylko prądem dodatkowym I_d , stanowiącym różnicę między prądem w uzwojeniu biegunów komutacyjnych I_k , odpowiadającym granicy obszaru komutacji beziskrowej a prądem twornika I w chwili pomiaru. Jeżeli $I_k > I$ to $I_d > 0$. Jeżeli $I_k < I$ to $I_d < 0$.

Napięcie źródła pomocniczego powinno umożliwiać zrownowazenie największego spadku napięcia, jaki może wystąpić na zaciskach biegunów komutacyjnych przy przeciążonej maszynie, będącej w stanie nagrzanej. Ponadto powinna istnieć możliwość znacznego obniżenia napięcia i zmiany biegunowości. Sposób ten jest jednak nieco niedogodny przy badaniu maszyn wysokonapięciowych ze względu na konieczność dodatkowej izolacji stanowiska pomiarowego.

Próby komutacji należy wykonać, spełniając następujące warunki:

- Ustalenie parametrów znamionowych maszyny
- Zaciemnienie otoczenia obszaru komutatora
- Maszyna powinna być w stanie nagrzanej
- Prędkość obrotowa powinna być znamionowa jak i znamionowy powinien być prąd wzbudzenia dla prądnic obcowzbudnych, a dla prądnic samowzbudnych powinna być stała wartość rezystancji obwodu wzbudzenia (dla silników dopuszcza się w czasie próby regulację prędkości przez zmianę prądu wzbudzenia, w celu utrzymania prędkości na poziomie znamionowym)
- Rozpoczęcie pomiaru od stanu jałowego maszyny
- Stopniowe powiększanie się prądu dodatkowego o wartości dodatniej aż do pojawienia się pierwszej iskry górna granica pracy beziskrowej (pkt 1, Rysunek 122a)
- Zmniejszenie prądu dodatkowego, zmiana jego kierunku i powiększenie jego wartości ujemnej aż do pojawienia się pierwszej iskry (dolna granica pracy beziskrowej) - (pkt 2, Rysunek 122a)
- Zmniejszenie prądu dodatkowego o kierunku ujemnym albo zwiększenie prądu o kierunku dodatnim w takim stopniu, aby zniknęło iskrzenie i aby dostatecznie oddalić się od granicy gasnięcia iskry
- Zwiększenie prądu obciążenia maszyny (prąd twornika) – przedział zmian prądu twornika ustala wytworca ((pkt 3, Rysunek 122a))
- Zwiększenie ujemnego prądu dodatkowego aż do pojawienia się pierwszej iskry.

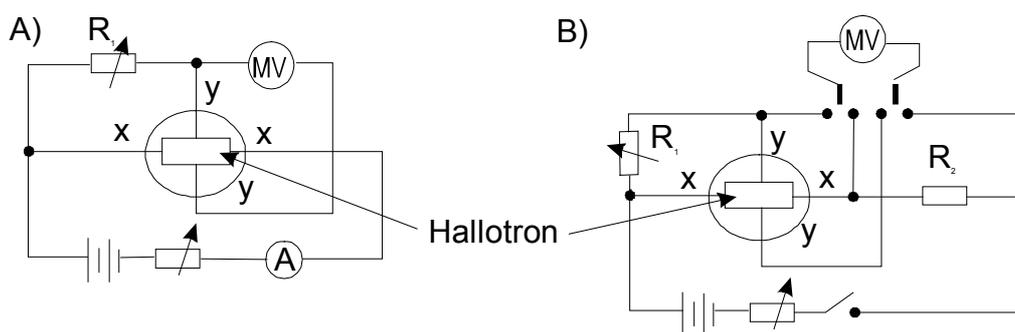


Rysunek 122 Obszar komutacji beziskrowej maszyny o przepływie uzwojenia biegunów komutacyjnych: a) niewystarczającym, b) nadmiernym, c) prawidłowym (linia przerywana - obszar zbyt krótki); I_d – prąd dodatkowy, I_t – prąd twornika, o – punkt pojawienia się pierwszej iskrzy, x- punkt znikania iskrzenia

Pomiar indukcji magnetycznej w szczelinie między wirnikiem a stojanem

Pomiaru indukcji magnetycznej dokonuje się przyrządem półprzewodnikowym w którym wykorzystane jest zjawisko Halla. Polega ono na tym, że jeśli odpowiednio wykonana płytka półprzewodnikowa, przez którą przepływa w osi x-x prąd elektryczny to w osi y-y pojawia się napięcie elektryczne.

W celu dokonania pomiaru indukcji magnetycznej w szczelinie maszyny umieszcza się w miejscu pomiaru na specjalnym wysięgniku hallotron, włączony do układu pomiarowego jak poniżej (Rysunek 123).



Rysunek 123 Układ połączeń teslomierza

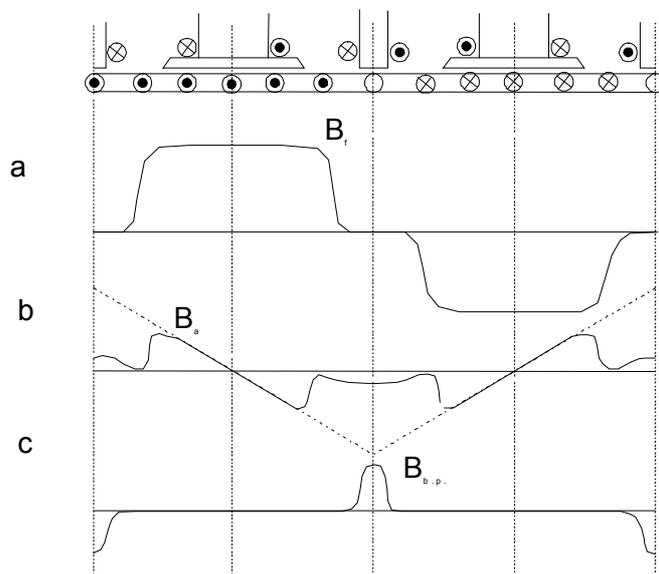
Na powyższym rysunku (Rysunek 123a) przedstawiono układ do pomiaru pola magnetycznego z bezpośrednim pomiarem prądu, a na b układ z pomiarem prądu przez pomiar spadku napięcia na rezystancji R_2 . Celem włączenia rezystancji R_1 jest kompensacja napięć resztkowych hallotronu. Zamiast miliwoltomierza może być użyty oscylograf lub oscyloskop ze wzmacniaczem wejściowym o dużej rezystancji wejściowej, co umożliwi rejestrację przebiegów zmiennych; np. przebiegu indukcji magnetycznej biegunów komutacyjnych podczas narastania prądu.

Badania pola magnetycznego obejmują pomiar indukcji magnetycznej na postoju maszyny:

- Tylko od biegunów głównych

- Tylko od biegunów komutacyjnych
- Tylko od uzwojenia twornika
- Łącznie od włączonych biegunów głównych i komutacyjnych

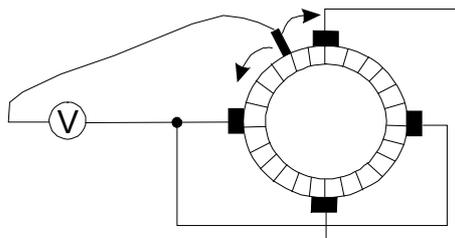
Rozkład indukcji magnetycznej w szczelini jest przedstawiony na rysunku (Rysunek 124)



Rysunek 124 Teoretyczny rozkład indukcji magnetycznej w maszynie prądu stałego: a) od biegunów głównych, b) od uzwojen twornika, c) od biegunów pomocniczych

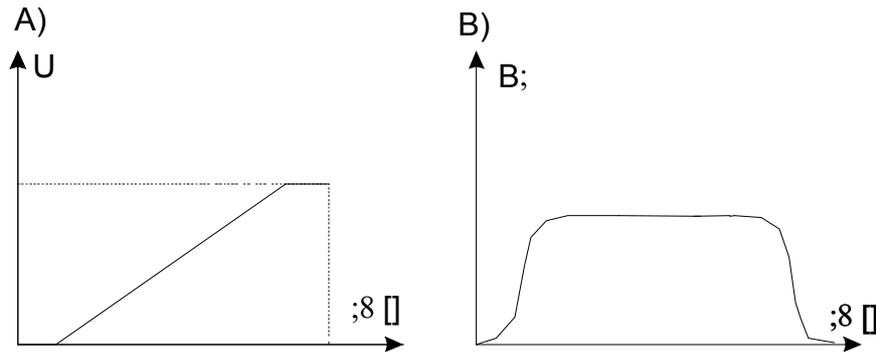
Pomiar rozkładu napięcia na komutatorze

W celu dokonania napięcia na komutatorze badana maszyna musi być wyposażona w ruchoma szczotkę pomocniczą, dająca się przesuwac pomiędzy dwiema sasiednimi szczotkami. Pomiedzy jedna ze szczotek głównych a szczotka pomocnicza przyłącza się woltomierz i odczytuje napięcia, przesuwając szczotkę pomocniczą np. co 10° (Rysunek 125).



Rysunek 125 Pomiar rozkładu napięcia na komutatorze

Pomiar można wykonać przy biegu jałowym lub obciążeniu maszyny. Przykładowa krzywa napięcia przy biegu jałowym pokazano na rysunku (Rysunek 126).



Rysunek 126 Krzywa a) rozkładu napięcia na komutatorze i b) pola pod biegunem

W oparciu o pomiar napięcia na komutatorze można wykresić krzywą indukcji magnetycznej pod biegunem, gdyż:

$$dU = B_{\alpha} \cdot l \cdot v \cdot d\alpha \quad \text{lub} \quad U = \int_0^{\alpha_i} B_{\alpha} \cdot l \cdot v \cdot d\alpha$$

stad:

$$\frac{dU}{d\alpha} = B_{\alpha} \cdot l \cdot v$$

Ponieważ l i v są wielkościami stałymi, można więc drogą różniczkowania graficznej krzywej napięcia względem drogi (kąta) otrzymać krzywą proporcjonalną do krzywej indukcji (Rysunek 126).

