

Digitalno simuliranje valnog oblika strujnog impulsa koji se javlja na srcu pri defibrilaciji

Dražen Lung, Aleksandar Včev i Ivica Bašić

Klinička bolnica Osijek i Elektrotehnički fakultet Osijek

Prethodno priopćenje
UDK 616.12:615.22
Prispjelo: 28. travnja 1992.

Pomoću impedancijskog modela ljudskog tijela u radu je analizirana defibrilacija srca. Proces defibrilacije simuliran je na personalnom računalu i dobiven je valni oblik strujnog impulsa koji se javlja na srcu pri defibrilaciji. Analiza je provedena za 2 različita položaja elektroda defibrilatora. Vremenska analiza impulsa defibrilatora na ostalim dijelovima tijela upućuje na postojanje znatnih struja i napona u okolini srca, tako da prilikom rada defibrilacije moramo biti vrlo oprezni. Članak upućuje na nužnost smanjenja prijelaznog otpora između kože i elektroda defibrilatora do najniže moguće granice zbog Džulovih gubitaka koji se tu javljaju.

Vremenska analiza impulsa pokazuje da kapacitivno svojstvo kože također moramo uzeti u obzir, jer znatno utječe na valni oblik impulsa, odnosno na napon koji se javlja na samim elektrodama pri defibrilaciji. Do danas u literaturi nedostupna slična analiza na PC-u, upućuje na mogućnost vrlo jednostavne analize rada tog instrumenta i nužnost njegove dorade.

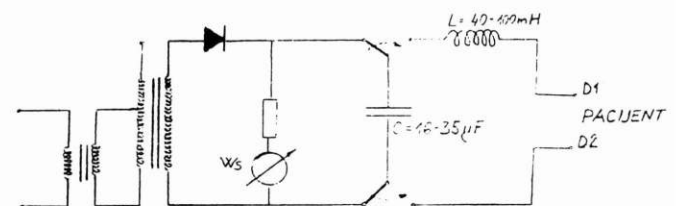
Ključne riječi: defibrilator, strujni impuls, impedancijski model ljudskog tijela.

Nastanak fibrilacije (nepravilnog treperenja srčanih klijetki) uzrokuje za nekoliko minuta smrt zbog prekida krvotoka kroz tijelo i mozak. Prekid fibrilacije može se postići ako se kroz srce pošalje jaka struja kroz kratko vrijeme. Uređaj koji omogućuje takav postupak naziva se defibrilator. To je zapravo vrlo jednostavan uređaj s visokonaponskim kondenzatorom kapaciteta 16-35 μF koji se nabija na napon od 2 do 7 kV. Maksimalna energija koja se ovdje iskorištava iznosi oko 400 Ws i predstavlja zapravo energiju napunjenu u kondenzatoru:

$$E = \frac{U^2 C}{2}$$

Pražnjenje se obavlja preko elektroda koje se prislanjaju izvana na prsa ili izravno na srce, npr. pri operaciji srca. Trajanje izbijanja traje nekoliko ms. Pojednostavljena shema defibrilatora dana je na slici 1. U strujnom krugu izbijanja kondenzatora nalazi se jedna zavojnica, kako bi impuls struje kroz srce dobio oblik kao što je prikazano na slici 3. (mijenjanjem induktiviteta zavojnice dobijamo najbolji fiziološki oblik impulsa). U toku depolarizacije cijeli miokard se kratkotrajno depolarizira s pomoću snažnog jednofaznog strujnog impulsa određena oblika i amplitude i tako se otklanjaju ekto-

SLIKA 1.
Principijelna shema defibrilatora
FIGURE 1.
The basic scheme of a defibrillator



pični centri, koji daju povoda treperenju atrijske i ventrikularne fibrilacije.

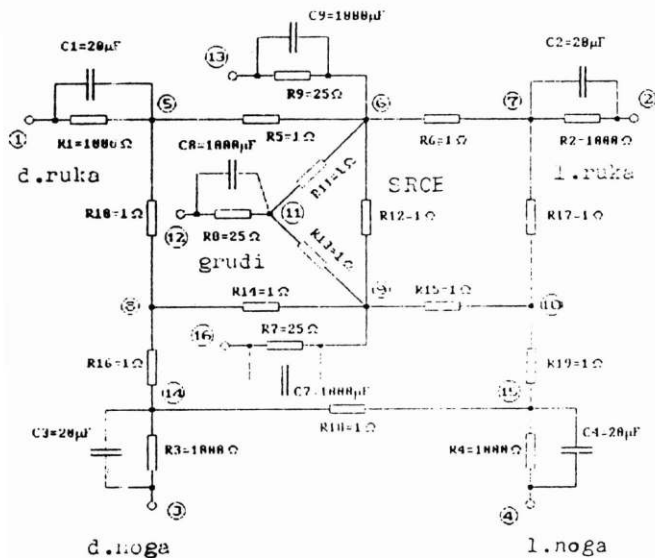
Defibrilator se ne koristi samo za sprečavanje fibrilacije, nego ga možemo koristiti i pri teškim aritmijama, ali tada postoji R-zubac i pražnjenje kondenzatora se mora sinkronizirati s R-zupcem, tako da slijedi odmah iza R-zupca. Sinkronizacija je nužna, jer u slučaju upadanja impulsa u vulnerabilnu zonu može u tom slučaju nastati fibrilacija. Takav sinkronizirani defibrilator, preko sklopa za sinkronizaciju, prazni kondenza-

