

Model cewki osiowo symetrycznej

Instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego

ver. 29.09.2016

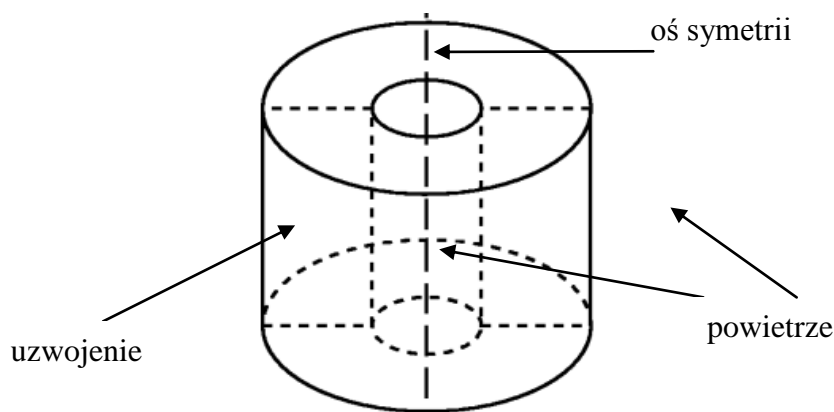
Arkadiusz Lewicki, Jarosław Guziński

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest przygotowanie modelu oraz wykonanie obliczeń i ich analizy cewki osiowo symetrycznej przy wykorzystaniu narzędzi CAE (*Computer Aided Engineering*). Ćwiczenie jest realizowane w programie FEMM 4.2 (*Finite Element Method Magnetics*) - <http://www.femm.info/wiki/HomePage>.

2. Założenia

Analiza dotyczy rozkładu pola magnetycznego wytworzonego przez cewkę powietrzną znajdującą się w otwartej przestrzeni. Analizowany element przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Cewka powietrzna

Przyjęto wymiary cewki:

- średnica wewnętrzna: 20mm
- średnica zewnętrzna: 60mm
- wysokość: 50mm


Uzwojenie: 100 zwojów przewodu miedzianego 18AWG tj. średnicy 1 mm (patrz załącznik).

Wartość prądu 1.5 A.

3. Budowa modelu cewki

Cewka będzie modelowana jako osiowo-symetryczna. Oś symetrii zaznaczono na rys 1. Dzięki temu rysowana będzie geometria dla jedynie połowy przekroju poprzecznego.

Definicja problemu

Po uruchomieniu programu FEMM należy wybrać z menu: *FILE-New* lub ikonkę . W oknie dialogowym należy wybrać *Magnetics Problem* i potwierdzić przyciskiem *OK*. Pojawi się wówczas okno, w którym należy narysować rozpatrywany model.

Model może być przygotowany wcześniej np. w programie AutoCAD – program FEMM umożliwi import plików DXF.

Ponieważ analiza przeprowadzona będzie dla modelu osiowo-symetrycznego, należy wybrać z menu: *Problem*. Zostanie wyświetlone okno dialogowe z ustawieniami i parametrami:

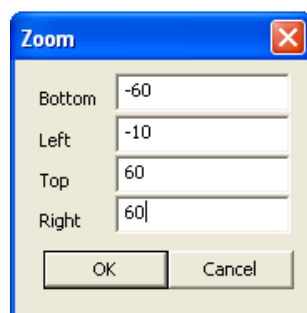
- *Problem Type* ustawić jako *Axisymetric* – geometria cewki będzie przedstawiana jako osiowo symetryczna. Ośią symetrii jest linia o współrzędnej $r=0$.
- *Lenght units* ustawiać jako *Milimeters* – wymiary cewki podane są w mm, wygodnie jest więc przełączyć jednostki na mm (*Lenght units – Milimeters*). Dalej definiuje się częstotliwość
- *Frequency* – w zadaniu przyjąć 0, gdyż zadanie rozwiązywanie jest jako przypadek magnetostatyczny.
- *Depth* – głębokość modelu czyli trzeci, niewidoczny wymiar rysunku, który przy modelu osiowo-symetrycznym nie jest ustawiany, wartość domyślna to 1.
- *Solver Precision* – precyzja obliczeń, wartość domyślna to 10^{-8} .
- *Min Angle* - parametr używany do konstrukcji siatki elementów skończonych¹, wartość domyślna to 30° .
- *AC Solver* – wybór metody numerycznej rozwiązywania problemu², domyślnie *Succ. Approx.* oznaczająca metodę iteracyjną, tj. kolejnych przybliżeń (ang. *Successive Approximation*).
- *Comment* - – komentarz opisujący realizowane zadanie.

