

3. SENZORI POZICIJE

3.2. Magnetno-statički senzori

- **Magnetno-statički senzori** mere jačinu jednosmernog magnetnog polja (DC magnetno polje).
- U odnosu na magnetno-induktivne senzore, pogodniji su za minijaturizaciju i jeftiniji su za primenu u mikrosistemskim tehnikama proizvodnje.
- Osnovni principi rada su:
 - *galvansko-magnetni efekat* (Holov i Gausov efekt),
 - *anizotropno-magnetno otporni efekat* (AMR) u tehnici tankog filma.

Magnetno-statički senzori - galvansko-magnetni efekt

Fig. 11

a Circuit

b Curve of Hall voltage U_H

c Increase of wafer resistance R (Gaussian effect)

B Magnetic induction

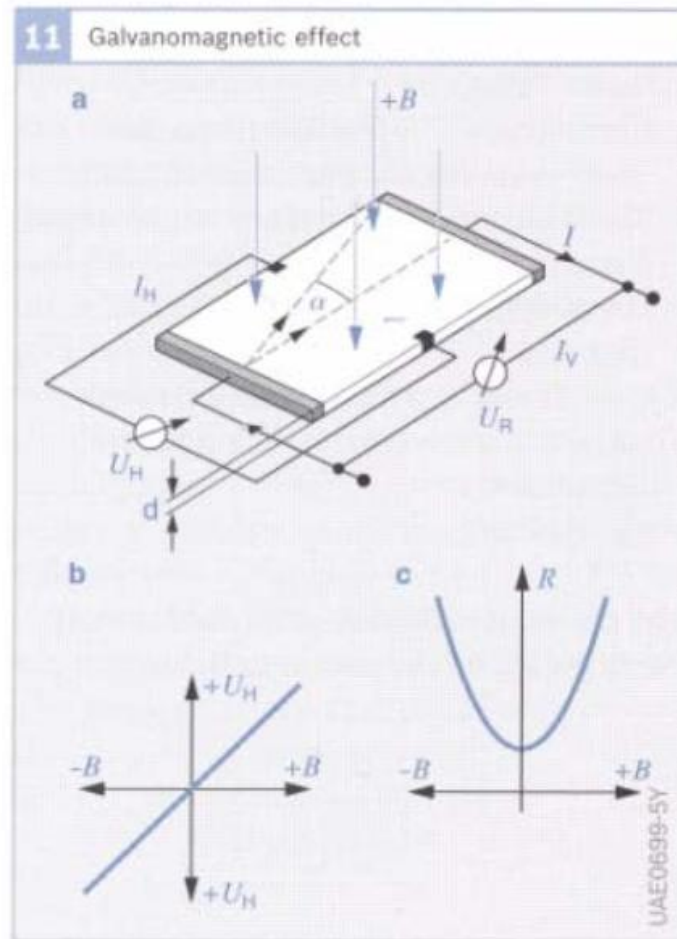
I Wafer current

I_H Hall current

I_V Supply current

U_H Longitudinal voltage

α Deviation of the electrons due to the magnetic field



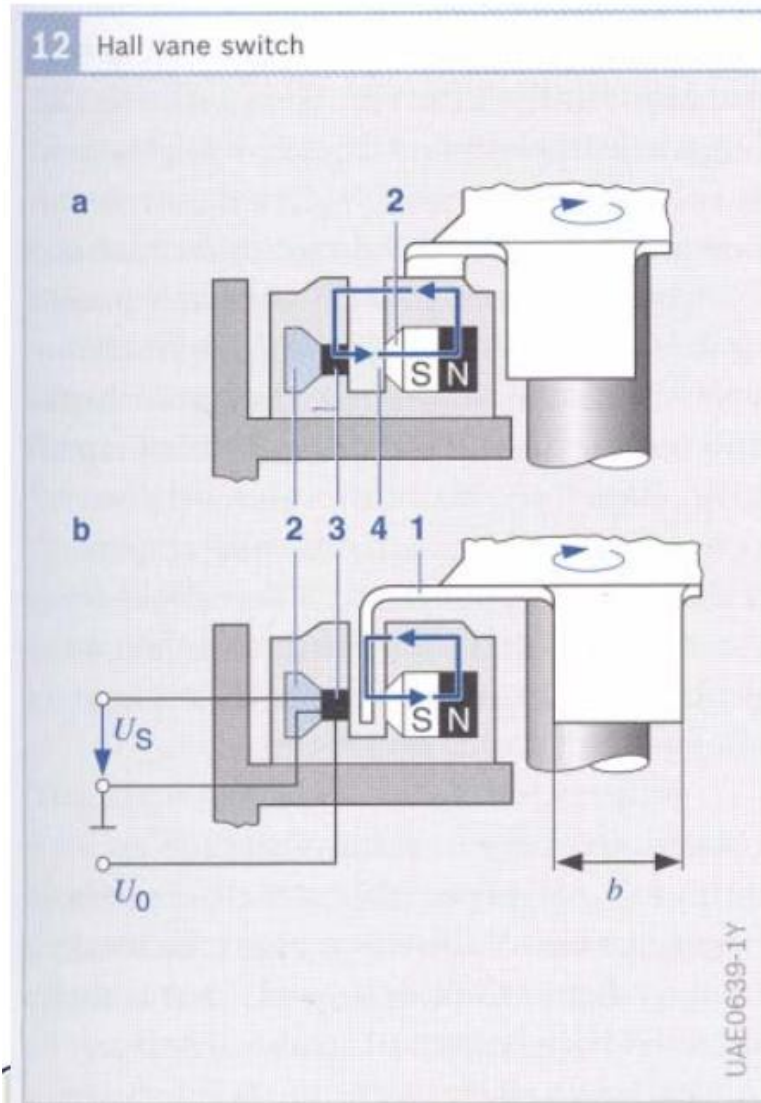
- Ako kroz poluprovodnički element debljine d protiče struja I , a na njega deluje magnetna indukcije B u normalnom pravcu, usled delovanja Lorencove sile dolazi do promene smera kretanja elektrona za ugao α .
- Kao posledica neravnomerne raspodele naelektrisanja po poluprovodničkom elementu na poprečnim krajevima pločice dolazi do generisanja napona U_H , proporcionalnog magnetnoj indukciji B i jačini struje I , odnosno:

$$U_H = \frac{IBR_H}{d}$$

R_H – Holov koeficijent,
 d - debljina poluprovodničkog elementa.

Izvedbe Holovih senzora pozicije

Holov prekidač



- Holov napon se vodi u elektronsko integralno kolo senzora (Schmitt-ov trigger), pa je izlazni signal digitalnog oblika.
- Ako je magnetna indukcija B senzora ispod donje granične vrednosti, izlazna vrednost iz trigeru je logička vrednost 0 (odgovara isključenom stanju), a ako je iznad gornje granične vrednosti tada odgovara logičkoj vrednosti 1 (radno stanje).
- Potrebna promena indukcije ΔB za okidanje Holovog prekidača je obično oko 50 mT

