

Digitalno simuliranje električnog udara istosmjernog i izmjeničnog napona na impedancijskom modelu ljudskog tijela

Ivica Bašić, Aleksandar Včev i Dražen Lung

Izvorni znanstveni rad
U D K 616.12-085:615.84
Prispjelo: 15. prosinca 1990.

Klinika za unutrašnje bolesti Opće bolnice Osijek i Elektrotehnički fakultet Osijek

U ovom je članku obrađen impedancijski model ljudskog tijela i fiziologija električnog udara na personalnom računalu, što do sada nije opisano u dostupnoj literaturi. Kao što je iz literature poznato, postoje vrlo velike poteškoće u određivanju električnih parametara kojima nadomještamo pojedine dijelove tijela, kako s obzirom na specifičnost svake ljudske jedinice, tako i na uvjete okoline za koje su parametri određeni. Budući da za takva eksperimentalna istraživanja ima dosta poteškoća, u radu je rađeno

simuliranje na personalnom računalu na impedancijskom modelu, uz srednje vrijednosti parametara iz literature (8,10). Dobiveni rezultati imaju vrlo veliku podudarnost s eksperimentalnim rezultatima. Simuliranje dokazuje puno veću štetnost izmjeničnog napona i posebno pokazuje kolike se struje i naponi javljaju u okolini srca i na samom srcu, jer je ventrikularna fibrilacija srca jedan od najopasnijih popratnih pojava strujnog udara.

Ključne riječi: digitalno simuliranje, fibrilacija srca, impedancija tijela, strujni udar

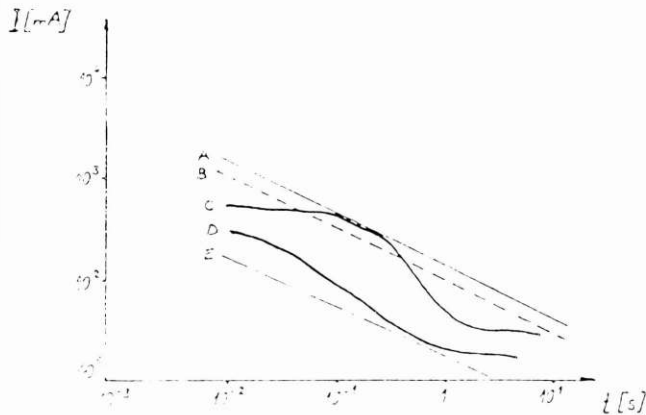
Električni udar koji se sve češće javlja u današnje vrijeme, još uvijek nije jednoznačno razriješen. Najveći dio podataka za rješavanje ovog problema prikupljen je na temelju pokusa na životinjama, a samo vrlo mali dio obavijesti dobiven je analizom slučajeva usmrćenja i ranjavanja ljudi električnom strujom i eksperimentiranjem na ljudskim leševima. Sve dosadašnje spoznaje, dakle, osnivaju se na interpolacijama i ekstrapolacijama podataka dobivenih iz tih pokusa. Ustanovljeno je da posljedice djelovanja električne struje na čovjeka ovise o putu protjecanja struje kroz tijelo, odnosno organu koji je zahvaćen protjecanjem struje, obliku i frekvenciji struje, kao i jačini i vremenu trajanja protjecanja struje.

Fiziologija električnog udara vrlo je kompleksan problem jer postoji jako puno varijabli s vrlo malo konstanti. Glavni je problem impedancija tijela koja ulazi u strujni krug, a ona se znatno mijenja s okolnostima strujnog udara, kao što su narinuti napon, vrijeme protjecanja struje, osjetljivost izložene osobe, što u sva-

kom slučaju ovisi o dobi, zdravstvenom stanju i spolu osobe. Ove parametre na različite načine uzimaju IEC i IEEE standardi, tako da dolazi do različita pristupa pojmu impedancije tijela (privedni otpor kojim se tijelo »bori« protiv narinutog napona). IEC-propisi, za razliku od IEEE-propisa, uzimaju naponsku ovisnost impedancije tijela, kao i utjecaj puta kojim struja protječe kroz tijelo. IEEE-propisi, koji se uglavnom osnivaju na istraživanju C.F. Dalziela, smatraju struju fibrilacije funkcijom težine tijela, dok IEC-propisi težinu tijela ne smatraju faktorom sa znatnijim utjecajem na struju fibrilacije (4, 8, 10).