Przyjęcie podejścia osiowo symetrycznego wymaga aby oś symetrii modelowanej cewki była osią pionową układu prostokątnego xy .

Definicja obszaru analizy

Wykorzystywana przez program metoda elementów skończonych wymaga, aby rozpatrywany obszar był ograniczony. Pierwszym zadaniem jest więc ograniczenie analizowanego obszaru poprzez narysowanie jego granic. Obszar ma obejmować również przewidywane linie pola magnetycznego poza samą cewką.

Rozpatrywany obszar powinien zmieścić się w oknie programu, należy, więc odpowiednio ustawić wyświetlany obszar w menu: *View/Keyboard*. Dla rozpatrywanego problemu przyjąć:



¹ Parametr określa minimalny kąt trójkątów tworzących siatkę elementów skończonych. Im mniejsza wartość tym obliczenia są dokładniejsze. W większości przypadków prawidłowe wyniki otrzymywane są dla kąta 33.8° . Bardziej złożone problemy mogą wymagać zmniejszenia parametru poniżej 20° aby zapewnić wystarczającą dokładność obliczeń zmiennoprzecinkowych. Akceptowane są wartości od 1° do 33.8° .

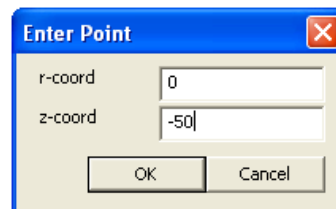
² Metoda wybierana w *AC Solver* ma znaczenie jedynie przy rozwiązywaniu problemów dla obwodów z prądami zmiennymi. W tym ćwiczeniu cewka zasilana jest prądem stałym, więc ten parametr nie ma znaczenia.

Okno programu zostanie odpowiednio przeskalowane. Po przeskalowaniu jedna z wartości ulegnie automatycznej zmianie uzależnionej od rozdzielczości i rozmiarów monitora komputera.

Następnie należy zdefiniować obszar poddany analizie przez pakiet FEMM. Obszar definiuje się określając jego punkty graniczne przyciskami : *Operate on Nodes*:



Należy umieścić punkty graniczne o współrzędnych: (0,-50), (0,50), (0,0). Można użyć klawisza *Tab* i podać współrzędne punktów, np.:



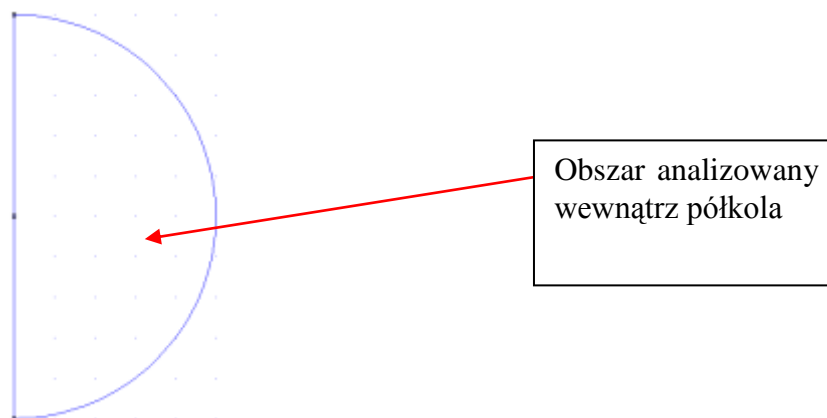
Dalej definiuje się oś symetrii. Wybrać pracę na liniach: *Operate on segments*, i wskazać uprzednio narysowane punkty o współrzędnych (0,-50) i (0,50).



