

Merni pretvarači vrednosti i faze struje

Symmetry tip SM307

SY345 • 4. avgust 2008.

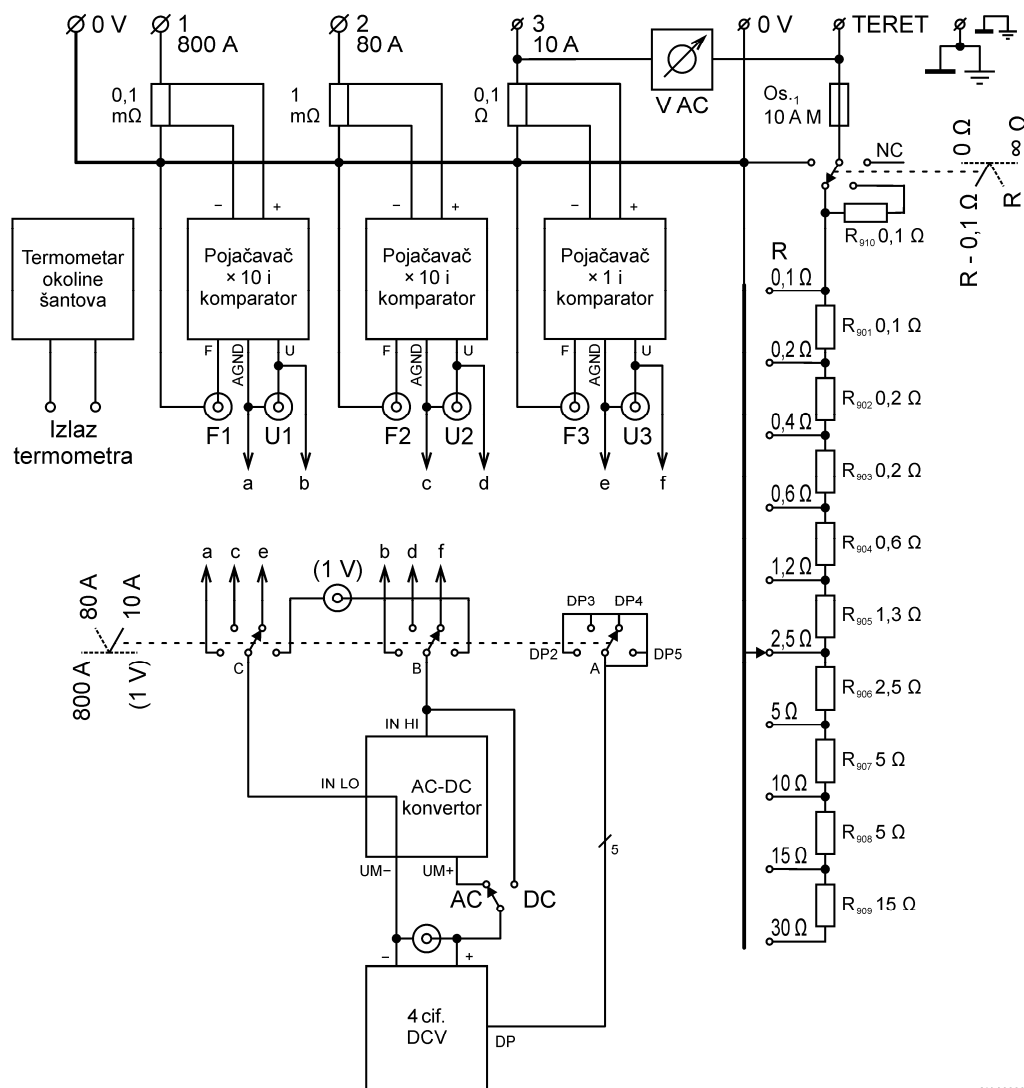


Odlike

- Merni pretvarači za merenje vrednosti, faze i izobličenja niskofrekventnih ili jednosmernih struja u opsegu od 0 A do 800 A.
- Tačnost mernih pretvarača 0,1 % vrednosti mernog signala za jednosmerne i niskofrekventne struje.
- Ugrađen merač visoke tačnosti sa četiri cifre.
- Ugrađeno deset standardnih tereta otpornosti od 0,1 Ω do 30 Ω za struje do 1,2 A ili do 6 A.

Primena

- Merenje struja primara i sekundara strujnog transformatora pri opterećenju standardnim teretima.
- Merenje fazne grške i harmonijskih izobličenja strujnog transformatora uz priključenje univerzalnog brojača i spektralnog analizatora.
- Referentni ampermetar, za prostoperiodične ili jednosmerne struje, tačnosti 0,20 % prikazane vrednosti za 1 A do 800 A.
- Merenje faze struje uz priključenje univerzalnog brojača.
- Merenje izobličenja struje uz priključenje spoljnih uređaja.
- Merenje reaktanse pri velikim strujama i naponima.



GK 080804

Slika 1. Blok šema uređaja SM307. Izlazi za merenje vrednosti struje označeni su sa U, a izlazi za merenje faze sa F.

Uređaj SM307 prikazan je blok šemom na slici 1. Uređaj čine sledeći podsklopovi:

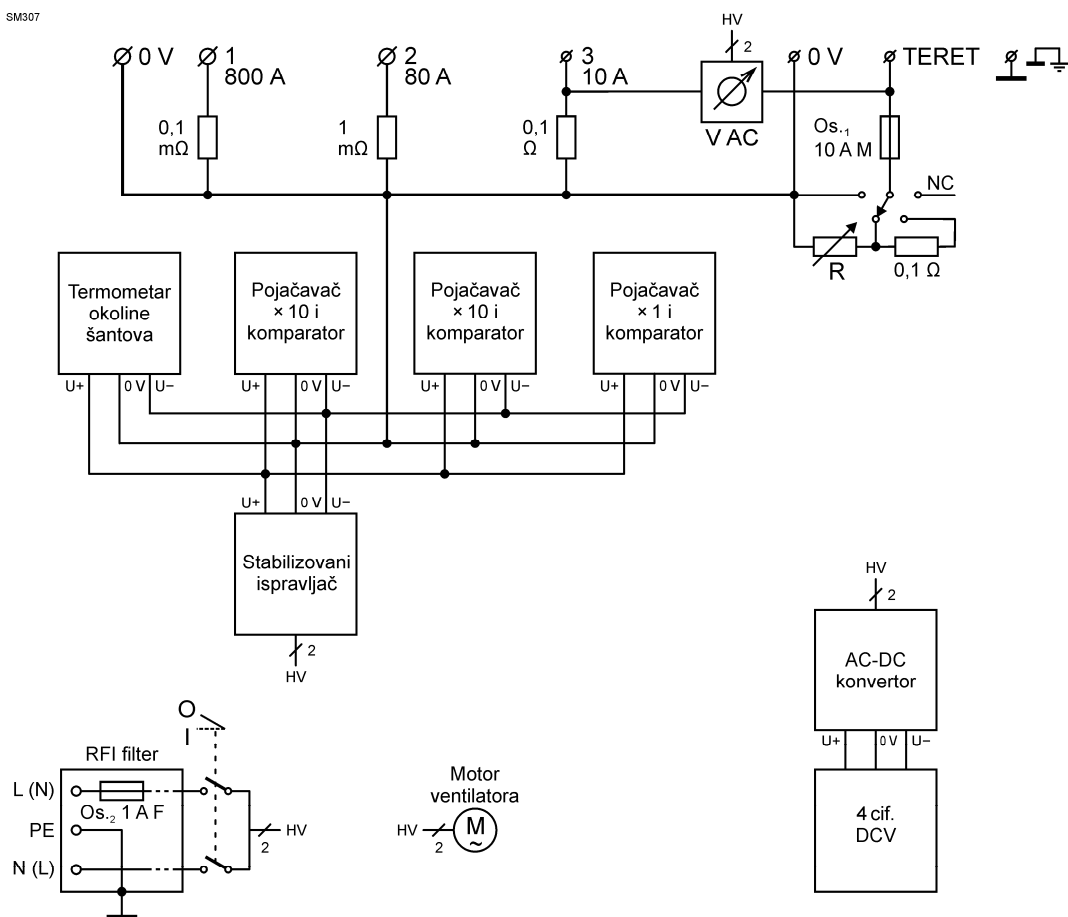
- 1) tri merna pretvarača vrednosti struje
- 2) tri merna pretvarača faze struje
- 3) voltmetar jednosmernog ili prostoperiodičnog napona (na šemi „AC-DC konvertor“ i „4 cif. DCV“)
- 4) voltmetar prostoperiodičnog napona tereta (na šemi „V AC“)
- 5) standardni tereti
- 6) merni pretvarač temperature okoline šantova.

