

**Maciej Balkowiec**

**Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice**

## **BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA RESOLWERA RELUKTANCYJNEGO**

### **CONSTRUCTION AND PRINCIPLES OF OPERATION OF VARIABLE- RELUCTANCE RESOLVER**

**Streszczenie:** Resolwer reluktancyjny jest przetwornikiem położenia kąтового działającym na zasadzie transformatora położenia kąтового. Przetworniki tego typu cechują się odpornością na wysokie temperatury, wstrząsy, wilgotność i zapylenie, dzięki czemu są wykorzystywane w układach napędowych o regulowanej prędkości obrotowej np. w samochodach elektrycznych. W artykule przedstawiono podstawowe informacje o budowie i zasadzie działania resolwera reluktancyjnego.

**Abstract:** Variable-Reluctance resolver is a rotor angular position transducer, which works on principles of rotary electric transformer. This type of transducers are resistant to high temperatures, shocks, humidity and dust and that is why they are used in propulsion drives with speed regulation e.g. electric vehicles. Article presents basic information about construction and principles of operation of Variable-Reluctance resolver.

**Słowa kluczowe:** przetwornik położenia kąтового, resolwer reluktancyjny

**Keywords:** angular position transducer, Variable-Reluctance resolver

### **1. Wstęp**

W elektrycznych układach napędowych o regulowanej prędkości obrotowej powszechnie stosowane są czujniki położenia kąowego wirnika. Pracują one w pętli sprzężenia zwrotnego, przekazując informację o aktualnej pozycji wirnika do sterownika silnika. Jednym z powszechnie stosowanych czujników położenia kąowego w tego typu napędach jest resolwer. Jego główną zaletą jest wysoka odporność na warunki środowiskowe, natomiast wadą jest potrzeba stosowania skomplikowanego układu przetwarzania cyfrowego, co sprawia, że informacja o aktualnym położeniu wirnika jest przekazywana nieco wolniej niż w przypadku enkodera. Resolwer działa na zasadzie transformatora położenia kąowego. Konwersja informacji o położeniu kąowym wirnika jest przeprowadzana elektromagnetycznie i zawarta jest w amplitudzie sygnałów wyjściowych sinus i cosinus. Uzwojenie pierwotne (wzbudzenia) zasilane jest napięciem sinusoidalnym o amplitudzie  $V_{exc}$  pulsacji  $\omega$ . Przepływ prądu w tym uzwojeniu, powoduje powstanie strumienia magnetycznego wzbudzenia skojarzonego z uzwojeniami wtórnymi sinus i cosinus. Uzwojenia wtórne są przesunięte względem siebie o  $90^\circ$  elektrycznych. Pozycja wirnika  $\theta$  determinuje wartość strumienia skojarzonego z uzwojeniami

sinus i cosinus, a co za tym idzie amplitudę napięć wyjściowych  $V_{sin}$  oraz  $V_{cos}$ . Można to wyrazić następującymi wzorami:

$$\begin{aligned} u_{exc}(t) &= V_{exc} \cdot \sin(\omega t) \\ u_{sin}(t) &= K \cdot V_{exc} \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin\theta \\ u_{cos}(t) &= K \cdot V_{exc} \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos\theta \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

$V_{exc}$  – amplituda napięcia wzbudzenia,

$K$  – przekładnia resolwera wyrażona jako iloraz  $V_{sin}/V_{exc}$  lub  $V_{cos}/V_{exc}$ ,

$\omega$  – pulsacja napięcia wzbudzenia w [rad/s],

$t$  – chwila czasowa w [s],

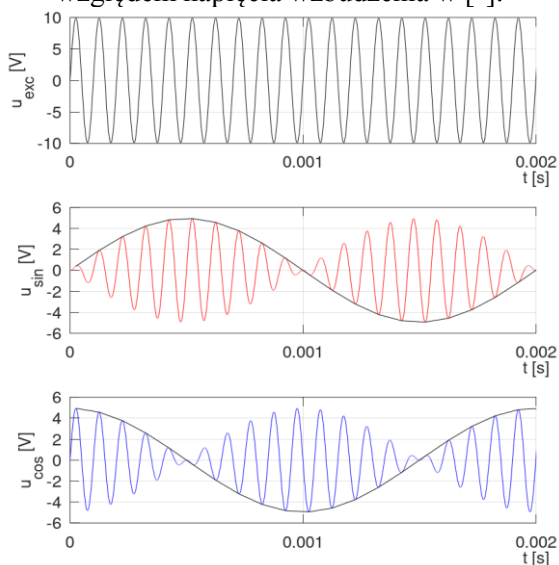
$\theta$  – pozycja kątowna wirnika w [ $^\circ$ ].