SLIKA 2.

Hipotetički ekvivalentni impedancijski model ljudskog tijela za simulaciju valnog oblika strujnog impulsa koji se javlja na srcu prilikom defibrilacije

FIGURE 2.

Hypothetical equivalent impedance model of the human body for the purpose of simulation of the wave form of electrical impulse appearing in the heart during defibrillation



tor odmah nakon R-zupca bez obzira na to kada je pritisnut kontakt za pražnjenje. Ovaj rad ima cilj da ustanovi kakav se valni oblik impulsa javlja na srcu prilikom defibrilacije izvana.

MATERIJAL I METODE

Simuliranje defibrilacije na hipotetičkom impedancijskom modelu ljudskog tijela.

Simuliranje je provedeno na impedancijskom modelu na slici 2., koji se pokazao do sada kao jedan od najboljih (6). Zbog vrlo velikog raspršenja parametara od čovjeka do čovjeka, a i ovisnosti parametara o dobi, spolu, temperaturi, vlažnosti i drugome, praktički je nemoguće odrediti točan model koji bi u potpunosti mogao nadomjestiti ljudsko tijelo. Vrijednosti parametara određene su eksperimentalno (2), (3), (6) i u ovom slučaju uzete u statistički najčešće veličine (pretpostavka otpora kože je 1 kΩ, a otpor fluida tijela uzet je za 3 reda veličine manji što u stvarnosti i jest slučaj) (5).

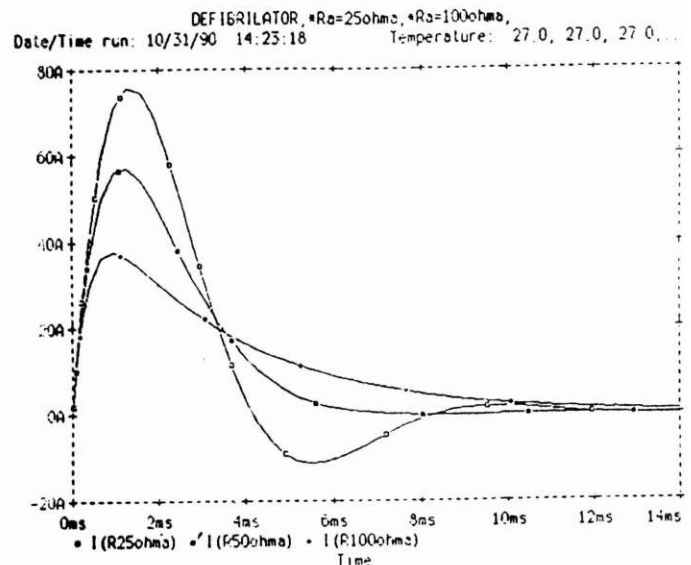
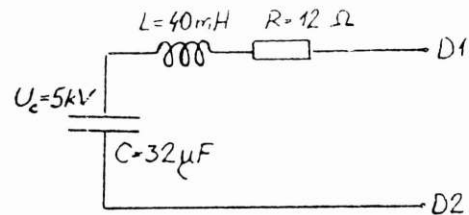
Literatura opisuje veliko smanjenje otpora kože s porastom narinutog napona, kao i ovisnost otpora kože o valnom obliku narinutog napona. Zbog toga je na čvorovima 12, 13 i 16, koji predstavljaju priključke elektroda defibrilatora, pretpostavljen otpor kože 40 puta manji nego na rukama i nogama.

SLIKA 3.

Strujni krug pražnjenja i valni oblik strujnog impulsa defibrilatora gdje je bolesnik predstavljen kao radni otpor od 25, 50 i 100

FIGURE 3.

Electrical circuit of discharging and the wave form of the electrical impulse of the defibrillator. The patient is being supposed as working resistance of 25,50 and 100



Smanjenju tog otpora još pridonosi i krema kojom mažemo elektrode radi što boljeg kontakta.

