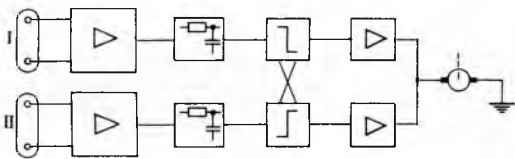


Pasivne endosonde usprkos svojoj jednostavnosti, manjim dimenzijama i neovisnosti o izvoru napajanja nisu naišle na veću primjenu. Uzrok je tome što je broj parametara koje mogu mjeriti dosta ograničen i točnost mjerenja dosta mala.

BIOELEKTRIČNO UPRAVLJANJE PROTEZAMA I ORTOZAMA

Proteze su naprave koje nadomještaju pojedine dijelove tijela (najčešće noge ili ruke), a ortoze su naprave koje omogućuju da pojedini dijelovi tijela koji su izgubili mogućnost obavljanja svoje funkcije nju ponovno djelomično dobiju (npr. očale ili uređaji za nagluhe). Mnoge od ovih naprava su mehaničke i jednostavne, sa skromnim mogućnostima. Naprave koje se bioelektrički upravljaju i elektronička rješenja daju mnogo veće mogućnosti s obzirom na funkcije koje mogu obavljati nego mehaničke naprave.

Proteze kao izvor bioelektričnog upravljanja upotrebljavaju mišićne napone. Proteza za šaku uzima napon iz različitih mišićnih grupa koje se mogu voljom kontrolirati. Najčešće su to mišići na leđima ili na batrljku amputirane ruke, ako se na tom mjestu mogu dobiti dovoljno veliki naponi. Najjednostavniji i najrasprostranjeniji je način upravljanja sa dva stanja *uključeno* i *isključeno* (engl. *on-off*). Oba se uzimaju sa dvije međusobno odvojene mišićne grupe (I i II) (sl. 31).

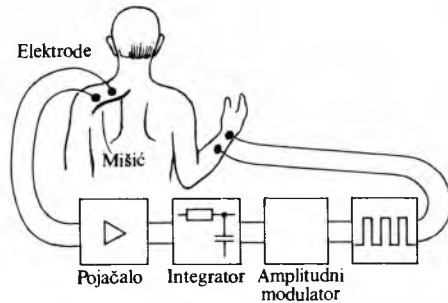


Sl. 31. Blok-shema bioelektričnog upravljanja protezom šake

Ti se signali najprije pojačavaju pojačalom do određene razine, zatim se uzima srednja vrijednost napona koji se dobiva na izlazu NF-filtra. Nakon toga signal dolazi na komparatore međusobno povezane, koji omogućuju da na pogonski motor (aktuator) stigne komanda samo jednog kanala. Motor proteze za šaku najčešće upravlja otvaranjem (pri mišićnom naponu na kanalu I), odnosno zatvaranjem šake (pri djelovanju mišićnog napona na kanal II). Kad nema mišićnog napona, motor se ne pokreće i zadržano je postojeće stanje. Mišićni naponi su praktički linearno proporcionalni mišićnom naprezanju. Ta činjenica omogućuje da se proporcionalno tome upravlja brzinom otvaranja ili zatvaranja šake ili da se regulira pritisak pri zahvatu šakom. Pri tome je potreban još jedan dodatni sklop, koji pretvara iznos srednjeg mišićnog napona u impulse kojima se širina mijenja uz istu frekvenciju s većim mišićnim naprezanjem (proporcionalno upravljanje). U nekim uređajima širina impulsa je konstantna, a mijenja se frekvencija impulsa, što nakon usrednjavanja mijenja istosmjernu komponentu struje kroz pogonski motor i time mijenja njegov moment. To uzrokuje povećanje brzine, odnosno stisak prstiju. Motor upravlja otvaranjem šake preko spojke i reduktora broja okretaja, koji omogućuje da se visoki broj okretaja motora uz mali moment pretvori u relativno sporo gibanje uz veliki moment. Tipične su vrijednosti brzine otvaranja šake na 8 cm razmaka između vrhova prstiju za 1 sekundu. Maksimalna sila među prstima jest 60-120 N. Pojačala koja se upotrebljavaju za pojačavanja miografskih napona jesu diferencijalna, s velikim faktorom rejekcije. Elektrode su najčešće od nerđajućeg čelika i takva oblika da što manje iritiraju kožu. Upotrebljavaju se i implantirane elektrode. Najpoznatije proteze za šake jesu Viennatone (Austrija) i Otto Bock (SR Njemačka). U nas je umjetna šaka bila konstruirana u Institutu »Mihajlo Pupin« (prof. Tomović). Za upravljanje malih jednostavnih proteza upotrebljavaju se preklopnici upravljani mišićnom silom zdravih mišića (najčešće leđnih). Preklopnici direktno upravljaju smjerom okretanja motora.

Za precizno doziranje tlaka među prstima stavljaju se senzori za tlak na vršcima prstiju. Od tih senzora koji pret-

varaju tlak u napon, nakon potrebnog pojačanja, obavlja se naponsko-frekvencijska pretvorba. Signalom promjenljive frekvencije prema tlaku upravlja se sada tzv. *vibrator*. Invalid prima mehaničke podražaje na osjetljivom mjestu tijela s vibratora, koji višom frekvencijom vibracija indicira veći tlak. Na taj su način realizirane proteze s povratnom vezom u kojoj je aktivan uključen nosilac proteze. Takva povratna veza može biti izvedena i potpuno automatski, gdje invalid konstrukcijom mišićne naprave, kojom inače upravlja, određuje pritisak stiska.



Sl. 32. Blok-shema bioelektričnog upravljanja mišicom (ortozom)

U području ortotike najčešće se upotrebljava funkcionalna električna stimulacija, gdje je motor zamijenjen mišicom bolesnika. Naime, ako je u bolesnika došlo do prekida živčane veze s mišićem, mišić ne može biti upravljana fiziološki. No, ako se ona stimulira električnim impulsima, ona se može pokretati (sl. 32). I u ovom slučaju pojačavaju se naponi zdravog mišića pojačalom, zatim se usrednjava mišićni napon kao i u prethodnom slučaju. Srednja vrijednost pojačanog mišićnog napona upravlja izvorom istosmjernog napona. Tim se naponom napaja astabilni multivibrator tako da se aktivirani mišić podražuje impulsima iz multivibratora promjenljive amplitude koja ovisi o naprezanju zdravog mišića. Impulsi su obično kraći od 0,5 ms, dok je razmak između impulsa obično 10-30 ms. Ako bi trajanje impulsa bilo dulje od 1 ms, bolesnik bi podražaje na atrofiranoj mišići mogao osjećati kao bol. Na taj se način može popraviti šepanje paraplegičkih bolesnika, kad se stimuliraju mišići nogu.

LIT.: L. Vodovnik, Osnove biokibernetike. Sveučilište u Ljubljani, Ljubljana 1968. — L. A. Greddes, L. E. Baker, Principal of applied biomedical instrumentation. John Wiley and Sons, New York-London-Sydney 1968. — R. Millner, R. Richwien, Grundlagen der medizinischen Elektronik Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1969. — J. W. Bellville, Ch. S. Weaver, Techniques in clinical physiology. Collier MacMillan Ltd., London 1969. — M. Clynes, J. H. Milsom, Biomedical engineering systems. McGraw-Hill, Book Co., 1970. — J. F. Crul, J. P. Payne, Patient monitoring. Excerpta medica, Amsterdam 1970. — B. W. Watson (editor), IEE medical electronics monographs 1-6. Peter Peregrinus, Herts-England 1971. — В. В. Парина (едитор), Биологическая телеметрия. Издательство Медицина, Москва 1971. — В. С. Гурфинкель, В. Б. Малкин, М. Л. Цетлин, А. Ю. Шнейдер, Биоэлектрическое управление. Издательство Наука, Москва 1972. — Ю. Ю. Бредикис, Очерки клинической электроники. Издательство Медицина, Москва 1974. — R. S. C. Cobbold, Transducers for biomedical measurements. John Wiley and Sons, New York-London-Sydney-Toronto 1974. — H. Thomas, Handbook of biomedical instrumentation and measurement. Reston Publishing Com., Reston 1974. — O. Z. Roy, The current status of cardiac pacing. CRC Critical Reviews Bioengineering, Vol. 2. Ottawa 1975. — A. Šantić, M. Neuman, Micropower low voltage radiotelemetry transmitter circuits. 11th International Conference on Medical and Biological Engineering. Ottawa, Canada, Aug. 1976.

A. Šantić

MEĐUSOBNI ODNOSI ELEKTROENERGETSKIH I TELEKOMUNIKACIJSKIH POSTROJENJA I VODOVA, međudjelovanje elektroenergetskih postrojenja (uključujući i postrojenja električne vuče) na susjedna telekomunikacijska postrojenja zbog moguće otporne, kapacitivne ili induktivne sprege te zbog zračenja elektromagnetskih valova (v. *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 684).

Elektroenergetska i telekomunikacijska postrojenja osnovne su potrebe modernog društva. Oba sustava dopiru do najudaljenijih korisnika, a kako se u oba sustava radi o elektromagnetskom prijenosu, moguć je međusobni utjecaj (v. *Električni vodovi*, TE 4, str. 237 i 246). Pri tom su telekomunikacijska postrojenja u apsolutno neravnopravnom položaju, jer se u elektroenergetskim postrojenjima radi o snagama 10^9 W, a za prijenos informacija karakteristične su snage reda veličina milivata na odašiljačkoj, odnosno mikrovata na prijamoj strani. Treba naglasiti da se pri elektroenergetskom prijenosu teži daljem povišenju napona prijenosa, dok se istodobno telekomunikacijska postrojenja grade sa sve osjetljivijim elementima i sklopovima (v. *Elektronika, sastavni dijelovi*, TE 4, str. 450). Oba su sustava u vrlo dinamičnom razvoju, prijenosni vodovi obaju sustava iz ekonomskih, geografskih i eksploatacijskih razloga grade se u blizini prometnica, tj. istim koridorima, pa se moraju studirati i rješavati problemi iz oblasti međusobnih odnosa. Utjecaj elektroenergetskih sustava na telekomunikacijske sustave izražen je pojavom stranih napona na telekomunikacijskim postrojenjima, koji mogu uzrokovati smetnje u prijenosu informacija, biti uzrokom oštećenja tih postrojenja ili ugroziti osoblje.

Problem koegzistencije elektroenergetskih i telekomunikacijskih sustava uočen je već u drugoj polovici prošlog stoljeća, ali je postao aktualan tek razvojem mreža visokih i najviših napona (v. *Električne mreže*, TE 4, str. 20), zbog sve intenzivnijeg uvođenja električne vuče (v. *Električna vuča*, TE 3, str. 689). Oba sustava ne ograničavaju se na nacionalna prostranstva, pa se mora prihvatiti činjenica da se uspješna rješenja problema međusobnih odnosa mogu postići samo u najužoj suradnji stručnjaka obiju strana.

