

# Jak zbudować kompas elektroniczny z czujnikiem magnetycznym, część 1

*W czasach, gdy nawigacja jest powszechnie kojarzona ze skomplikowanymi systemami satelitarnymi, takimi jak NAVSTAR GPS, mówienie o prostym przyrządzie nawigacyjnym, jakim jest kompas magnetyczny mogłoby wydawać się anachronizmem. Okazuje się jednak, że kompasy nadal znajdują szerokie wykorzystanie.*

Mimo powszechnego obecnie stosowania elektronicznych przyrządów nawigacyjnych, kompasy w dalszym ciągu można spotkać między innymi jako wyposażenie pomocnicze w samolotach i na statkach. Często są także stosowane w turystyce pieszej. O zastosowaniach kompasów decyduje nie tylko niska cena oraz prostota i związana z nią wysoka niezawodność. Okazuje się, że to, co potrafi prosty kompas, tj. określenie orientacji dowolnego kierunku względem północy magnetycznej, nie zawsze jest możliwe nawet z wykorzystaniem tak zaawansowanego systemu, jakim jest GPS. Odbiornik GPS wyznacza kurs, a więc kierunek poruszania się, na podstawie składowych prędkości tego ruchu. Jak jednak określić kierunek, np. osi pojazdu względem północy, jeśli pojazd ten stoi na parkingu? Jeśli nie chcemy inwestować wielu tysięcy dolarów w wieloantenowe odbiorniki GPS, które poradzą sobie i z tym problemem, możemy zwrócić się do sprawdzonego rozwiązania, jakim jest właśnie kompas. Problem ten dostrzegli także producenci odbiorników GPS i na rynku od dawna już są odbiorniki z wbudowanym kompasem działającym na zasadzie pomiaru pola magnetycznego. W prezentowanym artykule przedstawimy teorię budowy elektronicznego kompasu z czujnikiem magnetycznym.

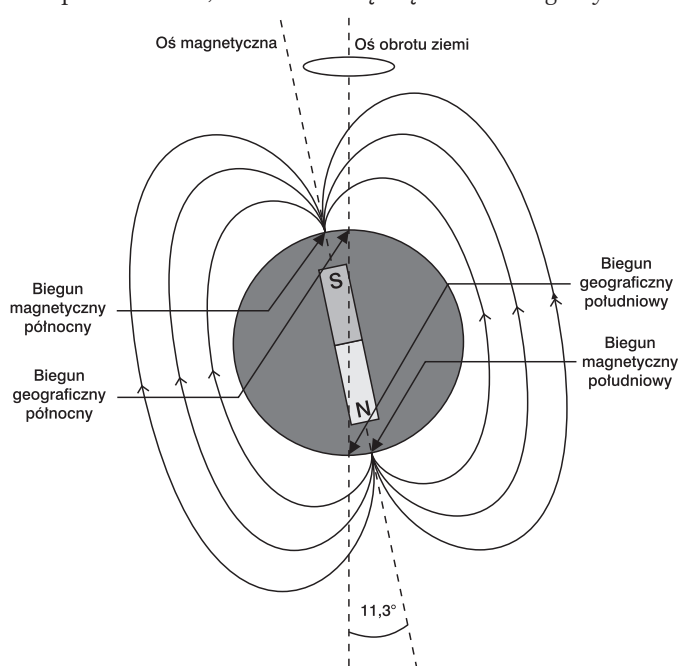
## Dlaczego kompas elektroniczny?

Kompas elektroniczny ma w porównaniu z jego tradycyjną wersją kilka istotnych zalet. Wyznaczony w nim kierunek może być przedstawiony użytkownikowi na wiele sposobów, np. na wyświetlaczu diodowym, wyświetlaczu LCD alfanumerycznym lub graficznym, czy nawet w formie komunikatów głosowych. Możliwości są tutaj ograniczone jedynie inwencją konstruktora. Jeśli konstruowany przez nas kompas będzie współpracował z innymi urządzeniami elektronicznymi, np. z układem sterowania robota, z komputerem zintegrowanego systemu nawigacyjnego, itp., dane wyjściowe z kompasu elektronicznego mogą być w wygodny sposób przekazane do dalszej części systemu np. przez port szeregowy, wyjście PWM i na wiele innych sposobów. Możliwości takiej nie będziemy mieli w tradycyjnym kompasie z igłą magnetyczną. Ponadto kompasy elektroniczne są obecnie konstruowane zwykle jako urządzenia mikroprocesorowe, co umożliwia zaimplementowanie w ich oprogramowaniu wielu użytecznych funkcji. Możliwe jest podawanie od razu azymutu geograficznego zamiast magnetycznego, co przy tradycyjnym kompasie wymagałoby użycia mapy z zaznaczoną deklinacją magnetyczną. W bardziej zaawansowanych rozwiązaniach można również pokusić się o zmniejszenie błędów wska-