Kod mernih pretvarača vrednosti struje uređaja SM307, u idealnom slučaju, trenutna vrednost napona na izlazu pretvarača proporcionalna je trenutnoj vrednosti struje kroz ulazne priključke pretvarača (uz izvestan fazni pomeraj).

Merni pretvarači vrednosti struje i merni pretvarači faze struje koriste iste šantove i ulazne priključke.

Merni pretvarači faze struje daju digitalni signal koji je u fazi sa ulaznom strujom mernih pretvarača. U idealnom slučaju, uzlazna ivica izlaznog digitalnog signala poklapa se sa prolaskom kroz nulu ivice porasta prostoperiodične ulazne struje, a silazna ivica sa prolaskom kroz nulu ivice opadanja ulazne struje.

Veze na nultom potencijalu i napajanja prikazuje slika 2. Veze na nultom potencijalu su izolovane od kućišta za slučajne (ne trajne) napone do 300 V RMS ili DC, kao i od priključaka za napajanje iz mreže. Kućište je povezano sa priključkom uzemljenja.



Slika 2. Šema veza nultih priključaka i napajanja uređaja SM307.

Uređaj je projektovan za upotrebu i uslove koji se mogu očekivati u metrološkoj laboratoriji ili radionici.

Pri povezivanju mernih uređaja u merni sistem kojim se meri sa visokom tačnošću, potrebno je između ostalog analizirati međusobno povezivanje nultih priključaka svakog od uređaja. Kroz provodnike koji povezuju nulte priključke najčešće ne sme da protiče struja velike vrednosti. Struja kroz provodnik koji povezuje dva nulta priključka proizvodi pad napona na tom provodniku, koji ako se superponira mernom signalu prouzrokuje povećanje greške rezultata. Najčešće neodgovarajuće povezivanje je povezivanje nultih priključaka na „lokalno“ uzemljenje uređaja. Pri ovakvom povezivanju, kroz provodnike koji spajaju nulte priključke protiče prevelika struja između priključaka „lokalnih“ uzemljenja jer između „lokalnih“ uzemljenja postoji neki napon. Dobra praksa je da se nulti priključci uređaja povezuju zavisno od metode merenja i ostaju neuzemljeni, ili se povezuju na uzemljenje samo na jednom mestu.

Od svih podsklopova uređaja SM307, merni pretvarači vrednosti struje imaju najveću tačnost i najširi frekventni opseg. U slučajevima kada je potrebno potpuno iskoristi metrološka svojstva pretvarača vrednosti struje, treba koristiti spoljni voltmetar odgovarajuće tačnosti, linearnosti, rezolucije i frekventnog opsega.

U narednom tekstu su date dole navedene teme.

- 1) detaljni tehnički podaci podsklopova uređaja SM307
- 2) primeri primene
- 3) jedan mogući načina etaloniranja podsklopova uređaja SM307
- 4) osnovni metrološki termini.

Vrednosti greške date kao maksimalni moduo mogu se preračunati u standardnu mernu nesigurnost deljenjem brojem tri.

U tekstu su primenjena sledeća obeležavanja: „AC“ označava naizmenični, „DC“ jednosmerni, „RMS“ označava efektivnu vrednost veličine, „NC“ označava nepovezano, oznaka „% i.“ označava procenete od prikazivane vrednosti.

1 Detaljni tehnički podaci podsklopova uređaja SM307

1.1 Merni pretvarači vrednosti struje

Pregled metroloških svojstava pretvarača vrednosti struje dat je u tabeli 1.

U idealnom slučaju, trenutna vrednost napona na izlazu pretvarača proporcionalna je trenutnoj vrednosti struje kroz ulazne priključke pretvarača (uz izvestan fazni pomeraj). Zato između efektivne vrednosti napona na izlazu pretvarača, U_{out} , i efektivne vrednosti struje kroz ulazne priključke pretvarača, I_{in} , postoji veza data obrascima (1).

$$U_{out} = S \cdot I_{in} \text{ ili } I_{in} = U_{out} / S \quad (1)$$

Veličina S su konstante koje predstavljaju osetljivost mernih pretvarača, i imaju sledeće nazivne vrednosti:

- za pretvarač do 800 A, $S = 1 \text{ mV/A}$
- za pretvarač do 80 A, $S = 10 \text{ mV/A}$
- za pretvarač do 10 A, $S = 100 \text{ mV/A}$.

Na naponski izlaz svakog od pretvarača može se preklopnikom uključiti ulaz ugrađenog voltmetra. Takođe se na BNC konektore na prednjoj ploči, ili pomoćni BNC konektor na zadnjoj ploči, može uključiti spoljni voltmetar, DAQ, osciloskop, spektralni analizator... Priključeni instrument treba da bude sa galvanski izolovanim ili diferencijalnim ulazom. Spoljni cilindar BNC konektora je približno, ali ne tačno, na potencijalu 0 V. Izlazna otpornost pretvarača je $10 \Omega \pm 1 \%$.

Maksimalna dozvoljena ulazna struja šanta za struju do 800 A zavisi od frekvencije ulazne struje i data je dijagramom na slici 3 i približno u tabeli 1. Kod ostala dva šanta maksimalna ulazna struja ne zavisi od frekvencije.

Međusobna preslušavanja mernih pretvarača su zanemarljiva pri struji frekvencije 50 Hz.

Temperatura svakog od šantova, θ , u stacionarnom stanju zavisi od njegove snage disipacije, P , termičke otpornosti šanta prema okolini, R_{th} , i temperature okoline šanta, θ_o , a data je obrascem (2).

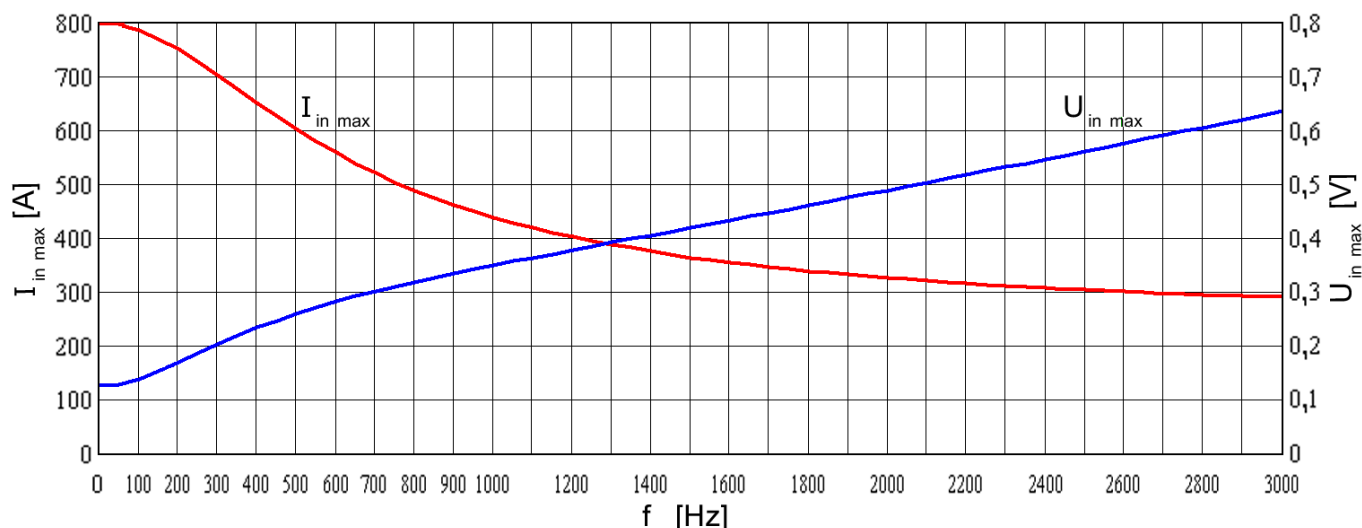
$$\theta = \theta_o + R_{th} \cdot P \quad (2)$$

Termičke otpornosti šantova prema okolini su sledeće:

- za šant do 800 A, $R_{th} < 0,3 \text{ K/W}$
- za šant do 80 A, $R_{th} < 3 \text{ K/W}$
- za šant do 10 A, $R_{th} < 3 \text{ K/W}$.