U tom smislu već su 1924. godine odlučile Međunarodna konferencija za velike električne mreže (Conférence Internationale des Grandes Réseaux Electriques — CIGRE) i Međunarodno udruženje proizvođača i distributera električne energije (Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Énergie Electrique — UNIPED) da će se priključiti radu prve studijske komisije (danas studijska komisija V), koju je u tu svrhu osnovao Međunarodni komitet za telekomunikacije (Comité Consultatif International Téléphonique — CCI, danas CCITT). Istodobno se u zajednički rad uključuje i Međunarodni željeznički savez (Union Internationale des Chemins de Fer — UIC).

Vrlo se brzo pokazalo da se u teorijski dobivenim izrazima nalaze parametri kojih se prave vrijednosti mogu dobiti praktički istraživanjima i mjerenjima. I opet je to bio zajednički interes energetske i telekomunikacijske strane, pa je 1927. godine dogovoreno osnivanje zajedničkog tijela, Međunarodne mješovite komisije za zaštitu telekomunikacijskih linija (Commission Mixte Internationale pour les expériences relatives à la protection des lignes de télécommunications — CMI). Kasnije CMI ima dvije sekcije, i to sekciju elektroenergetskih utjecaja i sekciju za utjecaj korozije. Istodobno se povećava i broj članica sudionica, jer, između ostalih, postaje redovni član Međunarodna unija industrije plina (Union Internationale de l'Industrie de Gaz — UIG).

Pojedine zemlje imaju nacionalne komisije, udruženja i sl., a u njihovom radu sudjeluju stručnjaci elektroprivrede, PTT, željeznica i sličnih znanstvenih institucija. Cilj njihova rada je utvrđivanje tehničkih uvjeta koegzistencije obaju sustava, odnosno dijelova sustava.

Međusobni položaj pojedinih dijelova postrojenja ima odlučujući značaj. Tako će elektromagnetski utjecaj elektroenergetskih vodova na telekomunikacijske vodove, zbog njihova usporodnog vođenja (često i desetak kilometara), biti najizraženiji.

ANALIZA UTJECAJA ELEKTROENERGETSKIH NA TELEKOMUNIKACIJSKA POSTROJENJA

U skladu s teorijom elektromagnetske kompatibilnosti taj se utjecaj može razvrstati prema vrsti povezanosti obaju sustava na utjecaj zbog otporne sprege, kapacitivne sprege, magnetske sprege i zbog zračenja elektromagnetskih valova (korona, iskrenje).

Kad je sprega otporna, javljaju se naponi između dijelova telekomunikacijskih pogonskih krugova i uzemljivačkih sustava elektroenergetskih postrojenja. Razlikuju se dva slučaja: a) kad se metalni plašt telekomunikacijskog kabela spoji na uzemljivač elektroenergetskog postrojenja, javlja se napon vodič—plašt kabela, b) kad telekomunikacijski kabel ulazi ili prolazi potencijalnim lijevkom (v. *Električne mreže*, TE 4, str. 28), a da metalni plašt nije u dodiru s uzemljivačkim sustavom, javlja se napon između uzemljivača (odnosno okolišnog područja) i dijelova kabela (plašt, vodiči).

Utjecaj zbog djelovanja elektroenergetskog voda preko kapacitivnih sprege javlja se samo u zračnim vodovima i nadzemnim kabelima bez uzemljenog metalnog plašta. S povišenjem

napona elektroenergetskog postrojenja i taj problem dobiva veće značenje te se proširuju istraživanja kapacitivnih utjecaja ispod elektroenergetskih vodova i u njihovoj neposrednoj blizini, i to ne samo na telekomunikacijska postrojenja već posebno na čovjeka.

Utjecaj zbog magnetske sprege najjače je izražen. Osim induciranih napona u normalnom radu elektroenergetskih postrojenja, osobito dolaze do izražaja pojave prilikom nenormalnih načina rada kao što su različiti kratki i dozemni spojevi (v. *Električne mreže*, TE 4, str. 29). Tada postoji mogućnost snažnog induktivnog utjecaja zbog magnetskog polja koje potječe od dozemnih struja koje iznose od nekoliko ampera do dvadesetak kiloampera. Osim veličine dozemne struje, bitni utjecaj ima blizina obaju sustava, duljina paralelizma i iznos međuinduktiviteta.

Utjecaji zbog zračenja elektromagnetskih valova nastaju zbog pojave električnih izboja na elektroenergetskim postrojenjima. Na intenzitet izboja utječu, osim iznosa naboja, još i polumjer zakrivljenosti vodiča, stanje površine vodiča i opreme te atmosferske prilike. U prvom redu promatra se utjecaj korone (v. *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 684) u frekventijskom području reda megaherca. Iskrenje na nosačima i izolatorima karakteriziraju smetnje vrlo visokih frekvencija, što ima snažan utjecaj na prijam televizijskih signala, osobito u gusto naseljenim predjelima. I korona i iskrenja vjerojatnog su karaktera i ovisi o nizu čimbenika.

Intenzitet utjecaja ovisi, osim ostalog, o konstrukciji obaju postrojenja, njihovu odnosu prema zemlji i o uvjetima pod kojima rade. Utjecaj može nadalje biti trajan ili tek kratkotrajan.

Elektroenergetsko postrojenje može biti izgrađeno s uzemljenom neutralnom točkom (direktno ili preko otpora), s kompenzacijom struje zemljospoja (kompenzacijska ili Petersenova prigušnica) ili s izoliranom neutralnom točkom.

Vodovi elektroenergetske mreže mogu biti izgrađeni kao zračni (v. *Električni vodovi*, TE 4, str. 226) ili kabelski.

Vodovi telekomunikacijske mreže grade se kao slobodni zračni vodovi, nadzemni kabeli (s metalnim uzemljenim plaštem ili bez njega) ili podzemni kabeli (s metalnim plaštem i čeličnom armaturom ili bez nje).

Posljedica utjecaja prema intenzitetu i karakteru može imati dva osnovna oblika: opasnost za osoblje i telekomunikacijska postrojenja te smetnje (šum) u prijenosu informacija.

Pod opasnostima se smatra: prolaz struje prevelike jačine tijelom osobe u dodiru s telekomunikacijskim postrojenjem, akustički udar i mogućnost oštećenja ili pojave požara na telekomunikacijskim postrojenjima.

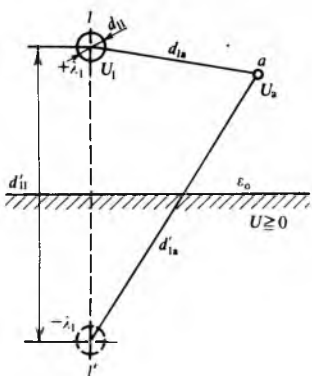
Pod smetnjom se smatra: smanjenje kvalitete prenošene informacije zbog pojave šumova na telekomunikacijskim postrojenjima, poremećaj u signalizaciji te dodatno izobličenje i pojava pogrešaka u prijenosu impulsa, odnosno podataka.

Na osnovi dugogodišnjih istraživanja utvrđene su prosječne vrijednosti štetnih utjecaja, koje su još prihvatljive s obzirom na kvalitetu prijenosa informacija i na ekonomičnost izgradnje obaju sustava.

Analiza utjecaja treba dati podlogu za utvrđivanje fizikalnih mehanizama međusobnog utjecaja i definiranje matematičkog modela pomoću kojeg se proračunavaju efekti utjecaja. Postupak je opsežan, a obuhvaća slijedeće najbitnije dijelove: upoznavanje geometrijskog rasporeda, dimenzija i međusobnog položaja obaju sustava; upoznavanje građe i položaja tla; određivanje naponskog i strujnog stanja elektroenergetskog sustava u normalnom pogonu i u stanju kvara; proračun vlastitih parametara obaju sustava i parametara sprege te utjecaj blizih predmeta na sprege među linijama; proračun efekta utjecaja zbog elektrostatske i elektromagnetske indukcije; utvrđivanje graničnih veličina štetnih utjecaja; izbor metoda mjerenja pojedinih veličina; izbor dodatnih zaštitnih mjera i postupaka.

Elektrostatička indukcija. Elementarni model prikazan je na sl. 1. Osnovne su pretpostavke da je vodič neograničene duljine, da je ravan i kružnog presjeka promjera d_{11} , da je položen horizontalno iznad zemlje na visini $0,5d_{11}$, da nosi naboj $+q_1$ po jedinici duljine te da je na istom statičkom

potencijalu U_1 po cijeloj duljini. Taj model predstavlja potpun sustav, jer se na površini zemlje influencira naboj suprotnog predznaka $-\lambda_1$, pa je u takvu sustavu $\Sigma \lambda = 0$. Iz teorije graničnih slojeva i rubnih problema povezane s Greenovim funkcijama može se vodič l preslikati u vodič l' i tako dobiti ekvivalentni sustav od dva vodiča razmaknuta za d'_{11} u zraku dielektričnosti ϵ_0 (sl. 1).



Sl. 1. Osnovni model za promatranje međusobnog utjecaja dvaju vodova. l realni vod, l' njegova slika u tlu

Rješenjem Laplaceove diferencijalne jednadžbe $\Delta U = 0$ u cilindričnom osnosimetričnom koordinatnom sustavu najprije za jedan vodič, zatim superpozicijom za dva vodiča, dobije se opća relacija za potencijal (napon prema zemlji) u bilo kojoj točki a u polju dvaju naboja $+\lambda_1$ i $-\lambda_1$:

$$U_a = \frac{\lambda_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d'_{1a}}{d_{1a}} = K_0 \lambda_1 n_{1a}, \quad (1)$$

a napon vodiča l :

$$U_l = \frac{\lambda_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d'_{11}}{d_{11}} = K_0 \lambda_1 n_{11}, \quad (2)$$

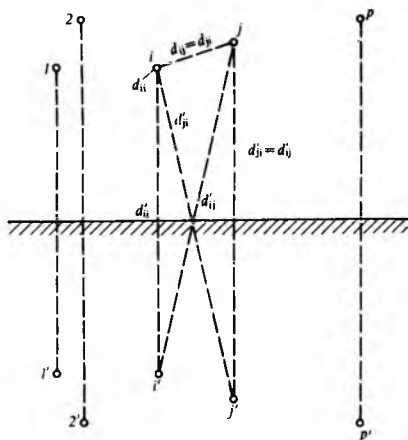
gdje je

$$K_0 = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} = 18 \cdot 10^9 \frac{\text{m}}{\text{F}},$$

a koeficijenti

$$n_{11} = \ln \frac{d'_{11}}{d_{11}}; \quad n_{1a} = \ln \frac{d'_{1a}}{d_{1a}} \quad (2a)$$

definirani su kao bezdimenzionalne veličine koje izražavaju prostornu geometrijsku raspodjelu, a nazivaju se koeficijentima potencijala.