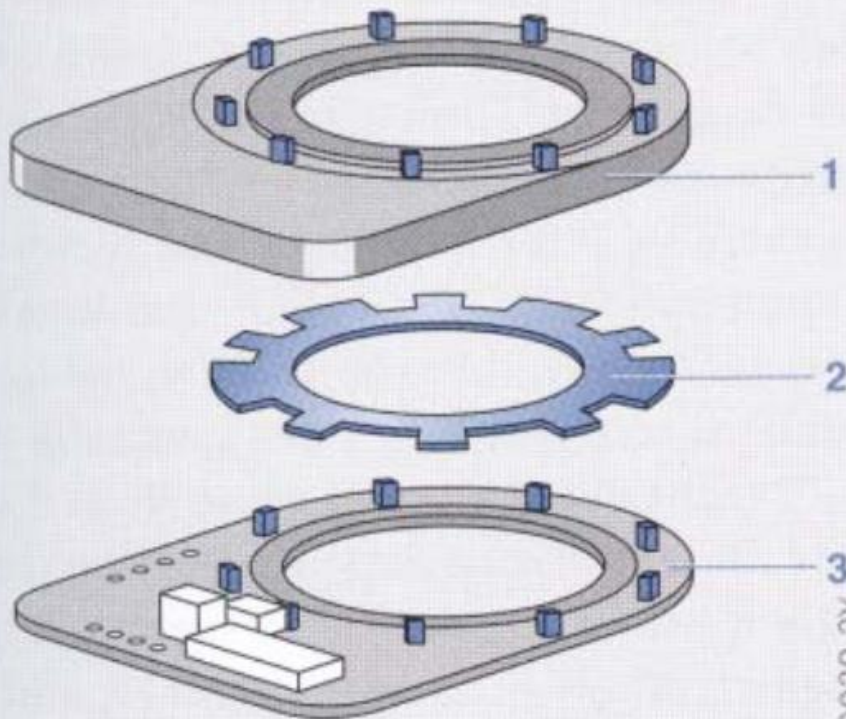
Fig. 12

- a Magnetic flux: unhindered
- b Magnetic flux: short-circuited
- 1 Vane width b
- 2 Soft-magnetic conductive element
- 3 Hall IC
- 4 Air gap
- U_0 Supply voltage
- U_S Sensor voltage

- Nedostatak je nepreciznost merenja analognih promenljivih.

22

Digital Hall angular-position sensor with
n Hall switches



UFL0029-2Y

Fig. 22

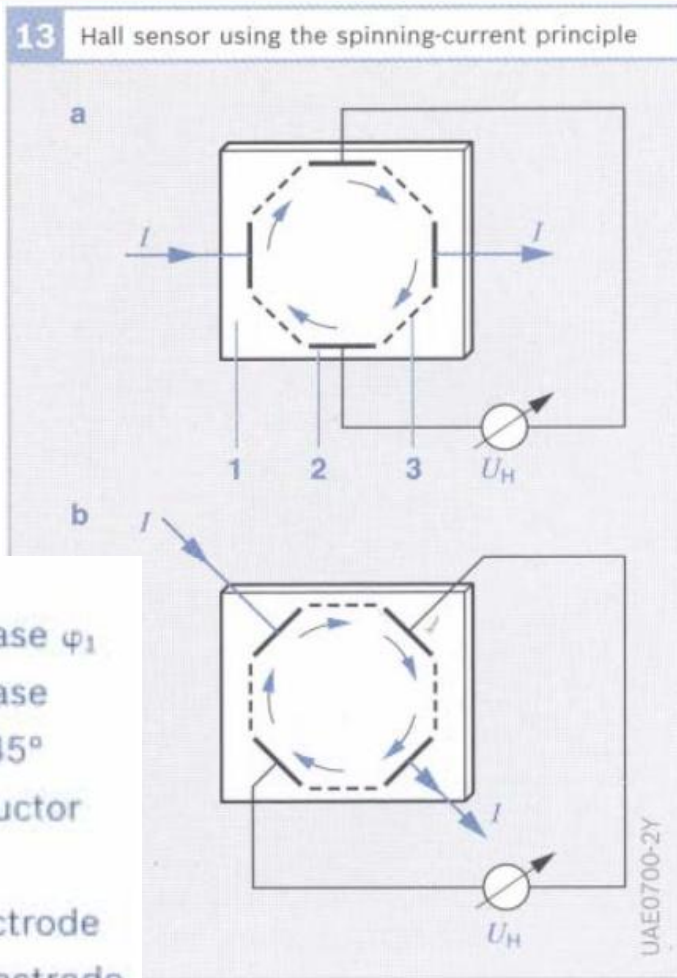
Angular position
measurement up to
360° with a circular,
equidistant arrange-
ment of simple Hall
switches

- 1 Housing with
permanent magnets
- 2 Code disk
- 3 Printed-circuit
board with Hall
switches

Digitalni senzor ugla upravljača

Izvedbe Holovih senzora pozicije

Holov senzor na principu obrtnih struja



- Osnovni nedostatak jednostavnijih silicijumskih Holovih senzora je njihova istovremena osetljivost na mehaničko naprezanje (piezo-električni efekat), što je nemoguće izbeći tokom eksploatacionog veka senzora, kao i negativan uticaj temperature na tačnost merenja.
- Navedeni nedostatak može se otkloniti primenom principa **obrnih (rotirajućih) struja**.
- Ovakav Holov senzor je pogodan za merenje malih pomaka pri kojima se registruju promene magnetnog polja permanentnog magneta.

Izvedbe Holovih senzora pozicije

Diferencijalni Holov senzor

14 Differential Hall sensor

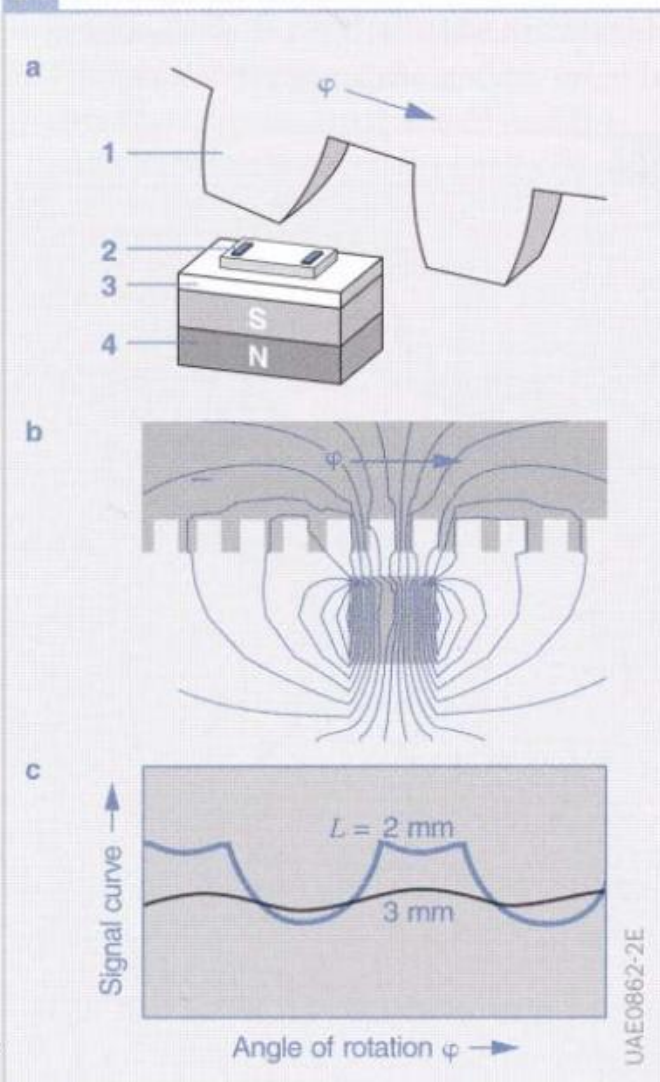


Fig. 14

- a Design
- b Field-strength distribution (1.5 times increment spacing)
- c Signal curve for air-gap widths L
- 1 Ring gear
- 2 Differential Hall IC
- 3 Homogenizing wafer (soft iron)
- 4 Permanent magnet

- Dva Holova sistema su postavljena na tačno definisanom rastojanju.
- Odgovarajuće elektronsko kolo obrađuje razliku dva Holova napona.
- Izlazni signal uglavnom nezavisan od apsolutne vrednosti jačine magnetnog polja, odnosno meri samo promenu magnetne indukcije u prostoru (gradijent polja), zbog čega su i dobili naziv - Gradijentni senzori.

