

## **Moduł 2**

### **Parametry techniczne i budowa maszyn elektrycznych**

- 1. Podstawowe parametry techniczne maszyn prądu stałego**
- 2. Podstawowe parametry techniczne maszyn prądu zmiennego**
- 3. Podstawowe parametry techniczne transformatorów**

## 1. Podstawowe parametry techniczne maszyn prądu stałego

Dostępne obecnie na rynku silniki prądu stałego można podzielić na następujące grupy:

- silniki szczotkowe,
- silniki bezszczotkowe,
- silniki bez przekładni,
- silniki z przekładnią czołową,
- silniki z przekładnią ślimakową,
- napędy liniowe.

Podstawowymi parametrami technicznymi maszyn prądu stałego są:

- **napięcie** – wyrażane w  $V$  (voltach) – to napięcie, na jakie zbudowany jest silnik,
- **liczba obrotów** – wyrażana w  $rpm$  (ang. *revolutions per minute* – obroty na minutę – jednostka miary częstotliwości obrotu wyrażająca prędkość obrotową maszyn wirujących) lub prędkość obrotowa (obr/min) – liczba obrotów wału maszyny wykonywana w jednostce czasu,
- **moment obrotowy silnika na wale** – wyrażany w  $Nm$  (niutonometrach). Moment obrotowy na wale opisuje się wzorem:

$$M = \frac{P}{\omega}$$
$$\omega = \frac{2\pi}{60} \cdot n$$

$$M = \frac{30 \cdot P}{\pi \cdot n}$$

gdzie:  $P$  – moc

$n$  – prędkość obrotowa

$\omega$  – prędkość kątowna

- **moment obrotowy prądnicy na wale** – wyrażany w  $Nm$  (niutonometrach). Moment obrotowy na wale opisuje się wzorem:

$$M = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{P}{\eta_g n}$$

gdzie:  $P$  – moc

$n$  – prędkość obrotowa

$\eta_g$  – wartość sprawności prądnicy prądu stałego

- **prąd w uzwojeniu twornika** – wyrażany w  $A$  (amperach) i opisany wzorem:

$$I_a = \frac{U - E}{R_{at}} I_a = \frac{|U - E| - 2U_c}{\Sigma R_a + R_{ad}}$$

gdzie:  $R_{at}$   $R_{ad}$  – rezystancja całkowita twornika, łącznie z rezystancjami dodatkowych innych uzwojeń włączonych w szereg z twornikiem, wyrażona w  $\Omega$   
 $U$  – napięcie na zaciskach twornika w V  
 $E$  – siła elektromotoryczna (napięcie indukowane) w uzwojeniu twornika w V

- **prąd pobierany z sieci** – wyrażany w A (amperach) i opisany wzorem:

$$I = \frac{P}{\eta_s U}$$

gdzie:  $\eta_s$  – sprawność silnika

- **prąd oddawany do sieci** – parametr charakterystyczny dla prądnicy prądu stałego, wyrażany w A (amperach) i opisany wzorem:

$$I = \frac{P}{U}$$

gdzie:  $\eta_s$  – sprawność silnika

- **moc znamionowa silnika** – wyrażona w kW (kilowatach) jest to moc mechaniczna oddawana przez silnik. Dla silnika prądu stałego moc tą opisuje się wzorem:

$$P = U \cdot I \cdot \eta \cdot 10^{-3}$$

gdzie:  $U$  – wartość napięcia stałego w V

$I$  – wartość prądu stałego w A

$\eta$  – współczynnik sprawności

- **waga** – inaczej masa silnika wyrażona w kg (kilogramach),
- **masowy moment bezwładności** – to miara bezwładności ciała w ruchu obrotowym względem osi obrotu wyrażona w  $\text{kgm}^2$  (kilogramach na metr kwadratowy), im większy jest moment bezwładności, tym trudniej wprowadzić w ruch wał wirnika,
- **żywoćność silnika** – określająca przewidziany przez producenta czas pracy silnika, wartość wyrażona w godzinach.