Sl. 2. Linija od p vodiča iznad zemlje

Za cijeli sustav od p vodiča, naponi se mogu izraziti matricama, gdje je (3) i -ti redak:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_p \end{bmatrix} = K_0 \begin{bmatrix} n_{11} n_{12} & & \\ & \ddots & \\ n_{p1} n_{p2} & & n_{pp} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_p \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$[n_{ij}]_{pp}$ tvori simetričnu kvadratnu matricu koeficijenata potencijala, koja sadrži p članova i koji se računaju prema

$$n_{ij} = \ln \frac{d'_{ij}}{d_{ij}}, \quad (5)$$

a članovi glavne dijagonale prema

$$n_{ii} = \ln \frac{d'_{ii}}{d_{ii}}. \quad (6)$$

Koeficijenti potencijala uvijek zadovoljavaju uvjet

$$n_{ii} \geq n_{ij} \geq 0. \quad (7)$$

Simetrična matrica $[n_{ij}]$ nije singularna i može se invertirati, pa se može izraz (4) pisati skraćeno

$$U_p = K_0 [n_{ij}]_{pp} [\lambda]_p, \quad (8)$$

a može se riješiti po nabojima na vodičima sustava

$$[\lambda]_p = K_0^{-1} [n_{ij}]_{pp} [U]_p = [c_{ij}]_{pp} [U]_p. \quad (9)$$

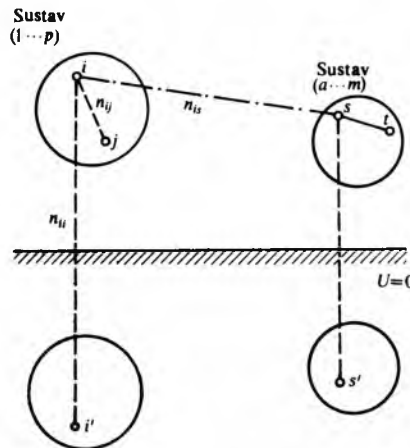
$[c_{ij}]_{pp}$ označuje matricu koeficijenata, a pojedini članovi dobiju se iz izraza

$$c_{ij} = \frac{1}{K_0} \frac{\Delta_{ij}}{\Delta}, \quad (10)$$

gdje je $\Delta = \det [n_{ij}]$, a Δ_{ij} = kofaktor od $n_{ij} = (-1)^{i+j} M_{ij}$. Nadalje je M_{ij} minor determinanta od elemenata n_{ij} determinante Δ .

Koeficijenti c_{ij} ovise samo o dimenzijama, obliku i razmještanju vodiča.

U stvarnosti, c_{ij} uvijek je negativan i izražava naboj inducirani na i -tom vodiču ako je j -ti vodič na jediničnom potencijalu, dok su svi ostali vodiči na potencijalu nula. Ti se koeficijenti nazivaju koeficijentima indukcije. Dijagonalni elementi matrice ne mogu imati to značenje pa se nazivaju koeficijentima kapaciteta i uvijek su pozitivni. Kombinacijom se dolazi do pojava parcijalnih kapaciteta i ukupnog kapaciteta u sustavu.



Sl. 3. Sprega dvaju sustava od p i m vodiča iznad zemlje

U analizi sprege dvaju sustava prema sl. 3 utvrđuju se neke pretpostavke koje će pojednostavniti analizu, a neće povećati bitno netočnost proračuna: sustav od p vodiča ima aktivni napon $[U]_p$ uvijek višeg reda od onog u m -sustavu (elektroenergetski sustav); m -sustav je bez vlastitih aktivnih izvora napona (telekomunikacijski sustav); vodiči m -sustava su galvaniski izolirani međusobno i prema zemlji; dimenzije vodiča m -sustava dovoljno su malene da se ne deformira elektrostatičko polje p -sustava; m -sustav ne djeluje na p -sustav, odnosno taj se utjecaj može zanemariti.

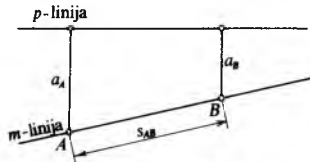
Primjenom superpozicije i uz iste pretpostavke može se pomoću izraza (2) dobiti napon i -tog vodiča u sustavu $1 \dots p$ vodiča izoliranih od zemlje (sl. 2):

$$U_i = K_0 (n_{i1} \lambda_1 + n_{i2} \lambda_2 + \dots + n_{ii} \lambda_i + n_{ij} \lambda_j + \dots + n_{ip} \lambda_p). \quad (3)$$

Utjecaj p -sustava na m -sustav može se izraziti elektrostatičkim induciranim naponom $[V]_m$ u vodičima prema zemlji. Uvođenjem izraza (1) u sustav izraza (4) može se po sličnosti pisati

$$[V]_m = K_0 [n_{is}]_{pm} [\lambda]_p \quad (11)$$

Ti bi naponi vladali na mjestima vodiča m -sustava i kad njih ne bi bilo tamo. Ukupni naboj po jedinici duljine na svakom vodiču m -sustava ostaje i dalje jednak nuli.



Sl. 4. Koso približavanje linija

Kad je položaj sustava kos kao na sl. 4, uvode se srednje vrijednosti preko sekcije $A-B$ za sve veličine koje su funkcija položaja s :

$$[V_s]_A^B = \frac{K_0}{S_{AB}} \int_A^B [n_{1s} \lambda_1 + n_{2s} \lambda_2 + \dots + n_{ps} \lambda_p] ds \quad (12)$$

$$(\lambda_s)_A^B = \frac{1}{S_{AB}} \int_A^B \lambda_s ds \quad (13)$$

$$(n_{is})_A^B = \frac{1}{S_{AB}} \int_A^B n_{is} ds. \quad (14)$$

Proračunavanje pri kosom približavanju provodi se tako da se umjesto pripadajućih pravih vrijednosti uvode srednje vrijednosti.

U realnom slučaju moraju se odbaciti neke pretpostavke. Tako se uzima u obzir da je m -sustav priključen na vlastiti izvor napona $[U]_m$. Odbacuje se pretpostavka o izoliranosti vodiča m -sustava od zemlje. Tada se može napon telekomunikacijskog voda $[U]_m$ izraziti formulom:

$$[U_s]_m = [V_s]_m + K_0 [n_{st}]_{mm} [\lambda_s]_m \quad (15)$$

a totalni naboj $[\lambda_s]_m$ po jedinici duljine u m -sustavu može se prikazati zbrojem

$$[\lambda_s]_m = [\lambda'_s]_m + [\lambda''_s]_m = [c_{st}]_{mm} ([U_s]_m - [V_s]_m). \quad (16)$$

Pri tom je prvi dio

$$[\lambda'_s]_m = [c_{st}]_m [U_s]_m$$

uzrokovan vlastitim naponom linije, a drugi

$$[\lambda''_s]_m = -[c_{st}]_m [V_s]_m$$

posljedica je elektrostatičke indukcije. Taj naboj ovisi samo o naponu $[U_i]_p$ u elektroenergetskom sustavu, sprezi između vodiča p -sustava i m -sustava (o $[n_{is}]_{pm}$) te o koeficijentima (geometrijskom rasporedu) m -sustava. U daljoj analizi nastoje se izvedene jednadžbe prilagoditi praktičnoj upotrebi uvođenjem parcijalnih kapaciteta i koeficijenata sprege među sustavima. Tako se aritmetička srednja vrijednost vlastitog kapaciteta elektroenergetske linije (za $i = j$) definira kao

$$\begin{aligned} \bar{C}_{ii} &= \frac{c_{11} + c_{22} + \dots + c_{ii} + \dots + c_{pp}}{p} \\ &= \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p c_{ij} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p c_{ii} \end{aligned} \quad (17)$$

a aritmetička srednja vrijednost međusobnih kapaciteta elektroenergetske linije (za $i \neq j$) kao

$$\bar{C}_{ij} = \frac{c_{12} + c_{13} + \dots + c_{1p} + c_{21} + c_{23} + \dots + c_{2p} + \dots}{p(p-1)} +$$

$$+ \frac{c_{p1} + c_{p2} + \dots + c_{p(p-1)}}{p(p-1)} = \frac{1}{p(p-1)} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p c_{ij}. \quad (18)$$

Uz pomoć izraza (17) i (18) mogu se izračunati i pojedinačni parcijalni kapaciteti, pojedinačni i međusobni za svaki vodič, odnosno za svaki par od p vodiča elektroenergetske linije. Pri proračunu se uvode korekcijski članovi γ_{ij} . Tako se dobije

$$C_{jj} = \bar{C}_{ii} + \gamma_{jj} \quad (19)$$

$$C_{ij} = \bar{C}_{ij} + \gamma_{ij} \quad (20)$$

Srednji parcijalni kapacitet elektroenergetske linije dobije se iz izraza

$$\bar{C}_{i0} = \bar{C}_{ii} + (p-1) \bar{C}_{ij} \quad (21)$$

uz određeni član korekcije

$$\gamma_{i0} = \gamma_{i1} + \gamma_{i2} + \dots + \gamma_{ip}. \quad (22)$$

Aritmetička srednja vrijednost za koeficijente sprege i -tog vodiča elektroenergetske linije i s -tog vodiča telekomunikacijske linije definira se izrazom

$$\bar{n}_{is} = \frac{n_{1s} + n_{2s} + \dots + n_{ps}}{p} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p n_{is}. \quad (23)$$

Prava vrijednost računa se uz korekcijski faktor sprege j -tog i s -tog vodiča dviju linija, a označuje se sa v_{js} :

$$n_{js} = \bar{n}_{is} + v_{js}.$$

Na osnovi tih definicija za srednje vrijednosti parcijalnih kapaciteta i za korekcije sprege za elektroenergetsku liniju od p vodiča može se pisati p relacija oblika

$$\bar{C}_{ii} v_{1s} + \bar{C}_{ij} v_{2s} + \dots + \bar{C}_{ij} v_{ps} = (\bar{C}_{ii} - \bar{C}_{ij}) v_{1s}. \quad (24)$$

Za elektroenergetsku liniju su γ_{ij} i v_{ij} manjeg reda veličine od \bar{C}_{ij} i n_{ij} , a njihovi su umnošci malene veličine drugog reda, pa se mogu zanemariti.

