

# Przekładnie zębate stosowane w układach napędowych mikromechanizmów (1)

Zdzisław Mrugalski

**W pierwszej części artykułu omówiono cechy konstrukcyjne i zasady budowy miniaturowych przekładni redukcyjnych - napędowych i zliczających, które spośród różnych rodzajów przekładni, w drobnych mechanizmach i miniaturowych urządzeniach elektromechanicznych stosowane są najczęściej.**

**W** drobnych mechanizmach i mikromechanizmach często znajdują zastosowanie układy napędowe składające się z silnika elektrycznego i redukcyjnej przekładni zębatej. Ze względu na spełniane funkcje można tu wyróżnić m.in. następujące rodzaje przekładni redukcyjnych [1]:

- przekładnie napędowe – jedno- lub kilkustopniowe przekładnie redukcyjne, przenoszące moc z silnika o ruchu obrotowym ciągłym lub silnika skokowego do urządzenia napędzanego i działające w sposób ciągły lub w ciągu dłuższych odstępów czasu,
- przekładnie zliczające – zwykle kilkustopniowe przekładnie redukcyjne przekazujące ruch obrotowy z silnika skokowego [2] do urządzenia odbiorczego, którym najczęściej jest układ wskazujący zliczane skoki (obroty) wałka silnika; przekładnie te przenoszą zwykle bardzo małe momenty, które wynikają z własnych oporów ruchu przekładni lub z oporów ruchu urządzenia wykonawczego (np. urządzenia wskazującego odmierzany czas).

Przekładnie zębate stosowane w mikromechanizmach można również podzielić w zależności od cech kinematycznych zastosowanego w nich ząbienia:

- przekładnie o przełożeniu stałym (np. z ząbieniem ewolwentowym),
- przekładnie o przełożeniu cyklicznie zmiennym w zakresie jednej podziałki (np. z ząbieniem zegarowym lub innym ząbieniem specjalnym).

Ze względów użytkowych drobne mechanizmy i mikromechanizmy, a zatem i ich przekładnie zębate, powinny mieć możliwie małe wymiary. Przy danym przełożeniu małe wymiary przekładni można uzyskać dwoma sposobami:

- przez zmniejszenie modułów uzębienia z zachowaniem tych samych liczb zębów współpracujących kół,
- przez zmniejszenie liczb zębów współpracujących kół (bez zmiany modułów).

Ponieważ z przyczyn technologicznych i ekonomicznych dąży się do stosowania możliwie dużych modułów, najczęściej pozostaje tylko drugi sposób, tj. stosowanie możliwie małych liczb zębów. Z tego powodu w przekładniach drobnych mechanizmów, w tym zega-

rów i zegarków, liczby zębów zębniaków wynoszą często 6 do 10, a niekiedy mniej niż 6.

W odróżnieniu od przekładni maszynowych i różnego rodzaju mechanizmów precyzyjnych w drobnych mechanizmach najczęściej spotyka się najprostsze typy przekładni, tj. z kołami zębatymi walcowymi o zębach prostych, znacznie rzadziej – przekładnie ślimakowe lub stożkowe. Stosowane w tych przekładniach ząbienia często mają przełożenie zmienne w zakresie jednej podziałki.

## Technologie stosowane w wytwarzaniu miniaturowych przekładni zębatach

### Metody konwencjonalne

W drobnych mechanizmach, w tym w zegarach i zegarkach, metalowe elementy przekładni (koła zębata i zębniaki) wykonuje się z reguły metodami konwencjonalnymi, tzn. koła zębata – przez frezowanie obwodniowe w pakietach lub wykrawanie przy użyciu specjalnych wykrojników, a zębniaki – przez frezowanie na frezarkach obwodniowych lub podziałowych.

Koła zębata z tworzyw sztucznych (najczęściej z poliacetali, takich jak np. DELRIN lub HOSTAFORM) wykonuje się przez odlewanie wtryskowe. Stosuje się przy tym zwykle formy wielogniazdowe.

Najmniejsze mechanizmy zegarkowe mechaniczne lub z rezonatorem kwarcowym, jakie wykonywane są metodami konwencjonalnymi, mają średnicę mechanizmu mniejszą od 10 mm (np. zegarek kwarcowy „Kaliber 201” firmy ETA SA, Szwajcaria, ma średnicę 9,9 mm i grubość 2,25 mm).

