

voljnijem i malo vjerojatnom slučaju granična će pogreška iznositi

$$G(y) = \pm \sum \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} G(x_i) \right|, \quad (20)$$

a vrijednost y nalazit će se posve sigurno unutar vrijednosti

$$y = \bar{y} \pm |G(y)|. \quad (21)$$

Zato $G(y)$, prema (18), mnogi autori zovu *sigurnom pogreškom* ili maksimalno mogućom pogreškom (engl. limit error, maximum possible error), a dvije moguće vrijednosti (21) *sigurnim graničama vrijednosti* veličine y .

Vrlo je mala vjerojatnost da će se stvarna vrijednost posredno mjerene veličine y nalaziti baš na gornjoj ili donjoj granici propisanoj jednadžbom (21). Drugim riječima: mala je vjerojatnost da granična pogreška $G(y)$ bude tako velika kako to opisuje izraz (20). Ta je vjerojatnost to manja što je broj i izravno mjerjenih veličina x_i veći. Zato se prema DIN 1319 statistička granična pogreška izračunava formulom

$$*G(y) = \sqrt{\sum \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} G(x_i) \right|^2}. \quad (22)$$

Usporedba pokazuje da je statistička granična pogreška $*G(y)$ uvijek manja od granične pogreške, tj. $|*G(y)| < |G(y)|$. Zato su statističke granice

$$y = \bar{y} \pm |*G(y)| \quad (23)$$

uvijek uže od sigurnih granica (21).

Određivanjem razine statističke sigurnosti rezultata (23) bavi se matematička statistika primjenjena na mjerjenje. Radi orijentacije korisno je reći da sigurnost P praktički ne ovisi o brojnosti i izravno mjerjenih veličina x_i koje tvore funkciju y . Statistička sigurnost je najmanja onda kad je funkcija y umnožak ili zbroj dviju izravno mjerjenih veličina. Uobičajeni mjerni uređaji suvremene tehnike omogućuju (pri ispravnoj primjeni uređaja) da statistička sigurnost bude $\sim 0,95$ ako se granične pogreške $*G(y)$ računaju pomoću izraza (22). Kvalitetnija mjerna oprema povećava sigurnost i do $P \approx 0,99$.

Primjena granične pogreške ilustrirana je primjerom posrednog mjerjenja jalove snage Q jednofaznog potrošača na temelju istodobnog mjerjenja napona U , struje I i djelatne snage P . Garantirane relativne granične pogreške (razredi, klase instrumenata) svih triju instrumenata međusobno su jednake i iznose $e(U) = G(U)/U = e(I) = e(P) = 0,5\% = 5 \cdot 10^{-3}$. Treba izračunati koliko iznose relativna sigurna granična pogreška $e(Q) = G(Q)/Q$ i relativna statistička granična pogreška $f(Q) = *G(Q)/Q$ posredno mjerene veličine Q pri različitim kutovima φ između vektora napona U i struje I .

Računa se jednadžbama (20) i (22) u relativnom obliku. Ulogu posredno mjerene veličine (15) ima jalova snaga, $y = Q$. Budući da je $Q = UI \sin \varphi$ i $P = UI \cos \varphi$, funkcija $Q = Q(U, I, P)$ ima oblik

$$y = Q = (U^2 I^2 - P^2)^{1/2}, \quad (24)$$

pa su parcijalne derivacije

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial U} &= \frac{1}{2} \frac{1}{Q} 2UI^2 = \frac{UI^2}{Q} = \frac{I}{\sin \varphi}, \\ \frac{\partial Q}{\partial I} &= \frac{1}{2} \frac{1}{Q} 2U^2 I = \frac{U^2 I}{Q} = \frac{U}{\sin \varphi}, \\ \frac{\partial Q}{\partial P} &= \frac{1}{2} \frac{-1}{Q} 2P = -\frac{P}{Q} = -\cot \varphi. \end{aligned} \quad (25)$$

Tablica 4

GRANIČNA I STATISTIČKA GRANIČNA POGREŠKA
PRI ODREĐIVANJU JALOVE SNAGE PREMA (24)

φ	90°	60°	45°	30°	0°
$\cos \varphi$	0	0,5	0,707	0,866	1
$e(Q)$	1%	1,5%	2,5%	5,5%	∞
$f(Q)$	0,71%	0,96%	1,5%	3,2%	∞

Iz relacije (20) dobiva se granična pogreška

$$e(Q) = \pm \left\{ \left| \frac{1}{\sin^2 \varphi} e(U) \right| + \left| \frac{1}{\sin^2 \varphi} e(I) \right| + [e(P) \cot^2 \varphi] \right\}, \quad (26)$$

dok se statistička granična pogreška izračunava pomoću izraza

$$f(Q) = \sqrt{\frac{*G(Q)}{Q}} = \left\{ \left[\frac{e(U)}{\sin^2 \varphi} \right]^2 + \left[\frac{e(I)}{\sin^2 \varphi} \right]^2 + [e(P) \cot^2 \varphi]^2 \right\}^{1/2}, \quad (27)$$

koji je izведен iz jednadžbe (22) i funkcije (24). Rješenja se nalaze u tabl. 4.

LIT.: L. Jánossy, Theory and practice of the evaluation of measurements. University Press, Oxford 1965. — N. Čubranić, Teorija pogrešaka s računom izjednačenja. Tehnička knjiga, Zagreb 1967. — Organisation Internationale de Métrologie Légale, Vocabulaire de Métrologie Légale. Termes fondamentaux. OIML, Paris 1968. — M. Brezinščak, Mjerjenje i računanje u tehniči i znanosti. Tehnička knjiga, Zagreb 1971. — C. Eisenhart, Contribution to panel discussion on adjustments of the fundamental constants. National Bureau of Standards Special Publication 343, Washington 1971, 509–518. — DIN 1319, Grundbegriffe der Messtechnik, Blatt 1 (1971), Blatt 2 (1968), Blatt 3 (1972). — ГОСТ 8.011' (1972), Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений. — BS 5233 (1975), British standard glossary of terms used in metrology. — IUPAC, Nomenclature, symbols, units and their usage in spectrochemical analysis — II. Data Interpretation (Rules approved 1975). Pure and Appl. Chem., Vol. 45 (1976), 99–103. — V. Bego, Mjerjenje u elektrotehnici. Tehnička knjiga, Zagreb 1976. — M. Brezinščak, Procjenjivanje mjerne nesigurnosti. Savezni zavod za mjere i dragocjene kovine, Beograd 1976. — P. Profos, Handbuch der industriellen Messtechnik. Vulkan Verlag, Essen 1978.

M. Brezinščak

MJERNI TRANSFORMATORI, naprave koje transformiraju mjerene napone ili struje u praktički stalnom omjeru i gotovo bez faznog pomaka u vrijednosti koje su prikladne za napajanje mjernih instrumenata, zaštitnih i regulacijskih uređaja. Time se postižu sljedeće osnovne prednosti: a) mjerene struje i naponi vrlo različitih nazivnih vrijednosti transformiraju se u uvijek iste nazivne vrijednosti (redovno u struje od 1 A ili 5 A i napone od 100 V, 200 V, $100/\sqrt{3}$ V ili $200/\sqrt{3}$ V), što bitno smanjuje broj potrebnih tipova mjernih, zaštitnih i regulacijskih instrumenata i uređaja, te omogućuje da se oni serijski proizvode; b) pomoću mjernih transformatora mjereni se instrumenti i uređaji izoliraju od visokih napona u mjerrenom krugu, tako da rukovanje njima postaje neopasno, a njihova se konstrukcija pojednostavljuje jer ih ne treba izolirati za visoki napon; c) mjereni instrumenti i uređaji mogu biti prostorno veoma udaljeni od mjerenu strujnog kruga, što omogućuje da se postavljaju ondje gdje će to biti najpovoljnije za upravljanje postrojenjem, npr. u zajedničku komandnu prostoriju; d) udaljavajući mjerne instrumente i uređaje od mjerenu strujnog kruga sprečava se da na rad instrumenata utječe često snažna magnetska i električna polja mjerenoj krug; e) posebnim izvedbama mjernih transformatora zaštićuju se mjereni instrumenti i uređaji od štetnoga dinamičkog i termičkog učinka struja kratkog spoja u mjerenoj strujnom krugu; f) strujni krugovi se galvanski odvajaju, što je često prijeko potrebno u različitim mjernim i drugim sklopovima.

Mjerni se transformatori obično sastoje od jezgre izrađene od magnetskog materijala, te od primarnog i sekundarnog namota koji su međusobno odvojeni i izolirani, već prema visini napona u mjerrenom krugu. Primarni se namot uključuje u mjereni krug, a na sekundarne se priključuju mjereni instrumenti ili zaštitni uređaji. Upotrebljavaju se dvije vrste mjernih transformatora: *naponski i strujni*. Primarni namot naponskoga transformatora priključuje se paralelno trošilu kojemu se mjeri napon. Pri tom struja kroz njegov primarni namot mora biti mnogo manja od struje trošila, slično kao i struja voltmatra kad se napon izravno mjeri. Primarni namot strujnog transformatora uključuje se u seriju s trošilom, pa njime teče puna

struja kao i kroz trošilo. Pad napona na njegovu primarnom namotu treba da je malen prema naponu trošila, slično kao pad napona na ampermetru pri izravnom mjerenu struje.

Osim mjernih transformatora s jezgrom od magnetskog materijala (*induktivni transformator*), primjenjuju se i drugi sklopovi. Tako se za mjerene vrlo visokih napona već odavnina upotrebljavaju i kapacitivna djelila s dodatnim sklopovima (*kapacitivni naponski transformatori*). Za mjerene struju i napona u mrežama za vrlo visoke napone traže se i iskušavaju u novije doba različita nekonvencionalna rješenja u kojima se teškoće u izoliranju visokonaponskog od niskonaponskog kruga izbjegavaju prijenosom mjerene vrijednosti pomoću elektro-optičkih ili magneto-optičkih sklopova ili mikrovalova (*nekonvencionalni mjerni transformatori*; v. *Optoelektronika*).

NAPONSKI TRANSFORMATORI

Naponski transformatori treba da transformiraju mjerene napone u praktički stalnom omjeru i gotovo bez faznog pomača u vrijednosti koje su prikladne za napajanje mjernih instrumenata, zaštitnih i regulacijskih uređaja. Nazivni omjer transformacije k_n naponskog transformatora definiran je omjerom njegova nazivnog primarnog napona U_{1n} i nazivnoga sekundarnog napona U_{2n} :

$$k_n = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}. \quad (1)$$

Nazivni primarni napon jednak je ili linijskome nazivnom naponu mreže (npr. 35 kV) ili njezinu faznom nazivnom naponu (npr. $35/\sqrt{3}$ kV). U prvom primjeru transformator je dvo-polno izoliran, a njegov standardizirani nazivni sekundarni napon je 100 V ili, rjeđe, 200 V za prostrane sekundarne strujne krugove. U drugom primjeru transformator je jednopolno izoliran, a sekundarni nazivni napon iznosi $100/\sqrt{3}$ V ili $200/\sqrt{3}$ V. Naponska je pogreška definirana izrazom:

$$p_u = \frac{k_n U_2 - U_1}{U_1}. \quad (2)$$

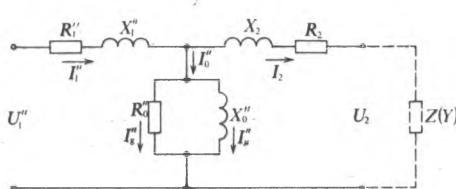
Fazna pogreška δ_u je fazna razlika između vektora primarnog i sekundarnog napona. Smjer vektora odabire se tako da savršenom transformatoru fazna razlika bude jednaka nuli. Smatra se da je fazna pogreška pozitivna ako je vektor sekundarnog napona vremenski ispred vektora primarnog napona.

