

KONSTRUKCIJA PRILAGODNOG OTPORA SONDE ZA MERENJE NAPONA U GHz OBLASTI / CONSTRUCTION OF ADJUSTABLE PROBE RESISTANCE FOR VOLTAGE MEASUREMENT IN THE GHz AREA

Prof. Dr. Predrag Osmokrović, email: opredrag@verat.net

Internacionalni univerzitet Travnik u Travniku

Prof. Dr. Tomislav Stojić, email: tstojic@mas.bg.ac.rs

Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

Dorđe Lazarević, email: djordje.lazarevic@ieent.org

Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu

Bekir Fulan, BA, email: bekir.fulan@gmail.com

Internacionalni univerzitet Travnik u Travniku

Amira Trako, BA, email: amira.grabus1@hotmail.com

Internacionalni univerzitet Travnik u Travniku

Izvorni naučni rad

Sažetak: Sonda za merenje naizmjeničnog napona se projektuje po principu kapacitivnog djelila ili kompenzovanog kapacitivnog djelila. Bez obzira koje se rešenje prihvati potrebno je sondu napraviti da se ne javljaju devijacije napona, ni superpozicija talasa prema jednačini telegrafičara. Iz tog razloga se visoko naponski kondenzator pravi u obliku dobro dihtovanog gasnog kondenzatora. Niskonaponski kondenzator se pravi sa dielektrikom elektronskog tipa polarizacije (ili od liskuna koji ima slične osobine dielektrcima sa elektronskom polarizacijom). Najveći problem je u prilagodnom otporu jer ako on nije dobro prilagodjen izaziva oscilacije i merenje postaje beskorisno, što posebno dolazi do izražaja u GHz domeni. U radu je prikazano rešenje završnog otpora koje je izuzetno prilagođeno nameni i sprečava oscilacije merenog napona.

Ključne riječi: merenje, napon, sonda

Abstract: The probe for measuring alternating voltage is designed according to the principle of capacitive divider or compensated capacitive divider. Regardless of which solution is accepted, the probe must be made so that no voltage deviations or wave superpositions occur according to the telegrapher's equation. For this reason, the high-voltage capacitor is made in the form of a well-sealed gas capacitor. The low-voltage capacitor is made with a dielectric of electronic polarization type (or from mica, which has similar properties to dielectrics with electronic polarization). The biggest problem is in the adjustment resistance, because if it is not well fitted, it causes oscillations and the measurement becomes useless, which is especially evident in the GHz domain. The paper presents a solution of the final resistance, which is extremely adapted to the purpose and prevents oscillations of the measured voltage.

Keywords: measurement, voltage, probe

1. Uvod

Standardne merne metode i odgovarajuća oprema su razvijene i verifikovane za merenje uobičajenih fizičkih veličina, pri čemu dolazi do mernih nesigurnosti. Mernu nesigurnost mernih instrumenata izražavaju njihovi proizvođači, a merna nesigurnost kompletnog eksperimentalnog postupka se izražava budžetom merne nesigurnosti, pri čemu je merna nesigurnost samih instrumenata samo jedna od komponenti u budžetu. Problem, a i izazov, u metrologiji predstavlja merenje u oblasti ekstremnih vrednosti fizičkih veličina. Tako je, na primjer, u elektrotehnici veoma komplikovano meriti jako velike i jako male vrednosti otpornosti, struje, napona, itd. Ipak, možda je najteže meriti kratkotrajne brzopromenljive i jednokratne fizičke veličine, kao što je impulsni napon. To je, upravo, i ono čime ćemo se pozabaviti u ovom radu.

2. Izražavanje merne nesigurnosti

Rezultat svakog realnog merenja sadrži u sebi određenu nesigurnost, što znači da se idealno tačna vrednost merene veličine ne može saznati. Uzroci mernih nesigurnosti mogu biti veoma brojni i po pravilu se ne mogu svi uzeti u obzir. Da bi se postigla jednoobraznost u izražavanju mernih rezultata, vodeće institucije međunarodnog metrološkog sistema, 1993. godine, publikovale su Uputstvo za izražavanje merne nesigurnosti. Do tada, za obradu i izražavanje rezultata bila je primenjivana klasična matematička disciplina, tzv. teorija grešaka. Načini obrade rezultata nisu bili ujednačeni nego su zavisili od shvatanja i stila pisanja autora, pa je bilo teško poređenje merenja iste vrste izvršenih u različitim institucijama. Uputstvo za izražavanje merne nesigurnosti propisuje da se obradom podataka odrede sledeće tri merne veličine:

- Rezultat merenja, koga predstavlja srednja vrednost ponovljenih merenja.
- Merna nesigurnost, izražena intervalom oko srednje vrednosti u kome se očekuje da se nalazi stvarna vrednost merene veličine.
- Statistička sigurnost (verovatnoća) koja se odnosi na dati podatak o mernoj nesigurnosti.

U Uputstvu za izražavanje merne nesigurnosti se osim merne nesigurnosti koristi i klasični pojam greška merenja. Ona je definisana kao razlika mernog rezultata i istog rezultata dobijenog ponovnim merenjem korišćenjem merila koje se smatra etalonskim, tj. predstavlja raspoloživo merilo najvišeg nivoa tačnosti. Od etalonskog instrumenta se očekuje da je pregledano u nacionalnom metrološkom institutu i da samim tim pripada lancu sledivosti u međunarodnom metrološkom sistemu. U principu, kod svakog merenja potrebno je odrediti i saopštiti mernu nesigurnost. Izražavanje rezultata merenja i pridružene merne nesigurnosti je zamenilo potrebu da se izražava greška merenja, čije određivanje najčešće nije lako izvodljivo. Ukoliko je merna nesigurnost valjano određena, greška treba da se nalazi unutar intervala merne nesigurnosti. Koncept izražavanja merne nesigurnosti (MN) ima kao teorijsku podlogu isti matematički aparat koji se koristi kod teorije grešaka. Međutim, metod izražavanja merne nesigurnosti je praktično orijentisan i može se dobro primeniti u svim eksperimentalnim merenjima. Nasuprot tome, teorija grešaka kao i svaka matematička disciplina polazi od aksiomatskih pojmova, a to su slučajne i sistematske greške, koje se, kao idealizovane veličine, ne javljaju u praksi. Prema teoriji grešaka, sistematske greške su posledica uticaja pojava koje dovode do fiksnih promena izlazne veličine, kako po veličini, tako i po znaku. Nasuprot tome, slučajne greške su po svojoj prirodi nepredvidivo promenljive, pa se mogu analizirati isključivo statističkim metodama. Ovakve pretpostavke nisu ispunjene u stvarnim merenjima. Na primer, jedna ista fizička veličina može izazvati kako slučajne, tako i sistematske efekte. Na primer, brze fluktuacije

temperature imaju za posledicu efekte koji odgovaraju slučajnim greškama. Međutim, sporije temperaturske promene mogu stvarati promene koje odgovaraju sistematskim greškama. Sličan primer, da jedna veličina izaziva i brze i spore promene, je napon napajanja pojačavača i mernih mostova. Napon napajanja dobijen iz mrežnog ispravljača ima i brze fluktuacije (tzv. talasnost), a takođe i spore promene koje zavise od temperature okoline i nestabilnosti mrežnog napona. Otuda, napon napajanja istovremeno prouzrokuje i slučajne i sistemske efekte. Nasuprot idealizovanim pretpostavkama teorije grešaka, pristup u izražavanju merne nesigurnosti je praktično orijentisan, tj. primenljiv je u analizi realnih eksperimentalnih rezultata. Pri izražavanju merne nesigurnosti koriste se svi termini i celokupni matematički aparat klasične statističke teorije. Drugim rečima, ne postoji posebna matematička teorija isključivo namenjena mernoj nesigurnosti. Međutim, uvedeno je više konvencija u koje spadaju i sledeće:

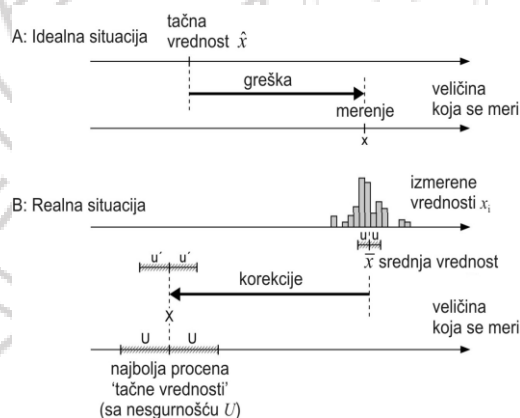
- Merna nesigurnost označava se slovom u (engl. uncertainty - nesigurnost).
- Svi vidovi merne nesigurnosti tretiraju se kao slučajne veličine. To znači da se svakom podatku o nesigurnosti pridružuje neka odgovarajuća funkcija raspodele, a takođe i verovatnoća, odnosno statistička sigurnost datog podatka.