### Metody stosowane w mikrotechnice

W ciągu ostatnich kilkunastu lat rozwinęła się nowa dziedzina – MIKROTECHNIKA (określana też skrótem „MEMS” – od słów: MicroElectro-Mechanical-Systems) [3, 4], która polega na wykonywaniu – obecnie jeszcze w skali laboratoryjnej – różnego rodzaju urządzeń, w tym mikroczipów i mikromechanizmów (wraz z mikrosilnikami napędowymi) o wymiarach gabarytowych wynoszących od kilkudziesięciu mikrometrów do kilku milimetrów. Są to zwykle zintegrowane układy mechaniczno-elektroniczno-optyczne, do których wytwarzania wykorzystuje się:

*Prof. dr hab. inż. Zdzisław Mrugalski – profesor zwyczaj. w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej.*

- „mikromachining” – tj. rozwinięte i udoskonalone technologie stosowane dotychczas w produkcji układów scalonych (gdzie jako materiał podstawowy stosowany jest krzem), które pozwalają uzyskiwać elementy lub złożone urządzenia o grubościach zwykle wynoszących kilka do kilkunastu mikrometrów;
- technologię LIGA (skrót od niemieckich słów: Litography, Galvanoformung, Abformung), opracowaną w Centrum Badań Jądrowych w Karlsruhe (Niemcy), umożliwiającą uzyskiwanie elementów o grubościach od kilkudziesięciu do kilkuset mikrometrów i stosowanie dowolnych materiałów; technologia ta pozwala wytwarzać mikromechanizmy, w których mogą współpracować elementy wykonane z różnych, optymalnie dobranych materiałów, a nie tylko z krzemu;
- technologie stanowiące kombinacje metod stosowanych w mikrotechnice i metod konwencjonalnych.

Cechą charakterystyczną metody „mikromachiningu” jest możliwość uzyskania – w jednym cyklu produkcyjnym – zintegrowanych mikroukładów zawierających np. część sensoryczną (mikroczipy), część sterującą (elektroniczno-informatyczną) i mikromechanizm wykonawczy (zawierający mikrosilnik obrotowy lub liniowy wraz z przekładnią zębatą) [3, 4].

Technologia LIGA stosowana jest zarówno do wykonywania mniaturowych kół zębatych i zębików z metali (np. ze stopu żelaza i niklu) jak i do wykonywania mikroform odlewniczych przeznaczonych do odlewania wtryskowego miniaturowych kół zębatych z tworzyw sztucznych.

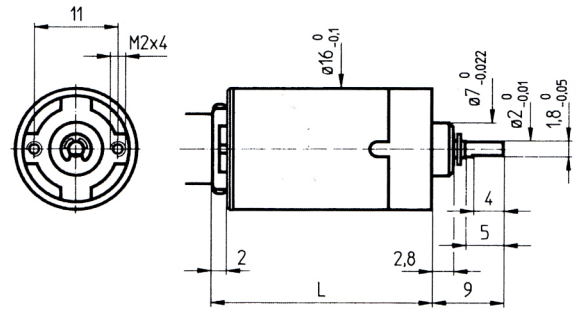
## Mikronapędy z przekładniami redukcyjnymi

### Układy napędowe zawierające mikrosilnik z przekładnią napędową

W miniaturowych układach napędowych silniki elektryczne (prądu stałego lub synchroniczne) konstruowane są z reguły w taki sposób, aby przy małych wymiarach uzyskać z nich możliwie dużą moc; z tego względu pracują one z dużymi prędkościami obrotowymi – od kilkunastu do kilkudziesięciu tysięcy obrotów na minutę. Jednak urządzenia napędzane przez te silniki z reguły wymagają znacznie mniejszych prędkości obrotowych, dlatego przekładnie zębate współpracujące z takimi silnikami muszą mieć duże przełożenia. Jednocześnie poszukuje się takich rozwiązań konstrukcyjnych przekładni redukcyjnych, aby w małej objętości i przy małej liczbie kół zębatych można było uzyskać możliwe duże przełożenia.

Oprócz klasycznych wielostopniowych przekładni z kołami walcowymi często stosuje się zębate przekładnie planetarne, a niekiedy także przekładnie falowe lub przekładnie ślimakowe. Przy wyborze rozwiązania konstrukcyjnego przekładni należy pamiętać, że im większe jest jej przełożenie, tym silniej objawiają się jej cechy niepożądane, takie jak: mała sprawność, mała dokładność kinematyczna, duży luz martwy, duży moment bezwładności.