Za vrednost temperature okoline, θ_o , uzima se temperatura koju daje ugrađeni merni pretvarač temperature okoline šantova.

Maksimalna dozvoljena temperatura ugrađenih šantova je $125 \text{ }^\circ\text{C}$.



Slika 3. Šant za struju do 800 A: maksimalna dozvoljena ulazna struja (RMS), $I_{in \max}$, i približna vrednost napona na priključcima pri toj struji, $U_{in \max}$.

Tabela 1. Metrološka svojstva pretvarača vrednosti i faze struje, pri temperaturi ambijenta 23 °C.

Merni pretvarač	Frekvencija ulazne struje	Merni opseg, RMS ili DC	Moduo impedanse između ulaznih priključaka	Greške ¹⁾ osetljivosti pretvarača za vrednost struje, maksimalne vrednosti, moduli				Greške ^{1) 3)} izlaznog signala pretvarača za merenje faze, maksimalne vrednosti, moduli		
				Greška	Temperaturna nestabilnost	Nestabilnost usled starenja, za 1000 h ²⁾	Najnepovoljnija apsolutna greška faze	Greška	Temperaturna nestabilnost	Nestabilnost usled starenja, za 1000 h ⁴⁾
1 800 A	0 Hz (DC)	−800 do +800 A	156 μΩ	0,10 % i.	10 · 10 ^{−6} i. /K + 20 mA/K	0,03 % i.	-	-		
	> 0 Hz do 50 Hz	0 do 800 A	156 μΩ .. 162 μΩ		12 · 10 ^{−6} i. /K		−0,050°	0,35' = 0,10 mrad	0,00' /K = 0,00 mrad/K	0,00' = 0,00 mrad
	> 50 Hz do 300 Hz	0 do 700 A	162 μΩ .. 290 μΩ				−0,30°	2,1' = 6,1 mrad		0,02' = 0,006 mrad
	> 300 Hz do 1 kHz	0 do 440 A	290 μΩ .. 800 μΩ	0,50 % i.			−1,0°	7,0' = 2,0 mrad		0,01' /K = 0,003 mrad/K
	> 1 kHz do 3 kHz	0 do 290 A	800 μΩ .. 2,2 mΩ		−2,0°		20' = 5,8 mrad	0,15' = 0,044 mrad		
	> 3 kHz do 12 kHz	0 do 240 A	2,2 mΩ .. 8,5 mΩ	1,0 % i.	−10°		1,0° = 17 mrad	0,03' /K = 0,009 mrad/K	0,50' = 0,15 mrad	
2 80 A	0 Hz (DC)	−80 do +80 A	1,5 mΩ	0,10 % i.	14 · 10 ^{−6} i. /K + 2 mA/K	0,03 % i.	-	-		
	> 0 Hz do 150 Hz	0 do 80 A		0,50 % i.	14 · 10 ^{−6} i. /K		−0,20°	1,0' = 0,29 mrad	0,00' /K = 0,00 mrad/K	0,02' = 0,006 mrad
	> 150 Hz do 1,5 kHz		−2,0°				10' = 2,9 mrad	0,05' = 0,015 mrad		
	> 1,5 kHz do 12 kHz		1,5 mΩ .. 5,0 mΩ				2,5 % i.	−10°		1,0° = 17 mrad
3 10 A	0 Hz (DC)	−10 do +10 A	111 mΩ...112 mΩ ⁵⁾	0,10 % i.	10 · 10 ^{−6} i. /K + 20 μA/K	0,03 % i.	-	-		
	> 0 Hz do 300 Hz	0 do 10 A			10 · 10 ^{−6} i. /K		−0,30°	7,0' = 2,0 mrad	0,00' /K = 0,00 mrad/K	0,00' = 0,00 mrad
	> 300 Hz do 1 kHz						−1,0°			
	> 1 kHz do 3 kHz		−3,0°				20' = 5,8 mrad			
	> 3 kHz do 10 kHz		−10°				1° = 17 mrad			
	> 10 kHz do 30 kHz		−20°				3° = 52 mrad	0,02' = 0,006 mrad		
	> 30 kHz do 200 kHz		116 mΩ...250 mΩ ⁵⁾				−30°			

¹⁾ Podaci obuhvataju i grešku od najvećeg mogućeg samozagrevanja.

²⁾ Nestabilnost u tabeli je za puno opterećenje, maksimalno prvih 1000 h, zatim manje. Pod punim opterećenjem, tipično prvih 1000 h, 0,01 % i., zatim manje. Bez opterećenja, tipično, 0,001 % i. /godina.

³⁾ Greške izlaznog signala za merenje faze date su za opsege struja 1) 80 do 800 A, 2) 8 do 80 A i 3) 0,8 do 10 A.

⁴⁾ Maksimalno prvih 1000 h, zatim manje.

⁵⁾ Mereno između „banana“ utičnica: „0 V“ i „10 A“.

1.2 Merni pretvarači faze struje

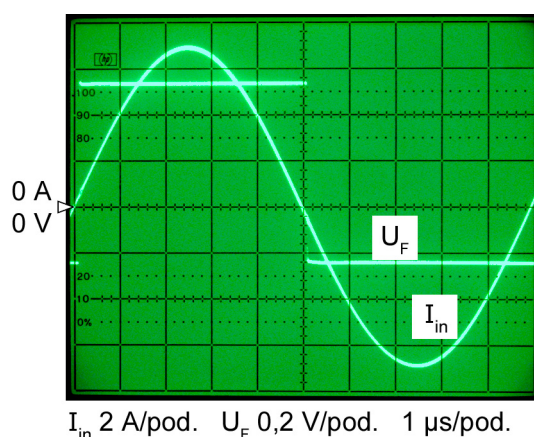
Pregled metroloških svojstava pretvarača faze struje dat je u tabeli 1.

Merni pretvarači faze struje daju digitalni signal koji je u fazi sa ulaznom strujom mernih pretvarača, videti sliku 4. U idealnom slučaju, uzlazna ivica izlaznog digitalnog signala, U_F , se poklapa sa prolaskom kroz nulu ivice porasta prostoperiodične ulazne struje I_{in} , a silazna ivica sa prolaskom kroz nulu ivice opadanja ulazne struje. Impedansa izlaza pretvarača je $50 \Omega \pm 6 \Omega$. Pri opterećenju izlaza sa 50Ω , visoki nivo izlaznog digitalnog signala ima napon $0,55 V \pm 0,05 V$, a nizak nivo $-0,25 V \pm 0,05 V$. Pri opterećenju izlaza sa 50Ω , brzine ivica digitalnog signala su veće od $+0,3 V/ns$ (uzlazna ivica), ili $-0,3 V/ns$ (silazna ivica).

Izlazi mernih pretvarača faze struje dovedeni su na BNC konektore na prednjoj ploči uređaja. Spoljni cilindar BNC konektora je približno, ali ne tačno, na potencijalu 0 V. Radi merenja faze potrebno je da se na izlaz svakog od pretvarača uključiti ulaz spoljnog univerzalnog brojača. Brojač mora da ima galvanski izolovane ili diferencijalne ulaze. Alternativa takvim ulazima je galvanski izolovano napajanje brojača. Može se upotrebiti i brojač koji nema izolovane ili diferencijalne ulaze i nije sa galvanski izolovanim napajanjem, ali tada uzemljenje brojača treba da bude jedino uzemljenje priključaka na nultom potencijalu svih uređaja mernog sistema.

Prag okidanja brojača treba da bude u opsegu $-50 mV$ do $+200 mV$ u odnosu na 0 V uređaja SM307. Greške date u tabeli 1 odnose se na prag okidanja u navedenom intervalu.

Za povezivanje izlaza pretvarača faze struje i ulaza univerzalnog brojača mora se koristiti kabl karakteristične impedanse 50Ω . Na strani brojača kabl treba da bude opterećen sa 50Ω .⁶⁾



Slika 4. Pretvarač za merenje faze: talasni oblik ulazne struje I_{in} i izlaznog napona U_F .⁷⁾

⁶⁾ Videti dokument *Symmetry* oznake SY233: Kostić; 2008; Specijalni slučajevi refleksije na vodu.

⁷⁾ Prikazana ulazna struja prednjači u odnosu na stvarnu ulaznu struju za 2° .