Postoje dva osnovna tipa merne nesigurnosti:

- merna nesigurnost tip A
- merna nesigurnost tip B

Ova podela je zasnovana isključivo na osnovu metoda određivanja, a ne na osnovu analize fizičkih pojava, koji su predstavljali osnovu za podelu na slučajne i sistemske greške u klasičnoj teoriji grešaka. Ukoliko postoje merne nesigurnosti tip A i tip B, ili pak ako postoje dve ili više mernih nesigurnosti tip B, onda je neophodno odrediti i kombinovanu mernu nesigurnost. Određivanje standardne kombinovane mernje nesigurnosti i proširene kombinovane merne nesigurnosti po pravilu, predstavlja krajnji cilj obrade mernih podataka. Suštinska razlika između koncepta teorije grešaka i koncepta merne nesigurnosti šematski je prikazana na Slici 1.

Slika 1. Šematska reprezentacija koncepta merne nesigurnosti



2.1. Merna nesigurnost tip A

Merna nesigurnost tip A određuje se isključivo metodom statističke obrade rezultata. Iz ovog sledi da merna nesigurnost tip A postoji samo ako se radi o merenju koje je ponovljeno više puta. Rezultati ponovljenih merenja predstavljeni su uzorkom $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$. Ukoliko su svi elementi uzorka ravnopravni, tj. ako su ponovljeni eksperimenti izvršeni na istovetan način i istovetnom mernom opremom, rezultat merenja dobija se kao srednja vrednost uzorka:

$$\bar{X}_s = \frac{1}{n} \sum x_i$$

Srednja vrednost uzorka predstavlja slučajnu veličinu čije je standardno $\sqrt{n}$ odstupanje puta manje od standardnog odstupanja elemenata uzorka. Po definiciji, merna nesigurnost tipa A, u_a , jednaka je standardnom odstupanju srednje vrijednosti:

$$u_a = s_{x_s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_s)^2}{n(n-1)}}$$

Srednja vrednost merenja, kod dovoljno velikih uzoraka, ispunjava uslove Centralne granične teoreme, što znači da joj se po pravilu pridružuje Gausova raspodela, (ili Studentova raspodela, ako se radi o manjim uzorcima).

2.2. Merna nesigurnost tip B

Prema definiciji datoj u Uputstvu za izražavanje merne nesigurnosti, merna nesigurnost tip B određuje se svim ostalim metodama, izuzev statističke analize. Merna nesigurnost tip B se određuje nezavisno od toga da li se radi o pojedinačnim ili ponovljenim merenjima. Definicija da treba koristiti sve ostale metode, znači da skup tih metoda nije određen, nego da izbor metoda zavisi od potrebe i od iskustva i znanja samog eksperimentatora. Valjano određivanje merne nesigurnosti tip B, posebno kada se radi o složenijim mernim sistemima, predstavlja jedan od najtežih problema u mernoj tehnici. Za rešavanje problema treba imati potpuna saznanja o korišćenju mernoj opremi i o uticaju parametara okruženja na mernu opremu, a takođe i na veličinu koja se meri. Po pravilu, valjano određivanje merne nesigurnosti tip B kod složenijih sistema, u stanju je da izvrši samo eksperimentator sa dubokim poznavanjem eksperimenta i sa višegodišnjim iskustvom u datoj oblasti. Merna nesigurnost tip B pod uticajem bilo koje veličine ima slučajni karakter, pa je moguće odrediti odgovarajuću vrednost standardnog odstupanja rezultata. Standardna merna nesigurnost tip B, uz, po definiciji, jednaka je standardnom odstupanju usled uticaja date veličine. I kod merne nesigurnosti tip B, kao i kod svake veličine slučajnog karaktera, neophodno je odrediti odgovarajuću funkciju raspodele. Dok je kod merne nesigurnosti tip A, po pravilu zastupljena Gausova raspodela, kod merne nesigurnosti tip B mogu se javiti raznovrsne raspodele. Problem određivanja raspodele takođe nema jednoznačne metode rešavanja, već u velikoj meri zavisi od praktičnih okolnosti u eksperimentu.