Padovi napona u transformatoru, a time i njegova naponska i fazna pogreška, ovise o trošilu priključenome na sekundarne stezeljke. Vrijednost trošila izražava se pomoću njegove kompleksne vodljivosti i faktora snage:

$$Y = \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}}; \quad \cos \beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{X^2}{R^2}}}. \quad (3)$$

Opterećenje se može izraziti i pomoću prividne snage trošila pri nazivnom sekundarnom naponu (uz propisani faktor snage):

$$P = Y U_{2n}^2.$$



Sl. 1. Nadomjesna shema transformatora

S obzirom na trošilo koje se priključuje na njihovu sekundarnu stranu upotrebljavaju se *naponski transformatori za mjerenu i naponski transformatori za zaštitu*. Od prvih se redovito zahtijeva veća točnost, ali samo na uskome naponskom po-

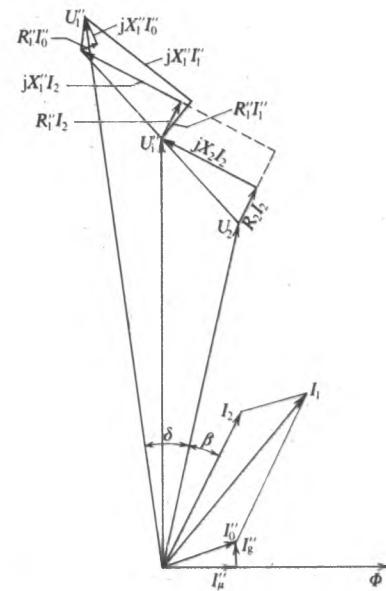
dručju. Kod drugih se zahtijeva manja točnost, ali je potrebno da ona bude održana na mnogo širemu naponskom području.

Naponska i fazna pogreška induktivnog naponskog transformatora nastaju zbog padova napona koje u njegovim djelatnim i induktivnim rasipnim otporima pobuđuje primarna i sekundarna struja, kako se to vidi iz nadomjesne sheme transformatora (sl. 1), gdje su sve vrijednosti u primarnom krugu preračunate na sekundarnu stranu (v. *Transformator*). Preračunate vrijednosti označene su sa dvije crticice:

$$U''_1 = U_1/n; \quad I''_1 = I_1 n; \quad R''_1 = R_1/n^2; \quad X''_1 = X_1/n^2,$$

gdje je n omjer broja razvoja primarnog i sekundarnog namota ($n = N_1/N_2$).

Padovi napona u naponskim transformatorima bit će manji ako je manje opterećenje transformatora, odnosno ako se transformator približi stanju praznog hoda. To pokazuje i vektorski dijagram naponskog transformatora (sl. 2) u kojem su, radi veće preglednosti, padovi napona i fazni pomaci nacrtani pretjerano veliki. Na sekundarne stezeljke naponskog transformatora priključeni su mjerni instrumenti, pa će kroz sekundarni namot teći struja opterećenja I_2 , koja općenito zaostaje za naponom U_2 za neki kut β_2 . Struja I_2 pobuđuje u sekundarnom namotu padove napona $R_2 I_2$ i $j X_2 I_2$. Ako



Sl. 2. Vektorski dijagram naponskog mjernog transformatora

se ti naponi pribroje naponu U_2 , dobiva se napon U''_1 inducirani u sekundarnom namotu. Taj napon inducirani je magnetskim tokom Φ . Njegova efektivna vrijednost iznosi:

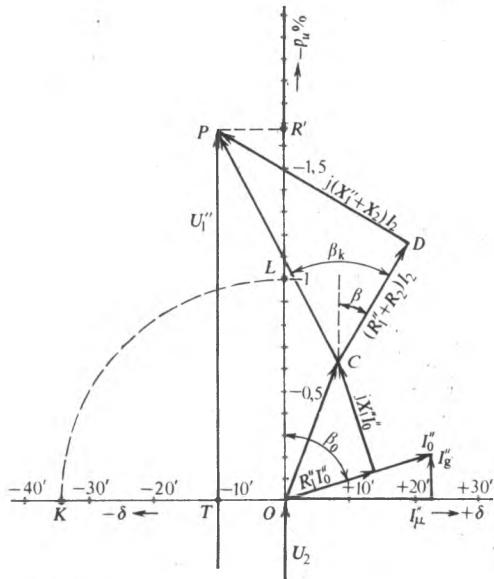
$$U''_1 = 4,44 \Phi_m N_2 f, \quad (4)$$

gdje je Φ_m vrijednost glavnog toka Φ , tj. toka zajedničkog za primarni i sekundarni namot, a f frekvencija mjerene struje. Za održavanje toka Φ bit će potrebna struja magnetiziranja I'_0 , kojoj je jalova komponenta $I''_0 = U''_1/X'_0$ u fazi s glavnim tokom Φ , a komponenta $I''_g = U''_1/R'_0$ fazno je pomaknuta za kut $\pi/2$ i pokriva gubitke u željezu. Napon U''_1 na stezeljkama primarnog namota veći je od napona U'_1 za padove napona $R'_1 I'_1$ i $j X'_1 I'_1$ u primarnom namotu. Struja I'_1 jednaka je vektorskem zbroju sekundarne struje I_2 i struje magnetiziranja I'_0 , pa se može odvojeno prikazati pad napona $(R'_1 + j X'_1) I'_0$ koji pobuđuje struju magnetiziranja u primarnom namotu, od pada napona $(R'_1 + j X'_1) I_2$ koji nastaje zbog opterećenja transformatora strujom I_2 .

U stvarnosti su padovi napona u mjernom transformatoru bitno manji od onih na sl. 2. Stoga bi takav dijagram, nacrtan u mjerilu, bio nepregledan i ne bi mogao poslužiti za kvantitativna razmatranja. Dijagram koji su već 1912. godine

uveli J. Möllinger i H. Gewecke omogućuje i kvantitativna razmatranja (sl. 3). U tom dijagramu polazilo se od realnih odnosa kod mjernih transformatora, pa se na dijagramu prikazuju samo vrhovi vektora napona U'_1 i U_2 . Vrh vektora napona U_2 u ishodištu je koordinatnog sustava kojemu je jedna os paralelna, a druga okomita na taj vektor.

Zbog maloga faznog pomaka između induciranih napona U''_1 i napona na sekundarnim stezaljkama nastaje pogreška koja se sasvim može zanemariti ako se struja I''_μ nanese okomito na U_2 , a ne na U''_1 . Isto vrijedi i za struju I''_g koja se nanosi paralelno sa U_2 . Padovi napona $R''_1 I''_0$ i $jX'_1 I''_0$, koje pobuđuje struju magnetiziranja u primarnom namotu, dodaju se sekundarnom naponu U_2 , tj. nanose se od ishodišta koordinatnog sustava paralelno, odnosno okomito na struju I''_0 (vektor \overrightarrow{OC}). Struja trošila I_2 pobuđuje pad napona $(R'_1 + R_2) I_2$ (vektor \overrightarrow{CD}) i pad napona $j(X'_1 + X_2) I_2$ (vektor \overrightarrow{DP}). U točki P vrh je vektora napona U''_1 . Zbog malog δ_u može se dio vektora U''_1 , koji se vidi na dijagramu, nacrtati paralelno s vektorom U_2 . Naponska se pogreška dobiva iz razlike duljina vektora U''_1 i U_2 , odnosno dovoljno točno iz odsječka $\overline{OR'}$ na ordinati.



Sl. 3. Möllinger-Geweckeov dijagram za napredni mjeri transformator

Fazna se pogreška dobiva iz odsječka OT na apscisi. Određivanje naponskih i faznih pogrešaka pojednostavnjuje se izborom prikladnog mjerila. Tako, uzme li se da je $U_2 = 100 \text{ V} \approx 5 \text{ m}$, izlazi da odsječak OL , duljine $0,05 \text{ m} = 5 \text{ cm}$, predviđa naponsku pogrešku $0,01$, tj. 1% , odnosno svaki centimetar ordinata $0,02$, tj. $0,2\%$. Odsječak OK , dug 5 cm , na apscisi izražava faznu pogrešku $\delta_1 \approx \tan \delta_1 = 0,05/5 = 0,01 \text{ rad}$ ili $\delta_1 \approx 34,4^\circ$. Uz određene duljine OL i OK lako se na apscisi i ordinati mogu nanjeti podjele za naponsku i faznu pogrešku. Za primjer na sl. 3 dobiva se da je $OR' = -1,67\%$ i $OT = -10'$. Uz oznake na sl. 1 i sl. 3, naponske i fazne pogreške što ih uzrokuje struja magnetiziranja (p_{u0} i δ_{u0}) i struja trošila (p_{ut} i δ_{ut}) iznose:

$$\begin{aligned} p_{u0} &= -Z'_1 Y_0 \cos(\beta_0 - \beta_1), \\ \delta_{u0} &= -Z_1 Y_0 \sin(\beta_0 - \beta_1), \end{aligned} \quad (5a)$$

ili u kutnim minutama:

$$\begin{aligned} \delta_{u0} &= -3440 Z_1 Y_0 \sin(\beta_0 - \beta_1); \\ p_{ut} &= -Z_k Y \cos(\beta_0 - \beta_k), \\ \delta_{ut} &= Z_k Y \sin(\beta_0 - \beta_k), \end{aligned} \quad (5b)$$

ili u kutnim minutama:

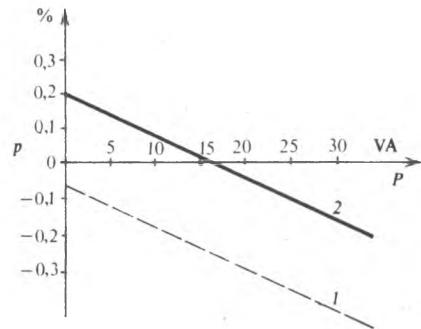
$$\delta_{ut} = 3440 Z_k Y \sin(\beta_0 - \beta_k).$$

U izrazima (5a) i (5b) je:

$$Z''_1 = \sqrt{R''_1^2 + X''_1^2}, \quad Y_0 = 1/\sqrt{R''_0^2 + X''_0^2},$$

$$Z_k = \sqrt{(R'_1 + R_2)^2 + (X'_1 + X_2)^2} \quad i \quad Y = 1/Z.$$

Iz sl. 2 i 3 vidi se da se pri omjeru zavoja koji je jednak nazivnom omjeru transformacije k_n dobiva već u praznom hodu negativna naponska pogreška, koja postaje sve negativnija što je opterećenje veće. Zbog toga se obično korigira broj zavoja, tj. oduzima se nešto zavoja primarnom namotu, tako da će se naponska pogreška raspodijeliti (sl. 4). Ona je onda pri malim opterećenjima pozitivna, a pri većim postaje negativna. Kada je korekturu broja zavoja na primarnom namotu teško provesti, jer je namotaj već izoliran debelim slojem papira.



Sl. 4. Naponska pogreška napanskog mjeri transformatora u ovisnosti o opterećenju. 1 bez korekture broja zavoja, 2 s korekturom broja zavoja

Tada se obično na sekundarne stezaljke transformatora priključi mali dodatni autotransformator, na kojem je lakše korigirati broj zavoja.

Propisi o granicama pogrešaka. Prema preporukama Internationalne elektrotehničke komisije IEC (publikacije 186 i 186A iz 1969. i 1970. godine) i prema našim standardima (JUS N.H9.121, 122 i 123 iz 1978. godine) napredni transformatori za mjerjenje razvrstani su u pet klasa točnosti: 0,1, 0,2, 0,5, 1,0 i 3,0, a napredni transformatori za zaštitu u dvije klase točnosti: 3P i 6P. Kod napenskih transformatora za mjerjenje označena je klasa točnosti brojem koji je jednak absolutnoj vrijednosti najveće dopuštene naponske pogreške p_u . Kod napenskih transformatora za zaštitu oznaka klase sastoji se od broja koji je jednak absolutnoj vrijednosti najveće dopuštene naponske pogreške p_u i slova Piza njega. Naponske i fazne pogreške napenskih transformatora za mjerjenje pri nazivnoj frekvenciji ne smiju premašiti vrijednosti iz tabl. 1 za napone $80\ldots120\%$ nazivnog napona i opterećenja od $25\ldots100\%$ nazivnog opterećenja uz induktivni faktor snage 0,8. Standardizirane su ove vrijednosti nazivnih snaga u VA:

10, 15, 25, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 i 500.

Pri tom se preporučuju one koje su deblje tiskane. Za fazne transformatore navedene vrijednosti odnose se na snagu po fazi.

