



## Rezonantni ispitni sistemi [1], [2]

Bojana Škrbić

Prilikom ispitivanja dominantno kapacitivnih opterećenja sa malim gubicima visokim naponom naizmenične učestanosti (HVAC – *High Voltage Alternating Current*) velike uštede u prostoru, investicionim i eksploatacionim troškovima mogu se postići upotrebom rezonantnih kola umesto konvencionalnih HVAC ispitnih sistema koji se zasnivaju na ispitnim transformatorima. Kapacitivno opterećenje se potpuno kompenzuje, te sistem iz mreže uzima samo aktivnu snagu  $P_f$  koja se disipira u ispitnom kolu. Ulazna snaga jednaka je ukupnim gubicima u ispitnom sistemu koje čine: gubici u prigušnici (gubici u namotaju prigušnice, gubici u jezgru i gubici usled rasipnog fluksa) i gubici u ispitivanom objektu (gubici u izolaciji usled rezistivne struje curenja, gubici u opremi za priključenje ispitivanog objekta na ispitni sistem kojom se sprečava pojave korone i gubici u provodnim delovima ispitnog sistema usled rasipnog fluksa).

Kvalitet rezonantnog ispitnog sistema opisuje se faktorom dobrote  $Q$ , koji predstavlja odnos između kapacitivne ispitne snage  $S_C$  i ulazne snage  $P_f$ :

$$Q = \frac{S_C}{P_f} \quad (1)$$

Ispitni sistem se može posmatrati kao paralelna veza napojnog kola čiji je faktor dobrote  $Q_f$  i ispitivanog objekta sa faktorom dobrote  $Q_t$ . Tada je

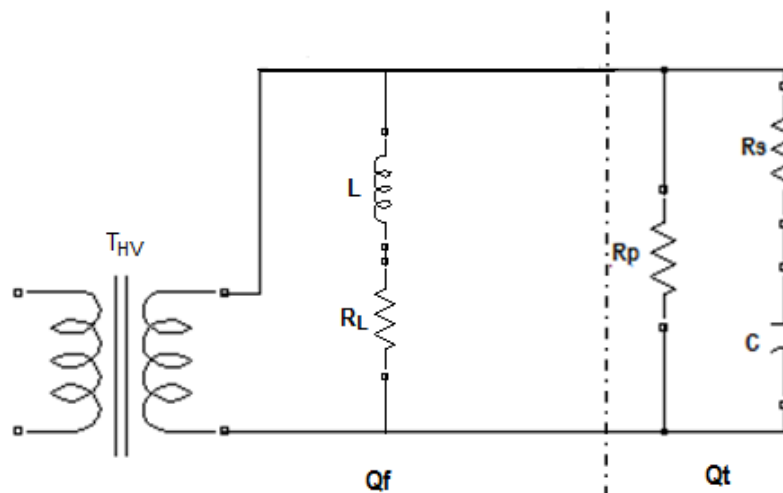
$$Q = \frac{1}{\frac{1}{Q_f} + \frac{1}{Q_t}} = \frac{Q_f \cdot Q_t}{Q_f + Q_t} \quad (2)$$

Prema tome, faktor dobrote je parametar koji zavisi od ispitnih uslova, odnosno od prirode ispitivanog objekta. U slučaju objekata velikih kapacitivnosti, kapacitivna ispitna snaga je velika i faktor dobrote  $Q_t$  je veliki,  $Q_t > Q_f$ , te vrednost faktora dobrote  $Q$  dominantno određuje  $Q_f$  koje zavisno od dizajna ima vrednost  $Q_f = 50 - 200$ . Kada objekat ispitivanja ima velike rezistivne gubitke, faktor dobrote  $Q_t$  je manji od  $Q_f$ , stoga dominantno određuje vrednost ukupnog faktora dobrote ispitnog sistema  $Q$ .

Radi korektnog projektovanja rezonantnog ispitnog sistema mora se poznavati oblast njegove primene, odnosno vrednosti faktora dobrote ispitnog sistema za slučajevne priključenja različitih objekata. Snaga pobudnog transformatora  $S_e$  bira se na osnovu ulazne snage  $P_f$  određene za najmanju vrednost potrebnog faktora dobrote sistema:  $P_f = \frac{S_C}{Q_{min}}$ , tako da je  $S_e \geq P_f$ . Naznačeni napon transformatora bira se na osnovu maksimalnog ispitnog napona HVAC ispitivanja za koja je ispitni sistem namenjen. Prilagođavanje sistema različitim potrebama za ispitnom snagom i ispitnim naponima postiže se pomoću pobudnog transformatora sa otepcima na sekundarnom namotaju. Kontinualna regulacija napona vrši se pomoću regulacionog transformatora na koji se priključuje pobudni transformator.

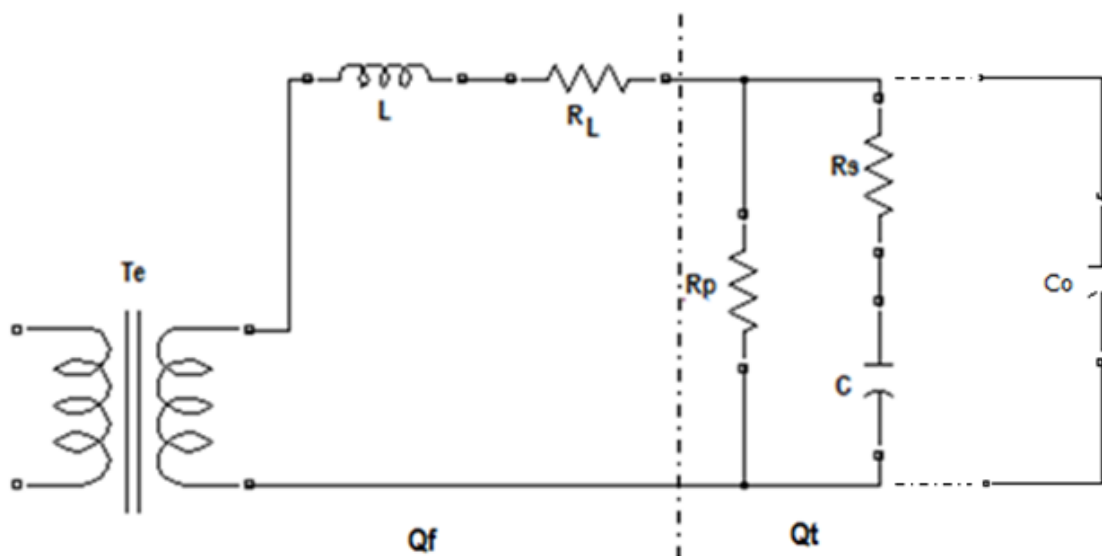
Rezonantni ispitni sistemi mogu biti paralelni i serijski. Ekvivalentna šema paralelnog rezonantnog kola prikazana je na slici 1. Paralelno sa sekundarnom HV pobudnog transformatora vezana je prigušnica i kapacitivni objekat ispitivanja. Zbog ovakve konfiguracije izlazni napon može biti veoma izobličen višim harmonicima. Paralelni rezonantni sistemi daju stabilniji izlazni napon u odnosu na serijske rezonantne sisteme iz razloga što izlazni napon direktno kontrolište

visokonaponski transformator. Ispitni napon je prema tome određen prenosnim odnosom transformatora. Stoga je brzina uspostavljanja ispitnog napona nezavisna od stepena kompenzacije i faktora dobrote ispitnog kola. Moguće je postići pun ispitni napon čak i kad opterećenje nije priključeno na ispitni sistem, što je pogodno kada se vrši kalibracija merne opreme ili merenje nivoa parcijalnih pražnjenja ispitnog sistema. Koriste se za opterećenja sa nestabilnom omskom komponentom, tipično za ispitivanje izolacije generatorskih namotaja, ispitivanja korone i dinamička ispitivanja kondenzatorskih baterija.