zań poprzez kompensację dewiacji magnetycznej, wynikającej z oddziaływania stałych zewnętrznych pól magnetycznych, np. pochodzących od karoserii pojazdu, w którym zamontowano kompas. Opisane wyżej rozwiązania są jednak zwykle stosowane w bardziej złożonych układach kompasów.

## Ziemskie pole magnetyczne

Zarówno kompasy tradycyjne, jak i elektroniczne wykorzystują właściwości magnetyczne naszej planety. Do opisu ziemskiego pola magnetycznego posłużymy się prostym modelem i założymy, że pole to odpowiada w przybliżeniu polu wytwarzanemu przez umieszczony w środku Ziemi magnes sztabkowy (dipol magnetyczny), z jednym biegunem magnetycznym w pobliżu geograficznego bieguna północnego i z drugim biegunem magnetycznym w pobliżu bieguna południowego. Położenie biegunów magnetycznych nie pokrywa się jednak z położeniem biegunów geograficznych, a linia łącząca te bieguny two-



Rys. 1 Model ziemskiego pola magnetycznego

rzy z osią obrotu Ziemi kąt równy około  $11,3^\circ$ . Opisany model pola magnetycznego przedstawiono na **rys. 1**. Z rysunku wynika, że biegun magnetyczny określany jako północny jest w rzeczywistości biegunem południowym magnesu występującego w modelu pola. Konwencja taka obowiązuje ze względów historycznych, ponieważ kiedyś przyjęto, że biegunem północnym magnesu (np. igły magnetycznej) umieszczonego w ziemskim polu magnetycznym jest ten biegun, który ustawia się w kierunku północy geograficznej.

Taki prosty model dobrze opisuje efekty wywołane występowaniem pola, ale nie oddaje istoty zjawiska magnetyzmu ziemskiego i odpowiada raczej historycznym wyobrażeniom na jego temat. Dawne teorie głosiły, że źródłem pola magnetycznego wokół Ziemi jest namagnesowane metaliczne jądro naszej planety. Obecnie uważa się, że przyczyną powstawania pola magnetycznego wokół Ziemi są prądy wirowe płynące w zewnętrznej części jej płynnego jądra. Wiedza na ten temat nie jest jednak pełna, a zagadnienie magnetyzmu ziemskiego nadal stanowi przedmiot wielu hipotez i badań naukowych.

Ilość różnorodnych zjawisk fizycznych mających wpływ na pole magnetyczne Ziemi jest ogromna, ale z punktu widzenia naszej aplikacji, którą jest kompas elektroniczny o niskiej rozdzielczości, nie ma potrzeby ich szczegółowej analizy. Warto natomiast zdawać sobie sprawę z faktu, że pole to posiada składową zmienną, oraz składową, której uśrednioną wartość określa się jako stałe pole magnetyczne. Skła-

dowa zmienna ma stosunkowo niewielką wartość, a jej udział w polu całkowitym wynosi na ogół nie więcej niż 1%, niekiedy osiągając 5%. Określanie kierunku w kompasach bazuje na występowaniu stałego pola magnetycznego, a pole zmienne można traktować jako składnik zakłócający pomiary.

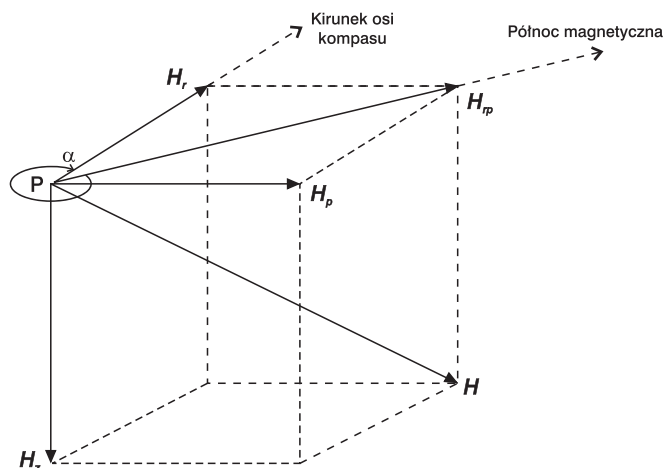
Natężenie stałego ziemskiego pola magnetycznego występującego przy powierzchni naszej planety zmienia się w zależności od lokalizacji w zakresie od około 15 do 50 A/m. Wektor natężenia pola magnetycznego w punkcie P przy powierzchni Ziemi oraz jego składowe przedstawiono na **rys. 2**.