Izvedbe Holovih senzora pozicije

Holov senzor ugla rotacije do 180°

15 Analog Hall angular-position sensor (movable magnet)

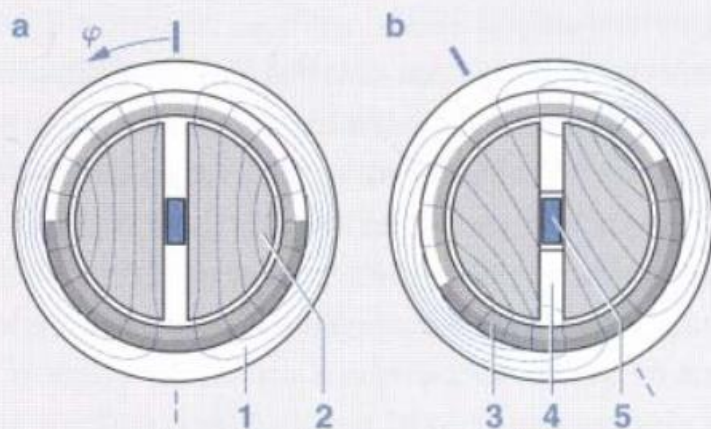
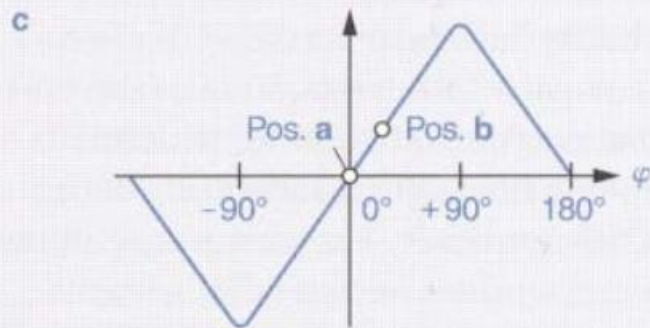


Fig. 15

Linear characteristic curve for angles up to 180°

- a Position a
- b Position b
- c Output signal
- 1 Magnetic yoke
- 2 Stator (1, 2 soft iron)
- 3 Rotor (permanent magnet)
- 4 Air gap
- 5 Hall sensor
- φ Angle of rotation



- Ovaj tip senzora koristi rotacioni magnetni prsten (**pokretni magnet**) sa određenim brojem fiksnih feromagnetnih provodnih elemenata.
- Izlazni signal je linearan u širem mernom području.
- Efektivna vrednost magnetnog polja preko Holovog senzora direktno zavisi od ugla rotacije φ .

Holov senzor ugla rotacije tipa ARS1

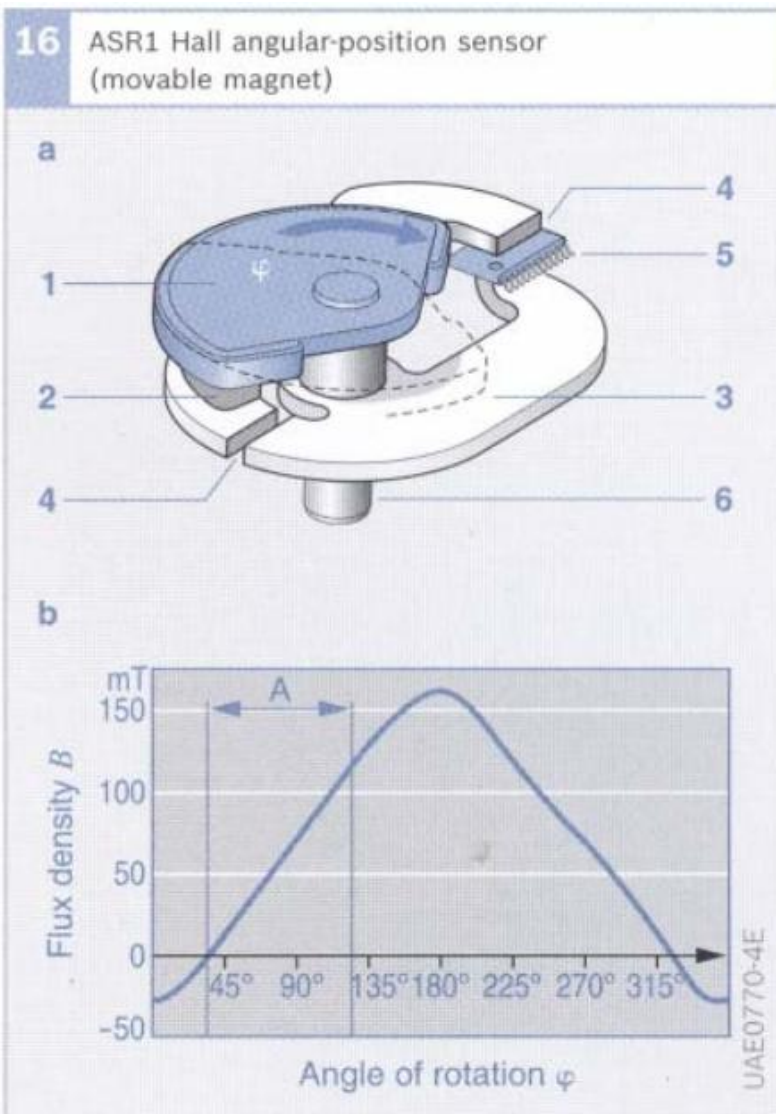


Fig. 16

Linear characteristic curve for angles up to approximately 90°

a Design

b Characteristic curve with working range A

1 Rotor disk (permanent-magnetic)

2 Pole shoe

3 Conductive element

4 Air gap

5 Hall sensor

6 Shaft (soft magnetic)

- Senzor ugla rotacije (ARS1) s mernim područjem oko 90° izveden je na principu Holovog senzora sa pokretnim magnetom.
- Magnetni fluks iz praktično polukružnog diska permanentnog magneta zatvara se preko polnog nastavka, dva dodatna provodna elementa od kojih svaki sadrži Holov senzor.
- Primenom ovog principa dobija se praktično linearna izlazna karakteristika.

Holov senzor ugla rotacije tipa ARS2

17 ASR2 Hall angular-position sensor
(movable magnet)

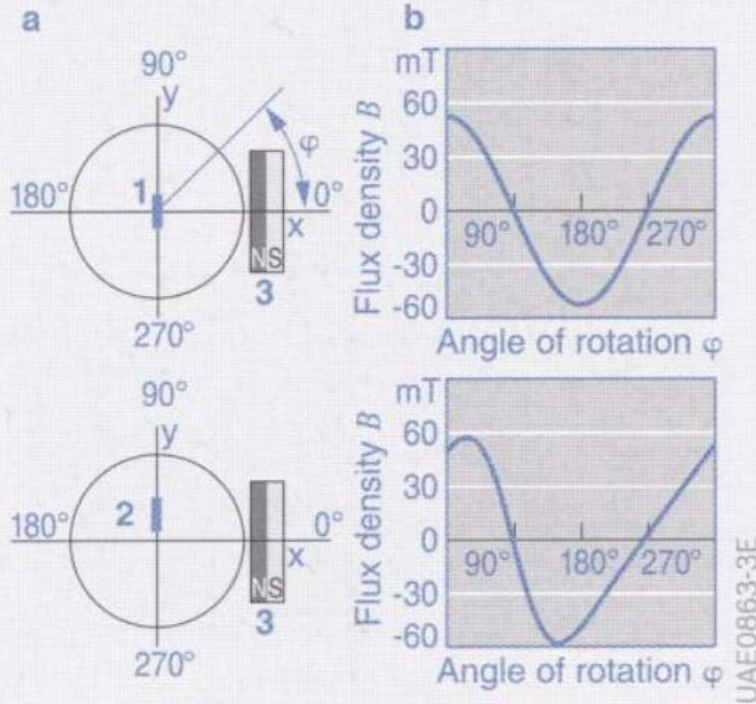


Fig. 17

Linear characteristic curve for angles over 180°

- a Principle of operation
- b Characteristic curve
- 1 Hall IC positioned in the mid-point of the circular path
- 2 Hall IC located outside the mid-point (linearization)
- 3 Magnet

- Senzor tip ARS2 je pojednostavljena verzija bez provodnih elemenata, u kojoj se permanentni magnet pomera po luku kruga u odnosu na Holov senzor.
- ukoliko se Holov senzor pomeri iz centra kruga, dobija se promena u izlaznom sinusnom signalu koja rezultuje povećanjem područja linearnosti karakteristike signala:
 - kraće područje $\approx 90^\circ$
 - šire područje $\geq 180^\circ$

Osnovni nedostaci ovog rešenja su:

- osetljivost na elektromagnetne smetnje od spoljnih polja,
- izražena zavisnost od tolerancija geometrije magnetnog kola,
- značajan uticaj temperature i eksploatacionog veka na magnetni fluks permanentnog magneta.

