

# NEKONVENCIONALNI MJERNI PRETVARAČI UNCONVENTIONAL MEASURING TRANSDUCERS

Krunoslav Bičanić, dipl. ing., ZG-Projekt d.o.o.,  
Đorđićeva 24, 10000 Zagreb, Hrvatska

Doc. dr. sc. Igor Kuzle, prof. dr. sc. Tomislav Tomiša, Sveučilište u Zagrebu,  
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

Krunoslav Bičanić, dipl.ing. ZG-Projekt d.o.o., Đorđićeva 24, 10000 Zagreb, Croatia,

Assistant Prof Igor Kuzle, PhD, Prof Tomislav Tomiša, PhD,

University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing,

Unska 3, 10000 Zagreb, Croatia

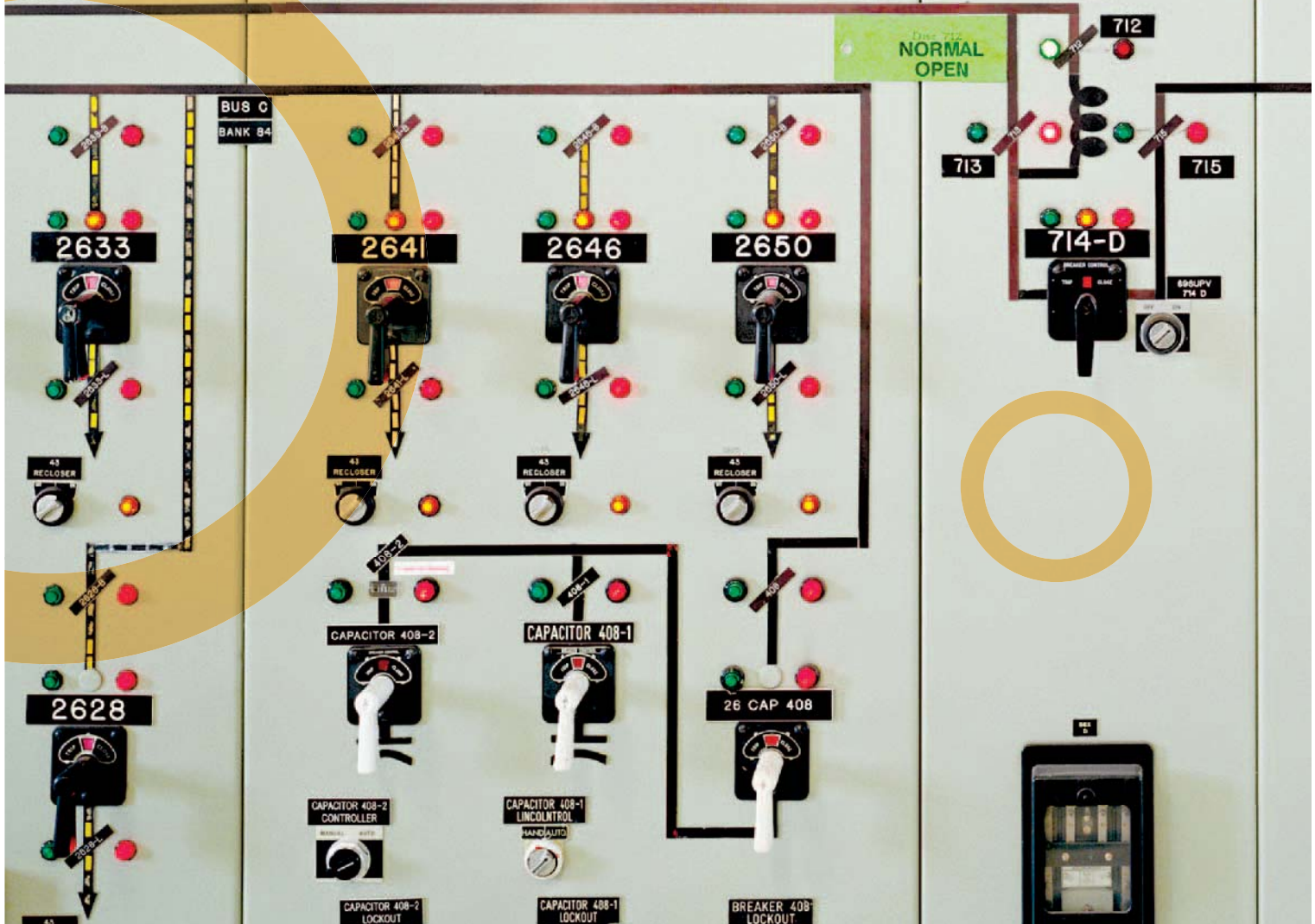
U elektroenergetskim postrojenjima većinu naponskih i strujnih mjernih pretvarača čine naponski, odnosno strujni mjerni transformatori s feromagnetskom (željeznom) jezgrom (konvencionalni mjerni pretvarači). Napredak tehnologije omogućio je razvoj i uporabu drukčijih vrsta mjernih pretvarača bez feromagnetske jezgre ili uz uporabu drugih feritnih materijala koji imaju velike prednosti (nekonvencionalni mjerni pretvarači). U radu je predstavljena teorija nekonvencionalnih načina pretvorbe mjernih signala napona, odnosno struje, te najvažnija obilježja nekonvencionalnih mjernih pretvarača. Nekonvencionalni mjerni pretvarači imaju brojne prednosti pred mjernim transformatorima s feromagnetskom jezgrom: jeftiniji su, smanjeni su troškovi i pojednostavljena je njihova ugradnja, postižu veliku točnost u mjerenjima, manjih su dimenzija i imaju manju masu.

In electric power transmission systems most voltage and current measuring transducers are conventional high-voltage and current measuring transformers with a ferromagnetic (iron) core (conventional measuring transducers). Progress in technology has made possible the development and usage of different kind of measuring transducers without ferromagnetic cores or with other ferrite materials that have many significant advances (unconventional measuring transducers). This essay shows the theory of unconventional methods of measuring voltage and current signals and the most important characteristics of unconventional measuring transducers.

Unconventional measuring transducers have numerous advantages over conventional measuring transformers with ferromagnetic cores: they are affordable, installation costs are reduced, installation is easier and faster, they achieve high accuracy, and have smaller volume and mass.

**Ključne riječi:** djelitelj napona, Halova sonda, kombinirani transformator, naponski optički mjerni pretvarač, nekonvencionalni mjerni pretvarač, Rogovski svitak, strujni optički mjerni pretvarač

**Key words:** combined transformer, current optical measuring transducer, Hall probe, Rogowski coil, unconventional measuring transducer, voltage divider, voltage optical measuring transducer



## 1 UVOD

U elektroenergetskim postrojenjima većinu naponskih i strujnih mjernih pretvarača za prilagođivanje mjerne veličine čine naponski, odnosno strujni mjerni transformatori s feromagnetskom (željeznom) jezgrom koji se u praksi nazivaju konvencionalnim mjernim pretvaračima. Konstrukcija i načini izrade konvencionalnih naponskih i strujnih mjernih transformatora dosegli su svoj maksimum i nisu se znatnije mijenjali u posljednjih nekoliko desetljeća. Pri tome sve više dolazi do izražaja nekompatibilnost između suvremenih elektroničkih mjernih instrumenata i uređaja relejne zaštite s postojećim rješenjima strujnih i naponskih mjernih transformatora. Zbog toga je potrebna ugradnja mjernih međutransformatora kojima se mjereni ulazni signali snižavaju na razinu prikladnu za rad elektroničkih sklopova, što za posljedicu ima povećane troškove mjernog sustava i smanjenje njegove točnosti.

Napredak tehnologije omogućio je razvoj i uporabu drukčijih vrsta mjernih pretvarača - bez feromagnetske jezgre - ili uporabu (umjesto standardne željezne jezgre) drugih feritnih materijala koji imaju bolji odziv na brze promjene mjernih signala. U praksi se takvi mjerni pretvarači nazivaju nekonvencionalnim mjernim pretvaračima.

Kao popratni dio sustava nekonvencionalnih mjernih pretvarača redovito se ugrađuju elektronički sklopovi koji su često integrirani u same mjerne pretvarače [1] (njihova velika prednost prema konvencionalnim rješenjima). Na taj se način ostvaruje potpuna kompatibilnost s digitalnim mjernim uređajima koji su sve zastupljeniji u sustavima mjerne i zaštitne tehnike jer omogućuju veliku fleksibilnost glede broja i vrsta funkcija koje se pomoću njih mogu ostvariti.

## 1 INTRODUCTION

In electric power transmission systems most voltage and current measuring transducers used for adjusting measured values are voltage and current measuring transformers with a ferromagnetic (iron) core. These iron core transformers are often called conventional measuring transducers. The construction and production of conventional voltage and current measuring transformers have reached their maximum and have not changed significantly over the past decades. Incompatibility between modern electronic measuring instruments and relay protection devices with existing solutions of current and voltage measuring transformers is becoming more evident. There is always a need for auxiliary measuring transformers, which lower input signals to the level required for electronic devices to work. This increases the measuring system's costs and lowers its accuracy.

Developments in science and technology have made possible the use of other kinds of measuring transducers without ferromagnetic cores or with other ferrite materials because they have a better response to rapid signal changes. Such transducers are usually called unconventional measuring transducers.

Electronic circuits are regularly integrated into the transducers themselves as an appendix to unconventional measurement systems. In that way full compatibility with digital measurement devices is ensured (that is the biggest advantage over conventional measuring systems). These devices are more frequent in measurement and protective systems because they enable greater flexibility concerning the number and kind of functions.

## 2 MJERNI PRETVARAČI

Kako bi spomenuti sustavi uopće ispravno radili, potrebno im je osigurati što je moguće čišću sliku mjerne veličine. Zbog uporabe elektroničkih sklopova koji rade na niskim naponima, najčešće do 12 V, potrebno je smanjiti mjernu veličinu na iznos prikladan za mjerenje. Tijekom pretvorbe mjerne veličine na pogrešku mjerenja najviše utječu sljedeći čimbenici:

- klimatski utjecaji (temperatura, vlaga itd.),
- elektromagnetski utjecaji okolnih elemenata u postrojenju,
- fizikalne osobine materijala upotrijebljenih u konstrukciji samog pretvarača.

Za mjerenje napona u praksi se sve češće rabe otpornički, kapacitivni i kompenzirani (*RC*) djelitelji [2], naponski optički mjerni pretvarači [3], [4], [5], [6], a za mjerenje struje shuntovi (tj. pad napona na otporniku) [7], strujni optički mjerni pretvarači [8], Hall sonde [9] i di/dt pretvarači (Rogowsky svici) [2]. Često se, zbog težnje prema jednostavnosti i kompaktnosti, izrađuju kombinirani mjerni pretvarači koji u sebi ujedinjuju elemente za mjerenje napona i struje. Nekonvencionalni mjerni pretvarači imaju brojne prednosti prema mjernim transformatorima s feromagnetskom jezgrom. Najvažnije prednosti (osim kod pretvarača koji u konstrukciji sadrže feritne materijale) su što nema:

- učinka histereze,
- zasićenja magnetskog polja pri velikim strujama,
- učinka ferorezonancije koja uzrokuje termičko preopterećenje - što najčešće ima za posljedicu uništenje naponskih mjernih transformatora.