Wektor natężenia pola magnetycznego Ziemi  $H$  posiada dwie składowe: składową pionową  $H_z$  oraz składową poziomą  $H_p$ . Kierunek składowej  $H_p$  w punkcie P położonym przy powierzchni Ziemi jest zgodny z kierunkiem lokalnego południka magnetycznego. Igły tradycyjnych kompasów ustawiają się właśnie wzdłuż południków magnetycznych, czyli półokręgów biegnących po powierzchni Ziemi i łączących oba bieguny magnetyczne. Wektor składowej poziomej  $H_p$  można z kolei rozłożyć na składową równoległą do mierzonego kierunku (osi kompasu)  $H_r$  i składową prostopadłą do tego kierunku  $H_\perp$ . Przyjęto, że dodatnie wartości tych składowych odpowiadają zwrotowi wektora  $H_r$  do przodu, natomiast wektora  $H_\perp$  w prawo. Jeśli zwrócimy kompas w interesującym nas kierunku to wskaże on kąt zwany azymutem, na **rys. 2** oznaczony symbolem  $\alpha$ . Pojęcie azymutu jest zapewne doskonale znane większości czytelników, zwłaszcza tym, którzy mieli kiedykolwiek do czynienia z harcerstwem. Przypomnijmy jednak: azymut jest to kąt zawarty między północną częścią południka magnetycznego, a danym kierunkiem poziomym. Wartość azymutu liczy się zgodnie z ruchem wskazówek zegara i wyraża w stopniach, minutach oraz se-

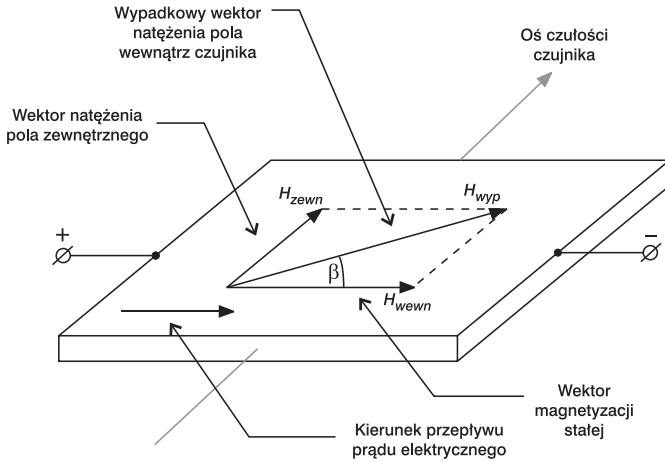
kundach kątowych w zakresie od 0 do  $360^\circ$ .

Należy zwrócić uwagę, że wskazywany przez kompas azymut magnetyczny różni się od azymutu geograficznego określanego względem południka geograficznego. Dzieje się tak, ponieważ, jak wspomniano, położenie biegunów magnetycznych i geograficznych nie pokrywa się. Obecne położenie północnego bieguna magnetycznego znajduje się w pobliżu Wyspy Ellefa Ringnesa i ma współrzędne geograficzne równe około  $79^\circ\text{N}$ ,  $105^\circ\text{W}$ . Z tego względu pomiędzy południkiem magnetycznym i geograficznym występuje kąt zwany deklinacją magnetyczną. Przyjęto, że wartość deklinacji jest dodatnia dla odchyleń południka magnetycznego względem geograficznego na wschód i ujemna przy odchyleniach na zachód. Deklinacja magnetyczna stanowi również różnicę pomiędzy azymutem magnetycznym, określanym przez kompas, a azymutem geograficznym i należy ją uwzględnić podczas wyznaczania kierunków. Deklinacja magnetyczna jest różna w różnych miejscach naszej planety i zmienia się w czasie z powodu stałego przemieszczania się biegunów magnetycznych. Jest ona podawana m.in. na mapach nawigacyjnych. W Internecie można znaleźć formuły do obliczeń deklinacji oraz kalkulatory, które pozwalają sprawdzić jej wartość w wybranym miejscu na kuli ziemskiej, w wybranym czasie. Autorzy polecają odwiedzenie strony <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/geomag/jsp/Declination.jsp> i samodzielne eksperymenty z umieszczonym tam kalkulatorem.