Tablica 1
GRANICE NAPONSKE I FAZNE POGREŠKE NAPONSKIH TRANSFORMATORA ZA MJERENJE

Klasa točnosti	$\pm p_u$ %	$\pm \delta_u$	
		min	crad
0,1	0,1	5	0,15
0,2	0,2	10	0,3
0,5	0,5	20	0,6
1,0	1,0	40	1,2
3,0	3,0	nije propisana	nije propisana

Kod naponskih transformatora za mjerjenje sa dva odvojena sekundarna namota navodi se opseg snaga posebno za svaki namot. U takvih transformatora opterećenje jednoga namota utječe na pogrešku drugoga, jer je pad napon u djelatnom otporu R_1 i rasipnoj reaktanciji X_1 zajedničkoga primarnog namota razmjeran zbroju opterećenja obaju sekundarnih namota. Zbog toga se u propisima zahtijeva da svaki od namota mora zadovoljavati zahtjeve s obzirom na točnost za svoj opseg snage, a da pri tom drugi namot može biti opterećen bilo kojim opterećenjem od 0...100% svoje gornje granice snage.

Napomska i fazna pogreška naponskih transformatora za zaštitu ne smiju premašiti vrijednosti iz tabl. 2 pri nazivnoj frekvenciji, uz 5% nazivnog napona i pri naponu koji odgovara umnošku nazivnog napona i nazivnog faktora napona, te uz opterećenja od 25...100% nazivnog opterećenja.

Tablica 2

GRANICE NAPONSKA I FAZNE POGREŠKE NAPONSKIH TRANSFORMATORA ZA ZAŠTITU

Klasa točnosti	$\pm p_u$ %	$\pm \delta_u$	
		min	crad
3P	3,0	120	3,5
6P	6,0	240	7,0

Nazivni faktor napona ovisi o načinu uzemljenja mreže i o tome kako se na nju priključuje primarni namot naponskog transformatora. Kad je naponski transformator priključen između faza u bilo kojoj mreži, onda je nazivni faktor napona 1,2, a ako je to između faze i zemlje, bit će 1,5 ili 1,9, već prema načinu uzemljenja mreže. Kod naponskih transformatora za zaštitu, sa dva odvojena sekundarna namota, zahtijeva se, slično naponskim transformatorima za mjerjenje sa dva sekundarna namota, da svaki namot zadovolji točnost kad je drugi namot istodobno opterećen od 0...100% svoje gornje granice snage.

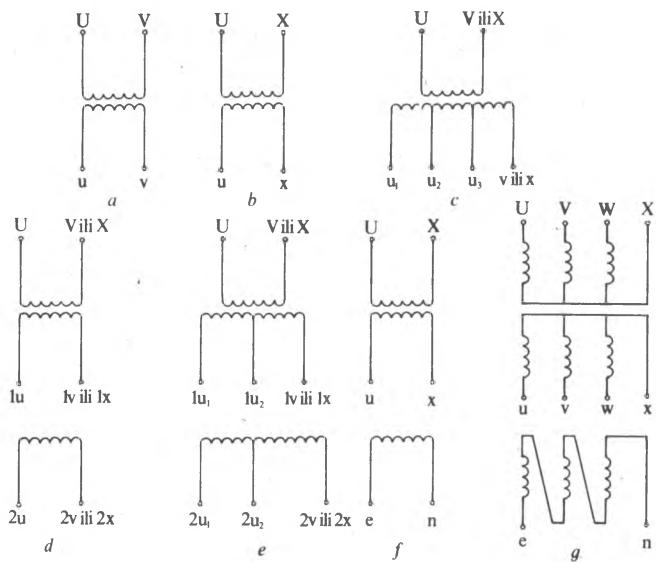
Naponskim transformatorima za zaštitu standardizirane su iste nazivne snage kao i kod naponskih transformatora za mjerjenje. Potrebna nazivna snaga i za jedne i za druge određuje se prema potrošku instrumenata ili releja koji će biti priključeni na njihovu sekundarnu stranu. Pri tom u posljednje vrijeme uvedeni mjerni pretvarači i elektronička zaštita troše mnogo manje snage od klasičnih instrumenata i elektromehaničke zaštite. Tako klasični pokazni i registracijski voltmetri troše 1...10 VA, a mjerni pretvarač koji izmjenični napon pretvara u istosmjernu struju nazivnog iznosa 10 ili 20 mA troši 1,5...7 VA, s time da se na njega može priključiti više pokaznih i registracijskih instrumenata. Slično vrijedi za pretvarače snage, frekvencije i faznog pomaka, te za elektroničke releje. Stoga u novijim postrojenjima često nisu potrebni mjerni transformatori tako velike snage kao prije.

Standardizirane vrijednosti nazivnih napona. Naponskim transformatorima nazivni je primarni napon efektivna vrijednost primarnog napona, koja se upisuje na natpisnu pločicu i prema njoj se određuju svojstva transformatora. Standardne vrijednosti tog napona jednake su nazivnim vrijednostima napona mreže prema JUS N.A2.001. Standardne vrijednosti nazivnoga primarnog napona jednofaznih transformatora priključenih između jedne faze trofazne mreže i zemlje, ili između neutralne točke mreže i zemlje, jesu $1/\sqrt{3}$ višekratnici vrijednosti mrežnih nazivnih napona.

Standardne vrijednosti nazivnoga sekundarnog napona za jednofazne napomske transformatore u jednofaznim mrežama i za one priključene između faza u trofaznim mrežama jesu 100 V, ili 200 V za prostrane sekundarne krugove. Jednofaznim naponskim transformatorima koji služe za priključak između faze i zemlje u trofaznoj mreži standardni nazivni sekundarni naponi jesu $100/\sqrt{3}$ V i $200/\sqrt{3}$ V, a namotima što se spajaju u otvoreni trokut $100/3$ V i $200/3$ V.

Označivanje stezaljki. Naponskim se transformatorima stezaljke primarnog napona označuju velikim slovima: U, V, W,

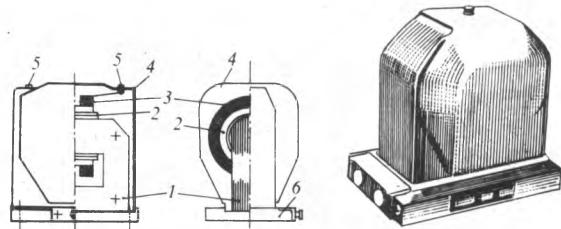
X, a one sekundarnog napona malim slovima: u, v, w i x (sl. 5). Pri tom slova U, V i W označuju potpuno izolirane stezaljke, a slovo X stezaljku za uzemljenje, kojoj je razina izolacije niža nego na ostalim stezaljkama. Slova e i n označuju stezaljke namota za spajanje u otvoren trokut. Stezaljke s istim velikim i malim slovima moraju u istom momentu imati jednak polaritet.



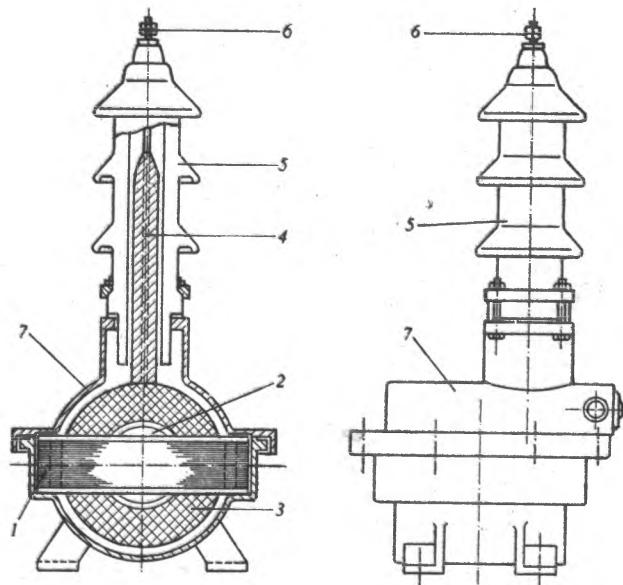
Sl. 5. Označivanje naponskog transformatora. a dvopolno izolirani jednofazni naponski transformator s jednim sekundarnim namotom, b jednopolno izolirani jednofazni naponski transformator s jednim sekundarnim namotom, c jednofazni naponski transformator s jednim sekundarnim namotom i nekoliko odvojaka, d jednofazni naponski transformator s dva sekundarna namota, e jednofazni naponski transformator s dva sekundarna namota i nekoliko odvojaka, f jednopolno izolirani jednofazni naponski transformator s namotom za otvoreni trokut, g trofazni naponski transformator s namotom u otvorenom trokutu

Izvedbe induksijskih naponskih transformatora. Napomske i fazne pogreške naponskih transformatora opadaju smanjivanjem djelatnog otpora i rasipnih reaktancija primarnog i sekundarnog namota, što daje osnovne smjernice za njegov proračun i konstrukciju. Djelatni otpor namota može se smanjiti povećanjem presjeka žice i smanjenjem broja zavoja, što uz odabranu magnetsku indukciju u željezu dovodi do povećanja presjeka jezgre. Smanjenje rasipnih reaktancija postiže se također smanjenjem broja zavoja, smanjenjem razmaka između namota i povećanjem duljine namota. Kako i struja magnetiziranja uzrokuje stanovitu pogrešku, to se ne smije odabrati previsoka magnetska indukcija u željezu.

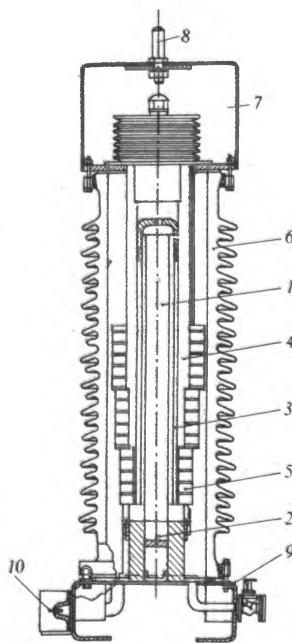
Na izvedbu naponskih transformatora bitno utječe pogonski napon. Na niskim pogonskim naponima upotrebljavaju se suhe izvedbe, a zaštita od vlage postiže se impregnacijom prikladnim izolacijskim lakovima. Za pogonske napone do 38 kV redovito se upotrebljavaju izvedbe s epoksidnim smolama. U tim izvedbama (sl. 6) primarni namot 3 je zaliven epoksidnom smolom, koja ujedno služi kao izolacija između



Sl. 6. Epoksidni dvopolno izolirani naponski transformator za nazivne napone 3...20 kV (proizvod Rade Končar). 1 jezgra, 2 sekundarni namot, 3 primarni namot, 4 izolacija od epoksidne smole, 5 priključci U i V primarnog namota, 6 priključci sekundarnog namota



Sl. 7. Jednopolno izolirani malouljni naponski transformator za nazivni napon $35/\sqrt{3}$ kV (proizvod Rade Končar). 1 jezgra, 2 sekundarni namot, 3 primarni namot s papirnom izolacijom impregniranom transformatorskim uljem, 4 izolirani izvod primarnog namota, 5 porculanski izolator, 6 visokonaponski priključak U, 7 siluminsko kućište

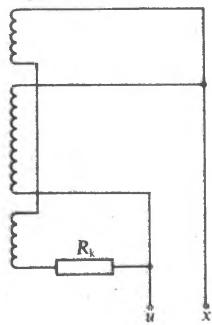


Sl. 8. Naponski mjerni transformator s otvorenim jezgrom za $110/\sqrt{3}$ kV (proizvod Rade Končar). 1 otvorena jezgra, 2 stopalo jezgre, 3 sekundarni namot, 4 izolacija između primarnog i sekundarnog namota, 5 primarni namot, 6 porculanski izolator, 7 konzervator, 8 visokonaponski priključak, 9 siluminsko kućište, 10 priključci sekundarnog namota i donji priključak primarnog namota

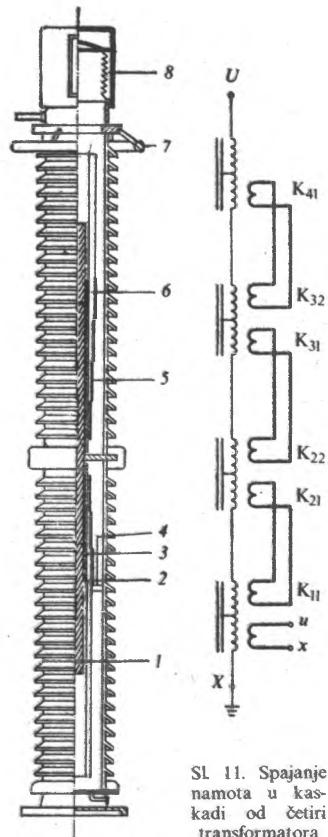
tog namota, te sekundara i jezgre. Priključci 5 na primarni namot također su zaštićeni epoksidnom smolom.

