

Jak zbudować kompas elektroniczny z czujnikiem magnetycznym, część 2

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.

W pierwszej części artykułu nie zdołaliśmy wyjaśnić wszystkich zagadnień teoretycznych i spodziewanych problemów praktycznych związanych z budową kompasu elektronicznego z czujnikiem pola magnetycznego. Uzupełniamy zatem opis i zachęcamy jednocześnie Czytelników do zapoznania się z projektem takiego kompasu.

Problem offsetu

Podstawowym problemem podczas pomiaru natężenia pola magnetycznego jest napięcie offsetu, które dodaje się do każdego wyniku pomiaru. Napięcie offsetu składa się z offsetu statycznego, który zgodnie z parametrami układu

KMZ51 może wynosić $\pm 1,5$ mV na każdy 1 V napięcia zasilania oraz z offsetu związanego z dryftem temperaturowym. Jeśli czujnik KMZ51 jest zasilany rekomendowanym napięciem 5 V, to przy stałej temperaturze otoczenia równej 25°C wartość napięcia offsetu może wynieść $\pm 7,5$ mV. Temperaturowy dryft offsetu wynosi $\pm 3 \mu\text{V/V/K}$ i zakładając dużą zmienność temperatury otoczenia, w którym pracuje kompas, np. 100 K, może powodować powstanie dodatkowego offsetu wynoszącego $\pm 1,5$ mV. Wynika stąd, że przy zasilaniu czujnika napięciem 5 V, można się liczyć z wystąpieniem maksymalnego offsetu wynoszącego ± 9 mV/V. Okazuje się, że w przypadku pomiarów słabych pól, a do takich zalicza się ziemskie pole magnetyczne, wymieniona wartość offsetu jest bardzo duża i mogłaby uniemożliwić pracę nawet prostego kompasu 8-segmentowego.

Do zobrazowania tego problemu posłużymy się następującym przykładem. Założmy, że do pomiaru ziemskiego pola magnetycznego, które w miejscu pomiaru ma minimalne spotykane w praktyce natężenie 15 A/m, używamy czujnika KMZ51. Założymy ponadto, że jest on zasilany napięciem 5 V i ma typową wartość czułości podawaną przez producenta, równą 16 (mV/V)/(kA/m) . W wyniku wykonania pełnego obrotu czujnika w mierzonym polu magnetycznym składowa pola magnetycznego wzdłuż osi pomiarowej czujnika będzie się zmieniała od -15 do $+15$ A/m. Napięcie na wyjściu czujnika również będzie ulegało zmianom podczas wykony-

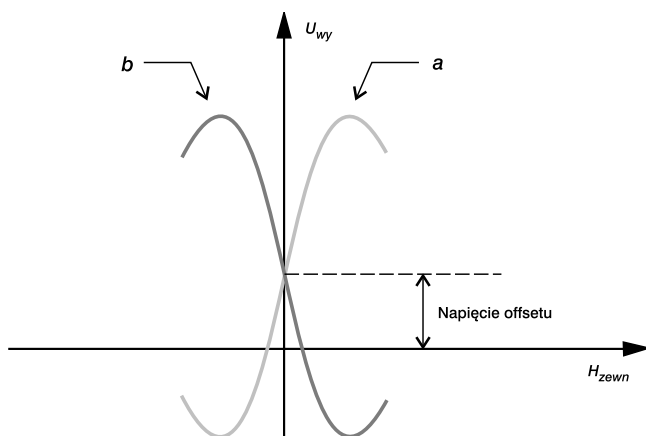
wania obrotu, przy czym amplituda tych zmian wyniesie:

$$U_m = 16 \frac{\text{mV/V}}{\text{kA/m}} \cdot 5 \text{ V} \cdot 0,015 \text{ kA/m} = 1,2 \text{ mV}$$

Przy pomiarze słabego ziemskiego pola magnetycznego, amplituda zmian napięcia użytecznego na wyjściu czujnika KMZ51 może być wielokrotnie mniejsza od napięcia offsetu, a nawet porównywalna ze zmianami offsetu pod wpływem zmian temperatury.