Slika 1. prikazuje vremensku ovisnost struje fibrilacije prema rezultatima koji su dobiveni u UL (United Laboratories), CPSC (Consumer Product Safety Commission) i istraživanjima C.F. Dalziela, prikupljenih u Americi, IEC kriterijima (10).

IEC-propisi također razlikuju početnu i normalnu impedanciju tijela koja je u svezi s prijelaznom pojavom



SLIKA 1.

Ovisnost struje fibrilacije o vremenu prolaska struje kroz tijelo

- A- C.F. Dalziel (čovjek od 80 kg)
- B- C.F. Dalziel (čovjek od 59 kg)
- C- IEC-izvještaj 479, I dio
- D- UL/CPSC (dijete 8,4 kg)
- E- C.F. Dalziel (dijete 8,4 kg)

FIGURE 1.

Fibrillation current and the time of electrical current passing through the skin

- A- C.F. Dalziel (80 kg – heavy man)
- B- C.F. Dalziel (59 kg – heavy man)
- C- IEC – report 479, I part
- D- UL/CPSC (8.4 kg – heavy child)
- E- C.F. Dalziel (8.4 kg – heavy child)

kapacitivne naravi, čije će pojedinosti biti iznijete poslije.

IEC i IEEE propisi također definiraju prag napona (dodirni napon) i struje fibrilacije za različito vrijeme trajanja strujnog udara. Na primjer, IEEE-propis za vrijeme trajanja strujnog udara od 60 ms definira prag napona i struje fibrilacije 474 V, odnosno 474 mA, za trajanje strujnog udara 1s 116 V, odnosno 116 mA, a za trajanje strujnog udara 5,4 s napon fibrilacije 50 V i struju fibrilacije 50 mA. Vidljiv je drastičan pad napona fibrilacije s produženjem trajanja strujnog udara. U radu se također pokazuje da postoji razlika u pragu napona i struje fibrilacije za istosmjernu i izmjeničnu struju, što je logično zbog kapacitivnog karaktera impedancije kože. Prolaskom električne struje kroz živi organizam oslobađa se stanovit dio energije, što može imati dvije posljedice:

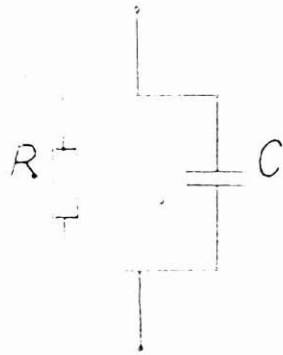
- privremenu modifikaciju fiziologije organa ili cijelog organizma što se očituje kao uzbuđenost ili zakočenost (grč),
- termičke efekte čija je osnovna jačina definirana Joulovim zakonom.

Ovaj rad daje analizu raspodjele električne struje u tijelu za različite strujne putove. Dakle, zanimljiva nam je struja koja prolazi kroz tijelo, a napose struje i naponi u području srca. Kao što je i navedeno u literaturi (7), struje jakosti do 1mA izazivaju blage kontrakcije muskulature, struje od 5-15 mA izazivaju grčenje, ali je još moguće spontano ispuštanje ako se radi o rukama, izmjenične struje od 25 mA, a istosmjerne od oko 80 mA izazivaju tetaničke grčeve i nemogućnost ispuštanja kontakta. Izmjenične struje iznad 50 mA, (istosmjerne 80-300 mA) redovito uzrokuju nagli zastoj srca, koji je uglavnom povratan. Struje od 3-5 A u trajanju od samo 0,3 ms izazivaju srčanu fibrilaciju. Da bi se mogla simulirati bilo kakva električna pojava u ljudskom organizmu, prijeko je potrebno odrediti ekvivalentnu impedancijsku shemu koja nije jednoznačno određena čak ni za svakog čovjeka (ovisi o temperaturi, vlažnosti kože, raspoloženju i drugom).