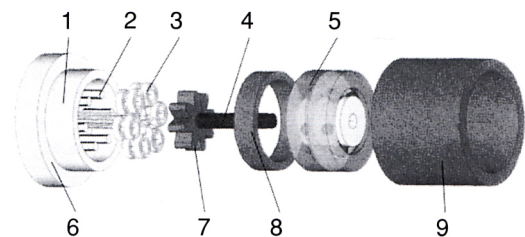
Zespół napędowy często ma postać tzw. motoreduktora składającego się z silnika (prądu stałego lub przemien-



Rys. 1. Przykład motoreduktora (typ M 1616 C 11) firmy Portescap [6]: silnik prądu stałego 2 V,  $n = 7000$  obr./min; przekładnia o przełożeniu – zależnie od wersji: 9, 27, 54, 486 lub 2190

nego) i zintegrowanej z nią przekładnią zębatą (rys. 1). Zespoły takie produkowane są seryjnie przez wyspecjalizowane firmy, oferujące odbiorcom różne typy i odmiany motoreduktorów [5, 6].

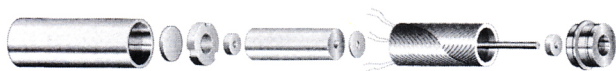
W 1993 r. w Instytucie Mikrotechniki w Moguncji (IMM – Institut für Mikrotechnik GmbH, Mainz) opracowano konstrukcję i uruchomiono produkcję synchronicznego mikrosilnika reluktancyjnego o średnicy zewnętrznej 2 mm i długości ok. 5 mm [3, 7]. Budowę tego silnika przedstawiono na rys. 2. Stojan silnika (1) wraz z nabie-



Rys. 2. Silnik reluktancyjny opracowany i wykonywany w IMM [7]

gunnikami (2) i kołnierzem (6), wirnik (7) oraz uzwojenie stojana (3) wykonywane są techniką LIGA, natomiast pozostałe elementy: wałek o średnicy 0,24 mm (4), pierścien dystansowy (8) i obudowa (9) – metodami konwencjonalnymi. Wałek łożyskowy jest w łożyskach kulkowych (5) lub w łożyskach ślizgowych (z panewkami mineralnymi). Odchyłki wykonawcze poszczególnych elementów nie przekraczają 5  $\mu\text{m}$ . Montaż elementów silnika odbywa się przez wciskanie lub klejenie. Odległość pomiędzy nabiegunnikami stojana a wirnikiem wynosi 10 – 20  $\mu\text{m}$ . Przy zasilaniu prądem przemiennym silnik pracuje jako synchroniczny. Zależnie od częstotliwości prądu zasilającego wirnik osiąga do 200 000 obrotów na minutę i rozwija moment rzędu 1  $\mu\text{Nm}$ .

W efekcie współpracy IMM w Moguncji z Instytutem Faulhabera w Schönaich (RFN) opracowano konstrukcję i uruchomiono seryjną produkcję trójfazowego mikrosilnika synchronicznego o średnicy zewnętrznej 1,9 mm i długości ok. 5,5 mm (rys. 3). Silnik ten osiąga prędkość 100 000 obr./min i moment 7,5  $\mu\text{Nm}$ .



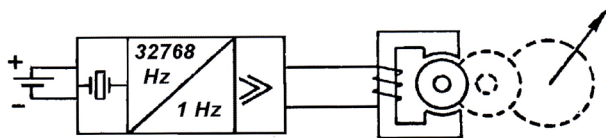
Rys. 3. Silnik synchroniczny o średnicy 1,9 mm, wytwarzany w Instytucie Faulhabera [7]

Szczegóły dotyczące konstrukcji tego silnika i jego parametrów zawarte są w wydawnictwach firmowych [5] i w publikacji [7]. Obecnie jest to najmniejszy w świecie seryjnie produkowany silnik synchroniczny.

### Układy napędowe zawierające mikrosilnik skokowy z przekładnią zliczającą

Podstawową funkcją przekładni zliczających jest zliczanie obrotów mikrosilnika skokowego lub niekiedy innego elementu poruszającego się ruchem obrotowym, np. koła zapadkowego. A zatem działają one najczęściej w sposób przerywany (małymi skokami).

We współczesnych mechanizmach zegarowych, w których jako oscylator umożliwiający pomiar czasu jest zastosowany rezonator kwarcowy, drgania generatora o częstotliwości od kilkudziesięciu kHz do kilku MHz, zredukowane są w dzielniku częstotliwości do 1 Hz. Impulsy o tej częstotliwości doprowadzane są do mikrosilnika skokowego [2]. Silnik ten napędza analogowe urządzenie wskazujące za pośrednictwem przekładni zliczającej (rys. 4), przez co umożliwia ona wskazywanie



Rys. 4. Schemat kinematyczny mechanizmu zegarowego z rezonatorem kwarcowym i przekładnią zliczającą

odmierzanego przez zegar czasu [1, 2]. W mechanizmach zegarowych przekładnie zliczające przenoszą jedynie bardzo małe momenty wynikające z własnych oporów ruchu przekładni i z oporów ruchu urządzenia wskazującego.