Na szczęście rozwiązanie problemu występowania offsetu jest stosunkowo proste. Offset można wyznaczyć za pomocą specjalnej techniki przemagnesowania czujnika, a następnie odejmować od kolejnych wyników pomiarów. Wyznaczanie napięcia offsetu opiera się na zmianie charakterystyki czujnika z dodatniej na ujemną, czyli na zmianie zwrotu jego wewnętrznej magnetyzacji. Na **rys. 6** przedstawiono zależność napięcia wyjściowego czujnika KMZ51 od natężenia mierzonego pola magnetycznego. Na rysunku znajdują się dwie charakterystyki dla obu możliwych zwrotów wektora magnetyzacji wewnętrznej. Z rysunku tego wynika, że napięcie offsetu nie zależy od charakterystyki czujnika. Aby określić to napięcie wystarczy zatem wykonać pomiary napięcia wyjściowego czujnika dla charakterystyk (a) i (b) przy stałym zewnętrznym polu magnetycznym. Zasadę wyznaczania offsetu wyjaśniono na **rys. 7**.

Impulsy prądu przemagnesowującego I_F płynące przez cewkę przemagnesowującą powodują zmianę zwrotu magnetyzacji, co powoduje odwrócenie charakterystyki czujnika. Przy stałym natężeniu zewnętrznego pola magnetycznego H_x , na wyjściu czujnika pojawia się przebieg prostokątny przesunięty o napięcie offsetu U_{offset} . Poszukiwane napięcie offsetu możemy wyznaczyć z zależności:



Rys. 6. Charakterystyki czujnika KMZ51 dla różnych zwrotów wektora magnetyzacji

$$U_{offset} = \frac{1}{2}(U_p + U_n)$$

Nie musimy wyznaczać offsetu przed każdym pomiarem, ponieważ jego wartość nie ulega szybkim zmianom i raz zmierzona zachowuje aktualność przez dłuższy czas. Poza tym częste mierzenie offsetu powoduje zwiększone zużycie energii ze źródła zasilania. Należy jednak pamiętać, że wartość offsetu może ulegać zmianom, np. w wyniku zmian temperatury lub napięcia zasilania. Z tego względu, co pewien czas należy aktualizować jego wartość. Częstotliwość wykonywania procedury pomiaru offsetu jest zależna od aplikacji i może wynosić od kilku sekund do kilku minut.

Jak określić azymut?

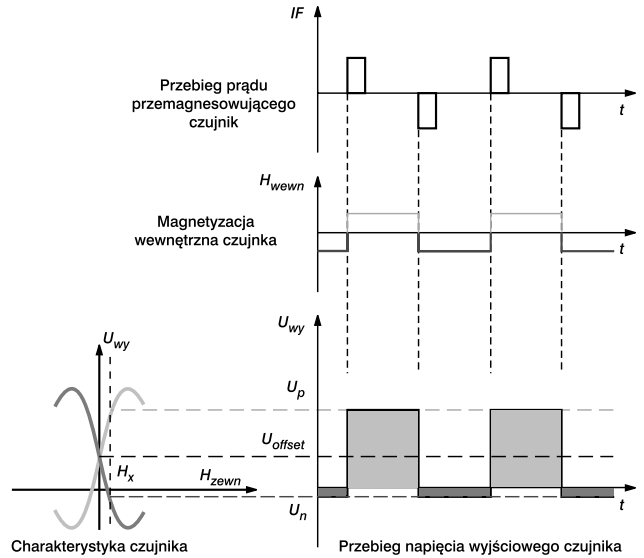
Jednym z możliwych rozwiązań jest zastosowanie dwóch czujników pola magnetycznego, np. KMZ51. Czujniki te powinny być zamontowane w taki sposób, aby oś pomiarowa (oś czułości) jednego z czujników była równoległa, natomiast oś czułości drugiego czujnika była prostopadła do osi odniesienia kompasu. Oś odniesienia kompasu jest osią kierowaną w stronę obiektów, których azymut chcemy wyznaczyć. Nasz kompas będzie wyznaczał kąt zawarty pomiędzy tą właśnie osią, a lokalnym południkiem magnetycznym.

Podczas pracy kompas powinien być umieszczony poziomo, a jego znaczące odchylenie od płaszczyzny horyzontalnej spowoduje zwiększenie błędów pomiarowych na skutek dodatkowego oddziaływania na czujniki KMZ51 składowej pionowej ziemskiego pola magnetycznego. Zapewnienie poprawnej pracy urządzenia w warunkach odchylenia od poziomu jest możliwe przez zastosowanie swobodnego zawieszenia modułu kompasu (rozwiązanie mechaniczne) lub przez dodanie do układu pionowego czujnika magnetycznego i co najmniej dwóch poziomych czujników przypsieszenia (rozwiązanie elektroniczne).