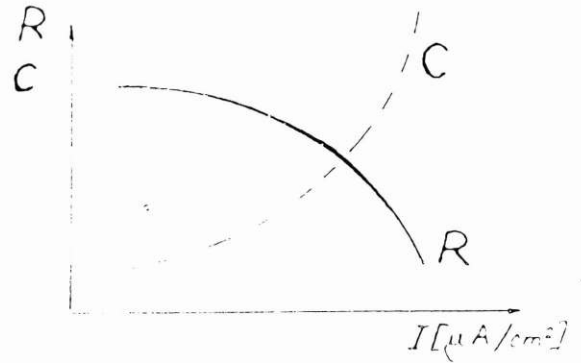
Impedancija tijela

Impedancija ljudskog tijela određena je s nekoliko faktora, od kojih je primaran otpor kože koji je u većini slučajeva i dominantan, jer je njegova vrijednost mnogo puta veća od ukupne vrijednosti unutrašnjeg otpora tijela dobivenog serijsko-paralelnom kombinacijom različitih tkiva i krvnih žila unutar tijela. Otpor kože najvećim dijelom čini korneum, koji, nažalost, prilično koleba i može u laboratorijskim uvjetima biti smanjen na vrijednosti usporedive s unutaršnjom impedancijom tijela. Na niskim frekvencijama impedancija tijela uglavnom je otporna, dok na visokim frekvencijama impedancija postaje nelinearna i dobiva kapacitivnu komponentu. Na standardnim frekvencijama (oko 50 Hz) i naponima (oko 200 V) otpor u točkama dodira je glavni limitirajući faktor struje (vlažni kontakti imaju vrlo mali prijelazni otpor koji je najveći dio otpora u strujnom krugu impedancija tijela-naponski izvor) i tada unutarnja impedancija tijela postaje glavni limitirajući čimbenik. Suha koža može imati otpor od 100 do 300 kΩ/cm², dok u slučaju mokre kože otpor može pasti na 1% te vrijednosti. Vrijednost oko 500 uzima se obično kao minimalni otpor ljudskog tijela između glavnih udova, dok se kao normalni otpor uzima oko 1500. Koža kao organ koji se sastoji od 7 slojeva može se predstaviti elektičnim modelom što prikazuje slika 2, gdje je R otpor, a C kapacitet kože. Kao što je već navedeno, otpor kože izrazito koleba i kreće se od 1kΩ do 300kΩ, a kapacitet iznosi desetak μF/cm².

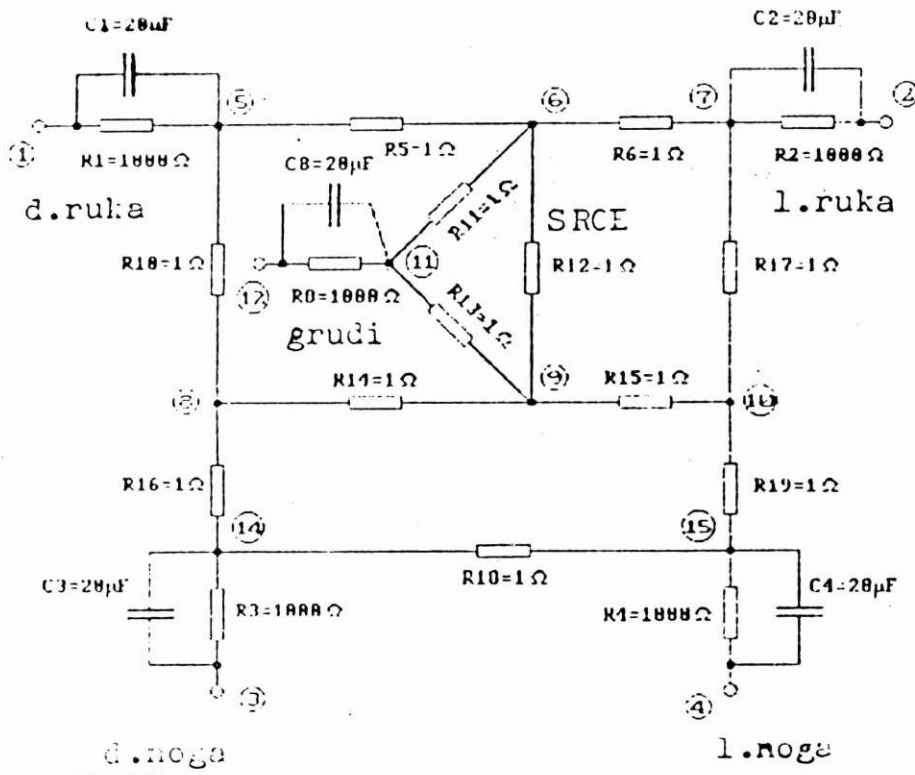
Slika 3. kvalitativno pokazuje kako parametri impedancije kože ovise o struji, odnosno o priključenom naponu. Za razmatranje je njegova ekvivalentna impedancijska shema. Kao najprikladniji model ljudskog tijela pokazao se model na slici 4, koji sadrži nelinearna