Należy zauważyć, że sygnały napięć sinus i cosinus są sygnałami modulowanymi amplitudowo, a ich obwiednia zawiera informację o aktualnej pozycji kątownej wirnika.

Podstawowymi parametrami resolwera są:

- wielkość mechaniczna,
- parametry napięcia wzbudzenia to są: wartość skuteczna w [V] oraz częstotliwość [Hz],
- przekładnia resolwera jako iloraz  $V_{sin}/V_{exc}$  lub  $V_{cos}/V_{exc}$ ,
- błąd maksymalny wyrażany w ['] lub [ $^\circ$ ],
- napięcie minimalne wyrażone w [mV],

- impedancja uzwojenia wzbudzenia, impedancja wejściowa w  $[\Omega]$ ,
- impedancja uzwojenia sinus i cosinus, impedancja wyjściowa w  $[\Omega]$ ,
- przesunięcie fazowe napięć sinus i cosinus względem napięcia wzbudzenia w  $[\circ]$ .



Rys. 1. Przykładowe przebiegi sygnałów: wzbudzenia  $u_{exc}$ , sygnału sinus  $u_{sin}$ , oraz sygnału cosinus  $u_{cos}$  i ich obwiednie

## 2. Budowa resolwera reluktancyjnego

Resolwer reluktancyjny (z ang. Variable-Reluctance lub VR) jest bezszczotkowym przetwornikiem pozycji kątowej wirnika i składa się ze stojana oraz wirnika wewnętrznego. Konstrukcja rdzenia stojana resolwera nie odbiega znacząco od konstrukcji rdzenia stojana maszyny z cewkami skupionymi, natomiast wirnik resolwera reluktancyjnego zapewnia zmienną wysokość szczeliny powietrznej. Uzwojenia wzbudzenia (R1-R2), sinus (S2-S4) oraz cosinus (S1-S3) umieszczone są w stojanie. Cewki uzwojeń resolwera typu VR nawijane są na tym samym zębie stojana w sposób przedstawiony na Rys. 4. Składają się one z cewek skupionych połączonych szeregowo. Cewka skupiona uzwojenia sinus oraz cosinus nawijane są na cewki uzwojenia wzbudzenia w odpowiedniej konfiguracji:

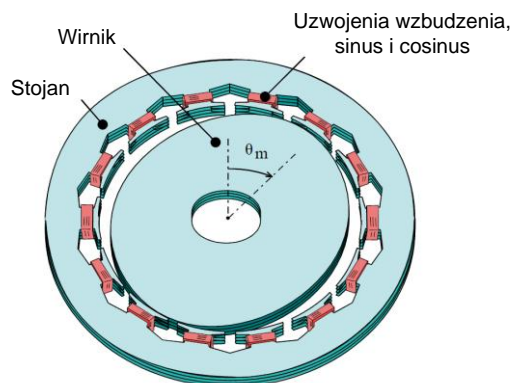
$$\begin{aligned} N_i &= N_{exc} \cdot \cos[(i-1) \cdot \pi] \\ N_{si} &= N_0 \cdot \sin[(i-1) \cdot 2\pi \cdot (p/Z) + \alpha] \cdot \cos[(i-1) \cdot \pi] \\ N_{ci} &= N_0 \cdot \cos[(i-1) \cdot 2\pi \cdot (p/Z) + \alpha] \cdot \cos[(i-1) \cdot \pi] \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

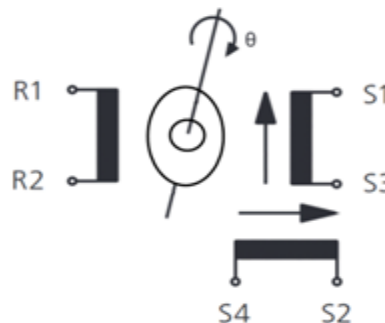
$i$  - nr zęba stojana,

$N_i$ ,  $N_{si}$ ,  $N_{ci}$  - liczba zwojów cewki wzbudzenia, sinus oraz cosinus na  $i$ -tym zębie stojana,

$N_{exc}$  - wartość referencyjna liczby zwojów cewki wzbudzenia,  
 $N_0$  - wartość referencyjna liczby zwojów cewki sinus i cosinus,  
 $p$  - liczba biegunów,  
 $Z$  - liczba zębów stojana,  
 $\alpha = 0$  dla  $Z_0 = m \cdot 4$  oraz  $m=1, 2, 3, \dots$   
 $\alpha = \pi/4$ , pozostałe wartości  $Z_0$ ,  
 $Z_0 = Z/n_0$ ,  
 $n_0 = \text{NWD}(Z, p)$ .