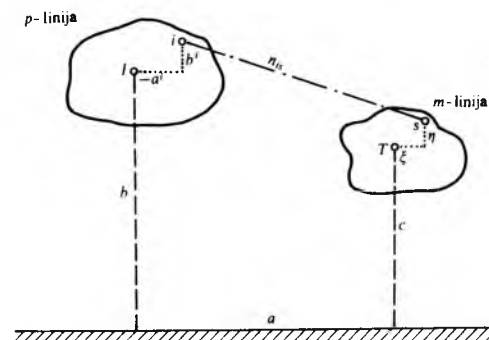
Na osnovi tih veličina i izraza (9) mogu se odrediti relacije $[V]_m = f[U]_p$. Tako se inducirani napon u s -tom vodiču telekomunikacijske linije prema zemlji određuje iz izraza

$$\begin{aligned} \frac{V_s}{K_0} &= \bar{n}_{is} \bar{C}_{i0} \sum_{i=1}^p U_i + \\ &+ \bar{n}_{is} (\gamma_{10} U_1 + \gamma_{20} U_2 + \dots + \gamma_{p0} U_p) + \\ &+ (\bar{C}_{ii} - \bar{C}_{ij}) (v_{1s} U_1 + v_{2s} U_2 + \dots + v_{ps} U_p). \end{aligned} \quad (25)$$

Ako se promatra djelovanje induciranih napona u vodu koji čine dva vodiča s i t telekomunikacijske linije, primjenjuje se izraz

$$\begin{aligned} \frac{V_s - V_t}{K_0} &= (\bar{n}_{is} - \bar{n}_{it}) \bar{C}_{i0} \sum_{i=1}^p U_i + \\ &+ (n_{is} - n_{it}) (\gamma_{10} U_1 + \gamma_{20} U_2 + \dots + \gamma_{p0} U_p) + \\ &+ (\bar{C}_{ii} - \bar{C}_{ij}) ((v_{1s} - v_{1t}) U_1 + (v_{2s} - v_{2t}) U_2 + \dots + \\ &+ (v_{ps} - v_{pt}) U_p). \end{aligned} \quad (26)$$

Koeficijenti sprege između p -linije i m -linije proračunavaju se pomoću modela na sl. 5, gdje I i T predstavljaju težišta



Sl. 5. Shema za proračun koeficijenata sprege

tin dvaju sustava. Uz ranije definicije i uzimajući koordinate vodiča iz sl. 5, slijedi prema (2a):

$$n_{is} = \frac{1}{2} \ln \frac{(a - a^i + \xi)^2 + (b + b^i + (c + \eta))^2}{(a - a^i + \xi)^2 + (b + b^i - (c + \eta))^2} \quad (27)$$

Uz srednju (težišnu) vrijednost koeficijenata sprege

$$\bar{n} = \frac{1}{2} \ln \frac{a^2 + (b + c)^2}{a^2 + (b - c)^2} \quad (28)$$

koeficijent n_{is} može se odrediti primjenom izraza (28) i Taylorovog razvoja funkcije n_{is} po varijablama a , b i c . Na taj se način dobije za telekomunikacijsku liniju od m vodiča i elektroenergetsku liniju od p vodiča približan izraz za srednje vrijednosti sprege

$$\bar{n} = \frac{1}{m} \sum_{s=a}^m n_{is} = \frac{1}{pm} \sum_{s=a}^m \sum_{i=1}^p n_{is}, \quad (29)$$

a za srednju korekciju (članovi drugog reda se zanemaruju)

$$\frac{1}{m} \sum_{s=a}^m v_{is} = -a^i \frac{\partial \bar{n}}{\partial a} + b^i \frac{\partial \bar{n}}{\partial b} \quad (30)$$

Za koso približavanje (sl. 4) računa se s prosječnim koeficijentima sprege na duljini s_{AB} :

$$\begin{aligned} (\bar{n})_A^B &= \frac{1}{s_{AB}} \int_A^B \bar{n} ds = \frac{1}{2} \frac{1}{a_A - a_B} \int_{a_A}^{a_B} \ln \frac{a^2 + (b + c)^2}{a^2 + (b - c)^2} da \\ &= \frac{N(a_B) - N(a_A)}{a_B - a_A} \end{aligned} \quad (31)$$

U dokumentima CCITT dane su tablice u kojima se nalaze izrazi za n , odnosno \bar{n} , i njegove parcijalne derivacije te izrazi za N i njegove parcijalne derivacije izražene kao funkcije od a , u i v , jer su uvedene veličine (tablica 1 i 2 te sl. 6)

$$u = \frac{b + c}{a}; \quad v = \frac{b - c}{a}$$

Uz tu dopunu može se pisati

$$n = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + u^2}{1 + v^2} = \ln \sqrt{1 + u^2} - \ln \sqrt{1 + v^2} \quad (32)$$

Tablica 1
IZRAZI ZA FUNKCIJU $n(a)$ I NJEZINE DERIVACIJE

	$a = 0$	$a > 0$	$ u > 0,1$ $ v > 0,1$	$a > 0$ $ u < 0,1$ $ v < 0,1$	Jedinica
$n(a)$	$\ln \frac{b+c}{b-c}$	$\ln \sqrt{\frac{1+u^2}{1+v^2}}$		$\frac{1}{2}(u^2 - v^2)$	
$n'_a(a)$	0	$-\frac{1}{a} \left[\frac{1}{1+v^2} - \frac{1}{1+u^2} \right]$		$-\frac{1}{a}(u^2 - v^2)$	m^{-1}
$n'_b(a)$	$-\frac{2c}{b^2 - c^2}$	$\frac{1}{a} \left[\frac{u}{1+u^2} - \frac{v}{1+v^2} \right]$		$\frac{1}{a}(u - v)$	m^{-1}
$n'_c(a)$	$\frac{2b}{b^2 - c^2}$	$\frac{1}{a} \left[\frac{u}{1+u^2} + \frac{v}{1+v^2} \right]$		$\frac{1}{a}(u + v)$	m^{-1}
$n''_a(a)$	$-\frac{4bc}{(b^2 - c^2)^2}$	$\frac{1}{a^2} \left[\frac{1-v^2}{(1+v^2)^2} - \frac{1-u^2}{(1+u^2)^2} \right]$		$\frac{3}{a^2}(u^2 - v^2)$	m^{-2}
$n''_{ab}(a)$	0	$\frac{2}{a^2} \left[\frac{v}{(1+v^2)^2} - \frac{u}{(1+u^2)^2} \right]$		$-\frac{2}{a^2}(u - v)$	m^{-2}
$n''_{ac}(a)$	0	$-\frac{2}{a^2} \left[\frac{u}{(1+u^2)^2} + \frac{v}{(1+v^2)^2} \right]$		$-\frac{2}{a^2}(u + v)$	m^{-2}
$n''_{bc}(a)$	$-\frac{2(b^2 + c^2)}{(b^2 - c^2)^2}$	$\frac{1}{a^2} \left[\frac{1-u^2}{(1+u^2)^2} + \frac{1-v^2}{(1+v^2)^2} \right]$		$\frac{2}{a^2}$	m^{-2}

Tablica 2
IZRAZI ZA FUNKCIJU $N(a)$ I NJEZINE DERIVACIJE

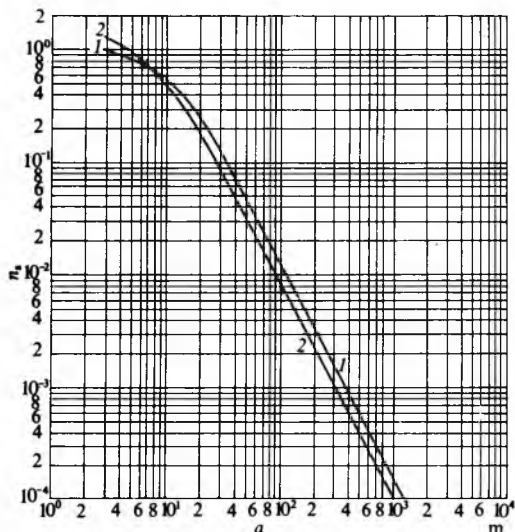
	$a = 0$	$a > 0$	$u > 0,1$ $v > 0,1$	$a > 0$ $u < 0,1$ $v < 0,1$	Jedinica
$N(a)$	0	$a \left[\ln \sqrt{\frac{1+u^2}{1+v^2}} + u \operatorname{Arctan} \frac{1}{u} - v \operatorname{Arctan} \frac{1}{v} \right]$		$a \left[1,571(u - v) - \frac{1}{2}(u^2 - v^2) \right]$	m
$N'_a(a)$	$n(a)$	$\ln \sqrt{1+u^2} - \ln \sqrt{1+v^2}$		$\frac{1}{2}(u^2 - v^2)$	
$N'_b(a)$	0	$\operatorname{Arctan} \frac{1}{u} - \operatorname{Arctan} \frac{1}{v}$		$-(u - v)$	
$N'_c(a)$	0	$\operatorname{Arctan} \frac{1}{u} + \operatorname{Arctan} \frac{1}{v}$		$3,142 - (u + v)$	
$N''_a(a)$	0	$-\frac{1}{a} \left[\frac{1}{1+v^2} - \frac{1}{1+u^2} \right]$		$-\frac{1}{a}(u^2 - v^2)$	m^{-1}
$N''_{ab}(a)$	$-\frac{2b}{b^2 - c^2}$	$\frac{1}{a} \left[\frac{u}{1+u^2} - \frac{v}{1+v^2} \right]$		$\frac{1}{a}(u - v)$	m^{-1}
$N''_{ac}(a)$	$\frac{2b}{b^2 - c^2}$	$\frac{1}{a} \left[\frac{u}{1+u^2} + \frac{v}{1+v^2} \right]$		$\frac{1}{a}(u + v)$	m^{-1}
$N''_{bc}(a)$	0	$-\frac{1}{a} \left[\frac{1}{1+u^2} + \frac{1}{1+v^2} \right]$		$-\frac{2}{a} \left[1 - \frac{u^2 + v^2}{2} \right]$	m^{-1}

Za određivanje srednje vrijednosti $(n_A)^B$ može se primijeniti izraz

$$a = \frac{a_A - a_B}{2}$$

uz uvjet da je

$$\frac{1}{2} \leq \frac{a_B}{a_A} \leq 2.$$



Sl. 6. Koeficijent sprege $n_a = \frac{1}{2} \frac{a^2 + (b+c)^2}{a^2 + (b-c)^2} = f(a)$
 krivulja 1: $b = 12$ m; $c = 6$ m
 krivulja 2: $b = 8$ m; $c = 6$ m

Određivanje kapaciteta elektroenergetskih i telekomunikacijskih linija. Taj se problem u elektroenergetskoj liniji svodi na određivanje srednjih vrijednosti parcijalnih kapaciteta. U tu se svrhu uzima \bar{n}_{ii} i \bar{n}_{ij} umjesto $[n_{ij}]_{pp}$ iz izraza (4) i definicija u (5) i (6). To unosi neku netočnost koja se može prihvatiti. Uvrštavanjem \bar{n}_{ii} i \bar{n}_{ij} u izraze (9) i (10) dobivaju se koeficijenti \bar{c}_{ij} . S njima se nadalje iz izraza (17) i (18) određuju \bar{C}_{i0} i srednja razlika $(\bar{C}_{ii} - \bar{C}_{ij})$. Napokon iz (19), (20) i (21) dobivaju se tražene vrijednosti

$$K_0 \bar{C}_{i0} = \frac{1}{\bar{n}_{ii} + (p-1)\bar{n}_{ij}} \quad (33)$$

$$K_0 (\bar{C}_{ii} - \bar{C}_{ij}) = \frac{1}{\bar{n}_{ii} - \bar{n}_{ij}}. \quad (34)$$

Ispitivanja su pokazala da se za elektroenergetske linije uobičajenih tipova može uzeti $\bar{n}_{ii} = 8$ i $\bar{n}_{ij} = 1,5$. Ako se te vrijednosti uvrste u (33) i (34), dobiju se vrijednosti kapaciteta kako slijedi:

za jednostruki trofazni vod bez zaštitnog užeta:

$$\bar{C}_{i0} = 5,0 \text{ nF/km}; \quad \bar{C}_{ii} - \bar{C}_{ij} = 8,5 \text{ nF/km},$$

a za jednofazni vod:

$$\bar{C}_{i0} = 5,5 \text{ nF/km}; \quad \bar{C}_{ii} - \bar{C}_{ij} = 8,5 \text{ nF/km}.$$

Prisutnost jednog ili više uzemljenih vodiča znatno smanjuje \bar{C}_{i0} , a neznatno mijenja $(\bar{C}_{ii} - \bar{C}_{ij})$. Te promjene uzima u obzir zaštitni faktor p' , kojega je vrijednost $p' = 0,75$ utvrdila organizacija CCITT na osnovi mjerenja. Dakle, u elektroenergetskim linijama sa zaštitnim užetom pojavljuje se u proračunu $p' \bar{C}_{i0}$ umjesto \bar{C}_{i0} .