SLIKA 2.
Električni model kože
FIGURE 2.
Electrical model of the skin



SLIKA 3.
Ovisnost parametara impedancije kože o struji
FIGURE 3.
Dependence of skin impedance on the electric current



SLIKA 4.
Hipotetička ekvivalentna impedancijska nadomjesna shema za određivanje (procjenu) gustoće struje u blizini srca
FIGURE 4.
Hypothetical equivalent impedancy replacement scheme for the estimation of the current density in the vicinity of the heart

svojstva impedancije ljudskog tijela (kapacitivne i djelatne komponente otpora).

Kao što je već navedeno, otpor kože je nekoliko redova veličine veći od otpora fluida tijela, a otpor kože kreće se oko veličine $1k\Omega$, u modelu su pretpostavljene vrijednosti parametara, kao što je navedeno na slici 4. S obzirom na temperaturu, vlažnost i slično, mijenjanje parametara nije provedeno, a osim toga sve je te varijable praktički i nemoguće uzeti u obzir.

Na ovom hipotetičkom modelu s konstantnim parametrima učinjena je digitalna simulacija procjene gustoće struje u blizini srca, kao i potencijala koji se tada javljaju na srcu.

MATERIJAL I METODE

Digitalno simuliranje strujnog udara

Simuliranje je provedeno na računaru IBM PC-AT s pomoću programa »PSPICE«, koji omogućuje analizu analognih i digitalnih električnih mreža, kao i grafički prikaz te analize (1).

Vrlo jednostavnim mijenjanjem parametara kruga i vrijednosti pojedinih elemenata, pomoću osam analiza koje PSPICE provodi, može se steći potpun uvid u ponašanje strujnog kruga.

Električna mreža zadaje se tako da se svakom čvoru mreže pridruži ime, zatim se za svaki element definiraju njegovi parametri (osnovna vrijednost, vremenska ovisnost, temperaturni koeficijent i slično) i čvorovi na koje je element spojen.

