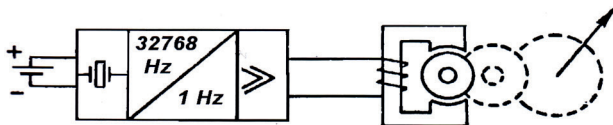


Miniaturowe silniki skokowe stosowane w mechanizmach zegarowych

Zdzisław Mrugalski

Omówiono zasadę działania miniaturowych jednopasmowych silników skokowych stosowanych w mechanizmach zegarowych. Zasygnalizowano problematykę wyznaczania momentu użytecznego silnika, a także podano przykłady rozwiązań konstrukcyjnych tych silników.

W zegarach i zegarkach z rezonatorem kwarcowym (potocznie zwanych „kwarcowymi”) i analogowym urządzeniem wskazującym (rys. 1) jako przetworniki impulsów prądowych na przemieszczenie kątowe mechanizmu wskazówkowego najczęściej są stosowane jednopasmowe silniki skokowe. Silnik skokowy za pośrednictwem przekładni zębatej napędza urządzenie wskazujące w tradycyjnej postaci, tj. wskazówki poruszające się na tle tarczy z podziałką, a niekiedy także – urządzenie kalendarzowe składające się z zestawu znaków ukazujących się w okienkach tarczy.



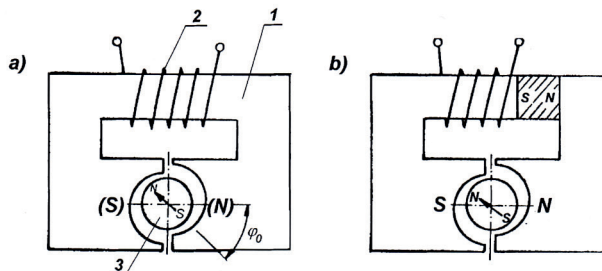
Rys. 1. Schemat blokowy zegara kwarcowego z mechanicznym, analogowym urządzeniem wskazującym

W zegarach i zegarkach z rezonatorem kwarcowym wirnik porusza się najczęściej z częstotliwością 1 Hz, co odpowiada skokowemu ruchowi wskazówki sekundowej co 1 s, jednak w niektórych rozwiązaniach konstrukcyjnych (stosowanych np. przez firmy OMEGA, TISSOT i in.) podczas nastawiania wskazówek zegarka silnik skokowy porusza wskazówki ze znacznie większą częstotliwością, np. 32 Hz. Oprócz tego są produkowane także zegarki (bez wskazówki sekundowej), w których silnik napędza wskazówki z mniejszą częstotliwością, np. co 5, 12, 30 lub 60 s. Pozwala to zmniejszyć moc pobieraną z baterii [1, 2].

Zasada działania i właściwości użytkowe jednopasmowego silnika skokowego

Schemat konstrukcyjny najprostszego jednopasmowego silnika skokowego z wirnikiem czynnym o jednej parze biegunów jest przedstawiony na rys. 2a. Silnik składa się ze stojana (1) złożonego z kilku blach z magnetycznie miękkiej stali (w małych mechanizmach – najczęściej z permalaju), uzwojenia wzbudzenia (2) i namagnesowanego wirnika (3). Jeśli przez uzwojenie nie płynie prąd, wirnik jest utrzymywany w położeniu jak na rysunku, wskutek oddziaływania momentu synchronizującego spowodowanego polem magnetycznym wirnika. W nabiegunkach stojana pojawiają się różnoimienne bieguny magnetyczne oznaczone na rysunku symbolami w nawiasach.

Prof. dr hab. inż. Zdzisław Mrugalski – profesor zwyczajny w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki Politechniki Warszawskiej.



Rys. 2. Schemat konstrukcyjny jednopasmowego silnika skokowego z niesymetryczną szczeliną pomiędzy wirnikiem i nabiegunkiem: a) zasilanego impulsami dwukierunkowymi, b) zasilanego impulsami jednokierunkowymi

W celu uzyskania w silniku niesymetrii pola magnetycznego w stanie, zapewniającej obrót wirnika w określonym kierunku, najczęściej stosuje się zmienną szczelinę pomiędzy wirnikiem a nabiegunkami stojana. W stanie bezprądowym oś biegunów wirnika będzie wtedy obrócona o kąt φ_0 w stosunku do osi nabiegunków stojana.