Izvedbe Holovih senzora pozicije

Holov senzor ugla rotacije do 360°

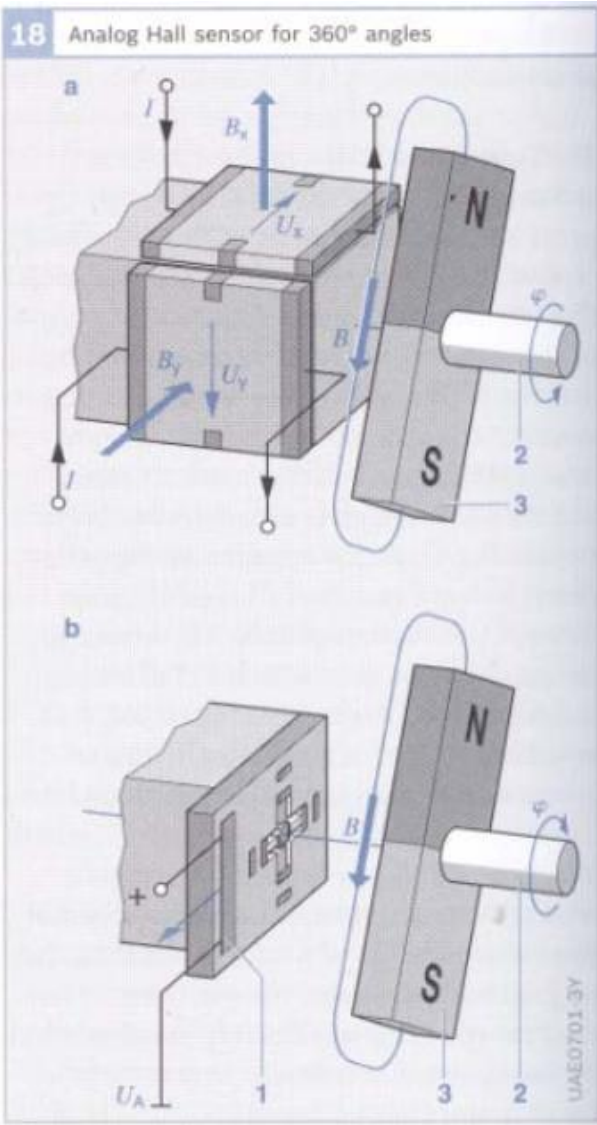


Fig. 18

- a Constructed from discrete Hall ICs
- b Constructed from planar integrated Hall ICs
- 1 Signal electronics
- 2 Camshaft
- 3 Control magnet
- B Induction
- I Current
- U Voltage
- U_A Output voltage
- φ Angle of rotation

- Permanetni magnet rotira ispred dva Holova senzora postavljena pod uglom od 90° i paralelno u odnosu na osu rotacije permanentnog magneta.
- Merenje je ograničeno samo za montažu senzora na kraju rotacione osovine.
- Permanentni magnet mora biti dovoljne veličine da se izbegne uticaj tolerancija vezanih za njegovu ugradnju.

$$U_{H1}=U_x= B \cdot \sin\varphi$$

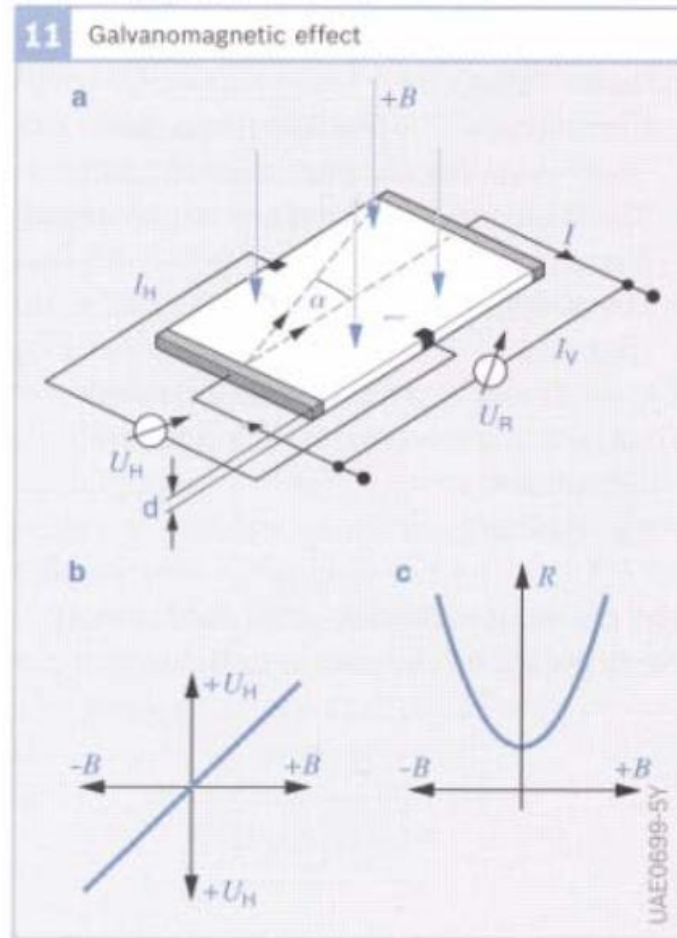
$$U_{H2}=U_y= B \cdot \cos\varphi$$

$$\varphi = \arctg (U_x/U_y)$$

Magnetno-otporni senzori

Fig. 11

- a Circuit
- b Curve of Hall voltage U_H
- c Increase of wafer resistance R (Gaussian effect)
- B Magnetic induction
- I Wafer current
- I_H Hall current
- I_V Supply current
- U_R Longitudinal voltage
- α Deviation of the electrons due to the magnetic field



Osnovi teorije magnetno-otpornih senzora

- Pored Holovog napona koji nastaje u transversalnom smeru poluprovodničkog elementa dolazi i do efekta promene otpora u longitudinalnom smeru, poznatog pod nazivom **Gausov efekat**.
- Senzore koje koriste ovaj efekat nazivaju se magnetno-otpornim senzorima.
- Zavisnost otpora od magnetne indukcije B do približno 0,3 T je kvadratna, dok je iznad te tačke promena otpora linearna sa povećanjem magnetne indukcije.