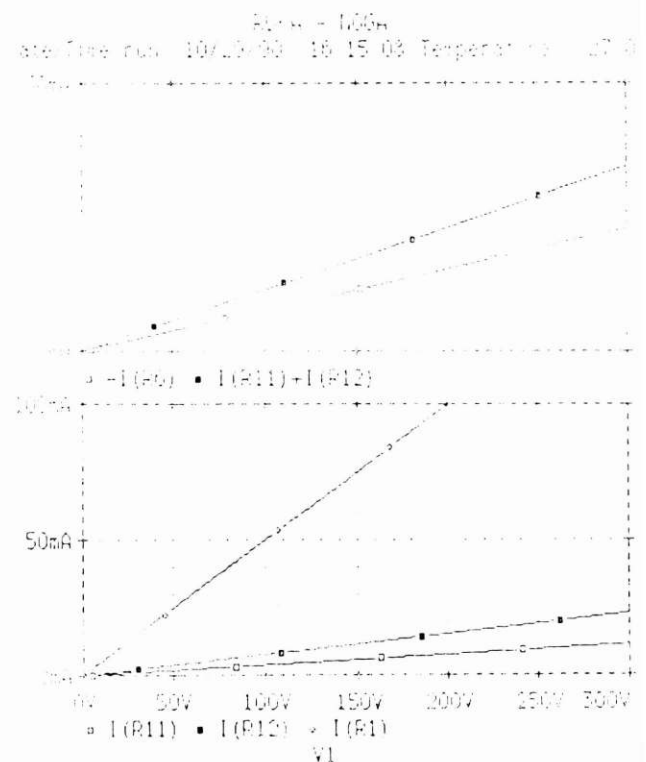
Ovaj hipotetički model ljudskog tijela je jednostavna RC-mreža na koju na određene čvorove priključujemo naponski izvor (ovisno koji strujni put želimo simulirati). Zadavanje naponskog izvora ovisi o vrsti analize koja se provodi. Osim čvorova između kojih je izvor spojen, za istosmjernu (DC) analizu navodi se vrijednost istosmjernog napona izvora, a za frekvencijsku (AC) analizu zadaje se faza i amplituda izmjeničnog napona. Ako želimo analizirati ovisnost napona ili struje o vremenu, moramo zadati i vremenski oblik napona (program podržava nekoliko osnovnih oblika: sinusni, pravokutni, pilasti, eksponencijalni). Rješavanje mreže provodi se iteracijskim postupcima s točnošću koja se zada u ulaznim podacima. Program daje potencijale svih čvorova i struje kroz sve grane, a moguć je i grafički prikaz ovisnosti napona između dva čvora o narinutom naponu, frekvenciji, vremenu ili nekom drugom parametru.

REZULTATI

Digitalno simuliranje strujnog udara istosmjernim naponom

Simuliranje strujnog udara na impedancijskom modelu sa slike 4. provedeno je za dva slučaja: strujni udar ruka – noga i obje ruke – obje noge. Za ova dva slučaja izračunate su struje i naponi koji se javljaju na samom srcu i oko srca. Na slikama 5 – 7. prikazani su grafički naponi i struje koje se javljaju u čvorovima, odnosno granama kao što je označeno.

Iz dijagrama na slikama 5. i 6. vidimo da se na srcu i oko srca javljaju struje i naponi koji mogu uzrokovati grčenje mišića 3, 7, (potencijali koji se javljaju su reda veličine akcijskih potencijala srca) i oni su glavni uzroci zastoja srca prilikom srčanog udara. Pretpostavke, odnosno zanemarenja u ovom hipotetičkom modelu dovele su do malih odstupanja od vrijednosti koje su dobivene mjerenjem. Ali, budući da je praktički nemoguće točno modelirati parametre ovog hipotetičkog modela i uzeti u obzir sve što može utjecati na promjenu parametara, dobiveni rezultati imaju prihvatljivu točnost. Na slikama 5 – 7. prikazano je stacionarno stanje strujnog udara s pretpostavkom svih konstan-

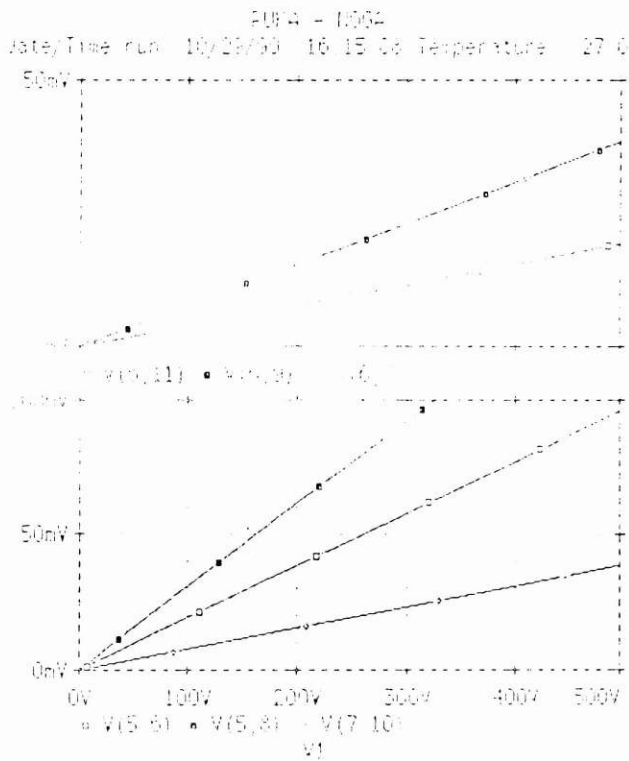


SLIKA 5.