Ziemskie pole magnetyczne określane jako stałe, w rzeczywistości okazuje się zmiennie w czasie. Wraz z upływem czasu stopniowo zmienia swój kierunek i zmniejsza swoją wartość, jednak zmiany te nie są zauważalne w krótkich odcinkach czasu. Przykładowo, zmiana kierunku pola o około  $0,1^\circ$  trwa rok. Obecnie ziemskie pole magnetyczne jest w fazie zmniejszania swojej wartości, przy czym czas połowicznego zaniku tego pola wynosi około 1400 lat. Kierunek tych zmian nie jest jednak przewidywalny w długim czasie. W historii zdarzały się już nawet okresy zmiany kierunku pola magnetycznego na przeciwny, więc można się spodziewać takiego zjawiska również w przyszłości.



**Rys. 2** Rozkład pola magnetycznego w punkcie P przy powierzchni Ziemi



Rys. 3 Rozkład pola magnetycznego w czujniku magneto-rezystancyjnym

Gdyby doszło do zmiany biegowości, pole magnetyczne stałoby się bardzo słabe, a liczba biegów magnetycznych mogłyby ulec zwielokrotnieniu, co postawiłoby pod znakiem zapytania przydatność kompasu w nawigacji. Osoby, które z tego powodu mogłyby zrezygnować z wykonania kompasu elektronicznego musimy w tym miejscu uspokoić. Wprawdzie pole magnetyczne naszej planety ulega ciąglem stopniowym zmianom, jednak procesy takie są bardzo długotrwałe. Ostatnia zmiana kierunku pola miała miejsce około 750 tysięcy lat temu, a gdyby miała miejsce obecnie, do jej ukończenia upłynęłoby i tak jeszcze kilka tysięcy lat. Przy najmniej przez taki okres nie widać zatem zagrożenia dla przydatności naszego kompasu.

### Czujniki pola magnetycznego

Przjrzyjmy się jeszcze raz przez chwilę rozkładowi wektora pola magnetycznego z rys. 2. Można zauważyć, że gdybyśmy byli w stanie zmierzyć wartości składowych tego pola  $H_r$  i  $H_p$ , bez trudu moglibyśmy obliczyć wartość interesującego nas kąta azymutu  $\alpha$  zgodnie z następującą zależnością trygonometryczną:

$$\alpha = \text{atan2}(H_r, -H_p)$$

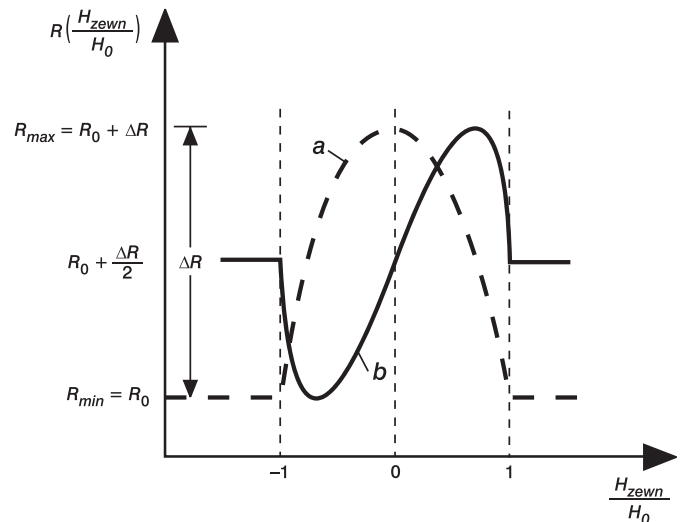
przy czym funkcja  $\text{atan2}()$  stanowi wersję funkcji  $\text{arctg}()$ , jednoznaczna w pełnym przedziale kątów od  $-180^\circ$  do  $+180^\circ$ . Uzyskaną wartość należałoby jeszcze przeliczyć tak aby mieściła się w przyjętym do określania azymutu zakresie kątów od 0 do  $360^\circ$ . Wymaga to jedynie dodania kąta pełnego  $360^\circ$  w przypadku otrzymania wartości ujemnej.