Općenito, moderni pretvarači mogu se podijeliti na:

- hibridne - temeljene na poznatim i već rabljenim mjernim postupcima i metodama,
- optičke - temeljene na promjenama optičkih obilježja pojedinih kristala i drugih materijala u magnetskom i električnom polju. Kod tih pretvarača mjerenje struje temelji se na djelovanju magnetskog polja na kut polarizacije svjetlosti, a mjerenje napona temelji se na djelovanju električnog polja na promjenu polarizacije svjetlosti iz linearno polarizirane u eliptički polariziranu svjetlost.

## 2 MEASURING TRANSDUCERS

To make possible the proper usage of the systems mentioned above, it is necessary to ensure as clean an image as possible of the measurement values. Because of the use of low voltage electronic circuits, usually up to 12 V, it is necessary to reduce the unit of measurement to one that is appropriate. Factors affecting measured values during the transformation process are:

- climatic influence (temperature, moisture, etc.),
- electromagnetic influences of other elements present at the power plant,
- physical characteristics of materials used in the construction of the transducer.

For measuring voltages, in practice the following are more and more frequently used: resistive, capacitive and compensated (*RC*) voltage dividers [2], current shunts [7], voltage optical measuring transducers [3], [4], [5], [6], current optical measuring transducers [8], Hall probes [9] and di/dt transducers [2]. The necessity for simplicity has often led to making combined measuring transducers which unify the elements for measuring both - voltage and current. Unconventional measuring transducers have significant advantages over measuring transformers with a ferromagnetic core. The most significant advantages are: (expect to those made with ferrite material):

- no effect of hysteresis,
- no saturation of the magnetic core at high currents,
- no ferroresonance which causes thermal overload having as an effect the destruction of voltage measuring transformers.

In general, modern transducers can be divided into two groups:

- hybrid - based on already known and used measurement procedures and methods,
- optical - based on the impact which magnetic and electrical fields have on the optical features of certain crystals and similar materials. Current measurements are based on the impact of a magnetic field on the angle of light polarization in the case of transducers, while voltage measurement is based on the impact of the electric field on the change of polarization from linear polarized to elliptic polarized light.

### 3 NAPONSKI MJERNI PRETVARAČI

#### 3.1 Otpornički, kapacitivni i kompenzirani (RC) djelitelji napona

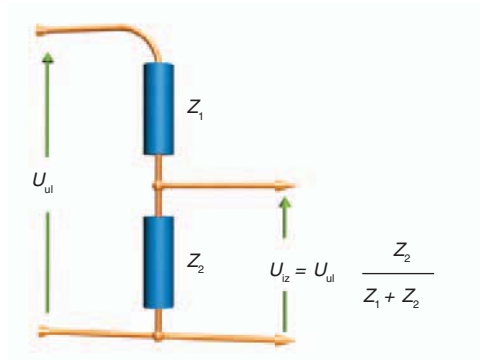
Pri mjerenjima niskih i srednjih napona u rasponu 24 V do 24 kV za prilagođivanje mjernog signala napona upotrebljavaju se mjerni pretvarači temeljeni na mjerenju pada napona na impedanciji, tzv. djelitelji napona (slika 1). Načelo rada djelitelja napona izvedeno je iz temeljnog Ohmova zakona [2], [7] i [10].

### 3 VOLTAGE MEASURING TRANSDUCERS

#### 3.1 Resistive, capacitive and compensated (RC) voltage dividers

When measuring low and middle voltages in the range from 24 V to 24 kV, transducers are used for adjusting the measuring voltage signal, based on measuring the fall in voltage on impedance. These transducers are called voltage dividers (Figure 1). The basic principle of a voltage divider is deduced from basic Ohm's law [2], [7] and [10].

Slika 1  
Djelitelj napona  
Figure 1  
Voltage divider



$$I = \frac{U_{ul}}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

$$U_{iz} = I \cdot Z_2 \quad (2)$$

$$U_{iz} = U_{ul} \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3)$$

Za mjerenja na niskom i dijelom na srednjem naponu, do 10 kV, sinusoidalnog valnog oblika relativno niske frekvencije, redovito se upotrebljavaju tzv. otpornički djelitelji napona. Oni se izrađuju od otporne žice malog temperaturnog koeficijenta, kako njihov otpor ne bi ovisio o temperaturi okoline i struji opterećenja. Kod predmetnih djelitelja imaginarna je sastavnica zanemariva i ne utječe na valni oblik i mjernu veličinu.

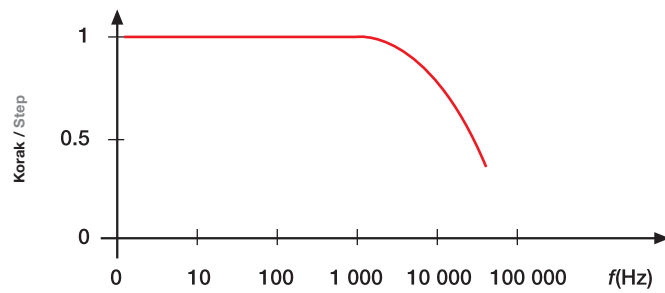
Za mjerenje napona iznad 110 kV upotrebljavaju se kapacitivni djelitelji napona (kapacitivni naponski transformatori), zbog većih izolacijskih naprezanja koje podnose kondenzatori i većih potrebnih razmaka između vodljivih površina.

Najistaknutija osobina otporničkih djelitelja napona je frekvencijsko područje koje se proteže od 0 do 3 kHz (slika 2).

For measuring sinusoidal wave form with relatively low frequency at low and partially at medium voltage, up to 10 kV, so called resistive voltage dividers are regularly used. They are made of resistive wire with a small temperature coefficient, so their resistance does not depend on the environmental temperature or the current load. The imaginary component of these dividers can be ignored and it does not affect the waveform and measured value.

For measuring voltage above 110 kV, capacitive voltage dividers are used (capacitive voltage transformers) because of the higher isolation exertions withstandable by condensers and the greater distance needed between conductive areas.

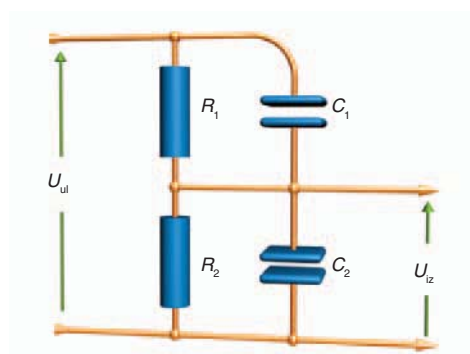
The most significant feature of resistive voltage dividers is their frequency range which spans from 0 to 3 kHz (Figure 2).



**Slika 2**  
Frekencijska karakteristika otporničkog djelitelja napona  
**Figure 2**  
Frequency characteristic of resistive voltage divider

Na slici 2 zorno se uočava da relativno niska granična frekvencija otporničkog djelitelja napona ograničava mjerenje napona visokih frekvencija i vjerno prikazivanje valnih oblika sa strmim bridovima na njihovu izlazu. Zbog toga se za mjerenje nesinusoidalnih, ali i sinusoidalnih valnih oblika većih frekvencija, iznad 3 kHz, u paralelu otporima dodaju kondenzatori za kompenzaciju [11]. Takvi se djelitelji nazivaju kompenzirani (*RC*) djelitelji napona (slika 3).

From Figure 2 it is clearly visible that the relatively low end frequency of a resistive voltage divider limits the measuring of voltage of high frequency and also limits the correct showing of waveforms with sharp edges on their exit. Because of this, in order to measure nonsinusoidal but also sinusoidal wave forms of high frequency, above 3 kHz, condensers are added in parallel to the resistors for compensation [11]. These dividers are called compensated (*RC*) voltage dividers (Figure 3).



**Slika 3**  
Kompenzirani (*RC*) djelitelj napona  
**Figure 3**  
Compensated (*RC*) voltage divider

Predmetni djelitelji imaju ograničenu gornju graničnu frekvenciju, određenu paralelnim spojem *R* i *C* komponentata. Djelitelj u tom slučaju mora zadovoljavati uvjet:

This divider has a limited upper borderline frequency which is determined by the parallel connection of *R* and *C* components. In this case the divider should satisfy this condition:

$$T_g = R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot C_2 \quad (4)$$

gdje je  $T_g = 1/f_g$  vremenska konstanta *RC* kombinacije djelitelja napona, a  $f_g$  gornja granična frekvencija.

where  $T_g = 1/f_g$  is the time constant of the *RC* combination of voltage divider, and  $f_g$  is the upper borderline frequency.

Ta vrsta mjernih pretvarača može bez oštećenja podnijeti velika naponska opterećenja. To u praksi znači da otpor takvih pretvarača mora biti

This type of measuring transducer can endure significant voltage loads without damage. In practice this means that the resistance of these transducers

jako velik. Posljedica toga je da struja u manjem iznosu teče kroz djelatnu komponentu ukupne impedancije, a uglavnom teče kroz parazitne kapacitete, nastale kao rezultat konstrukcije otpornika. Jalova komponenta struje uzrokuje znatan fazni pomak koji nastaje pri pretvorbi i koji se najčešće kompenzira kalibriranjem u elektroničkim sklopovima koji obrađuju te signale.

Točnost djelitelja napona ovisi o:

- temperaturnom koeficijentu otpora (i kondenzatora kod kompenziranih djelitelja),
- naponskom koeficijentu promjene otpora,
- parazitnom kapacitetu otpora,
- elektromagnetskom utjecaju susjednih faza.

Bez posebnih uvjeta, u praksi se postižu točnosti od najmanje  $\pm 0,5\%$ , a uporabom odgovarajućih materijala i temperaturne kompenzacije postižu se točnosti od  $\pm 0,1\%$  u području temperatura od  $-40^\circ\text{C}$  do  $120^\circ\text{C}$ . Najbolje je točnost odrediti mjerenjem. Dokazano je da se u praksi postižu točnosti od  $\pm 0,04\%$  pri naponima od  $175\%$  nazivne vrijednosti [12]. Djelitelji napona imaju sljedeće prednosti pred naponskim mjernim transformatorima s feromagnetskom jezgrom:

- velika linearnost u širokom rasponu frekvencija,
- niska cijena i jednostavnost izrade,
- male dimenzije i mala masa,
- nema zasićenja i učinka ferorezonancije.