Magnetno-otporni senzori

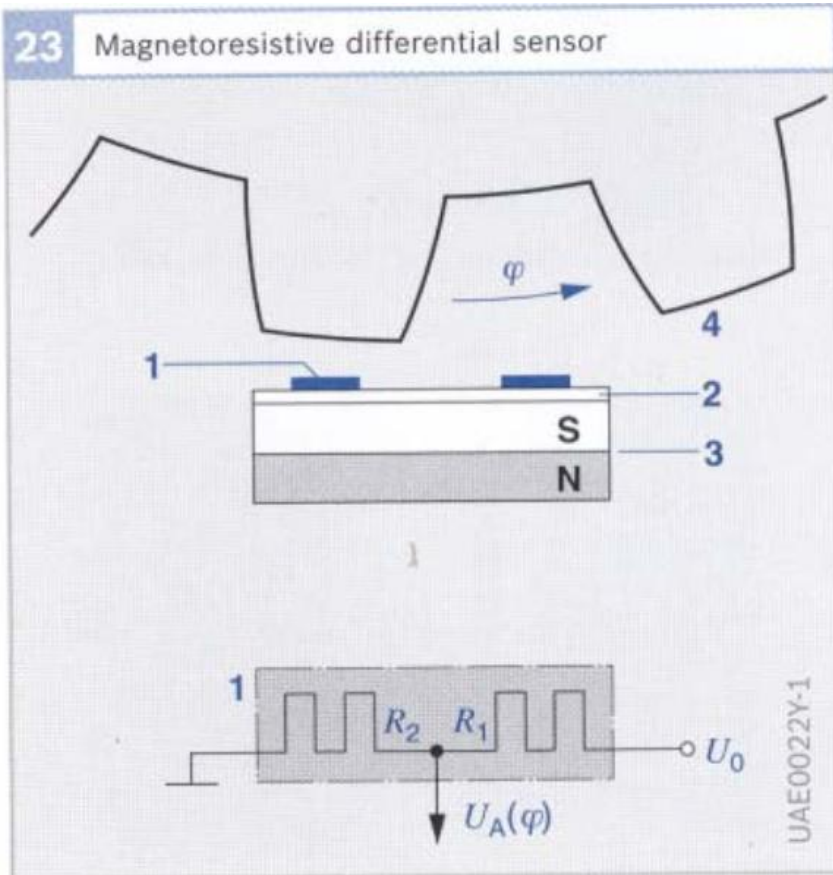


Fig. 23

Magnetic activation of a magnetoresistive differential sensor for gear wheel scanning (incremental angular position measurement, speed of rotation sensing)

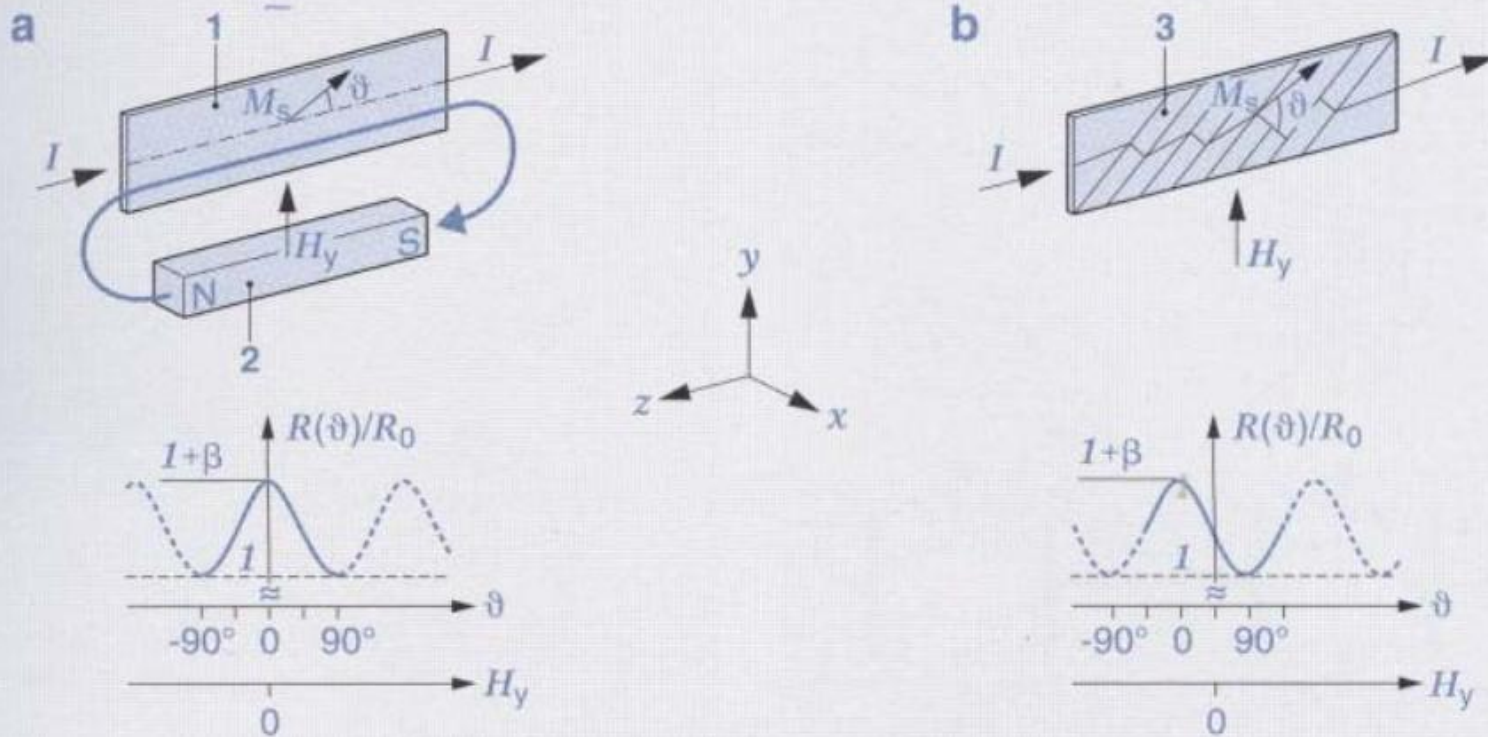
- 1 Magnetoresistors R_1, R_2
- 2 Soft-magnetic substrate
- 3 Permanent magnet
- 4 Gear wheel
- U_0 Supply voltage
- U_A Output voltage at angle of rotation φ

- S obzirom da temperatura bitno utiče na otpornost magnetno-otpornih senzora (promena temperature od 100 K dovodi do smanjenja otpornosti za oko 50 %), zbog čega se ovi senzori obavezno izvode u dualnoj konfiguraciji razdelnika napona, odnosno kao diferencijalno magnetno-otporni senzori.

- **Osnovna prednost** magnetno-otpornih senzora je visok nivo signala od (nekoliko V), što znači da nije potrebno lokalno pojačanje.
- Kako su otpornici pasivne komponente, zanemarljiv je uticaj elektromagnetnih smetnji usled čega su ovi senzori praktično imuni na spoljna magnetna polja.