Ovisnost struje u okolini srca o priključnom naponu između ruke i noge

FIGURE 5.

Relationship of the current in the vicinity of the heart and the connecting potential between the arm and the leg

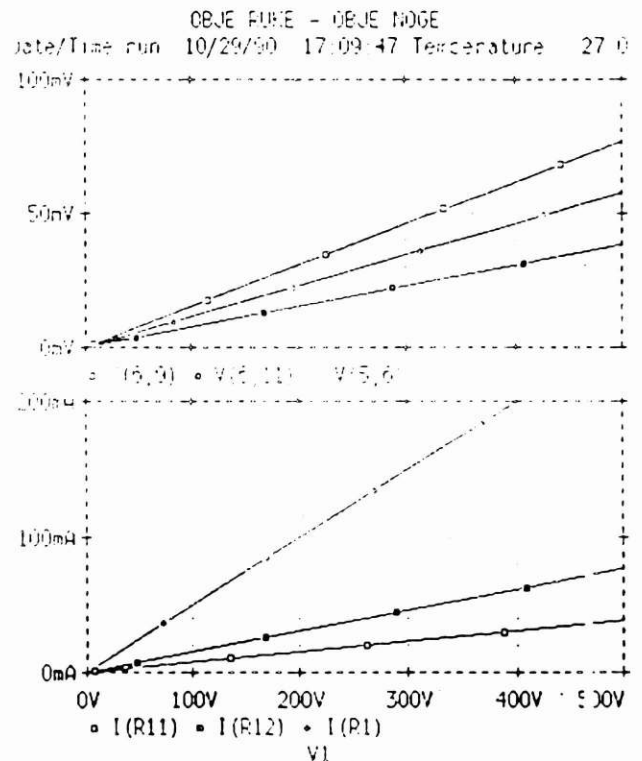


SLIKA 6.

Ovisnost napona čvorova sa slike 4. o narinutom naponu između ruke i noge

FIGURE 6.

Relationship of the potential knots (Fig. 4) and the forced potential between the arm and the leg



SLIKA 7.

Ovisnost napona i struja sa slike 4. o narinutom naponu obje ruke - obje noge

FIGURE 7.

Relationship between the potential and current from Fig. 4 and the forced potential between both arms and legs

tnih parametara, koji u stvarnosti nisu konstantni, kao što je već navedeno u tekstu.

Na slici 7. možemo vidjeti da su za slučaj udara struje od obje ruke i obje noge vrijednosti struje i napona nešto veće nego za prethodni slučaj (slike 5. i 6.), što je i logično (ukupna impedancija strujnog kruga u ovom slučaju je manja, jer sada postoje strujni putovi kroz obje ruke i obje noge, koji su spojeni paralelno).

Digitalno simuliranje strujnog udara izmjeničnim naponom

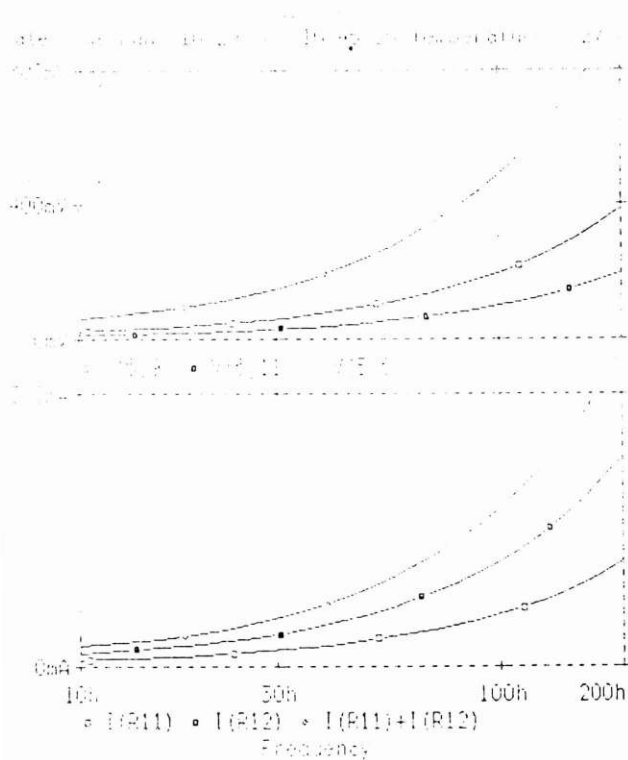
Analiza ovog slučaja provedena je za izmjenični napon sinusnog oblika od 200 V u frekvenzijskom rasponu od 10 Hz do 200 Hz. Uočljiv je drastičan porast struja i napona grana, odnosno čvorova u odnosu na isti, narinuti, istosmjerni napon. Uzrok tome je kapacitivno svojstvo impedancije kože, tako da impedancija kože opada s porastom frekvencije i ukupna struja kroz tijelo postaje znatno veća.