Slika 1. Paralelno rezonantno kolo:  $T_{HV}$  – visokonaponski transformator;  $L, R_L$  - induktivnost i otpornost prigušnice ispitnog sistema;  $C, R_s, R_p$  – kapacitivnost, serijska i paralelna otpornost ispitivanog objekta;  $Q_f, Q_t$  – faktori dobrote ispitnog sistema i ispitivanog objekta.

Serijska rezonantna kola imaju daleko širu primenu. Sistem se sastoji od pobudnog transformatora vezanog na red sa prigušnicom koja sa kapacitivnim objektom ispitivanja formira redno rezonantno kolo (slika 2). Ispitni sistem čini i kondenzator baznog opterećenja  $C_0$  koji omogućava proveru performansi sistema i kalibraciju mernih instrumenata kada ispitivani objekat nije priključen.



Slika 2. Serijski rezonantni ispitni sistem:  $T_e$  – pobudni transformator;  $L, R_L$  - induktivnost i otpornost prigušnice ispitnog sistema;  $C, R_s, R_p$  – kapacitivnost, serijska i paralelna otpornost ispitivanog objekta;  $Q_f, Q_t$  – faktori dobrote ispitnog sistema i ispitivanog objekta.

Ispitni napon  $V_t$  određen je faktorom dobrote serijskog rezonantnog kola  $Q_s$ :

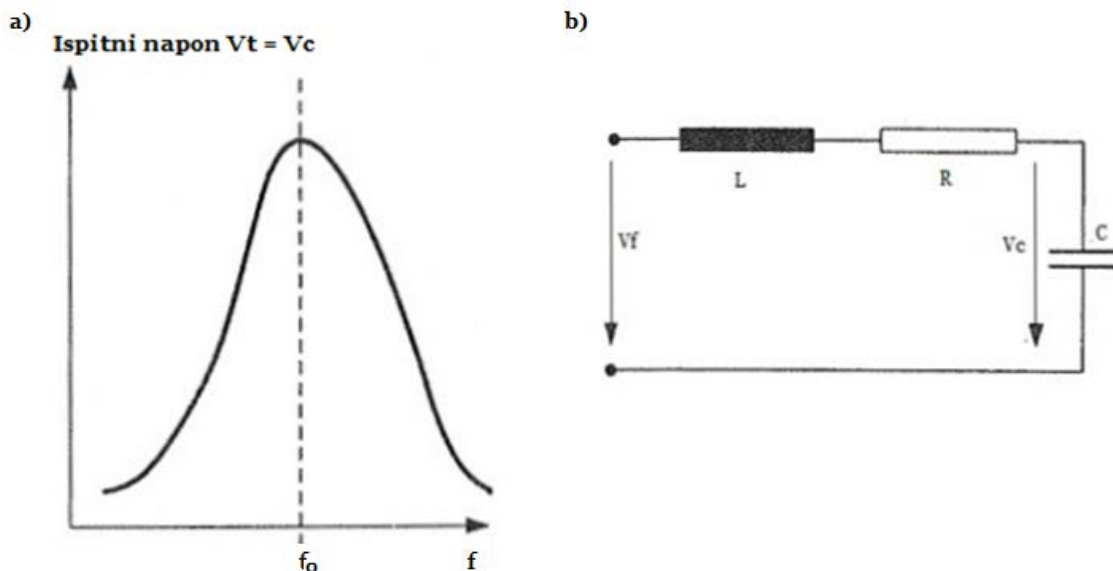
$$Q_s = \frac{S_C}{P_f} \approx \frac{V_t \cdot I_t}{V_f \cdot I_t} = \frac{V_t}{V_f} \quad (3)$$

gde je:  $V_f$  – napon napajanja sistema,  $I_t$  – ispitna struja.

Na slici 3 prikazana je pojednostavljena šema serijskog rezonantnog kola. Rezonancija nastaje kada pad napona na induktivnosti prigušnice potpuno kompenzuje pad napona na ekvivalentnoj kapacitivnosti ispitivanog objekta, zbog čega dolazi do naglog povećanja struje u kolu, odnosno napona na kondenzatoru. Rezonancija je opisana relacijom  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ . Frekvencija  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  naziva se rezonantna frekvencija. Kolo se uvodi u rezonanciju na dva načina: promenom  $L$  pri konstantnoj učestanosti  $\omega$  ili promenom  $\omega$  pri konstantnoj induktivnosti  $L$  (slika a). Prema tome razlikujemo dve varijante ovih sistema:

1. Rezonantni ispitni sistemi sa prigušnicama promenljive induktivnosti  
(*AC resonant circuit of variable inductance – ACRL sistemi*)
2. Rezonantni ispitni sistemi sa promenljivom frekvencijom  
(*AC series resonant circuit of variable frequency – ACRF sistemi*)

U oba slučaja izlazni signal je veoma slabo izobličen usled prisustva redne prigušnice. Ovi sistemi su idealni za merenje parcijalnih pražnjenja, zbog čega su našli veliku primenu u dijagnostičkim ispitivanjima. Serijska rezonantna kola karakteriše velika impedansa kratkog spoja, odnosno male struje kratkog spoja zbog čega pri nastanku razornog pražnjenja na ispitivanom objektu ne dolazi do njegove eksplozije. Takođe, pri ispitivanju SF6 rasklopne opreme ne dolazi do pojave visokih tranzijenata usled višestrukih pražnjenja. Kapacitivni objekat je potpuno kompenzovan stoga kod ovih sistema nemamo dodatne kompenzacione prigušnice kao kod konvencionalnih sistema. Kompaktan dizajn, izuzetno mali odnos težine i snage, portabilnost i ekonomičnost osnovne su prednosti ovih sistem u odnosu na druge visokonaponske ispitne sisteme.



Slika 3. Rezonantna kriva (a) rednog RLC kola (b).