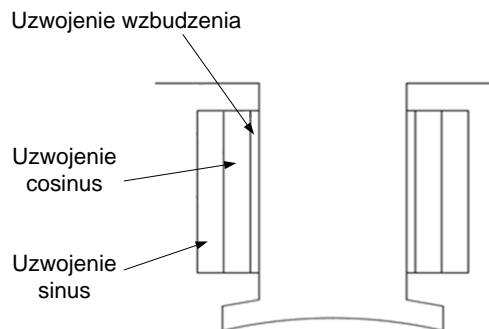


Rys. 2. Budowa typowego resolwera VR

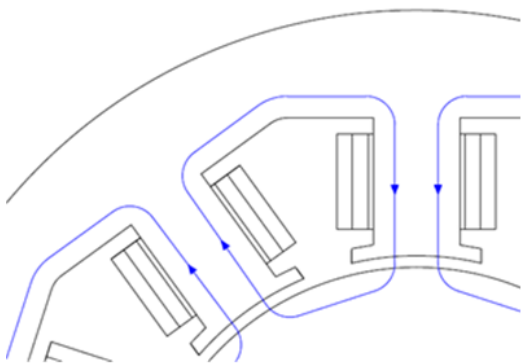


Rys. 3. Schemat zastępczy resolwera reluktancyjnego

Warto zauważyć, że cewki uzwojenia wzbudzenia nawijane są w taki sposób, aby strumień magnetyczny wzbudzenia zamykał się przez sąsiednie zęby stojana, a liczba ich zwojów jest stała.

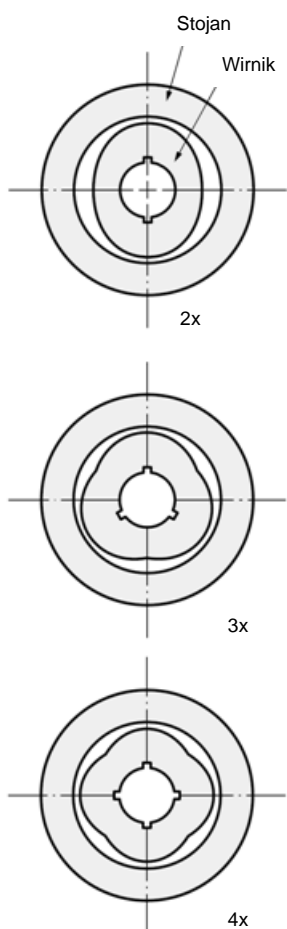


Rys. 4. Przykład konfiguracji uzwojeń resolwera reluktancyjnego



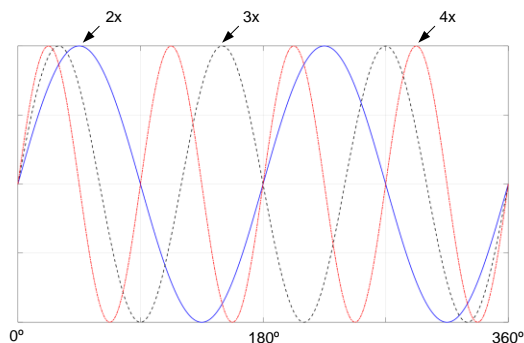
Rys. 5. Przepływ strumienia magnetycznego wzbudzenia

Budowa wirnika zapewnia zmienną wartość permeancji obwodu magnetycznego uzwojeń sinus i cosinus. Wpływa to na amplitudę napięć chwilowych  $u_{\sin}$  oraz  $u_{\cos}$ , które zmieniają się zgodnie ze wzorami (1) i zależą od aktualnej pozycji wirnika. W zależności od liczby biegunów resolwera reluktancyjnego, jego wirnik przybiera inny kształt, co zostało przedstawione na Rys. 6.