Kapacitet kože iznosi približno desetak $\mu\text{F}/\text{cm}^2$, a površina elektroda defibrilatora oko 80 cm^2 , pa je za kapacitete preko kojih je spojen defibrilator, s dovoljnom točnošću za simuliranje valnog oblika strujnog impulsa na srcu, uzeta vrijednost $1000\mu\text{F}$.

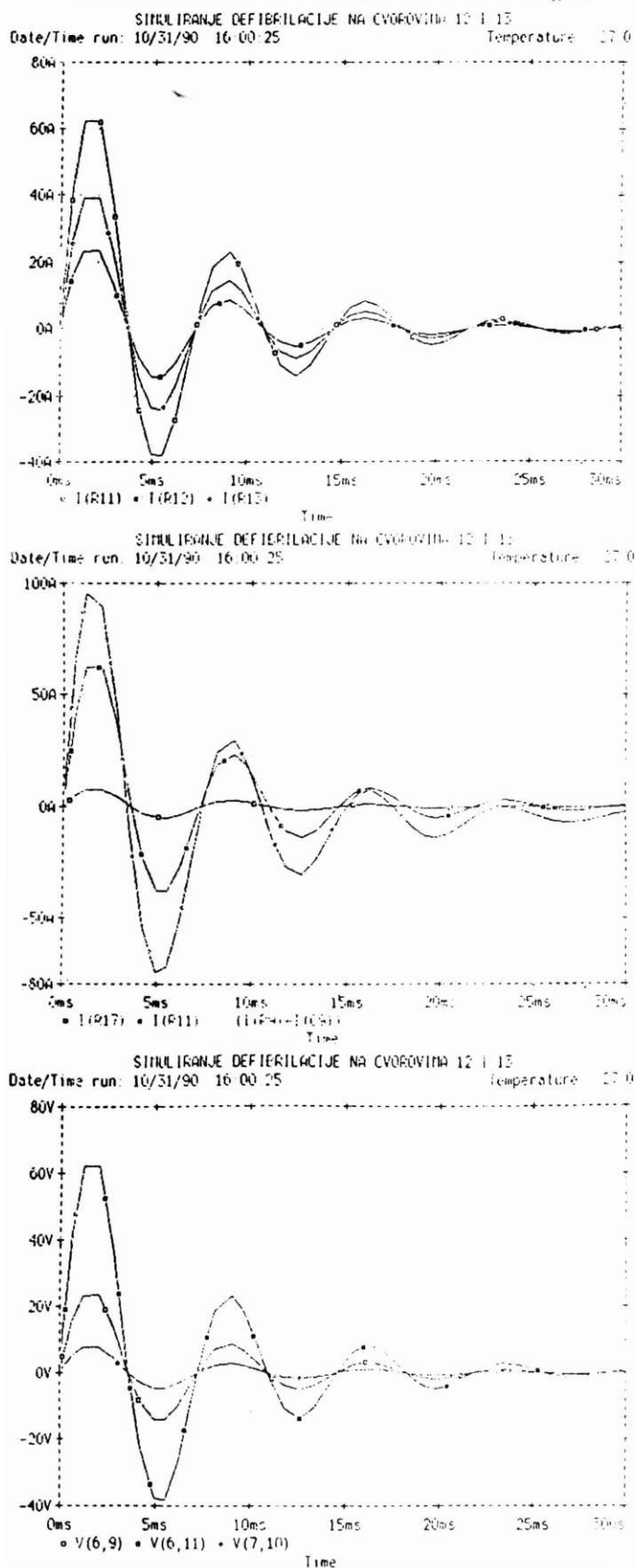
Strujni krug pražnjenja defibrilatora sastoji se od visoko-naponskog kondenzatora $32\mu\text{F}$ koji se nabija na napon od 5 kV, zavojnice induktiviteta 40 mH i radnog otpora 12Ω (8) i impedancije pacijenta koju u strujni krug pražnjenja (izbijanja) kondenzatora priključujemo na čvorove 12 i 13 ili 13 i 16, čime uzimamo u obzir različite položaje elektroda na prsnom košu (anterior-anterior elektrode).

Krivulja pražnjenja kondenzatora odgovara sinusnom poluvalu s aperiodičnim prigušenjem. Trajanje impulsa, kao što je i vidljivo na slici 3., iznosi između 4 i 10 ms, zavisno od impedancije opterećenja (impedancija pacijenta).

SLIKA 4.

Valni oblici struje i napona simuliranjem defibrilacije na čvorovima 12 i 13. (vidi sliku 2)
FIGURE 4.