Teoretyczny przebieg momentu synchronizującego, wywołanego polem magnetycznym wirnika w funkcji kąta położenia wirnika, jest przedstawiony na rys. 3 jako krzywa $M_0(\varphi)$. W miarę obrotu wirnika moment synchronizujący zmienia się według zależności

$$M_0(\varphi) = -M_{0\max} \sin(2\varphi + \varphi_0) \quad (1)$$

Jeśli przez uzwojenie stojana popłynie prąd, to wartość momentu synchronizującego, wywołanego przez pole magnetyczne wzbudzone płynącym prądem, będzie miała przebieg według krzywej $M_n(\varphi)$, zgodny z zależnością

$$M_n(\varphi) = M_{n\max} \sin \varphi \quad (2)$$

Przebieg sumarycznego momentu synchronizującego w silniku skokowym o jednej parze biegunów i niesymetrycznej szczelinie pomiędzy wirnikiem i stojanem – w czasie przepływu przez uzwojenie prądu – przedstawiono na rys. 3 jako krzywą $M(\varphi)$. Przebieg ten opisuje równanie

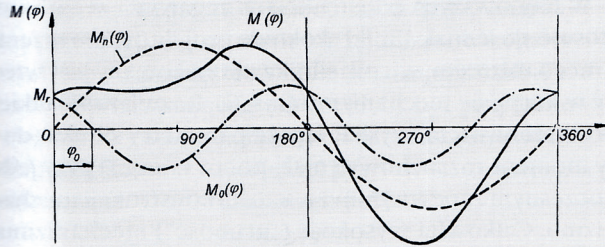
$$M(\varphi) = -M_{0\max} \sin(2\varphi + \varphi_0) + M_{n\max} \sin \varphi \quad (3)$$

lub ogólnie, w przypadku wirnika o p parach biegunów:

$$M(\varphi) = -M_{0\max} \sin(2p\varphi + \varphi_0) + M_{n\max} \sin p\varphi \quad (3a)$$

Z przebiegu tego wynika, że w chwili przyłączenia uzwojenia do źródła prądu na wirnik zaczyna działać dodatnio skierowany moment rozruchowy M_r .

Właściwości użytkowe jednopasmowego silnika skokowego można przedstawić jako zależności matematyczne



Rys. 3. Charakterystyki statyczne jednopasmowego silnika skokowego (rys. 2 a): $M_0(\varphi)$ – moment synchronizujący wywołany przez pole magnetyczne wirnika, $M_n(\varphi)$ – moment synchronizujący wytwarzany przez pole magnetyczne wywołane przepływającym przez uzwojenie prądem, $M(\varphi)$ – moment synchronizujący wynikowy

między wielkościami wejściowymi (U, i) i wyjściowymi ($\omega = j\dot{\varphi}$, M_U), które można wyznaczyć wychodząc z ogólnego równania ruchu wirnika:

$$M_B(\varphi) + M_R(\varphi) + M_U(\varphi) = M(\varphi) \quad (4)$$

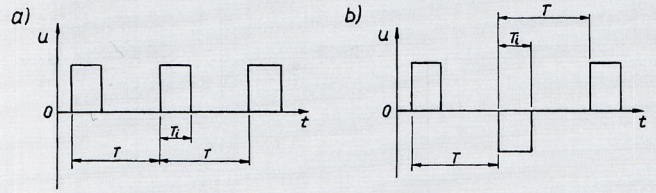
gdzie: $M_B(\varphi) = (I_w + I_o)\ddot{\varphi}$ – sumaryczny moment wynikający z bezwładności układu mechanicznego, I_w – moment bezwładności wirnika, I_o – moment bezwładności obciążenia zredukowany do wałka wirnika, $M_R(\varphi) = k_p\dot{\varphi} + k_w\ddot{\varphi} + M_t$ – sumaryczny moment oporów ruchu wirnika, $k_p\dot{\varphi}$ – moment tarcia o powietrze, $k_w\ddot{\varphi}$ – moment oporów ruchu wywołany prądami wirowymi, M_t – moment tarcia w łożyskowaniu wirnika, $M_U(\varphi)$ – moment użyteczny odbierany na wałku silnika (bez uwzględnienia bezwładności obciążenia); $M(\varphi)$ – moment synchronizujący wg zależności (3) lub (3a). Stąd moment użyteczny odbierany na wałku silnika

