

## Moduł 5

### Rodzaje uzwojeń i materiałów konstrukcyjnych

1. Rodzaje materiałów stosowanych w elektrotechnice
2. Materiały konstrukcyjne stosowane do budowy maszyn i urządzeń elektrycznych
3. Rodzaje uzwojeń silników indukcyjnych
4. Podział materiałów elektroizolacyjnych
5. Lakiery elektroizolacyjne

## 1. Rodzaje materiałów stosowanych w elektrotechnice

Podział materiałów elektrotechnicznych wynika z ich funkcji w urządzeniach lub układach elektrycznych. Ze względu na wartość rezystywności w temperaturze 20°C rozróżnia się materiały przewodzące, półprzewodzące i elektroizolacyjne. Osobną grupę stanowią materiały nadprzewodzące, które cechuje temperatura przejścia w stan nadprzewodnictwa, zwana temperaturą krytyczną.

Oprócz wymienionych rozróżnia się również materiały magnetyczne, tj. materiały, które z racji swych właściwości ferromagnetycznych są stosowane w obwodach magnetycznych.

Do materiałów przewodzących zaliczyć można:

- miedź i jej stopy – sama miedź stosowana w elektrotechnice, ze względu na sposób wytwarzania, dzieli się na beztlenową i elektrolityczną. Do stopów miedzi zalicza się mosiądz (stop miedzi z cynkiem), brąz (stop miedzi z innymi metalami lub krzemem), wieloskładnikowy stop oporowy (stop miedzi z niklem lub manganem).



**Rysunek 1. Gruda miedzi Cu**

Źródło: <http://pl.wikipedia.org/wiki/Mied%C5%BA>, stan na dzień 21.11.13

- aluminium i jej stopy – aluminium stosowane do celów elektrotechnicznych dzieli się pod względem sposobu wytwarzania na rafinowane i hutnicze. Aluminium rafinowane wykorzystywane jest do produkcji folii kondensatorowej. Aluminium hutnicze wykorzystywane jest do produkcji żył przewodów i kabli. Stopy aluminium dzieli się na odlewnicze i przerabiane plastycznie. Stosując odpowiednie dodatki, można uzyskać większą wytrzymałość, większą zdolność odlewania, lepszą spawalność i obrabialność niż czystego aluminium. Stop aluminium-magnezowo-krzemowy jest stosowany do wyrobu przewodów elektroenergetycznych. Dużą odporność na korozję wykazują stopy aluminium z magnezem

i manganem.



**Rysunek 2. Bryłka aluminium**

Źródło: <http://pl.wikipedia.org/wiki/Glin>, stan na dzień 21.11.13

- cyna – jest odporna na działanie czynników atmosferycznych. Stosuje się ją na lutowia (spoiwa) oraz na powłoki ochronne (nakładane metodą ogniową lub galwanicznie), a także jako dodatek do stopów (głównie z miedzią). Druty miedziane z ochronną powłoką cynową znajdują się m.in. w przewodach o izolacji gumowej wulkanizowanej siarką. Warstwa cyny zapobiega szkodliwemu oddziaływaniu siarki na miedź.



**Rysunek 3. Spoiwo lutownicze – Cyna z 4% domieszką srebra**

Źródło: <http://sklep.rms.pl/wbt-0840-1-cyna-spoiwo-lutownicze-bezolowiowa-4-srebra-1mb>, stan na dzień: 21.11.13

- cynk – jest stosowany tylko jako dodatek stopowy, a także jako warstwa ochronna nakładana metodą ogniową lub galwanicznie. Z cynku są wykonywane elektrody ujemne ogniów galwanicznych.



**Rysunek 4. Cynk**

Źródło: [http://www.e-chemia.nazwa.pl/efektowna/?page\\_id=33](http://www.e-chemia.nazwa.pl/efektowna/?page_id=33), stan na dzień: 21.11.13

- ołów i jego stopy – ołów stosuje się do wyrobu powłok kablowych oraz płyt akumulatorowych, anod do elektrolizy, armatury kwasoodpornej, podkładek i uszczeltek. Wadą ołowiu jest jego duża masa właściwa, mała twardość, mała wytrzymałość na rozciągania, wrażliwość na drgania mechaniczne.



**Rysunek 5. Ołów**

Źródło: <http://pl.wikipedia.org/wiki/O%C5%82%C3%B3w>, stan na dzień: 21.11.13

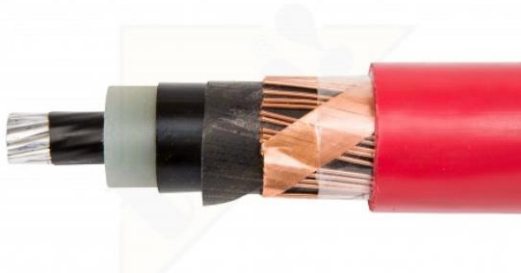
- materiały elektrotechniczne na bazie węgla i grafitu – materiały te pod względem składu dzieli się na grafitowe, węglowo-grafitowe i węglowe. Rezystywność tych materiałów w szerokim zakresie temperatur nie zmienia rzędu swej wartości.



**Rysunek 6. Grafit**

Źródło: <http://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:GraphiteUSGOV.jpg>, stan na dzień 21.11.13

- materiały przewodowe – nazwę tą noszą metale i stopy, z których są wytwarzane przewody i kable elektroenergetyczne. Do tej grupy należą przede wszystkim miedź i aluminium, a także niektóre brązy, stopy aluminium-magnezowo-krzemowe oraz stal.



**Rysunek 7. Kabel YHAKXS 1x240/50 12/20kV**

Źródło: <http://sklep.tim.pl/kabel-yhakxs-1x24050-1220kv-odcinki-bebnowy?context=689dd37934>, stan na dzień: 21.11.13

- materiały oporowe – ze względu na zastosowanie dzieli się je na następujące grupy:
  - o stopy oporowe na rezystory techniczne, regulacyjne, rozruchowe, obciążeniowe itp.
  - o stopy oporowe na rezystory pomiarowe, wykazujące mały współczynnik temperaturowy rezystancji oraz małą jednostkową siłę termoelektryczną względem miedzi
  - o metale i stopy oporowe oraz materiały oporowe niemetalowe na elementy grzejne
  - o metale na oporowe czujniki termoelektryczne, wyróżniające się dużym współczynnikiem temperaturowym rezystancji
  - o materiały na rezystory specjalne bezindukcyjne, oraz o nieliniowej charakterystyce napięciowo-prądowej (warystory)
- materiały stykowe – mogą być jednorodne, dwuwarstwowe (bimetale oraz z warstwą zewnętrzną nakładaną galwanicznie lub natryskiwaną) i wielowar-

stwowe. Materiały stykowe jednorodne wykonuje się w kształcie prętów, drutów, płytek, nakładek stykowych lub blach.