### 3.2 Naponski optički mjerni pretvarači

Naponski optički mjerni pretvarači polagano preuzimaju svjetsko tržište zbog svojih prednosti pred naponskim transformatorima s feromagnetskom jezgrom. Na tržištu su se probili ponajprije zbog niže cijene, smanjene mase i jednostavnosti ugradnje. Primjerice, naponski optički mjerni pretvarač proizvođača ALSTOM [4] ima visinu od 7,3 m i masu od samo 230 kg, a upotrebljava se za mjerenje napona do 800 kV (ispitni napon 2 100 kV). Osim toga, relativno jednostavno ga se može pretvoriti u strujni, ili čak kombinirani mjerni pretvarač zamjenom mjerne glave.

Ta vrsta pretvarača temelji svoj rad na promjeni linearno polarizirane svjetlosti u eliptično polariziranu svjetlost [3], u dvolomnim kristalima pod djelovanjem električnog polja. Električno polje stvara razliku potencijala, koja nastaje zbog fazne razlike dva polarizirana vala koji su međusobno fazno pomaknuti i čije su polarizacijske ravnine međusobno okomite. Opisana pojava u fizici se naziva Pockelsovim efektom, a upotrijebljivi sustavi kristala Pockelsove ćelije. Kristali koji se upotrebljavaju ne smiju biti centralno simetrični.

Kao osjetilne ćelije rabe se kristali litij-kalcij-aluminij-heksafluorida (LiCAF), litij-stroncij-alumi-

should be very high. As a consequence the current runs to a lesser degree through the active component of total impedance, but mostly runs through parasitic capacitance which originates as a result of resistor construction. The reactive current component causes significant phase shift which originates during the transformation and which is most frequently compensated by calibrating in the electronic circuits that process these signals.

The accuracy of voltage dividers depends on:

- temperature coefficient of the resistor (and condenser when compensator dividers are used),
- voltage coefficient of resistance changes,
- parasitic capacitance of resistance,
- electromagnetic influence of neighboring phases.

Without special conditions, an accuracy of at least  $\pm 0,5\%$  is achieved, while the use of certain materials and temperature compensation make possible an accuracy of  $\pm 0,1\%$  in temperatures ranging from  $-40^\circ\text{C}$  to  $120^\circ\text{C}$ . Measuring is the best way to determine accuracy. Practice has shown that an accuracy of  $\pm 0,04\%$  can be achieved at  $175\%$  nominal voltage value [12]. Voltage dividers have significant advantages when compared to voltage measuring transformers with ferromagnetic cores:

- high linearity in a wide frequency range,
- low price and simplicity of construction,
- small dimensions and mass,
- no saturation and ferroresonance effect.

### 3.2 Voltage optical measuring transducers

Voltage optical measuring transducers are slowly taking over the world market because of their advantages when compared to voltage transformers with a ferromagnetic core. They are highly valued because of their lower price, smaller mass and simplicity of installation. For instance an optical voltage transducer made by the ALSTOM [4] company has a height of 7,3 m and mass of only 230 kg, and is used for measuring voltages up to 800 kV (its test voltage is 2 100 kV). Apart from that, it is relatively easy to transform it to a current or even combined measuring transducer by simply changing the measuring head.

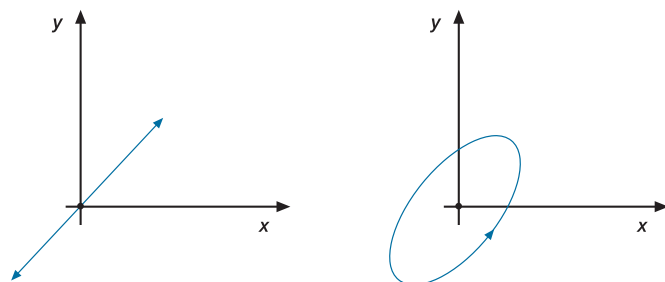
The working of this kind of transducer is based on changing linear polarized light to elliptic polarized light [3] in birefringence crystals when placed in an electrical field. This electrical field makes potential difference. It originates because of the phase difference of two polarized waves which are phase-shifted and whose polarization planes are perpendicular. This phenomenon is called Pockel's effect, while the systems of crystals which are used are called Pockel's cells. The crystals used must not be centrally symmetrical.

nij-heksafluorid (LiSAF), bizmut-silicij oksid (BSO), bizmut-germanij oksid (BGO) i sl. Kristali su relativno malih dimenzija, volumena reda veličine nekoliko kubičnih centimetara [13].

Pockelsove ćelije mogu se upotrebljavati u transversalnoj konfiguraciji (tzv. frekvencijski modulatori) ili longitudinalnoj konfiguraciji (tzv. amplitudni modulatori). Kod transversalne konfiguracije svjetlosni je snop okomit na smjer vektora električnog polja, a kod longitudinalne konfiguracije smjer svjetlosnog snopa podudara se sa smjerom vektora električnog polja. U praksi se češće upotrebljavaju Pockelsove ćelije u longitudinalnoj konfiguraciji. Promjenjivo polje u kojem se nalazi kristal uzrokuje promjene jakosti efekta čija je posljedica nastanak dvaju valova koji su međusobno okomito polarizirani i međusobno su pomaknuti u fazi. Taj pomak na kraju kristala uzrokuje promjene u eliptičnosti. Promjena eliptične polarizacije svjetlosti očituje se kao promjena u intenzitetu na izlazu iz kristala i prolasku kroz analizator (slika 4).

Crystals of lithium-calcium-aluminium-hexafluoride (LiCAF), lithium-strontium-aluminium-hexafluoride (LiSAF), lithium-silicat oxide (BSO), bismuth-germanium oxide (BGO) and others are used as sensing cells. Their dimensions are relatively small, sizes of a few cubical centimeters in volume [13].

Pockel's cells can be used in transversal configuration (so-called frequency modulators) or longitudinal configuration (so-called amplitude modulators). When used in transversal configuration the light beam is perpendicular to the electrical field vector, while in the case of longitudinal configuration the light beam is parallel to the electrical field vector. Pockel's cells are more often used in a longitudinal configuration. A changeable field which contains a crystal causes the changes in the strength of the effect whose consequence is the appearance of two waves which are perpendicularly polarized and phase-shifted. This distortion causes elliptical changes. This change of elliptic polarization of light is manifested as a change in intensity at its exit from the crystal and passing through the analyzer (Figure 4).



**Slika 4**  
Linearno polarizirana zraka koja ulazi u kristal nakon prolaska kroz polarizator (lijevo) i eliptično polarizirana zraka nakon prolaska kroz kristal (desno) Figure 4  
Linearly polarized light beam entering crystal after passing through polarizer (left) and elliptically polarized beam exiting crystal (right)

Napon koji stvara električno polje između dvije točke unutar područja djelovanja polja [3] dobije se integracijom prema izrazu:

The voltage caused by the electrical field between two points inside the area of the field [3] can be calculated according to this equation:

$$V_{ba} = - \int_a^b E_x(x) dx \quad (5)$$

gdje su a i b točke između kojih se računa razlika potencijala, tj. napon, a  $E_x$  polje u smjeru x osi.

where a and b are points between which voltage can be measured, while  $E_x$  is a field in the direction of the x axis.

Ako se zbog nehomogenosti polja integral iz izraza (5) aproksimira diskretnim vrijednostima unutar nekih konačnih područja stvorenog električnog polja, dobiva se izraz:

If, due to the inhomogeneity of the field, the integral from equation (5) is approximated by discrete values within certain finite areas of the created electrical field, we get the equation:



$$V_{ba} = -\sum_{i=1}^N \alpha_i E_i(x_i) \quad (6)$$

u kojemu je  $\alpha_i$  udio u sumiranju napona,  $E_i$  diskretno polje na  $i$ -tom djelu raspodjele polja, a širina diskretnog područja djelovanja polja  $E_i$ .

Aproksimirane diskretne vrijednosti predstavljaju područja unutar kojih se postavljaju mjerne sonde i, na temelju mjerenja određenog broja sonda, zaključuje se vrijednost mjerene napona.

Retardacija [14] u Pockelsovu efektu može se prikazati sljedećim izrazom:

$$\Delta\beta = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot n_0^3 \cdot E \cdot l}{\lambda} \quad (7)$$

u kojemu je  $\Delta\beta$  fazna razlika svjetlosti inducirana u kristalu (retardacija),  $\lambda$  valna duljina svjetlosti,  $n_0$  koeficijent loma optičkog kristala,  $r$  linearni elektro-optički koeficijent optičkog kristala,  $E$  električno polje i  $l$  duljina kristala.

Linearni elektro-optički koeficijent kristala  $r$  je tenzor koji se, zbog vrlo složenog načina određivanja njegove vrijednosti primjenom matematičkog modela, u praksi najčešće određuje mjerenjem.

Intenzitet polarizirane svjetlosti  $I$  nakon prolaska kroz analizator iznosi:

$$I = I_{ul} \cdot \left[ 1 + \Delta\beta \cdot \frac{\sin \theta \cdot l}{\theta} \cdot \cos(2\phi - \theta \cdot l) \right] \quad (8)$$

gdje je  $I_{ul}$  intenzitet svjetlosti na ulazu u kristal,  $\phi$  kut između polarizacijskih osi polarizatora i kristala,  $\theta$  koeficijent zakreta kristala ( $^\circ/\text{mm}$ ),  $l$  duljina kristala i  $\Delta\beta$  fazna razlika svjetlosti inducirana u kristalu.

### 3.2.1 Transverzalna konfiguracija

Kod transversalne konfiguracije mjerenja napona (slika 5) svjetlosni izvor daje svjetlosnu zraku čija se ravnina titranja okreće kutnom brzinom  $\Delta\omega t/2$  [4]. Polarizator i analizator imaju međusobno zakrenute osi vektora propuštanja za  $45^\circ$ . Prolaskom zrake kroz kristal te zbog djelovanja električnog polja ravnina titranja dodatno se zakrene za kut  $\theta$ . Izlazna zraka, zajedno s ulaz-

where  $\alpha_i$  is a portion in summing the voltage,  $E_i$  is a discrete field on part  $i$  of the divided field, and the width of the discrete distance of field  $E_i$ .

Approximated discrete values present areas where measuring probes are installed and where, based on the measuring of certain numbers of probes, the value of measured voltage can be determined.

Retardation [14] in the Pockel's effect can be shown by this expression:

Whereas  $\Delta\beta$  is the difference in phase shift of light induced in the crystal (retardation),  $\lambda$  is the wave length of light,  $n_0$  the refraction coefficient of the crystal,  $r$  the linear electro-optical coefficient of the crystal,  $E$  the electric field and  $l$  the length of the crystals.

The linear electro-optical coefficient of crystal  $r$  is a tensor which because of the complicated way of determining its mathematical value is most commonly determined by measuring.