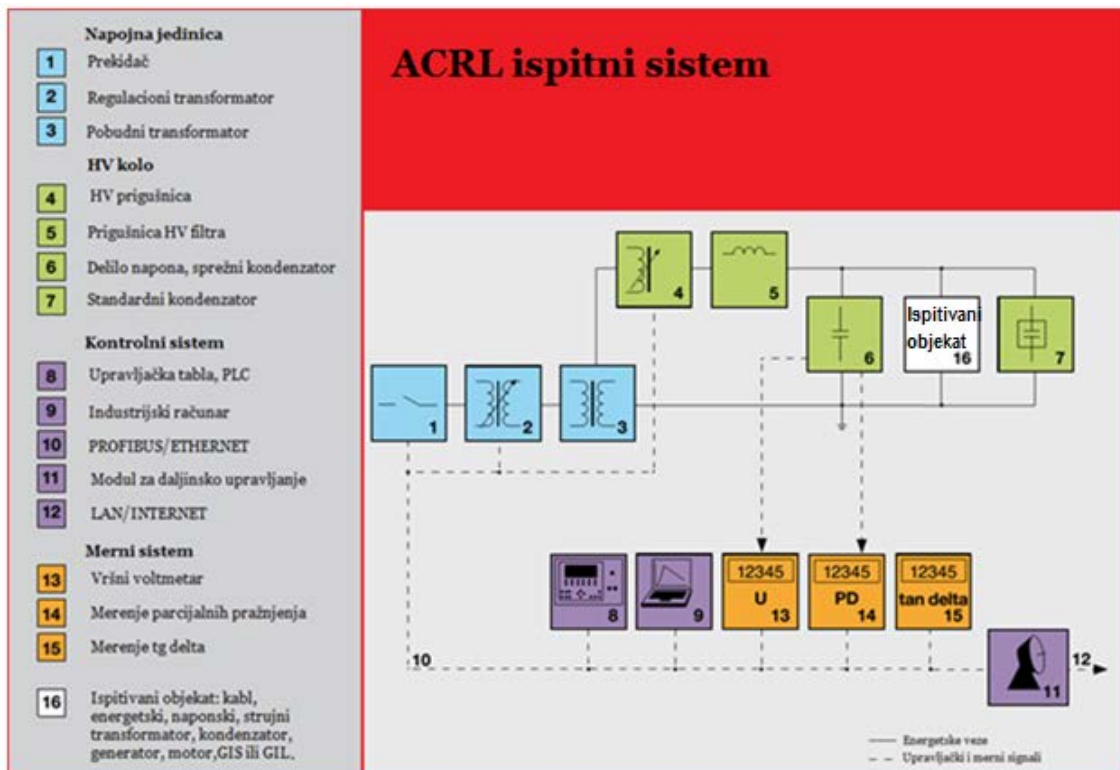
## 1. Rezonantni ispitni sistemi sa prigušnicama promenljive induktivnosti

Serijski rezonantni sistemi sa promenljivom induktivnošću (*AC resonant circuit of variable inductance* – ACRL sistemi). imaju rezonantnu učestanost  $f_0$  jednaku učestanosti napajanja  $f_m$ . Induktivnost prigušnice  $L$  se podešava tako da bude ispunjen uslov:

$$L = \frac{1}{(2\pi f_m)^2 \cdot C} \quad (4)$$

gde je  $C$  kapacitet ispitivanog objekta. Na slici 4 prikazana je principijelna šema ACRL ispitnog sistema.

Prigušnice promenljive induktivnosti imaju u gvozdenom jezgru vazdušni zazor čija se širina menja delovanjem posebnog mehanizma. Na taj način vrši se kontinualna regulacija induktivnosti u opsegu od  $L_{min}$  do  $L_{max}$ . Induktivnost je obrnuto proporcionalna širini vazdušnog zazora: sa povećanjem širine zazora, rasipni fluks prigušnice raste, stoga njena induktivnost opada ( $L_{max} = k \frac{1}{a_{min}}$ ,  $k$  – faktor proporcionalnosti). Rasipni fluks uzrokuje gubitke u prigušnici i njeno zagrevanje. Gubici u prigušnici smanjuju faktor dobrote ispitnog sistema i uzrokuju nelinearnost induktivnosti. Zbog toga i još nekih tehnoloških ograničenja tipično je odnos  $\frac{a_{max}}{a_{min}} \leq 20$ . Najčešće je  $\frac{a_{max}}{a_{min}} = 20 = \frac{L_{max}}{L_{min}} = \frac{C_{max}}{C_{min}}$ .



Slika 4. Principijelna šema ACRL ispitnog sistema.

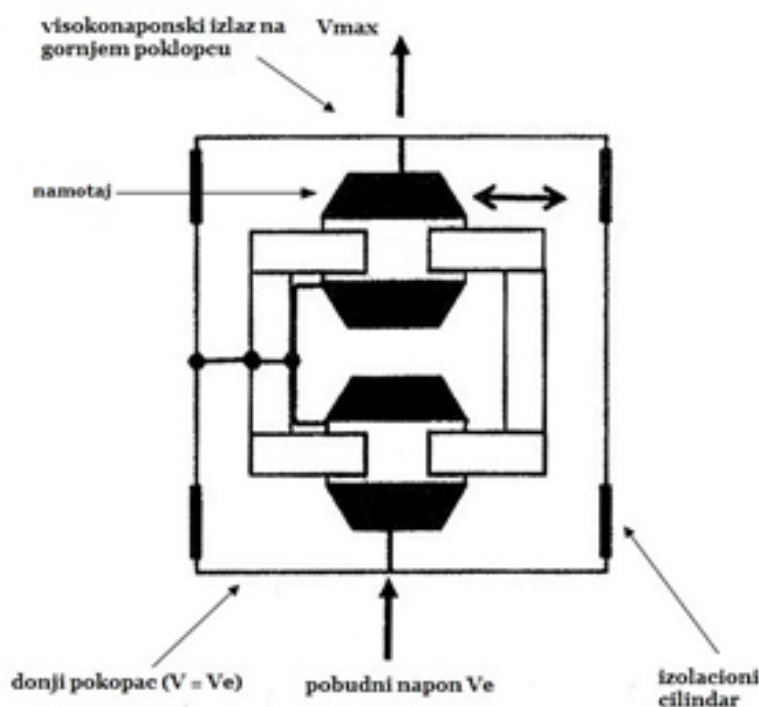
Podešavanje širine zazora vrši se na osnovu faznog pomeraja između ispitne struje i ispitnog napona. Maksimum rezonante krive dostiže se pri faznom pomeraju od  $90^\circ$  i njemu odgovara

željena induktivnost prigušnice. Sa povećavanjem faktora dobrote sistema, rezonantna kriva postaje strmija. Veća strmina rezonante krive znači da je izlazni napon osetljiviji na promenu induktivnosti. Stoga se kod ispitnih sistema sa većim faktorom dobrote zahteva veća preciznost mehanizma za regulaciju širine vazdušnog zazora magnetskog kola prigušnice.

Postoje dva tipa prigušnica promenljive induktivnosti:

1. cilindrične, odnosno izolovane prigušnice ili, kako se često nazivaju, modularne prigušnice;
2. metalom oklopljene (*tank type*).