Następnie należy wybrać pracę na łukach: *Operate on arc* i wskazać punkty (0,-50) i (0,50). Przy pracy na łukach istotna jest kolejność wyboru punktów.

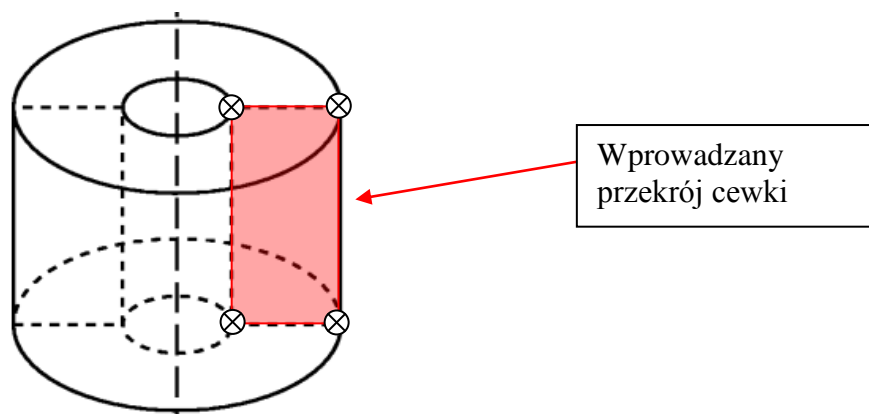


Pojawi się wówczas okno dialogowe pozwalające na określenie parametrów łuku. Aby narysować półokrąg *Arc Angle* należy ustawić na 180°. Parametr *Max Segment* ustawić na 2.5°. Łuk przybliżony jest przez połączenie ze sobą linii prostych. Parametr *Max Segment* określa, co ile stopni rysowana jest kolejna prosta. Obszar analizy jest następującym obszarem:



Rysowanie uzwojeń

Program należy przełączyć w tryb pracy na węzłach. Należy zdefiniować węzły w taki sposób, aby odległości pomiędzy nimi odpowiadały wymiarom przekroju cewki. Uwaga – rysowana jest tylko część cewki zaznaczona na rys. 2.



Rys. 2. Fragment cewki wraz z węzłami wprowadzany w programie

Współrzędne punktów węzłowych cewki są następujące: (10, 25), (30, 25), (10, -25) (30, -25), gdyż:

- 50 mm jest wysokością cewki,
- 20 mm to średnica wewnętrzna,
- 60 mm jest średnicą zewnętrzną.

Pierwsza współrzędna to promień, druga to wysokość cewki.

Następnie należy przełączyć program w tryb rysowania prostych i połączyć przygotowane punkty tak, aby powstał prostokąt. W ten sposób uzyskuje się przekrój uzwojenia cewki.

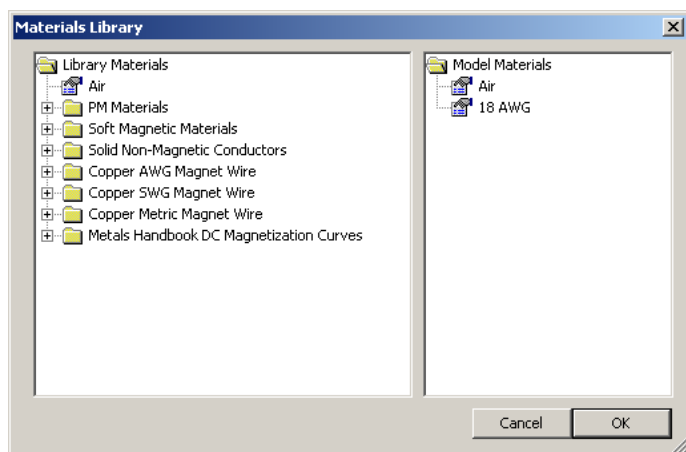
Dodawanie materiałów i przypisanie ich do obszarów

Kolejną operacją jest zdefiniowanie materiału dla obszarów. W rozpatrywanym przypadku występują dwa materiały – powietrze i miedź. Należy wybrać ikonę *Operate on labels*:




Następnie wskazać dwa obszary – wewnątrz prostokąta przekroju uzwojeń i na zewnątrz cewki ale wewnątrz półokręgu obszaru analizy.