The intensity of polarized light  $I$  after passing through the analyzer is:

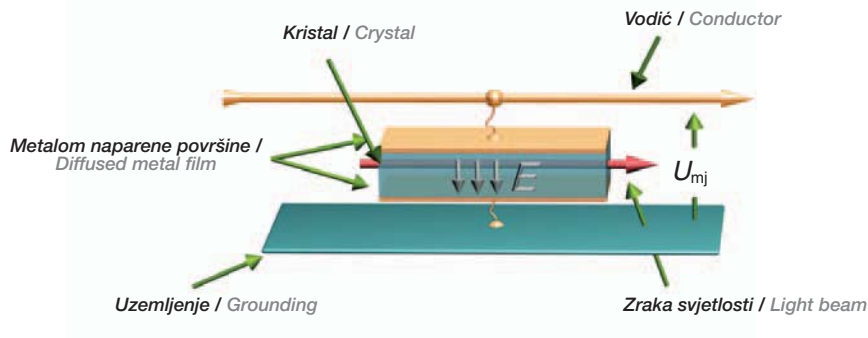
$I_{ul}$  is the light intensity entering the crystal,  $\phi$  is the angle between the polarization axes of the polarizer and crystal,  $\theta$  the crystal's beam rotation coefficient ( $^\circ/\text{mm}$ ),  $l$  length of crystal and  $\Delta\beta$  the phase difference induced in the crystal.

### 3.2.1 Transversal configuration

When measuring voltage in a transversal configuration (Figure 5), the light source spreads a light beam whose oscillation vector rotates with angle velocity  $\Delta\omega t/2$  [4]. The polarizer and analyzer vector axes make a  $45^\circ$  angle. When the beam passes through the crystal and the electrical field the oscillation vector is twisted by an additional angle  $\theta$ . The output beam and input beam are

nom zrakom, dovede se elektroničkom sklopu za detektiranje faznog zakreta. Projekcija okretnog svjetlosnog vektora na vektor propuštanja analizatora daje na izlazu intenzitet svjetlosti:

$$I = \frac{I_0}{2} [1 + \sin(\Delta\omega t + \theta)] \quad (9)$$



Slika 5  
Pockelsova ćelija  
u transversalnoj  
konfiguraciji  
Figure 5  
Pockel's cell  
in transversal  
configuration

S obzirom na to da je za mjerenje potrebna samo promjenjiva komponenta zbog usporedbe s ulaznim signalom  $I = I_0 \Delta\omega t$  dobiveni se signal filtrira, što osigurava da se uspoređuje samo komponenta:

Only the variable component is needed for the comparison with input signal  $I = I_0 \Delta\omega t$ . The output signal is then filtered ensuring comparison of the component according to this equation:

$$I = \frac{I_0}{2} \sin(\Delta\omega t + \theta) \quad (10)$$

Kod opisanog načina mjerenja bitan je kut  $\theta$  te je predmetni sustav neosjetljiv na promjene intenziteta zrake svjetlosti.

In the described method of measuring, the angle  $\theta$  is important, and this makes the system insensitive to changes of light beam intensity.

### 3.2.2 Longitudinalna konfiguracija

Alternativni način mjerenja je mjerni sustav amplitudne modulacije (longitudinalna konfiguracija) koji čine polarizator, valni filter za poništavanje retardacije, kristal u električnom polju mjerene napona i analizator (slika 6) kojim se omogućuje mjerenje napona prema jednadžbi:

### 3.2.2 Longitudinal configuration

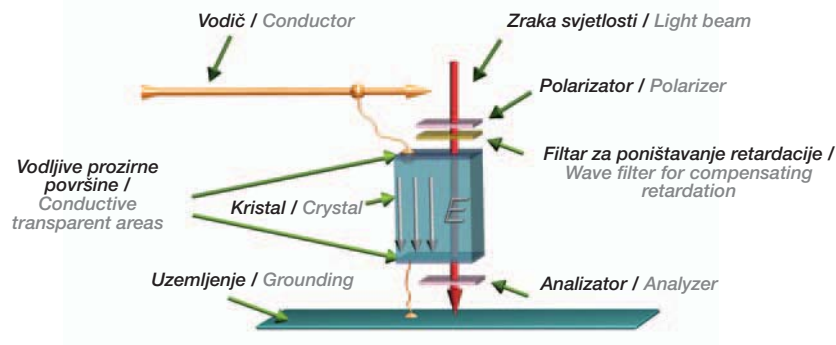
An alternative way of measuring is a measuring system with amplitude modulation (longitudinal configuration) which consists of a polarizer, a wave filter for compensating retardation, a crystal in an electrical field of measured voltage and an analyzer (Figure 6) which enables voltage measuring according to this equation:

$$I = \frac{I_m}{2} \cdot [1 + \sin(K \cdot U(t))] \quad (11)$$

u kojemu je  $I$  intenzitet svjetlosti nakon prolaska kroz analizator,  $I_m$  početni intenzitet svjetlosti te  $K$  konstanta Pockelsove osjetljivosti.

Where  $I$  is the light intensity after passing through the analyzer,  $I_m$  the light intensity of the input beam,  $K$  the Pockel's sensitivity constant.

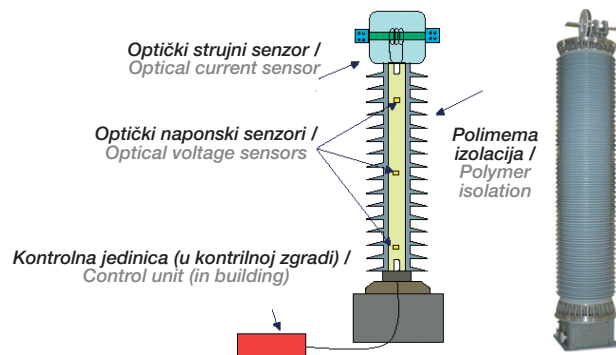
**Slika 6**  
Mjerenje napona pomoću Pockelsove ćelije u longitudinalnoj konfiguraciji  
Figure 6  
Measuring voltage with Pockel's cells in longitudinal configuration



Za priključenje mjenog napona na ćelije rabe se tanki, metalom napareni slojevi. U praksi se najčešće upotrebljavaju 3 mjerne ćelije koje daju vjernu sliku napona koji se mjeri. Raspored Pockelsovih ćelija u naponskom transformatoru predočen je na slici 7.

Measured voltage is brought to cells by conductors which are then connected to diffused metal film on crystal edges. In practice three cells are most frequently used to give a clear image of the measured voltage. The arrangement of Pockel's cells in a voltage transformer is given in Figure 7.

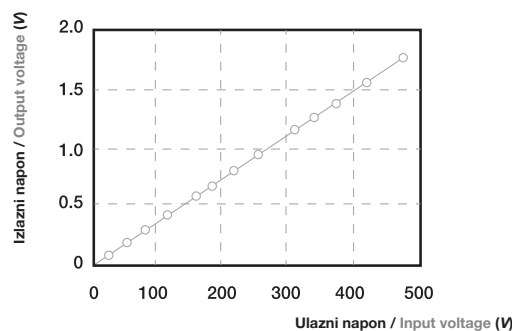
**Slika 7**  
Raspored Pockelsovih ćelija u kombiniranom optičkom mjernom transformatoru  
Figure 7  
Arrangement of Pockel's cells in combined optical transformer



Obilježje naponskih optičkih mjernih pretvarača koje treba posebno istaknuti je linearnost (slika 8).

The most significant feature of voltage optical measuring transducers is linearity (Figure 8).

**Slika 8**  
Ulazno izlazna karakteristika naponskog optičkog mjernog pretvarača  
Figure 8  
Input/output characteristic of voltage optical measuring transducer



Prednosti u odnosu na naponske mjerne transformatore s feromagnetskom jezgrom su sljedeće:

Advantages over voltage measuring transformers with a ferro-magnetic core are:

- velika linearnost,
- relativno male dimenzije i mala masa,
- velika osjetljivost na brze promjene,
- ne proizvode elektromagnetske smetnje,

- great linearity,
- relatively small dimensions and small mass,
- high sensitivity to rapid changes,
- does not produce electromagnetic disturbances,

- smanjen rizik od nastanka požara i eksplozija,
- pokazuju veliku točnost mjerenja uz temperaturne promjene [5], [6].

- lower risk of fire and explosion,
- high accuracy even with temperature changes [5] and [6].

## 4 STRUJNI MJERNI PRETVARAČI

Mjerenje struje složeniji je problem od mjerenja napona, zbog neprekidnog mijenjanja opterećenja te velikog udjela harmoničkih članova. Konvencionalni strujni transformatori imali su više nedostataka. Najveći im je nedostatak zasićenje feromagnetske jezgre istosmjernom komponentom struje tijekom kratkog spoja. Osim toga, dimenzije, masa i cijena strujnih transformatora povećavaju se s obzirom na naponske razine na koje se priključuju.

## 4 CURRENT MEASURING TRANSDUCERS

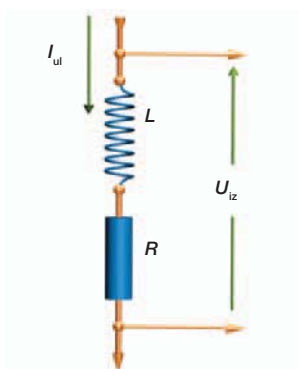
Measuring current is a more complex issue than measuring voltage because of the constant load changes and great amount of harmonic members. Conventional current transformers have many shortcomings. The most significant is saturation of the ferromagnetic core of the direct current component during a short circuit. As well as that dimension, the mass and price of current transformers are increased because of the voltage levels which they are connected to.

### 4.1 Mjerenje struje padom napona na otporniku (shuntu)

Najjednostavniji način mjerenja struje je mjerenje pada napona koji stvara struja prolaskom kroz otpornik koji ima zanemarivu reaktanciju, shunt [7]. Ograničenja takvog načina mjerenja su toplinsko opterećenje  $I^2R$  (Joulesovi gubici) [10] i iznos pada napona, zbog malih dimenzija otpora i neposredne veze s popratnim mjernim komponentama koje se nalaze na istom naponu kao i shunt. To shunt čini neprikladnim za mjerenja vrlo velikih struja. Loše obilježje ovoga mjernog pretvarača je parazitni induktivitet (uobičajene vrijednosti od nekoliko nH) koji može uzrokovati znatan fazni pomak koji, opet, može rezultirati velikim mjernim pogreškama pri malim faktorima snage (slika 9).