1.3 Voltmetar jednosmernog ili prostoperiodičnog napona

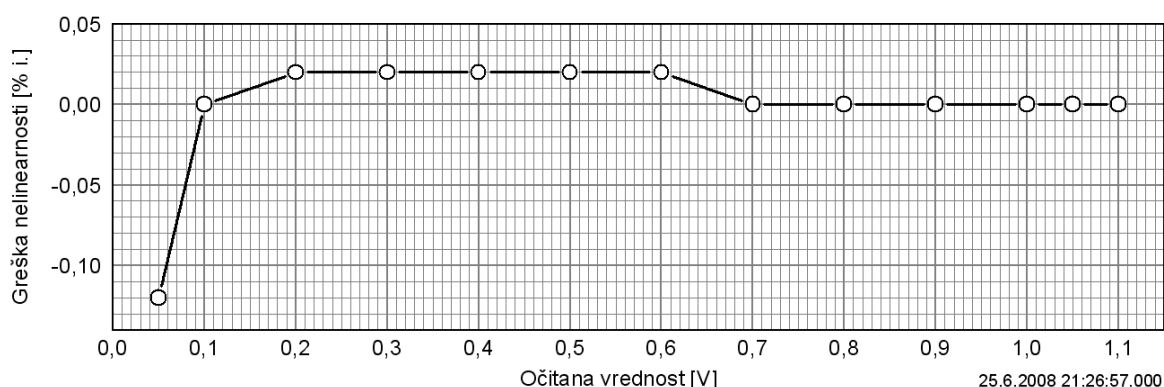
Voltmetar jednosmernog napona i AC-DC konvertor imaju galvanski izolovane ulaze. Priključeni su unutar uređaja prema šemama na slici 1 i 2 tako da je omogućeno merenje jednosmernog ili prostoperiodičnog napona sa izlaza mernih pretvarača vrednosti struje. Prikazana vrednost ugrađenog voltmetra skalira se u zavisnosti od položaja preklopnika tako da daje vrednost merene struje.

1) Pri merenju **jednosmernog napona** metrološka svojstva voltmetra, pri temperaturi ambijenta 23 °C, su sledeća:

- Voltmetar prikazuje vrednost jednosmerne komponente ulaznog napona uz potiskivanje naizmenične komponente napona.
- Merni opseg $-1,0000 \text{ V}$ do $+1,0000 \text{ V}$.
- Rezolucija $0,1 \text{ mV}$.
- Greška pri merenoj vrednosti oko $-1,0000 \text{ V}$ ili $+1,0000 \text{ V}$, $0,05 \% \text{ i.}$
- Greške usled nelinearnosti, u celom mernom opsegu, maksimalni moduo, $0,05 \% \text{ i.} + 0,1 \text{ mV}$.
- Temperaturna nestabilnost, maksimalni moduo, $11 \cdot 10^{-6} \text{ i./K} + 2 \text{ } \mu\text{V/K}$.
- Ulaz: struja curenja, maksimalni moduo, 100 pA ; ulazna otpornost, minimalno, $15 \text{ G}\Omega$.
- Maksimalni dozvoljeni ulazni napon, jednosmerna ili vršna vrednost, -15 V do $+15 \text{ V}$.

2) Pri merenju **prostoperiodičnog napona**, metrološka svojstva voltmetra sa AC-DC konvertorom, pri temperaturi ambijenta 23 °C, su sledeća:

- Voltmetar prikazuje efektivnu vrednost prostoperiodičnog ulaznog napona uz potiskivanje jednosmerne komponente napona.
- Merni opseg $0,0800 \text{ V}$ do $1,0000 \text{ V}$.
- Rezolucija $0,1 \text{ mV}$.
- Greške zavisne od frekvencije i vrednosti merenog napona date su u tabeli 2 i na slici 5.
- Temperaturna nestabilnost, maksimalni moduo, $15 \cdot 10^{-6} \text{ i./K} + 1 \text{ } \mu\text{V/K}$.
- Ulazna impedansa, $1 \text{ M}\Omega \pm 0,1 \% \text{ paralelno sa } 70 \text{ pF} \pm 20 \%$.
- Maksimalni dozvoljeni ulazni napon 16 V RMS ili DC.
- Izlazna otpornost AC-DC konvertora, $32 \text{ k}\Omega$ do $36 \text{ k}\Omega$, nelinearna.



Slika 5. Poznati deo greške nelinearnosti AC-DC konvertora u zavisnosti od vrednosti merenog napona pri frekvencijama 11 Hz do 1 kHz. (Ne računajući nelinearnost DC voltmetra.)

Tabela 2. Greška prikazane vrednosti napona u zavisnosti od frekvencije i vrednosti merenog napona.

Frekvencija napona	Maksimalna relativna greška pri dole navedenoj merenoj vrednosti ⁸⁾		
	0,4 V do 1 V	0,1 V do < 0,4 V	0,08 V do < 0,1 V
> 3,5 Hz do 11 Hz ⁹⁾	$-1,0 \% \text{ i. do } +0,1 \% \text{ i.}$		
> 11 Hz do 1 kHz ⁹⁾	$\pm 0,1 \% \text{ i.}$	$-0,15 \% \text{ i. do } +0,0 \% \text{ i.}$	$-0,25 \% \text{ i. do } 0,0 \% \text{ i.}$
> 1 kHz do 3 kHz	$\pm 0,5 \% \text{ i.}$	$-1,0 \% \text{ i. do } +0,5 \% \text{ i.}$	
> 3 kHz do 30 kHz	$-1,0 \% \text{ i. do } +0,5 \% \text{ i.}$		

⁸⁾ Date greške obuhvataju i grešku od rezolucije.

⁹⁾ Pri frekvencijama merenog napona manjim od 45 Hz, i u opsegu 60 Hz do 75 Hz, prikazivana vrednost je „modulisana“ frekvencijom merenog napona; u tabeli 2 su date greške srednje vrednosti prikazivanja.

1.4 Voltmetar prostoperiodičnog napona tereta

Voltmetar prostoperiodičnog napona tereta ima galvanski izolovan ulaz. Priključen je unutar uređaja prema šemama na slici 1 i 2 tako da meri napon na sekundaru strujnog transformatora u grani sa šantom za merenje do 10 A.

Ovaj voltmetar prikazuje efektivnu vrednost prostoperiodičnog ulaznog napona uz potiskivanje jednosmerne komponente napona.

Ostala metrološka svojstva pri temperaturi ambijenta 23 °C su sledeća:

- Merni opseg 2,00 V do 40,00 V.
- Rezolucija 10 mV.
- Greške zavisne od frekvencije i vrednosti merenog napona date su u tabeli 3.
- Temperaturna nestabilnost, maksimalni moduo, $40 \cdot 10^{-6}$ i. / K.
- Ulazna otpornost $1,068 \text{ M}\Omega \pm 0,1 \%$.
- Maksimalni dozvoljeni jednosmerni ulazni napon 50 V, ili naizmenični $> 2 \text{ Hz}$, 300 V RMS.

Tabela 3. Greška prikazane vrednosti napona u zavisnosti od frekvencije merenog napona.

Frekvencija napona	Maksimalna relativna greška pri dole navedenoj merenoj vrednosti ¹⁰⁾		
	15 V do 40 V	4 V do < 15 V	2 V do < 4 V
> 3,5 Hz do 11 Hz ¹¹⁾	-1,0 % i. do +0,2 % i.		
> 11 Hz do 1 kHz ¹¹⁾	$\pm 0,20 \%$ i.	-0,25 % i. do +0,0 % i.	-0,4 % i. do +0,0 % i.
> 1 kHz do 3 kHz	$\pm 0,5 \%$ i.	-1,0 % i. do +0,5 % i.	
> 3 kHz do 30 kHz	-1,0 % i. do +0,5 % i.		

¹⁰⁾ Date greške obuhvataju i grešku od rezolucije.

¹¹⁾ Pri frekvencijama merenog napona manjim od 45 Hz, i u opsegu 60 Hz do 75 Hz, prikazivana vrednost je „modulisana“ frekvencijom merenog napona; u tabeli 3 su date greške srednje vrednosti prikazivanja.

1.5 Standardni tereti

U uređaj su ugrađeni otpornici male induktivnosti i povezani prema šemi na slici 1. Sa dva preklopnika na prednjoj ploči (desno, gore) može se postaviti jedna od deset otpornosti koja se „vidi“ između priključka „teret“ i nultih priključaka. Postavljenom otpornošću može se na primer opteretiti sekundar strujnog transformatora, ili zadati struja radi etaloniranja ampermetra (videti „2 Primeri primene“).