Pytania i zadania kontrolne

1. Budowa maszyn prądu stałego
2. Wpływ oddziaływania twornika na właściwości ruchowe maszyny prądu stałego
3. Komutacja prawidłowa i nieprawidłowa
4. Pomiar rezystancji uzwojeń maszyn prądu stałego dwuszczkowych i wieloszczkowych
5. Od czego zależy rezystancja przejścia pomiędzy szczotką a komutatorem
6. Wyznaczanie początków i końców uzwojenia biegunów pomocniczych metoda impulsów prądu stałego i metoda prądu zmiennego
7. Układ połączeń prądnicy boczniowej wirującej w prawo z dozwojeniem szeregowym zasilanym z obcego źródła
8. Wyjaśnić pojęcie strefy komutacji beziskrowej i określić sposób jej wyznaczania
9. Rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie maszyny prądu stałego i rozkład napięcia na komutatorze

Cwiczenie P2: Pradnica prądu stałego

Wprowadzenie teoretyczne

Budowa i zasada działania.

Pradnica prądu stałego działa na zasadzie zjawiska indukcji elektromagnetycznej Faradaya. Wirnik, wirując z prędkością n , porusza N -pretów uzwojenia twornika tworząc a -par gałęzi równoległych w stałym polu magnetycznym wytworzonym przez p -par biegunów, w wyniku czego na zaciskach twornika prądnicy indukuje się napięcie rotacji:

$$U_i = c_u \cdot \Phi \cdot n = \frac{Np}{60a} \phi n = \frac{Np}{2\pi a} \phi \omega$$

Strumień Φ jest wytworzony przez prąd płynący w uzwojeniach wzbudzenia lub dodatkowo przez prąd obciążenia prądnicy płynący przez uzwojenie dodatkowe połączone szeregowo z twornikiem.

Równania statycznego stanu pracy.

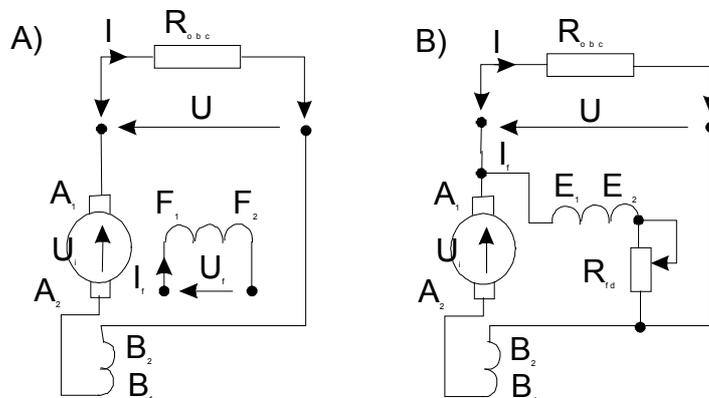
Tabela 1

Równanie	Pradnica obcowzbudna	Pradnica bocznikowa
Napięcie prądnicy	$U = U_i - R_a I - \Delta U_{sz}$	$U = U_i - R_a (I + I_f) - \Delta U_{sz}$
Napięcie indukowane	$U_i = c_u \cdot \Phi \cdot \omega$	$U_i = c_u \cdot \Phi \cdot \omega$
Prąd wzbudzenia	$I_f = \frac{U_f}{R_f}$	$I_f = \frac{U}{R_f + R_{fd}}$

Uwaga:

- Wielkości występujące w tabeli 1 objaśnia rysunek (Rysunek 127)
- R_a – suma rezystancji wszystkich uzwojeń szeregowych (twornika, biegunów pomocniczych, ewentualnie dozwojenia szeregowego)
- ΔU_{sz} – spadek napięcia na szczotkach dla danego prądu obciążenia (jeśli $\Delta U_{sz} \ll U$, to w mniej dokładnych obliczeniach może być pominięte)
- $\Phi = f(I_f)$ strumień wzbudzenia będący funkcją prądu wzbudzenia

Warunki samowzbudzenia się prądnicy bocznikowej prądu stałego.



Rysunek 127 Układ połączeń prądnicy prądu stałego: a) obcowzbudnej; b) bocznikowej

- W osi podłużnej maszyny powinien działać pewien magnetyzm szczotkowy

2. Uzwojenia biegunow głównych powinny być tak podłączone do wirnika, aby niewielki prąd, jaki w nich popłynie w pierwszej chwili, wzmocnił działanie magnetyzmu szczatkowego.
3. Całkowita rezystancja w obwodzie biegunow głównych powinna być mniejsza od krytycznej
4. Predkosc obrotowa prądnicy powinna być wieksza od krytycznej

Badania laboratoryjne

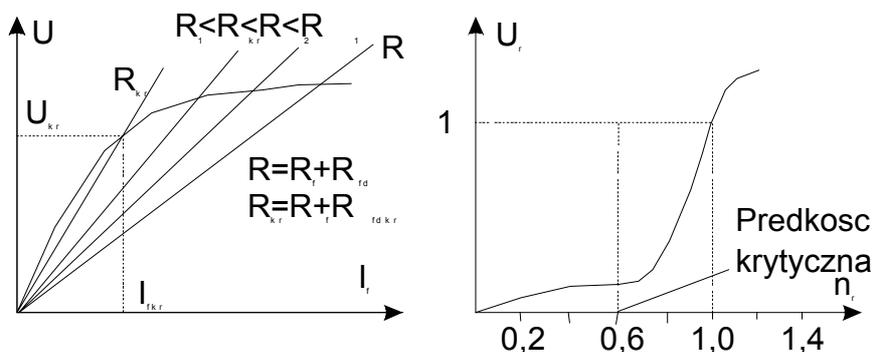
Pomiary i badania wstępne

Należy dokonac oględzin zewnętrznych badanej maszyny oraz zmierzyc rezystancje uzwojen wzbudzenia i wirnika według ogólnych zasad przyjętych dla maszyn prądu stałego (ćwiczenie P1).

Charakterystyka magnesowania

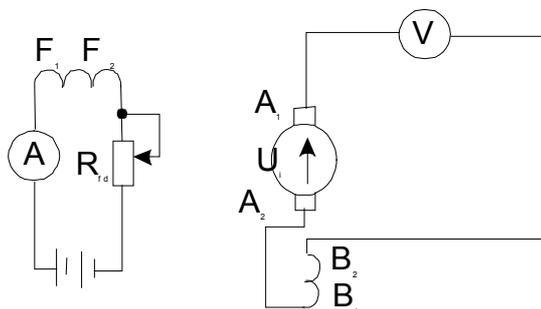
Charakterystyka magnesowania maszyny prądu stałego jest to zależność napięcia na zaciskach twornika od prądu wzbudzenia $U = f(I_f)$, przy niezmienniej predkosci obrotowej maszyny pracujacej jako prądnica w stanie jałowym przy wzbudzeniu obcym.

W przypadku pracy prądnicy przy samowzbudzeniu należy wyznaczyć krytyczną rezystancję obwodu wzbudzenia, poniżej której samowzbudzenie jest możliwe i największą wartość napięcia uzyskiwaną przy samowzbudzeniu (prądnica bocznikowa przy nieczynnym uzwojeniu szeregowym).



Rysunek 128 Samowzbudzenie się prądnicy bocznikowej: a) wyznaczenie rezystancji krytycznej obwodu wzbudzenia; b) wyznaczenie predkosci krytycznej

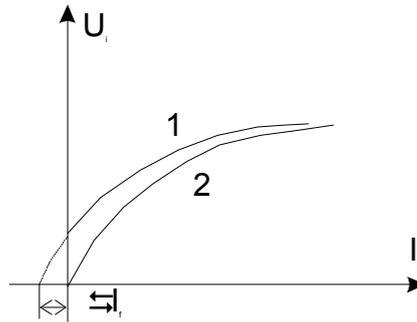
Aby wyznaczyć charakterystykę magnesowania prądnicy należy postępować w sposób podany niżej.



Rysunek 129 Układ pomiarowy do wyznaczenia charakterystyki magnesowania $U=f(I_f)$ przy $n=n_N=const$ i $I=0$

Prąd wzbudzenia zmienia się od wartości największej, przy której $U \approx 1,3U_n$ do zera (nie cofając się). Wyznaczona charakterystyka (krzywa 1, Rysunek 130) ekstrapoluje się graficznie do przecięcia z osią odciętych. Przesuwając krzywa 1 o odcinek ΔI_f wzdłuż osi odciętych w prawo, otrzymuje się charakterystykę magnesowania przechodzącą przez początek osi współrzędnych (krzywa 2 Rysunek 130). odcinek ΔI_f można wyznaczyć bez ekstrapolacji, zmieniając kierunek prądu wzbudzenia i mierząc jego wartość, gdy napięcie $U=0$.

Aby uzyskac petle histerezy, postepuje sie odwrotnie, zmieniajac prąd wzbudzenia od wartosci $I_f=0$ az do takiej wartosci, gdy $U \approx 1,3U_n$, a nastepnie wracajac z powrotem do wartosci $I_f=0$



Rysunek 130 Charakterystyka magnesowania

Jezeli w czasie pomiaru nie mozna zapewnic znamionowej predkosci obrotowej lub utrzymac jej na stalym poziomie, to rownoczesnie z odczytem wskazan amperomierza i woltomierza nalezy mierzyc predkosc obrotowa maszyny. Zmierzone wartosci napiecia U na zaciskach pradnicy nalezy przeliczyc na znamionowa predkosc obrotowa wedlug wzoru:

$$U_{oi} = U_i \frac{\omega_N}{\omega}$$

Gdzie:

U_{oi} – wartosc napiecia na zaciskach pradnicy odpowiadajaca znamionowej predkosci obrotowej

U_i – napiecie zmierzone

ω_N -znamionowa predkosc obrotowa

ω – predkosc obrotowa w czasie pomiaru

Nalezy wyznaczyc okolo 10 punktow pomiarowych.