Obecnie przy najmniej kilku producentów ma w swojej ofercie czujniki odpowiednie do pomiarów ziemskiego pola magnetycznego zwane magnetometrami. Spośród różnych rodzajów czujników natężenia pola magnetycznego przyjrzymy się bliżej czujnikom opartym na efekcie magnetorezystancji. Zjawisko magnetorezystancji polega na zmianie rezystancji przewodnika wykonanego z materiału ferromagnetycznego, przez który przepływa prąd elektrycznym, pod wpływem przyłożonego do niego zewnętrznego pola magnetycznego.

W procesie produkcji czujnik magnetorezystancyjny jest umieszczony w silnym polu magnetycznym, które nadaje materiałowi stałą magnetyzację  $H_{wewn}$ , zgodną z kierunkiem przepływu prądu. Jeśli umieścimy czujnik w zewnętrznym polu magnetycznym  $H_{zewn}$ , o kierunku prostopadłym do kierunku stałej magnetyzacji, wypadkowy wektor natężenia pola magnetycznego  $H_{wyp}$  zostanie odchyłony o kąt  $\beta$  od wektora  $H_{wewn}$ . Kąt odchylenia  $\beta$  będzie tym większy, im silniejsze będzie zewnętrzne pole magnetyczne. Opisane zjawisko przedstawiono na rys. 3.

W wyniku zmiany wypadkowego wektora natężenia pola magnetycznego  $H_{wyp}$ , zmienia się również rezystancja czujnika, co określamy jako efekt magnetorezystancyjny. Rezystancja czujnika wyraża się następującą zależnością:

$$R = R_0 + \Delta R \cdot \cos^2 \beta = R_0 + \Delta R \cdot \left[ 1 - (H_{zewn}/H_0)^2 \right]$$



Rys. 4 Charakterystyki  $R=f(H_{zewn}/H_0)$  czujników magneto-rezystancyjnych: a) czujnik standardowy, b) czujnik ze strukturą grzebieniową

Zależność rezystancji od prostopadle przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego  $H_{zewn}$  jest określona dla  $H_{zewn} \leq H_0$ . Przy wartościach  $H_{zewn} \geq H_0$  rezystancja czujnika przyjmuje stałą, minimalną wartość równą  $R_0$ . Zarówno rezystancja  $R_0$ , zakres zmian rezystancji pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego  $\Delta R$ , jak i stała normująca  $H_0$  są zależne od materiału, z którego wykonano czujnik magnetorezystancyjny. Typowe wartości rezystancji  $R_0$  są rzędu setek  $\Omega$  lub pojedynczych  $k\Omega$ , natomiast zakres jej zmian  $\Delta R$  jest stosunkowo niewielki. W przypadku permalaju, który jest materiałem często stosowanym do produkcji czujników magnetorezystancyjnych  $\Delta R$  wynosi 2...3 %.

Z przedstawionego opisu i zależności na rezystancję wynika, że charakterystyka standardowego czujnika magnetorezystancyjnego jest silnie nieliniowa i ma bardzo małe nachylenie dla małych natężeń pól zewnętrznych, co oznacza niewielką czułość czujnika w tym zakresie. W celu linearyzacji charakterystyki oraz zwiększenia czułości w praktycznie wykonywanych czujnikach nie stosuje się opisanej wcześniej struktury standardowej, lecz strukturę zmodyfikowaną, tzw. strukturę grzebieniową, w której na powierzchni permalaju umieszczane są pod kątem  $+45^\circ$  lub  $-45^\circ$  wąskie paski aluminium. W zależności od kąta ustawienia tych pasków uzyskiwana jest następująca zależność rezystancji czujnika od zewnętrznego pola magnetycznego:

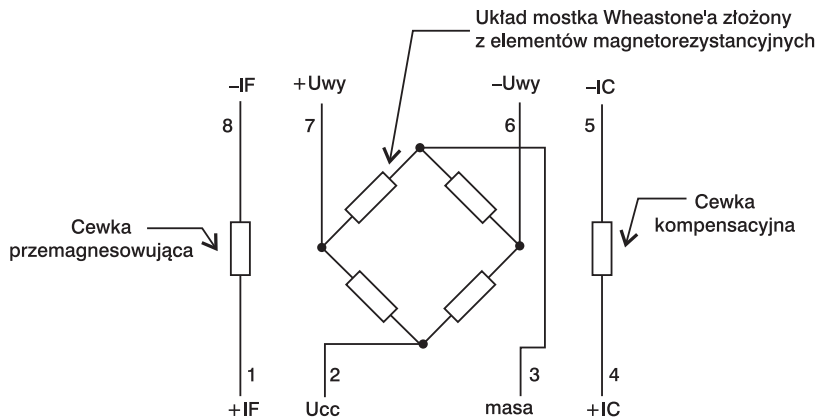


$$R = R_0 + \frac{\Delta R}{2} \pm \Delta R \left( \frac{H_{zewn}}{H_0} \right) \sqrt{1 - \left( \frac{H_{zewn}}{H_0} \right)^2}$$

Zależność ta jest zbliżona do liniowej dla niewielkich wartości zewnętrznego pola magnetycznego i ma w tym obszarze większe nachylenie od charakterystyki czujnika standardowego. Zależności rezystancji od unormowanego natężenia zewnętrznego pola magnetycznego dla czujnika o strukturze standardowej i o strukturze grzebieniowej przedstawiono na rys. 4.

Przykładem takiego czujnika może być układ KMZ51 firmy Philips. Zawiera on czujniki magneto-rezystancyjne ze strukturą grzebieniową. Jego budowę wewnętrzną przedstawiono na rys. 5.

Układ KMZ51 zawiera mostek Wheatstone'a zbudowany z czterech elementów magnetorezystancyjnych oraz dwóch cewek: cewki przemagnesowującej i cewki kompensacyjnej. Kierunek wektora pola magnetycznego wytwarzanego przez cewkę przemagnesowującą jest zgodny z kierunkiem wewnętrznej magnetyzacji czujnika. Kierunek wektora pola wytwarzanego przez cewkę kompensacyjną jest zgodny z osią czułości czujnika. Cewka przemagnesowująca umożliwia zmianę



Rys. 5 Budowa wewnętrzna czujnika KMZ51

Tab. 1. Wybrane parametry czujnika KMZ51

Lp.	Parametr	Wartość	Jednostka
1	Napięcie zasilania mostka	5	V
2	Typowa czułość	16	mV/V kA/m
3	Zakres pomiarowy	-0,2...+0,2	kA/m
4	Napięcie offsetu	-1,5...+1,5	mV/V

zwrotu wewnętrznej magnetyzacji czujnika (przemagnesowanie czujnika) natomiast cewka kompensacyjna umożliwia kompensację zewnętrznego pola magnetycznego. Wybrane parametry czujnika KMZ51 zestawiono w tab. 1.

Jak widać teoria nieskomplikowanego, jakby się wydawać mogło,

kompasu elektronicznego nie jest taka prosta. To jeszcze nie wszystko. W tym odcinku nie zdołaliśmy pomieścić wszystkich problemów, będziemy je kontynuować za miesiąc.

**Piotr Kaniewski**  
**Jakub Kazubek**  
**Piotr Komur**

# PŁYTKI PROTOTYPOWE

## Umożliwiają szybkie tworzenie projektów na tzw. pająka bez lutowania

**SD35** ↘  
cena: 86 zł  
Płytki stykowa o 2420 polach stykowych z czterema gniazdami zasilania.  
Wymiary: 237x175x18,5mm.

**SD12N** ↘ cena: 24 zł  
Płytki stykowa o 840 polach stykowych. Zaczepy znajdujące się z boku płytki umożliwiają łączenie kilku płytek w jeden większy moduł. Taśma klejąca znajdująca się pod spodem płytki umożliwia przytwierdzenie modułu na stałe do podłoża.  
Wymiary płytki: 168x55x10mm.

**SD24** ↘  
cena: 69 zł  
Płytki stykowa o 1680 polach stykowych z trzema gniazdami zasilania.  
Wymiary płytki: 220x127x18,5mm.

**SD JUMPER** ↘ cena: 18,50 zł  
Zestaw 140 łączówek do płytek stykowych. Oszczędza czas i zapewnia ładny i przejrzysty wygląd projektu

Dział Handlowy AVT 01-939 Warszawa, ul. Burleska 9, tel 22 568 99 50, handlowy@avt.pl