W programie wykorzystuje się nazwy obszarów do przypisania parametrów materiałów. W menu: *Properties* należy wybrać *Materials Library* i przeciągnąć *Air* i *18AWG* z *Library Materials* do *Model Materiale* – rys. 3. Istnieje możliwość edycji parametrów materiałów w *Materials Library* po dwukrotnym kliknięciu klawiszem myszki na wskazywany materiał.



Rys. 3. Okno biblioteki materiałów

Wybrać menu: *Properties/Circuit*. W oknie dialogowym nacisnąć przycisk *ADD Property* by utworzyć obwód. Nadać nazwę *Uzwojenie*. Ustawić *Series* co oznacza, że wszystkie przewody w polu przekroju cewki są połączone szeregowo. Wpisać przyjętą w założeniach wartość prądu cewki 1.5 A.

Kolejnym etapem jest przyporządkowanie obszarów rysunku do materiałów i obwodu elektrycznego. Należy nacisnąć prawym klawiszem myszki w pobliżu nazwy obszaru (kolor punktu etykiety obszaru zmieni się na czerwony) i wcisnąć *Spację*, lub ikonę .

W przypadku powietrza należy ustawić *Block type* na *Air*. Odznaczyć *Let Triangle choose Mesh Size* i wprowadzić wartość 1 jako *Mesh size*. Parametr ten definiuje największy możliwy rozmiar elementu siatki. Siatka tworzona jest z trójkątów równobocznych o boku nie większym niż zdefiniowana wartość. Gdy *Let Triangle choose Mesh Size* jest zaznaczone, program sam wybiera rozmiar siatki o możliwie małej liczbie elementów.

W przypadku przekroju uzwojenia – należy ustawić *Block type*: *18AWG, In circuit* – *Uzwojenie* oraz liczbę zwojów na *Number of turns*:100.

Jeśli liczba zwojów jest dodatnia to kierunek nawijania jest przeciwny do ruchu wskazówek zegara, natomiast ujemna liczba zwojów oznacza kierunek nawijania zgodny z ruchem wskazówek zegara³.

³ Kierunek ruchu wskazówek zegara patrząc na cewkę z góry.

W tabeli 1 podano skróty klawiszowe dostępne w programie FEMM

Tab. 1. Wybrane skróty klawiszowe dostępne w programie FEMM

KLAWISZ	FUNKCJA
Space	Edycja parametrów wskazanego obiektu
Tab	Wyświetla okno dialogowe, w którym definiuje się współrzędne nowego punktu lub bloku
Escape	Odnacza wybrane obiekty
Delete	Kasuje wybrane obiekty
Strzałki	Przesuwają widok ekranu
Page Up	Powiększenie
Page Down	Pomniejszenie
Home	Ustawia widok okna tak, ze widoczne sa wszystkie wprowadzone obiekty

4. Obliczenia

Warunki brzegowe

Z menu *Properties/Boundary* należy wybrać *Add Property*. Następnie nadać nazwę warunków brzegowych (ABC) oraz zmienić *BC Type* na *Mixed*. Nazwa ABC jest skrótem ang.: "*Asymptotic Boundary Condition*" oznaczającym metodę asymptotyczną rozwiązywania zagadnień brzegowych. Warunek ten pozwala na odtworzenie wpływu nieograniczonego obszaru zewnętrznego (pomimo, że sama analiza realizowana jest w obszarze ograniczonym). W przypadku warunku brzegowego *Mixed*⁴ należy określić parametry c_0 i c_1 zgodnie z:

$$c_0 = \frac{1}{\mu_r \mu_0 R} \quad (1)$$

$$c_1 = 0$$

gdzie: μ_r – przenikalność magnetyczna przy brzegu obszaru,
 μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni⁵,
 R – promień półkola analizowanego obszaru (dla rozpatrywanego przypadku $R=50$ mm, tj. w układzie jednostek SI promień $R=0.05$ m).