Jedną z cech mechanizmów zegarowych są małe ich wymiary, a zatem stosowane w nich przekładnie zębate również muszą być możliwie małe. Ze względów technologicznych i ekonomicznych dąży się do stosowania w tych przekładniach możliwie dużych modułów uzębienia, a więc przy zadanym przełożeniu przekładni liczby zębów współpracujących kół muszą być możliwie małe. Przy większej wartości modułu można bowiem zwiększyć odchyłki wykonawcze elementów przekładni.

Od przekładni zliczających nie jest wymagana stałość przełożenia (może ono być cyklicznie zmienne w zakresie jednej podziałki), jednak stosowane w nich ząbienia muszą spełniać następujące inne wymagania:

- mała zmienność momentu chwilowego na zębniku napędzającym,

- duża sprawność średnia przekładni,
- mały wpływ zmiany głębokości przenikania uzębienia współpracujących kół na sprawność średnią i moment chwilowy na zębniku napędzającym,
- duży luz międzyzębny obwodowy i promieniowy (ze względu na żadaną 100-procentową zamiennność przy montażu).

Jako wielkość charakteryzującą względne zmiany momentu chwilowego  $M_{c1}$  na zębniku napędzającym przy stałym momencie na kole napędzanym  $M_2$  można przyjąć wskaźnik momentu chwilowego zdefiniowany następująco:

$$m_{c1} = \frac{M_{c1}}{M_1}$$

gdzie:  $M_{c1}$  – moment chwilowy na zębniku napędzającym,

$$M_1 = \frac{M_2}{i} \quad \text{– moment średni na tym zębniku (bez uwzględnienia tarcia),}$$

$M_2$  – moment obciążenia na kole napędzanym,

$$i = \frac{z_2}{z_1} \quad \text{– wartość średnia przełożenia.}$$

W przekładniach zliczających, w których przenoszone momenty są małe i nie jest wymagana stałość przełożenia, celowe jest stosowanie ząbienia o przełożeniu cyklicznie zmiennym w zakresie jednej podziałki. Zaletą takiego ząbienia jest to, że przez odpowiedni dobór parametrów geometrycznych zarysów zębów współpracujących kół można ustalić położenie odcinka przyporu w taki sposób, aby warunki pracy przekładni były najbardziej korzystne.

### Bibliografia

1. Mrugalski Z.: Zespoły funkcjonalne urządzeń zegarowych i tachometrycznych. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1991, s. 59–88.
2. Mrugalski Z.: Miniaturowe silniki skokowe stosowane w mechanizmach zegarowych. PAR 2001, nr 7–8, s. 14–17.
3. Mrugalski Z., Rymuza Z.: Mikrotechnika – MEMS. PAK, 1993, nr 6, s. 133–137.
4. Mrugalski Z., Rymuza Z.: Mikromechanizmy. PAR 1998, nr 6 (cz. I – s. 4–9) oraz nr 7–8 (cz. II – s. 5–9).
5. Katalogi mikrosilników firmy FAULHABER-MOTOREN, Dr Fritz Faulhaber GmbH & Co, Schönaich (RFN).
6. Katalogi mikrosilników firmy Portescap, La Chaux-de-Fonds (Szwajcaria).
7. Beckord U., Bessey R.: Mikromotoren gewinnen Schwung. FEIWERKTECHNIK & MIKROTECHNIK 1997, Nr 11–12, s. 850–852.

Część 2. artykułu – w następnym numerze

## Streszczenia artykułów naukowych

**Przekładnie zębate stosowane w układach napędowych mikromechanizmów** (1), Zdzisław Mrugalski — s. 12

W pierwszej części artykułu omówiono cechy konstrukcyjne i zasady budowy miniaturowych przekładni redukcyjnych — napędowych i zliczających, które spośród różnych rodzajów przekładni, w drobnych mechanizmach i miniaturowych urządzeniach elektromechanicznych stosowane są najczęściej.

**Toothed gears in micromechanisms** (1), Zdzisław Mrugalski — p. 12

In the paper (part 1 and 2), there are described design features and principles of building miniature reduction gears — power and counter gears, which among other types, are applied in fine mechanisms and micro-devices most often. There is also presented a recent work concerning this field carried out at the Warsaw University of Technology.