Za pogonske napone od nekoliko kilovolta pa do najviših napona upotrebljavaju se uljne izvedbe, gdje se jezgra s primarnim i sekundarnim namotom nalazi u kotlu napunjeno transformatorskim uljem. Na sl. 7 prikazana je uljna izvedba naponskog transformatora za mjerjenje faznih napona od $35/\sqrt{3}$ kV. Pri visokim naponima upotrebljavaju se naponski transformatori s otvorenim jezgrom (sl. 8) u obliku stupa. Jezgra je štapastog oblika i na dnu ima stopalo koje smanjuje magnetski otpor. Otvorenom jezgom mnogo se smanjuju dimenzije transformatora i pojednostavljuje izoliranje, jer ne treba izolacije prema jarmu. Zbog malog promjera jezgre s namotima može se čitav transformator smjestiti u izolator od porculana, koji je tek nešto veći od običnog potpornog izolatora za isti napon. Otvorena jezgra uzrokuje veću struju magnetiziranja, koja ipak ne prelazi razumne granice. Fazna pogreška koju uzrokuje pad napona zbog povećane struje

magnetiziranja može se otkloniti prikladnim kompenzacijskim spojevima. Tako se u tu svrhu upotrebljava sekundarni namot podijeljen u tri dijela (sl. 9). Dva su krajnja spojena u seriju, a zatim su paralelno povezana sa srednjim dijelom. Obje paralelne grane imaju podjednak broj zavoja, pa, jer je indukcija u sredini stupa veća od one na njegovim krajevima, teku između grana struje izjednačenja. Te struje ujednačuju indukciju u dijelu stupa koji je obuhvaćen sekundarnim namotom i dobiva se znatno jednoličnija raspodjela napona uzduž namota, što je povoljno s obzirom na naprezanje izolacije. Osim toga, fazni pomak tih struja prema primarnom namotu praktički je $\pi/2$, pa se pruža jednostavna mogućnost kompenzacije fazne pogreške. Struje izjednačenja teku preko otpornika prikladna iznosa R_k i u njemu uzrokuju pad na napon kojim se kompenzira fazna pogreška. Za izolaciju primarnog od sekundarnog namota i jezgre služe cilindri tankog papira s metaliziranim ulošcima zbog ujednačivanja dielektričnih naprezanja u izolaciji. Poteškoće u izoliranju primarnog namota transformatora smanjuju se ako je sredina tog namota povezana s njegovom jezgrom (sl. 10). Tu se sekundarni namot nalazi na donjem kraju jezgre, pa je još potreban i kompenzacijski namot kojim se ujednačuje inducirani napon u zavojima uzduž cijelog namota. Pri vrlo visokim naponima spaja se često više transformatora u kaskadu. Spoj četiriju transformatora u kaskadu prikazan je na sl. 11. Primarni namoti spojeni su u seriju, a sredina svakog namota povezana je s njegovom jezgrom. Zbog toga je najveći napon između namota i jezgre samo jedan dio mjerene napon. Kod četiriju transformatora u kaskadnom spoju on iznosi samo osminu mjerene naponu, što veoma olakšava izoliranje primarnog namota. Takav način spajanja uzrokuje potencijalnu razliku između jezgri transformatora, pa ih valja međusobno razmaknuti i izolirati. Obično je, zbog lakšeg transporta, svaki pojedini transformator hermetički zatvoren u vlastitome porculanskom izolatoru, pa se na terenu kaskada montira slažući jedan transformator na drugi. Transformatori su međusobno još povezani pomoću kompenzacijskih namota: K_{11} , K_{21} , K_{22} , K_{31} , K_{32} i K_{41} . Bez njih bi se mjereni napon jednolikou raspodijelio na primarne namote transformatora samo ako sekundarni namot nije opterećen.

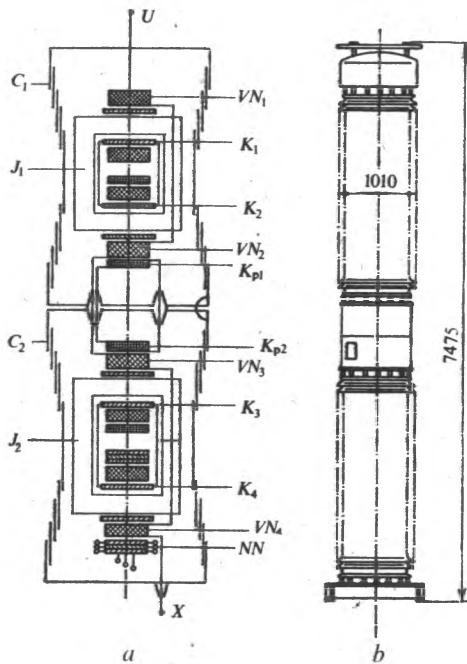


Sl. 9. Trodjelni sekundarni namot s kojim se korigira fazna pogreška pomoću struje izjednačenja u paralelnim grana sekundarnog namota (proizvod Rade Končar)



Sl. 11. Spajanje namota u kaskadi od četiri transformatora

Optereti li se sekundarni namot, smanjuje se napon na donjem transformatoru, a raste napon na ostalim transformatorima. Stoga bi se sekundarni namot smio samo malo opteretiti, dakle za mjerjenje bi preostala samo mala snaga. Kompenzacijski namoti poboljšavaju raspodjelu napona između transformatora u kaskadi, jer zbog nejednolike raspodjele napona nastaju struje izjednačenja u kompenzacijskim namotima, koje smanjuju razlike. Zbog takva djelovanja kompenzacijskih namota može se više opteretiti sekundarni namot. U nekim izvedbama primarni je namot pojedinog transformatora podijeljen na dva dijela koja su namotana na suprotnim stupovima iste jezgre (sl. 12). Kako bi se smanjilo rasipanje između tih dvaju dijelova, upotrebljavaju se kompenzacijski namoti: K_1 , K_2 , K_3 i K_4 , a transformatori se međusobno čvršće povezuju kompenzacijskim namotima K_{p1} i K_{p2} . Tim namotima osigurana je jednolika raspodjela namota u primarnom namotu pri mrežnoj frekvenciji, međutim pri naglim promjenama napona njegovu podjelu diktiraju kapaciteti između dijelova namota i prema zemlji. Da bi se i tada osigurala jednolika raspodjela, dodani su kapaciteti C_1 i C_2 koje tvore papirni ovoj s metaliziranim folijama.



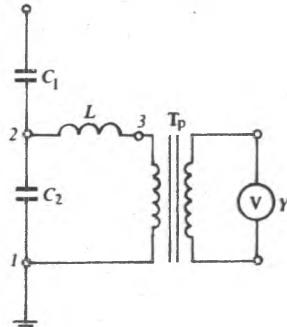
Sl. 12. Kaskadni naponski transformator za 750 kV. a raspored namota u kaskadi od dva transformatora s dvo-djelnim primarnim namotom, b vanjski izgled, $VN_1 \dots VN_4$ primarni namot u četiri dijela, NN sekundarni namot, $K_1 \dots K_4$, K_{p1} i K_{p2} kompenzacijski namoti, J_1 i J_2 jezgre gornjeg i donjeg transformatora, C_1 i C_2 kapacitivne obloge koje ujednačuju podjelu udarnog napona

Za precizna laboratorijska mjerena izrađuju se posebni naponski transformatori s malim naponskim i faznim pogreškama, najčešće prespojivi za različite napone. Pri mjerenu naponskih i faznih pogrešaka naponskih transformatora usporednom metodom upotrebljavaju se *etalonski transformatori*. Odlikuju se vrlo malim naponskim i faznim pogreškama od, npr., 0,02% i $\pm 0,5\%$.

Podjelu priključenog napona u vrhunskoj točnosti omogućuju *induktivna djelila*. Tu se podjela priključenog napona, najčešće na deset jednakih dijelova, postiže tako što se deset vodiča istog presjeka najprije međusobno isprepletu, a onda omotaju oko prstenaste jezgre odlične magnetske vodljivosti. Nakon toga vodiči se spoje u seriju, a na spojnim mjestima se izvedu odvojci. Zbog takva načina namatanja induciranju se u svim dionicama praktički potpuno jednaki naponi. Kako su djelatni i rasipni otpori dionica također potpuno izjednačeni, struja magnetiziranja uzrokuje u njima podjednake padove

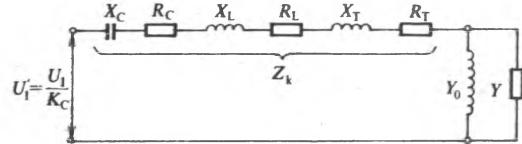
naponu, što sve omogućuje da pogreška pri podjeli napona ne prelazi, npr., 10^{-7} . Spajanjem više takvih djelila u kaskadu može se namještati omjer napona čak i na osam mesta.

Kapacitivni naponski transformatori. Za mjerjenje visokih mrežnih napona upotrebljavaju se često i kapacitivni naponski transformatori. Njihov je glavni dio visokonaponski kondenzator kapaciteta C_1 (sl. 13) koji je spojen u seriju s kondenzatorom mnogo većeg kapaciteta C_2 . Zbog toga pad napona na kapacitetu C_2 iznosi obično oko $10 \dots 20$ kV. Na



Sl. 13. Principijelna shema kapacitivnog naponskog transformatora

njega je preko prigušnice induktivnosti L i pomoćnog transformatora T_p priključeno trošilo admitancije Y . Nadomjesna shema kapacitivnog naponskog transformatora prikazana je na sl. 14.



Sl. 14. Nadomjesna shema kapacitivnog naponskog transformatora

Tu su sve vrijednosti preračunate na napon U'_1 kapaciteta C_2 u neopterećenom stanju: $U'_1 = U_1/K_C$, gdje je $K_C = 1 + C_2/C_1$. Sa X_C označena je reaktancija kapaciteta C_1 i C_2 spojenih paralelno, a sa R_C otpor zbog gubitaka u oba kondenzatora:

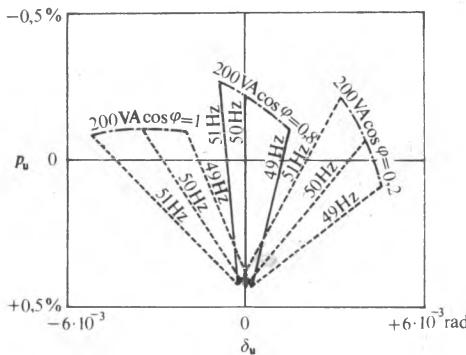
$$X_C = X_{C1} X_{C2} / (X_{C1} + X_{C2}) \quad i \quad R_C = X_C \tan \delta_C.$$

Dalje su u nadomjesnoj shemi sa X_L i R_L označeni reaktančija i djelatni otpor svitka kojemu je induktivitet L , a sa X_T i R_T reaktancija i otpor transformatora T_p u kratkom spoju. Y_0 označuje admitanciju transformatora T_p zbog djelatnih i jalovih gubitaka u njegovoj jezri, a Y' admitanciju trošila, preračunano na primarnu stranu transformatora ($Y' = Y N_2^2 / N_1^2$). Redovno je Y_0 mnogo manje od Y' , pa se obično može zanemariti. Zadatak je prigušnice da na minimum svede unutrašnju impedanciju Z_k kapacitivnog transformatora, što se postiže kada je $X_L = X_C - X_T$. Tada je $Z_k = R_C + R_L + R_T = R_K$, a napomska i fazna pogreška zbog priključenog trošila iznose:

$$p_{ut} = -R_K Y' \cos \beta \quad i \quad \delta_{ut} = R_K Y' \sin \beta. \quad (6)$$

Uvjet $X_2 = X_C - X_T$ može se ostvariti samo pri nekoj određenoj frekvenciji, pa su zbog toga pogreške ovisne o frekvenciji (sl. 15). Pogreške zbog priključenog trošila i njihova ovisnost o frekvenciji gotovo su obrnuto razmjerne omjeru transformacijske transformatora, pa je zbog toga povoljno da taj omjer bude što veći. Ipak, zbog konstruktivnih razloga njegov primarni napon obično ne prelazi 20 kV. Iz nadomjesne sheme kapacitivnog naponskog transformatora (sl. 14) vidi se da su kapacitet X_C i induktivnost X_L i X_T spojeni u seriju, a pri serijskom spoju kondenzatora i prigušnika s nelinearnom karakteristikom nastaju u određenim okolnostima

snažne oscilacije, koje mogu uzrokovati njihovo oštećenje zbog pretjeranog zagrijavanja ili prepuna. Uobičajeni naziv za tu pojavu je *ferorezonancija*, koja se kod kapacitivnih transformatora prigušuje ugradnjom zaštitnih iskrišta i prikladnih pomoćnih sklopova.