Aby przypisać warunek brzegowy należy przełączyć się na rysowanie łuków, następnie prawym klawiszem myszki kliknąć w pobliże łuku ograniczającego rozpatrywany obszar i wcisnąć *Spację* (lub przycisk *Properties*). Z *Boundary Cond* należy wybrać *ABC*.

Generowanie siatki

Plik z przygotowanym modelem należy zapisać na dysku komputera i nacisnąć przycisk generatora siatki:



Run mesh generator

⁴ Opis w [1] – załącznik A.3.2.

⁵ $\mu_0=4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m

W przypadku, gdy siatka będzie zbyt rzadka/zbyt gęsta można ponownie edytować parametry obszarów, linii i łuków.

Start obliczeń

Obliczenia można uruchomić naciskając przycisk:



Run analysis

Gdy postępy obliczeń nie są zadowalające należy je przerwać (obliczenia dla prawidłowo zdefiniowanego i ustawionego problemu trwają kilka sekund). Najprawdopodobniej nieprawidłowo zdefiniowano warunki brzegowe.

5. Analiza wyników

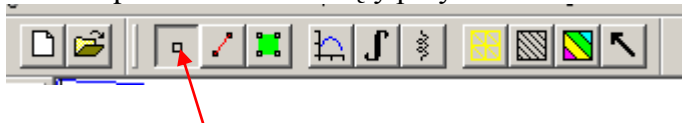
Analizę wyników uruchamia się przyciskiem:



View results

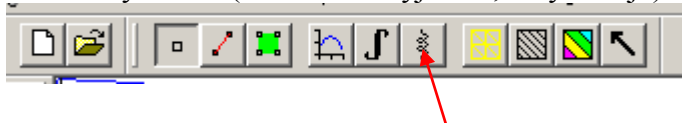
Możliwe jest przeprowadzenie kilku rodzajów analizy wyników:

- Analiza punktowa - wciśnięty przycisk:

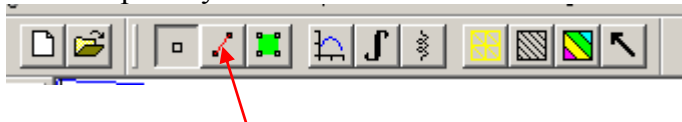


Poprzez wskazanie odpowiednich punktów możliwe jest określenie dla nich parametrów, m.in. strumień, straty energii, indukcja. Można podawać współrzędne po wciśnięciu klawisza *Tab*.

- Parametry cewki (m.in. indukcyjność, rezystancja):



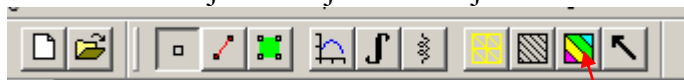
- Rozkład polowy wzdłuż konturu:



Należy wybrać np. punkty wzdłuż osi symetrii cewki w kolejności: górny, środkowy, dolny w wyniku czego powstanie linia a następnie nacisnąć przycisk:



- Rozkład indukcji w wersji kolorowej



6. Program ćwiczenia

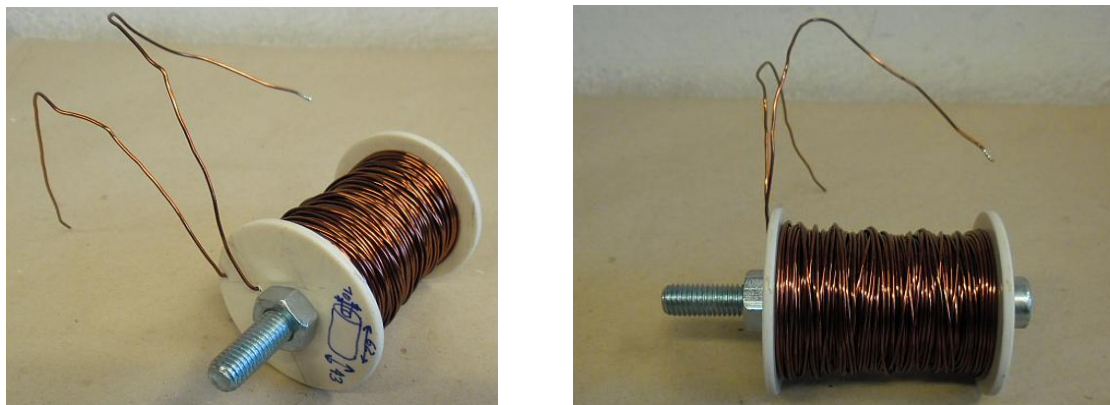
1. Dla przyjętej cewki powietrznej przygotować jej model, wykonać obliczenia oraz przeprowadzić analizę wyników.
2. Cewkę umieścić na rdzeniu żelaznym. Sprawdzić jak zmieni się rozkład pola magnetycznego oraz indukcyjność cewki.
3. W osi symetrii cewki umieścić żelazną kulkę i wyznaczyć siłę, z jaką przyciągana jest kulka przez cewkę. Wyznaczyć charakterystykę siły przyciągania w funkcji prądu cewki. Wyznaczyć charakterystykę siły przyciągania w funkcji odległości kulki od cewki.

Wyznaczenie siły, z którą przyciągana jest kulka wymaga:

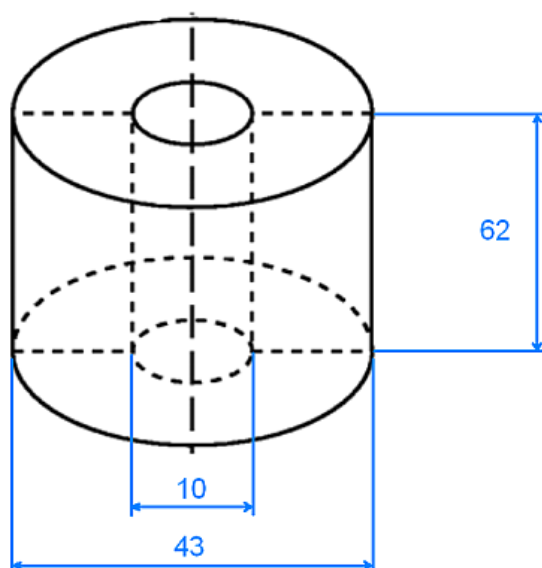
- zaznaczenia pola przekroju kulki przez wybranie polecenia *Operation*→*Area* i wskazanie dowolnego punktu wewnątrz kulki, który zostanie zaznaczony zielonym kolorem,
 - wybrania polecenia *Integrate*→*Force via Weighted Stress Tensor*.
4. W polu magnetycznym cewki, w osi symetrii umieścić magnes stały. Sprawdzić jak zmieni się rozkład pola magnetycznego. Zbadać rozkład pola magnetycznego dla różnych kierunków magnesowania.
 5. Zamodelować rzeczywistą cewkę cylindryczną znajdującą się w laboratorium i określić liczbę zwojów.

Cewka nawinięta jest na stalowym rdzeniu. Na rys. 4 pokazano zdjęcia cewki natomiast rysunek z zaznaczonymi wymiarami na rys. 5. Cewka nawinięta jest drutem miedzianym o średnicy 0.8 mm. W laboratorium zmierzono indukcyjność uzwojenia $L=9.5$ mH. Przyjąć gęstość prądu $J=2.5$ A/mm². Założyć że rdzeń stalowy nie wystaje poza obrys cewki.

Dla dobranej liczby zwojów określić rezystancję uzwojenia.
Obliczyć długość drutu w metrach do nawinięcia cewki.



Rys. 4. Widoki cewki.



Rys. 5. Wymiary cewki.