- materiały na ogniwa termoelektryczne – termoelementy lub inaczej materiały termoelektrodowe. Do tych materiałów należą zarówno metale szlachetne z grupy platynowców i ich stopy, a także złoto, jak i metale nieszlachetne z rodziny chromowców (chrom, wolfram, molibden), żelazowców (żelazo, nikiel) oraz aluminium, miedź i mangan.
- termobimetale – wykonuje się przez spojenie pod wysokim ciśnieniem, a następnie walcowanie dwóch metali o różnej rozszerzalności cieplnej. Pod wpływem temperatury termobimetal ulega odkształceniu na skutek różnicy rozszerzalności. Dzięki tej właściwości jest stosowany na elementy termoregulacyjne w obwodach elektrycznych. dają się one obrabiać plastycznie. Najczęściej stosowanym zestawem materiałów tworzących termobimetale jest nikiel ze stopem żelaza z niklem, noszącym nazwę inwar.
- luty (spoiwa) – to stopy metali o temperaturze niższej niż temperatura łączonych metali. Rozróżnia się luty miękkie o temperaturze topnienia poniżej 400°C i luty twarde o temperaturze topnienia powyżej 700°C. Luty miękkie stosuje się do połączeń szczelnych, a luty twarde do połączeń szczelnych i przenoszących obciążenia.

Materiały przewodzące znajdują zastosowanie jako materiały przewodowe, oporowe i stykowe. Osobną grupę stanowią materiały przewodzące stosowane w ogniwach termoelektrycznych, termobimetale oraz spoiwa<sup>1</sup>.

Najważniejszymi materiałami potrzebnymi do wykonania i naprawy uzwojeń oraz węzłów szczotkowych są:

- przewody nawojowe



**Rysunek 8. Drut nawojowy**

Źródło: [http://www.statorservice.pl/?pg\\_symb=druty](http://www.statorservice.pl/?pg_symb=druty), stan na dzień: 21.11.13

- materiały izolacyjne na izolację żłobkową



**Rysunek 9. Klin izolacji żłobkowej**

Źródło: <http://www.multipino.pl/offer535188.html>, stan na dzień: 21.11.13

---

<sup>1</sup> Praca zbiorowa, *Poradnik inżyniera elektryka Tom 1*, WNT, Warszawa 1996, s. 171



- lakiery izolacyjne do nasycania i pokrywania uzwojeń
- szczotki do silników pierścieniowych i silników prądu stałego



**Rysunek 10. Przykładowe szczotki do silnika**

Źródło: <http://agdlab.pl>, stan na dzień 21.11.13

**Przewody nawojowe** są wykonane z drutu nawojowego okrągłego lub profilowego (o przekroju prostokątnym). Druty okrągłe są stosowane we wszystkich małych i średnich silnikach indukcyjnych, a druty profilowe – w wirnikach silników pierścieniowych i większych silnikach prądu stałego na uzwojenie twornika i biegunów zwrotnych. Druty nawojowe są wykonane z miedzi elektrolitycznej, ponieważ metal ten oprócz srebra na większą konduktywność (przewodność elektryczną właściwą), wynoszącą  $57 \cdot 10^6 \text{ S/m}$  w temperaturze  $20^\circ\text{C}$ . Pod względem mechanicznym miedź ma dość dużą wytrzymałość na zerwanie, jest ciągliwa i łatwa do obróbki. Ważną jej cechą jest łatwość lutowania. Natomiast odlewy z miedzi są kruche i porowate. Z miedzi wykonuje się również wyciniki komutatorów. Stopy miedzi mają nieco mniejszą przewodność, ale większą wytrzymałość, większą twardość i nadają się do odlewania. Brązy są używane na pierścienie ślizgowe i obsady szczotkowe. Mosiądze są stosowane na obsady szczotkowe, śruby, nakrętki i zawory zaciskowe.

Aluminium ma mniejszą konduktywność, wynoszącą ok.  $34 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ . stosowane jest głównie do odlewania uzwojeń wirników klatkowych silników indukcyjnych.

**Na izolację żłobkową** stosuje się różne materiały elektroizolacyjne, takie jak:

- triaszpan
- tereszpan



**Rysunek 11. Tereszpan**

Źródło: <http://corpig.pl/?materiały-izolacyjne>, stan na dzień: 21.11.13

- taśmy izolacyjne



**Rysunek 12. Taśma izolacyjna papierowa wzmocniona nitką**

Źródło: <http://www.energem.pl/component/content/?view=featured>, stan na dzień: 21.11.13

- ceratki



**Rysunek 13. Ceratki teflonowe**

Źródło:

[http://elektrotermia.com.pl/pl/oferta/grzalki\\_elektryczne\\_produkty\\_kanthal,materiały\\_wysokotemperaturowe,ceratki\\_teflonowe.html](http://elektrotermia.com.pl/pl/oferta/grzalki_elektryczne_produkty_kanthal,materiały_wysokotemperaturowe,ceratki_teflonowe.html), stan na dzień: 21.11.13

- materiały szklane
- materiały mikowe
- różnego rodzaju folie ze sztucznych żywic

Użyty materiał izolacyjny musi być oczywiście dostosowany pod względem ciepłoodporności do klasy izolacji silnika podanej na tabliczce znamionowej.



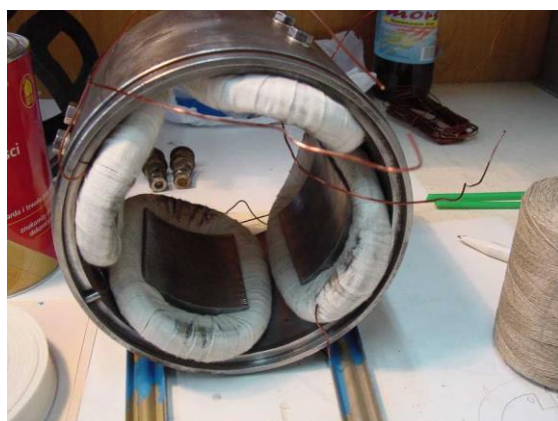
**Kliny żłobkowe** wykonuje się z twardego drewna, najczęściej bukowego, tekstolitu szklanego lub innego tworzywa sztucznego.