Sl. 15. Kompleksni dijagram pogrešaka kapacitivnog naponskog transformatora (proizvod Rade Končar), za nazivni primarni napon do $400000/1/3$ V i nazivnu snagu 200 VA, klase točnosti 0,5 i pogonskog kapaciteta $4200 \text{ pF} \pm 10\%$

Umjesto sklopa s prigušnicom i transformatorom (sl. 13) primjenjuju se rješenja u kojima se na kondenzator C_2 priključuje ulaz električnog pojačala, a na njegov izlaz mjerni instrumenti ili zaštita. Ulazni otpor električnog pojačala vrlo je velik, pa kapacitet djelila može biti mnogo manji nego kod konvencionalnoga, kapacitivnoga naponskog transformatora. Time se bitno pojednostavljuje izvedba visokonaponskog kondenzatora C_1 , osobito u oklopljenim rasklopnim postrojenjima ispunjenim stlačenim plinom (redovito je to sumpor-heksafluorid SF_6 , koji već uz tlak $\sim 0.2 \text{ MPa}$ ima visoku dielektričnu čvrstoću). Tu su njegove elektrode dva kratka koaksijalna metalna valjka između kojih je sumpor-heksafluorid.

STRUJNI TRANSFORMATORI

Strujni transformatori mjerenu struju transformiraju u praktički stalnom omjeru i gotovo bez faznog pomaka u vrijednost koja je prikladna za napajanje mjernih instrumenata, te zaštitnih i regulacijskih uređaja. Nazivni omjer transformacije K_n strujnog transformatora definiran je omjerom njegove nazivne primarne struje I_{1n} i nazivne sekundarne struje I_{2n} :

$$K_n = I_{1n}/I_{2n}. \quad (7)$$

Strujni se transformatori u svom radu približavaju idealnom transformatoru s obzirom na jednakost primarnih i sekundarnih amperzavoja ($I_1 N_1 = I_2 N_2$). Odstupanja ipak imaju, jer je za protjecanje sekundarne struje potreban određen napon inducirani u sekundarnom namotu, koji služi da bi se pokrivali padovi napona u tom namotu i priključenom trošilu. Za induciranje tog napona potreban je određen dio amperzavoja primarnog namota, koji nije kompenziran sekundarnim amperzavojima. Taj dio amperzavoja izravan je uzrok strujnoj i faznoj pogrešci, pa mora biti to manji što je veća potrebna točnost. Zato se u strujnim transformatorima većinom upotrebljavaju jezgre od magnetskih materijala velike permeabilnosti i odabiru se niže magnetske indukcije. Zbog istog razloga ne smije otpor priključenog trošila premašiti određenu, redovno nisku vrijednost. Ako bi sekundarne staze transformatora ostale otvorene, cijela bi primarna struja služila za magnetiziranje željeza, što bi uzrokovalo vrlo visoku magnetsku indukciju, a stoga i visok napon na sekundarnom namotu, čak opasan za život. Visoka indukcija uzrokuje velike gubitke u željezu i pretjerano zagrijavanje. Zbog toga strujnom transformatoru sekundarne staze ne smiju u pogonu nikad ostati otvorene.

Opterećenje strujnog transformatora izražava se pomoću prividnog otpora Z priključenoga sekundarnog kruga i njegova faktora snage $\cos\beta$ ili, češće, pomoću prividne snage pri-

ključenoga strujnog kruga pri nazivnoj sekundarnoj struci i faktoru snage $\cos\beta$:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \cos\beta = 1/\sqrt{1 + X^2/R^2} \quad (8)$$

$$\tan\beta = X/R \quad P = I_{2n}^2 Z.$$

Opterećenje je jednako nuli ($Z = 0$) kad su strujnom transformatoru kratko spojene sekundarne staze.

S obzirom na trošila koja se priključuju na sekundarne staze transformatora, upotrebljavaju se *strujni transformatori za mjerjenje* i *strujni transformatori za zaštitu*. Od njih se zahtijeva različito vladanje pri kratkim spojevima u mreži, kad primarna struja u strujnom transformatoru poraste na vrijednosti mnogostruko veće od nazivne struje. U strujnim transformatorima za mjerjenje trebalo bi da sekundarna struja pri kratkom spoju samo ograničeno poraste, kako bi se zaštitali instrumenti. Obratno, strujni transformatori za zaštitu morali bi na sekundarnu stranu vjerno prenijeti i struje mnogostruko veće od nazivnih. Za jedne i druge strujne transformatore definirana je strujna pogreška na ovaj način:

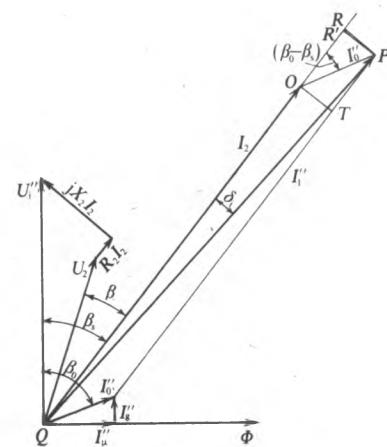
$$p_i = \frac{K_n I_2 - I_1}{I_1}. \quad (9)$$

Fazna pogreška δ_i fazna je razlika između vektora primarne i sekundarne struje. Smjer vektora odabire se tako da u idealnom transformatoru fazna razlika bude jednaka nuli. Smatra se da je fazna pogreška pozitivna ako je vektor sekundarne struje vremenski ispred onoga u primarnoj struci.

Budući da su moguća izobličenja sekundarne struje pri povećanoj primarnoj struci zbog utjecaja zasićenja u jezgri, kod strujnih se transformatora za zaštitu definira složena pogreška p_{is} koja je efektivna vrijednost razlike između trenutnih vrijednosti primarne i sekundarne struje pomnožene nazivnim omjerom transformacije:

$$p_{is} = \frac{1}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n i_2 - i_1)^2 dt}. \quad (10)$$

Rad strujnog transformatora može se objasniti pomoću nadomjesne sheme transformatora, upotrijebljene već pri razmatranju naponskih transformatora (sl. 1). Ako se polazi od te sheme, dobiva se vektorski dijagram za strujni transformator (sl. 16).



Sl. 16. Vektorski dijagram strujnog transformatora

Sekundarna struja I_2 uzrokuje pad napona $R_2 I_2$ u djelatnom otporu i $jX_2 I_2$ u rasipnoj reaktanciji sekundarnog namota, te pad napona U_2 na priključenom trošilu $Z = R + jX$. Tim padovima napona drži ravnotežu napon U_1'' inducirani u sekundarnom namotu:

$$U_1'' = I_2(R_2 + jX_2 + Z) = I_2 Z_s. \quad (11)$$

Pri tom je Z_s ukupna impedancija sekundarnog kruga:

$$Z_s = \sqrt{(R + R_2)^2 + (X + X_2)^2} \quad \tan \beta_s = (X + X_2)/(R + R_2). \quad (12)$$

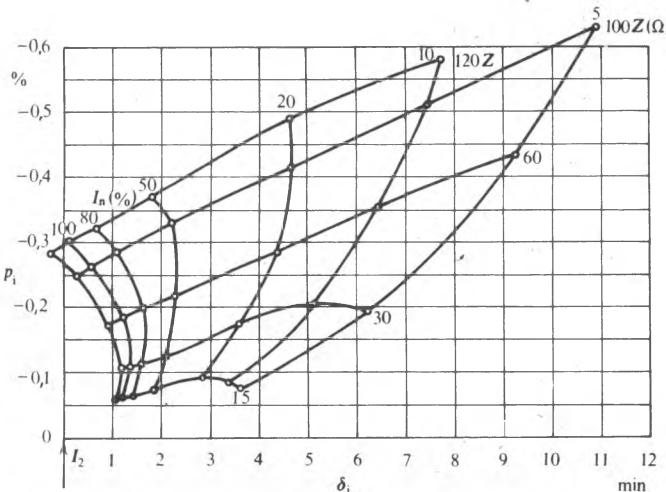
S tokom Φ u fazi je komponenta I''_u struje magnetiziranja I''_0 , a djelatna je komponenta I''_g struje magnetiziranja u fazi s naponom U''_i . Vektorski zbroj struja I_2 i I'_0 daje primarnu struju I'_1 , reduciranu na sekundarnu stranu. Ako je nazivni omjer transformacije K_n jednak omjeru broja zavoja N_2/N_1 , strujna pogreška iznosi

$$p_i = \frac{I_2 - I'_1}{I'_1} = \frac{\overline{QO} - \overline{QP}}{\overline{QP}} = -\frac{\overline{OR}}{\overline{QR}} \approx -\frac{\overline{OR'}}{\overline{QR}}. \quad (13)$$

Budući da je $\overline{OR'} = \overline{OP} \cos(\beta_0 - \beta_s) = I'_0 \cos(\beta_0 - \beta_s)$, to je za izračunavanje pogrešaka strujnog transformatora potrebno poznavati struju magnetiziranja I'_0 i njegov fazni pomak β_0 prema induciranom naponu U''_i . Pri tom je $U''_i = I_2 Z_s = 2\pi f B_m S_{Fe} N_2$, gdje je B_m tjemena vrijednost indukcije u magnetskoj jezgri, S_{Fe} njegov efektivni presjek, a N_2 broj zavoja sekundarnog namota. Indukciji B_m odgovara, već prema vrsti upotrijebljene magnetske materijala, određena efektivna vrijednost jakosti magnetskog polja H , pa ako se označi magnetska permeabilnost $\mu_\sigma = B_m/H$, slijedi: $I'_0 = B_m l_{Fe}/(\mu_\sigma N_2)$, gdje je l_{Fe} duljina silnica u magnetskoj jezgri. Dalje se uvrštenjem dobiva:

$$p_i = -\frac{C Z_s}{\mu} \cos(\beta_0 - \beta_s) \quad \text{i} \quad \delta_i = \frac{C Z_s}{\mu} \sin(\beta_0 - \beta_s), \quad (14)$$

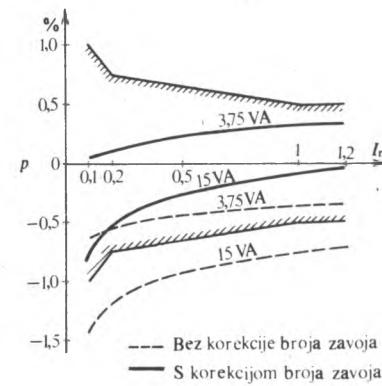
gdje je $C = l_{Fe}/(\sqrt{2}\pi f N_2^2 S_{Fe})$. Iz ovih se izraza razabire da s povećanjem impedancije Z_s sekundarnog kruga rastu strujna i fazna pogreška. Pogreške ovise i o iznosu mjerene struje, jer je njemu razmjerna indukcija u jezgri, a permeabilnost se mijenja s indukcijom (sl. 17). Ako se broj zavoja strujnog



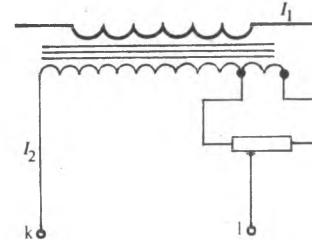
Sl. 17. Kompleksni dijagram strujne i fazne pogreške ovisno o struci pri raznim otporima u sekundarnom krugu

transformatora tako odabere da umnožak nazivne primarne struje i broja zavoja u primarnom namotu bude potpuno jednak umnošku nazivne sekundarne struje i broja zavoja u sekundarnom namotu $I_{1n} N_1 = I_{2n} N_2$, dobit će se redovito negativna strujna pogreška, jer je zbog struje magnetiziranja sekundarna struja I_2 manja od reducirane primarne struje I''_i (crtkano prikazane krivulje pogrešaka na sl. 18). Očito je da se uže granice pogrešaka mogu postići ako strujna pogreška bude dijelom negativna, a dijelom pozitivna. Za to je dovoljno jednomo od namota korigirati broj zavoja. Redovno je to sekundarni namot, koji obično ima mnogo više zavoja od primarnoga. Njemu valja smanjiti broj zavoja da se dobije veća sekundarna struja. Ipak se taj jednostavni postupak ne može primijeniti u svim prilikama, jer promjena broja zavoja za samo

jedan zavoj često daje pregrubu korekciju. U takvima prilikama upotrebljavaju se različita rješenja koja djeluju kao da se broj zavoja promjenio za manje od jednog zavoj. Takvo je rješenje prikazano na sl. 19. Jedan ili više zavoja sekundarnog namota premosti se otpornim djelilom, a na njegov odvojak spoji se trošilo strujnog transformatora. Struja trošila I_2 granat će se na jednu i drugu stranu djelila, pa će kroz premošćeni dio namota teći samo jedan dio struje trošila, koji se može ugoditi izborom odvojka na djelilu. Na sl. 16 je radi veće preglednosti pretjerano povećana struja magnetiziranja. Ako bi se ona u tom dijagramu nacrtala u mjerilu, dijagram bi bio nepregledan i ne bi mogao poslužiti za kvantitativna razmatranja. Stoga se i ovdje prema Möllinger-Geweckeju, slično kao i za naponske transformatore, upotrebljava dijagram u kojem je ishodište koordinatnog sustava premješteno na vrh vektora struje I_2 , a smjer se osi ordinata poklapa sa smjerom vektora struje I_2 .