Postavljena otpornost može da se smanji za $0,1 \Omega$ kako bi se izvršila korekcija za otpornost šanta za struju do 10 A. Može se postaviti i otpornost $\infty \Omega$ da bi se omogućilo korišćenje ugrađenog voltmetra za merenje napona na sekundaru strujnog transformatora u slučaju kada se koristi spoljni teret, kao i za nezavisno korišćenje voltmetra.

Ostali tehnički podaci:

- Mogu se postaviti sledeće nazivne vrednosti otpornosti za jednosmerne ili naizmenične struje:
 - za ≤ 10 A RMS ili DC: 0Ω
 - za ≤ 6 A RMS ili DC: $0,1 \Omega$, $0,2 \Omega$, $0,4 \Omega$, $0,6 \Omega$ i $1,2 \Omega$
 - za $\leq 1,2$ A RMS ili DC: $2,5 \Omega$, 5Ω , 10Ω , 15Ω i 30Ω .
- Greška postavljenje otpornosti:
 - za nazivnih 0Ω , $+25 \text{ m}\Omega \pm 5 \text{ m}\Omega$
 - za nazivnih $> 0 \Omega$, maksimalno, $\pm(1 \% \text{ nazivne vrednosti}) + (45 \text{ m}\Omega \pm 5 \text{ m}\Omega)$.
- Temperaturni koeficijent postavljene otpornosti, maksimalno:
 - za vrednosti $\leq 0,6 \Omega$, 0 do $+200 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
 - za vrednosti $\geq 1,2 \Omega$, $-50 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ do $+80 \cdot 10^{-6} / \text{K}$.
- Termička otpornost svakog od otpornika prema zajedničkom hladnjaku $< 5 \text{ K/W}$.
- Termička otpornost zajedničkog hladnjaka otpornika prema ambijentu $0,83 \text{ K/W}$.
- Nestabilnost otpornosti kontakata svakog od dva preklopnika za postavljanje otpornosti, do $+7 \text{ m}\Omega$.
- Induktivnost koja se „vidi“ redno povezana postavljenoj otpornosti:
 - za nazivnih 0Ω , $380 \text{ nH} \pm 50 \text{ nH}$
 - za nazivnih $> 0 \Omega$, $1 \mu\text{H} \pm 0,2 \mu\text{H}$.
- Osigurač („Os.1“ na slikama 1 i 2) za 10 A srednje brzi, maksimalni pad napona 120 mV (prema DIN 41571).

1.6 Merni pretvarač temperature okoline šantova

Senzor mernog pretvarač temperature okoline šantova je montiran na metalni blok sa krilcima hlađenim protočnim vazduhom. Blok uobičajeno ima ujednačenu temperaturu približnu temperaturi ambijenta. Na taj blok su montirani šantovi pa je temperatura svakog od šantova jednaka zbiru temperature bloka i proizvoda snage disipacije posmatranog šanta i termičke otpornosti šanta. (Videti „1.1 Merni pretvarači vrednosti struje“ i posebno obrazac (2).) Senzor temperature je montiran u blizini stezača šine „0 V“ pa lokalno zagrevanje spoja ovog priključka, ili priključenog provodnika, ima za posledicu povećanje vrednosti izmerene temperature.

Izlazni napon mernog pretvarača je jednosmerni i proporcionalan je Celzijusovoj temperaturi senzora. Izlaz pretvarača je doveden na utičnice na zadnjoj ploči uređaja. Utičnica sa crnom izolacijom je približno, ali ne tačno, na potencijalu 0 V. Radi merenja temperature okoline šantova potrebno je na izlaz uključiti termometar za senzor LM35 (integrisano kolo) ili voltmetar sa galvanski izolovanim ili diferencijalnim ulazom. Napon sa izlaza se može meriti i ugrađenim voltmetrom ako se prethodno dovede žicama na ulaz na prednjoj ploči označen sa „(1 V)“.

Ostala metrološka svojstva pri temperaturi ambijenta 23 °C su sledeća:

- Merni opseg -40 °C do +110 °C.
- Osetljivost pretvarača 10 mV/°C.
($U_{out} [\text{mV}] = 10 [\text{mV}/^{\circ}\text{C}] \cdot t [^{\circ}\text{C}]$ ili $t [^{\circ}\text{C}] = U_{out} [\text{mV}] / 10 [\text{mV}/^{\circ}\text{C}]$)
- Greška u mernom opsegu, maksimalni moduo, 2 °C.
- Impedansa opterećenja: $\geq 50 \text{ k}\Omega$ paralelno sa $\leq 20 \text{ nF}$.
- Izlazna otpornost $\leq 5 \Omega$.

1.7 Opšti podaci

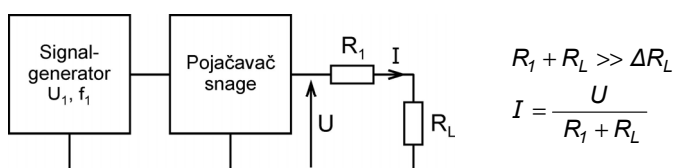
- Izolacija nultih priključaka prema kućištu i uzemljenu, pri frekvencijama 0 do 50 Hz, slučajno (ne trajno), 300 V RMS ili DC.
- Napajanje, za zanemarljiv uticaj na izmerenu vrednost, 207 V do 255 V, 50 Hz, do 35 VA.
- Temperatura ambijenta, 0 do 40 °C.
- Vlažnost ambijenta, nekondenzujuća, 0 % RH do 99 % RH.
- Kućište, gabariti, V 132,4 mm x Š 482,6 mm x D 450 mm.
- Masa 17 kg.

2 Primeri primene

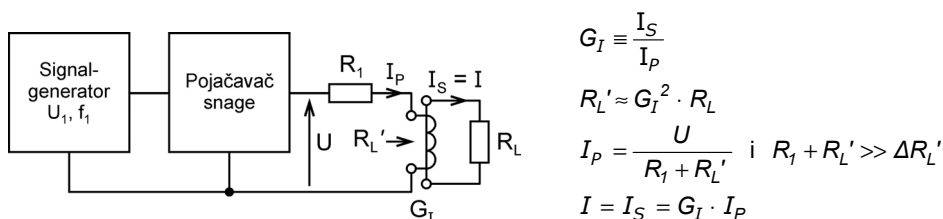
2.1 Generisanje konstantne prostoperiodične struje

Za etaloniranje strujnih transformatora i ampermetara potrebna je prostoperiodična struja stabilne vrednosti i frekvencije koja je uz to i sa dovoljno malo izobličenja. Stabilnu vrednost struje zahteva većina metoda merenja (izuzev nekih ratiometrijskih). Frekvencija struje mora da bude jednaka frekvenciji električne mreže zbog pojave efekta izbijanja. Metrološki propisi, kao i svojstva merne opreme, zahtevaju da talasni oblik struje bude što približniji prostoperiodičnom talasnom obliku, to jest da je sa dovoljno malo izobličenja, to jest da ima dovoljnu spektralnu čistoću. Prethodno navedeni zahtevi se mogu ispuniti generisanjem struje elektronskim uređajima.

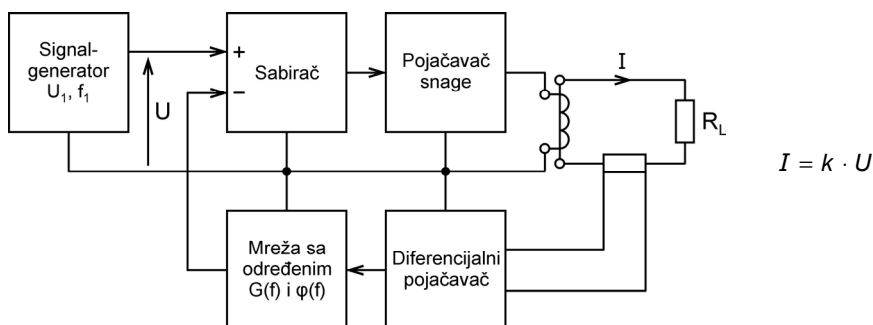
Naredne četiri šeme prikazuju sklopove za generisanje konstantne struje (tj. struje konstantnih parametara) kroz teret R_L . Vrednost i frekvencija struje su određene signal-generatorom.