Znamionowa wartosc pradu wzbudzenia

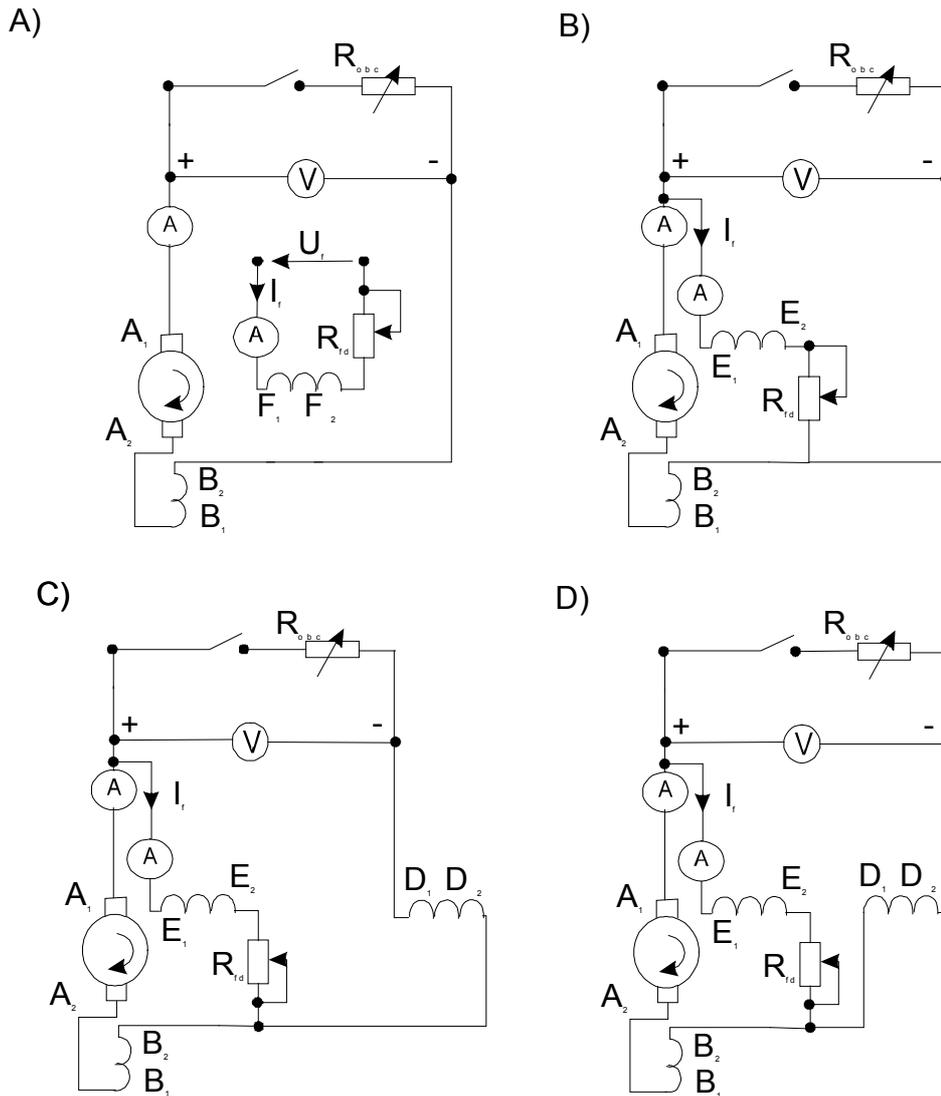
Znamionowa wartosc pradu wzbudzenia wyznacza sie napedzajac pradnice z predkoscia znamionowa, po czym stopniowo ja obciazajac tak doregulowuje sie pradem, aby napiecie na zaciskach bylo znamionowe. Utrzymujac niezmienna predkosc obrotowa, pomiar konczy sie, gdy prad obciazenia pradnicy osiagnie wartosc znamionowa. Wartosc pradu wzbudzenia dla tego punktu obciazenia przyjmuje sie jako znamionowa I_{fN} .

Charakterystyka zewnetrzna.

Charakterystyka zewnetrzna pradnicy jest to zaleznosc napiecia na zaciskach pradnicy od pradu obciazenia $U=f(I)$ lub mocy wydawanej $U=f(P_2)$, przy niezmiennym predkosci obrotowej i przy niezmiennym rezystancji obwodu wzbudzenia dla pradnic samowzbudnych lub przy niezmiennym prądzie wzbudzenia dla pradnic obcowzbudnych.

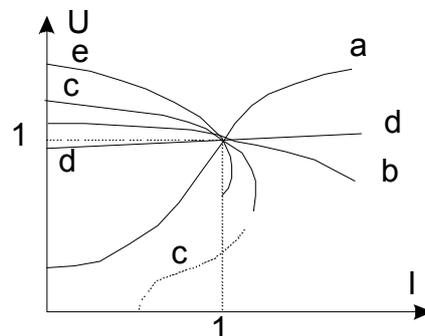
Sposob postepowania przy wyznaczaniu charakterystyki zewnetrznej:

- Ustalic parametry obciazenia znamionowego pradnicy
- Napedzic pradnice z predkoscia $\omega=\omega_N$
- Przy wzbudzeniu obcym ustawic $I_f=I_{fN}$, natomiast przy wzbudzeniu bocznikowym ustawic rezystor regulacyjny R_{fd} w obwodzie wzbudzenia na wartosc pradu I_f przy znamionowym obciazeniu pradnicy
- Oporem obciazenia nastawic obciazenie pradnicy w miare mozliwosci $I=(1,25 -1,5) I_N$
- Zmniejszajac obciazenie az do stanu jalowego, mierzyc prad obciazenia pradnicy i napiecie na jej zaciskach
- W czasie pomiaru charakterystyki zewnetrznej pradnicy obcowzbudnej $I_f = \text{const}$, natomiast dla pradnicy bocznikowej $R_{fd} = \text{const}$ i $\omega=\omega_N= \text{const}$
- Wykonac okolo 8 punktow pomiarowych w stanie nagrzanym pradnicy



Rysunek 131 Układy pomiarowe do wyznaczenia charakterystyki zewnętrznej prądnicy przy wzbudzeniu: a) obcym; b) bocznikowym; c) bocznikowo-szeregowym zgodnym; d) bocznikowo-szeregowym przeciwnym

Przykładowe przebiegi charakterystyk zewnętrznych zostały podane poniżej (Rysunek 132).



Rysunek 132 Charakterystyki zewnętrzne prądnicy: a) szeregowej; b) obcowzbudnej; c) bocznikowej; d) bocznikowej z dozwojeniem szeregowym zgodnym; e) bocznikowej z dozwojeniem szeregowym przeciwnym

Znamionowa predkosć prądnicy (tj. odnosząca się do znamionowych warunków pracy) dla dowolnego punktu charakterystyki zewnętrznej oblicza się według wzoru:

$$\delta U = \frac{U - U_N}{U_N} \cdot 100$$

Gdzie:

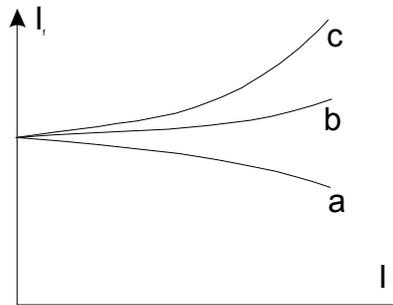
U – napięcie w danym punkcie charakterystyki zewnętrznej
 U_N – znamionowe napięcie prądnicy

Charakterystyka regulacyjna.

Charakterystyka regulacyjna prądu wzbudzenia prądnicy $I_f=f(I)$ jest to zależność prądu wzbudzenia od prądu obciążenia lub od mocy wydawanej przy niezmiennym napięciu na zaciskach prądnicy i niezmiennej prędkości obrotowej. Układy pomiarowe należy połączyć tak jak w rozdziale *Charakterystyka zewnętrzna* (Rysunek 131).