3. Razdelnici napona

Uloga razdelnika napona je da smanje vrednost visokonaponskog signala, tako da ona bezbedno može biti izmerena konvencionalnim voltmetrima ili specijalizovanim instrumentima kao što su osciloskopi ili digitalni registratori. Sa konstruktivne tačke gledišta razdelnici napona se izrađuju kao:

- Kapacitivni razdelnici (pogodni za merenje naizmeničnih i komutacionih udarnih napona)
- Omski razdelnici (pogodni za merenje jednosmernog i atmosferskog udarnog napona)
- Kombinovani omsko-kapacitivni razdelnici (pogodni za merenje naizmeničnih napona, kao i atmosferskih i komutacionih udarnih napona)

Za merenje punih i odsečenih atmosferskih i komutacionih udarnih napona koriste se kombinovani omsko-kapacitivni razdelnici napona, kao što je razdelnik napona Haefly-

hiptronics CR-3200-263. Svi razdelnici napona se sastoje iz visokonaponskog i niskonaponskog dela. Visokonaponski deo se u zavisnosti od odzivnog napona izrađuje iz jednog dela ili iz više redno povezanih sekcija. Na njegovom kraju i na spojevima sekcija nalaze se elektrode za oblikovanje polja. Na niskonaponskom delu nalazi se priključak za priključivanje mernog (koaksijalnog) kabla. Merni kabl može da ima više završetaka za različite prenosne odnose razdelnika. Uobičajeno je da se i visokonaponski i niskonaponski deo razdelnika postavljaju na isto postolje, koje može da bude stacionarno ili pokretno. Kućište razdelnika napona se izrađuje u vidu cevi od staklenih vlakana. Kao izolacija koristi se transformatorsko ulje ili gas SF₆. Kondenzatori se izrađuju sa izolacijom od nauljene hartije ili sa čvrstom izolacijom. Ako se razdelnik koristi za spoljašnju upotrebu, kućište se izrađuje od polimera.



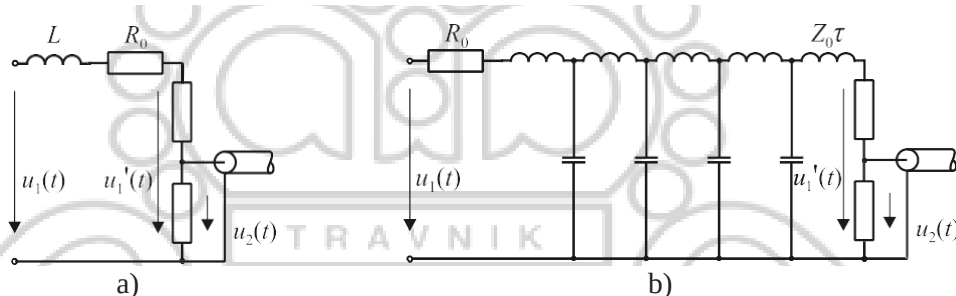
Slika 2. Omsko-kapacitivni razdelnik napona Haefly-hiptronics CR 3200-263