### 4.1 Measuring current by measuring voltage drop on a current shunt

The simplest way of measuring current is by measuring voltage drop caused by current flowing through a resistor with negligible reactance called a shunt [7]. Restrictions to this kind of measuring are temperature overload  $I^2R$  (Joule's losses) [10], and the amount of voltage drop because of the small dimensions of the resistor and the close connection to measuring components which are at the same voltage as the shunt. This makes a shunt inappropriate for measuring relatively high currents. A worse characteristic of this measuring transducer is parasitical inductance (usual values of a few nH) which can cause significant phase shift and significant measuring errors while measuring at small power factors (Figure 9).



**Slika 9**  
Mjerenje struje pomoću pada napona na otporniku (shuntu)  
**Figure 9**  
Measuring current by measuring voltage drop on a current shunt

Mjerenje struje ograničeno je toplinskim opterećenjem do oko 200 A, a iznad tog iznosa toplinski se gubici u mjernom otporniku znatno povećavaju - zbog čega naglo raste i veličina otpornika. U praksi se na taj način mjeri struja u sustavima napona do 30 kV. Prednosti mjerenja struje shuntom pred mjernim transformatorima s feromagnetskom jezgrom su:

Measuring current is limited to 200 A by thermal overload. Above that value thermal losses in the measuring resistor increase significantly causing a sudden increase in the size of the resistor as well. This method of measuring current is used in voltage systems up to 30 kV. Advantages of measuring current with a shunt when compared to measuring transformers with a ferromagnetic core are:

- velika linearnost u širokom području frekvencija,
- jednostavnost izvedbe,
- male dimenzije i masa,
- niska cijena,
- nema efekta ferorezonancije i zasićenja jer nema željezne jezgre,
- nema ni utjecaja susjednih faza na mjerenje.

Točnost mjerenja struje shuntom ovisi o:

- temperaturnom koeficijentu mjernog otpornika,
- parazitnom kapacitetu otpora pri vrlo visokim frekvencijama,
- načinu izvedbe mjernog otpornika (žičani, od posebnog materijala itd.).

- great linearity in a wide frequency range,
- simplicity of production,
- small dimensions and small mass,
- low price,
- no effect of feroresonance and saturation because of the absence of a ferromagnetic core,
- no impact of the neighboring phases on measuring.

Accuracy of measuring current with a shunt depends on:

- temperature coefficient of the resistor,
- parasitical capacitance at high frequencies,
- the way the measuring resistor is made (wire resistor, use of special materials, etc.).

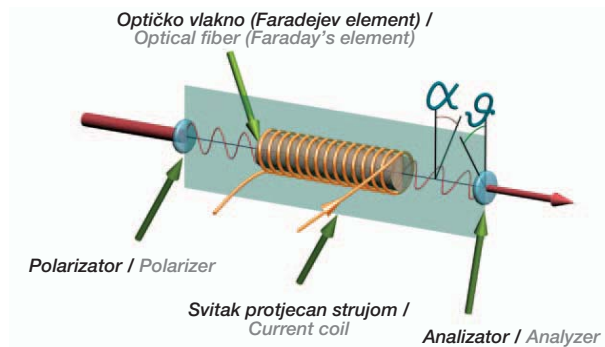
#### 4.2 Strujni optički mjerni pretvarači

Strujni optički mjerni pretvarači temelje svoj rad na zakretu kuta polarizacije svjetlosti pri prolasku polarizirane svjetlosti kroz magnetsko polje, okomito na smjer širenja svjetlosti [4]. Magnetno-optički efekt naziva se Faradejev efekt (slika 10).

#### 4.2 Current optical measuring transducers

Current optical measuring transducers are based on the light polarization angle of the polarized light beam passing through a magnetic field which is perpendicular to the beam's path [4]. This magnetic-optical effect is called the Faraday effect (Figure 10).

Slika 10  
Faradejev efekt  
Figure 10  
Faraday's effect



Svjetlost se u kristal dovodi svjetlovodnim kabelom kroz polarizator, a odvodi svjetlovodnim kabelom kroz analizator u elektronički uređaj za mjerenje promjene intenziteta, što je posljedica zakreta polarizacijske osi nakon prolaska kroz analizator. Ravnina titranja polarizirane svjetlosti zakreće se zbog djelovanja magnetskog polja vodiča, a zakret polarizacijske ravnine pri prolazu kroz analizator očituje se promjenom intenziteta svjetlosti  $I$  koja prolazi kroz optički kabel prema elektroničkom sklopu za mjerenje izlaznog intenziteta:

Light is introduced to the crystal by fiber optical cable through a polarizer, and is led through an analyzer by fiber optical cable to an electronic device for measuring intensity change, as a direct consequence to polarization axis twist. The polarization axis of polarized light beam twists because of the conductor's magnetic field, and the twist of the polarization axis while passing through the analyzer manifests itself by changing the intensity of light  $I$  passing through an optical cable to a device for measuring output intensity:

$$I_{iz} = I_{ul} \cdot \cos^2(\vartheta - \alpha) \quad (12)$$

gdje je  $I_{iz}$  intenzitet svjetlosti nakon prolaska kroz analizator,  $I_{ul}$  početni intenzitet svjetlosti nakon prolaska kroz polarizator,  $\alpha$  kut zakreta

where  $I_{iz}$  is the light intensity after passing through the analyzer,  $I_{ul}$  the input light intensity after passing through the polarizer,  $\alpha$  is the angle

polarizacijske ravnine zbog djelovanja polja,  $\vartheta$  kut zakreta polarizacijske ravnine analizatora prema polarizacijskoj ravnini polarizatora koji je suprotan od smjera zakreta polarizacijske ravnine koju stvara polje. Izraz (12) naziva se i Malusov zakon.

Kut  $\alpha$  može se izraziti kao:

$$\alpha = C \cdot l \cdot H \quad (13)$$

gdje je  $C$  Verdetova konstanta optičkog materijala kroz koji prolazi svjetlost,  $l$  efektivna duljina svjetlosne zrake zahvaćena homogenim poljem, a  $H$  magnetsko polje koje stvara svitak protjecan mjernom strujom.

S obzirom na to da polje u tako postavljenim geometrijskim odnosima nije homogeno, kut  $\alpha$  se dobije integracijom, uporabom izraza:

$$\alpha = C \cdot \int H(l) dl \quad (14)$$

Alternativna konstrukcija jednog takvog sustava za mjerenje struje, u blokovskom prikazu, predočena je na slici 11.

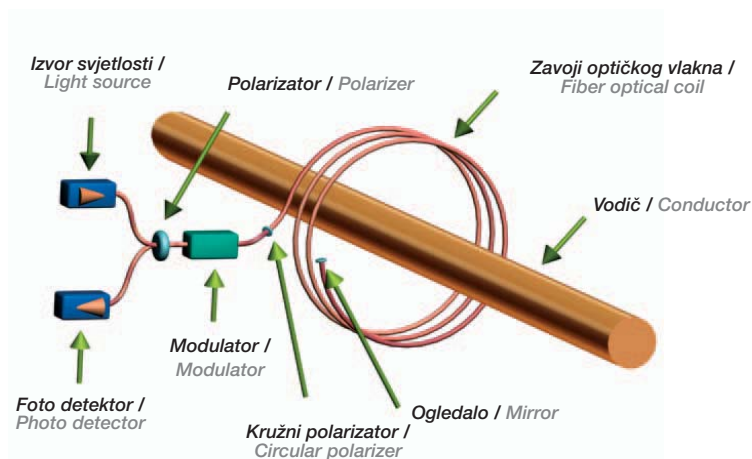
of polarization axis twisted due to impact of the field,  $\vartheta$  the polarization axis twist of the analyzer compared to polarization axis of the polarizer whose twist direction is opposite to the twist direction of the polarized level made by the field. An expression (12) is also called Malus's law.

The angle  $\alpha$  can be expressed as:

where  $C$  is Verdet's optical material constant,  $l$  the effective length of the light beam in a magnetic homogenous field,  $H$  the magnetic field made by current flow through the coil.

Because of no homogenous field in such geometrical relations, the angle  $\alpha$  is attained by integration according to the equation:

An alternative construction of such a system for measuring current is shown in block diagram in Figure 11.



**Slika 11**  
Alternativna konstrukcija optičkog sustava za mjerenje struje  
Figure 11  
Alternative construction of optical system for measuring current

U praksi se često pronalaze pretvarači izrađeni kao kristalni prsten koji navodi zraku svjetlosti da totalnom refleksijom na najmanjoj mogućoj udaljenosti obiđe vodič čija se struja mjeri (slika 12). Takva konfiguracija omogućuje smanjenje utjecaja susjednih vodiča na najmanju mjeru, neovisnost mjerenja o položaju vodiča, smanjenje geometrijskih odstupanja zbog termičkih rastezanja i vibracija itd.

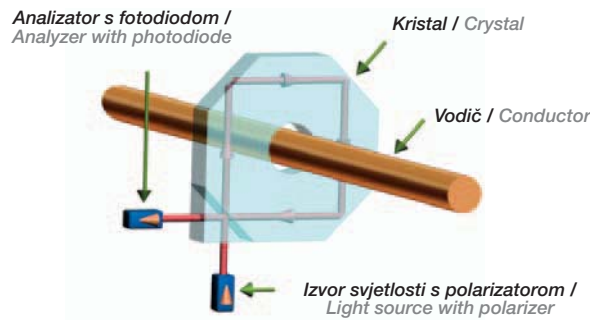
In practice, there are often found transducers made as a crystal ring which leads the light beam to go around the conductor whose current is being measured by the shortest possible distance using total reflection (Figure 12). This kind of configuration enables the impact of neighboring conductors to be reduced, measuring independent of the position of conductor, lowering geometrical deviation because of thermal stretching, vibration, etc.

Slika 12

Usmjeravanje zrake svjetlosti u kristalu mjernog uređaja

Figure 12

Directing the light beam into the crystal of the measuring device



Polarizacijske ravnine polarizatora i analizatora međusobno su zakrenute za 45°. Takva konfiguracija omogućuje mjerenje struje prema zakonu:

The polarizer's and analyzer's polarization levels are twisted by 45°. Such a configuration enables current measuring according to this law:

$$I = \frac{I_m}{2} \cdot [1 + \sin(2C \cdot I(t))] \quad (15)$$

Kao i kod naponskih optičkih mjernih pretvarača, najvažnije obilježje strujnih optičkih mjernih pretvarača je linearnost (slika 13).

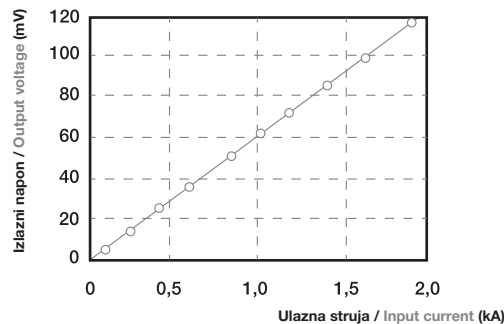
As in the case of voltage optical measuring transducers the most important feature of current optical measuring transducers is linearity (Figure 13).