Anizotropno-magnetno otporni efekat (AMR) u tehnici tankog filma

25 AMR basic principle, barber pole structure

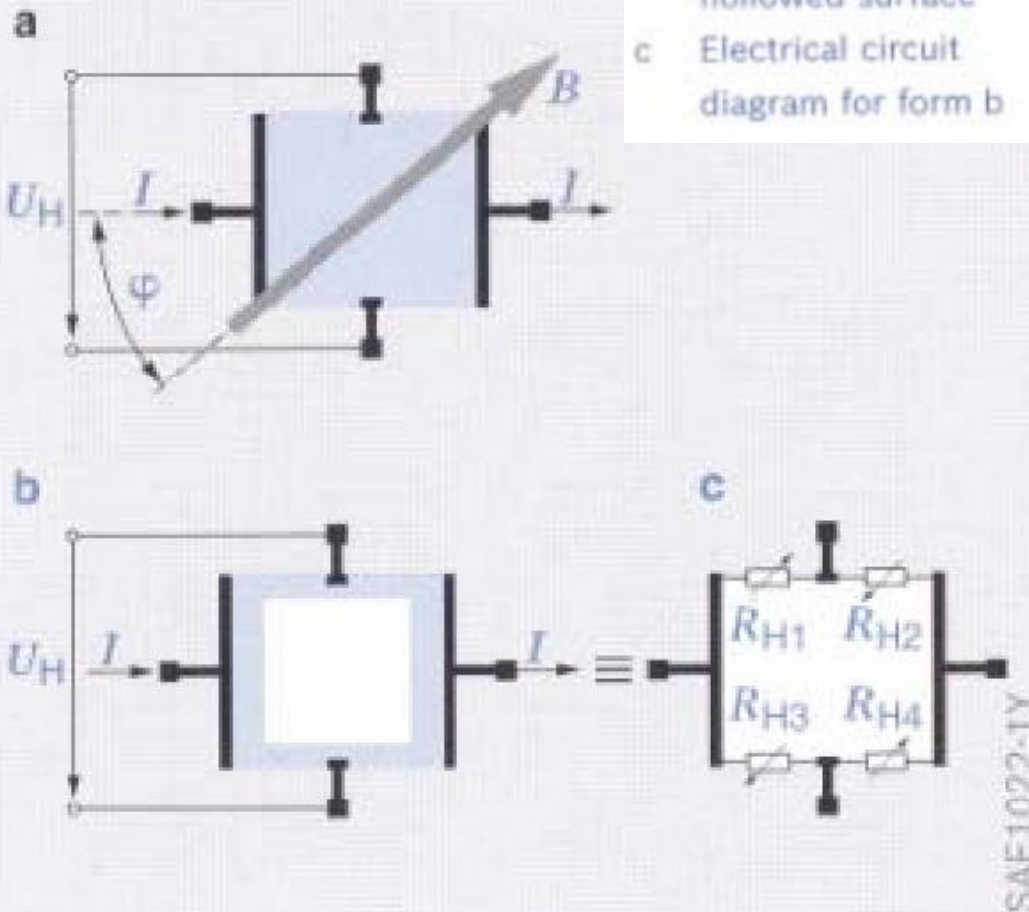


- Sloj *NiFe* debljine od 30-50 nm odlikuje se elektromagnetno anizotropnim karakteristikama, odnosno, električni otpor mu se menja pod uticajem elektromagnetnog polja (*Anisotropic Magneto Resistive* - AMR).
- Ta legura metala u stručnoj literaturi je poznata pod nazivom **permaloj** (*permalloy*).

26 Pseudo Hall sensor

Fig. 26

- a Full area basic form
- b Modified form with hollowed surface
- c Electrical circuit diagram for form b



- U slučaju dvopolnog AMR elementa, npr. na *NiFe* strukturi tankog filma, dobija se tkzv. „pseudo-Holov“ senzor.
- Kontrolno magnetno polje B u većini slučajeva se generiše sa magnetnom koji vrši ili translatorsni ili rotacioni pomeraj u odnosu na senzor.
- Za razliku od normalnog Holovog senzora, „pseudo-Holov“ senzor je osetljiv samo na magnetno polje u ravni, odnosno nije osetljiv na vertikalno polje.
- Zatim, nema proporcionalnu statičku karakteristiku već sinusnu koja nije osetljiva na jačinu kontrolnog polja.

Senzor ugaone pozicije za uglove $< 30^\circ$

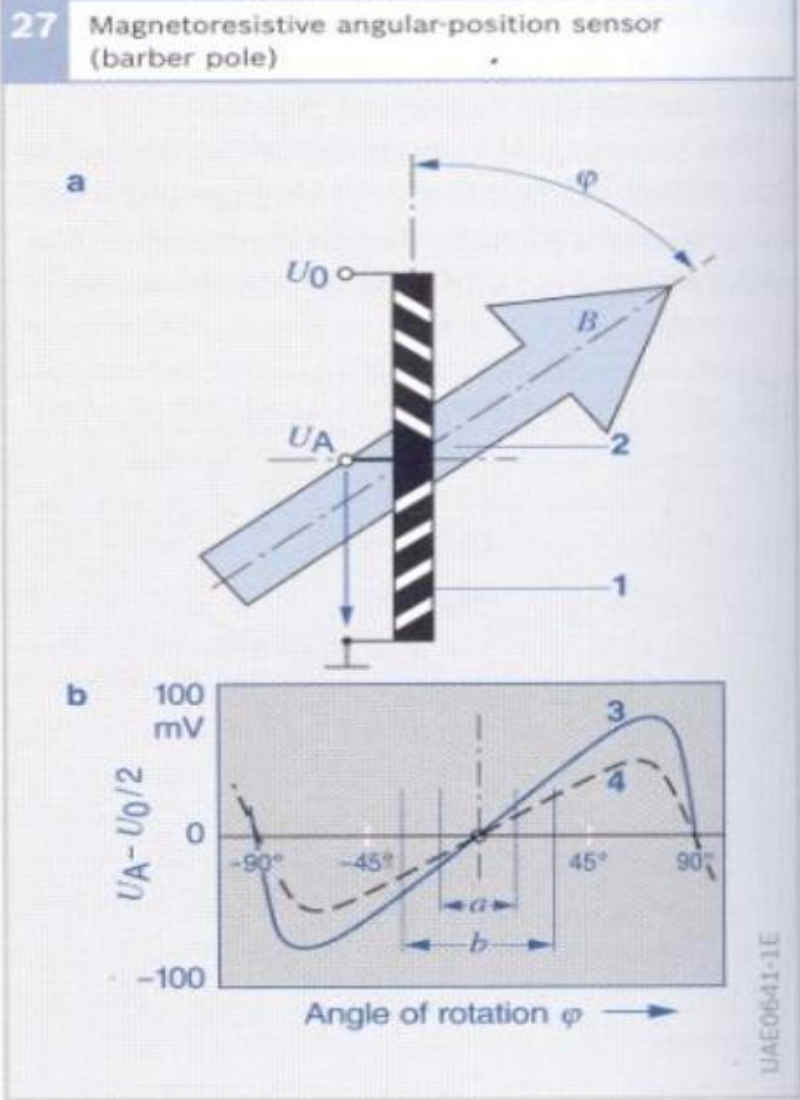


Fig. 27

Measuring range
up to $\pm 15^\circ$

a Measuring principle
b Characteristic curve

1 Permalloy resistors
2 Rotatable permanent magnet with control induction B

3 Lower operating temperature

4 Higher operating temperature

a Linear measuring range

b Effective measuring range

U_A Output voltage

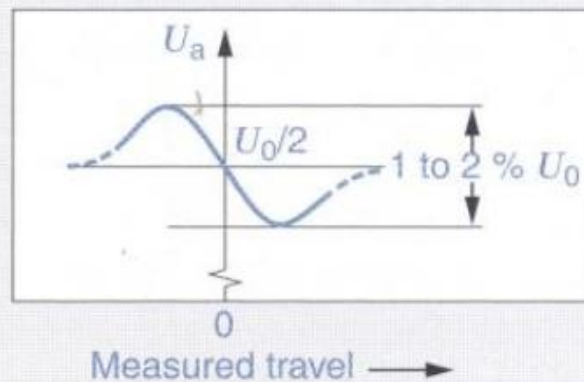
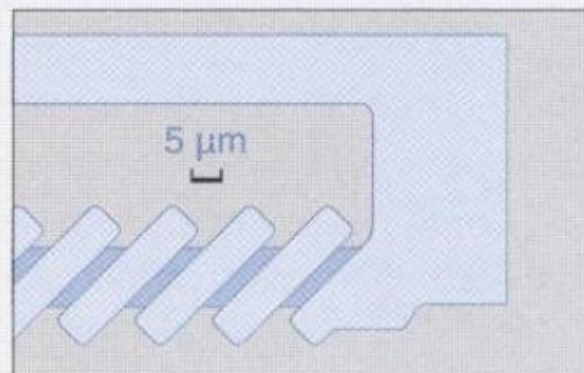
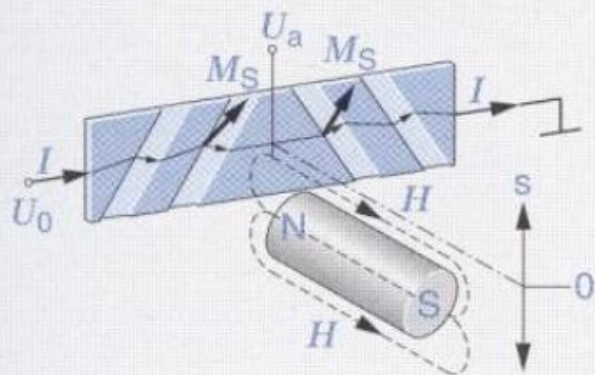
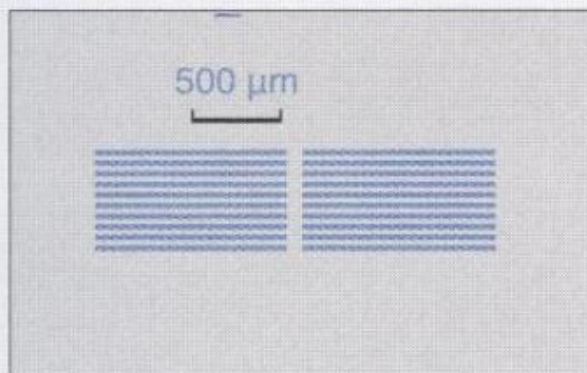
U_0 Supply voltage (5V)