Sposób wykonania pomiaru:

- Ustalić parametry znamionowego obciążenia prądnicy
- Napędzić prądnicę z prędkością $\omega=\omega_N=\text{const}$
- Ustawić rezystorem R_{obc} i regulatorem wzbudzenia R_{fd} obciążenia prądnicy na wartość prądu $I=(1,25 - 1,5) I_N$
- Zmniejszając obciążenie aż do stanu jałowego tak regulować prądem wzbudzenia I_f , aby napięcie na zaciskach prądnicy było stałe
- W czasie pomiaru obserwować stałość wskazań woltomierza na zaciskach prądnicy oraz wskazań miernika prędkości
- Wykonać około 8 punktów pomiarowych w stanie nagrzanym prądnicy



Rysunek 133 Charakterystyki regulacji prądnicy bocznikowej: a) naturalna (normalna); b) z dozwojeniem szeregowym zgodnym; c) z dozwojeniem szeregowym przeciwnym

Straty i sprawność

Sprawność prądnicy wyraża się wzorem:

$$\eta = \left(1 - \frac{\sum \Delta P}{P_2 + \sum \Delta P}\right) \cdot 100$$

Gdzie:

$P_2=U \cdot I$ wydawana moc czynna

$\sum \Delta P = \Delta P_{\text{Cua}} + \Delta P_{\text{Cuf}} + \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{m}} + \Delta P_{\text{sz}} + \Delta P_{\text{d}}$

$\Delta P_{\text{Cua}} = R_a I^2$ straty w uzwojeniu twornika oraz w uzwojeniach połączonych z nim szeregowo

$\Delta P_{\text{Cuf}} + \Delta P_{\text{m}}$ – straty jałowe (głównie w żelazie twornika i mechaniczne)

$\Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{m}} = (R_f + R_{\text{fd}}) I_f^2$ w uzwojeniu wzbudzenia

$\Delta P_{\text{sz}} = \Delta U_{\text{sz}} I$ straty przejścia na szczotkach (w mniej dokładnych obliczeniach można pominąć)

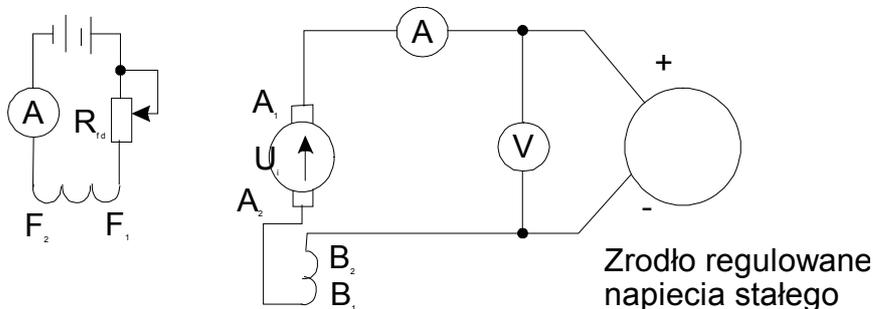
$$P_d = 0,01 \cdot P_N \cdot \left(\frac{I}{I_N}\right)^2 - \text{straty dodatkowe}$$

Straty jałowe najłatwiej jest wyznaczyć sposobem silnikowym. Maszynę zasilają z regulowanego źródła napięcia stałego jako silnik obcowzbudny przy biegu jałowym, zmieniając prąd wzbudzenia I_f w taki sposób, aby $\omega=\omega_N=\text{const}$ (Rysunek 134).

Pomiary należy rozpocząć przy napięciu $U=U_N$ i tak doregulować prąd I_f , aby $\omega=\omega_N$. Pozostałe punkty pomiarowe wyznacza się analogicznie dla $U<U_N$.

Dla każdego punktu pomiarowego wyznacza się moc doprowadzoną do wirnika (napięcie razy prąd).

$$\Delta P_{o1} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_m + \Delta P_{Cu0} + U_o I_o$$



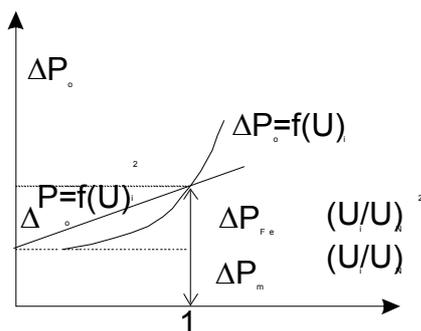
Rysunek 134 Układ pomiarowy do wyznaczenia strat jałowych metodą silnikową

gdzie:

$$\Delta P_{Cu0} = I_o^2 R_a$$

Wykresić krzywą zależności $\Delta P_o = \Delta P_{o1} - \Delta P_{Cu0}$ od zmian napięcia indukowanego $U_i = U_o - R_a I_o - \Delta U_{SZ}$ (Rysunek 135).

Aby straty jałowe ΔP_o rozdzielić na straty w żelazie ΔP_{Fe} i straty mechaniczne ΔP_m , należy wykresić $\Delta P_o = f(U^2)$ i odpowiednio ekstrapolować otrzymaną krzywą na osi rzędnych (Rysunek 135).



Rysunek 135 Zależność strat jałowych od napięcia indukowanego w tworniku

Przy ekstrapolacji krzywej nie należy uwzględniać punktów otrzymanych przy bardzo niskim napięciu.

Wyznaczanie strat w rezystancji szeregowej R_a

$$\Delta P_{Cua} = R_a I^2$$

Rezystancję R_a mierzy się jako sumę rezystancji twornika i uzwojenia biegunów pomocniczych, ewentualnie kompensacyjnego i dozwojenia szeregowego.

Wyznaczanie strat wzbudzenia

Straty wzbudzenia wynoszą:

$$\Delta P_{Cur} = I_f U_f = (R_f + R_{fd}) I_f^2$$

Straty przejścia przez szczotki.

Oblicza się je przyjmując spadek napięcia:

$$\Delta U_{SZ} = (0,8 - 1,1) V \text{ – w jednej szczotce węglowej lub grafitowej}$$

$$\Delta U_{SZ} = (0,2 - 0,6) V \text{ – w jednej szczotce miedzi–grafitowej}$$

$$\Delta P_{SZ} = \Delta U_{SZ} I \cdot 2 \text{ szczotki}$$

Sprawdzenie zasobów wzbudzenia przy bezpośrednim obciążeniu i $\omega = \omega_N = \text{const}$

Napedza się nagrzaną prądnicę z prędkością obrotową $\omega = \omega_N = \text{const}$ po czym:

- a) Obciąża się prądem $I = 1,25 I_N$ i sprawdza możliwość wytworzenia przez prądnicę napięcia $U = 1,05 U_N$, przy $I_f = I_{f\text{max}}$.
- b) Obciąża się prądnicę prądem $I = I_N$ i sprawdza możliwość wytworzenia przez prądnicę napięcia $U = 1,05 U_N$, przy $I_f = I_{f\text{max}}$.

Pytania i zadania kontrolne.

1. Metody pomiaru oporności uzwojeń prądnicy prądu stałego
2. Fizykalna interpretacja zasady działania prądnicy prądu stałego
3. Na podstawie zależności opisującej charakterystykę zewnętrzną prądnicy omówić od czego zależy zmienność napięcia prądnicy
4. Przedstawić prądnicę prądu stałego jako wzmacniacz z dodatnim sprzężeniem zwrotnym (warunki samowzbudzenia)
5. Zwarcie jest bardziej groźne dla prądnicy bocznikowej czy obciążeniowej?
6. Omówić wyznaczanie sprawności metodą strat poszczególnych, jeśli strat jałowych wyznacza się metodą:
7. Prądnicowa
8. Silnikowa
9. Układ połączeń prądnicy bocznikowo-szeregową prądu stałego z dozwojeniem przeciwnym wirującej w lewo.
10. Prądnicę obciążeniową prądu stałego obciążoną prądem $I = 15 \text{ A}$ wytwarza na zaciskach twornika napięcie $U = 210 \text{ V}$. Napędzana jest z prędkością $n = 1400 \text{ obr/min}$. Zmienność napięcia odniesienia do napięcia stanu jałowego wynosi $\delta U = 5\%$. Obliczyć napięcie prądnicy, jeśli jest ona napędzana z prędkością 1470 obr/min przy stałym wzbudzeniu i założeniu liniowej charakterystyki magnesowania (obciążenie stałą rezystancją).

Cwiczenie P3: Silnik bocznikowy prądu stałego

Wprowadzenie teoretyczne

Budowa i zasada działania

Silnik bocznikowy prądu stałego zbudowany jest zasadniczo z tych samych części co wszystkie maszyny prądu stałego. Uzwojenie wzbudzenia bocznikowego jest przyłączone równolegle do szeregowo połączonych uzwojeń wirnika i biegunów pomocniczych. Silnik może mieć również dozwojenie szeregowe. Pod wpływem przyłożonego napięcia U w uzwojeniu wirnika przepływa prąd I , a w uzwojeniu wzbudzenia prąd I_f , wytwarzając wraz z ewentualnym dozwojeniem szeregowym wypadkowy strumień Φ . Współdziałanie strumienia Φ oraz prądu I przepływającego przez N pretów uzwojenia wirnika tworzących a par gałęzi równoległych wytwarza moment elektromagnetyczny wirnika

$$M = \frac{Np}{2\pi a} \Phi I = c_u \Phi I$$

Równania statycznego stanu pracy (tabela 1)

Tabela 1

Równanie	Silnik obcowzbudny	Silnik bocznikowy
Obwodu wzbudzenia	$U_f = R_f \cdot I_f$	$U_f = (R_f + R_{fd}) \cdot I_f$
Napięciowe	$U = U_i + (R_a + R_d) \cdot I + \Delta U_{sz}$	$U = U_i + (R_a + R_d) \cdot (I - I_f) + \Delta U_{sz}$
Napięcia indukowanego	$U_i = c_u \cdot \Phi \cdot \omega$	$U_i = c_u \cdot \Phi \cdot \omega$
Momentu	$M = c_u \cdot \Phi \cdot I$	$M = c_u \cdot \Phi \cdot (I - I_f)$

Gdzie:

R_a – suma szeregowo połączonych rezystancji wirnika i uzwojeń biegunów pomocniczych

ΔU_{sz} – spadek napięcia na szczotkach

R_f – rezystancja uzwojenia wzbudzenia

R_{fd} – rezystor regulacyjny obwodu wzbudzenia

R_d – rezystor szeregowy regulacyjny

$\phi = f(I_f)$ – strumień określony charakterystyką magnesowania

Jeżeli prędkość obrotowa jest wyrażona w rd/s, to $c_u = \frac{Np}{2\pi a}$, a jeżeli w obr/min, to $c_u = \frac{Np}{60a}$

Gdzie:

N – liczba pretów wirnika

p – liczba par biegunów

a – liczba par gałęzi równoległych uzwojenia wirnika

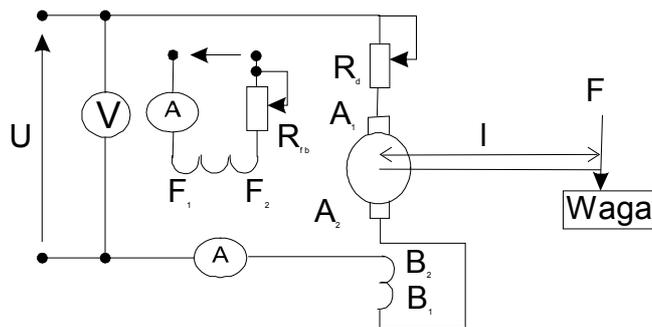
Badania laboratoryjne

Pomiary i badania wstępne

Należy dokonać oględzin zewnętrznych, sprawdzić izolacje uzwojeń i izolacje korpusu – uzwojenie, zmierzyć rezystancje uzwojeń według zasad obowiązujących dla maszyn prądu stałego, zidentyfikować dane znamionowe i układ połączeń silnika.