Slika 13

Ulazno izlazna karakteristika strujnog optičkog mjernog pretvarača

Figure 13

Input-output characteristic of current optical measuring transducer



Prednosti strujnih optičkih mjernih pretvarača naspram konvencionalnih strujnih mjernih transformatora jednake su onima kao i kod naponskih optičkih mjernih pretvarača.

Advantages of current optical measuring transducers when compared to conventional current measuring transformers are the same as in the case of voltage optical measuring transducers.

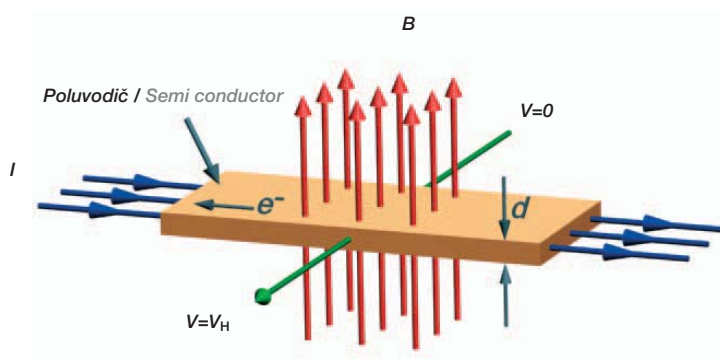
### 4.3 Hall sonde

Razvoj poluvodičkih elektroničkih komponenata omogućio je izradu minijaturnih mjernih osjetnika magnetskog polja koje stvara vodič protjecan električnom strujom, poznatih pod nazivom Hall sonde (slika 14). Rad tih osjetnika temelji se na Lorentzovu pravilu [10], [15]. Ako električna struja  $I$  protječe kroz vodljivu pločicu debljine  $d$  koja se nalazi u magnetskom polju  $B$ , magnetsko polje djeluje na nositelje naboja u pločici prema Lorentzovu pravilu.

### 4.3 Hall probes

The development of semiconductor electronic components has made possible the production of miniature magnetic field measuring sensors known as Hall probes (Figure 14). The work of these sensors is based on Lorentz's law [10] i [15]. If an electric current  $I$  passes through a plate of thickness  $d$  which is situated in magnetic field  $B$ , the magnetic field acts on the electrons in the plate according to Lorentz's law.

$$F_m = -q \cdot v_d \times B \quad (16)$$



**Slika 14**  
Načelo rada Hall  
sonde  
Figure 14  
The principle of  
the Hall probe

Prema tom pravilu, na naboj djeluje magnetska, Lorentzova sila [10], okomita na smjer magnetskog polja i smjer struje, koja uzrokuje nakupljanje naboja na jednoj strani pločice. Posljedica nakupljanja naboja je mjerljivi napon na rubovima pločice, nazvan Hallov napon [9]:

According to this law magnetic, Lorentz force [10] has influence on electrons in a way that causes electron accumulation on one side of the plate. A direct consequence of this electron accumulation is a measurable voltage at the edges of the plate called Hall's voltage [9]:

$$V_H = \frac{I \cdot B}{n \cdot q \cdot d} \quad (17)$$

gdje je  $I$  jakost električne struje koja prolazi kroz pločicu zbog dovođenja nositelja naboja,  $B$  jakost magnetskog polja u kojemu se pločica nalazi,  $n$  gustoća mobilnih nositelja naboja,  $q$  iznos elementarnog naboja i  $d$  debljina pločice.

where  $I$  is the current passing through the plate to bring electrons,  $B$  the intensity of the magnetic field in which the plate is situated,  $n$  the density of non stationary charges,  $q$  the amount of elementary charge and  $d$  the thickness of the plate.

Hallov napon neposredno je proporcionalan magnetskom polju  $B$  koje stvara mjerena struja, pa su sonde pogodne i za mjerenje istosmjernih struja. Tim se postupkom mogu mjeriti istosmjerne struje do 100 kA, uz pogrešku mjerenja od  $\pm 10^{-3}$ . Za mjerenje izmjeničnih struja potrebni su dodatni elektronički sklopovi za pretvorbu signala u digitalne oblike i daljnju obradu. Hall sonde proizvode se od poluvodičkih elemenata (iridij, iridij-arsen itd.) i vrlo su malih dimenzija, reda veličine nekoliko kubnih milimetara. Zbog toga su mjerni osjetnici s Hall sondama najčešće izvedeni kao zaliveni termootporni plastični kvadri koji u sebi imaju otvor kružnog presjeka kroz koji se provlači vodič. S obzirom na to da su to poluvodičke komponente, često se u jednoj sondi mogu, osim Hall osjetnika, integrirati i analogno digitalni pretvarači, temperaturni kompenzatori, kompenzatori histereze i sklopovlje za linearizaciju čija je namjena postizanje što je moguće vjernije slike mjerene struje.

Hall's voltage is directly proportional to magnetic field  $B$  caused by the measured current which makes these probes also appropriate for measuring direct currents. With this procedure direct currents up to 100 kA can be measured with errors of  $\pm 10^{-3}$ . For measuring alternating currents additional electronic circuits are necessary to transform the signal to digital forms and further processing. Hall probes are made of semiconductors (Iridium, Iridium-Arsenic, etc.) and have very small dimensions (size of a few cubic millimeters). That is why measuring devices with Hall probes are most frequently made as compact thermo-resistant plastic parallelepipeds having a circular hole in the middle for the conductor to pass through. Considering that these are semiconductors, there often can be found in one probe, besides the Hall sensor, analog - digital transducers, temperature compensators, hysteresis compensators and linearization circuits whose aim is to form as clear a picture as possible of measured current.



Prednosti mjernih pretvarača s Hall sondama su:

- jednostavnost izvedbe,
- vrlo male dimenzije i masa,
- niska cijena,
- jednostavna ugradnja,
- nema utjecaja susjednih faza na mjerenje.

#### 4.4 $di / dt$ pretvarači

To su zračni svici torusnog oblika. Služe za pretvorbu mjerene struje u naponski signal, pogodan za daljnju obradu. Vrsta svitaka koji se upotrebljavaju bez feromagnetske jezgre nazivaju se svici Rogowskog (slika 15) [2]. Ta vrsta svitaka konstrukcijski je najjednostavnija, jeftina i prikladna za mjerenje širokog raspona struja različitih frekvencija, a tradicionalno se rabi za mjerenje vrlo velikih struja. Kakvoća svitka kao pretvarača ovisi o stalnosti gustoće zavoja  $N$  po jedinici duljine tijela te stalnoj i poznatoj površini  $S$  zavoja koji moraju biti okomiti na središnju crtu svitka (bolja se točnost postiže namatanjem na kruta tijela jer savijanjem svitka nastaju odstupanja zavoja od idealnog položaja).

Primjena digitalnih rješenja omogućuje primjenu ove vrste strujnih pretvarača u brojilima - za uporabu u kućanstvima i industriji.

Advantages of transducers with Hall probes:

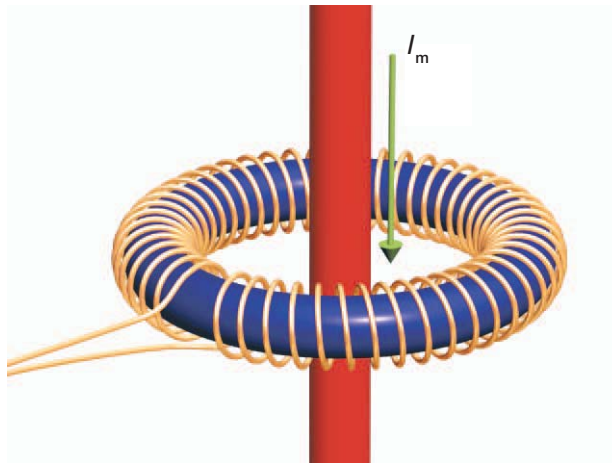
- simplicity of construction,
- very small dimensions and small mass,
- low price,
- simple installation,
- no impact of neighboring phases on measuring.

#### 4.4 $di / dt$ transducers

They are torus-shaped coils with an air core. They are made for transforming measured current to a voltage signal appropriate for further processing. This kind of coil used without a ferromagnetic core is called a Rogowski coil (Figure 15) [2]. This type of coil is of the simplest construction, cheap, appropriate for measuring a wide range of currents of different frequencies, and is usually used for measuring very high currents. The quality of the coil as a transducer depends on the constant density of  $N$  turns per unit length, constant and known surface  $S$  of the coil which should be perpendicular to the middle line of coil (better accuracy is achieved by winding on firm objects, because twisting the wound coil causes deviation from the ideal coil position).

The appliance of digital solutions enables the application of this kind of current transducer in electricity meters for house usage and in industry.

Slika 15  
Rogowski svitak  
Figure 15  
Rogowski coil



Mjerenje struje  $di / dt$  pretvaračem ostvaruje se mjerenjem napona induciranog u torusu svitka nastalog zbog mjene magnetskog toka u svitku koji stvara mjerena struja  $I_m$  prema Lentzovu pravilu. Ako se pretpostavi da je svitak namotan na torusnu jezgru pravokutnog presjeka s  $N$  namota, kako je to predočeno na slici 16, onda će promjena struje u primarnom vodiču čija se struja mjeri uzrokovati promjenu magnetskog toka u torusu unutar svitka [10]. Promjena magnetskog toka unutar zavoja

Measuring current with a  $di / dt$  transducer is done by measuring voltage induced in the coil's torus winding induced by changes of the magnetic flux made by measured current  $I_m$  according to Lorentz's law inside the coil. When a coil with  $N$  windings is wound onto a torus core of rectangular intersection area as seen in Figure 16, then a change in the current in the primary conductor will cause changes of magnetic flux inside the torus coil [10]. Changes

svitka uzrokovat će indukciju napona prema izrazu:

$$e = -N \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (18)$$

gdje je  $e$  ukupni inducirani napon u cijelom svitku,  $N$  broj namota svitka,  $d\phi(t)$  promjena toka unutar jednog namota te  $dt$  promjena vremena.

Promjena toka koja uzrokuje indukciju napona u svitku posljedica je promjene struje kroz primarni vodič. Zbog nejednolike preraspodjele toka na različitim udaljenostima od vodiča, potrebno je promatrati tok kroz infinitezimalni dio površine presjeka torusnog svitka  $dS$  na udaljenosti  $r$  od vodiča.