Slika 9. prikazuje istu ovisnost na strujni udar s obje ruke i na obje noge.

Na slikama 8. i 9. vrlo je zanimljivo usporediti napone između čvorova 5 i 6 V (5,6). Prije svega, ovdje je potrebno napomenuti da je simuliranje strujnog udara jedna ruka i jedna noga rađeno za desnu ruku i desnu nogu. U prvi mah čini se nelogično da je napon V (5,6) na slici 9. znatno manji, ali ako se malo analiziraju strujni putovi, vidi se da je u slučaju na slici 8. znatno veća gustoća struje s desne strane tijela.

RASPRAVA

Iz grafičkih prikaza simulacije vidljivo je da je izmjenični napon puno opasniji (uz isti narinuti napon u blizini srca imamo veću struju, i to izmjeničnu, koja je opasnija od istosmjerne (7), da se pri naponima koji se smatraju opasnim (istosmjerni oko 150 V, a izmjenični već na oko 50 V (8), javljaju na srcu i u njegovoj blizini struje, koje mogu izazvati grčenje srčanog mišića, odnosno fibrilaciju ventrikula (kontraktcija srca kojom ono prati frekvenciju električne struje). Vrlo važan nam je i podatak da se na srcu javljaju naponi koji su reda veličine akcijskih potencijala srca, a to je zapravo i



SLIKA 8.

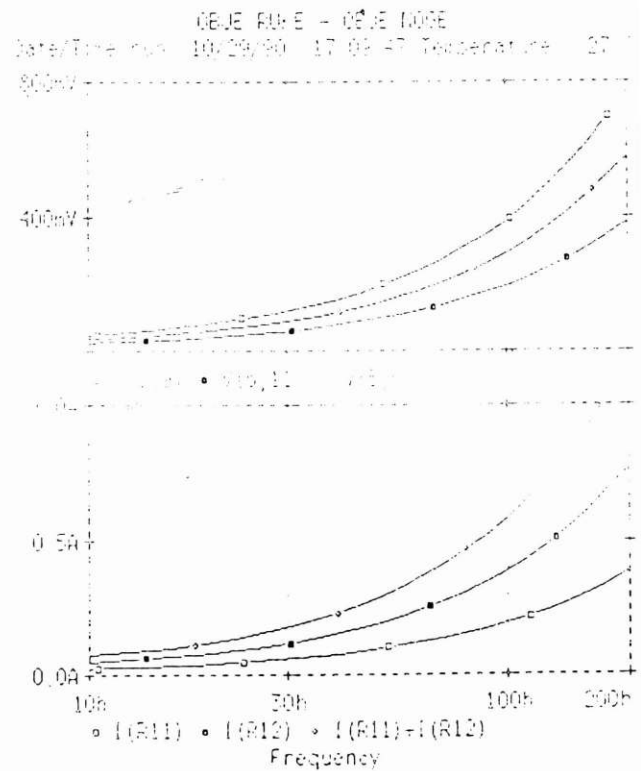
Ovisnost napona i struje čvorova, odnosno grana na slici 4. o frekvenciji narinutog izmjeničnog napona na jednu ruku i jednu nogu

FIGURE 8.