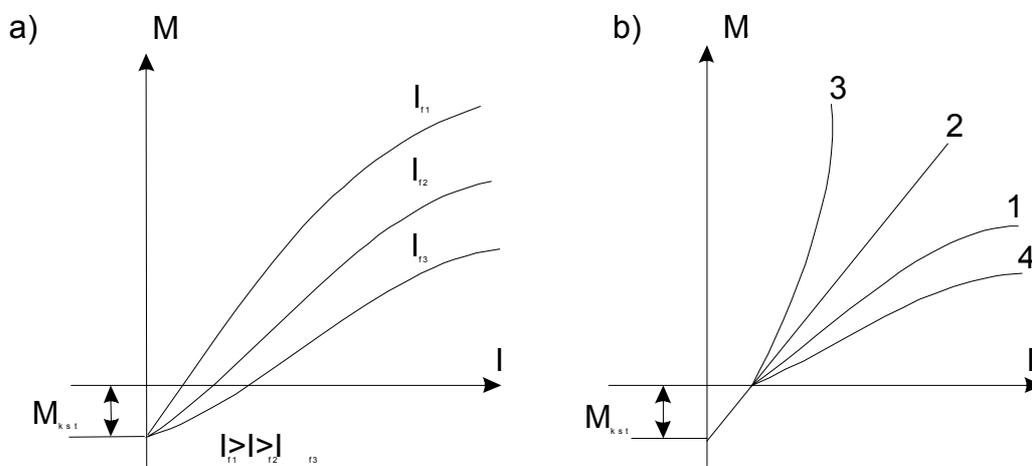
Początkowy moment rozruchowy

Charakterystykę początkowego momentu rozruchowego $M_k = f(I) = c_u \Phi I$ wykonuje się przy zamkniętym silniku ($\omega = 0$) dźwignia o długości l , naciskając na wagę mierzącą siłę F nacisku (Rysunek 136).



Rysunek 136 Pomiar początkowego momentu rozruchowego

Regulując prąd I poprzez zmianę napięcia U lub przy $U = \text{const}$ rezystorem R_d odczytuje się siłę F naciskającą na wagę. Moment rozruchowy $M_k = F \cdot l$. Pomiar wykonuje się od $I = 0$ do $I = 1,25 I_n$ dla różnych prądów wzbudzenia $I_f = (0,8 - 1,2) I_{fN}$.



Rysunek 137 Początkowy moment rozruchowy w funkcji prądu silnika: a) dla różnych prądów wzbudzenia; b) 1- silnik bocznikowy, 2 - silnik bocznikowy z uzwojeniem kompensacyjnym, 3 - silnik bocznikowy z dozwojeniem szeregowym zgodnym, 4 - silnik bocznikowy z dozwojeniem szeregowym przeciwnym

Moment tarcia statycznego M_{kst} otrzymuje się przez ekstrapolację krzywych $M_k = f(I)$. Zakrzywienie charakterystyk z powyższego rysunku (Rysunek 137a) jest spowodowane oddziaływaniem wirnika.

Charakterystyka mechaniczna (zewnętrzna)

Charakterystyka mechaniczna jest to zależność prędkości obrotowej od prądu obciążenia lub momentu obrotowego silnika $\omega = f(I)$, $\omega = f(M)$, przy niezmiennym napięciu na zaciskach silnika ($U = \text{const}$) i przy niezmiennym rezystancji obwodu wzbudzenia ($R_f + R_{fd} = \text{const}$) dla silników bocznikowych lub przy niezmiennym prądzie wzbudzenia ($I_f = \text{const}$) dla silników obcowzbudnych. Pomijając spadek napięcia na szczotkach charakterystykę mechaniczną można opisać zależnością:

- dla silnika obcowzbudnego:

$$\omega = \frac{U - (R_a + R_d)I}{c_u \Phi} = \frac{U}{c_u \Phi} - \frac{R_a + R_d}{c_u \Phi^2} \cdot M$$

- dla silnika bocznikowego:

$$\omega = \frac{U - (R_a + R_d)(I + I_f)}{c_u \Phi} = \frac{U}{c_u \Phi} - \frac{R_a + R_d}{c_u \Phi^2} \cdot M$$

Przy wyznaczaniu charakterystyki mechanicznej należy przyjąć następujący tok postępowania:

- a) ustalić parametry znamionowego obciążenia
- b) dokonać rozruchu napięciowego bądź oporowego (uwaga: silnik obcowzbudny powinien być wzbudzony do wartości $I_f = I_{fN}$, a nastawnik R_{fd} prądu wzbudzenia silnika bocznikowego powinien być nastawiony na wartość bliska minimalnej)
- c) silnik w stanie nagrzanym zasila się napięciem $U = U_N$
- d) obciążyć silnik do około 150% obciążenia znamionowego
- e) zmniejszając obciążenie (I, M) odczytywać prędkość obrotową ω
- f) w czasie pomiaru $I_f = \text{const}$ dla silnika obcowzbudnego lub $R_{fd} = \text{const}$ dla silnika bocznikowego
- g) pomiar kończy się przy biegu jałowym
- h) wykonać około 8 punktów pomiarowych
- i) znamionowa zmienność prędkości obrotowej ω (tj. odnosząca się do prędkości znamionowej ω_N) wyraża się zależnością:

$$\delta\omega = \frac{\omega - \omega_N}{\omega_N} 100$$

Z pomiarów obciążenia silnika wyznacza się charakterystyki:

$\omega = f(P_2)$ – prędkość w funkcji mocy oddanej

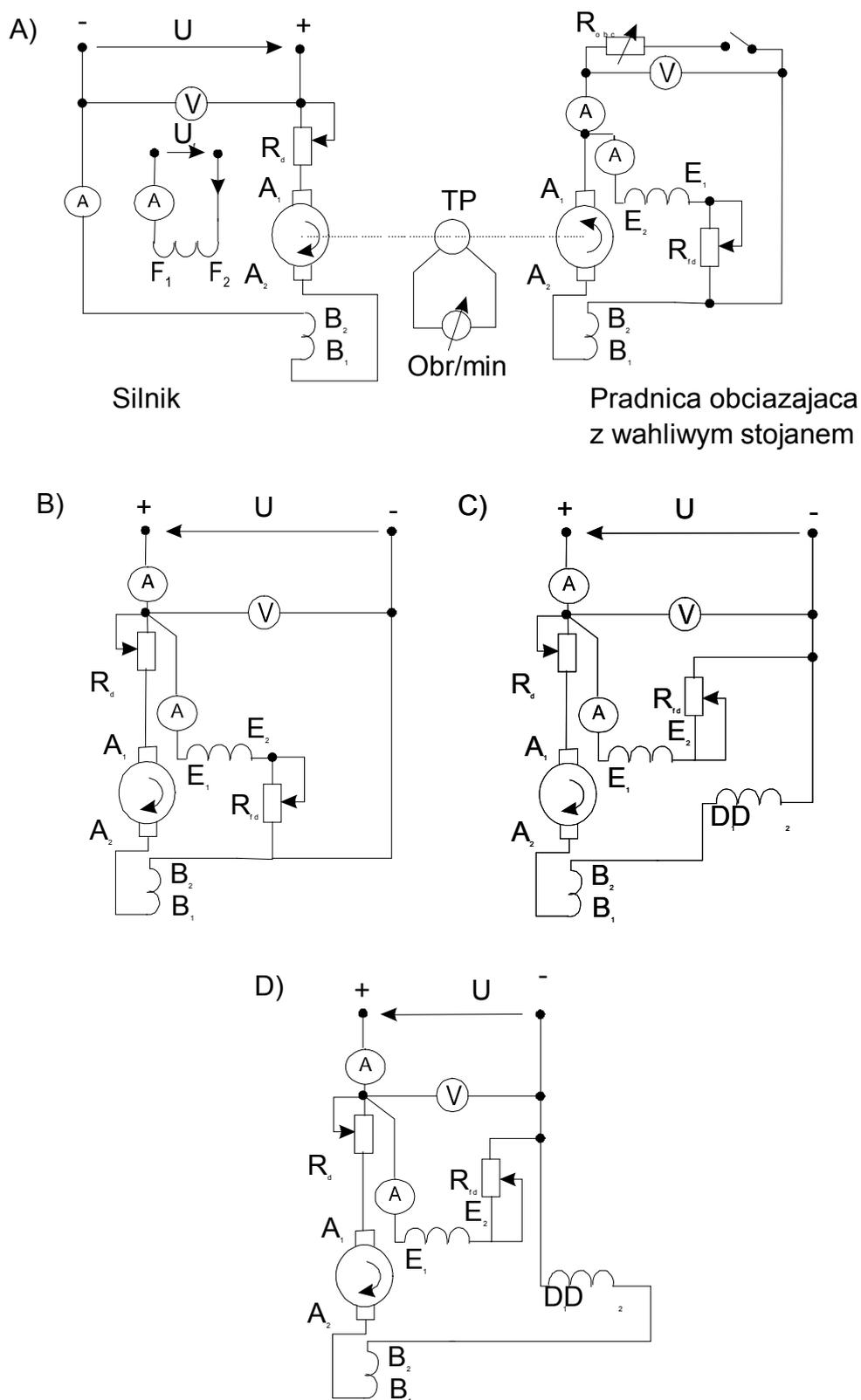
$\eta = f(P_2)$ – sprawność w funkcji mocy oddanej