**Sistemi sa modularnim prigušnicama** proizvode se tipično za napone  $U_n = 250 - 1600$  kV i snage  $S_n = 1000 - 22500$  kVA. Primenjuju se samo u serijskim rezonantnim kolima. Namenjene su za rad u zatvorenom prostoru, a upotreba za *on-site* ispitivanja moguća je samo pri lepom vremenu. Zbog svoje kompaktnosti pogodne su za formiranje kaskada. Obično se do 3 redno vezane prigušnice postavljaju jedna na drugu. Na gornjoj i donjoj strani prigušnice nalazi se metalni poklopac preko kojeg se povezuju međusobno ili sa izolacionim postoljem. Na izolaciono postolje postavlja se najniža prigušnica u kaskadi zato što se vezuje za pobudni transformator napona do 100 kV. Na poslednju prigušnicu u kaskadi postavlja se toroidna elektroda kojom se kontroliše raspodela polja i obezbeđuje izuzetno mali nivo parcijalnih pražnjenja u tački priključenja ispitivanog objekta.



Slika 5. Magnetsko kolo modularne prigušnice.

Modularna prigušnica sastoji se od dva horizontalna namotaja i magnetskog kola, kojeg čine dva U-profila. Zavisno od dizajna, širina zazora podešava se pomoću obe polovine jezgra ili je samo jedna od njih pokretna. Magnetsko kolo sa namotajima smešteno je čelični cilindar sa izolacijom od fiberglasom ojačane plastike, kojim se postiže ravnomerna raspodela električnog polja. Jezgro je zajedno sa čeličnim cilindrom povezano na tačku namotaja srednjeg potencijala (slika 5). Radi uštede prostora unutar cilindra, namotaji su pravougaonog poprečnog

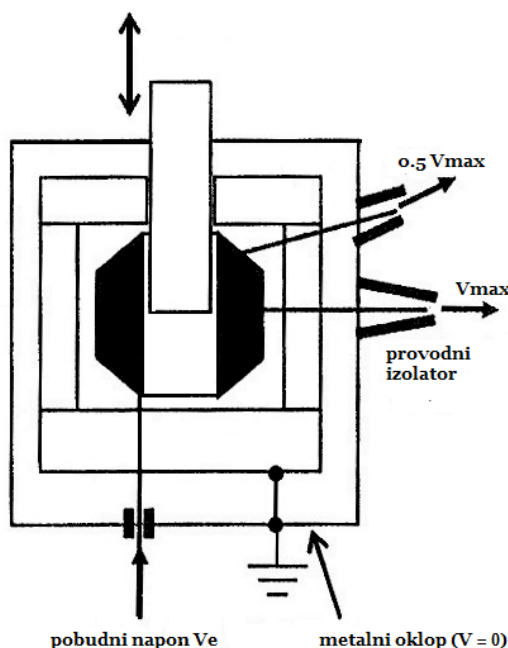
preseka. Namotaji su folijski sa uljno-papirnom izolacijom. Ovakva konstrukcija rezultuje velikom mehaničkom stabilnošću i velikom termičkom otpornošću odnosno otežanim hlađenjem, stoga nisu predviđene za kontinualni rad. Naznačeni radni ciklus se može produžiti smanjenjem napona i dodavanjem radiatora i hladnjaka.

**Sistemi sa prigušnicama oklopljenog tipa** proizvode se tipično za napone  $U_n = 6 - 400$  kV i snage  $S_n = 300 - 10000$  kVA. Najviše se primenjuju u serijskim rezonantnim kolima pri ispitivanju sredjenaponskih i visokonaponskih kablova (IEC 60502 i 60840). Oklopljena prigušnica primenjuje se i u paralelnim rezonantnim kolima za ispitivanje objekata sa velikim ili nestabilnim gubicima (npr. rotacione mašine), za ispitivanje kondenzatora sa širokim opsegom vrednosti kapaciteta i dinamičko ispitivanje kondenzatora.

Budući da je prigušnica smeštena u metalno kućište, koje je uzemljeno, ne postoje zahtevi u pogledu bezbednosnih rastojanja od provodnih struktura. Posebna pogodnost je što se mogu postaviti izvan laboratorije, uz sam zid kroz koji se provlače provodni izolatori prigušnice, čime se štedi na laboratorijskom prostoru. Ako se u ispitnoj prostoriji postavi Faradejev kavez, dobija se potpuno oklopljen ispitni sistem imun na elektromagnetske smetnje. Visokonaponski kraj prigušnice izvodi se kroz metalno kućište pomoću HV provodnog izolatora. Prisustvo provodnog izolatora ograničava naznačeni napon prigušnice na 400 kV inače bi dimenzije provodnog izolatora postale previše velike.

Kaskadno vezivanje ovih prigušnica primenjuje se samo kod nižih napona.

Metalom oklopljene prigušnice imaju jedan vertikalni namotaj i magnetsko kolo sa cilindričnim klipom u centru i četiri spoljašnja stuba povezana jarmovima (slika 6). Ovakva konstrukcija obezbeđuje veliku mehaničku stabilnost, iz čega sledi mali nivo buke, i stabilna širina zazora i induktivnost prigušnice, odnosno stabilan izlazni napon. Namotaj prigušnice je folijski, sa papirnom izolacijom impregnisanom mineralnim uljem. Često se realizuje sa otcepima. Promena otcipa vrši se u beznaponskom stanju pomoću regulacione sklopke. Ukoliko postoji samo jedan dodatni otcep, ekonomičnije rešenje je dodatni provodni izolator umesto regulacione sklopke. Promenom otcipa ispitni sistem se prilagođava objektu veće kapacitivnost na račun smanjenja ispitnog napona.



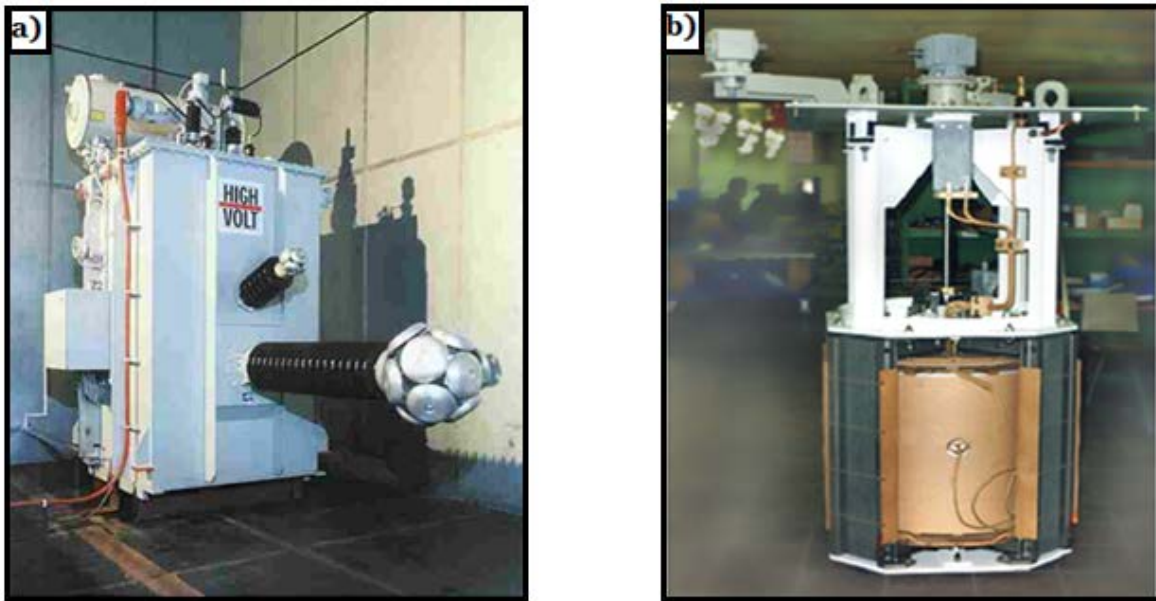
Slika 6. Magnetsko kolo metalom oklopljene prigušnice, tzv. *shell-type*.