Jeśli kompas elektroniczny zostanie ustawiony w płaszczyźnie horyzontalnej, czujniki magnetorezystancyjne będą mierzyły składową równoległą i prostopadłą względem osi odniesienia kompasu składowej poziomej natężenia ziemskiego pola magnetycznego. Przetwarzanie wyników pomiarów obu składowych może wykonywać

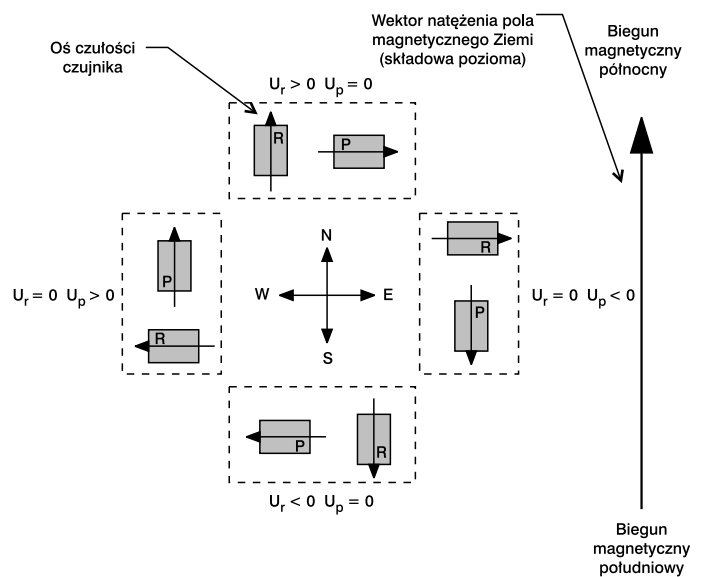
mikrokontroler, który na podstawie zmierzonych wartości napięć wyjściowych z obu czujników określa mierzony kierunek (azymut). Zależność napięć z czujników magnetorezystancyjnych od ustawienia ich osi czułości względem wektora pola magnetycznego wyjaśniono na **rys. 8**. Pokazano na nim cztery podstawowe położenia czujników R i P względem składowej poziomej wektora pola magnetycznego Ziemi. Literą R oznaczono czujnik równoległy do osi odniesienia kompasu, natomiast literą P oznaczono czujnik do niej prostopadły. Przy każdym z czterech pokazanych na **rys. 8** położeniach kompasu napięcie jednego z czujników przyjmuje wartość zerową. Znak napięcia z drugiego czujnika wskazuje wówczas, w którym z dwóch możliwych kierunków jest skierowany kompas. Przykładowo, przy równoległym ustawieniu osi kompasu względem północy magnetycznej, napięcie z czujnika R przyjmuje wartość większą od zera $U_r > 0$, zaś na wyjściu czujnika P, którego oś czułości jest prostopadła do składowej poziomej wektora pola magnetycznego, napięcie wynosi zero $U_p = 0$.

W dalszych rozważaniach przyjmujemy dla uproszczenia założenie, że kompas będzie wskazywał tylko 8 wyróżnionych kierunków, nie ma zatem potrzeby obliczania funkcji $atan2()$, o której była mowa w pierwszej części artykułu, a wystarczy jedynie sprawdzić, który z 8 kierunków znajduje się najbliższy kierunkowi osi odniesienia. Decyzję podejmuje się w wyniku