**Rysunek 14. Kliny generatora**

Źródło: <http://wemi.eu/p,s,galeria,strona,2.html>, stan na dzień 21.11.13

Do wiązania czół używa się sznurów, taśm lub koszulek z włókna szklanego. Bandaże mocujące czoła uzwojeń wirników pierścieniowych i uzwojeń wirników silników prądu stałego wykonuje się z drutu stalowego pokrywanego warstwą cyny albo z włókna szklanego klejonego żywicą epoksydową.



**Rysunek 15. Uzwojenia silnika owinięte taśmą**

Źródło: <http://www.pg.gda.pl/~jarguz/melex/mb3.jpg>, stan na dzień: 21.11.13

Bardzo ważną rolę w układzie elektroizolacyjnym silnika odgrywa lakier elektroizolacyjny, którym nasycy się i powleka uzwojenie. Proces lakierowania uzwojeń ma decydujący wpływ na jakość naprawianych silników. Dzięki opracowaniu dobrych lakierów elektroizolacyjnych i opanowaniu technologii ich stosowania bardzo zwiększyła się trwałość silników w normalnych warunkach, a oprócz tego stało się możliwe wykonanie silników pracujących w zaostrzonych warunkach środowiskowych<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup>J. Zebrzuski, *Uszkodzenia i naprawa silników elektrycznych*, WNT, Warszawa 1992, s 235

## 2. Materiały konstrukcyjne stosowane do budowy maszyn i urządzeń elektrycznych

Zadaniem materiałów konstrukcyjnych jest zapewnienie maszynie odpowiedniej sztywności, wytrzymałości na drgania, uderzenia itp. W maszynach wirujących jest dodatkowo wymagane:

- dobre ułożyskowanie wirnika
- zabezpieczenie elementów nieizolowanych będących pod napięciem przed dotykiem bezpośrednim
- stworzenie układu osłon i kanałów dla właściwego obiegu czynnika chłodzącego

W maszynach małych i średnich elementy z materiałów konstrukcyjnych tworzą widoczną z zewnątrz obudowę. W dużych jednostkach podstawowe elementy konstrukcyjne są często osłonięte z zewnątrz dodatkowymi pokrywami, przeważnie metalowymi. Ważnym elementem konstrukcyjnym jest wał wirnika oraz jego ułożyskowanie. Wszystko to sprawia, że najistotniejsze dla materiałów konstrukcyjnych są takie właściwości mechaniczne, jak:

- twardość
- wytrzymałość na rozerwanie
- zginanie
- skręcanie
- ciągliwość
- łatwość obróbki i spawania
- właściwości odlewnicze

Materiały konstrukcyjne nie stanowią na ogół elementów obwodu wykorzystywanych jako drogi przepływu strumienia magnetycznego – wyjątkiem są stojany maszyn prądu stałego, gdzie korpus zewnętrzny jest często równocześnie fragmentem obwodu magnetycznego.

Jako materiałów konstrukcyjnych używa się prawie wyłącznie różnych gatunków stali, staliwa, rzadziej żeliwa. W maszynach małych i średnich najczęściej stosuje się zwykłe gatunki stali węglowych, natomiast w maszynach dużych często konieczne jest stosowanie specjalnych stali stopowych o najwyższych parametrach wytrzymałościowych. Duże znaczenie ma zastosowanie maszyny, ponieważ w przypadku ciężkich warunków pracy materiały konstrukcyjne muszą być bardzo dokładnie dobrane. Tylko w małych maszynach można spotkać elementy konstrukcyjne w postaci korpusów odlewanych ze stopów aluminium lub części tłoczone z mas plastycznych.

Ze stopów miedzi (brązu, mosiądzu) wykonuje się panewki łożysk wylwane stopem łożyskowym, którego podstawowym składnikiem jest cyna, oraz uchwyty i trzymadła szczotek węglowych współpracujących z ruchomymi pierścieniami lub komutatorem.

W odniesieniu do wszystkich materiałów konstrukcyjnych obowiązują zasady obliczeń wytrzymałościowych stosowane przy projektowaniu wszystkich urządzeń mechanicznych. Dobór odpowiedniego materiału i odpowiednie zaprojektowanie elementów konstrukcyjnych – przy uwzględnieniu technologii wykonania i kosztu samego materiału – ma istotne znaczenie dla prawidłowej pracy maszyny i jej wytrzymałości. Szczególnie ważne jest to dla maszyn dużych mocy, w których oprócz obciążeń statycznych mogą występować drgania oraz naprężenia dynamiczne<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup>E. Goźlińska, *Maszyny elektryczne*, WSiP, Warszawa 2007, s. 52

Do materiałów konstrukcyjnych zaliczamy:

- metale i ich stopy
- polimery
- ceramikę
- kompozyty

Metale to materiały konstrukcyjne, które w stanie stałym charakteryzują się następującymi właściwościami:

- dobre przewodnictwo ciepła
- dobre przewodnictwo elektryczne
- połysk
- plastyczność

Metale i ich stopy poddane naprężeniu mechanicznemu odkształca się sprężysto, a po przekroczeniu pewnej wartości naprężenia – plastycznie. Odkształcenie sprężyste polega na sprężystym (odwracalnym) odkształceniu sieci krystalicznej. Odkształcenie plastyczne natomiast – na nieodwracalnym przemieszczeniu się jednej części kryształu względem drugiej, zwanym poślizgiem. W materiale polikrystalicznym przemieszczenie to następuje wewnątrz ziaren.

Polimery to tworzywa sztuczne, wielocząsteczkowe związki organiczne, które ze względu na właściwości mechaniczne dzieli się na:

- plastomery – o dużym module sprężystości. W określonym zakresie temperatur dominują w nich odkształcenia plastyczne
- elastomery – o małym module sprężystości. W pewnym zakresie temperatur wykazują zdolność niemal natychmiastowego powrotu do postaci pierwotnej, nawet po dużym odkształceniu.

Polimery należą do materiałów elektroizolacyjnych syntetycznych.