Na udaljenosti  $r$  od vodiča magnetski tok  $d\phi$  iznosi:

$$d\phi = B(r) \cdot dS \quad (19)$$

$$dS = a \cdot dr \quad (20)$$

$$d\phi = B(r) \cdot a \cdot dr = \mu \cdot H(r) \cdot a \cdot dr \quad (21)$$

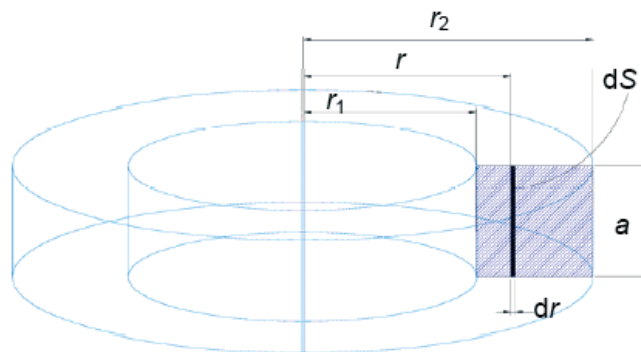
Vidljivo je da je tok kroz površinu  $dS$  neposredno proporcionalan jakosti magnetskog polja  $H(r)$  na udaljenosti  $r$  od vodiča (slika 16). Zato je potrebno poznavati raspodjelu polja - kako bi se mogao izračunati inducirani napon u svitku.

of magnetic flux inside the coil will induce voltage according to:

where  $e$  is total induced voltage in the whole coil,  $N$  the number of the coil's windings,  $d\phi(t)$  the change of magnetic flux inside one coil and  $dt$  the time interval.

The change of flux which causes induced voltage inside the coil is the consequence of the current change through the primary conductor. Because of the unequal disposal of the flux at different distances from the coil, it is necessary to watch the flux through an infinitesimal part of the torus area  $dS$  at distance  $r$  from the coil.

At distance  $r$  from the conductor magnetic flux  $d\phi$  is:



**Slika 16**  
 Određivanje magnetskog tijeka u torusnom svitku  
 Figure 16  
 Determining of the magnetic flux inside the torus coil

Uz pretpostavku da je jakost polja na istoj udaljenosti  $r$  od vodiča uvijek jednaka, prema zakonu protjecanja vrijedi [10]:

With the assumption that the field is always equal at distance  $r$  from the conductor it can be applied that [10]:

$$\sum I = \oint H(r) \cdot dl \quad (22)$$

Kroz jedan zavoj svitka protječe vremenski promjenjiva struja  $I$ , tj. sumarna struja koja se dobije integracijom po opsegu kružnice  $l$ :

Through a single coil of the coil arrangement flows a changeable current  $I$ , (sum of currents) which can be calculated by integration on the circumference of the circle  $l$ :

$$I = H(r) \cdot \int_{2 \cdot r \cdot \pi} dl = H(r) \cdot 2 \cdot r \cdot \pi \quad (23)$$

iz čega slijedi raspodjela jakosti magnetskog polja u ovisnosti o udaljenosti  $r$  od vodiča:

from which follows the distribution of the strength of the electromagnetic field according to the length  $r$  from the conductor according to the equation:

$$H(r) = \frac{I}{2 \cdot r \cdot \pi} \quad (24)$$

Ako se u izraz (21) uvrsti izraz (24) slijedi da je magnetski tijek na udaljenosti  $r$  od vodiča:

If equation (21) is connected to equation (24) then the magnetic flux at distance  $r$  from the conductor is:

$$d\phi = \frac{\mu \cdot a \cdot I}{2 \cdot r \cdot \pi} \cdot dr \quad (25)$$

Ukupni tijek kroz torus dobije se integracijom i iznosi:

Total flux through the torus can be calculated by the next integration:

$$\phi = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\mu \cdot a \cdot I}{2 \cdot r \cdot \pi} \cdot dr = \frac{\mu \cdot a \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (26)$$

Struja koja teče primarnim vodičem vremenski je promjenjiva te će i tijek kroz torusni svitak biti također vremenski promjenjiv. Ako se izraz (26) uvrsti u Lenzovo pravilo (18), dobije se izraz za inducirani napon:

Current flow through the primary conductor changes with time and that causes changes in flux inside the torus coil. If equation (26) is used in Lorentz's law (18) then the induced voltage is:

$$e(t) = -\frac{N \cdot \mu \cdot a}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot \frac{dI(t)}{dt} \quad (27)$$

Za torusni svitak kružnog presjeka s unutarnjim radiusom  $r_1$  i vanjskim radiusom  $r_2$  inducirani napon dobije se numeričkom integracijom izraza:

For a torus coil of circular cross section with inner radius  $r_1$  and outer radius  $r_2$ , induced voltage can be calculated by numeric integration using the equation:

$$e(t) = \frac{\mu}{\pi} \cdot \frac{dI(t)}{dt} \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{\sqrt{\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right)^2 - \left(r - \frac{r_2 + r_1}{2}\right)^2}}{r} \cdot dr \quad (28)$$

Ako se opisanom konstrukcijom  $di / dt$  pretvarača žele mjeriti kontinuirane sinusoidalne struje, tada nije potrebna dodatna integracija signala jer se derivacijom struje  $I(t)$  ponovno dobije sinusoidalna veličina s faznim pomakom  $90^\circ$ , što omogućuje mjerenje efektivne vrijednosti inducirano napona svitka. Pri tome je pretpostavljeno da mjerena struja ima oblik:

If the described construction of a  $di / dt$  transducer is made for measuring continued sinusoidal current, then additional integration of the signal is not needed because derivation of sinusoidal current  $I(t)$  obtains sinusoidal signal shifted by  $90^\circ$ , and this is what enables the measuring of effective voltage values induced in the coil. However, it is supposed that measured current can be expressed by this equation:

$$I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (29)$$

Uvrštenjem izraza (29) u izraz (27), nakon deriviranja, dobiva se jednačba za inducirani napon u torusu pravokutnog presjeka:

By connecting equation (29) to equation (27), and after derivation, an equation for the induced voltage in a torus of rectangular cross-section is:

$$e(t) = -f \cdot N \cdot \mu \cdot a \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot I_0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (30)$$

Ako se odredi efektivna vrijednost, postaje očito da će mjerni uređaj za mjerenje napona zapravo mjeriti efektivnu vrijednost napona koja je neposredno proporcionalna efektivnoj vrijednosti struje:

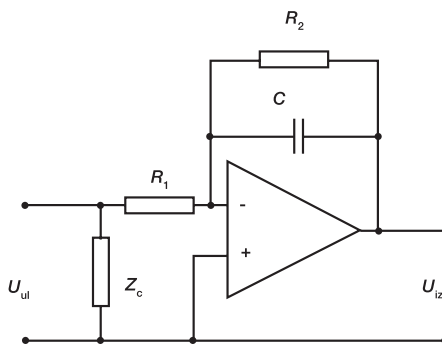
If effective value is determined it becomes obvious that a voltage measuring device actually measures the effective value of voltage that is proportional to the effective value of the current:

$$U_{\text{eff}} = f \cdot N \cdot \mu \cdot a \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot I_{\text{eff}} \quad (31)$$

Može se zaključiti da mjerena vrijednost inducirano napona, kao slike mjerene struje, odnosno prijenosni omjer  $di / dt$  pretvarača neposredno ovisi o geometriji sonde, vrsti materijala jezgre  $\mu$ , i frekvenciji  $f$ . Međutim, ako se kao izlaz želi dobiti točna slika mjerene veličine, tada se izlaz sonde mora integrirati jer je dobiveni inducirani napon derivacija mjerene struje, odnosno magnetskog tijeka koji ulančuje svitak. Za integraciju napona često se upotrebljavaju aktivni integratori s operacijskim pojačalom [11].

It can be concluded that the measured value of the induced voltage, or ratio of the  $di / dt$  transducer depends on the geometry of the probe, core material  $\mu$ , and frequency  $f$ . But if a clear picture of the measured value is required then the probe output must be integrated because the induced voltage obtained is the derivation of the measured current (total magnetic flux to be exact) which is embraced by the coil. For voltage integration active integrators are frequently used with operational amplifier [11].

**Slika 17**  
Osnovni sklop  
za integraciju  
Figure 17  
Basic circuit for  
integration



$$U_i(t) = -\frac{1}{R_1 \cdot C} \int U_u(t) \cdot dt \quad (32)$$

$$U_i = -\frac{N \cdot \mu \cdot a}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot I_{mj} \quad (33)$$

$$f_d = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C} \quad (34)$$

Prednosti  $di / dt$  mjernih pretvarača pred strujnim mjernim transformatorima s feromagnetskom jezgrom su:

- jednostavnost izvedbe,
- jako male dimenzije i masa,
- niska cijena,
- jednostavna ugradnja,
- zračna jezgra ima linearan fazni odziv,
- mogućnost mjerenja vrlo visokih struja (od 10 A do reda MA),
- niska potrošnja samog uređaja,
- niski temperaturni pomak.

Advantages of  $di / dt$  transducers compared to current measuring transformers with a ferromagnetic core are:

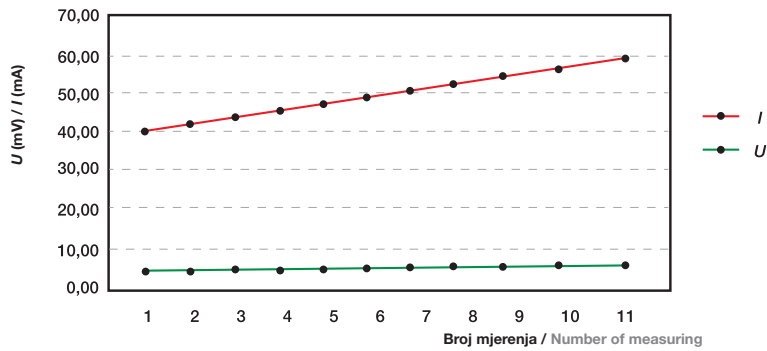
- simplicity of construction,
- very small dimensions and small mass,
- low price,
- simple installation,
- air core has linear phase response,
- possibility of very high current measurements (from 10 A to the order of MA),
- low power consumption of the device itself,
- small temperature shift.

U tablici 1 prikazani su rezultati mjerenja napona induciranog u pretvaraču namotanom na feritnoj jezgri, pa je nacrtan odgovarajući graf na kojemu je vidljiva linearnost u području u kojemu feritni materijal na koji je namotan svitak ima linearnu karakteristiku. Mjerene su vrlo male struje (mA) iz čega se može zaključiti da su pretvarači primjenjivi i za takva mjerenja te su upotrebljivi i u mjernim tehnikama opće namjene.

The Table 1 shows the results of measuring induced in a transducer wound onto a ferrite core and it also shows linearity in the area where ferrite material has linear characteristics. Only small currents have been measured (mA) which leads to conclusion that transducers are applicable for this kind of measuring, and also usable in general purpose measuring techniques.