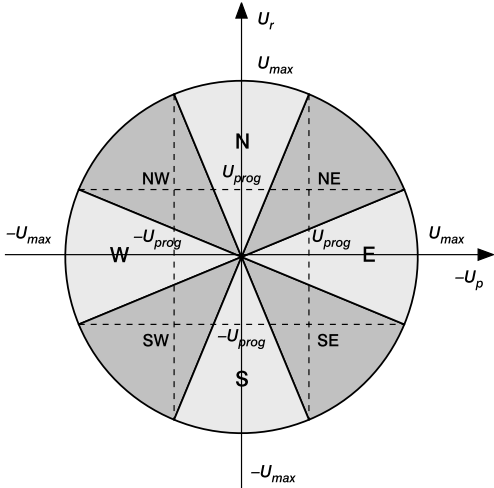


Rys. 7. Zasada pomiaru napięcia offsetu

sprawdzenia, w jakich przedziałach mieszczą się wartości obu napięć U_r i U_p . W idealnym przypadku napięcia obu czujników zależą od kierunku osi kompasu w sposób przedstawiony na **rys. 9**. Założono tutaj, że czułości obu czujników są takie same, a ich offset całkowicie skompensowany. Wówczas wartości napięć U_r i U_p można przedstawić jako zbiór punktów okręgu o promieniu U_{max} . Napięcie U_{max} stanowi maksymalną wartość napięcia wyjściowego czujnika, a więc także amplitudę zmian napięcia na wyjściu czujnika przy jego obrocie w ziemskim polu magnetycznym o kąt pełny. Znak ujemny przy napięciu U_p wynika z ustawienia osi czułości czujnika P na płytce kompasu. Jak



Rys. 8. Wartości napięć z czujników magnetycznych przy ustawieniu osi odniesienia kompasu równoległe do jednego z czterech kierunków głównych (N, S, W, E)



Rys. 9. Zasada określania kierunku w kompasie 8-segmentowym

Tab. 2. Napięcia wyjściowe czujników dla różnych położeni osi kompasu 8-segmentowego

Lp.	Kierunek	Napięcie czujnika R	Napięcie czujnika P
1	N	$U_r \geq U_{prog}$	$-U_{prog} \leq -U_p < U_{prog}$
2	NE	$U_r \geq U_{prog}$	$-U_p \geq U_{prog}$
3	E	$-U_{prog} \leq U_r < U_{prog}$	$-U_p \geq U_{prog}$
4	SE	$U_r < -U_{prog}$	$-U_p \geq U_{prog}$
5	S	$U_r < -U_{prog}$	$-U_{prog} \leq -U_p < U_{prog}$
6	SW	$U_r < -U_{prog}$	$-U_p < -U_{prog}$
7	W	$-U_{prog} \leq U_r < U_{prog}$	$-U_p < -U_{prog}$
8	NW	$U_r \geq U_{prog}$	$-U_p < -U_{prog}$

wynika z rys. 8, kiedy oś kompasu jest skierowana na wschód, oś czułości tego czujnika jest zwrócona przeciwnie do zwrotu składowej poziomej wektora ziemskiego pola magnetycznego, a więc wartość napięcia na jego wyjściu jest mniejsza od zera.

Z rys. 9 wynika, że przy podejmowaniu decyzji o azymucie, należy sprawdzać, w którym z trzech możliwych przedziałów wartości

$$\langle -U_{max}; -U_{prog} \rangle, \langle -U_{prog}; U_{prog} \rangle, \text{ czy } \langle U_{prog}; U_{max} \rangle$$

mieści się napięcie każdego z czujników. Wartość progowa U_{prog} , przy której uzyskuje się podział kąta pełnego na 8 równych sektorów wynosi 38,3% napięcia maksymalnego U_{max} . Zestawienie wartości napięć na wyjściach czujników R i P dla poszczególnych kierunków zestawiono w tab. 2.

Wyznaczając azymut musimy zdawać sobie sprawę, że ziemskie pole magnetyczne w otoczeniu kompasu może być odkształcone w wyniku od-

działywania znajdujących się w pobliżu obiektów ferromagnetycznych oraz wskutek występowania dodatkowych pól magnetycznych z innych źródeł (pracujących w pobliżu urządzeń elektrycznych, przewodów, przez które przepływa prąd, itp.). Oddziaływania tego typu mogą mieć charakter stały, np. wpływ karoserii pojazdu, w którym na stałe zamontowano kompas lub przejściowy, np. zaburzenia pola spowodowane przez przejeżdżające w pobliżu samochodu. Wpływ stałych zniekształceń pola może być zredukowany poprzez zastosowanie specjalnych procedur kalibracji kompasu. W najprostszych kompasach wskazujących np. tylko 8 podstawowych kierunków, ze względu na niewielką

wymaganą dokładność, procedury takie nie muszą być implementowane. Warto natomiast uwzględnić problem szybkich przejściowych zakłóceń pola magnetycznego objawiający się niestalością wskazań kompasu. Najlepszą metodą pozbycia się tego problemu jest uśrednianie wyników pomiarów napięć z czujników magnetorezystancyjnych.