Ceramika należy do materiałów elektroizolacyjnych stałych nieorganicznych. Tworzą ją nieorganiczne związki metali z tlenem, azotem, węglem, borem i innymi pierwiastkami. Atomy są połączone wiązaniem jonowym i kowalencyjnym. Po zaformowaniu materiały ceramiczne wygrzewane są w wysokich temperaturach. Materiały ceramiczne znajdują szerokie zastosowanie jako:

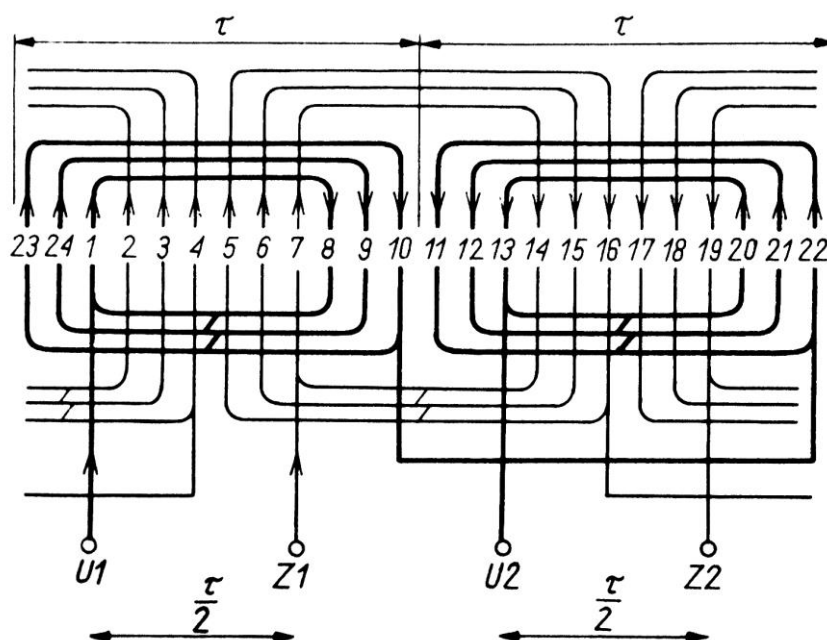
- izolatory i części izolacyjne
- elementy konstrukcyjno-izolacyjne aparatów i urządzeń niskonapięciowych
- izolatory i elementy izolacyjne wysokonapięciowe i niskonapięciowe o dużej wytrzymałości mechanicznej i podwyższonych temperaturach eksploatacji, elementy konstrukcyjno-izolacyjne w obwodach wielkiej częstotliwości, kondensatory
- elementy w urządzeniach elektronicznych i próżniowych
- elementy lamp elektronowych
- elementy konstrukcyjno-izolacyjne do specjalnych urządzeń elektrotechnicznych, urządzeń próżniowych, lamp elektronowych

Kompozyty są połączeniem dwóch lub więcej odrębnych nierozpuszczających się w sobie faz, z których każda odpowiada innemu podstawowemu materiałowi inżynierskiemu zapewniającymi lepszy zespół własności i cech strukturalnych, od właściwych dla każdego z materiałów składowych oddzielnie.

### 3. Rodzaje uzwojeń silników indukcyjnych

Rozróżnia się trzy rodzaje uzwojeń stojanów silników jednofazowych. Dwa z nich są uzwojeniami dwufazowymi rozłożonymi w żłobkach, trzeci zaś rodzaj stanowi uzwojenie skupione w postaci cewek umieszczonych na wydrotnych biegunach stojana.

**Symetryczne uzwojenie dwufazowe** jest stosowane w silnikach z fazą pomocniczą, w których obie fazy są przyłączone do sieci zarówno podczas rozruchu, jak i w czasie pracy. Ten rodzaj uzwojenia mają najczęściej spotykane silniki z kondensatorową fazą pomocniczą. Przykładem może być uzwojenie o parametrach  $Q=24$ ,  $2p=2$ .



**Rysunek 16. Jednowarstwowe symetryczne uzwojenie dwufazowe  $Q=24$ ;  $2p=2$ ;  $Y_q=7, 9, 11$ ;  $q=6$**

Źródło: J. Zebrzusi, *Uszkodzenia i naprawa silników elektrycznych*, WNT, Warszawa 1992, s 51

Obie fazy powyższego uzwojenia są symetrycznie rozłożone na obwodzie stojana i każda z nich zajmuje połowę żłobków. Liczba żłobków na biegun i fazę w symetrycznych uzwojeniach dwufazowych wynosi:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot 2p} = \frac{24}{2 \cdot 2} = 6$$

Liczba żłobków na biegun i fazę odpowiada szerokości strefy fazowej, więc strefy fazowe obu faz zawierają po 6 żłobków, leżących obok siebie. Ponieważ na każdy biegun przypada jedna strefa fazowa każdej z faz, więc w przypadku dwóch biegunów i dwóch faz otrzymuje się ogółem cztery strefy fazowe. Jeżeli sześć żłobków (licząc od lewej strony) o numeracji 20, 21, 22, 23, 24, 1 zostało przydzielone do fazy U1-U2 i stanowią jej pierwszą strefę fazową, to następne z kolei żłobki 2, 3, 4, 5, 6, 7 będą pierwszą strefą fazową fazy Z1-Z2. Dwanaście żłobków zajmuje szerokość jednej podziałki biegunowej  $\tau$ . Obie strefy fazowe są przesunięte względem siebie o połowę podziałki biegunowej  $\frac{\tau_p}{2}$ . W tej samej kolejności leżą strefy fazowe w drugiej podziałce biegunowej.

Ze względu na dużą liczbę  $q = 6$  w uzwojeniu zastosowano grupy dzielone na połowę, dzięki czemu uzyskuje się dwukrotne zmniejszenie liczby zezwojów o różnych rozmiarach oraz zmniejszenie średniej długości i wysięgu czoł uzwojenia, a więc mniejsze zużycie miedzi. Zezwoje obu faz mają jednakowe wymiary i mogą być nawijane na tym samym wzorniku, natomiast mogą się różnić przekrojem przewodu oraz liczbą zwojów w zezwoju. W przypadku grup dzielonych połączenie między dwiema grupami w fazie wykonuje się, łącząc koniec pierwszej grupy w paśmie fazowym z końcem drugiej (połączenie 10-22). Początki pierwszych grup U1, Z1 i końce drugich grup U2, Z2 wyprowadza się do tabliczki zaciskowej jako początki i końce faz. W celu sprawdzenia prawidłowości połączenia uzwojenia, na schemacie przyjmuje się dowolny kierunek prądu i oznacza się kierunki prądu w bokach zezwojów. Przy prawidłowym połączeniu uzwojenia kierunki prądów w żłobkach jednej strefy fazowej muszą być zgodne, w sąsiednich strefach zaś tej samej fazy – przeciwne.