$P_1 = f(P_2)$ – moc pobrana $P_1 = U \cdot I$ w funkcji mocy oddanej

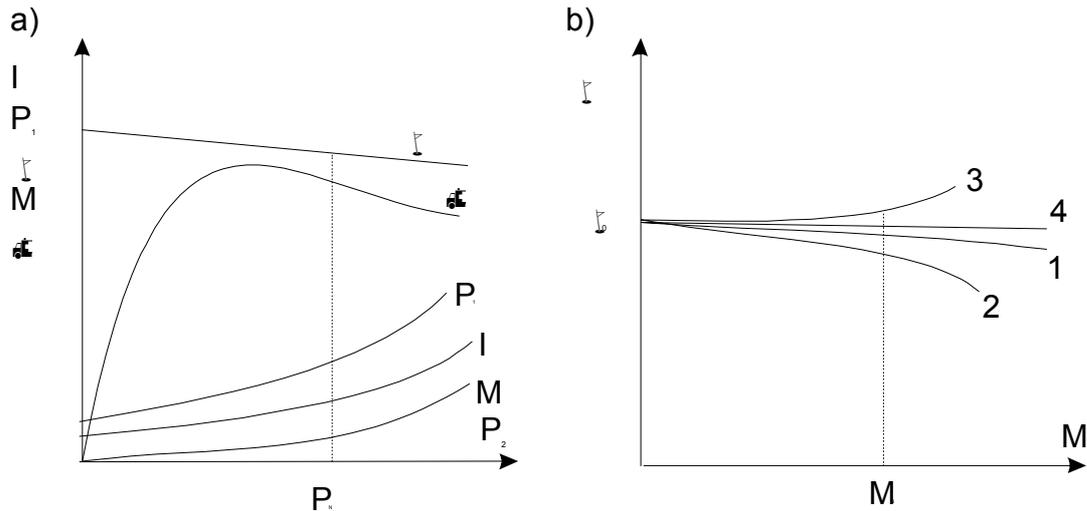
$I = f(P_2)$ – prąd silnika w funkcji mocy oddanej

$M = f(P_2)$ – moment silnika w funkcji mocy oddanej

$\omega = f(M)$ – charakterystyka mechaniczna (zewnętrzna)



Rysunek 138 Układy pomiarowe do wyznaczenia charakterystyki mechanicznej silnika: a) obcowzbudnego, b) bocznikowego, c) bocznikowo-szeregowego zgodnego, d) bocznikowo-szeregowego przeciwnego



Rysunek 139 Obciążenie silnika: a) charakterystyki obciążeniowe b) charakterystyki mechaniczne: 1- silnik bocznikowy, 2 - silnik bocznikowo-szeregowy zgodny, 3 - silnik bocznikowo-szeregowy przeciwny, 4 - silnik obcowzbudny

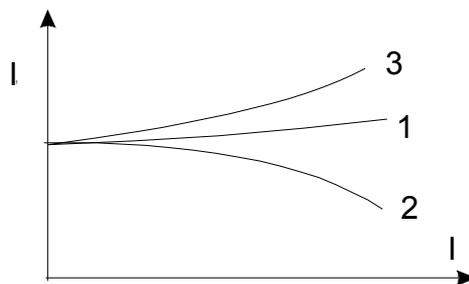
Charakterystyka regulacyjna

Jest to zależność prądu wzbudzenia I_f od mocy wydawanej P_2 lub prądu obciążenia silnika I przy niezmiennych prędkości obrotowej ω , $I_f=f(P_2)$ lub $I_f=f(I)$

Układy pomiarowe zostały przedstawione powyżej (Rysunek 138).

Pomiary do wyznaczenia charakterystyki regulacyjnej wykonuje się na nagrzanym silniku przy napięciu znamionowym U_N według następujących czynności:

- po dokonaniu rozruchu obciążyć silnik do około 150% obciążenia znamionowego
- regulować tak prąd wzbudzenia, by silnik uzyskał zadaną prędkość obrotową ω
- zmniejszyć obciążenie silnika do około 120% obciążenia znamionowego i doregulować prądem wzbudzenia prędkość obrotową do wartości ω
- następne punkty charakterystyki otrzymuje się analogicznie jak w punkcie c, lecz dla stopniowo zmniejszanego obciążenia silnika
- należy wykonać około 8 punktów pomiarowych, kończąc w stanie pracy silnika bliskim jałowemu



Rysunek 140 Charakterystyki regulacyjne $I_f=f(I)$ silnika: 1- bocznikowego, 2 – bocznikowo-szeregowego zgodnego, 3 – bocznikowo szeregowego przeciwnego

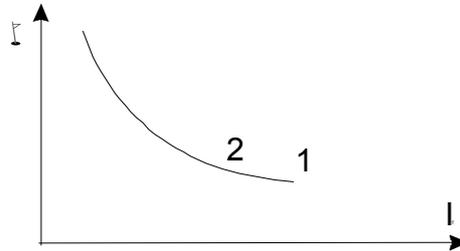
Charakterystyka prędkości obrotowej przy zmianie prądu wzbudzenia

Zależność tę wykonuje się przy stałym prądzie silnika $I=\text{const}$ bądź przy stałym momencie obciążenia $M=\text{const}$.

Pomiary wykonuje się w jednym z układów połączeń przedstawionych na rysunku (Rysunek 138) według następujących czynności:

- po dokonaniu rozruch silnik należy nagrzać
- zwiększyć prąd wzbudzenia do wartości $I_f=1,25I_{fN}$

- c) obciążyc silnik do wartości zadanego prądu I lub momentu M (punkt 1 na charakterystyce Rysunek 141)
- d) zmniejszyć prąd wzbudzenia o pewną wartość i tak doregulować obciążeniem silnika, aby uzyskać zadaną wartość prądu I lub momentu M (punkt 2 na charakterystyce Rysunek 140)
- e) następne punkty pomiarowe uzyskuje się analogicznie jak w punkcie d
- f) należy wykonać około 8 punktów pomiarowych



Rysunek 141 charakterystyka prędkości obrotowej w funkcji prądu wzbudzenia $\omega=f(I_f)$

Sprawność silnika

Metoda bezpośredniego obciążenia

Należy zmierzyć moc P_1 pobrana przez silnik i moc P_2 oddana na wale silnika.

$P_1=UI$, zmierzona w watach

$P_2=M\omega=M\pi n/30$ zmierzona w watach, M w [Nm]

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{U \cdot I}{M \omega} \cdot 100 \quad [\%]$$

Metoda strat poszczególnych

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_1 - \sum \Delta P}{P_1} \cdot 100 = \left(1 - \frac{\sum \Delta P}{P_1} \right) \cdot 100$$

$\sum \Delta P = \Delta P_{Cu_a} + \Delta P_{Cu_r} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m + \Delta P_{sz} + \Delta P_d$

$\Delta P_{Cu_a} = R_a I^2$ – straty w uzwojeniach wirnika i uzwojeniach szeregowych

$\Delta P_{Cu_r} = (R_f + R_{fd}) I_f^2$ – straty w uzwojeniu wzbudzenia

$\Delta P_{sz} = \Delta U_{sz} I_t$ – straty na szczotkach (można pominąć)

$\Delta P_d = 0,01 P_N (I^2 / I_N^2)$ – straty obciążeniowe dodatkowe maszyn bez uzwojeń kompensacyjnych

$\Delta P_d = 0,005 P_N (I^2 / I_N^2)$ – straty obciążeniowe dodatkowe maszyn z uzwojeniami kompensacyjnymi

$\Delta P_{Fe} + \Delta P_m = \Delta P_o$ – straty jałowe (w obwodzie magnetycznym i mechaniczne) wyznacza się sposobem silnikowym według ogólnych zasad przyjętych dla maszyn prądu stałego, a następnie dokonuje się ich rozdziału na ΔP_{Fe} i ΔP_m (patrz cw. P2)

Pytania i zadania kontrolne

1. W jakich silnikach bocznikowych prądu stałego i dlaczego stosuje się dozwojenie szeregowo?
2. Wpływ oddziaływania twornika na wartość początkowego momentu rozruchowego
3. Układ połączeń silnika bocznikowo-szeregowego wirującego w lewo z dozwojeniem szeregowym zgodnym
4. Sposoby dokonania rozruchu silnika bocznikowego i regulacji prędkości obrotowej
5. Zmiennosc prędkości jest większa dla silnika:
6. Bocznikowego
7. Obcowzbudnego
8. Bocznikowego z dozwojeniem szeregowym zgodnym
9. Bocznikowego z dozwojeniem szeregowym przeciwnym
10. Cel wyznaczania charakterystyki mechanicznej i regulacyjnej
11. Wyznaczanie sprawności silnika metoda strat poszczególnych
12. Silnik obcowzbudny obciążony momentem $M_N=20$ Nm rozwija prędkość obrotową $n_N=1450$ obr/min przy napięciu zasilania $U_N=230$ V. Rezystancja wszystkich uzwojeń szeregowych $R_a=2,3$ Ω . Silnik jest wzbudzony prądem $I_f=I_{fN}$. Obliczyć prędkość

obrotowa silnika jeśli $U=0,8U_N$, $I_f=0,7I_{fN}$ przy $M=M_N$. Zakłada się liniowość charakterystyki magnesowania. Dodatkowo obliczyć znamionową sprawność silnika.