Trzeba tutaj zauważyć, że niestalość wskazań kompasu może być spowodowana również jego niewielką (np.

10-bitową) rozdzielczością przetworników A/C, jakie są dostępne w popularnych mikrokontrolerach. Rozdzielczość ta pogorszy się do 7-bitowej w wyniku 200-krotnego wzmocnienia sygnałów z przetworników za pomocą wewnętrznych wzmacniaczy mikrokontrolera. W tej sytuacji błędy kwantyzacji mogą się objawiać „skakaniem” wyników pomiarów i przypadkowym migotaniem diod LED, szczególnie przy ustawieniach kompasu na granicy segmentów azymutu.

Do eliminacji „skakania” wyników pomiarów można zastosować ich uśrednianie. Algorytm obliczania średniej zastosowany w praktycznej realizacji kompasu wymaga jednak krótkiego wyjaśnienia. Jak wiadomo średnia ruchoma z N ostatnich pomiarów wynosi:

$$\bar{x}_k = \frac{x_{k-N+1} + x_{k-N+2} + \dots + x_{k-1} + x_k}{N}$$

Taki sposób liczenia średniej jest jednak kłopotliwy, ponieważ do chwili obliczania średniej \bar{x}_k w pamięci danych należy przechowy-

wać $N-1$ poprzednich wyników pomiarów. Okazuje się jednak, że średnią ruchomą można obliczać w sposób wymagający znacznie mniejszego zużycia pamięci. Wystarczy przekształcić wzór na średnią ruchomą w sposób pokazany poniżej, aby przekonać się, że obliczenie nowej wartości średniej \bar{x}_k wymaga przechowywania w pamięci jedynie poprzedniej wartości średniej \bar{x}_{k-1} . Średnia ta jest następnie aktualizowana o ostatnio wykonany pomiar x_k .

$$\begin{aligned} \bar{x}_k &= \frac{x_{k-N+1} + x_{k-N+2} + \dots + x_{k-1} + x_k}{N} \\ &= -\frac{x_{k-N}}{N} + \frac{x_{k-N} + x_{k-N+1} + x_{k-N+2} + \dots + x_{k-1}}{N} \\ &\quad + \frac{x_k}{N} \approx -\frac{1}{N} \bar{x}_{k-1} + \bar{x}_{k-1} + \frac{1}{N} x_k = \\ &= \frac{N-1}{N} \bar{x}_{k-1} + \frac{1}{N} x_k \end{aligned}$$

Wybierając wartość N w tej zależności decydujemy o tzw. efektywnym oknie uśredniania, tzn. uzyskiwane wyniki będą odpowiadały wynikom klasycznego obliczania średniej ruchomej przy uśrednianiu N pomiarów, np. średnia ruchoma z 5 ostatnich pomiarów może być obliczana następująco:

$$\begin{aligned} \bar{x}_k &= \frac{5-1}{5} \bar{x}_{k-1} + \frac{1}{5} x_k = \\ &= 0,8 \bar{x}_{k-1} + 0,2 x_k \end{aligned}$$

Warto zauważyć, że suma współczynników przy obu składnikach nowej średniej jest zawsze równa 1, co można intuicyjnie rozumieć w taki sposób, że tyle samo „zapominamy” ze starej średniej, ile nowej informacji wprowadzamy do niej z ostatniego pomiaru.

Uśrednianie danych pomiarowych, oprócz zalety polegającej na redukcji zakłóceń, a przez to zwiększeniu stałości wskazań kompasu, ma też istotną wadę polegającą na zwiększeniu czasu reakcji kompasu na zmianę kierunku. Wartość N powinna być dobierana w celu uzyskania kompromisu pomiędzy stałością wskazań i szybkością reakcji kompasu.

Uzyskaliliśmy już kompletną wiedzę teoretyczną pozwalającą na zbudowanie prawdziwego, działającego kompasu. Jak już było powiedziane wcześniej, artykuł na ten temat zamieścimy w EP6/2007 w dziale „Projekty”.

Piotr Kaniewski
Jakub Kazubek
Piotr Komur