Sl. 18. Strujna pogreška strujnog transformatora u ovisnosti o vrijednosti struje i opterećenju



Sl. 19. Način korigiranja strujne pogreške pomoću potenciometra

Propisi o granicama pogrešaka strujnih transformatora. Strujni transformatori na koje se priključuju mjeri instrumenti (strujni transformatori za mjerjenje) razvrstani su prema preporukama Međunarodne elektrotehničke komisije (IEC, publikacija 185, prvo izdanje 1966, II dio) i prema Jugoslavenskom standardu (JUS N.H9.102, II-1972) u šest klasa točnosti: 0,1, 0,2, 0,5, 1, 3 i 5. Oznaka klase točnosti jednaka je po apsolutnoj vrijednosti granici strujne pogreške u postocima pri nazivnoj struci i nazivnom opterećenju. Tako su strujnim transformatoru

Tablica 3
GRANICE POGREŠAKA STRUJNIH TRANSFORMATORA
ZA MJERENJE

Klasa točnosti	± granice strujnih pogrešaka u % pri				± granice faznih pogrešaka u min pri			
	0,1 I_n	0,2 I_n	1,0 I_n	1,2 I_n	0,1 I_n	0,2 I_n	1,0 I_n	1,2 I_n
0,1	0,25	0,2	0,1	0,1	10	8	5	5
0,2	0,5	0,35	0,2	0,2	20	15	10	10
0,5	1,0	0,75	0,5	0,5	60	45	30	30
1	2	1,5	1,0	1,0	120	90	60	60
3	0,5...1,2 I_n : 3,0%				nisu propisane			
5	0,5...1,2 I_n : 5,0%				nisu propisane			

klase točnosti 1 granice strujne pogreške $\pm 1\%$ pri nazivnoj struci i nazivnom opterećenju. Ovisnost granica strujne i fazne pogreške o primarnoj struci prema navedenim preporukama i standardu prikazana je u tabl. 3. U njima je još definirana i maksimalna struja kao najveća efektivna vrijednost primarne struje pri kojoj pogreške strujnog transformatora za mjerjenje ostaju u granicama propisanim za 120% nazivne primarne struje. Strujni transformatori klase od 0,1...1 kojima je maksimalna struja 150% ili 200% nazivne primarne struje nazivaju se strujnim transformatorima s proširenim mjernim opsegom. Oni još moraju ispunjavati uvjet da njihova nazivna trajna termička struja bude jednaka maksimalnoj struci.

Strujna i fazna pogreška transformatora klase točnosti 0,1, 0,2, 0,5 i 1 ne smiju premašiti vrijednosti u tabl. 3 za sve vrijednosti opterećenja od 25 do 100% nazivnog opterećenja, a transformatora klase 3 i 5 za sve vrijednosti opterećenja od 50 do 100% nazivnog opterećenja. Trošilo koje je upotrijebljeno pri ispitivanju mora imati induktivni faktor snage 0,8. Dručje je ako mu je snaga manja od 5 VA. Tada faktor snage treba da bude jednak jedinici. Opterećenje izraženo u voltamperima nipošto ne smije biti manje od 1 VA. Za klase točnosti 3 i 5 granice faznih pogrešaka nisu propisane.

U nadopuni publikacije 185 Međunarodne elektrotehničke komisije (IEC), izašloj u studenom 1977. godine, navode se granice pogrešaka pri $0,05I_{1n}$, a ne pri $0,1I_{1n}$, koje za klase točnosti 0,1, 0,2, 0,5 i 1 redom iznose 0,4, 0,75, 1,5 i 3,0%, odnosno 15', 30', 90' i 180'. Osim toga, uvedeni su i strujni transformatori za specijalnu namjenu s klasama točnosti 0,2s i 0,5s. Za klasu 0,2s granice strujnih i faznih pogrešaka pri strujama $0,01I_{1n}$, $0,05I_{1n}$ i $0,2I_{1n}$ redom su 0,75, 0,35 i 0,2% odnosno 30', 15' i 10', a za 0,5s iznose 1,5, 0,75 i 0,5%, odnosno 90', 45' i 30'. Pri strujama $1I_{1n}$ i $1,2I_{1n}$ granice pogrešaka su kao i u tabl. 3 za klase točnosti 0,2 i 0,5.

Nazivna se opterećenja obično izražavaju u voltamperima prema izrazu

$$P_n = I_{2n}^2 Z_n. \quad (15)$$

Tu je I_{2n} nazivna sekundarna struja, a Z_n nazivna impedancija trošila. Standardne vrijednosti nazivnih snaga koje imaju strujni transformatori za mjerjenje i pripadne impedancije trošila za nazivne struje 1...5 A prikazane su u tabl. 4

Tablica 4

STANDARDNE VRIJEDNOSTI NAZIVNIH SNAGA STRUJNIH TRANSFORMATORA ZA MJESENJE

Nazivna snaga (VA)	2,5	5	10	15	30
Nazivna impedancija (Ω) pri nazivnoj struci od 1 A	2,5	5	10	15	30
Nazivna impedancija (Ω) pri nazivnoj stuci od 5 A	0,1	0,2	0,4	0,6	1,2

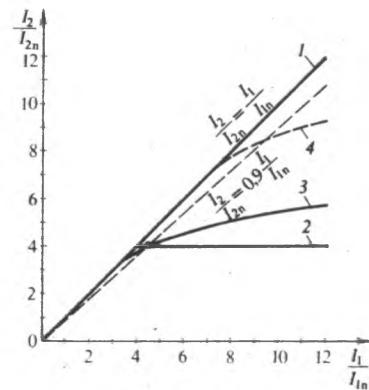
Ako impedancija trošila u transformatoru klase točnosti od 0,1...1 ne doseže četvrtinu nazivne vrijednosti, preporučuje se u seriju dodati prikladnu impedanciju, kako bi transformator bio opterećen trošilom za koje vrijede propisane granice pogrešaka. Osim toga, time se postiže povoljnije vladanje transformatora pri povećanoj primarnoj struci.

Pri tipnim ispitivanjima strujnih transformatora za mjerjenje klase točnosti 0,1...1 provjerava se točnost za sve vrijednosti primarne struje iz tabl. 3 uz 25% i 100% nazivnog opterećenja. Transformatorima klase točnosti 3 i 5 provjerava se točnost pri dvjema vrijednostima primarne struje prema tabl. 3, uz 50% i 100% nazivnog opterećenja.

U pojedinačnim ispitivanjima strujnih transformatora može se mjeriti pogrešaka izvesti s manjim brojem vrijednosti struja u tabl. 3 i samo jednim opterećenjem, ako je na osnovi toga i prethodnih tipnih mjerena moguće zaključiti da transformator zadovoljava granice pogrešaka prema tabl. 3.

Ponašanje strujnog transformatora pri povećanoj primarnoj struci. Pri kratkim spojevima u mreži porast će često primarna struja strujnog transformatora na vrijednost mnogostruko veću od nazivne vrijednosti. To pobuduje povećanje sekundarne struje, sekundarnog napona i magnetske indukcije u jezgri.

Ako primarna struja toliko naraste da indukcija prijeđe koljeno na krivulji magnetiziranja, znatno će porasti struja magnetiziranja, a time i pogreška transformatora. Kod strujnih transformatora predviđenih za priključak mjernih instrumenata nastoji se da sekundarna struja pri kratkom spoju što manje naraste, kako bi se zaštitili instrumenti od oštećenja. Tu se upotrebljavaju transformatori s relativno visokom magnetskom indukcijom u jezgri pri nazivnoj struci, pa već na manjim strujnim preopterećenjima dolazi do zasićenja u željezu. Kad je jezgra jednom zasićena, dalji porast primarne struje pobuduje mnogo manje povećanje sekundarne struje. Ovisnost sekundarne struje o primarnoj prikazana je na sl. 20. Na ordinati je omjer između stvarne I_2 i nazivne sekundarne struje I_{2n} , a na apscisi omjer između stvarne I_1 i nazivne primarne struje I_{1n} , da bi se eliminirao utjecaj omjera transformacije. Prikazana ovisnost naziva se i nadstrujnom karakteristikom strujnog transformatora. Pravac 1 predočavao bi nadstrujnu karakteristiku kad bi strujna pogreška bila jednaka nuli, a krivulja 2 idealnu karakteristiku strujnog transformatora za mjerjenje. Krivulja 3 prikazuje stvarnu karakteristiku jednoga takvog transformatora.



Sl. 20. Nadomesna karakteristika strujnog transformatora.
1 idealna nadstrujna karakteristika strujnog transformatora za zaštitu, 2 idealna nadstrujna karakteristika strujnog transformatora za mjerjenje, 3 i 4 strujna karakteristika strujnog transformatora za mjerjenja pri cijelom i polovičnom nazivnom opterećenju

Vladanje strujnog transformatora za mjerjenje u području struja iznad nazivne karakterizirano je nazivnom *sigurnosnom strujom* I_{1s} . To je vrijednost primarne struje kod koje, uz teret jednak nazivnom, umnožak efektivne vrijednosti sekundarne struje I_{2s} i nazivnog omjera transformacije K_n nije veći od $0,9I_{1s}$:

$$K_n I_{2s} \leq 0,9I_{1s} \text{ ili } I_{2s}/I_{2n} \leq 0,9I_{1s}/I_{1n} = 0,9F_s. \quad (16)$$

Omjer između nazivne sigurnosne struje I_{1s} i nazivne primarne struje I_{1n} naziva se faktorom *sigurnosti*: $F_s = I_{1s}/I_{1n}$. Njegove standardne vrijednosti su: $F_s = 5$ i $F_s = 10$. Na sl. 19 crtkano je ucrtan pravac koji prikazuje $I_2/I_{2n} = 0,9I_1/I_{1n}$. Apscisom točke u kojoj se siječe nadstrujna karakteristika s tim pravcem određen je najmanji faktor sigurnosti koji još zadovoljava spomenuti izraz. Za strujni transformator kojemu je nadstrujna karakteristika prikazana krivuljom 3, faktor sigurnosti iznosi 4,5 ili više.

Instrumenti su u sekundarnom krugu, kad je kratki spoj u mreži, bolje zaštićeni što je faktor sigurnosti manji. Ne smije se pri tom zaboraviti da se faktor sigurnosti odnosi na transformatore opterećene nazivnim opterećenjem. Ako je priključeni teret manji od nazivnoga, potreban je manji inducirani napon, pa do zasićenja jezgre dolazi kod većih struja (krivulja 4 na sl. 20). Zbog toga je potrebno, ako priključeni instrumenti nemaju dovoljnu impedanciju, priključiti u seriju dodatnu impedanciju.

Strujni transformatori za zaštitu treba da ispravno rade baš pri preopterećenju, odnosno kratkom spoju u mreži. Zato bi pravac 1 na sl. 20 predstavljao idealnu karakteristiku takva

strujnog transformatora. Za ispravan rad određene vrste zaštite važno je da se ograniče viši harmonički članovi sekundarne struje koje uzrokuje nelinearna krvulja magnetiziranja, osobito u blizini zasićenja. Ako je udio viših harmoničkih članova velik, nije moguće vektorsko prikazivanje, a ni rastavljanje ukupne pogreške na strujnu i faznu. To je razlog da se kod strujnih transformatora za zaštitu definira složena pogreška P_{is} .