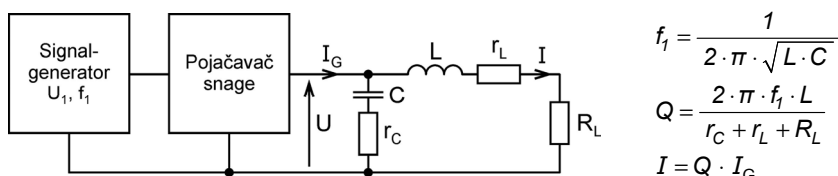
Slika 6. Šema osnovnog sklopa za generisanje struje. Za velike struje kroz teret male otpornosti potreban je pojačavač snage koji je skup i energetski neefikasan. Sličnim sklopom se može generisati i jednosmerna struja.



Slika 7. Šema sklopa za generisanje struje korišćenjem strujnog transformatora. Strujni transformator služi da snagu pojačavača relativno velikog napona i male struje, transformiše u približno istu snagu tereta relativno velike struje i malog napona. Mana sklopa je povećanje izobličenja transformatorom.



Slika 8. Šema sklopa za generisanje konstantne struje automatskom regulacijom. Šant na šemi može da bude zamenjen pretvaračem uređaja SM307 koji ujedno služi i za merenje vrednosti struje.



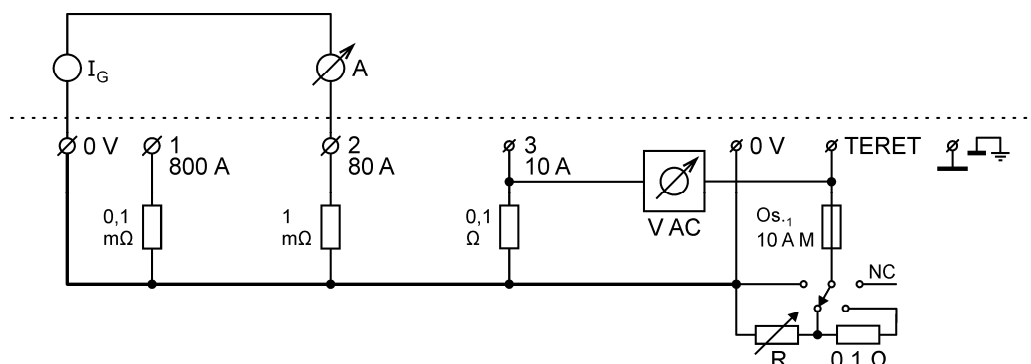
Slika 9. Šema sklopa za generisanje struje pomoću paralelnog oscilatornog kola u rezonansi. Teret je redno povezan sa kalemom, pa je struja kroz njega Q puta veća od struje iz naponskog generatora (Q je faktor dobrote). Ovakva veza deluje i kao filter pa povećava spektralnu čistoću struje kroz teret. Sklop je pogodan za generisanje struje do tridesetak ampera i frekvencije veće od kiloherca.

2.2 Etaloniranje ampermetra

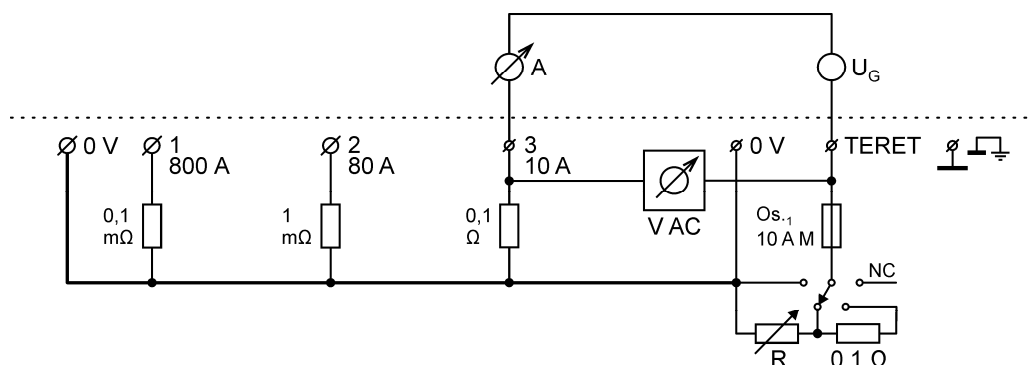
Naredne tri blok šeme prikazuju povezivanja uređaja SM307 u sistem za etaloniranje ampermetara. Za merenje vrednosti struje može se koristiti voltmetar ugrađen u SM307 ili spoljni voltmetar.

U primerima na slikama 10, 11 i 12, pri korišćenju ugrađenog voltmetra i odgovarajućeg mernog pretvarača, za prostoperiodičnu struju frekvencije > 11 Hz do 1 kHz i vrednosti 1 A do 800 A, maksimalni moduo kombinovane greške prikazane vrednosti struje kroz etalonirani ampermetar je $0,20\%$ i.

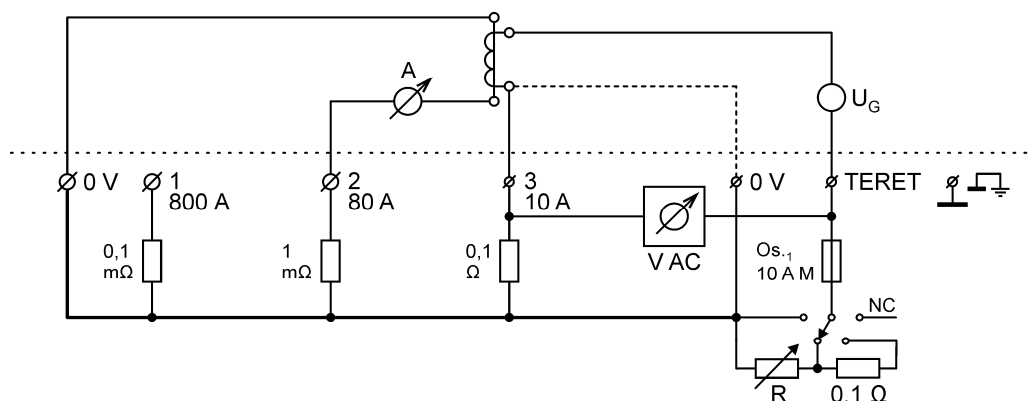
Za primere na slikama 10 i 11, pri korišćenju ugrađenog voltmetra i odgovarajućeg mernog pretvarača, za jednosmernu struju vrednosti $\pm 0,8$ A do ± 800 A, maksimalni moduo kombinovane greške prikazane vrednosti struje kroz etalonirani ampermetar je $0,18\%$ i., a relativna kombinovana standardna merna nesigurnost je $0,060\%$ ¹²⁾.



Slika 10. Šema povezivanja ampermetra za naizmeničnu ili jednosmernu struju radi etaloniranja. Strujni generator označen sa I_G može se realizovati jednim od sklopova iz poglavlja 2.1.



Slika 11. Šema povezivanja ampermetra za naizmeničnu ili jednosmernu struju radi etaloniranja. Struja do $1,2$ A, ili do 6 A, se generiše korišćenjem otpornika ugrađenih u uređaj SM307 i spoljnog naponskog generatora podesivog napona (ekvivalentno sklopu na slici 6).



Slika 12. Šema povezivanja ampermetra za naizmeničnu struju radi etaloniranja. Naizmenična struja se generiše korišćenjem otpornika ugrađenih u uređaj SM307, strujnog transformatora i spoljnog naponskog generatora podesivog napona (ekvivalentno sklopu na slici 7).

¹²⁾ Za određivanje merne nesigurnosti videti: Kostić; (u pripremi); Metrološki priručnik.

2.3 Etaloniranje strujnog transformatora

Blok šema na slici 13 prikazuje povezivanja uređaja SM307 u sistem za određivanje metroloških svojstava strujnog transformatora. Prikazanim sklopom se mogu odrediti:

- vrednosti struja primara i sekundara, a odatle i odnos transformacije struja
- fazna razlika struje primara i sekundara
- izobličenja struje primara i struje sekundara.