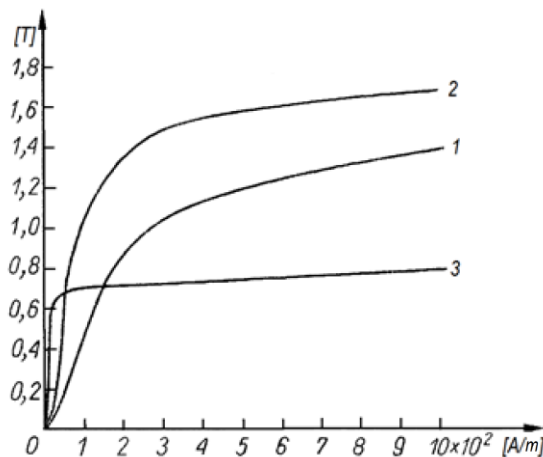
Rys. 6. Przykład wykonania resolwera typu VR w wersji dwu- (2X), trój- (3X) oraz czterobiegunowej (4X)

Liczba biegunów resolwera ma wpływ na liczbę pełnych okresów obwiedni sygnałów  $u_{\sin}$  oraz  $u_{\cos}$  przypadających na pełny obrót wirnika. Warto zauważyć, że ze względu na niewy wagę rzadziej stosuje się resolwery reluktancyjne jednobiegunowe (1x).



Rys. 7. Liczba obwiedni sygnału resolwera w zależności od liczby biegunów resolwera

Ze względu na bardzo małe wartości przepływu, występującego w obwodzie elektromagnetycznym resolwera do wykonania rdzenia magnetycznego preferowane są blachy magnetycznie miękkie ze stopów żelazowo-niklowych (permalojowe i supermalojowe). Ich cechą charakterystyczną jest to, że osiągają bardzo dużą wartość przenikalności magnetycznej przy małych przepływach.



Rys. 8. Przykładowe charakterystyki magnesowania: 1–stali krzemowej izotropowej walcowanej na gorąco, 2–stali krzemowej anizotropowej walcowanej na zimno oraz 3–stopu niklo-żelazowego

### 3. Podsumowanie

Resolwer reluktancyjny jest przetwornikiem położenia kąтового działającym na zasadzie transformatora położenia kąтового. Przetworniki tego typu cechują się dużą odpornością na

wysokie temperatury, wstrząsy, wilgotność i zapylenie. Artykuł stanowi zbiór podstawowych informacji o konstrukcji i zasadzie działania resolvera reluktancyjnego (ang. Variable-Reluctance resolver).

#### 4. Literatura

- [1]. Nay Lin Htun Aung, "Analysis and synthesis of precision resolver system", National University of Singapore 2015, praca doktorska.
- [2]. D.C. Hanselman, R.E. Thibodeau, D.J. Smith, "Variable-Reluctance Resolver Design Guidelines", 15th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society 1989.
- [3]. D.C. Hanselman, "Resolver signal requirements for high accuracy resolver to digital conversion", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 37, Issue: 6, Dec 1990.
- [4]. L. Sun, Y. Lu, "Rotor-position Sensing System based on one type of Variable - Reluctance Resolver", IECON 2006 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics 2006.
- [5]. S. Cui, H. Ge, "Stator Structure Design and Analysis of Variable Reluctance Resolver for Hybrid-Vehicle Motor Drive", IEEE 7th International

Power Electronics and Motion Control Conference – ECCE Asia 2012.

- [6]. A. Ishizaki, K. Takasaki, S. Shimomura, K. Masaki, K. Kitazawa, "Theory and Characteristics of Novel Variable Reluctance 1X Resolver", Electrical Engineering in Japan, Vol. 116, No.5, 1996.
- [7]. K. Zhou, X. Wang, T. Tan, Y. Zhou, "Design and analysis of variable reluctance resolver for hybrid-electric vehicle", Int. J. Electric and Hybrid Vehicles, Vol.4, No. 2, 2012.
- [8]. N. Neidig, A. Wanke, Q. Werner, M. Doppelbauer, "Influence of a Variable Reluctance Resolver on an E-Motor-System", 18th European Conference on Power Electronics and Applications 2016.
- [9]. Geoffrey S. Boyes, "Synchro and resolver conversion", Analog Devices 1980, ISBN 0-916550-06-0.
- [10]. "Synchro and Resolver Engineering Handbook", MOOG Components Group 2004.

#### Autorzy

mgr inż. Maciej Bałkowiec  
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn elektrycznych KOMEL  
40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188