$$M_U(\varphi) = M(\varphi) - M_B(\varphi) - M_R(\varphi) \quad (5)$$

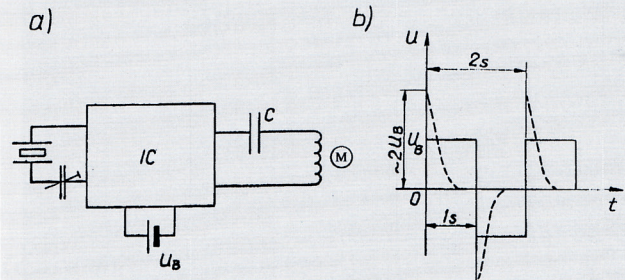
Moment użyteczny $M_U(\varphi)$ można obliczyć z równania (5) pod warunkiem, że istnieje możliwość wyznaczenia wartości poszczególnych momentów po prawej stronie tego równania. Szczególne trudności sprawia jednak wyznaczenie przebiegów wartości $M_0(\varphi)$ i $M_n(\varphi)$. Obliczenia te są dość złożone i uciążliwe [3-7], a ich wyniki mogą być obciążone znacznymi błędami. Dlatego przy konstruowaniu miniaturowych silników skokowych ostateczne wersje ich rozwiązań konstrukcyjnych wraz z doborem najwłaściwszych materiałów [8, 9], uzyskuje się na podstawie wyników badań modeli tych silników na specjalnych stanowiskach pomiarowych [10, 3, 11]. W taki właśnie sposób opracowano ostateczne wersje silników skokowych do kwarcowych zegarów samochodowych (do samochodu POLONEZ) – produkowanych w Zakładach POLTIK w Łodzi i do zegarów domowych produkowanych przez Zakłady METRON w Toruniu [1].

Zasilanie jednopasmowych silników skokowych

Zasilanie jednopasmowych silników skokowych stosowanych w mechanizmach zegarowych znacznie różni się od zasilania i sterowania zwykłych silników skokowych wielopasmowych. Krótkotrwałe impulsy prądowe (kilkadziesiąt ms) powodują rozruch wirnika, wytrącając go z położenia równowagi i nadają mu przyspie-



Rys. 4. Przebiegi impulsów zasilających ($T = 1 \dots 3$ s, $T_i = 4 \dots 100$ ms): a) jednokierunkowych, b) dwukierunkowych



Rys. 5. Silnik skokowy z szeregowo włączonym kondensatorem: a) schemat, b) przybliżony przebieg impulsów zasilających

sznienie, tak że po zaniku impulsu wirnik porusza się wskutek swej energii kinetycznej oraz oddziaływania statycznego pola magnetycznego, aż do osiągnięcia nowego położenia równowagi, w którym reluktancja obwodu magnetycznego jest najmniejsza. Występujące drgania wirnika w jego nowym położeniu mogą być tłumione na drodze elektrycznej lub mechanicznej.

W zegarach i zegarkach są stosowane dwa sposoby zasilania silników skokowych [1]: impulsami jednokierunkowymi (rys. 4a) oraz impulsami o kierunku naprzemiennie (rys. 4b). Najczęściej stosuje się zasilanie impulsami o kierunku naprzemiennie (rys. 4b). Zasilanie impulsami jednokierunkowymi (rys. 4a) jest prostsze, jednak wymaga bardziej złożonej konstrukcji obwodu magnetycznego silnika (rys. 2b). Jeśli wirnik ma jedną parę biegunów, jednemu impulsowi prądowemu odpowiada pełny obrót wirnika. Przełożenie przekładni zębatej musi jednak być dwukrotnie większe niż w przypadku zasilania impulsami dwukierunkowymi.

W małych zegarkach najczęściej silnik skokowy jest bezpośrednio przyłączony do wyjścia układu sterującego. W większych zegarach (np. stołowych lub samochodowych) często stosuje się kondensator włączany szeregowo z uzwojeniem silnika (rys. 5). Rozwiązanie takie pozwala prawie dwukrotnie zwiększyć napięcie impulsów zasilających, a przez dobór pojemności kondensatora – uzyskać odpowiedni czas trwania impulsów.

Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych miniaturowych silników skokowych

W większości obecnie produkowanych zegarów i zegarków kwarcowych silniki skokowe są konstruowane łącznie z mechanizmami, do których są przeznaczone. W małych i bardzo małych mechanizmach (np. zegarki naręczne) wirnik jest zaopatrzony z reguły w jedną parę biegunów (rys. 6). Średnica wirnika tych silników wynosi 1,5 do 3 mm.

Przykładowe dane charakteryzujące tego rodzaju silnik produkowany przez firmę SEIKO i stosowany w zegarkach naręcznych tej firmy (kal. 78) są następujące [12]:

cewka: liczba zwojów – 13800, średnica drutu – 20 μm ,
rezystancja – 4,5 k Ω , długość – 9,3 mm,
średnica zewnętrzna – 2,8 mm;

rdzeń cewki: długość – 9,8 mm,
przekrój – 0,8 x 0,6 mm;

stojan: średnica wewnętrzna – 2,4 mm,
grubość – 0,7 mm;

wirnik: średnica zewnętrzna – 1,65 mm,
grubość – 0,7 mm;

czas trwania impulsu: 7,8 ms;

pobór prądu: 1,1 μA (podczas przepływu prądu stałego) i 1,3 μA (w impulsie);

moment rozruchowy silnika

(na wałku minutowym): 2,5 mNm;

średnia sprawność: ok. 30 %.