3.1 Merenje visokih udarnih napona pomoću razdelnika napona i osciloskopa

Ispitivanje izolacije električnih uređaja vrši se impulsima atmosferskih i komutacionih napona čije maksimalne vrednosti i vremenske karakteristike treba da budu izmerene sa visokim stepenom tačnosti. To obezbeđuje pouzdanost električne opreme. S jedne strane, merni uređaj ne sme da pokazuje manji napon, da ne bi došlo do oštećenja izolacije, a sa druge strane ne treba vršiti ispitivanja sa višim naponima mernih uređaja, jer time ne bi bio ispunjen cilj ispitivanja. U procesu ispitivanja mogu da se pojave mnogi izvori smetnji, koji otežavaju ili onemogućavaju ostvarivanje propisane tačnosti merenja. Za određivanje maksimalne vrednosti normiranog impulsa visokog napona koriste se merni uređaji koji obezbeđuju grešku merenja punih i sečenih impulsa koja nije veća od 1%. Merenja se vrše pomoću amplitudnog voltmetra ili osciloskopa. Ova druga opcija omogućuje da osim merenja maksimalne vrednosti budu utvrđene i promene ispitnog napona u vremenu, što omogućava da se u određenim slučajevima utvrdi da li je objekat oštećen u toku ispitivanja. Pri merenju maksimalnih vrednosti na čelu sečenih impulsa (takozvanih kosouglih impulsa visokog napona) u oba slučaja može doći do grešaka. Zadatak merenja visokih udarnih napona postavlja se ne samo pri ispitivanju električne opreme, već i pri mnogim fizičkim eksperimentima. Pri tome je važno znati ne samo maksimalnu vrednost, već i tačan oblik impulsa koji ne sme da bude deformisan prolaskom kroz merno kolo. Pred razdelnik napona postavljaju se strogi zahtevi da bi se isključio njegov uticaj na izvor napona. Ovo je naročito potrebno pri merenju kosouglih impulsa nanosekundne dužine čela (na primer kod akceleratora, katodnih odvodnika i u mnogim drugim elektro-fizičkim uređajima). Ovi zahtevi su ostvareni tek uvođenjem novijih konstruktivnih rešenja. Razdelnici napona koji se koriste za merenje udarnih napona moraju da imaju dobre prenosne karakteristike. Bez obzira na to, nije sigurno da će dobijena slika na ekranu osciloskopa u određenoj razmeri predstavljati mereni visoki napon. Uporedo sa razdelnikom napona dodatne greške mogu da izazovu provodnici i kablovi koji spajaju razdelnik sa osciloskopom.

3.2 Merna kola i njihove prenosne karakteristike

Za povezivanje razdelnika visokog napona sa izvorom napona koriste se visokonaponski kablovi. Pri ostvarivanju tih veza neophodno je voditi računa o potrebnim izolacionim rastojanjima. Pri visokim frekvencijama ne sme da bude zanemarena induktivnost spojnih provodnika. U cilju eliminacije visokofrekventnih oscilacija razdelnik se često spaja na izvor napona preko prigušnog otpornika na čijoj se otpornosti javlja pad napona. Zbog toga napon na objektu, ili napon kojeg daje generator $u(t)$, može da se razlikuje od napona koji stiže do razdelnika $z(t)$ (Slika 3. a)



Slika 3. Šema razdelnika napona sa priključnim provodnicima

- a) provodnik predstavljen svojom induktivnošću L i otpomošću R_0
- b) provodnik predstavljen kao vod sa raspodeljenim parametrima

Pri veoma velikim brzinama promene napona, vod koji povezuje razdelnik sa izvorom napona treba posmatrati kao vod sa raspodeljenim parametrima i karakterističnom impedansom i vreme prolaska talasa τ (Slika 3.b). Matematička osnova za proračun induktivnosti pravougaone petlje koja može da se primeni kod impulsnog generatora data je u . Veliki broj nerešenih problema povezan je sa ograničenom primenom teorije prelaznih procesa u kolima. Poprečne dimenzije i dužina Sistema provodnika treba da budu manje od četvrtine talasne dužine talasa, to je uslov koji često nije ispunjen. Ne mogu tačno da budu zadate jačina električnog i magnetskog polja kada se talasi polja prostiru u obliku sfernih talasa, a dužina provodnika je relativno mala, zbog toga što bi se obrazovao vrh talasa, u krajnjem slučaju u prostoru između provodnika. Mnogi radovi se bave pitanjem određivanja napona i struja neposredno iz prostorno i vremenski promenljivog elektromagnetnog polja koje je dobijeno korišćenjem pobude u vidu odskočne funkcije. Na strani niskog napona priključni provodnici treba da budu što kraći ili da uopšte ne postoje, što se postiže prostornim rasporedom celog uređaja, pri čemu treba obezbediti da predajne karakteristike razdelnika ne zavise od okolnih uređaja. Za povezivanje generatora sa razdelnikom i ispitivanim objektom na strain uzemljenja koriste se široke trake od bakra ili mesinga. Pri merenjima u elektro- fizičkim aparatima u nanosekundnoj oblasti često je potrebno koristiti koaksijalne veze. U daljim razmatranjima razdelnik napona zajedno sa njegovim spojnim provodnicima biće posmatran kao četvoropol, čiji je ulazni napon $u(t)$ priključen između spojnog provodnika i zemlje, a izlazni napon $u_2(t)$ se dobija na izvodima razdelnika. Povratno dejstvo razdelnika na izvor napona neće biti uzimano u obzir zato što se on često zajedno sa generatorom koristi za formiranje impulsa. Smatraće se da je poznat napon koji je priključen na objekat. Prenosne karakteristike sistema za merenje udarnih napona mogu da se odrede eksperimentalno ili računskim putem metodom analize sistema. Eksperimentalno određivanje vrši se korišćenjem visokih frekvencija i relativno niskih napona. Pri uopštavanju