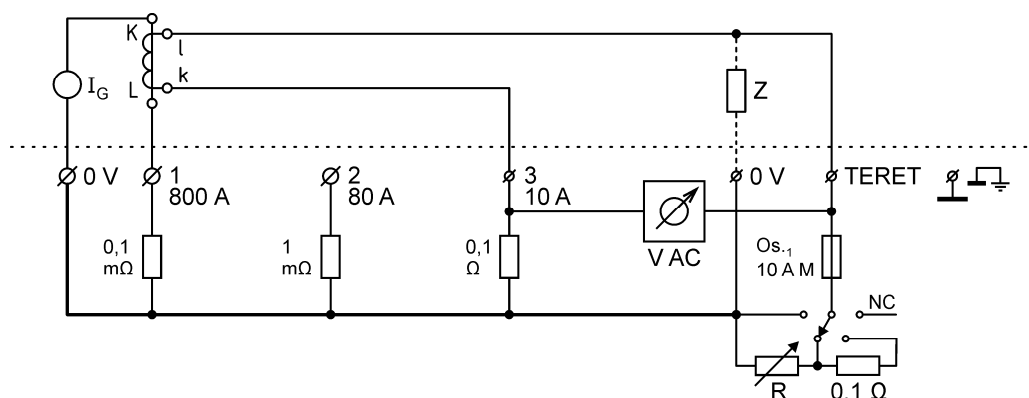
Vrednosti struja se određuju korišćenjem odgovarajuća dva merna pretvarača vrednosti struje i voltmetra ugrađenog u uređaj SM307 ili spoljnog voltmetra. Za određivanje odnosa transformacije struja, tj. količnika vrednosti struje primara i struje sekundara, treba koristiti isti voltmetar na istom mernom opsegu, a pri višim frekvencijama i iste veze do ulaza voltmetra. Na taj način se, pri izračunavanju količnika vrednosti struja, potiru greške voltmetra koje potiču od greške skaliranja i frekventne karakteristike, a ostaju greške od nelinearnosti i rezolucije. (Korišćenje istog mernog opsega voltmetra omogućava isti interval izlaznog napona sva tri merna pretvarača vrednosti struje.) Pri korišćenju ugrađenog voltmetra pri strujama frekvencije > 11 Hz do 150 Hz, i bez korekcije nelinearnosti, maksimalni moduo kombinovane greške određenog odnosa transformacije je oko 0,2 %¹³⁾.

Fazna razlika struje primara i sekundara meri se korišćenjem dva odgovarajuća merna pretvarača faze struje i spoljnog univerzalnog brojača ili osciloskopa pogodnog za merenje fazne razlike. Brojač treba povezati na odgovarajuće izlaze na prednjoj ploči uređaja SM307 prema poglavlju „1.2 Merni pretvarači faze struje“.

Harmonijska izobličenja struje primara i sekundara se mogu odrediti priključivanjem spoljnog spektralnog analizatora (ili merača izobličenja, ili selektivnog voltmetra) na odgovarajući izlaz pretvarača vrednosti struje.

Struja generatora označenog sa I_G može se generisati na jedan od načina prikazanih u poglavlju „2.1 Generisanje konstantne prostoperiodične struje“.

Sekundar strujnog transformatora treba opteretiti ugrađenim standardnim teretima (videti poglavlje „1.5 Standardni tereti“) ili spoljnom impedansom. Ugrađeni voltmetar omogućava merenje napona sekundara.



Slika 13. Šema povezivanja strujnog transformatora radi određivanja njegovih metroloških svojstava.

¹³⁾ Za određivanje merne nesigurnosti videti: Kostić; (u pripremi); Metrološki priručnik.

2.4 Merenje impedanse pri velikim strujama i naponima

Na slici 14 je prikazano povezivanje uređaja SM307 u sistem za merenje aktivne i reaktivne komponente impedanse pri velikim strujama i naponima. Na ovaj način se može izmeriti impedansa električne mašine pri njenom uobičajenom opterećenju. Tako se na primer može meriti impedansa koja se „vidi“ na priključcima elektromotora sa normalnim mehaničkim opterećenjem. Promena mehaničkog opterećenje motora menja i otpornost i reaktansu koja se „vidi“ na priključcima motora.

Aktivna i reaktivna komponenta priključene impedanse se mere posredno, merenjem fazne razlike struja kroz priključenu impedansu i struje kroz referentni kalem. Za referentni kalem mora da bude poznata induktivnost i ekvivalentna redna otpornost.

U narednom tekstu su dati obrasci za izračunavanje aktivne i reaktivne komponente priključene impedanse. Generator napona daje napon vrednosti U_G , i frekvencije f . Uređajem SM307 se na uobičajeni način, pomoću spoljnog brojača ili osciloskopa, meri fazni stav φ , struje kroz priključenu impedansu u odnosu na struju kroz referentni kalem. Aktivna komponenta R_2 i reaktivna komponenta X_2 izračunavaju se iz sistema jednačina (3). Induktivnost, odnosno kapacitivnost, reaktanse izračunavaju se obrascima (4). Kao što pokazuje slika 14 navedeni obrasci važe za redne veze reaktansi i otpornosti; redna veza se može transformisati u ekvivalentnu paralelnu, kao i obrnuto.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$X_1 = \omega \cdot L_1$$

$$\mathbf{Z}_{ref.} = (r_1 + R_{\dot{s}3}) + j X_1$$

$$\mathbf{Z}_M = (R_2 + R_{\dot{s}2}) + j X_2$$

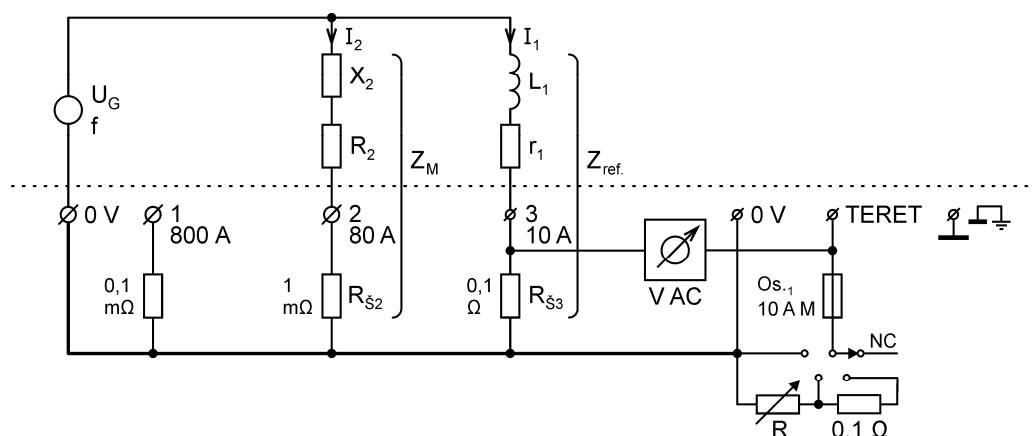
$$|\mathbf{Z}_M| = \frac{|U_G|}{|I_2|}$$

$$\varphi = \arg I_2 - \arg I_1$$

$$\begin{cases} R_2 = \sqrt{|\mathbf{Z}_M|^2 - X_2^2} - R_{\dot{s}2} \\ X_2 = (R_2 + R_{\dot{s}2}) \cdot \tan(\arctan \frac{X_1}{r_1 + R_{\dot{s}3}} - \varphi) \end{cases} \quad (3)$$

...

$$L_2 = \frac{X_2}{\omega} \quad \text{ili} \quad C_2 = \frac{-1}{\omega \cdot X_2} \quad (4)$$



Slika 14. Šema povezivanja uređaja za merenje aktivne i reaktivne komponente impedanse pri velikim strujama i naponima. Na šemi su označeni i parametri koji se koriste pri računanju.

3 Jedan mogući način etaloniranja podsklopova uređaja SM307

Etaloniranje se može obaviti na različite načine, a kao rezultat da se da izveštaj različitog oblika. Međutim svako etaloniranje mora da utvrdi vezu između vrednosti ostvarene etalomom i vrednosti koju daje merilo. Etaloniranje može da bude sprovedeno tako da potvrdi da je greška merila u granicama dozvoljene greške, ili u granicama određenim klasom tačnosti, ili u granicama koje navodi proizvođač merila.¹⁴⁾

U narednom tekstu su date neke napomene koje mogu biti korisne pri određivanju postupka etaloniranja.

¹⁴⁾ Videti: Kostić; (u pripremi); Metrološki priručnik.

3.1 Etaloniranje mernih pretvarača vrednosti struje

Povezati uređaje prema poglavlju „1.1 Merni pretvarači vrednosti struje“.

Etaloniranjem za svaki od tri merna pretvarača odrediti:

- grešku nule pretvarača
- merne signale pretvarača pri jednosmernoj struji
- merne signale pretvarača pri naizmjeničnoj struji.