W większych zegarkach (np. w budzikach stołowych) wirnik ma najczęściej 3 pary biegunów [1]; pełny obrót wirnika trwa wtedy 6 sekund. Zaletą silnika z wirnikiem wielobiegunowym jest możliwość zastosowania w przykładni zębatej mniejszej liczby stopni przełożenia.

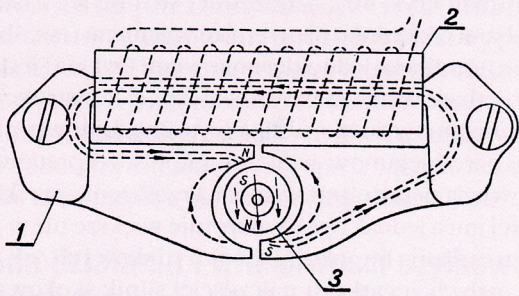
Niektóre firmy produkujące poszczególne elementy i zespoły do mechanizmów zegarowych wytwarzają również jednopasmowe silniki skokowe jako odrębne zespoły – zarówno do zegarów, jak i małych zegarków [13, 14]. Na rys. 7 przedstawiono schemat konstrukcyjny miniaturowego silnika skokowego (o 6 parach biegunów) stosowanego w niektórych typach zegarków naręcznych firm OMEGA i TISSOT.

W najnowszych konstrukcjach zegarów i zegarków stosuje się jednak silniki skokowe projektowane razem z mechanizmem; wirnik silnika ułożyskowany jest wtedy w korpusie mechanizmu (rys. 8). Rozwiązanie takie pozwala bowiem uzyskać lepsze parametry silnika (duży moment rozruchowy i mały pobór energii) przy jednoczesnym zapewnieniu zwartości konstrukcji mechanizmu. Całkowita wysokość („grubość”) mechanizmu – łącznie ze wskazówkami – zawarta jest w granicach 3 do 4 mm.

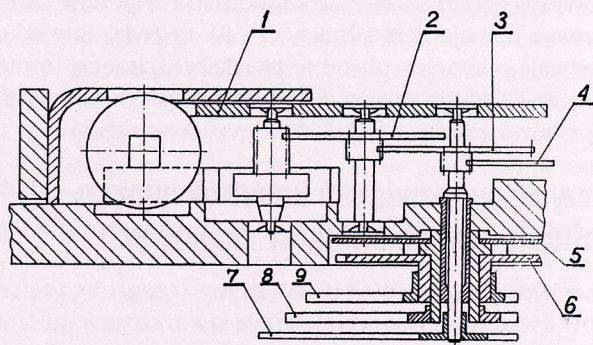
Podsumowanie

Postęp zarówno w dziedzinie teorii, jak i doświadczalnych metodach badawczych jednopasmowych miniaturowych silników skokowych jest warunkiem dalszego udoskonalania dotychczasowych rozwiązań konstrukcyjnych tych silników pod względem zmniejszenia ich wymiarów gabarytowych i zmniejszenia poboru energii, przy jednoczesnym zachowaniu dotychczas uzyskiwanych parametrów użytkowych.

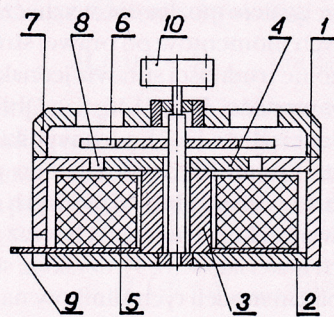
Z analizy opublikowanych prac na temat miniaturowych jednopasmowych silników skokowych wynika, że dotychczas brak jest prostych metod oraz szczegółowych wytycznych do projektowania miniaturowych jednopasmowych silników skokowych. Takie metody i wytyczne byłyby przydatne dla konstruktorów coraz to nowszych typów zegarów i zegarków kwarcowych z mechanicznymi urządzeniami wskazującymi, które mają szereg zalet w porównaniu z innymi rodzajami urządzeń wskazujących. Postęp w tej dziedzinie ma



Rys. 6. Schemat konstrukcyjny silnika skokowego w zegarku naręcznym: 1 – stojan, 2 – uzwojenie stojana, 3 – wirnik