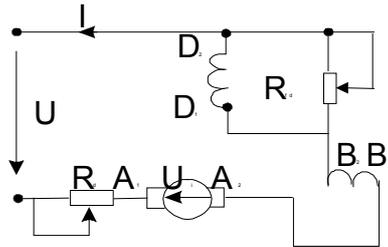
Cwiczenie P4: Silnik szeregowy prądu stałego

Wprowadzenie teoretyczne

Budowa i zasada działania

Silnik szeregowy prądu stałego znajduje szerokie zastosowanie w napędzie trakcyjnym ze względu na swoje właściwości ruchowe samoczynnego dopasowania w dużym zakresie prędkości i momentu obrotowego do wymagań trakcyjnych.

Zbudowany jest z reguły tak samo jak wszystkie maszyny prądu stałego, z tym, że strumień wzbudzenia jest wprost zależny od prądu obciążenia silnika, gdyż uzwojenie wzbudzenia jest połączone szeregowo z uzwojeniem wirnika. Wirnik zasilany jest poprzez układ szczotki – komutator



Rysunek 142 Układ połączeń silnika szeregowego

Badania laboratoryjne

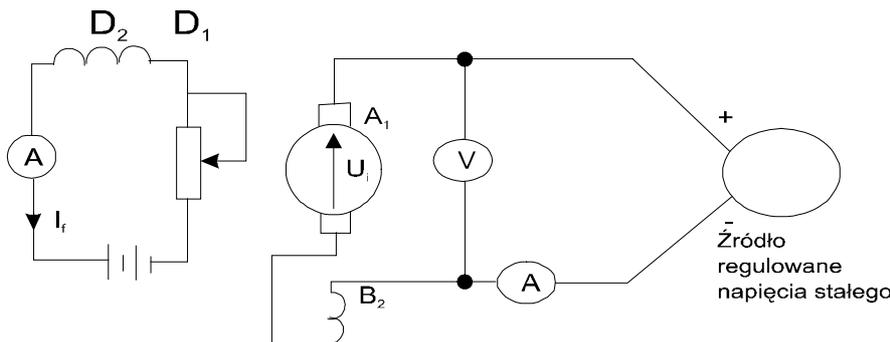
Pomiary i badania wstępne

Ogledziny zewnętrzne, budowa maszyny, dane znamionowe, dopuszczalne parametry pracy, pomiar rezystancji uzwojen.

Charakterystyka magnesowania (biegu jałowego)

Wykonuje się sposobem silnikowym lub prądnicowym w układzie maszyny obcowzbudnej. Uzwojenie wzbudzenia D1, D2 zasilane jest z obcego źródła napięcia stałego z możliwością regulacji dużego prądu, jaki płynie w tym uzwojeniu (źródło niskonapięciowe, wysokoprądowe)

Przy sposobie silnikowym wirnik zasilany jest napięciem o szerokim zakresie regulacji. Prąd wzbudzenia zmienia się od wartości maksymalnej do minimalnej, tak regulując napięciem U_o zasilającym wirnik, aby prędkość była stała i równa prędkości znamionowej (Rysunek 145)



Rysunek 143 Układ do pomiaru charakterystyki magnesowania

Napięcie indukowane U_i oblicza się z zależności:

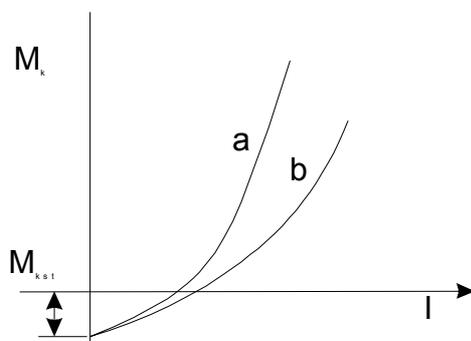
$$U_i = U_o - R_a I_a - \Delta U_{sz} = f(I_f) \quad \text{stad} \quad \phi = \frac{U_i}{c_u \omega} = f(I_f)$$

Przy sposobie prądnicowym wyznacza się charakterystykę magnesowania prądnicy obcowzbudnej $U_i = f(I_f)$, przy $n = n_N$.

Pomiary te pozwalają określić stan nasycenia obwodu magnetycznego w dowolnym stanie pracy silnika, a także wyznaczyć straty ΔP_{Fe} w obwodzie magnetycznym i straty mechaniczne ΔP_m .

Charakterystyka początkowego momentu royruchowego

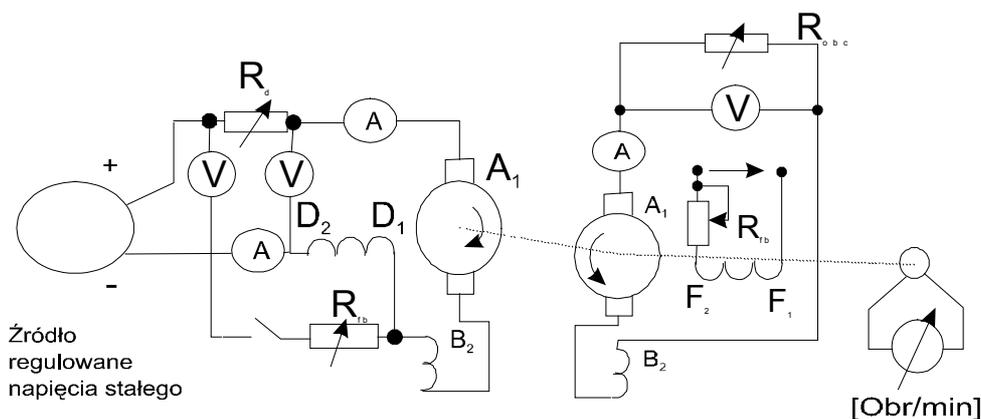
Zahamowany silnik zasila sie z regulowanego zrodla napiecia, poczynajac od wartosci minimalnej (bliskiej zera). Zwikszajac stopniowo napiecie zasilajace dokonuje sie pomiaru momentu $M_k = F \cdot l$ (Rysunek 144) i pobieranego przez silnik pradu I . Krzywa zaleznosci $M_k = f(I)$ ma w poczatkowym zakresie przebieg paraboliczny, lecz dla wiekszych pradow na skutek nasycenia obwodu magnetycznego i oddziaływania wirnika przyjmuje przebieg prostoliniowy (Rysunek 144, krzywa a). Po zbocznikowaniu uzwojenia wzbudzenia (zmniejszenie strumienia) dla tych samych pradow wirnika charakterystyka $M_k = f(I)$ obniza sie (Rysunek 144, krzywa b).



Rysunek 144 Początkowy moment rozruchowy w funkcji prądu silnika: a) charakterystyka naturalna, b) charakterystyka przy zbocznikowanym uzwojeniu wzbudzenia

Charakterystyka mechaniczna (zewnetrzna)

Jest to zaleznosc predkosci obrotowej od pradu silnika lub momentu obciazenia: $n = f(I)$, $n = f(M)$ przy $U = \text{const}$. Pomiaru dokonuje sie, regulujac stopniowo obciazenie silnika od maksymalnego $I = (1,3-2)I_N$ do takiego, przy ktorym predkosci obrotowa nie przekracza predkosci dopuszczalnej. Pomiaru momentu obciazenia silnika mozna dokonac wieloma sposobami, jednak najdogodniejszy w przypadku silnika szeregowego jest pomiar momentu za pomoca sprzegnietej z nim mechanicznie pradnicy pradu stalogo z wahliwym stojanem. W miare wzrostu obciazenia pradnicy, a tym samym silnika (regulacja rezystancja R_{obc} przy stalym wzbudzeniu lub pradem wzbudzenia pradnicy przy $R_{obc} = \text{const}$.) stojan pradnicy odchyla sprzegnieta z nim wskazowke, ktora pokazuje moment obciazenia silnika.

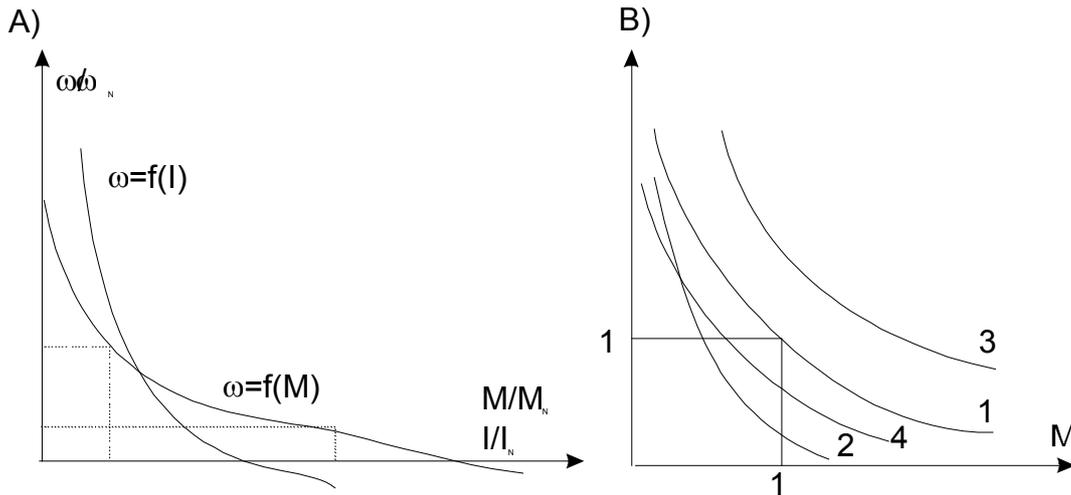


Rysunek 145 Układ do pomiaru charakterystyki mechanicznej silnika szeregowego

Uwaga: rozruchu silnika mozna dokonywac tylko pod obciazeniem (pradnica obciazajaca wzbudzona przy zalaczonym R_{obc}), regulujac napieciem zasilajacym od wartosci 0 do U_N (rozruch napieciowy) lub przy $U = \text{const}$ regulujac rezystorem R_d od wartosci maksymalnej do zera.