U telekomunikacijskim linijama sa m vodiča može se sličnim postupkom odrediti parcijalni kapacitet:

$$C_{aa}^{(m)} = \frac{1}{K_0} \frac{n_{aa} + (m-2)n_{st}}{(n_{aa} - n_{st})(n_{aa} + (m-1)n_{st})} \quad (35)$$

$$C_{st}^{(m)} = -\frac{1}{K_0} \frac{n_{st}}{(n_{aa} - n_{st})(n_{aa} + (m-1)n_{st})}. \quad (36)$$

Totalni kapacitet a -tog vodiča prema zemlji dobije se iz izraza

$$C_{a0}^{(m)} = C_{aa}^{(m)} + C_{ab}^{(m)} + \dots + C_{am}^{(m)} = \frac{1}{K_0 n_{aa} + (m-1)n_{st}}. \quad (37)$$

Za proračunavanje koeficijenta iz izraza (35), (36) i (37) trebalo bi rješavati determinante m -tog reda i $\frac{m}{2}(m-1)$ subdeterminanti $(n-1)$ reda. Za praktičnu upotrebu, međutim, može se uzeti da je $n_{aa} = 9$, $n_{st} = 3$, pa se kapaciteti mogu računati prema približnim izrazima (u nF/km):

$$C_{aa}^{(m)} = \frac{9(m+1)}{m+2} \quad C_{st}^{(m)} = -\frac{9}{m+2} \quad (38)$$

$$C_{a0}^{(m)} = \frac{18}{m+2} \quad \frac{C_{aa} - C_{ab}}{2} = 5,5.$$

Pogreška je u računu to manja što je manji broj vodiča m .

U praktičnoj primjeni, uz zaštitne užadi, slične kompenzacijske efekte pokazuju i uzemljeni predmeti iz slabo vodljivog materijala. To su najčešće redovi drveća na udaljenosti ne većoj od 3 m od elektroenergetske ili telekomunikacijske linije. U prvom slučaju taj se efekt uzima u obzir s faktorom q , a u drugom s faktorom r . Mjerenja pokazuju (CCITT) da se može uzeti

$$q = r = 0,7.$$

Inducirane struje u telekomunikacijskim linijama. Razmatranja su ograničena na sinusoidna vremenski promjenljiva polja koja se promatraju kao kvazistatička. Takav je pristup moguć ako su frekvencije izvora i polja niže od 1 MHz. Da bi se proračunavanje pojednostavnilo, uvode se neke pretpostavke kao: 1) U , V , λ su konstantne veličine koje predstavljaju srednju vrijednost uzduž voda; 2) tlo na kojemu se zrale vodiči obiju linija idealno je vodljivo; 3) vodiči spojeni sa zemljom preko otpora ili impedancije kojoj je vrijednost manja od neke granične smatraju se direktno uzemljenim, a ako se radi o otporu ili impedanciji većoj od granične, vodič se smatra izoliranim od zemlje; 4) te aproksimacije znače da ostaju valjane relacije za U , V i λ utvrđene u elektrostatičkom slučaju, ako se u njih uvrste u dinamičkim poljima trenutne vrijednosti za U , V i λ , odnosno u slučaju sinusoidno vremenski promjenljivih polja frekvencije f , uvrštavaju se njihove efektivne vrijednosti; 5) promjena po vremenu inducirano naboj λ'' po jedinici duljine uzrokuje provodne struje i u vodičima tzv. inducirane struje:

$$[i_s]_m = \frac{d}{dt} [\lambda_s]_m = -[c_{st}]_m \frac{d}{dt} [V_s]_m. \quad (39)$$

Proračunavanje induciranih struja može se pojednostavniti uzimanjem istih vrijednosti n_{aa} i n_{st} kojih će posljedica biti da sustav jednadžbi (15) daje iste vrijednosti za sve napone $V_a = V_b = \dots = V_m = \bar{V}$, ili jednostavno V . U petlji razlika $(V_a - V_b)$ daje njihove prave vrijednosti, ali se opet zbog jednostavnosti uzima da je efekt ostalih $(m-2)$ vodiča zanemariv u usporedbi s efektom te diferencije na struju u petlji. Prema CCITT proračun se provodi kad su efekti najveći, a to je kad su svi vodiči telekomunikacijske linije ili izolirani od zemlje ili su spojeni sa zemljom. U prvom se slučaju inducirani napon računa iz izraza (11), (15) ili (25), a zatim se pomoću (12) računa srednja vrijednost preko sekcije AB

$$U = \frac{1}{S_{AB}} \int_A^B V(s) ds. \quad (40)$$

Uz m vodiča naboj po jedinici duljine iznosi

$$\lambda(s) = \frac{1}{K_0 (n_{aa} + (m-1)n_{st})} (U - V(s)). \quad (41)$$

Ako su linije paralelne, onda je $U = V$ na cijeloj duljini sekcije, pa je $\lambda(s) = 0$. U drugom slučaju, tj. kad je m' vodiča telekomunikacijske linije uzemljeno, računa se sa srednjim vrijednostima napona V i naboja λ_a po jedinici duljine. Kako je napon uzemljenog vodiča jednak nuli, slijedi

$$V + K_0 [n_{aa} + (m' - 1)n_{st}] \lambda_a = 0. \quad (42)$$

S obzirom da se radi o induciranoj struji, to je $\lambda_a = \lambda''$ i dalje iz (37) i (39) ili direktno iz (42)

$$I_{a0} = \frac{j\omega}{K_0} \frac{Vs}{n_{aa} + (m - 1)n_{st}}. \quad (43)$$

Ako se uvrsti vrijednost za dozemni kapacitet iz (38), dobije se numerička vrijednost struje

$$I_{a0} = \omega \frac{12}{m' + 2} Vs \cdot 10^{-9} \quad (44)$$

gdje je I_{a0} u amperima, V u voltima, a s u kilometrima. To je, dakle, slučaj koji se prema CCITT treba razmatrati. U obzir dolaze tri mogućnosti: 1) struja prema zemlji može poteći preko jednog vodiča (a), tada se računa jedinična poprečna inducirana struja $i_a(s)$ uz udaljenosti s od početka sekcije; 2) struja prema zemlji teče preko dva vodiča (a i b), tada se promatra suma ($i_a(s) + i_b(s)$); 3) struja može teći u krugu koji čine vodiči a i b , tada se promatra jedinična poprečna inducirana struja $\frac{(i_a - i_b)}{2}$.

Jedinične inducirane poprečne struje iznose

$$i_a(s) = j\omega C_{0f} V(s) \quad (45)$$

$$i_a(s) + i_b(s) = j\omega C_{0p} V(s), \quad (46)$$

gdje je C_{0f} i C_{0p} :

$$C_{0f} = \frac{18}{z + 3}; \quad C_{0p} = \frac{36}{z + 4}, \quad (47)$$

jer se jedanput u (38) uvrštava $z = m' - 1$, a drugi put $z = m' - 2$. U trećem slučaju je petlja, pa je

$$\frac{i_a - i_b}{2} = \frac{j\omega}{K_0} \frac{V_a - V_b}{2(n_{aa} - n_{ab})} = j\omega C_c (V_a - V_b). \quad (48)$$

C_c je prema (38) približno jednak 5,5 nF/km.

Inducirane struje mogu se izračunati pomoću induciranih napona (45), (46) i (48) i pomoću naponskog stanja u elektroenergetskoj liniji. Sustav napona može se promatrati kao da rezultira od tzv. rezidualnog sustava, kojemu komponente imaju isti modul i iste faze na svim vodičima, i drugoga tzv. izbalansiranoga, a kojemu komponente imaju isti modul, ali im faze imaju pomak za 120°.

Jedinične inducirane poprečne struje u telekomunikacijskoj liniji računaju se na sljedeći način: prema definiciji za rezidualni sustav jest

$$U_r = U_1 = U_2 = \dots = U_p; \quad \gamma_{10} + \gamma_{20} + \dots + \gamma_{p0} = 0.$$

Nakon uvrštenja u (25) i (26) i uvođenjem srednjih vrijednosti koeficijenata sprege iz (30) i (31) mogu se pomoću (45) do (48) dobiti konačni izrazi

$$i_a = \omega C_{0f} g_r \bar{n} U_r p' q r \quad (49)$$

$$i_a + i_b = \omega C_{0p} g_r \bar{n} U_r p' q r \quad (50)$$

$$\frac{i_a - i_b}{2} = \omega C_c g_r n_r^I U_r. \quad (51)$$

U tim je izrazima i_a i i_b u nA/km, a kapaciteti su C_{0f} , C_{0p} i C_c iz izraza (47) i (38). Koeficijent $g_r = p K_0 \bar{C}_{i0}$, p = broj vodiča, a C_{i0} je iz izraza (21). Nakon uvrštavanja jest

$$g_r = \frac{p}{n_{ii} + (p - 1)n_{ij}}. \quad (52)$$

Njegova je prosječna vrijednost 2/9,5 za jednofazni vod, a 3/11 za trofazni. Srednji koeficijent sprege n izračuna se iz (28) i (29), dok je

$$n_r^I = \bar{n}_{ia} - \bar{n}_{ib}. \quad (53)$$

Za sustav izbalansiranih napona primjenjuje se sljedeći postupak: prema definiciji

$$U_1 = U_e; \quad U_2 = -\frac{1 + j\sqrt{3}}{2} U_e; \quad U_3 = -\frac{1 - j\sqrt{3}}{2} U_e;$$

$$U_1 + U_2 + U_3 = 0.$$

Ako elektroenergetska linija nema zaštitno uže:

$$\gamma_{10} + \gamma_{20} + \gamma_{30} = 0; \quad v_{10} + v_{20} + v_{30} = 0.$$

Za jedinične inducirane poprečne struje u nA/km slijedi

$$i_a = \omega C_{0f} g_e n_e^I U_e \quad (54)$$

$$i_a + i_b = \omega C_{0p} g_e n_e^I U_e \quad (55)$$

$$\frac{i_a - i_b}{2} = \omega C_c g_e n_e^{II} U_e \quad (56)$$

gdje je $g_e = 1/65$ za jednofazne i trofazne linije, a koeficijenti n_e^I i n_e^{II} mogu se računati ili očitati iz publikacija CCITT.