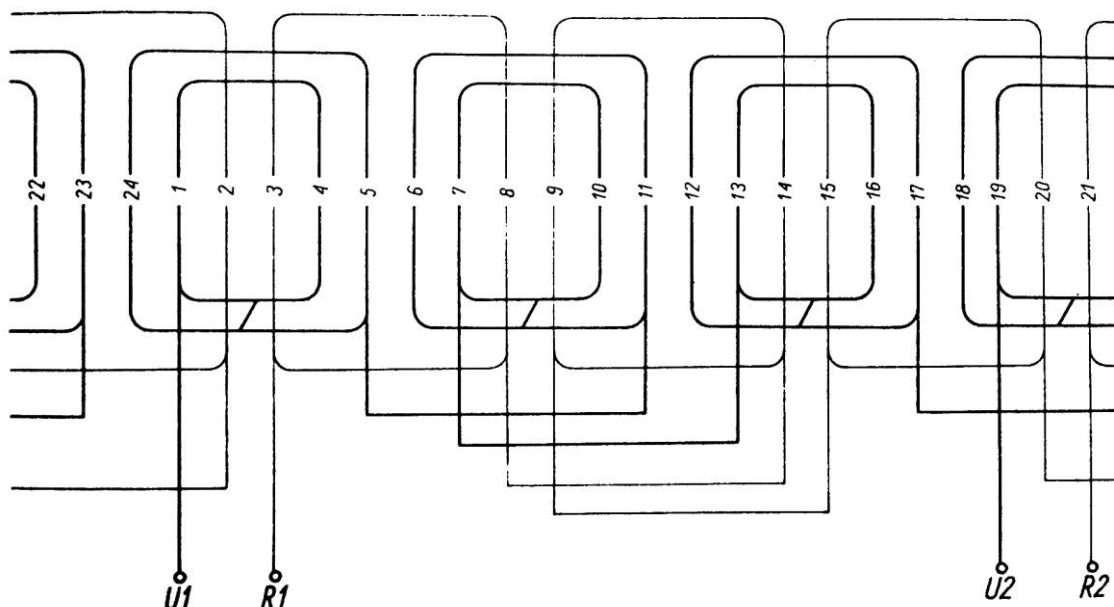
**Niesymetryczne uzwojenia dwufazowe** zwykle stosuje się w tych silnikach, w których po dokonaniu rozruchu pozostaje włączone na czas pracy tylko jedno uzwojenie – faza główna. Są to silniki z kondensatorową lub z oporową fazą rozruchową. W uzwojeniach niesymetrycznych obydwie fazy są niejednakowo rozłożone na obwodzie stojana. W celu zapewnienia jak największego wykorzystania rdzenia faza główna zwykle zajmuje około  $2/3$  żłobków, a faza rozruchowa –  $1/3$ . Obie fazy są, tak jak poprzednio, przesunięte względem siebie o pół podziałki biegunowej  $\frac{\tau_p}{2}$ .

Niesymetryczne uzwojenia dwufazowe są zwykle wykonywane jako jednowarstwowe koncentryczne. Uzwojenia te można podzielić na dwa rodzaje:

- uzwojenia zwykłe
- uzwojenia sinusoidalne

W uzwojeniu zwykłym każdy żłobek stojana zawiera tylko jeden bok zezwoju jednej fazy, natomiast w uzwojeniu sinusoidalnym tylko pewna liczba żłobków jest całkowicie wypełniona wyłącznie przez fazę główną lub rozruchową, pozostałe żłobki mają po dwa zezwoje – jeden fazy głównej i jeden fazy rozruchowej. Poszczególne zezwoje tej samej fazy mają różne liczby zezwojów tak dobrane, aby w szczelinie uzyskać rozkład pola magnetycznego, wytwarzanego przez uzwojenie, możliwie zbliżony do sinusoidalnego.

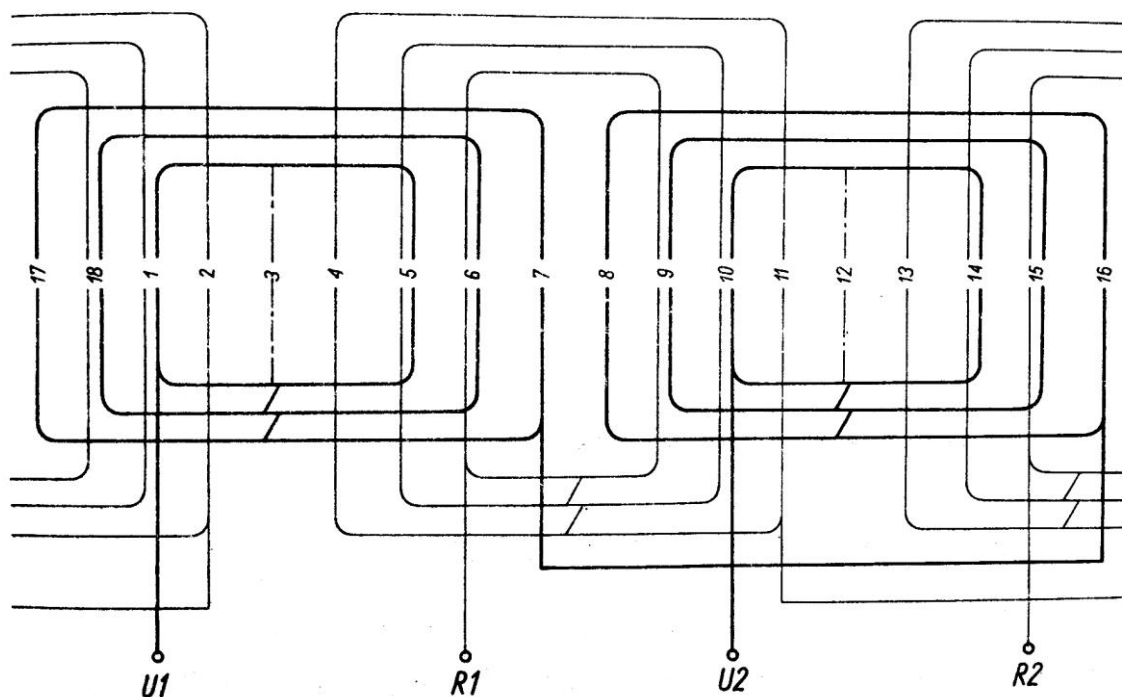
Schemat najczęściej spotykanego w praktyce uzwojenia czterobiegunowego silnika z fazą rozruchową przedstawia rysunek:



**Rysunek 17. Niesymetryczne uzwojenie dwufazowe  $Q=24$ ;  $2p=4$ ;  $Y_{Q1}=3, 5$ ;  $Y_{Q2}=5$ ;  $q_1=4$ ;  $q_2=2$**

Źródło: J. Zebrzusi, *Uszkodzenia i naprawa silników elektrycznych*, WNT, Warszawa 1992, s 53

Jest to zwykle niesymetryczne uzwojenie dwufazowe o danych:  $Q=24$ ;  $2p=4$ ;  $Y_{Q1}=3, 5$ ;  $Y_{Q2}=5$ ;  $q_1=4$ ;  $q_2=2$ . Przykład uzwojenia sinusoidalnego od danych  $Q=18$ ;  $2p=2$ ;  $q_1=6$ ;  $q_2=6$  przedstawia rysunek:



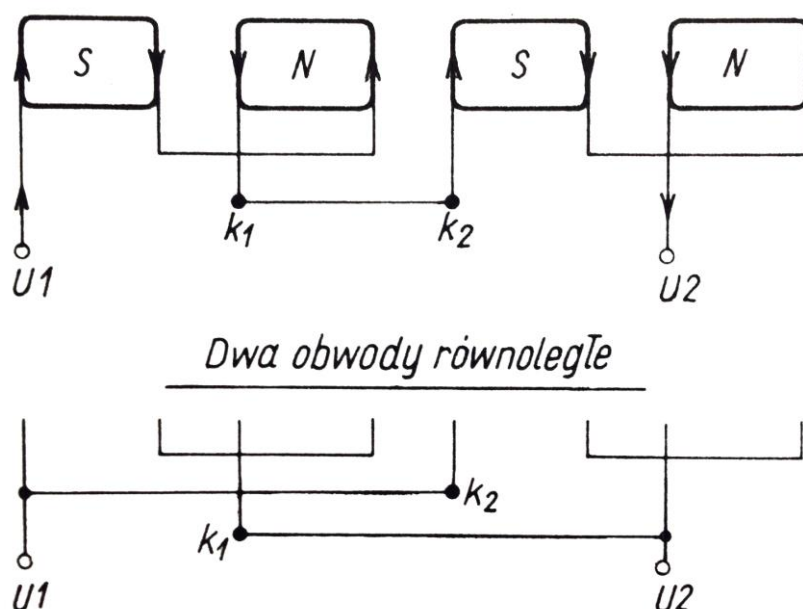
**Rysunek 18. Uzwojenie sinusoidalne  $Q=18$ ;  $2p=2$ ;  $Y_{Q1}=4, 6, 8$ ;  $Y_{Q2}=3, 5, 7$ ;  $q_1=6$ ;  $q_2=6$**

Źródło: J. Zebrzusi, *Uszkodzenia i naprawa silników elektrycznych*, WNT, Warszawa 1992, s 53

Źłobki 3 i 12, leżące w środku obu grup fazy głównej, są nieuzwojone.



**Uzwojenia skupione** stosuje się w silnikach ze zwartą fazą pomocniczą (ze zwartym zwojem), najczęściej stosowanych do wentylatorów pokojowych. Jest to najprostszy rodzaj uzwojeń silników prądu przemiennego. Uzwojenie składa się z cewek, z których każda jest umieszczona na innym biegunie. W tym przypadku na wewnętrznym obwodzie stojana zamiast żłobków znajdują się wystające bieguny. Liczba cewek jest równa liczbie biegunów silnika. Schemat takiego uzwojenia przedstawia rysunek:



**Rysunek 19. Uzwojenie skupione  $2p=4$**

Źródło: J. Zebruski, *Uszkodzenia i naprawa silników elektrycznych*, WNT, Warszawa 1992, s 54

Uzwojenie składa się z czterech cewek, które mogą być łączone ze sobą szeregowo lub równoległe. Na schemacie oznaczono kierunki chwilowej wartości prądu w cewkach oraz wynikającą stąd ich biegunowość. Przy prawidłowym połączeniu uzwojenia otrzymuje się różną biegunowość sąsiednich cewek<sup>4</sup>.

#### 4. Podział materiałów elektroizolacyjnych

Do materiałów elektroizolacyjnych zalicza się:

- gazy (dielektryki gazowe)
- ciecze (dielektryki ciekłe)
- materiały stałe (dielektryki stałe)

których rezystywność w warunkach normalnych, czyli w temperaturze 20°C, przy wilgotności 65 % i ciśnieniu 0,133 Mpa, jest większa lub równa  $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ .

##### Dielektryki gazowe

Każdy gaz, jeżeli nie jest w stanie silnego zjonizowania, ma właściwości izolacyjne. W technice wykorzystuje się zarówno gazy pochodzenia naturalnego, jak i gazy otrzymywane w wyniku syntezy. Do najczęściej wykorzystywanych dielektryków gazowych zaliczamy:

<sup>4</sup>J. Zebruski, *Uszkodzenia i naprawa silników elektrycznych*, WNT, Warszawa 1992, s 50

- hel
- neon
- argon
- krypton
- wodór
- dwutlenek węgla
- tlen
- powietrze
- azot
- freon 12
- sześćciofluorek siarki

Z gazów naturalnych należy przede wszystkim wymienić powietrze. W układach zamkniętych do najczęściej wykorzystywanych należy azot, dwutlenek węgla, wodór, hel, a w technice oświetleniowej – gazy szlachetne, takie jak argon, neon, krypton, ksenon.

Z gazów syntetycznych szerokie zastosowanie ma sześćciofluorek siarki. Do wcześniej stosowanych gazów syntetycznych należał freon 12.