Najveća vrijednost primarne struje, uz koju transformator zadovoljava s obzirom na složenu pogrešku, zove se *nazivna primarna granična struja točnosti*, a omjer između nje i nazivne primarne struje *granični faktor točnosti*. Standardne vrijednosti tog faktora jesu: 5, 10, 15, 20 i 30. Standardne klase točnosti strujnih transformatora za zaštitu jesu: 5P i 10P (tabl. 5). Podaci o klasi i graničnom faktoru točnosti navode se na natpisnoj pločici jedan do drugoga, pa npr. oznaka 5P20 znači da strujni transformator ima klasu točnosti 5P i granični faktor točnosti 20.

Tablica 5

GRANICE POGREŠAKA STRUJNIH TRANSFORMATORA ZA ZAŠTITU

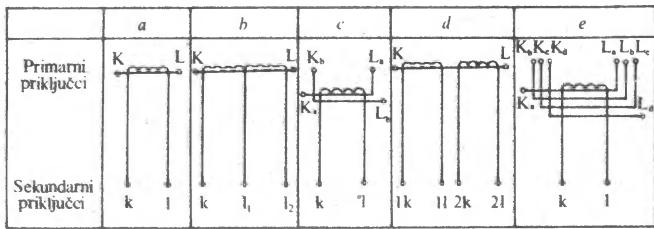
Klasa točnosti	Granice strujne pogreške pri nazivnoj primarnoj struci i nazivnom opterećenju %	Granice fazne pogreške pri nazivnoj primarnoj struci i nazivnom opterećenju min	Granice složene pogreške pri nazivnoj primarnoj graničnoj struci točnosti %
5P	±1	±60	5
10P	±3	nisu ograničene	10

Termička i dinamička struja strujnih transformatora. Strujni transformatori moraju mehanički i termički izdržati struju kratkog spoja u mreži, što se postiže dovoljno velikim presekom namota i dobrom učvršćenjem. Najveća struja kratkog spoja koja može proteći kroz strujni transformator ovisi o snazi izvora, a ne o snazi trošila kojem transformator mjeri struju. Zato se može dogoditi da strujni transformator male nazivne struje bude izložen vrlo velikim strujama kratkog spoja. Zbog toga se na natpisnoj pločici transformatora mora označiti koje dinamičke i termičke struje transformator još podnosi. Kao *nazivna kratkotrajna termička struja* I_{th} definira se efektivna vrijednost primarne struje koju transformator može izdržati u trajanju 1s uz kratko spojen sekundarni namot. Pri tom se namot ne smije nedopušteno zagrijati. Kao *nazivna dinamička struja* I_{dyn} definira se najveća trenutna vrijednost primarne struje koju, uz kratko spojen sekundarni namot, transformator može izdržati a da pri tom ne bude električki ili mehanički oštećen zbog elektromagnetskih naprezanja. Da bi transformator izdržao određenu termičku struju I_{th} , potrebno mu je presjek S vodiča primarnog namota dimenzionirati za dopuštenu gustoću struje prema izrazu:

$$S = I_{th}/a.$$

Dopuštena je gustoća struje za bakar $a = 180 \text{ A/mm}^2$, a za aluminij $a = 118 \text{ A/mm}^2$.

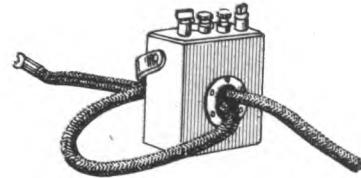
Označivanje stezaljki. Primarne stezaljke strujnog transformatora označuju se prema našem standardu (JUS N.H9.101)



Sl. 21. Označivanje stezaljki strujnih transformatora prema standardu JUS N.H9.101. a strujni transformator sa samo jednim omjerom transformacije, b strujni transformator s jednim odvojkom na sekundarnoj strani, c strujni transformator prespojiv u omjeru 1:2 na primarnoj strani, d strujni transformator s dvije jezgre, e strujni transformator prespojiv u omjeru 1:2:4 na primarnoj strani

velikim slovima K i L, a sekundarne stezaljke malim slovima k i l (sl. 21). Svi priključci označeni slovima K i k (ili K_a , K_b , K_c , ... i 1k, 2k, ... itd.) moraju u istom trenutku imati jednak polaritet. Te oznake nisu u skladu s onima Međunarodne elektrotehničke komisije (IEC-publikacija 185, I dio, prvo izdanje 1966. godine), koja preporučuje oznake P_1 i P_2 za primarni, te S_1 i S_2 za sekundarni namot. Stupci c i e na sl. 21 sadrže označivanje stezaljki za strujne transformatore prespojive u omjeru 1:2, odnosno 1:2:4 na primarnoj strani. Takvi prespojivi transformatori često se upotrebljavaju zbog budućeg proširenja mreže. U početku su oni spojeni za manju primarnu nazivnu struju, a poslije se, kad opterećenje poraste, spajaju na veću. Ako je primarni namot dvodijeljan (stupac c na sl. 21), bit će pri serijskom spoju dijelova namota (stezaljke K_b i L_a spojene) omjer transformacije npr. 100/5A. Kod paralelnog spoja (stezaljke K_a i K_b , te L_a i L_b spojene skupa) bit će tad omjer transformacije 200/5A. Kad je primarni namot u četiri dijela (stupac e na sl. 21), dobit će se serijskim spajanjem svih dijelova omjer transformacije, npr. 100/5 A (stezaljke L_a i K_b , L_b i K_c , L_c i K_d spojene skupa). Za omjer transformacije 200/5 A potrebno je pri tom spojiti stezaljke K_a i K_b , pa L_a , L_b , K_c , K_d , te još L_c i K_d , a za 400/5 A spajaju se međusobno stezaljke K_a , K_b , K_c i K_d , te L_a , L_b , L_c i L_d . Tim prespajanjem na primarnoj se strani ne mijenja broj amperzavoja i stoga ne nastaje ni promjena snage ni promjena pogreške transformatora.

Izvedbe strujnih transformatora. Postoji mnogo rješenja tehničke izvedbe strujnih transformatora, već prema namjeni, primarnim strujama i pogonskom naponu. Strujni transformatori koji se upotrebljavaju za laboratorijska mjerjenja redovno imaju više strujnih područja, koja se odabiru priključkom na odgovarajuće stezaljke transformatora. Neke izvedbe imaju ugrađenu preklopku koja omogućuje promjenu područja pod opterećenjem. Pri mjerenu većih struja obično se izbjegavaju stezaljke. Umjesto njih se jedan od vodiča mjerene kruga provlači kroz otvor na transformatoru. On tada predstavlja primarni namot strujnog transformatora. Namatanjem jednog ili više zavoja dobiva se strujni transformator za veće ili manje primarne struje (sl. 22).



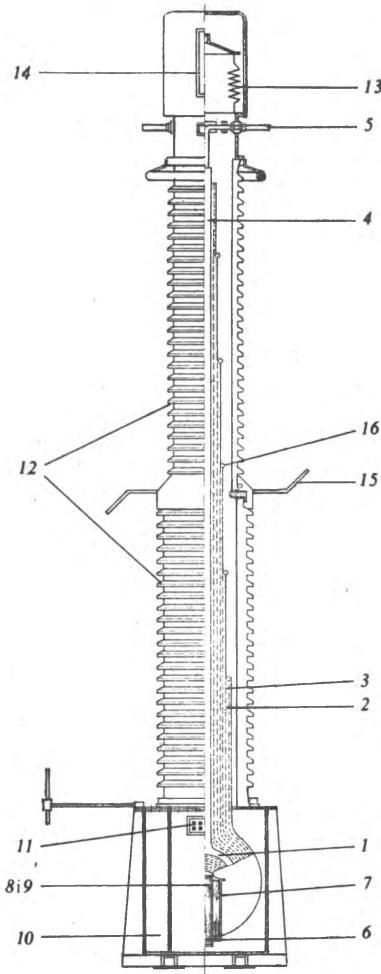
Sl. 22. Laboratorijski strujni transformator s otvorom za provlačenje vodiča mjerene strujnog kruga

Niskonaponski strujni transformatori za ugradivanje ne razlikuju se izvedbeno bitno od običnih niskonaponskih transformatora. U starijim izvedbama za više napone izolirao se primarni namot prema kućištu i sekundarnom namotu pomoću porculanskih izolatora posebnog oblika. Umjesto takvih izvedbi danas su sve češće izvedbe u kojima je primarni namot zalinjen epoksidnom smolom i tako izoliran prema jezgri i sekundarnom namotu (sl. 23). S obzirom na dodatne funkcije koje obavljaju u rasklopnim postrojenjima izvode se strujni transformatori kao potporni i provodni, a prema izvedbi primarnog namota kao štapni, provlačni i namotni. *Štapni strujni transformatori* imaju primarno samo jedan vodič štapasta oblika i upotrebljavaju se gdje god je to moguće zbog praktički neizmjerno velike dinamičke struje i jednostavne konstrukcije. Za male nazivne primarne struje štapni strujni transformator ima i malo amperzavoja, pa nije prikladan ako je potrebna veća nazivna snaga. Obično se takvi transformatori rade za primarne nazivne struje od 100 A i više. *Provlačni strujni transformatori* nemaju vlastiti primarni namot, već samo jezgru i sekundarni namot zalinjen epoksidnom smolom, a kao primarni namot služi sabirnica kojoj je struju potrebno mjeriti. Da bi to bilo moguće, napravljen je poseban otvor kroz koji se sabirnica

provuće. *Namotni strujni transformatori* upotrebljavaju se kad je zbog male nazivne primarne struje potrebno više zavoja u primarnom namotu. Često je njihov primarni namot podijeljen na dva ili četiri jednaka dijela, pa se tada mogu prespajati u omjeru 1:2 ili 1:2:4 (sl. 21 c i e). Izvedbe za više napone, pogotovo za one vrlo visoke, redovno su uljne. Jezgra, primarni i sekundarni namot nalaze se u uljnom kotlu i međusobno su izolirani debelom bandažom papira. Zbog bolje raspodjele polja u izolaciji upotrebljavaju se ekvipotencijalne metalne bandaže, kao što se to vidi na sl. 24 koja prikazuje malouljni strujni transformator za nazivni napon 400 kV.

Transformator ima dvije jezgre od kojih je svaka namotana sa svojim sekundarnim namotom, dok je primarni namot zajednički. Jedna jezgra sa svojim sekundarnim namotom ima faktor sigurnosti $F_s = 10$ i služi za priključak instrumenata, dok druga ima velik granični faktor točnosti i služi za priključak zaštite.

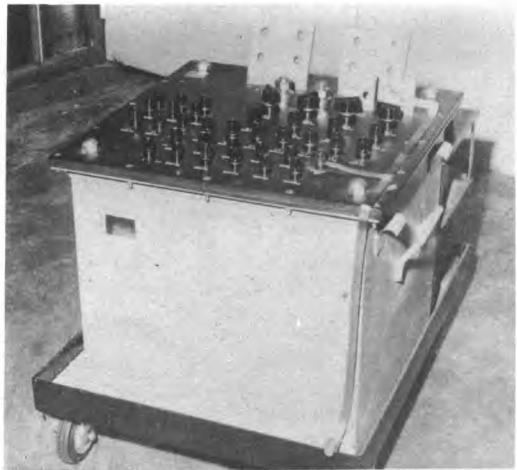
Sl. 23. Epoksidni potporni (namotni) strujni transformator za primarnu nazivnu struju $2 \times 100\text{A}$ za najviši pogonski napon od 12 kV (proizvod Rade Končar)



Sl. 24. Malouljni strujni transformator za nazivni napon 400 kV (proizvod Rade Končar). 1 primarni namot, 2 papirna izolacija primarnog namota, 3 ekvipotencijalne metalne bandaže, 4 izvodi primarnog namota, 5 priključne stezaljke K i L primarnog namota, 6 jezgra za faktor sigurnosti $F_s = 10$, 7 sekundarni namot za priključak instrumenata, 8 i 9 jezgra i sekundarni namot za priključak zaštite, 10 kotač transformatora, 11 stezaljke sekundarnih namota, 12 porculanski izolator, 13 elastična membrana, 14 stakleni prozorič za kontrolu razine transformatorskog ulja, 15 rogovi za zaštitu od prenapona, 16 prsteni na krajevima omota kojima se poboljšava raspodjela električnog polja

U oklopljenim rasklopnim postrojenjima sa sumpor-heksafluoridom, SF₆, obično su strujni transformatori štapne izvedbe s više prstenastih jezgri oko kojih su namotani sekundarni namoti za mjerjenje i zaštitu. Izolacija između primarnog i sekundarnog namota je sumpor-heksafluorid, a homogenije polje i zaštitu sekundarnih namota od preskoka postiže se uz njih priljubljenim uzemljjenim elektrostatskim oklopom.