Elektromagnetska indukcija. Promatrat će se elektromagnetska indukcija između vodova iznad zemlje kroz koje protječe izmjenična struja. Osnovni parametri koje treba u analizi utvrditi jesu vlastita i međusobna impedancija (CCITT, Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electricity lines, UIT 1963, chapter XII). Uz pomoć osnovnih zakona elektromagnetizma može se svako elektromagnetsko polje prikazati vektorom električnog polja \vec{E} i vektorom magnetske indukcije \vec{B}

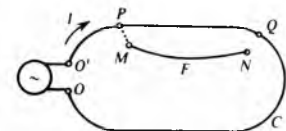
$$\vec{E} = -\text{grad } U - j\omega \vec{A} \quad (57)$$

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}, \quad (58)$$

gdje je U skalarni potencijal zbog električnih naboja na površini vodiča, a \vec{A} vektorski potencijal (magnetski) uzrokovan tokom struje u krugu koji napaja izvor i u drugim vodičima sustava. Drugi član u izrazu (57) označuje polje uzrokovano elektromagnetskom indukcijom:

$$\vec{E}^i = -j\omega \vec{A}. \quad (59)$$

Sl. 7. Shema za analizu spregnutih krugova



Iz sl. 7 može se definirati vlastita i međusobna impedancija uz pomoć uvedenih veličina. Vlastita će impedancija kruga C biti

$$\bar{Z}_c = -\frac{U_0 - U'_0}{I} = \frac{1}{I} \left(\int_{O'}^O \vec{E} dl - \int_{O'}^O \vec{E}^i dl \right) \quad (60)$$

Međusobna impedancija kruga C i izoliranog vodiča, zbog toga jer je na izoliranom vodiču između točaka M i N , $E = 0$, bit će

$$\bar{Z}_{c,F} = -\frac{U_N - U_M}{I} = \frac{1}{I} \left(- \int_M^N \vec{E}^i d\vec{l} \right). \quad (61)$$

Ako se M vodljivo spoji s točkom P kruga C , onda je međusobna impedancija kruga $O-O'$ (krug C) i kruga $N-Q$ jednaka

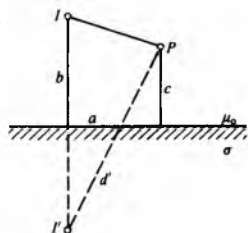
$$\begin{aligned} \bar{Z}_{c,F+C} &= -\frac{U_N - U_0}{I} = \\ &= -\frac{1}{I} \left(\int_P^Q \vec{E} d\vec{l} - \int_P^Q \vec{E}^i d\vec{l} + \int_M^N \vec{E}^i d\vec{l} \right). \end{aligned} \quad (62)$$

Ako je put $P-Q$ ekvipotencijal, u (62) ostaje samo treći integral. Ako je pak vodič F izoliran i tijesno priljubljen na vodič C , ostaje samo prvi integral.

Poznato je nadalje da za linearne probleme (impedancija neovisna o struji i frekvenciji) za površinu ravnog vodiča kružnog presjeka vrijedi

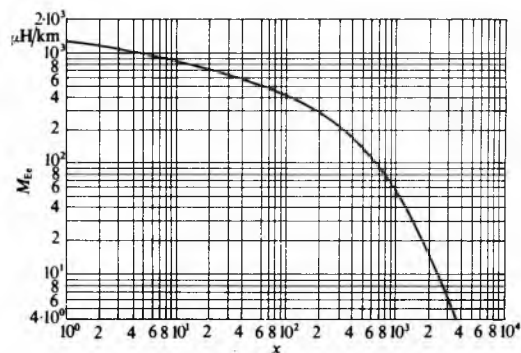
$$\frac{E}{I} = R + j\omega \frac{\mu_0}{8\pi} \quad (63)$$

Iz sl. 8 vidi se značenje pojedinih simbola koji će se primjenjivati u daljoj analizi, a osim njih još: σ vodljivost tla, $\alpha = \sqrt{\mu_0 \sigma \omega}$, $d = \sqrt{a^2 + (b-c)^2}$, $d' = \sqrt{a^2 + (b+c)^2}$, $x = \alpha a$, $y = (b+c)$. Permeabilnost tla izjednačit će se s permeabilnošću vakuumu (sl. 9).



Sl. 8. Sprega dvaju sustava s po jednim vodičem

Rješenje postavljenog problema (sl. 8) dali su F. Pollaczek i J. R. Carson pod pretpostavkom jednake vodljivosti tla i beskonačne duljine linije u oba smjera. Dobiveni izrazi za E^i , što inducira polje B od struje I , vrlo su zamršeni i vode na Kelvinove funkcije. Razmatraju se slučajevi: 1) Telekomunikacijski vod zračni (a) — elektroenergetski vod zračni (A): E_{Aa}^i ; 2) Telekomunikacijski vod podzemni (s) — elektroenergetski vod zračni (A): E_{As}^i ; 3) Oba voda podzemna: E_{ss}^i ; 4) Telekomunikacijski vod zračni (a) — elektroenergetski vod podzemni: E_{sa}^i .



Sl. 9. Ovisnost međuindukcije M_{EE} o međusobnom razmaku

vodova a , frekvenciji f i otpornosti zemlje $x = a \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho}}$

Za praktično računanje upotrebljavaju se približni izrazi:

$$E_{Aa}^i = -j \frac{\mu_0 \omega}{4\pi} I \left[4 \frac{k_{ei} \alpha a - j k_{er} \alpha a}{\alpha a} - 4j \frac{1}{(\alpha a)^2} - 2 \ln \left[1 + \left(\frac{b-c}{a} \right)^2 \right] \right] \quad (64)$$

Vrijednosti αa , već prema udaljenosti a , frekvenciji f i vodljivosti tla σ , dane su u tablici CCITT (tabl. 3), a vrijednosti vodljivosti tla σ u tabl. 4. U skladu sa (60) i (62) i uz pomoć (63) može se izračunati iz (64) vlastita i međusobna impedancija tih dviju linija. Vlastita impedancija (60) nadzemnog ili podzemnog

Tablica 3
VRIJEDNOSTI ZA αa

f Hz	σ S/m	α (10^{-4} /m)	αa za $a =$						
			10 m	20 m	50 m	100 m	200 m	500 m	1000 m
50	10^{-1}	63	0,063	0,125	0,315	0,63	1,25	3,15	6,3
	10^{-2}	20	0,02	0,04	0,1	0,2	0,4	1	2
	10^{-3}	6,3	0,0063	0,0125	0,0315	0,063	0,125	0,315	0,63
	10^{-4}	2,0	0,002	0,004	0,01	0,02	0,04	0,1	0,2
800	10^{-1}	250	0,250	0,5	1,25	2,5	5	12,5	25
	10^{-2}	80	0,080	0,16	0,4	0,8	1,6	4	8
	10^{-3}	25	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1,25	2,5
	10^{-4}	8,0	0,008	0,016	0,04	0,08	0,16	0,4	0,8

Tablica 4
VODLJIVOST RAZLIČITIH VRSTA TLA

Vrsta tla	Uvjeti koji se odnose na klimu — očitane oborine			Slane podzemne vode
	normalne ili visoke, tj. više od 500 mm/god.		niski ili pustinjski uvjeti, tj. manje od 250 mm/god.	
	vjerojatna vrijednost	moгуća promjena	moгуća promjena	
Nanosi vodom i svijetlo glineno tlo	0,2	0,5 do 0,1 prema razini vode u promatranoj površini	0,2 do 0,001 prema razini vode u promatranoj površini	1...0,2
Glina (bez nanosa)	0,1	0,2...0,05	0,1...0,01	
Plodno tlo	0,05	0,1...0,03	0,02...0,003	0,3...0,1
Porozni kalcij (vapnenac)	0,02	0,03...0,01		
Porozni pijesak	0,01	0,03...0,003		0,1...0,03
Kremen, tvrdo kristalizirani vapnenac	0,003	0,01...0,001		
Glineni škriljavac	0,001	0,003...0,0003		
Granit	0,001		$\leq 0,001$	0,03...0,01
Škriljavac, fosili, slojevite stijene, vulkanske stijene	0,0005	0,001...0		

vodiča izoliranog od zemlje, ali na krajevima spojenoga sa zemljom, dobije se iz izraza

$$Z = \frac{(E - E')^2}{I} = R + \frac{\omega\mu_0}{4} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{4\sqrt{2}}{3} \alpha b \right) + j \frac{\omega\mu_0}{4\pi} \left(2 \ln \frac{2}{g\alpha d_{11}} + \frac{3}{2} + \frac{4\sqrt{2}}{3} \alpha b \right), \quad (65)$$

u kojemu je član sa b zanemariv, a $g = 1,7811\dots = e$, gdje je $\gamma = 0,5772$ Eulerova konstanta.

Međusobna impedancija po jedinici duljine Z^i izražava se međuinduktivitetom po jedinici duljine M :

$$-Z^i I = -j\omega M I = E^i \quad \text{ili} \quad \frac{-E^i}{I} = j\omega M = Z^i. \quad (66)$$

M se može pisati u obliku

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} m(\alpha a, \alpha b, \alpha c), \quad (67)$$

gdje je m izraz u zagradi (64) za nadzemne vodove. Za podzemni vod može se staviti kao da je na tlu, za koji je, ovisno o slučaju, b ili c jednako nuli. Izraz (67) sadrži realni i imaginarni dio kojemu odnos ovisi o razmaku između linija. Pri manjim razmacima prevladava realna, a pri većim imaginarna komponenta.

Slično kao u analizi elektrostatske indukcije, upotrebljavat će se koeficijenti sprege kojih izrazi sadrže prve i druge derivacije od M s obzirom na a , b i c . Može se nadalje pisati

$$m(\alpha a, \alpha b, \alpha c) = 2 \ln \frac{2}{g\alpha d} + m_1(x, y) \quad (68)$$

$$v = \frac{b-c}{a}; \quad d = a\sqrt{1+v^2},$$

pa se može računati (67).

Za određivanje međusobne impedancije dviju paralelnih linija konačne duljine dobije se nakon provedene analize izraz

$$E_{fz} = -j\omega I \frac{\mu_0}{4\pi} m(\alpha s, \alpha a). \quad (69)$$

Funkcija $m(\alpha s, \alpha a)$ može se izraziti kako slijedi:

$$s > 0, \quad m(\alpha s, \alpha a) = m_0(\alpha a) - m_c(\alpha s, \alpha a)$$

$$s < 0, \quad m(\alpha s, \alpha a) = + m_c(\alpha |s|, \alpha a)$$

$$s = 0, \quad m(\alpha s, \alpha a) = \frac{m_0(\alpha a)}{2}.$$

Vrijednosti m_0 i m_c daju se u tablicama kao funkcije varijabli αs i αa .

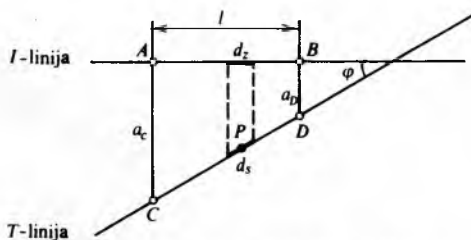
Pri kosom položaju linija (sl. 10) uvodi se srednja vrijednost međusobne indukcije m_{CD} . Uz pomoć funkcije

$$\overline{m}_{CD} = \cos \varphi \int_{SC}^{SD} m_0(\alpha a) ds \quad (70)$$

dobije se

$$\overline{m}_{CD} = l \frac{\int_{\alpha a_c}^{\alpha a_D} m_0(\alpha a) d(\alpha a)}{\alpha a_c - \alpha a_D} = l(m_0)_C^D, \quad (71)$$

koja se daje tabelarno (CCITT; chapter XII).