φ Angle of rotation

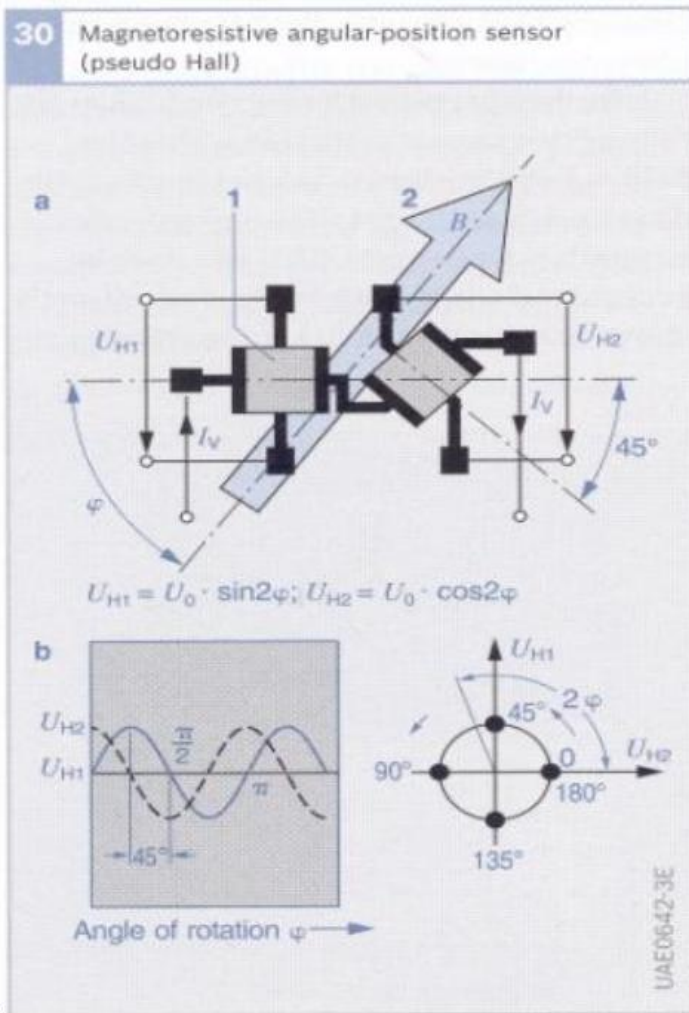
- „Barber pole“ senzor ugaone pozicije karakteriše ograničena tačnost i ograničeno područje primene (max. $\pm 15^\circ$).
- Princip rada se zasniva na nesimetričnom magnetno-otpornom naponskom delitelju koji sadrži „permaloy“ otpornike sa zlatnom trakom visoke provodnosti.
- Izlazna karakteristika senzora bitno zavisi od temperature (slika b).

„Barber pole“ senzor linearnih pomaka

28 Displacement measurement with single differential barber pole



Senzor ugaone pozicije za uglove $< 180^\circ$



- Magnetno-otporni senzor ugaone pozicije tipa „pseudo-Hol“ karakteriše pravi sinusni signal na izlaznim stezaljkama četveropolne strukture senzora.
- dve pune periode električnog signala odgovaraju mehaničkoj rotaciji magneta za 360° .
- Pomoću drugog elementa, koji je zakrenut za 45° , generiše se i kosinusni signal.

Senzor ugaone pozicije za uglove do 360°

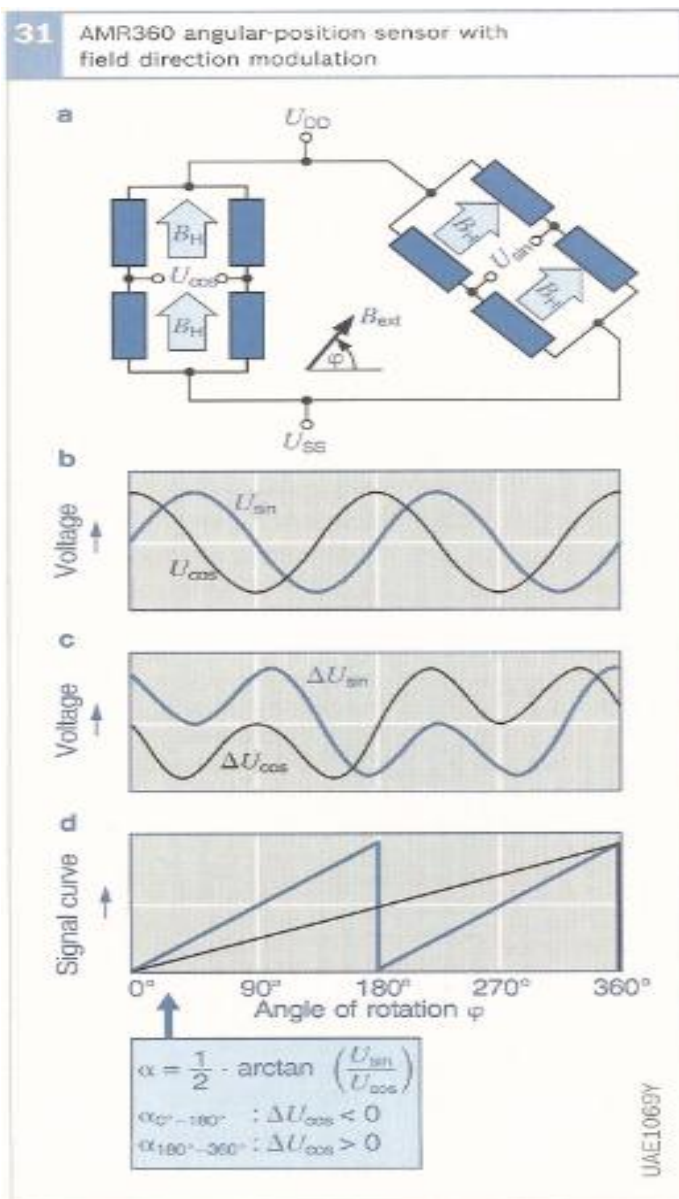


Fig. 31

- a Bridge circuit
- b Output signals from the Wheatstone bridges
- c Influence of the auxiliary field on the signals
- d Output signal from the evaluation circuit
- B_H Control Induction
- U_{DD}, U_{SS} Supply voltages
- U_{sin}, U_{cos} Measurement voltages
- φ Angle of rotation