Relationship between the potential and current of the knots or branches from the Fig. 4 and the frequency of the forced alternating potential between one arm and one leg

glavni razlog zbog kojega dolazi do fibrilacije, odnosno do zastoja srca. Glavni razlog veće opasnosti izmjeničnog napona je kapacitivno impedancijsko svojstvo kože, koje dolazi do izražaja već pri industrijskim frekvencijama. Nadalje, iz rezultata simulacije možemo zaključiti da je impedancija kože glavni čimbenik koji utječe na impedanciju tijela (strujnog puta) i da bi smanjivanjem otpora kože (npr. vlaženjem) u tijelu dobili za organizam puno nepovoljnije strujno-naponske prilike.

Kao što je u radu već navedeno, zbog nemogućnosti egzaktnog određenja parametara, rezultati su se morali prikazati vrlo uopćeno. U literaturi (8,10) navedeni su rezultati pokusa na životinjama i neki pokusi na ljudima, s kojima ovi rezultati, dobiveni simuliranjem, imaju veliku podudarnost. Ovdje je dan jedan sasvim nov pristup takvom problemu, puno jednostavniji od eksperimentalnog, koji daje sasvim zadovoljavajuće rezultate i otvara nov pristup istraživanju različitih električnih pojava na ljudskom tijelu.



SLIKA 9.

Frekvencijska ovisnost napona čvorova, odnosno grana pri narinutom izmjeničnom naponu 200 V na obje ruke i obje noge

FIGURE 9.

Relationship between the potential of the knots or branches and the frequency of the forced alternating potential (200V) between both arms and legs

LITERATURA

1. A Guide to Circuit Simulation and Analysis Using PSpice, Prentice Hall; ISBN 0-13-834607-0.
2. Biegelmeier G. New Knowledge on the Impedance of the Human Body, Proceedings of the First International Symposium on Electrical Shock Safety Criteria, 115-32.
3. Bridges JE. Body Impedance of non-human Primates under Constant Voltage Shock Conditions. Proceedings, 133-50.
4. Bridges JE, Vainberg M, Wills MD. Impact of recent developments in biological electrical shock safety criteria. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWED-2, 1987; 238-48.
5. Freiberger H. Der elektrische Widerstand des menschlichen Körpers gegen technischen Gleich- und Wechselstrom, Berlin, Verlag Julius Springer, 1934.
6. Gamulin S, Marušić M, Krvavica S. Patofiziologija, 1. izd. Zagreb, Jumea 1988; 651-5.
7. Medicinska enciklopedija, Jugoslavenski leksikografski zavod, svezak 2, 1967; 310-3-
8. Petričić Ž. Analiza djelovanja električne struje na čovjeka s osvrtom na principe zaštite u elektroenergetskom postrojenju. Diplomski rad, Elektrotehnički fakultet Osijek, 1987.

-
9. Pravilnik o zaštiti od električnog udara za elektroenergetska postrojenja do 1KV, JUS N.B2 741/1986, Službeni list SFRJ 9/86.
10. Proceedings of the First International Symposium on Electrical Shock Safety Criteria, Toronto, 1983.
-

Abstract

DIGITAL SIMULATION OF AN ELECTRIC SHOCK PERFORMED BY A DIRECT AND ALTERNATING CURRENT UPON THE IMPEDANCE MODEL OF HUMAN BODY

Ivica Bašić, Aleksandar Včev and Dražen Lung

Clinic of Internal Diseases, General Hospital Osijek and Electrotechnical Faculty Osijek

In this study a model of the human body impedance and electric stroke physiology were elaborated on a personal computer. Until now this phenomenon has not been described in literature. It is known from literature that it is very difficult to determine electric parameters by which single parts of the body could be replaced, because of a high specificity of every human being as well as due to environmental

conditions for which the parameters are determined. In this study, on the personal computer, the impedance model was simulated by mean levels of the parameters taken from literature. The results obtained were consistent with experimental results, and the approach to the problem was simplified. The simulation showed alternating voltage to be very harmful and pointed to the magnitude of currents and voltages adjacently to the heart, as one of the most dangerous phenomena accompanying electric stroke is ventricular fibrillation of the heart.

Key words: digital simulation, heart electric shock fibrillation, body impedance

Received: 15th December, 1990