Sl. 10. Sprega linija s kosim približavanjem

U tom proračunu glavni problem je određivanje vodljivosti tla, a krivo odabrana veličina unosi najveću grešku u račun koeficijenata međusobne indukcije. Da bi se povećala točnost (prema CCITT), tlo se prikazuje sa dva sloja, i to slojem jednolike vodljivosti σ i konačne debljine h , koji je položen na drugi sloj vodljivosti σ i beskonačne debljine. CCITT je dao dijagrame iz kojih se očitava ekvivalentna vodljivost takva tla.

Kompencacijski efekti. Ako se u blizini elektroenergetske i telekomunikacijske linije nalaze uzemljeni metalni predmeti (užad, vodiči, tračnice, kabelski plašt, cjevovodi), u njima će se inducirati struje koje teku u krugovima nastalim od tih vodiča i zemlje. Rezultat je kompenzacijski efekt izražen redukcijskim faktorom (v. *Električni vodovi*, TE 4, str. 252). To je odnos induciranih elektromotornih sila po jedinici duljine kad su prisutni uzemljeni vodiči (e_a) i kad oni nisu prisutni (e'_a):

$$k = \frac{e_a}{e'_a}. \quad (72)$$

Proračun je efekata elektromagnetske indukcije moguć ako se poznaju izrazi za induciranu elektromotornu silu po jedinici duljine koja se opaža u vodiču e_a ili u krugu ($e_a - e_b$) telekomunikacijskog voda. Osnovni izraz za elektromotornu silu po jedinici duljine u vodiču a glasi

$$e_a = -j\omega [M_{1a}I_1 + M_{2a}I_2 + \dots], \quad (73)$$

što je slično izrazu (11) za elektrostatičku indukciju. Koeficijenti M_{ia} ovise o relativnoj poziciji vodiča i i vodiča a . Isto se tako struje u elektromagnetskoj liniji rastavljaju u dva sustava: preostali (rezidualni) i simetrični. Za preostale struje $I_r = I_1 + I_2 + \dots$ kroz vodiče elektroenergetske linije slijedi

$$e_a = \omega M I_r k k', \quad (74)$$

gdje su k, k', k'' itd. redukcijski faktori pojedinih uzemljenih vodiča. I dalje za krug:

$$e_a - e_b = -j\omega \left\{ [M_{ia} - N_{ib}] - \frac{Z_{in}}{Z_{nn}} [M_{na} - N_{nb}] \right\} I_r, \quad (75)$$

gdje je n središte masa elektroenergetske linije, Z_{nn} vlastita impedancija hipotetskog kruga prikazanog grupom krugova i zemljom kao jednim od vodiča.

U simetričnom sustavu jest

$$I_1 = I_e; \quad I_2 = -\frac{1+j\sqrt{3}}{2} I_e; \quad I_3 = -\frac{1-j\sqrt{3}}{2} I_e;$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0,$$

pa će biti

$$e_a = -j\omega [M_{1a}I_1 + M_{2a}I_2 + M_{3a}I_3]. \quad (76)$$

Ako se uvede srednja vrijednost \overline{M} , vrijedi

$$M_{1a} = \overline{M} + \mu_{1a}; \quad M_{2a} = \overline{M} + \mu_{2a}; \quad M_{3a} = \overline{M} + \mu_{3a};$$

$$\mu_{1a} + \mu_{2a} + \mu_{3a} = 0,$$

i konačno

$$e_a = j\omega \left[\frac{3\mu_{1a} - j\sqrt{3}(\mu_{2a} - \mu_{3a})}{2} \right] I_e. \quad (77)$$

Za telekomunikacijski krug je

$$e_a - e_b = (M_{1a} - M_{1b})I_1 + (M_{2a} - M_{2b})I_2 + (M_{3a} - M_{3b})I_3. \quad (78)$$

Utjecaj preko otporne sprege. Mogućnost utjecaja postoji ako dođe do spoja metalnog plašta kabla s elektroenergetskim uzemljivačem. Tada se javlja elektromotorna sila E_c između metalnog plašta telekomunikacijskog kabla i vodiča u tom kabelu. Druga mogućnost utjecaja postoji kad telekomunikacijski kabel završava u području potencijalnog lijevka (koji nastaje kad je kvar na elektroenergetskom postrojenju) ili presijeca taj lijevak, a da taj metalni plašt nije s njim u dodiru. Tada se pojavljuje napon između uzemljivača (odnosno područja) i dijelova kabla (metalni plašt, vodiči).

Inducirana elektromotorna sila računa se pomoću izraza

$$E_{i1} = I_E w Z_E k, \quad (79)$$

gdje je I_E dozemna struja kroz uzemljivač, Z_E impedancija uzemljivača, k redukcijски faktor kabela, a $w = 0,7$. Osim pojave visokih vrijednosti napona opasnosti, može doći do iznošenja potencijala preko metalnog plašta kabela.

Utjecaj zbog zračenja elektromagnetskih valova. Zbog porasta prijenosnih napona na vodičima i opremi elektroenergetskih postrojenja dolazi do električnih izboja, a na njihovo nastajanje i intenzitet utječu osim polumjera zakrivljenosti vodiča još i stanje površine i vremenski uvjeti. S obzirom na frekvencijsko područje smetnje se javljaju u radio-komunikacijama. Pojava izboja nije ograničena samo na vodiče, nego se zamjećuje i na opremi kao što su oštećeni nosači, neočišćeni ili oštećeni izolatorski lanci i slično.

U nas još nisu provedena sustavna istraživanja o utjecaju smetnji od korone, pa se upotrebljavaju komparativne metode obrađene u dokumentu radne grupe studijskog komiteta 36 (Interference) CIGRE, a dobivene su na osnovi istraživanja provedenih u sedamdesetak zemalja. Osnovna značajka komparativnih metoda može se izraziti ukupnom razinom smetnje

$$E = E_0 + E_g + E_d + E_n + E_{DH} + E_f + E_{FW}, \quad (80)$$

gdje je E razina smetnje u $\frac{dB}{\mu Vm}$, E_0 komponenta ovisna o rasporedu vodiča energetskog voda, E_g komponenta ovisna o gradijentu potencijala, E_d komponenta ovisna o promjeru vodiča, E_n komponenta ovisna o broju vodiča, E_{DH} komponenta ovisna o radijalnom razmaku i visini vodiča iznad zemlje, E_f komponenta ovisna o frekvenciji, a E_{FW} komponenta koja pokazuje utjecaj kiše na razinu smetnji.

PRIMJENA

Iz provedene analize evidentno je da će se proračun efekata utjecaja, tj. opasnosti i smetnji, obavljati samo kad se oba sustava nalaze na razmaku koji je manji od nekoga graničnoga, što ga daje CCITT i JUS N.C0.101, 102 i 103: Zaštita telekomunikacionih postrojenja od utjecaja smetnji elektroenergetskih postrojenja, Beograd 1978. (nacr.) Isto tako se u propisima daju slučajevi kada je nužno koji proračun provesti, odnosno koje se veličine utjecaja neće provjeravati (npr. proračun djelovanja električnog polja obavlja se samo ako se radi o zračnom elektroenergetskomvodu).

Proračun opasnosti

Elektrostatička indukcija. Jakost struje (u mA) računa se prema izrazu (49), (50) i (51)

$$i = 2\pi f C_0 g_r \bar{n} s U_r p' q r \cdot 10^{-6}, \quad (81)$$

a za dionicu s kosim približavanjem prema

$$i = 2\pi f C_0 g_r [\bar{n}]_A^B s U_r p' q r \cdot 10^{-6}, \quad (82)$$

$[\bar{n}]_A^B$ dobije se iz (31).

Ako su sve točke zračnog voda udaljene od elektroenergetskog voda, $a > \frac{1}{12} \sqrt{E s_1}$, tada nije potreban proračun. Ako taj uvjet nije ispunjen, tada se proračunava, ali se zanemaruju sve dionice koje ispunjavaju uvjet $a_2 \geq \frac{1}{4} \sqrt{E s_1}$, gdje je s_1 ukupna duljina telekomunikacijskog voda koja se projicira na elektroenergetski vod. Granična vrijednost ove struje iznosi 10 mA. Napon opasnosti (u voltima) kome su izložene telekomunikacijske instalacije dobije se iz izraza

$$U = \frac{\sum i}{2\pi f(C_0 s)} \cdot 10^6 \quad (83)$$

a mora biti niži od 60% probojnog napona instalacije.

Elektromagnetska indukcija. Opći uvjeti kad se provjerava opasnost, odnosno kad je rizik opasnosti eliminiran, daju već

spomenuti propisi o zaštiti. Za dionicu usporednog vođenja vrijednost inducirane elektromotorne sile dobije se iz

$$e_i = 2\pi f M I l k \cdot 10^{-6} \quad (84)$$

a za dionicu s kosim približavanjem iz

$$e_i = 2\pi f I [M]_A^B l k \cdot 10^{-6}. \quad (85)$$

Jakost struje dozemnog spoja I daje elektroprivredna organizacija, a veličina M dobije se iz tablica, nomograma i dijagrama koje daje CCITT i domaći propisi. Granična vrijednost napona opasnosti prema CCITT iznosi 430 V, odnosno 650 V ako su elektroenergetska postrojenja visoke sigurnosti.

Otporna spregra. Elektromotorna sila uslijed otporne sprege dobije se iz izraza

$$E_{i1} = I_E w Z_E k. \quad (86)$$

Ako vod ima i svoj vlastiti izvor napajanja, dobije se iz izraza

$$E_{uk} = \sqrt{E_{iz}^2 + E_{i1}^2}. \quad (87)$$

Zračenje elektromagnetskih valova. Elektroenergetska i telekomunikacijska postrojenja nikad se ne grade na tako malom međusobnom razmaku da bi došlo do rizika opasnosti, pa nije potreban proračun.