7. Literatura

1. David Meeker: *FiniteElement Method Magnetics. User's Manual*.
2. David Meeker: *FEMM 4.0 Magnetostatic Tutorial*.
3. Konopiński T., Pac R.: *Transformatory i dławiki elektronicznych urządzeń zasilających*. WNT, Warszawa 1979.

Załącznik 1

Oznaczenie średnic drutów

Skrót AWG (ang. *American Wire Gauge*) jest to oznaczenie amerykańskiego znormalizowanego szeregu średnic drutu, oznaczonych umownymi liczbami, używany do drutów nieżelaznych. Przelicznik AWG na mm podano w poniższej tabelce.

Tabela przeliczeniowa
American Wire Gauge (AWG)

Rozmiar AWG	Budowa przewodu	Średnica zewn. [mm]	Przekrój [mm ²]
40	SOLID	0,079	0,005
39	SOLID	0,089	0,006
38	SOLID	0,102	0,008
37	SOLID	0,114	0,010
36	SOLID	0,127	0,013
	7/44	0,153	0,014
35	SOLID	0,142	0,016
34	SOLID	0,160	0,020
	7/42	0,191	0,022
33	SOLID	0,180	0,025
32	SOLID	0,209	0,032
	7/40	0,203	0,034
	19/44	0,229	0,039
31	SOLID	0,226	0,040
30	SOLID	0,255	0,051
	7/38	0,305	0,056
	19/42	0,305	0,060
29	SOLID	0,287	0,064
28	SOLID	0,320	0,080
	7/36	0,381	0,071
	19/40	0,406	0,093
27	SOLID	0,361	0,102
	7/35	0,457	0,111
26	SOLID	0,404	0,127
	7/34	0,483	0,140
	10/36	0,533	0,127
	19/38	0,508	0,153
25	SOLID	0,455	0,163
24	SOLID	0,511	0,203
	7/32	0,610	0,226
	10/34	0,584	0,200
	19/36	0,610	0,239
	41/40	0,584	0,201
23	SOLID	0,574	0,259
22	SOLID	0,643	0,322
	7/30	0,762	0,352
	19/34	0,787	0,380
	26/36	0,762	0,327

Tabela przeliczeniowa
American Wire Gauge (AWG)

Rozmiar AWG	Budowa przewodu	Średnica zewn. [mm]	Przekrój [mm ²]
21	SOLID	0,724	0,412
20	SOLID	0,813	0,514
	10/30	0,890	0,504
	19/32	0,940	0,612
	26/34	0,914	0,520
	41/36	0,914	0,533
19	SOLID	0,912	0,653
18	SOLID	1,020	0,816
	7/26	1,220	0,891
	16/30	1,200	0,808
	19/30	1,240	0,957
	41/34	1,200	0,819
	65/36	1,200	0,845
17	SOLID	1,150	1,039
16	SOLID	1,290	1,300
	7/24	1,520	1,420
	19/29	1,470	1,216
	26/30	1,500	1,310
	65/34	1,500	1,300
	105/36	1,500	1,365
15	SOLID	1,450	1,651
14	SOLID	1,630	2,070
	7/22	1,850	2,260
	19/27	1,850	1,930
	41/30	1,850	2,060
	105/34	1,850	2,100
13	SOLID	1,830	2,630
12	SOLID	2,050	3,290
	7/20	2,440	3,610
	19/25	2,360	3,070
	65/30	2,410	3,270
	165/34	2,410	3,300
11	SOLID	2,300	4,155
10	SOLID	2,600	5,230
	37/26	2,920	4,710
	65/28	2,950	5,230
	105/30	2,950	5,355

Jeżeli budowa przewodu jest SOLID to oznacza to, że jest to drut, natomiast jeżeli w rubryce *Budowa przewodu* jest oznaczenie typu liczba/ liczba to jest to przewód wielożyłowy – linka. Przykładowo dla 32AWG wartość 7/40 oznacza, że przewód składa się z 7 żyłek o średnicy 40AWG czyli:

$$7 \times 0.005 \text{ mm}^2 = 0.035 \text{ mm}^2$$

co w przybliżeniu odpowiada powierzchni przekroju drutu 32AWG.