Tablica 1 - Rezultati mjerenja napona induciranog u  $di / dt$  pretvaraču namotanom na feritnoj jezgri  
Table 1 - Results of voltage measuring induced in  $di / dt$  transducer wound onto a ferrite core

Broj mjerenja Number of measuring	Feritna jezgra (pravokutni presjek) / Ferrit core (rectangular cross section)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$I$ (mA)	40,00	42,00	44,00	46,00	48,00	50,00	52,00	54,00	56,00	56,00	56,00
$U$ (mV)	3,10	3,30	3,40	3,60	3,80	4,00	4,20	4,30	4,40	4,40	4,40
$I/U$	12,90	12,73	12,94	12,78	12,63	12,50	12,38	12,56	12,73	12,73	12,73



**Slika 18**  
Linearnost  $dI/dt$   
pretvarača  
Figure 18  
Linearity of  $dI/dt$   
transducer

U tablici 2 predočene su osobine mjerne sonde (pretvarača) koja je upotrijebljena za to mjerenje. Prijenosni omjer upotrijebljenog pretvarača:  $I/U = 12,7$ .

Table 2 shows features of the measuring probe (of transducer) which was used for test measuring. Transmission ratio:  $I/U = 12,7$ .

Tablica 2 - Osobine mjerne sonde / Table 2 - Characteristics of the transducer measuring probe

Osobina / Feature	Osobina / Feature	Iznos / Value	Mjerna jedinica / Unit
Unutarnji promjer / Inner diameter	$d_1$	15	mm
Vanjski promjer / Outer diameter	$d_2$	25	mm
Unutarnji polumjer / Inner radius	$r_1$	7,5	mm
Vanjski polumjer / Outer radius	$r_2$	12,5	mm
Širina / Width	$a$	8	mm
Unutarnji opseg / Inner perimeter	$O_u$	47,12	mm
Promjer žice / Wire diameter	$\emptyset$	0,6	mm
Broj namotaja / Number of windings	$N$	69	

Odstupanja na kraju mjerenja javljaju se zbog nelinearnosti krajnjeg dijela skale analognih mjernih instrumenata, a vrijednosti variraju i zbog sustavnih pogrešaka. Odabrana feritna jezgra pokazuje početak zasićenja kod struja većih od 250 mA. Proučavanje osobina pretvarača pokazuje da se upotrebom svitaka bez feromagnetske jezgre dobivaju najvjernije slike mjerene struje zbog njihove linearne karakteristike u čitavom mjernom području, bez obzira na mjernu veličinu.

Deviations which appear at the end of measuring are a consequence of the non-linearity in the final part of the scale of analog measuring devices, these values also vary because of systematic errors. The chosen ferrite core begins to saturate at currents greater than 250 mA. Studying the features of the transducers shows that the use of coils without a ferromagnetic core gives the most accurate measuring signals because of their linear characteristic in the whole measured area no matter the size of the measured value.

#### 4.5 Usporedba strujnih mjernih pretvarača

U tablici 3 prikazana je usporedba glavnih osobina mjernih pretvarača za mjerenje struje [7].

#### 4.5 Comparison of current measuring transducers

Table 3 shows a comparison of transducers for measuring current [7].

U tablici 3 mogu se uočiti znatne prednosti primjene optičkih pretvarača za mjerenje struje u elektroenergetskim postrojenjima.

From Table 3 can be seen significant advantages of appliance optical transducers for current measuring in electrical power transmission systems.

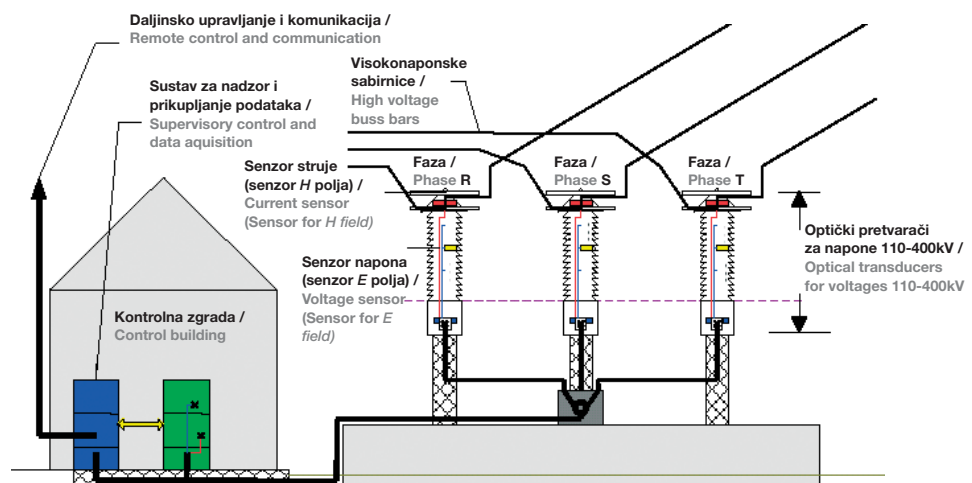
Tablica 3 - Usporedba glavnih osobina mjernih pretvarača za mjerenje struje  
Table 3 - Comparison of the current measuring transducers main features

Karakteristika / Feature	Niskoomski shunt / Current shunt	Strujni mjerni transformator sa željeznom jezgrom / Current transformer	Hall sonda / Hall sonde	Optički mjerni pretvarač / Optical transducer	$di/dt$ pretvarači / transducer
Cijena / Price	niska / low	srednja / middle	srednja / middle	srednja / middle	niska / low
Linearnost / Linearity	odlična / excelent	loša do srednja / quite low	loša / low	vrlo dobra / very good	vrlo dobra / very good
Mogućnost mjerenja velikih struja / High current measurement	jako slaba / very weak	dobra / good	dobra / good	vrlo dobra / very good	vrlo dobra / very good
Potrošnja / Consumption	niska do velika / low to high	srednja / middle	niska / low	niska / low	niska / low
Temperaturna ovisnost / Temperature stability	srednja / middle	niska / low	niska do srednja / low to middle	srednja / middle	jako niska / very low
Dimenzije / Dimensions	male do srednje / small to middle	velike / large	jako male do srednje / very small to middle	jako male do velike / very small to large	jako male do srednje / very small to middle
Problem zasićenja i histereze / Saturation and hysteresis	da / yes	da / yes	da / yes	da / yes	da / yes
Izobličenja i histereza / Distorsions	ne / no	ne / no	ne / no	ne / no	ne / no

Primjer uporabe kombiniranih optičkih mjernih pretvarača predočen je na slici 19.

Example of usage of combined optical measuring transducers is given in Figure 19

**Slika 19**  
Kombinirani optički mjerni pretvarači u visokonaponskom postrojenju  
Figure 19  
Combined optical measuring transducers in high voltage power plant



## 5 ZAKLJUČAK

Godinama se primarna i sekundarna oprema za elektroenergetska postrojenja razvijala i promatrala odvojeno. Električka veza između te opreme uglavnom se ostvaruje galvanski (bakrenim vodičima). U težnji da se smanje troškovi i poveća pouzdanost, nastoji se ta dva sustava spojiti, a za to su vrlo pogodni nekonvencionalni mjerni pretvarači. Oni omogućuju povezivanje primarne opreme sa sekundarnom opremom uporabom svjetlovoda koji imaju znatne prednosti pred vodičima (male dimenzije i masa, izvrsna dielektrička svojstva, veliki kapacitet prijenosa informacija, nesjetljivost na elektromagnetske smetnje itd.).

Od nekonvencionalnih pretvarača u elektroenergetskim postrojenjima u svijetu trenutno se najviše upotrebljavaju optički mjerni pretvarači. U hrvatskom elektroenergetskom sustavu optički mjerni pretvarači nisu još nigdje ugrađeni. No, s obzirom na sve prednosti koje imaju, za pretpostaviti je da će se uskoro započeti i s njihovom primjenom u elektroenergetskim postrojenjima našega EES-a.

## 5 CONCLUSION

For years primary and secondary equipment for power plants were developed and considered separately. An electrical connection between this equipment is mostly achieved by using copper conductors. The tendency for lowering costs and increasing reliability resulted in attempts to connect the two systems which can be done by unconventional measuring transducers. They enable connecting primary to secondary equipment by optical fibers which have significant advantages when compared to conductors (small dimensions and small mass, great dielectric features, large capacity of information transfer, insensitivity to electromagnetic disturbances etc.).

In the world, of unconventional transducers optical measuring transducers are most frequently used. In the Croatian electro-energetic system optical transducers have not yet been installed anywhere. But considering all the advantages they have, this should happen in the near future.

## LITERATURA / REFERENCES

- [1] ABB, Line entrance module, ABB 2006.
- [2] MAHONEN, P., MOISIO, M., HAKOLA, T., KUISTI, H., The Rogowski Coil and Voltage Divider in Power System Protection and Monitoring, CIGRÉ, Paris, 28 August - 3 September, 1996 Session, Ref. 34-103
- [3] KANOI, M., TAKASHI, G., SATO, T., HIGAKI, M., MORI, E., OKUMURA, K., Optical Voltage and Current Measuring System for Electric Power System, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 1, No. 1, 1986, pp. 91-97
- [4] Opto-electronic Sensors, A New Generation of Instrument Transformers, ALSTOM
- [5] RAHMATIAN, F., CHAVEZ, P. P., JAEGER, N. A. F., A 230 kV Optical Voltage Transducer Using Multiple Electric Field Sensors, IEEE 2002.
- [6] RAHMATIAN, F., CHAVEZ, P. P., JAEGER, N. A. F., 138 kV and 345 kV Wide-Band SF6-Free Optical Voltage Transducers, IEEE 2002.
- [7] KOON, W., Current Sensing for Energy Metering, Analog Devices, <http://www.analog.com/energymeter>
- [8] VUJEVIĆ, D., Pretvornici umjesto strujnih i naponskih transformatora, Energija, Vol. 47, No. 4, 1998., str. 303-311
- [9] RUDAN, M., Determination of the Hall Voltage in Devices with Arbitrary Aspect Ratio and Probe Position, ESSDERC 2003.
- [10] PINTER, V., Osnove elektrotehnike I, Tehnička knjiga, Zagreb, 1975.
- [11] PAUNOVIĆ, S., Elektronički sklopovi, Školska knjiga, Zagreb, 1994.
- [12] [http://www.rossengineeringcorp.com/hv\\_dividers.htm](http://www.rossengineeringcorp.com/hv_dividers.htm)
- [13] DEER, M. J. (Department of Physics, University of Bath, Bath, BA2 7AY, UK), HIRST, G. J., SHAIKH, W. (Central Laser facility, CLRC Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, Oxon, OX11 0QX, UK), Possible Electro-optic Materials for use in Vacuum Ultra Violet Pockels Cells, 2001
- [14] <http://scienceworld.wolfram.com/physics/PockelsEffect.html>
- [15] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/hall.html>

Uredništvo primilo rukopis:  
2005-11-25

Prihvaćeno:  
2006-04-03

Manuscript received on:  
2005-11-25

Accepted on:  
2006-04-03