**Powietrze** – w zakresie wahań temperatury i ciśnienia atmosferycznego można przyjąć, że wytrzymałość elektryczna powietrza zależy wprost proporcjonalnie od jego gęstości, a zatem wprost proporcjonalnie od ciśnienia i odwrotnie proporcjonalnie od temperatury bezwzględnej.

**Azot** – jest gazem niepalnym, nietoksycznym, słabo rozpuszczalnym w związkach organicznych. Jest tani, służy do wypełniania baniek żarówek wraz z argonem. Pod wysokim ciśnieniem stosuje się go jako izolację wysokonapięciową, np. w kondensatorach wzorcowych. Używa się go również jako atmosfery ochronnej przed utleniającym działaniem powietrza.

**Dwutlenek węgla** – jest gazem trwałym, niepalnym, łatwo otrzymywanym w stanie czystym. W obecności wyładowań niezupełnych słabo oddziałuje korozyjnie. W niewielkim stopniu działa drażniąco na błony śluzowe, a w obecności wilgoci – również na skórę.

**Wodór** – tworzy mieszaninę wybuchową z tlenem. Ze względu na dobre przewodnictwo ciepła i małą masę cząsteczkową jest stosowany w wymuszanych obiegach chłodzenia, m.in. w turbogeneratorach. Jest nietoksyczny i tani. W obecności wyładowań niezupełnych może działać niszcząco na niektóre materiały elektroizolacyjne.

**Hel** – jest pierwiastkiem o najniższej temperaturze wrzenia i z tego powodu znajduje zastosowanie jako czynnik chłodzący, a także izolujący w postaci ciekłej w urządzeniach krionicznych. Hel ciekły ma właściwości izolacyjne, nie jest toksyczny ani palny i nie wywołuje korozji, lecz jest drogi.

**Neon** – jest stosowany w barwnych lampach jarzeniowych, w świetlówkach, gazotronach, stabilizatorach jarzeniowych i innych gazowanych lampach elektronowych. Jest niepalny, nietoksyczny, nie powoduje korozji.

**Sześćciofluorek siarki** – jest syntetycznym gazem elektroujemnym, nietoksycznym, niepalnym, trwałym do temperatury 500°C i nie wywołującym korozji. Cechuje go duża gęstość, ok. 6-krotnie większa od powietrza. Zastosowany jako medium izolacyjne umożliwia miniaturyzację urządzeń elektrycznych, jak i całych rozdzielnic.

**Freon 12** – jest niepalny, nietoksyczny, stabilny chemicznie do temperatury 750°C, nie działa korodująco.

**Dielektryki ciekłe** – podzielić można na: oleje mineralne i oleje syntetyczne. Ropa naftowa, z której otrzymuje się oleje izolacyjne, jest głównie mieszaniną węglowodorów nasyconych parafinowych, naftenowych i węglowodorów aromatycznych. Jakość olejów

izolacyjnych sprawdza się poprzez badanie ich właściwości chemicznych, fizycznych i dielektrycznych. Do ważniejszych wielkości określających te właściwości należą: liczba kwasowa, zawartość osadów, lepkość, zawartość wody, zawartość ciał obcych, temperatura zapłonu, temperatura krzepnięcia, rozpuszczalność gazów, wytrzymałość elektryczna, tangens kąta strat dielektrycznych i rezystywność.

Do najczęściej stosowanych olejów syntetycznych należą oleje na bazie węglowodorów aromatycznych oraz oleje estrowe. Oleje na bazie węglowodorów aromatycznych cechują dobre właściwości gazowe, małą lepkość i dobra zwilżalność folii elektroizolacyjnych, przenikalność elektryczna jest jednak niewiele większa od olejów mineralnych. Temperatura ich zapłonu jest ok. 2-krotnie wyższa od temperatury zapłonu syciw z węglowodorów aromatycznych, łatwo chłoną wilgoć.

Do rzadziej stosowanych syntetycznych, trudnopalnych cieczy dielektrycznych należą oleje silikonowe. Wykazują one małą zależność lepkości od temperatury, w zakresie temperatur dodatnich odznaczają się stosunkowo dużą chłonnością wody. Starzenie się tych olejów polega na polimeryzacji, w wyniku której przechodzą w stan zestalony o cechach kauczuku. Proces ten można znacznie opóźnić hermetyzując olej. Nie stwarzają one zagrożenia dla środowiska, ponieważ są biodegradowalne.

### **Dielektryki stałe**

Zaliczamy do nich materiały ceramiczne, mikę i materiały mikowe, materiały azbestowe. Rozróżnia się również materiały elektroizolacyjne stałe organiczne naturalne takie jak np. materiały celulozowe, asfalty i woski. Do dielektryków stałych syntetycznych zalicza się tworzywa sztuczne, takie jak polimery (termoplasty), polietylen PE, polipropylen PP, poliizobutylen PIB, polistyren PS, plastyfikowany polichlorek winylu, czyli polwinit, PCW, PVC, duroplasty (tworzywa termoutwardzalne), elastometry, kauczuki i gumy. Ponadto zalicza się do nich półwyroby z tworzyw sztucznych, takie jak: tłoczywa, żywice lane, laminaty, koszulki elektroizolacyjne, folie elektroizolacyjne, taśmy samoprzylepne elektroizolacyjne, wyroby termokurczliwe<sup>5</sup>.

## **5. Lakiery elektroizolacyjne**

Istnieje kilka rodzajów klasyfikacji lakierów elektroizolacyjnych. W zależności od warunków suszenia rozróżnia się lakiery schnące na zimno oraz lakiery schnące w podwyższonej temperaturze – tzw. lakiery piecowe – o lepszych właściwościach dielektrycznych.

Udział rozpuszczalnika decyduje o podziale na lakiery rozpuszczalnikowe i bezrozpuszczalnikowe. W zależności od technologii użytkowania rozróżnia się:

- lakiery nasycające – do nasycania nie tylko uzwojeń maszyn i transformatorów, ale także tkanin przy produkcji takich półwyrobów, jak powlekane tkaniny z bawełny, jedwabiu, włókna szklanego i poliestrowego na taśmy i koszulki izolacyjne oraz materiały warstwowe
- lakiery pokrywające – do emaliowania przewodów oraz do ochrony powierzchni elementów izolacyjnych przed narażeniami klimatycznymi
- lakiery klejące – do produkcji elektroizolacyjnych materiałów azbestowych, mikowych itp.