Każda maszyna prądu stałego powinna posiadać tabliczkę z danymi znamionowymi, umieszczoną na korpusie w miejscu umożliwiającym łatwe odczytanie zapisanych na niej informacji. W przypadku małych silników tabliczka znamionowa powinna zawierać co najmniej:

- nazwę producenta,
- numer fabryczny,
- rok produkcji,
- oznaczenie typu maszyny,
- rodzaj maszyny np. silnik bocznikowy,
- napięcie znamionowe,
- rodzaj prądu (stały).

W przypadku większych silników oprócz danych wymienionych wyżej na tabliczce znamionowej powinny się znaleźć:

- moc znamionowa,

- prąd znamionowy,
- prędkość znamionowa lub zakres prędkości,
- największa dopuszczalna prędkość obrotowa – jeżeli jest ograniczona,
- klasa ciepłoodporności lub dopuszczalny przyrost temperatury izolacji,
- numer normy,
- dla silników ze wzbudzeniem obcym – prąd i napięcie wzbudzenia,
- maksymalna temperatura otoczenia i wysokość nad poziomem morza w przypadku gdy są one inne, jak 40°C i 1000 m,
- masa silnika,
- stopień ochrony,
- najmniejszy prąd wzbudzenia, jeżeli jest przewidziana regulacja prędkości obrotowej przez zmianę pola.

## 2. Podstawowe parametry techniczne maszyn prądu zmiennego

Podstawowymi parametrami maszyn prądu zmiennego są:

- **moc** – wyrażana w  $W$  (watach) jest zależnością napięcia, prądu, współczynnika mocy i sprawności maszyny. W silnikach prądu przemiennego rozróżnia się następujące moce:

- o moc oddawana  $P$  – jest to moc mechaniczna na wale silnika, równoznaczna mocy znamionowej. Inaczej jest to moc jaką silnik przekazuje napędzanemu urządzeniu. Moc ta dla silnika indukcyjnego trójfazowego lub synchronicznego jest wyrażana wzorem:

$$P = \sqrt{3}U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \eta$$

gdzie:  $U$  – napięcie międzyprzewodowe sieci zasilającej

$I$  – prąd przewodowy

$\eta$  – sprawność silnika

$\cos\varphi$  – współczynnik mocy

Moc oddawana silnika jednofazowego:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \eta$$

- o moc pobierana  $P_1$  – jest to moc elektryczna pobierana przez silnik z sieci. Moc pobierana jest większa od mocy oddawanej o straty w silniku  $\Delta P$   
Moc pobieraną dla silników trójfazowych opisuje wzór:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

dla silników jednofazowych:

$$P_1 = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

Moc pobieraną przez każdy silnik można wyrazić wzorem:

$$P_1 = P + \Delta P$$

lub

$$P_1 = \frac{P}{\eta}$$

- **napięcie uzwojenia fazowego stojana** – wyrażone w V (woltach), opisywane wzorem:

przy połączeniu w trójkąt:

$$U_{pks} = U_N$$

przy połączeniu w gwiazdę:

$$U_{pks} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_N$$

- **prąd** – wyrażony w A (amperach), zależny od mocy, na jaką został zbudowany silnik, od napięcia zasilającego i od układu połączeń uzwojeń. W silnikach indukcyjnych trójfazowych można rozróżnić następujące prądy:

- prąd przewodowy  $I$  – który płynie w przewodach doprowadzających zasilanie do silnika,
- prąd fazowy  $I_f$  – przepływający w fazie silnika. Przy połączeniu uzwojeń w gwiazdę prąd fazowy jest równy prądowi przewodowemu, natomiast przy połączeniu w trójkąt prąd fazowy  $\sqrt{3}$  razy mniejszy od prądu przewodowego:

$$I_f = \frac{I}{\sqrt{3}} \text{ lub } I = \sqrt{3} \cdot I_f$$

- prąd znamionowy  $I_n$  – czyli prąd pobierany przez silnik w stanie nagrzanim przy obciążeniu znamionowym i przy zasilaniu napięciem znamionowym,
  - prąd biegu jałowego  $I_0$  – czyli prąd przewodowy pobierany przez silnik na biegu jałowym (silnik nieobciążony) i niesprzęgniętym z inną maszyną bądź urządzeniem przy zasilaniu napięciem znamionowym,
  - Prąd rozruchowy  $I_r$  – czyli prąd przewodowy pobierany przez silnik w czasie rozruchu przy zwiększaniu prędkości obrotowej od zera do wartości znamionowej.
- **prędkość obrotowa** – zależna od liczby biegunów maszyny indukcyjnej i od częstotliwości napięcia zasilającego. Opisywana jest wzorem:

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

gdzie:  $f$  – częstotliwość napięcia zasilającego

$p$  – liczba par biegunów silnika

- **poślizg silnika** – różnica pomiędzy prędkością synchroniczną  $n_s$  i rzeczywistą  $n$  wyrażona w procentach (%). Opisany wzorem:

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

Prędkość obrotowa silnika zmienia się w niewielkim zakresie w zależności od obciążenia.

- **moment obrotowy** – zależny jest od prędkości obrotowej. Rozróżnia się kilka charakterystycznych wartości momentu obrotowego:

- moment rozruchowy – czyli moment w czasie rozruchu przy prędkości od zera do prędkości znamionowej,
  - moment rozruchowy początkowy  $M_r$ – występujący w silniku w chwili załączenia go do sieci przy znamionowej wartości napięcia zasilającego i znamionowej częstotliwości,
  - moment rozruchowy minimalny  $M_{min}$ – najmniejszy moment rozruchowy występujący w silniku podczas jego rozruchu przy znamionowych wartościach zasilania,
  - moment krytyczny (maksymalny, szczytowy) – największa wartość momentu obrotowego, jaką może wytworzyć silnik przy znamionowych wartościach zasilania
  - moment znamionowy  $M_n$ – czyli moment obrotowy występujący przy znamionowych wartościach napięcia i częstotliwości, jest to moment, na jaki maszyna została zaprojektowana i przy którym powinna pracować.
- **sprawność** – to stosunek mocy oddawanej przez silnik  $P$  do mocy pobieranej  $P_1$  opisuje się ją wzorem:

$$\eta = \frac{P}{P_1}$$

gdzie:

$$P_1 = P + \Delta P$$

Sprawność jest zawsze mniejsza od 1 w wyraża się ją w procentach np. 85%

- **współczynniki mocy** –  $\cos\varphi$  silniki indukcyjne pobierają z sieci prąd niezbędny do magnesowania. Im większy jest prąd magnesowania silnika tym większy jest pobór mocy biernej z sieci i tym niższa jest wartość współczynnika mocy.

Każda maszyna prądu przemiennego powinna posiadać tabliczkę z danymi znamionowymi, umieszczoną na korpusie w miejscu umożliwiającym łatwe odczytanie zapisanych na niej informacji. W przypadku małych silników tabliczka znamionowa powinna zawierać co najmniej:

- nazwę producenta,
- numer fabryczny,
- rok produkcji,
- oznaczenie typu maszyny,
- rodzaj maszyny np. silnik klatkowy,
- napięcie znamionowe,
- rodzaj prądu (przemienny ~).

W przypadku większych silników oprócz danych wymienionych wyżej na tabliczce znamionowej powinno się znaleźć:

- moc znamionowa,
- prąd znamionowy,
- częstotliwość znamionowa i liczba faz,
- prędkość znamionowa lub zakres prędkości,
- największa dopuszczalna prędkość obrotowa – jeżeli jest ograniczona,
- klasa ciepłoodporności lub dopuszczalny przyrost temperatury izolacji,

- numer normy,
- symbol układy połączeń uzwojeń,
- współczynnik mocy,
- maksymalna temperatura otoczenia i wysokość nad poziomem morza w przypadku, gdy są one inne jak 40°C i 1000 m,
- masa silnika,
- stopień ochrony.

### 3. Podstawowe parametry techniczne transformatorów

Najważniejszymi parametrami technicznymi transformatorów – w tym transformatorów energetycznych są:

- typ transformatora – zamieszczany jest zazwyczaj na tabliczce znamionowej i jest oznaczeniem producenta,
- moc znamionowa – to wartość mocy, na jaką został zaprojektowany i zbudowany transformator i przy której zagwarantowana jest jego prawidłowa praca, zgodna z normami i zaleceniami producenta. W praktyce moce znamionowe transformatorów energetycznych dopasowane są mocy generatorów. Moce transformatorów sieciowych zawierają się w granicach od 16 do 800 kVA oraz od 1 do 63 MVA, większe moce transformatorów nie są normalizowane,
- napięcie znamionowe uzwojenia GN (górnego napięcia) – znamionowa wartość napięcia strony górnej transformatora – czyli strony o większej liczbie zwojów – na jaką został zaprojektowany transformator,
- napięcie znamionowe uzwojenia DN (dolnego napięcia) – znamionowa wartość napięcia strony dolnej transformatora – czyli strony o mniejszej liczbie zwojów – na jaką został zaprojektowany transformator,
- zakres regulacji przekładni pod obciążeniem po stronie górnego napięcia – w celu utrzymania na odbiornikach możliwie niezmiennego wartości napięcia należy mieć możliwość jego regulacji. W transformatorach taką regulację uzyskuje się za pomocą zmiany przekładni, zmieniając liczbę zwojów po stronie górnego napięcia za pomocą tzw. zaczepek. Zaczepy to specjalne przyłącza do uzwojeń, dzięki którym można wykorzystać albo całą liczbę uzwojeń, albo tylko jej część. Regulacja napięcia przez zmianę liczby zwojów górnych jest dogodniejsza niż przez zmianę liczby dolnych zwojów, ponieważ liczba zwojów górnych jest większa, a co za tym idzie – regulacja napięcia jest dokładniejsza. Jeżeli uzwojenie górne jest uzwojeniem pierwotnym – czyli jeżeli jest to transformator obniżający napięcie – to przez zwiększenie liczby zwojów górnych i przekładni  $n$  zmniejsza się napięcie wtórne – czyli dolne. Jeżeli uzwojenie dolne jest uzwojeniem pierwotnym – czyli jeżeli jest to transformator podwyższający napięcie, to zwiększenie liczby zwojów górnych i przekładni  $n$  zwiększy napięcie wtórne, czyli górne,
- zakres regulacji przekładni w stanie beznapięciowym po stronie dolnego napięcia,
- przekładnia transformatora – czyli stosunek górnego napięcia do dolnego napięcia w stanie jałowym. Opisuje się ją wzorem:

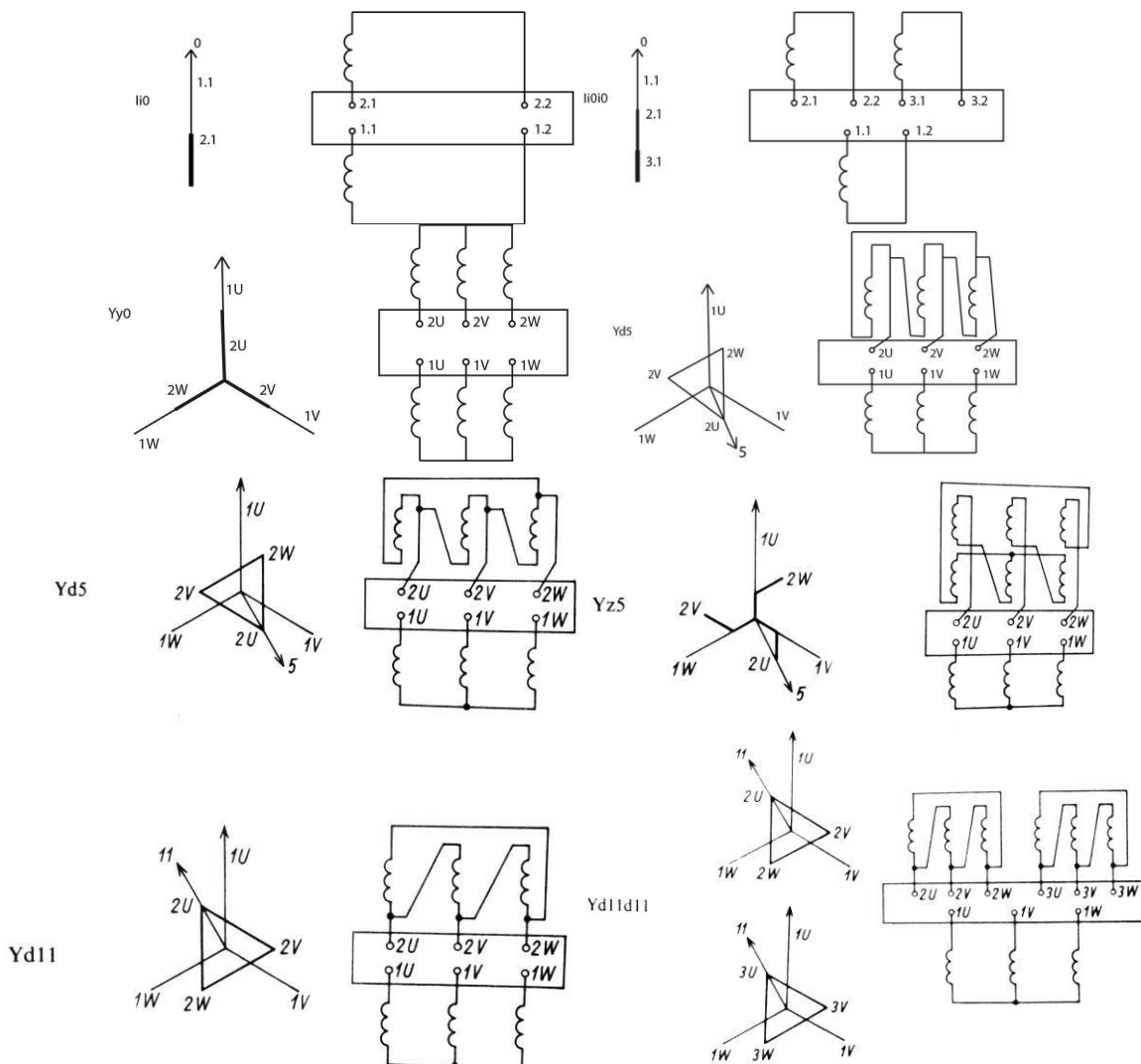
$$\vartheta = \frac{U_{g0}}{U_{d0}}$$

W stanie jałowym transformatora spadki napięć w uzwojeniach są pomijalnie małe, dlatego można przyjąć, że indukowane napięcia są w zasadzie równe napięciom na zaciskach. W takim przypadku przekładnia transformatora jest równa przekładni zwojowej.

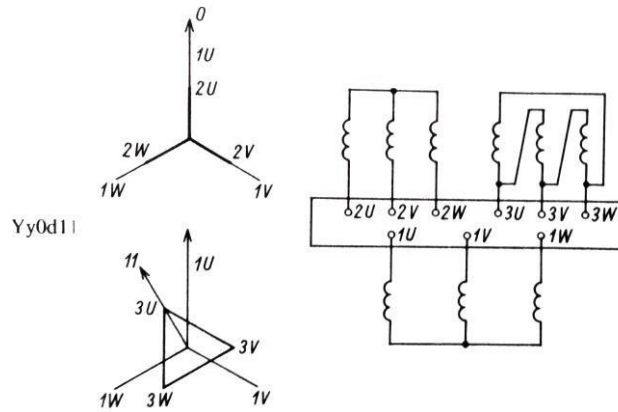
- układ (grupa) połączeń – połączenie uzwojeń fazowych transformatora trójfazowego w gwiazdę, trójkąt lub zygzak oznacza się odpowiednio literami Y, D i Z (dla uzwojenia górnego napięcia) i y, d i z (uzwojenie dolnego napięcia). Uzwojenia z wyprowadzonym punktem gwiazdowym oznacza literami YN lub yn oraz ZN lub zn, uzwojenia transformatorów jednofazowych literami I oraz i. Symbol układu połączeń (grupy połączeń) tworzy się podając symbol literowy uzwojenia górnego napięcia a następnie symbole pozostałych uzwojeń i odpowiadające im kąty godzinowe np.:

- o YNd11, Yzn5, Dyn5.