Od snage prigušnice zavisi način hlađenja. Prigušnice male snage imaju rebrasti metalni oklop. Za veće snage na metalni oklop montiraju se radijatori i/ili ventilatori.

Prigušnica se vezuje na pobudni transformator, čije se karakteristike (napon, snaga i broj otepa) biraju u skladu sa karakteristikama opterećenja (kapacitetom i gubicima). U slučaju prigušnica serijskog kola za ispitivanje kablova, pobudni transformator je sa prigušnicom u zajedničkom metalnom kućištu. Izbor otepa pobudnog transformatora vrši se u beznaponskom stanju posebnim prekidačem kojeg ili pogoni motor ili se njime upravlja manuelno. Kod prigušnica velikih snaga pobudni transformator se ne oklapa zajedno sa prigušnicom, a izbor otepa se vrši manuelno. Kod paralelnih rezonantnih sistema prigušnica ima dodatni pobudni namotaj koji se vezuje na pobudni transformator.

Na slici 7 prikazana je metalom oklopljena prigušnica i njen aktivni deo.



Slika 7. Metalom oklopljena prigušnica 250 – 100 kV, 2000 kVA sa dva provodna izolatora a) i njen aktivni deo sa pogonom za podešavanje širine vazdušnog zazora (b).

Fleksibilnost u pogledu prilagođavanja različitim ispitnim objektima je važna karakteristika rezonantnih sistema sa prigušnicom promenljive induktivnosti. Razmotrićemo kakvim mogućnostima raspolažemo ako su nam na raspolaganju dve modularne prigušnice istih karakteristika (ili jedna prigušnica sa otepom na sredini namotaja). Induktivnost  $L$  jedne prigušnice može da se menja od  $L_{min}$  do  $L_{max}$ , što odgovara opsegu promene opterećenja od  $C_{2min}$  do  $C_{2max}$  (slika 8). Maksimalna ispitna snaga sistema određena je minimalnom induktivnošću rezonantne prigušnice:

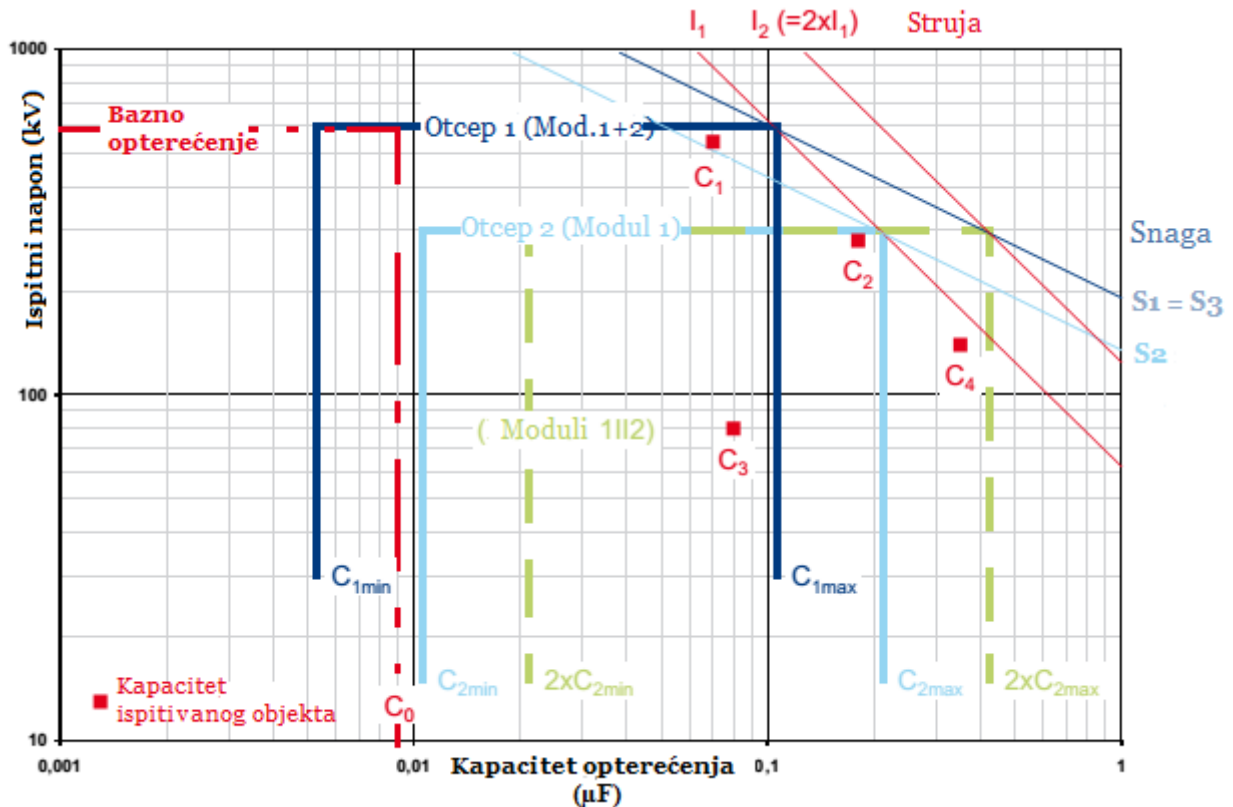
$$S_2 = V_2^2 \cdot \omega C_{2max} = V_2 \cdot I_2 \quad (5)$$

Ako prigušnice vežemo na red, ekvivalentna induktivnost je jednaka  $L_1 = 2L$ , što odgovara opsegu promene opterećenja od  $C_{1min}$  do  $C_{1max} = \frac{1}{2}C_{2max}$ . Maksimalni ispitni napon je tada  $V_1 = 2V_2$ , dok je maksimalna ispitna snaga  $S_1 = V_1^2 \cdot \omega C_{1max} = 2S_2$ . Ispitna struja jednaka je  $I_1 = \frac{1}{2}I_2$ . Kada su prigušnice vezane paralelno, ekvivalentna induktivnost je jednaka  $L_3 = \frac{1}{2}L$ , što odgovara

opsegu promene opterećenja od  $2C_{2min}$  do  $2C_{2max}$ . Maksimalni ispitni napon se ne menja:  $V_3 = V_2$ , dok je maksimalna ispitna snaga  $S_3 = V_2^2 \cdot 2\omega C_{2max} = 2S_2 = S_1$ .