---

<sup>5</sup>Praca zbiorowa, *Poradnik inżyniera elektryka Tom 1*, WNT, Warszawa 1996, s. 211

O odporności cieplnej lakierów decyduje ich baza żywiczna. Najwyższa dopuszczalna temperatura pracy ciągłej lakierów asfaltowych, melaminowych i fenolowych modyfikowanych olejami nie przekracza 105°C, lakierów poliestrowych modyfikowanych poliuretanami 130°C, lakierów epoksydowych – zazwyczaj 130°C (niektórych odmian 155°C), lakierów poliuretanowych i poliimidowych 155°C. Odporność cieplna lakierów silikonowych i poliimidowych mieści się w granicach 180-250°C.

Dobór lakierów do układy izolacyjnego jest uwarunkowany wymaganą odpornością cieplną, wytrzymałością mechaniczną oraz spodziewanym narażeniem klimatycznym lub środowiskowym. Istotną rolę odgrywają ponadto parametry technologiczne lakieru – lepkość, łatwość odparowania rozpuszczalnika, wymagana temperatura i czas utwardzania, a także dopuszczalny czas składowania.

Proces nasycania lakierami składa się z trzech etapów:

- nasycania ciekłym lakierem
- odprowadzania rozpuszczalnika
- utwardzania żywicy

Odprowadzanie rozpuszczalnika staje się zbędne w przypadku lakierów bezrozpuszczalnikowych. Istnieje kilka metod nasycania:

- nasycanie przez zanurzenie (przy ciśnieniu atmosferycznym)
- nasycanie pod próżnią lub w cyklu próżnia – nadciśnienie
- nasycanie tzw. metodą kropłową, polegającą na tym, że lakier – na ogół bezrozpuszczalnikowy – spływa małym strumieniem lub kroplami na czoło uzwojenia ustawionego pod odpowiednim kątem i obracającego się z prędkością kilkudziesięciu obrotów na minutę.

Układy izolacyjne wysokiego napięcia wymagają na ogół nasycenia próżniowego – czasami kilkakrotnego – końcowe nasycenie metodą zanurzeniową daje powłokę bardziej odporną na wilgoć. W skład rozpuszczalnikowych lakierów pokrywających – do wykonania izolacji przewodów emaliowanych – wchodzi żywice syntetyczne z grupy poliwinylacetali, poliuretany, poliestry modyfikowane oraz amidoimidy. Proces pokrywania drutów lakierami w celu wytwarzania warstwy izolacyjnej na drucie miedzianym lub aluminiowym dokonuje się wyłącznie metodą ciągłą na specjalnych urządzeniach lakierniczych zwanych piecami emalierskimi. Lakier nanosi się na przewód wielokrotnie, przy czym każdą warstwę przed naniesieniem kolejnej utwardza się w podwyższonej temperaturze. Jakość izolacji lakierowej zależy od właściwego doboru ustalonych eksperymentalnie parametrów:

- lepkości
- zawartości substancji błonotwórczych
- prędkości przesuwu przewodu przez piec emalierski
- krotności izolowania – liczby warstw lakieru tworzącego izolację
- warunków utwardzania lakieru

Jednym z najbardziej istotnych kryteriów doboru, jak również podstawą klasyfikacji lakierów stosowanych jako izolacja przewodów emaliowanych, jest odporność na długotrwałe i udarowe działanie podwyższonej temperatury. Ciepłoodporność lakieru charakteryzuje jego wskaźnik temperaturowy, określany dla lakieru jako warstwy izolacji przewodu nawojowego i zapisywany liczbowo po symbolu tego przewodu np. DNE 180 oznacza przewód nawojowy (DN) miedziany, okrągły, emaliowany (E) o wskaźniku temperaturowym 180.

Lakiery do przewodów emaliowanych przeznaczonych do pracy w innych środowiskach niż powietrze – np. w oleju transformatorowym lub freonach – muszą spełniać dodatkowe wymagania dotyczące odporności na działanie danego środowiska.

Lakiery pokrywające nanosi się przez zanurzenie lub natryskiem a w przypadku blach magnetycznych za pomocą systemu wałków w lakiernicy. Do izolowania blach magnetycznych stosuje się lakiery rozpuszczalnikowe, najczęściej na bazie żywic poliuretanowych.

Do nowoczesnych technologii należy wytwarzanie powłok żywicznych metodą fluidyzacyjną. Metoda ta polega na zanurzeniu nagrzanego przedmiotu w zawieszynie sproszkowanej żywicy w powietrzu. Zawiesinę tę uzyskuje się, przepuszczając przez proszek laminarny strumień powietrza. Na powierzchni zanurzonego w zawieszynie przedmiotu tworzy się jednolita powłoka, która po utwardzeniu wykazuje dobre właściwości elektroizolacyjne i ochronne. Metodę fluidyzacyjną stosuje się zwłaszcza przy nanoszeniu powłok z żywicy epoksydowej i poliamidowej.

Lakiery elektroizolacyjne klejące służą do produkcji mikanitów giętkich, mikafolii i taśm mikowych, wykonywanych przez sklejanie płatków miki lakierem. Lakier stosowany do produkcji materiałów mikowych giętkich ulega w procesie produkcji tylko wstępnemu utwardzeniu, tak aby zachował elastyczność do czasu zastosowania w produkcie finalnym. Lakiery te muszą odznaczać się odpornością cieplną odpowiadającą temperaturze pracy układu izolacyjnego.

## **Bibliografia:**

1. Goźlińska E., (2013): Maszyny elektryczne. Warszawa: Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne
2. Praca zbiorowa, (1996): Poradnik inżyniera elektryka Tom 1. Warszawa: WNT
3. Zebrzuski J., (1992): Uszkodzenia i naprawa silników elektrycznych. Warszawa: WNT
4. Kottlarski W., Grad J., (2012): Aparaty i urządzenia elektryczne. Warszawa: Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne
5. Latek W., (1978): Zarys maszyn elektrycznych. Warszawa: WNT
6. Latek W., (1994): Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach. Warszawa: WNT
7. Praca zbiorowa, (1978): Maszyny i napęd elektryczny. Warszawa: Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne
8. Praca zbiorowa, (1995): Poradnik inżyniera elektryka, Praca zbiorowa, Warszawa: WNT