Kąt przesunięcia (w godzinach) otrzymuje się przyjmując fazor górnego napięcia za wskazówkę minutową ustawioną na godzinę 12, a odpowiedni fazor dolnego napięcia za wskazówkę godzinową. Układy połączeń uzwojeń transformatorów przedstawiają poniższe rysunki:







**Rys. 2.1 Układy połączeń uzwojeń transformatorów**

Źródło: Praca zbiorowa, *Poradnik inżyniera elektryka*, tom 2, WNT, Warszawa 1995 r., s. 174

- sposób chłodzenia – straty w rdzeniu transformatora występujące podczas jego pracy powodują wydzielanie się dużych ilości ciepła. Z uwagi na fakt, że transformator nie posiada części wirujących – chłodzenie transformatorów staje się niełatwym zadaniem. Najczęściej spotykane są transformatory olejowe – umieszczone w kadzi, a absorpcja ciepła odbywa się przez zewnętrzne ściany kadzi. Ciepło z kadzi transformatora do powietrza odbywa się metodą konwekcji, promieniowania i przewodnictwa. Ciepło oddawane od rdzenia i uzwojeń do oleju oddawane jest tylko przez konwekcję. Zasadność stosowania oleju jako chłodziwa wynika z tego, że współczynnik konwekcji oleju w stosunku do powietrza jest 10-krotnie większy,
- straty jałowe – straty prądu jałowego są pomijalnie małe. Jednostkowe straty w rdzeniu nazywa się stratnością blach i oznacza symbolem  $P_{Fe}$ . Straty w rdzeniu dzielą się na straty histerezy i  $P_{hi}$  straty z prądów wirowych  $P_w$ :

$$P_{Fe} = P_w + P_h$$

- straty obciążeniowe – to straty w uzwojeniach (miedzi) i w rdzeniu (żelazie),
- straty zwarcia – z uwagi na bardzo małą indukcyjność i bardzo małe straty w rdzeniu, cała moc pobrana przez transformator jest równa stratom w uzwojeniu,
- napięcie zwarcia –  $U_k(V)$  jest to napięcie na zaciskach transformatora w stanie zwarcia normalnego, czyli jest to napięcie na zaciskach pierwotnych transformatora, przy zwartym uzwojeniu wtórnym, pod wpływem którego w uzwojeniach transformatora płyną prądy znamionowe. Wartość względna napięcia zwarcia to stosunek napięcia zwarcia do napięcia znamionowego i wyrażona jest wzorem:

$$U_{kr} = \frac{U_k}{U_n}$$

- dopuszczalny poziom hałasu,
- stopień ochrony,
- masa całkowita,
- rodzaj pracy – rozróżnia się następujące rodzaje pracy transformatorów:
  - o praca ciągła (S1) – jest to praca przy znamionowym obciążeniu w nieograniczonym okresie czasu lub do momentu osiągnięcia ustalonej wartości temperatury.
  - o praca dorywcza (S2) – jest to praca w określonym czasie, począwszy od stanu zimnego transformatora, przy czym przerwy w pracy są wystarczająco długie,

aby ochłodzić transformator do temperatury otoczenia. Do symboliki dorywczej pracy transformatora dodaje się czas, np. S2-20min.

- o praca przerywana (S3) – jest to praca w jednakowych cyklach pracy wykonywana kolejno po jednakowych odstępach czasu przerwy. Do symboliki pracy przerywanej dodaje się wartość procentową np. S3-20%, gdzie wartość %-owa oznacza procentowy stosunek czasu pracy  $t_p$  do czasu trwania okresu  $t_o$ , czyli czasu pracy i następującej po nim przerwy:

$$S3 = \frac{t_p}{t_p + t_s} \cdot 100\%$$

- klasa izolacji – to określony za pomocą liter rodzaj zastosowanych materiałów izolacyjnych informujący o maksymalnej temperaturze pracy transformatora. Przekroczenie tej temperatury podczas pracy ciągłej skraca żywotność i czas bezawaryjnej pracy transformatora. Rozróżnia się następujące klasy izolacji:
  - o *A* – gdzie maksymalna, trwale dopuszczalna temperatura wynosi 105°C
  - o *E* – gdzie maksymalna, trwale dopuszczalna temperatura wynosi 120°C
  - o *B* – gdzie maksymalna, trwale dopuszczalna temperatura wynosi 130°C
  - o *F* – gdzie maksymalna, trwale dopuszczalna temperatura wynosi 155°C
  - o *H* – gdzie maksymalna, trwale dopuszczalna temperatura wynosi 180°C
  - o *C* – gdzie maksymalna, trwale dopuszczalna temperatura wynosi 220°C