Etalonski strujni transformatori služe za vrlo točna mjerjenja struja, npr., pri određivanju pogrešaka preciznih mjernih transformatora usporednom metodom. Odlikuju se vrlo malom strujnom pogreškom od, npr., samo $\pm 0,005\%$ i faznom pogreškom od $\pm 0,5'$. Tako male pogreške postižu se upotrebom magnetskih materijala vrlo visokog permeabiliteta i odabiranjem većih nazivnih amperzavoja. Redovno se izrađuju s mnogo izvoda na primarnom namotu, tako da je moguće mjerjenje svih standardnih vrijednosti primarnih struja. I na sekundarnom namotu postoje odvojci za sve standardne i uobičajene vrijednosti sekundarnih struja (sl. 25). Još bolju točnost pružaju etalonski strujni transformatori s dvije jezgre, primarnim i sekundarnim namotom koji obuhvaćaju obje jezgre, te kompenzacijskim i indikacijskim namotom koji obuhvaćaju samo jednu jezgru. Indikacijski namot spojen je na ulaz osjetljivog elektroničkog pojačala, a kompenzacijski na njegov izlaz, tako da zbog negativne povratne veze praktički nema magnetskog toka u pripadnoj jezgri. Time je postignuto da je struja magnetiziranja te jezgre ravna nuli, odnosno da su primarni amperzavoji jednaki zbroju amperzavoja sekundarnog i kompenzacijskog namota. Zbog toga se pri paralelnom spajaju sekundarnog i kompenzacijskog namota, izvedenih s jednakim brojem zavoja, na njihovu izlazu dobiva struja iznosa $I_1 N_1 / N_2$. Kod dobrih izvedbi odstupanja od toga izraza su sasvim malena.

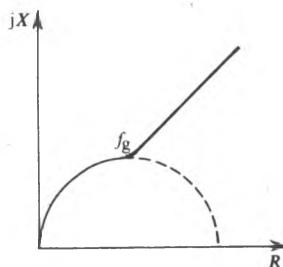


Sl. 25. Etalonski strujni transformator za primarne nazivne struje 1...2000 A (proizvod Rade Končar)

Elektroničko pojačalo upotrebljava se i kod strujnih transformatora na ulazu različitim preciznim elektroničkim mjernim uređaju, kao što su elektronička brojila, vatmetri, ampermetri, fazomjeri i drugi. Tu su redovno potrebne male snage, pa je dovoljan strujni transformator samo s jednom jezgrom, primarnim, sekundarnim i indikacijskim namotom koji je spojen na ulaz osjetljivog elektroničkog pojačala, a na njegov izlaz spojen je sekundarni namot u seriju s trošilom. Zbog toga je magnetski tok u jezgri gotovo ravan nuli, pa su pogreške transformatora malene. Ovdje nema prijenosa energije s primarnog na sekundarnu stranu, već se snaga potrebna trošilo dobiva iz pojačala.

Primjena mjernih transformatora nije ograničena samo na područje industrijskih frekvenciјa. Oni se upotrebljavaju i u visokofrekvenčnim postrojenjima za kaljenje i taljenje, a i u dojavnoj tehnici (tehnici veze). Kada se strujni transformatori upotrebljavaju na području viših frekvenciјa, treba paziti na

vrložne struje u limovima jezgre, koje uzrokuju potiskavanje magnetskog toka. Zbog toga se na području visokih frekvencija ne mogu jalovi i djelatni gubici u jezgri nadomjestiti gubicima u nekom određenom induktivitetu L_0 i njemu paralelno spojenom otporu R_0 , kao u nadomjesnoj shemi transformatora (sl. 1). Vektorski dijagram impedancije paralelne kombinacije R_0 i L_0 kružnog je oblika i podudara se s dijagramom impedancije svitka sa željeznom jezgrom samo do neke određene frekvencije, tzv. granične frekvencije f_g . Nakon te frekvencije raste impedancija svitka sa željeznom jezgrom, tako da je pri tom realna komponenta uvijek jednaka imaginarnoj (sl. 26). Granična frekvencija normalnih željeznih limova obrnuto je razmjerna s kvadratom debljine lima i iznosi kod limova za ovu svrhu $1\cdots20$ kHz. Na višim frekvencijama sve su važniji kapaciteti između namota te kapaciteti između slojeva i zavoja.

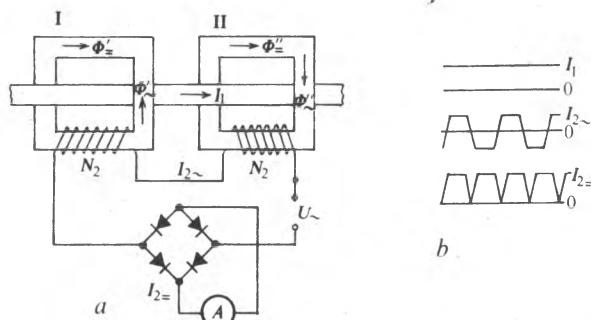


Sl. 26. Vektorski dijagram impedancije svitka sa željeznom jezgrom u ovisnosti o frekvenciji

Ako se o svemu tome vodi računa, mogu se izvesti strujni transformatori koji zadovoljavaju sve do frekvencija od nekoliko megaherca.

Strujni transformatori za istosmjernu struju. Za mjerjenje velikih istosmjernih struja upotrebljavaju se transformatori koji mnogo podsjećaju na strujne transformatore za izmjeničnu struju.

Uobičajeni način mjerjenja istosmrjerne struje pomoću instrumenata sa zakretnim svitkom i paralelnog otpornika (šanta) nije pogodan za mjerjenje vrlo velikih istosmjernih struja, jer tada nastaju veliki gubici u šantu (shuntu). Tako, npr., pri mjerenu struje od 10000 A i uobičajenog napona na šantu od 60 mV, nastaju gubici od 600 W koji uzrokuju poteškoće pri konstrukciji šanta. Zbog toga se jake struje obično mjere drugim metodama, od kojih se neke zasnivaju na principu magnetskih transduktora. Vod kojim teče mjerena istosmrjerena struja (sl. 27a) prolazi kroz dvije jezgre od dobrog magnetskog materijala s praktički pravokutnom krivuljom magnetiziranja.



Sl. 27. Strujni transformator istosmrjerne struje. a) shematski prikaz, b) primarna struja I_1 , izmjenična sekundarna struja I_{2-} i istosmrerna sekundarna struja I_{2+}

Oko tih jezgri namotan je sekundarni namot koji je spojen u seriju s ampermeterom i priključen na izmjenični napon konstantne vrijednosti. Namoti prve i druge jezgre spojeni su u seriju, pažeći pri tom da eventualne nagle promjene istosmrjerne struje induciraju u sekundarnim namotima napone koji se međusobno poništavaju. Zbog toga će se tokom jedne poluperiode u jednoj jezgri podudarati smjerovi istosmrjnog i izmjeničnog toka, dok će u drugoj jezgri njihovi smjerovi biti suprotni.

U jezgri gdje se izmjenični tok podudara s istosmrjernim ne može doći do povećanja njezine indukcije jer je jezgra veoma

zasićena istosmrjernim tokom. Za vrijeme te poluperiode bit će, dakle, izmjenični tok u toj jezgri jednak nuli. U drugoj jezgri može se stvoriti pripadni izmjenični tok, ali samo onda ako kroz sekundarni namot poteče takva struja da jezgra više ne bude zasićena. To je moguće samo onda ako sekundarni amperzavoji budu gotovo jednakim primarnim, tj. ako se budu razlikovali samo toliko koliko je potrebno za održavanje određenog toka u jezgri. Uz upotrebu dobrih magnetskih materijala ta razlika je malena, pa vrijedi: $I_1 N_1 = I_2 N_2$. Kako je redovno $N_1 = 1$, jer kroz jezgre prolazi samo jedan primarni vodič slijedi: $I_1 = I_2 N_2$. Ovdje su, dakle, kao i kod strujnih transformatora za izmjenične struje, primarni amperzavoji jednakim sekundarnim, ako se u jednom i drugom slučaju zanemari struja magnetiziranja.

Zbog gotovo pravokutne karakteristike upotrijebljene magnetskog materijala dobiva se gotovo pravokutan oblik sekundarne struje I_2 (sl. 27b), koju je najprikladnije mjeriti instrumentom sa zakretnim svitkom i ispravljačima u Graetzovu spoju. Granice pogrešaka koje se postižu takvim mjerjenjem iznose $0,2\cdots1\%$. Visina izmjeničnog napona ne utječe primjetno, pa nisu potrebni posebni stabilizatori izmjeničnog napona.

Ta metoda se primjenjuje za mjerjenje istosmrjernih struja jakosti nekoliko stotina ampera do nekoliko stotina tisuća ampera. Sekundarno opterećenje može iznositi i do 100 W.

Ispitivanje mjernih transformatora. Prijenosne i fazne pogreške mjernih transformatora mjerse se najčešće pomoću etalonih mjernih transformatora jednog ili podjednakog omjera prijenosa i prikladnih diferencijalnih ili kompenzacijskih metoda. Upotrebljavaju se i mjerne uređaji koji omogućuju izravno očitanje njihovih pogrešaka ili, pri većim serijama, automatizirani uređaji koji crtaju ili tiskaju mjerne rezultate i sami ugadaju potrebne vrijednosti ispitnog kruga prema zadanim programu. Njihova izolacijska svojstva provjeravaju se ispitivanjem stranim naponom industrijske frekvencije, ispitivanjem induciranim naponom i ispitivanjem udarnim naponom, slično kao i kod transformatora snage (v. Transformatori). Provode se i različita druga ispitivanja koja pomažu da se ocijene dielektrična svojstva izolacije i njezin vijek trajanja. Među takvima je i mjerjenje parcijalnih izbjivanja u izolaciji.

LIT.: J. Goldstein, Die Messwandler. Verlag Birkhäuser, Basel 1952. — R. Bauer, Die Messwandler. Springer Verlag, Berlin 1953. — J. Kopeček, M. Dvořák, Pristrojove transformatory. Academia, Praha 1966. — A. Wright, Current transformers, their transient and steady-state performance. Chapman and Hall, London 1968. — W. Brendler, Messwandler. VEB Verlag Technik, Berlin 1976. — V. Bego, Mjerni transformatori. Školska knjiga, Zagreb 1977.

V. Bego

MLJEVENJE, tehnološki proces sitnjena čvrstih materijala. Kao operacija povećavanja površine obrađivanog materijala mljevenje obično slijedi nakon drobljenja (v. *Drobjenje*, TE 3, str. 395) sa svrhom da se poboljša ili promijeni neko od fizičkih svojstava materijala (npr. cementa), da se oslobođe mineralne komponente u sraslim zrnima (npr. u oplemenjivanju mineralnih sirovina), ili da se promijene kemijska svojstva (npr. mehaničko-kemijsko aktiviranje u procesu izluživanja). Mljevenjem se dobiva proizvod u granulacijskom rasponu od $0,005\cdots25$ mm, pa se prema dobivenom granulatu razlikuje koloidno, fino, srednje i grubo mljevenje. Energija potrebna za mljevenje ovisi o postignutoj finoci samljevenog materijala (sl. 1).

Teorija mljevenja. Svako mehaničko opterećenje prouzrokuje u čvrstoj tvari deformaciju i unutrašnja naprezanja, već prema svojstvima materijala. Mnoga su ta svojstva uvjetovana kristalnom strukturom tvari i njenim defektima (točkastim, linearnim, dislokacijskim). Prema fizikalnoj teoriji sitnjena (A. A. Griffith, 1920) drobljenje minerala odvija se u dvije faze: nastanak pukotine i njeno širenje. Polazeći od strukture idealne kristalne rešetke može se izračunati potrebno naprezanje kidanja prema relaciji

$$\sigma_{\text{ideal}} \approx \frac{E}{10}, \quad (1)$$