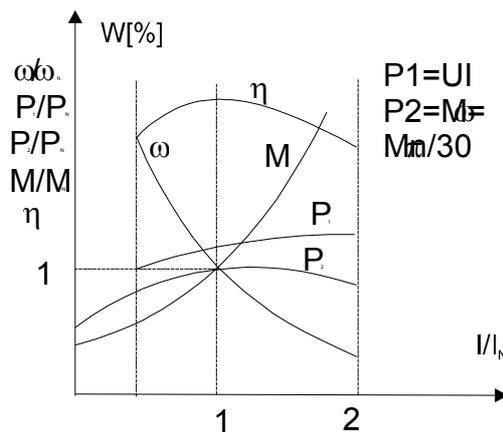
Nalezny wyznaczyć charakterystyki $\omega = f(I)$, $f(M)$ – Rysunek 146b.

1. przy $R_d = 0$, $R_{fb} = \infty$, $U = U_N = \text{const}$
2. przy $R_d > 0$, $R_{fb} = \infty$, $U = U_N = \text{const}$
3. przy $R_d = 0$, $0 < R_{fb} < \infty$, $U = U_N = \text{const}$
4. przy $R_d = 0$, $R_{fb} = \infty$, $U < U_N = \text{const}$



Rysunek 146 Przykładowe przebiegi charakterystyk mechanicznych silnika szeregowego: a) charakterystyka naturalna w jednostkach względnych, b) 1 –naturalna, 2-zoporem dodatkowym, 3-ze zbcznikowanym uzwojeniem wzbudzenia, 4-przy obniżonym napięciu

Opracowaniem wyników pomiarów będzie obliczenie i wykreślenie następujących charakterystyk: $\omega=f(M)$ (Rysunek 146), $\omega=f(I)$, $P_2=f(I)$, $P_1=f(I)$, $M=f(I)$, $\eta=P_2/P_1=f(I)$, (Rysunek 146), i $w\%=(I_f/I)100$, $w\%$ – stopień wzbudzenia silnika przy zbcznikowanym uzwojeniu wzbudzenia. Wielkość tę najlepiej jest wyrazić w wartościach względnych.



Rysunek 147 Przykładowe przebiegi charakterystyk obciążeniowych silnika szeregowego

Charakterystyka regulacji

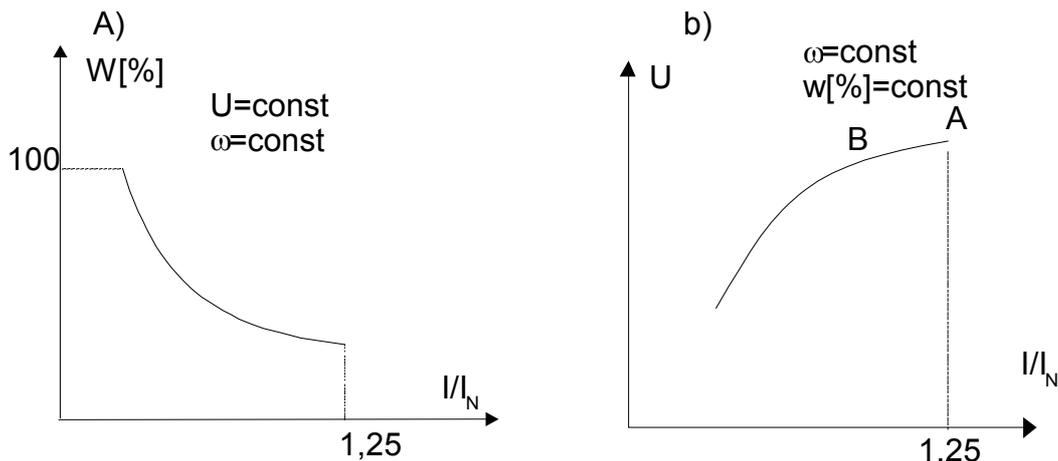
Charakterystyka regulacji określa jak należy zmieniać stopień wzbudzenia $w\%$ lub napięcie U zasilające silnik, aby przy zmieniającym się obciążeniu (M, I) utrzymać stałą prędkość obrotową:

- $w\%=f(I)$ przy $\omega = \text{const}$, $U = \text{const}$
- $U=f(I)$ przy $\omega = \text{const}$, $w\% = \text{const}$

Układ pomiarowy - Rysunek 145

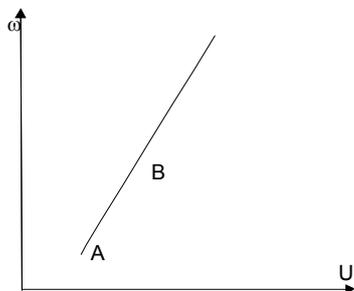
Pomiaru $w\%$ (I) dokonuje się, zaczynając od obciążenia maksymalnego $I=1,25I_N$. stopniowo odwzbudza się silnik, zmniejszając rezystancję R_{fb} bocznikującą wzbudzenie do chwili, gdy silnik uzyska zadana prędkość obrotowa (punkt A, Rysunek 148a). następnie zwiększając R_{fb} (dowzbudzenie silnika) zmniejsza się obciążenie tak, by silnik uzyskał prędkość ω (punkt B, Rysunek 148a); punkt C charakterystyki uzyskuje się tak samo jak punkt B.

Pomiar zależności $U=f(I)$ rozpoczyna się, obciążając silnik prądem około $1,25I_N$, przy niezbcznikowanym uzwojeniu wzbudzenia i takim napięciu zasilania, aby silnik uzyskał zadana prędkość obrotowa ω (punkt A, Rysunek 148b). następnie zmniejsza się napięcie U , po czym odciąża się silnik aż do uzyskania prędkości ω (punkt B, Rysunek 148b). następnymi punktami charakterystyki uzyskuje się analogicznie.



Rysunek 148 Charakterystyka regulacji: a) $w=f(I)$ przy $U=\text{const}$, b) $Uf(I)$ przy $w=\text{const}$

Regulacja predkosci obrotowej silnika poprzez zmiane napiecia zasilajacego przy stałym momencie (pradzie) obciazenia



Rysunek 149 Charakterystyka $\omega=f(U)$ przy $M=\text{const}$

Pomiaru dokonuje sie w ukkladzie - Rysunek 145, zaczynajac od napiecia minimalnego, przy ktorym da sie uzyskac zadany moment obciazenia silnika (pkt A, Rysunek 149). Zwikszajac napiecie U tak reguluje sie obciazeniem silnika, aby moment obciazenia M (prad I) pozostal stały (pkt B, Rysunek 149). Podczas pomiaru odczytuje sie predkosci obrotowa ω i napiecie zasilajace U .

Sprawnosci silnika

Metoda bezposredniego obciazenia

Nalezy zmierzyc moc P_1 pobrana przez silnik i moc P_2 oddana na wale silnika.

$$P_1=U \cdot I, \quad P_2=M \omega, \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100$$

1.1.1. Metoda strat poszczegolnych

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_1 - \sum \Delta P}{P_1} \cdot 100 = 1 - \frac{\sum \Delta P}{P_1} \cdot 100$$

$$\sum \Delta P = \Delta P_{\text{Cua}} + \Delta P_{\text{Cuf}} + \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{m}} + \Delta P_{\text{sz}} + \Delta P_{\text{d}}$$

$$\Delta P_{\text{Cua}} = R_a I^2 - \text{straty w uzwojeniach wirnika i uzwojeniach szeregowych}$$

$$\Delta P_{\text{Cuf}} = (R_f + R_{fd}) I_f^2 - \text{straty w uzwojeniu wzbudzenia}$$

$$\Delta P_{\text{sz}} = \Delta U_{\text{sz}} I_t - \text{straty na szczotkach (zwykle pomijane)}$$

$$\Delta P_{\text{d}} = 0,01 P_N (I^2 / I_N^2) - \text{straty obciazeniowe dodatkowe}$$

$\Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{m}} = \Delta P_o$ - straty jalowe (w obwodzie magnetycznym i mechaniczne) wyznacza sie sposobem silnikowym wedlug ogolnych zasad przyjetych dla maszyn pradu stalego, a nastepnie dokonuje sie ich rozdzialu na ΔP_{Fe} i ΔP_{m} (patrz cwiczenie P2)

Pytania i zadania kontrolne

1. Jakie parametry i cechy silnika szeregowego decydują o jego szczególnej przydatności do napędu trakcyjnego i dlaczego?
2. Jakiemu celowi służy wyznaczenie charakterystyki magnesowania?
3. Jak zmienia się początkowy moment rozruchowy w zależności od stopnia wzbudzenia silnika?
4. Rozruch i regulacja prędkości obrotowej silnika szeregowego.
5. Charakterystyki mechaniczna i regulacyjna silnika szeregowego i celowość ich wyznaczania.
6. Straty w silniku szeregowym i sposób ich wyznaczania.
7. Silnik szeregowy o danych: $P_N = 6 \text{ kW}$, $n_N = 2000 \text{ obr/min}$, $\eta_w = 85\%$, $U_N = 100 \text{ V}$, $R_t + R_f = 0,2 \text{ } \Omega$, $R_f = 0,5 \text{ } \Omega$ pracuje obciążony momentem $M_o = 20 \text{ Nm}$.
8. Obliczyć:
9. Prędkość obrotową dla danego momentu obciążenia M_o .
10. Prędkość obrotową, jeśli uzwojenie wzbudzenia zbocznikowano rezystancją $R_{fb} = 0,08 \text{ } \Omega$ przy momencie obciążenia $0,7 M_o$.
11. Charakterystyka magnesowania dana jest zależnością:

$$c_u * \phi = \frac{0,00226 I_f}{0,0425 |I_f| + 1}$$