Na osnovu dijagrama opterećenja vidimo da se:

1. objekat kapaciteta  $C_1$  može ispitivati samo ako se prigušnice vežu na red;
2. objekat kapaciteta  $C_2$  može se ispitivati sistemom sa jednom prigušnicom i sa paralelno vezanim prigušnicama;
3. objekat kapaciteta  $C_3$  može se ispitivati bilo kojim od pomenutih ispitnih sistema;
4. objekat kapaciteta  $C_4$  može se ispitivati samo sistemom sa paralelno vezanim prigušnicama.



Slika 8. Dijagram opterećenja ACRL ispitnog sistema.

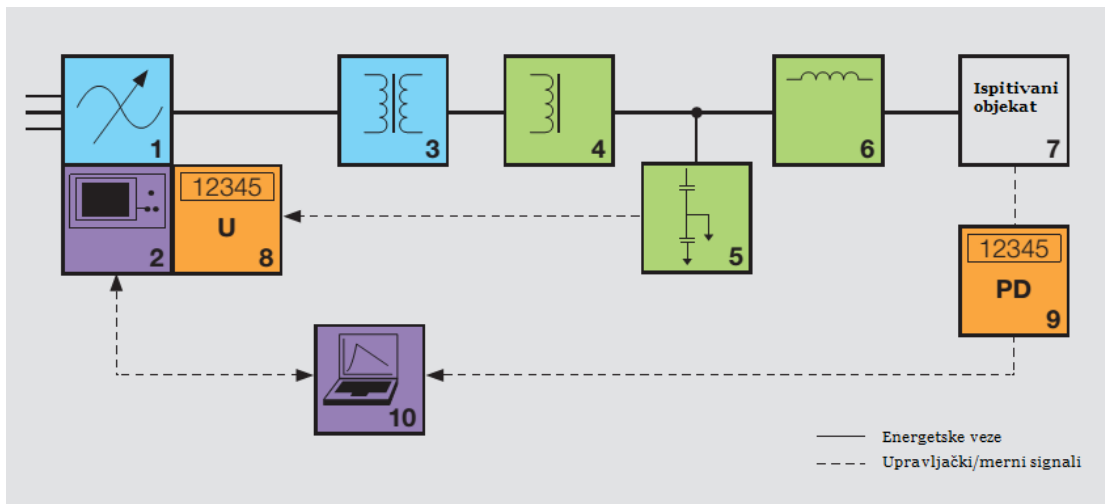
Dakle, serijskim vezivanjem prigušnica dvostruko se povećavaju ispitni napon i snaga ali se ovim sistemom mogu ispitivati objekti duplo manjeg kapaciteta. S druge strane, paralelnim vezivanjem prigušnica istim naponom ispituju se objekti duplo većeg kapaciteta, odnosno postiže se duplo veća ispitna snaga.

Serijski se obično vezuju do 3 prigušnice čija kaskada formira stub (slažu se jedna na drugu). Paralelno vezane prigušnice obično imaju posebna izolaciona postolja. Ukoliko je prostor deficitaran i paralelno vezane prigušnice se mogu postaviti jedna na drugu ali je za ovo specijalno izvođenje potrebna dodatna oprema i kompetentnost osoblja.



### 3.2.2 Rezonantni ispitni sistemi sa promenljivom frekvencijom

Rezonantni ispitni sistemi sa promenljivom frekvencijom (*AC series resonant circuit of variable frequency* – ACRF sistemi) prikazan je na slici 9. Rezonantna prigušnica konstantne induktivnosti (4) vezana na red sa kapacitivnim objektom ispitivanja (7). Između njih se postavlja prigušnice (6) za suzbijanje prenapona koji nastaju pri razornom pražnjenju na ispitivanom objektu (SF6 ćeliji/vodu). Rezonantno kolo napaja pobudni transformator (3). Pobudni transformator (3) izoluje inverter od ispitnog kola i podiže izlazni napon invertora statičkog frekventnog pretvarača (1) zavisno od potrebnog ispitnog napona i gubitaka u HV serijskom rezonantnom kolu, odnosno od faktora dobrote. Obično se realizuje sa otcepima. Merenje napona vrši pomoću delila napona (5) i vršnog voltmetra. Ispitni sistem unosi mali nivo smetnji te je pogodan za merenje parcijalnih pražnjenja (9). Statički pretvarač, kontrolna jedinica (2) i prekidači obično se smeštaju u zajednički orman. Zbog toga je ACRF sistemi imaju najmanje komponenata od svih ispitnih sistema, što pojednostavljuje montažu. Kontrolna jedinica i merni instrumenti mogu se povezati sa personalnim računarom (10) radi čuvanja i obrade rezultata.



Slika 9. Principijelna šema ACRF sistema.

Sistem se pobuđuje rezonantnom frekvencijom:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6)$$

gde je  $C$  ukupan kapacitet ispitivanog objekta i delila napona, a  $L$  induktivnost ispitnog kola.

Standardima je propisan opseg dozvoljenih frekvencija ispitnog naizmeničnog napona posebno za fabrička i terenska ispitivanja. Rezonantna frekvencija mora da zadovolji zahteve standarda. Budući da fabrička ispitivanja uglavnom zahtevaju frekvenciju između 45 Hz i 65 Hz, koju za većinu objekata nije lako na ekonomičan način obezbediti ovim sistemom, ACRF sistemi se obično koriste za *on-site* ispitivanja, koja dozvoljavaju znatno širi opseg ispitnih frekvencija. Šira primena ovih sistema pri fabričkim ispitivanjima zahtevala bi dodatna istraživanja uticaja frekvencije na proces električnog pražnjenja u određenom izolacionom materijalu i definisanje novih prihvatljivih frekvencijskih granica.

Stoga se može zaključiti da je za konstantnu vrednost induktivnosti prigušnice  $L$ , dozvoljenim opsegom promene pobudne frekvencije  $[f_{min}, f_{max}]$  određen opseg kapacitivnosti objekata koji se mogu ispitivati ACRF sistemom  $[C_{min}, C_{max}]$ :

$$C_{min} = \frac{1}{(2\pi f_{max})^2 L}, \quad (7)$$

$$C_{max} = \frac{1}{(2\pi f_{min})^2 L}. \quad (8)$$

Obično su granice uže od standardom propisanih za terenska ispitivanja. Frekvencija izlaznog napona je tipično između 20 Hz i 300 Hz, što daje širok opseg opterećenja  $\frac{C_{max}}{C_{min}} = \left(\frac{f_{max}}{f_{min}}\right)^2 = 225$ . Maksimalna ispitna struja jednaka je:

$$I_t^{max} = 2\pi f_{min} C_{max} V_t = 2\pi f_{min} \cdot \frac{V_t}{(2\pi f_{min})^2 L} = \frac{V_t}{2\pi f_{min} L}. \quad (9)$$

dok je maksimalna ispitna snaga sistema:

$$S_t^{max} = V_t I_t^{max} = V_t^2 2\pi f_{min} C_{max}. \quad (10)$$

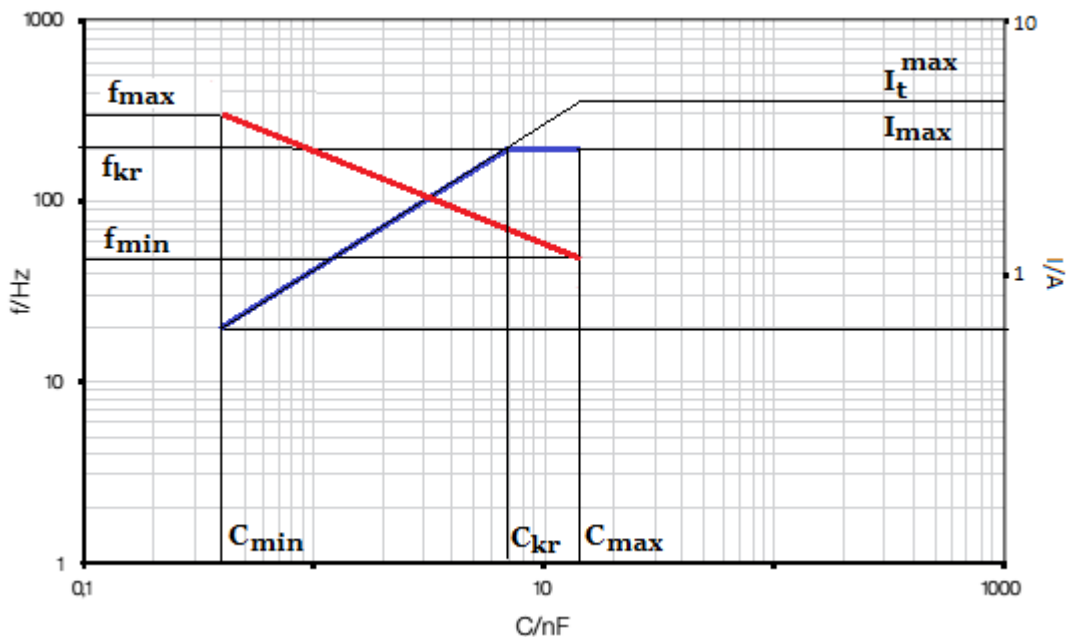
Budući da ispitna snaga zavisi od frekvencije, umesti nje se kao naznačeni parametar sistema daje ekvivalentna ispitna snaga pri frekvenciji 50 Hz (ili 60 Hz):

$$S_t^{50 \text{ Hz}} = \frac{50}{f_{min}} S_t^{max}. \quad (11)$$

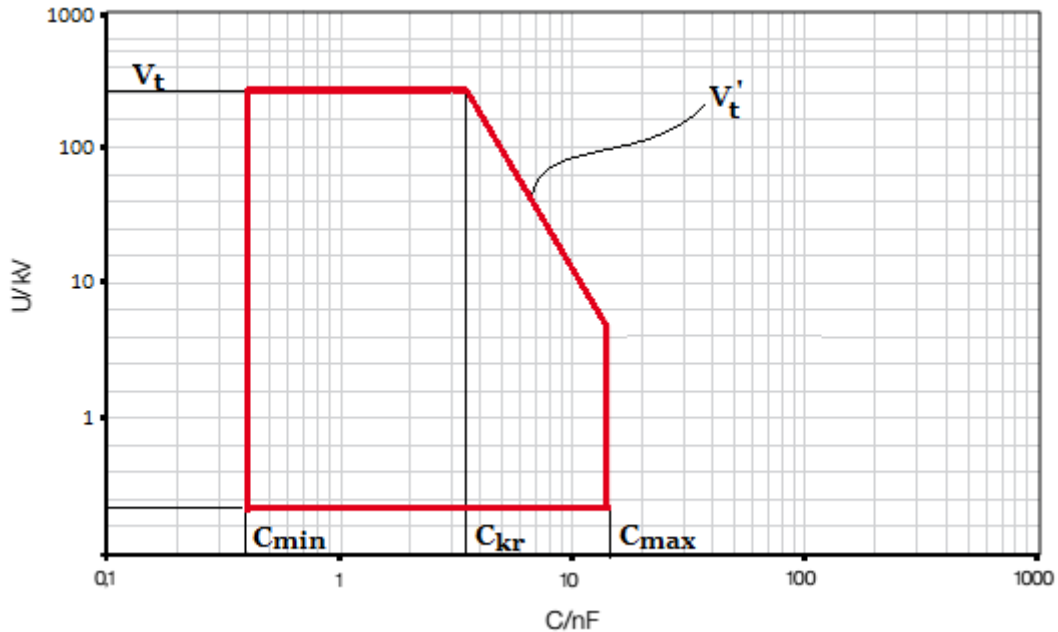
Prema tome, snaga i struja ispitnog sistema rastu sa povećanjem kapacitivnosti ispitivanog objekta i sa opadanjem frekvencije. Treba voditi računa da ispitna struja ne bude veća od maksimalne trajno dozvoljene struje sistema  $I_{max}$ . Za vrednosti frekvencije ispod kritične frekvencije pri kojoj je  $I_t = I_{max}$ , vrši se redukcija ispitnog napona kako bi se ispitna struja ograničila na vrednost  $I_{max}$  (slike 10 i 11):

$$I_{max} = \frac{V_t}{2\pi f_{kr} L} = \frac{V_t'}{2\pi f L} \quad (12)$$

$$V_t' = \frac{f}{f_{kr}} V_t = \sqrt{\frac{C}{C_{kr}}} V_t \quad (13)$$



Slika 10. Zavisnost frekvencije i ispitne struje od kapacitivnosti.



Slika 11. Oblast radnih napona ACRF sistema u zavisnosti od opterećenja.

Napajanje promenljivom frekvencijom realizuje se statičkim frekventnim pretvaračem koji trofazni sistem napona ispravlja u jednosmerni napon. Zatim se jednosmerni napon invertuje pomoću monofaznog mosta sastavljenog od IGBT tranzistora snage u impulsni širinsko-modulisan (Pulse Width Modulation – PWM) signal. Rezonantno kolo ima ulogu filtra propusnika niskih učestanosti, te eliminiše valovitost ovog signala i dobija se slabo izobličen izlazni signal.

Statički frekventni pretvarač može da se napaja iz niskonaponske mreže ili iz dizel motor-generatorске grupe. Potrebna ulazna snaga ispitnog sistema  $P_F$  se u slučaju mrežnog napajanja određuje pomoću faktora dobrote  $Q$ :

$$P_F = \frac{S_t^{max}}{Q} \quad (14)$$

dok motor-generatorска grupa treba da obezbedi snagu:

$$P_F = \frac{3S_t^{max}}{Q}. \quad (15)$$

Osnovna komponenta ovih sistema je visokonaponska rezonantna prigušnica. Prigušnice se projektuju sa uljnom ili SF6 izolacijom za napone do 800 kV po jedinici. U ACRF ispitnom sistemu koriste se sledeći tipovi prigušnica, koje su projektovane po uzoru na odgovarajući tip ispitnih transformatora:

1. oklopljene prigušnice – za najveće snage, mogu se kaskadno vezivati.  
Primena:
  - pre svega za *on-site* ispitivanja kablova nakon polaganja ili remonta,
  - rutinska ispitivanja dugačkih podvodnih kablova
  - testovi predkvalifikacije novih modela kablova.
2. modularne (cilindrične) – za manje snage i više napone u odnosu na snage i napone oklopljenih prigušnica i kratkotrajan. Pogodne su za formiranje kaskada.  
Primena:
  - *on-site* ispitivanja gasom izolovanih postrojenja (GIS) i vodova (GIL),

- ispitivanja energetskih transformatora primenjenim naponom (i fabrička i *on-site*).
3. SF6 prigušnice – za male struje (nekoliko ampera), kratkotrajan rad (oko 15 min dnevno pri naznačenoj snazi). Imaju izuzetno mali termički kapacitet. Njihova specifičnost je da nemaju magnetsko jezgro, stoga su malih dimenzija. Primenjuju se za ispitivanje GIS-a i njegovih komponenata.