Senzor ugaone pozicije za uglove veće od 360°

33 Arrangement for angular measurement in excess of 360°

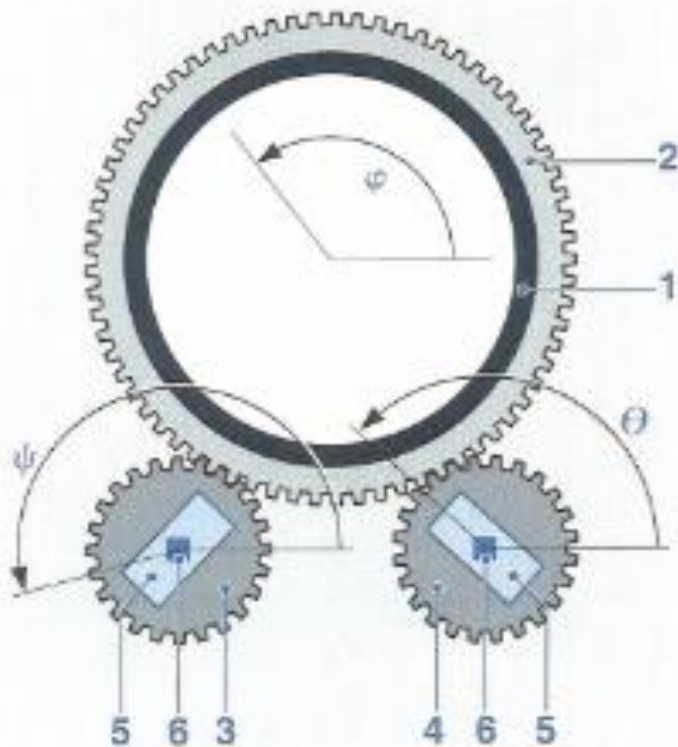


Fig. 33

- 1 Steering axle
- 2 Ring gear
- 3 Gear wheel with m teeth
- 4 Gear wheel with $m + 1$ teeth
- 5 Magnets
- 6 AMR sensor elements
- ψ Angle of rotation of the steering column
- Ψ, θ Angle of rotation of the small gear wheels

- Dvostruka konfiguracija „pseudo-Holvog” senzora ugla rotacije (za 180°) može se primeniti za određivanje položaja uga upravljača.
- Dva permanenta magneta rotiraju, svaki sa svojim zupčanikom.
- Zbog dva manja izlazna zupčanika, koji se razlikuju za po jedan zub, njihov međusobni ugao (razlika uglova rotacije) predstavlja tačnu mernu apsolutnu poziciju ugla upravljača.
- Sistem je projektovan tako da fazna razlika ne prelazi 360° za ukupno 4 obrtaja osovine upravljača.

Primer primene senzora ugaone pozicije za uglove veće od 360°

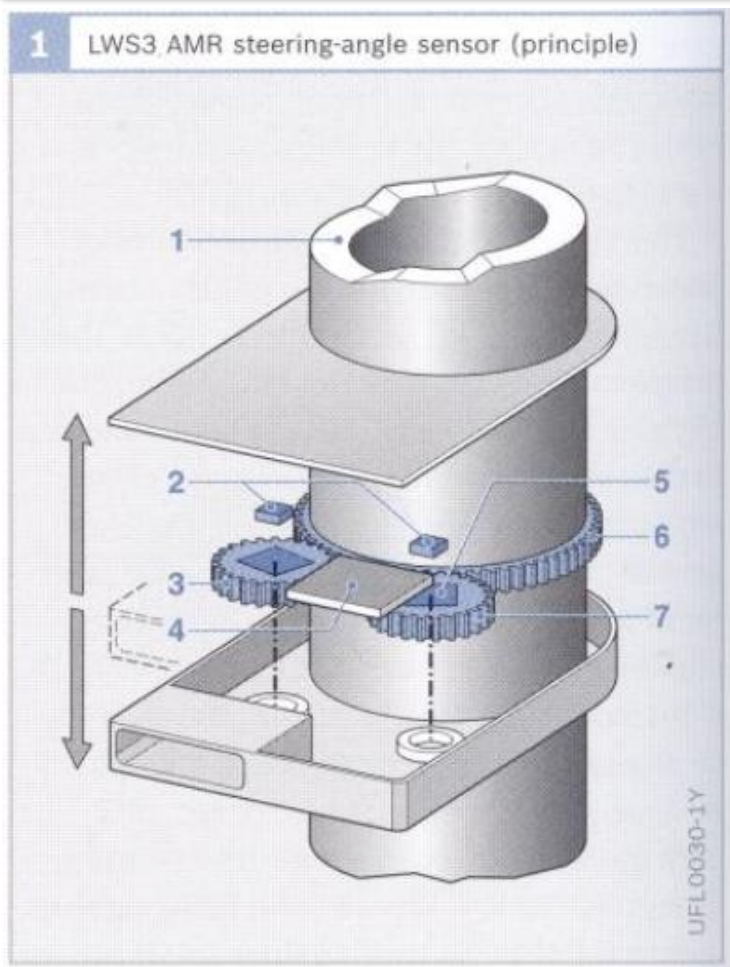


Fig. 1

- 1 Steering shaft
- 2 AMR sensor elements
- 3 Gear wheel with m teeth
- 4 Evaluation electronics
- 5 Magnets
- 6 Gear wheel with $n > m$ teeth
- 7 Gear wheel with $m + 1$ teeth

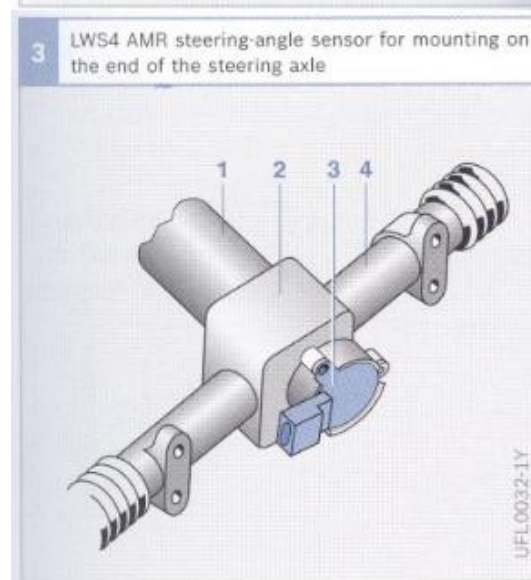


Fig. 3

- 1 Steering column
- 2 Steering gear
- 3 Steering-angle sensor
- 4 Steering rack

4 Measuring principle of FPM2.3

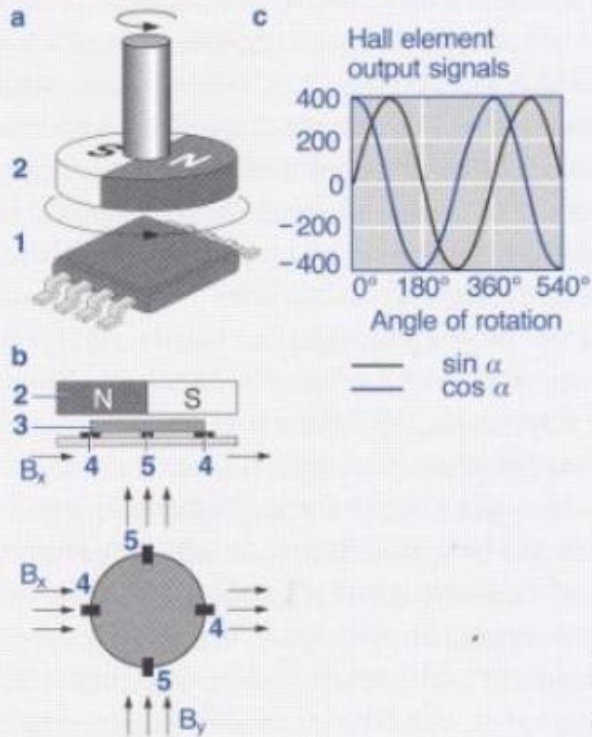


Fig. 4

- a Design
 - b Principle
 - c Measurement signals
- 1 Integrated circuit (IC) with Hall elements
 - 2 Magnet (opposing magnet not shown here)
 - 3 Conductive element
 - 4 Hall elements (for recording x-components of B)
 - 5 Hall elements (for recording y-components of B)
- B_x Homogenous magnetic field (x-components)
 B_y Homogenous magnetic field (y-components)

5 Exploded view of FPM2.3 accelerator-pedal module

Fig. 5

- 1 Pedal
- 2 Cover
- 3 Spacer sleeve
- 4 Sensor block with housing and plug
- 5 Bearing block
- 6 Shaft with two magnets and hysteresis elements (round magnets not visible)
- 7 Kickdown (optional)
- 8 Two springs
- 9 Stop damper
- 10 Thrust member
- 11 Floor cover