U izveštaju o etaloniranju dati vrednosti struja propuštanih kroz merni pretvarač i standardnu mernu nesigurnost tih struja, kao i odgovarajuće vrednosti napona izmerenih na izlazima mernih pretvarača (merni signal) i takođe standardnu mernu nesigurnost tog napona. Dati i stepene slobode standardnih nesigurnosti. Vrednosti izveštaja o etaloniranju mogu da budu dati tabelarno kao što je prikazano tabelom 4. Potrebna je po jedna tabela za svaki od tri merna pretvarača vrednosti struje i za nekoliko specifičnih frekvencija uključujući i 0 Hz, tj. jednosmernu struju.

Određivanje greške nule pretvarača obaviti merenjem jednosmernog napona na izlazu mernog pretvarača pri otvorenoj grani u kojoj je ulaz pretvarača.

Određivanje mernog signala pretvarača pri jednosmernoj struji obaviti propuštanjem jednosmerne struje poznate vrednosti kroz ulaz mernog pretvarača i merenjem jednosmernog napona na izlazu mernog pretvarača.

Određivanje mernog signala pretvarača pri naizmjeničnoj struji obaviti propuštanjem prostoperiodične struje kroz ulaz mernog pretvarača i merenjem naizmjeničnog napona na izlazu mernog pretvarača. Propuštana struja mora da bude poznate vrednosti i frekvencije i dovoljne spektralne čistoće. Voltmetar kojim se meri izlazni napon pretvarača mora da meri samo naizmjeničnu komponentu napona.

Prethodni postupci ne obuhvataju određivanje nestabilnosti usled starenja i temperaturne nestabilnosti.

3.1.1 Alternativni postupci

Umesto određivanja mernog signala pretvarača, narednim postupkom se može odrediti osetljivost pretvarača i pri jednosmernoj i pri naizmjeničnoj struji. Osetljivosti pretvarača ima dimenziju i prirodu otpornosti, pa se tako može i odrediti korišćenjem ratiometrijske metode.

Struju stabilne vrednosti propuštati kroz redno povezan ulaz pretvarača i referentni otpornik relativno male induktivnosti i poznatog modula impedanse $|Z_{ref}|$. Pri tome izmeriti napon na priključcima referentnog otpornika, U_{Zref} , i izlazni napon pretvarača, U_{out} . Poželjno je da referentni otpornik ima moduo impedanse približno jednak nominalnoj osetljivosti pretvarača, S , i da se naponi mere istim voltmetrom na istom opsegu. Iz prethodno dobijenih vrednosti se računa osetljivost pretvarača obrascem (5).

$$S = |Z_{ref}| \cdot (U_{out} / U_{Zref}) \quad (5)$$

Tabela 4. Primer tabele za izveštaj o etaloniranju mernih pretvarača vrednosti struje.

Merni pretvarač vrednosti struje do ____ A, izlazni priključak označen sa „NAPONSKI IZLAZ ____“.

Ulazna struja frekvencije: ____ Hz.

Harmonici ulazne struje: – ____ dB ili manji.

Propusni opseg korišćenog voltmetra: _____.

Zahtevana ulazna struja, RMS	Ulazna struja pretvarača			Napona izmeren na izlazu pretvarača		
	Vrednost, RMS	Standardna nesigurnost	Stepen slobode	Vrednost, RMS	Standardna nesigurnost	Stepen slobode
0 A (otvorena ulazna grana)	0 A					
8 A ± 0,2 A						
40 A ± 1 A						
80 A ± 1 A						

3.2 Etaloniranje mernih pretvarača faze struje

Povezati uređaje prema poglavlju „1.2 Merni pretvarači faze struje“.

Određivanje greške faze pretvarača obaviti korišćenjem referentnih otpornika poznate i relativno male induktivnosti i univerzalnog brojača ili osciloskopa pogodnog za merenje fazne razlike. Pri zahtevanoj frekvenciji i vrednosti ulazne struje izmeriti razliku faza napona na referentnom otporniku i izlaznog napona mernog pretvarača faze. Izmerenu vrednost fazne razlike korigovati za prednjačenje faze referentnog otpornika usled njegove induktivnosti.

U izveštaju o etaloniranju dati apsolutne greške faza napona izmerenih na izlazima mernih pretvarača (merni signali) i standardne merne nesigurnost tih grešaka. Takođe dati stepene slobode standardnih nesigurnosti.

3.3 Etaloniranje ostalih podsklopova

Dva voltmetra uređaja SM307 se etaloniraju na uobičajen način. AC-DC konvertor se može etalonirati kao merni pretvarač, ili zajedno sa DC voltmetrom kao AC voltmetar.

Za standardne terete se može izmeriti otpornost i ekvivalentna redna induktivnost.¹⁵⁾

Merni pretvarač temperature okoline šantova se može etalonirati, kada ne protiče struja kroz šantove, na temperaturi ambijenta, ili na različitim temperaturama stavljanjem uređaja SM307 u termostatsku komoru.

¹⁵⁾ Videti: Kostić; 2008; Četvorožično merenje reaktanse na osnovu faznog stava napona.

4 Osnovni metrološki termini ¹⁶⁾

Metrologija je nauka o merenjima.

Merenje je skup postupaka čiji je cilj određivanje brojčane vrednosti pojedinačne veličine.

Pokazivanje merila (pokazivanje) je vrednost veličine koju daje merilo.

Rezultat merenja je merenjem dobijena vrednost koja se pripisuje merenoj veličini.

Tačnost rezultata je kvalitativni pojam koji označava nivo bliskosti rezultata merenja i vrednosti merene veličine.

Apsolutna greška ima vrednost datu donjim obrascem.

$$\text{Apsolutna_greška} = \text{Rezultat_merenja} - \text{Vrednost_merene_veličine}$$

Relativna greška ima vrednost datu donjim obrascem.

$$\text{Relativna_greška} = \frac{\text{Apsolutna_greška}}{\text{Vrednost_merene_veličine}}$$

Sistematska greška je srednja vrednost, koja bi se dobila beskonačnim brojem merenja iste veličine obavljenih u uslovima ponovljivosti, minus, vrednost merene veličine.

Slučajna greška je pojedinačni rezultat merenja minus aritmetička sredina koja bi se dobila beskonačnim brojem merenja iste veličine obavljenih u uslovima ponovljivosti.

Greška nule je apsolutna greška merila pri vrednosti merene veličine jednakoj nuli.

Rezolucija (ili razlučivanje) je najmanja razlika u pokazivanju merila koja može jasno da se uoči.

Nestabilnost usled starenja (nestabilnost) je nestabilnost merila tokom vremena.

Temperaturna nestabilnost je nestabilnost pri promeni temperature okoline.

Gruba greška je rezultat merenja za koji je proverama utvrđeno da ne odražava regularnu, na planirani način dobijenu vrednost.

Kombinovana greška (ili složena greška) je ukupna greška posrednog merenja, ili merila, nastala kao posledica grešaka komponenata merenja.

Merni opseg (ili opseg merenja) je interval vrednosti merene veličine za koje greška merila leži unutar određenih granica.

Merni pretvarač je merilo koje obezbeđuje određenu vezu između vrednosti njegove ulazne i vrednosti njegove izlazne veličine.

Funkcija odziva je veza između ulazne i izlazne veličine mernog pretvarača pri određenim uslovima.

Osetljivost mernog pretvarača je promena njegove izlazne veličine podeljena odgovarajućom promenom njegove ulazne veličine.

Merni signal je veličina koja predstavlja merenu veličinu. Veza između mernog signala i merne veličine daje se funkcijom.

Nazivna vrednost (ili nominalna vrednost) je zaokružena ili približna vrednost svojstva merila značajnog za merenje.

Dobra procena vrednosti je procenjena vrednost koja je najverovatnija.

Standardna merna nesigurnost je standardna devijacija rezultata merenja koji je dobra procena vrednosti veličine.

Stepen slobode je parametar hi-kvadrat raspodele, ili t-raspodele.

Etalon je merilo, ili referentni materijal, namenjen da definiše, ostvari, čuva ili reprodukuje jedinicu, ili jednu ili više vrednosti veličine, da bi služila kao osnova merenja.

Etaloniranje je skup postupaka čiji je cilj određivanje veze između vrednosti veličine koju pokazuje merilo i odgovarajuće vrednosti ostvarene etalomom.

¹⁶⁾ Prema: Kostić; (u pripremi); Metrološki priručnik.