Proračun smetnji

Elektrostatička indukcija. Granična vrijednost za psometrijsku elektromotornu silu iznosi 1 mV. Za razliku od stranog napona kojemu je efektivna vrijednost dana kao $U_F = \sqrt{\sum_{f=1}^n U_f^2}$, smetnja se u prijenosu govornih informacija izražava psometrijskim naponom između dva vodiča nekog voda u bilo kojoj točki telekomunikacijskog sustava, a dana je izrazom

$$U_p = \frac{1}{p_{800}} \sqrt{\sum (p_f U_f)^2}, \quad (88)$$

gdje je U_f izmjerena komponenta napona frekvencije f koji uzrokuje elektroenergetski vod, a p_f faktor težine koji se pridaje toj frekvenciji $p_{800} = 1000$. Vrijednost psometrijske elektromotorne sile e_{p1} na krajevima zračnog voda zatvorenoga s obje strane, s karakterističnim impedancijama, kad je normalni režim rada, računa se (u mV) iz izraza ($f' = 800$ Hz):

$$e_{p1} = 2\pi f' U_{Pe} C_{NS} l \sqrt{600 Z} \cdot 10^{-6} \quad (89)$$

odnosno kad je jedan vodič elektroenergetskog voda u spoju sa zemljom, iz izraza

$$e_{p1} = 2\pi f' U_{Pr} C_{ES} l p' q \sqrt{600 Z} \cdot 10^{-6}. \quad (90)$$

Tu se javlja U_{Pe} i U_{Pr} , ekvivalentni napona smetnji elektroenergetskog voda $\frac{1}{p_{800}} \sqrt{\sum (k_f p_f V_f)^2}$ koji odgovara uravnoteženim komponentama (U_{Pe}), odnosno preostalom naponu (U_{Pr}). Taj napon predstavlja napon frekvencije 800 Hz kojih bi komponente, kad bi djelovale umjesto pripadnih istih komponentata elektroenergetskog voda, prouzrokovale istu smetnju u telekomunikacijskom govornom krugu na susjednom telekomunikacijskomvodu. (Veličine U_{Pe} , U_{Pr} , k_f , C_N i C_{ES} vidi u materijalima CCITT). Kad je promatrani telekomunikacijski vod nesimetričan, psometrijska elektromotorna sila (u mV) dobije se iz izraza

$$e_{p2} = U_p \lambda_e \quad (91)$$

gdje je U_p ponderirani (frekvencijski vrednovan) napon (u V), a λ_e (u $\frac{mV}{V}$) faktor osjetljivosti prema elektrostatičkoj indukciji (vidi CCITT):

$$U_p = U_{Pr} g_r n \cdot 10^3 \quad (92)$$

u kojemu je g_r iz (52) i faktor n iz (32).

Elektromagnetska indukcija. Prema nekim autorima ekvivalentna struja u simetričnom krugu trofaznog elektroenergetskog

voda redovito ne inducira psofometrijsku elektromotornu silu osim u sasvim izuzetnim slučajevima (velika duljina paralelizma i mali međusobni razmak). Taj se iznos (u mV) dobije iz izraza

$$e_{p1} = \sqrt{\frac{600}{Z_n}} I_{Pc} Z_c^{II} l' \cdot 10^{-3} \quad (93)$$

gdje je Z_n karakteristična impedancija kruga, $I_{Pc} = \frac{1}{P_{800}} \sqrt{\Sigma(k_f p_f I_f)^2}$ ekvivalentna struja smetnje, a $Z_c^{II} = \omega M_{ES}$ impedancija sprege (dalje v. tablice CCITT).

Za efekte zbog nesimetrije telekomunikacijskog voda uzima se u obzir izraz

$$e_0 = I_{Pc} Z_c^I l k \quad (94)$$

gdje je Z_c^I impedancija sprege (ωM_{NC}), l računski duljina telekomunikacijskog voda, a k redukcijски faktor koji uzima u obzir kompenzacijsko djelovanje uzemljenih metalnih dijelova.

Ako se promatra elektroenergetski vod u normalnom pogonu i efekt preostale struje, tada je

$$e_{p1} = \sqrt{\frac{600}{Z_n}} I_{Pr} Z_r^I l' k \cdot 10^{-6} \quad (95)$$

gdje je $Z_r^I = \omega M_{ES}$ (v. tablice CCITT), a ostale su veličine već definirane. Slično kao i ranije za psofometrijsku elektromotornu silu koja je rezultat nesimetrije telekomunikacijskog voda uzima se u obzir izraz

$$e_{p2} = \lambda_m e_0 \cdot 10^{-3} \quad (96)$$

gdje je λ_m koeficijent osjetljivosti za elektromagnetsku indukciju (mV/V).

Odvojeno se, s obzirom na smetnje, promatraju telefonski i telegrafski vodovi. U posljednje se vrijeme osim lokomotiva s diodnim ispravljanjem na željeznici uvode lokomotive s tiristorskim ispravljanjem. Tada su smetnje bitno povećane. Istraživanja tog fenomena u našim uvjetima su u toku.

Djelovanje korone. U praktičnom proračunu (za utjecaj na prijamnu obalnu radio-stanicu Rijeka) upotrijebljeno je šest empiričkih izraza spomenute radne grupe. Najbolji sklad rezultata mjerenja i proračuna dala je metoda ENEL (Italija). Ta metoda pretpostavlja da promatrani vod i referentni vod imaju iste klimatske uvjete i iste uvjete površine vodiča. Izraz ima oblik

$$E = 47 + 3,8(g_{moy} - 15) + 40 \log \frac{d}{5} + 10 \log n + 30 \log \frac{20}{D} + E_r + E_q, \quad (97)$$

gdje je g_{moy} prosječni gradijent, d promjer vodiča u cm, n broj vodiča u snopu, D radijalni razmak u m, f frekvencija u MHz, $E_r = 20 \log \frac{1 + 0,5^2}{1 + f}$, a $E_q = \frac{q}{300}$ daje ovisnost o nadmorskoj visini q .

Rezultati mjerenja pokazali su da je razina smetnji unutar referentnih razina koje je dala spomenuta radna grupa. Uočeno je da je na udaljenosti od 100 m razina smetnji pala na razinu normalnog šuma.

Razina smetnji. Dopuštena razina smetnji ovisi o prihvatljivom odnosu signal—šum. Do sada nema niti međunarodnih niti domaćih preporuka za dopuštenu razinu smetnji. Vrlo je teško povezati razinu smetnji izraženu decibelima i osjećaj nelagodnosti koji čovjek ima kad takvu smetnju sluša ili gleda. Vrlo su rijetke zemlje koje imaju to regulirano. Npr. propisi u Kanadi dozvoljavaju u frekvenzijskom području 0,54...1,6 MHz razinu smetnji od $27 \frac{\text{dB}}{\mu\text{Vm}}$, mjereno direktno ispod visokonaponske linije, odnosno $42 \frac{\text{dB}}{\mu\text{Vm}}$ za rijetko naseljena područja. Čehoslovački propisi ograničavaju razinu smetnji na $40 \frac{\text{dB}}{\mu\text{Vm}}$ na

poprečnoj udaljenosti 30 m od linije, za frekvenciju 0,5 MHz. Prema švicarskim propisima razina smetnji na poprečnoj udaljenosti 20 m i pri $f = 0,5$ MHz ne smije prijeći vrijednost od $44 \frac{\text{dB}}{\mu\text{Vm}}$. Ranije je naglašeno da se efekti od pojedinih utjecaja geometrijski zbrajaju.

Postupci zaštite

Ako se iz tehničkih, ekonomskih ili eksploatacijskih razloga ne može postići takav izbor trase elektroenergetskog voda koja bi u cijelosti osigurala da efekti utjecaja ostanu u prihvatljivim granicama, trasu treba dodatno zaštititi. Smanjenje utjecaja može se postići na elektroenergetskom postrojenju smanjenjem međusobnih sprege između telekomunikacijskog i elektroenergetskog postrojenja i dodatnom zaštitom na telekomunikacijskom postrojenju.

Opasnost. Radi smanjenja rizika opasnosti na elektroenergetskim vodovima primjenjuje se zaštitno uzemljeno uže, smanjuje se otpor uzemljenja elektroenergetskog postrojenja i konačno se pristupa kabliiranju elektroenergetskih vodova u gradovima. Međusobne sprege će se smanjiti ako se prilikom projektiranja trasa odabere tako da duljina paralelizma bude što kraća, a međusobni razmak što veći. Telekomunikacijsko postrojenje može se mnogostruko zaštititi. U prvom redu treba se paziti na što bolju simetričnost telekomunikacijskih postrojenja. Odvodnici prenapona postavljaju se između vodiča telekomunikacijskih vodova i zemlje. Takva je zaštita djelotvorna pri kratkotrajnim pojavama prenapona kojih iznosi prelaze iznose napona na koje odvodnici reagiraju. Pad napona između telekomunikacijskog vodiča zaštićenog odvodnikom prenapona i udaljene zemlje utvrđuju nacionalni propisi o zaštiti (v. i CCITT). Nadalje se utvrđuje broj i raspored odvodnika. Ako je inducirana elektromotorna sila u granicama $0 < e_i < 430$ V, nisu potrebne dodatne zaštite. Razdvojni transformatori primjenjuju se za završavanje telekomunikacijskog kruga i za sekcioniranje ugroženog dijela telekomunikacijskog voda na dionice gdje e_i neće prijeći 430 V. Redukcijski transformatori mogu znatno povećati induktivnu komponentu impedancije kablenskog plašta, čime se postigne znatno povoljniji redukcijски faktor. Primjenom transformatora za neutralizaciju mogu se znatno kompenzirati uzdužne elektromotorne sile, a da se pri tom samo neznatno mijenjaju značajke telekomunikacijskog voda u cijelom frekvenzijskom području prijenosa informacija. Jedna je od najdjelotvornijih zaštita, kad su u pitanju zračni telekomunikacijski vodovi, kabliiranje kabelima primjerene konstrukcije plašta i armature.

Smetnja. U slučaju rizika smetnji potrebno je provjeriti izvor smetnji da li zadovoljava tehničke uvjete u tom pogledu (ili treba primjerice ugraditi filtre na vodove koji napajaju ispravljače). U telekomunikacijskim se vodovima od niskofrekventnog prelazi na visokofrekventni prijenos. Nadalje se kabliiraju vodovi s primjerenom konstrukcijom plašta i armature. Zatim se mogu upotrijebiti kompendori, povišenje razine korisnog signala te drugi postupci zaštite koje predviđaju nacionalni propisi. Posebnu pažnju treba posvetiti nacionalnim propisima o zaštiti kako bi se postigla takva zaštita koja odgovara uvjetu optimalnosti, tj. da se uz minimalnu cijenu postigne potrebna sigurnost za osoblje i postrojenja te prihvatljiva razina smetnje u prijenosu informacija.

LIT.: F. Pollaczek, Über das Feld einer unendlich langen wechsellstromdurchflossenen Einfachleitung. Elektrische Nachrichten, Nr. 3, Berlin 1926. — J. R. Carson, Wave propagation in overhead wires with ground return. Bell System Technical Journal, No. 5, American telephone and telegraph Co., New York 1926. — H. R. J. Klewe, Interference between power systems and telecommunication lines. E. Arnold, London 1958. — CCITT, Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electricity lines. UIT, Genève 1963. — V. Matković, I. Plačko, Međusobna udaljenost objekata telekomunikacija i visokog napona s obzirom na potencijalni lijevak. Elektrotehnički fakultet, Zagreb 1968. — B. Stefanini i sur., Utjecaj vodova visokog napona na telekomunikacione vodove. Elektrotehnički fakultet, Zagreb 1973. — CCITT, Green Book, Vol. IX, Protection. UIT, Genève 1973. — JUS N.CO.101, 102 i 103, Zaštita telekomunikacionih postrojenja od utjecaja smetnji elektroenergetskih postrojenja (nacr.). Beograd 1978.