Rys. 8. Schemat konstrukcyjny mechanizmu kwarcowego zegarka naręcznego (fragment): 1 – zespół silnika skokowego, 2 – zespół koła pośredniego I, 3 – zespół koła sekundowego, 4 – koło pośrednie II (fragment), 5 – koło minutowe, 6 – koło godzinowe, 7, 8 i 9 – wskazówki: sekundowa, minutowa i godzinowa



Rys. 7. Schemat konstrukcyjny miniaturowego silnika skokowego: 1, 2, 3 i 4 – elementy składowe stojana, 5 – uzwojenie stojana, 6 – wirnik, 7 – pokrywa, 8 – szczeliny magnetyczne pomiędzy nabiegunkami stojana, 9 – końcówki uzwojenia, 10 – zębnik współpracujący z przekładnią zębatą

istotne znaczenie ze względu na masowy charakter produkcji tego rodzaju mechanizmów zegarowych (na świecie kilkaset milionów szt. rocznie). Ponadto, opracowane metody mogłyby być przydatne w opracowywaniu konstrukcji subminiaturowych silników, które w niedalekiej przyszłości znajdą zastosowanie w mikrorobotach [15].

Bibliografia

1. Mrugalski Z.: Zespoły funkcjonalne urządzeń zegarowych i tachometrycznych. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1991, s. 35-47.
2. Mrugalski Z.: Elektryczne napędy miniaturowych urządzeń precyzyjnych i mikromechanizmów. Zbiór referatów na XII Międzynar. Sympozjum MIKROMASZyny I SERWOMECHANIZMY, Kamień Śląski k. Opola, wrzesień 2000 r., wyd. Instytut Elektrotechniki, W-wa 2000, tom II, s. 324-333.
3. Glaser G.: Quarzuhrentechnik. Verlag Wilhelm Kempfer. Stuttgart/Ulm, 1974.
4. Kreuth H. P.: Schrittmotoren. R. Oldenburg Verlag, München-Wien, 1988.
5. Pochanke A.: Indirectly coupled circuit-field model of single phase permanent magnet stepping motor. Zbiór referatów na III Polish-German Mechatronic Workshop 2000, Krynica, październik 2000, wyd. IMiF PW, W-wa 2000, s. 161 – 165.
6. Wróbel T.: Silniki skokowe. WNT, Warszawa 1993.
7. Praca zbior. pod red. J. Owczarka: Elektryczne maszynowe elementy automatyki. WNT, Warszawa, 1983.
8. Haman P., Zoller R.: Dauermagnete in Kleinuhren. Feinwerktechnik + Messtechnik, 1989, nr 7, s. 295-298.
9. Rodewald W., Schmidt F.: Seltenerd- Dauermagnetwerkstoffe. Feinwerktechnik + Messtechnik, 1989, nr 4, s. 157-162.
10. Frankenstein E.: Messungen an Schrittmotoren für Quarzarmbanduhren. Uhren und Schmuck, 1983, nr 5, s. 143-145, nr 6, s. 187-189.
11. Sołtyśiński J.: Pomiar charakterystyki statycznej momentu synchronizującego miniaturowych silników skokowych. PAK, 1980, nr 8-9, s. 299-302.
12. Katalogi i opisy techniczne silników skokowych firmy SEIKO (Japonia).
13. OMEGA ELECTRONIC – Technischer Ratgeber (wydawnictwo ciągłe, uzupełniane w miarę ukazywania się nowych typów zegarków firmy OMEGA).
14. Katalogi i opisy techniczne silników skokowych firmy ESCAP (Szwajcaria).
15. Mrugalski Z.: Silniki elektryczne w mikrotechnice – stan obecny i tendencje rozwojowe. Zbiór referatów na XI Międzynar. Symp. MIKROMASZyny I SERWOMECHANIZMY, Malbork, wrzesień 1998, wyd. Instytut Elektrotechniki, W-wa 1998, tom I, s. 20-27.

Streszczenia artykułów naukowych

Miniaturowe silniki skokowe stosowane w mechanizmach zegarowych, Zdzisław Mrugalski — s. 14

Omówiono zasadę działania miniaturowych jednopasmowych silników skokowych stosowanych w mechanizmach zegarowych. Zasygnalizowano problematykę wyznaczania momentu użytecznego silnika, a także podano przykłady rozwiązań konstrukcyjnych tych silników.

Miniature stepping motors used in clock-works, Zdzisław Mrugalski — p. 14

Miniature one-phase stepping motors used in clock-works are discussed. The problems connected with calculation of usability moment for motor are pointed out, and design examples for those motors are also shown.