dobijenih rezultata pretpostavlja se da se pri daljem radu uređaja na visokom naponu zadržava stroga linearnost karakteristika elemenata mernog sistema. Međutim, to u mnogim slučajevima nije tako. Na primer, može da se javi korona, parcijalno pražnjenje koje zavisi od vrednosti priključenog napona, kao i termički efekti, što sve u manjoj ili većoj meri izaziva nelinearnost karakteristika elemenata pojedinih uređaja. Izbor materijala sa malim temperaturnim koeficijentom odgovarajuća konstrukcija visokonaponskog dela uređaja obezbeđuje odsustvo varničenja pri nazivnom naponu, čime ovaj problem nije više dominantan. Pri razmatranju prenosnih karakteristika pretpostavlja se da izobličenje posmatranog impulsa u odnosu na idealni impuls prouzrokuju razdelnik i njegovi spojni provodnici, a ne struje u omotaču kabla ili druge smetnje.

4. Zaključak

Na osnovu rezultata predstavljenih u ovom radu može se zaključiti da bi preporuke koje se odnose na projektovanje i konstrukciju kapacitivnih razdelnika za merenje prenapona u nanosekundnoj oblasti mogle biti sledeće: 1 – potrebno je učiniti napor da se smanje dimenzije razdelnika na najmanju moguću meru (zavisno, naravno, od nivoa napona za koji je razdelnik namenjen); 2 – kablovske strukture moraju biti što je više moguće kratke, kako bi se smanjila na minimum parazitna induktivnost (ovo se naročito odnosi na dimenzije niskonaponske grane, koje bi trebalo da budu što je moguće manje), jer je induktivnost približno $1 \mu\text{H/m}$ za svaki vod; 3 – kapacitivnosti kondenzatora razdelnika ne smeju biti nestabilne (npr. kondenzatori od nauljenog papira menjaju kapacitivnost u toku punjenja usled elektrostatičkih i elektrodinamičkih sila); 4 – kapacitivnosti kondenzatora razdelnika moraju biti frekvencijski nezavisne (zbog toga što kondenzatori sa frekvencijski zavisnim prenosnim odnosom degenerišu mernu veličinu); 5 – trebalo bi koristiti talasovodne otpornike umesto diskretnih otpornika radi prilagođavanja kapacitivnog razdelnika karakterističnoj impedansi prenosa.

5. Literatura

- [1] P. Osmokrović, I. Milovanović, M. Vujisić, K. Stanković, R. Radosavljević, *Experimental measurements of very fast transient voltages based on an electro-optic effect*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 43, No. 1, pp. 408 – 417, 2012.
- [2] A. Kost, *Numerische Methoden in der Berechnung elektromagnetischer Felder.*, Berlin: Springer-Verlag, 1994. –ISBN 3-540-55005-4.
- [3] HAEFELY Documentation: *Standard Capacitors, Type NK, Type 3370*, Basel, 2001.
- [4] A. Kumada, A. Iwata, K. Oyaki, M. Ciba and K. Hidaka, *Kerr effect in gas and its application to non - contact measurement of electric field*, Journal of Applied Physics, Vol. 92, No. 5, pp. 2875 - 2879, September 2002.
- [5] R. M. Mersarau, A. V. Oppenheim, *Digital reconstruction of multi – dimensional signals from their projections*, Proc. IEEE, Vol. 62. No. 10, pp. 1319 – 1338, October 1974.