Ove prigušnice imaju konstantnu induktivnost odnosno fiksnu širinu vazdušnog zazor, zbog čega su njihov rasipni fluks, gubici, dimenzije i težina manji u odnosu na prigušnice promenljive induktivnosti. Gubici se mogu dodatno smanjiti upotrebom prigušnica sa distribuiranim vazdušnim zazorom. Zbog manjih gubitaka, ACRF sistemi imaju veći faktor dobrote od ACRL ispitnih sistema. Tipično je faktor dobrote ACRL sistema  $Q_L = 20 - 60$  dok ACRF sistemi imaju faktor dobrote  $Q_F = 50 - 150$ . Veliki faktor dobrote zahteva preciznu regulaciju učestanosti (bolju od  $\pm 0.1$  Hz) kako bi se postigao željeni ispitni napon.

ACRF sistemi su u poređenju sa ACRL sistemima jednostavniji (manji broj komponenata), kompaktniji, robusniji, nemaju pokretne delove koje bi bilo potrebno održavati, stoga imaju veću pouzdanost i proizvode manji nivo buke. Smanjenjem frekvencije mogu se ispitivati objekti većeg kapaciteta nego pri industrijskoj učestanosti. ACRF sistem je uvek ekonomski bolje rešenje, pod uslovom da dozvoljeni opseg podešavanja frekvencije omogućava ispitivanje datog objekta. Gubici ovih sistema i potrebna snaga napajanja su oko pet puta manji nego kod ACRL sistema delom zbog većeg faktora dobrote, delom zbog mogućnosti rada sa opsegom frekvencija. Bolji odnos težine i snage favorizuje ACRF sisteme za ispitivanje najvećih kapacitivnosti.

Zbog svega navedenog ACRL sistemi uglavnom se primenjuju za laboratorijska ispitivanja. Za izuzetno velike kapacitivnosti (npr. kapacitivnosti podvodnih kablova), ACRL sistem morao da ima veliku prigušnicu, stoga se u takvim situacijama za laboratorijska ispitivanja umesto ACRL sistema primenjuje ACRF ispitni sistem.

## Zadaci

**Zadatak 1.** Dat je serijski rezonantni ispitni sistem sa promenljivom induktivnošću za visokonaponska ispitivanja naponom industrijske učestanosti. Ako su na raspolaganju dve prigušnice sa vazdušnim zazorom promenljive širine  $a$  ( $\frac{a_{max}}{a_{min}} = 20$ ), maksimalne induktivnosti 1020 H, naznačenog napona 350 kV, koji se elementi iz Tabele 1 mogu ispitivati ovim sistemom? Visokonaponska ispitivanja se vrše naizmeničnim naponom čija je frekvencija 50 Hz.

Tabela 1 Ispitivani elementi

Kapacitivnost	Ispitni napon
$C_1 = 250$ nF	350 kV
$C_2 = 50$ nF	600 kV
$C_3 = 6$ nF	440 kV
$C_4 = 15$ nF	800 kV

**Zadatak 2.** Za terensko HVAC ispitivanje kablovskog sistema opseg dozvoljenih ispitnih frekvencija je 20-300 Hz. Primenjuje se rezonantni ispitni sistem sa promenljivom frekvencijom. Naznačeni napon prigušnice ovog sistema je 160 kV, a naznačena struja je 80A. Kolika je maksimalna kapacitivnost kablovskog sistema koji se ovim HVAC ispitnim sistemom može ispitivati maksimalnim ispitnim naponom? Ako je specifična kapacitivnost kabla 200 nF/km, kolika je maksimalna dužina kabla koji se može ispitivati ovim sistemom? Kolika je kapacitivnost baznog opterećenja potrebna da bi se mogao proveriti rad HVAC ispitnog sistema bez priključenja objekta ispitivanja? Kolika snaga napajanja je potrebna za rad datog ispitnog sistema ako je njegov faktor dobrote  $Q = 100$ ? Razmotriti sledeće slučajeve:

- HVAC ispitni sistem je napajan iz niskonaponske mreže
- HVAC ispitni sistem je napajan iz motor-generatorске grupe.

Kolika je ekvivalentna ispitna snaga sistema za frekvenciju 50 Hz?

**Zadatak 3.** Rasklopnu opremu izolovanu SF6 gasom (*GIS – gas-insulated switchgear*) naznačenog napona 245 kV, kapacitivnosti 2.2 nF potrebno je ispitati nakon montaže ACRF ispitnim sistemom čiji su parametri:  $U_n = 460$  kV,  $I_n = 1.5$  A i  $L = 720$  H. Faktor dobrote ispitnog sistema je  $Q = 50$ . Prema standardu IEC 62271-203, terenska ispitivanja date opreme izvode se naizmeničnim naponom efektivne vrednosti 380 kV. Odrediti:

- ispitnu frekvenciju
- ispitnu struju
- ispitnu snagu
- potrebnu snagu napajanja ispitnog sistema.

Da li je dati ACRF sistem pogodan za ispitivanje date opreme? Može li se u ispitno kolo vezati sprežni kondenzator kapacitivnosti  $C_k = 1.2$  nF za merenje parcijalnih pražnjenja?

**Zadatak 4.** Potrebno je ispitati 400 kV kablovski sistem dužine 22 km i kapacitivnosti  $C_t = 4.9$   $\mu$ F visokim naizmeničnim naponom. Ispitivanje se vrši frekvencijom iz opsega 20-300 Hz, ispitnim naponom 260 kV. S obzirom na veliku kapacitivnost ovako dugačkog kablovskog sistema potrebno je povezati nekoliko jedinica ACRF sistema kako bi se izvršilo potrebno ispitivanje. Na raspolaganju su sledeći ispitni sistemi:

- dva ispitna sistema 260 kV sa ukupno četiri prigušnice  $L = 16.2$  H/83 A
- jedan ispitni sistem 160 kV sa dve prigušnice  $L = 23$  H/55 A.

Kako je najbolje vezati ove sisteme i njihove prigušnice, a da ispitni sistem odgovara nameni u pogledu ispitnog napona, ispitne frekvencije i ispitne snage? Kolika je ispitna snaga ovog sistema?

## Literatura

[1] B. Škrbić, *Uporedna analiza postupaka za ispitivanje izolacije opreme visokim naponom industrijske učestanosti, master rad pod mentorstvom prof. dr Zlatana Stojkovića*, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2015.

[2] W. Hauschild, E. Lemke, *High Voltage Test and Measuring Techniques*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.