Wave forms of the current and of the voltage during simulation of defibrillation on knots 12 and 13 (v. Fig. 2)



Simuliranje je provedeno na računaru IBM PC-AT programom »Pspice« koji nam omogućuje analizu analognih i digitalnih električnih mreža kao i grafičku prezentaciju te analize (1). Vrlo jednostavnim mijenjanjem parametara kruga i vrijednosti pojedinih elemenata, pomoću osam analiza koje »Pspice« provodi, možemo steći potpuni uvid u ponašanje strujnog kruga. U ovom slučaju korištena je mogućnost tranzientne analize koja se provodi tako da se najprije nađe statička radna točka, a zatim se sukcesivno mreža rješava iteracijskim postupcima sve dok se ne zadovolje Kirchoffovi zakoni za tu mrežu.

REZULTATI

Simuliranje i usporedba rezultata za dva različita položaja anterior-anterior elektroda

Ako bolesniku uzmemo kao realnu (radnu) otpornost, tada dobivamo krivulje strujnog impulsa kao što su prikazane na slici 3. Budući da kapacitivno svojstvo kože ni u kojem slučaju ne možemo zanemariti, simuliranjem se nastojalo prikazati kako kapacitet kože utječe na valni oblik strujnog impulsa. Najprije je učinjena simulacija preko čvorova 12 i 13 (u ovom slučaju imamo kraći put struje koji prolazi kroz prsa, odnosno kroz srce), a zatim je urađena simulacija preko čvorova 13 i 16 (vidi sliku 2). Na slici 4. a-c vide se rezultati simulacije na čvorovima 12 i 13. Slika koja predočuje napone koji se javljaju na srcu vrlo dobro pokazuje da najveći napon koji se javlja u prsima ne zahvaća čitavo srce (najveći je napon između čvorova 6 i 11), dok u slučaju priključka elektroda defibrilatora na čvorove 13 i 16 (slika 5) vidimo da kroz R 12 protječe najveća struja, a taj otpornik zapravo predočuje središte prsa. Kao što je do sada i praksa pokazala, vidimo da je elektrode potrebno dovoljno razmaknuti, kako bi strujni impuls zahvatio što veći dio prsa, odnosno srca. Napon između čvorova 7 i 10 pokazuje napon koji se javlja u okolini srca, te vidimo da je on samo manji dio napona koji se pojavljuje na srcu. Ovo »rasipanje« strujnog impulsa ni u kom slučaju ne možemo spriječiti, jer ljudski organizam ipak predstavlja jednu realnu cjelinu koju možemo aproksimirati samo mrežom (slika 2).

Ako sada usporedimo valne oblike izbijanja defibrilatora preko realnog otpora (slika 3) i preko ekvivalentnog impedancijskog modela na slici 2, možemo zaključiti da postoji bitna razlika u valnom obliku napona, odnosno struje, ali prvi maksimum amplitude strujnog vala ostaje praktički isti. Razlika proizlazi iz zanemarenja kapaciteta kože, koji pri defibrilaciji nije zanemariv. Na slici 6 prikazani su valni oblici struje i napona uz smanjen kapacitet kože 10 puta. Vidi se da su amplitude strujnih i naponskih valova ne bitno različite, ali prijelazna pojava (oscilacije) kraće traje.

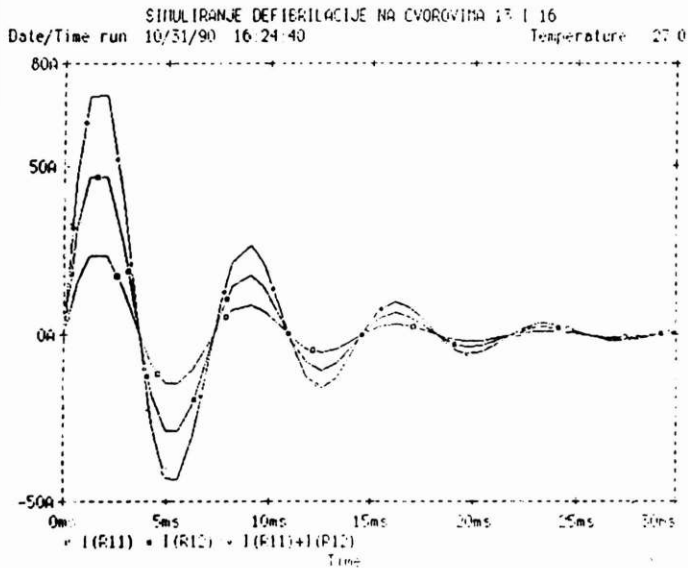
Na slici 7 prikazana je energija koja se predaje paci-

SLIKA 5.

Valni oblici struje i napona prilikom pokusa simulacije na čvorovima 13 i 16 (vidi sliku 2)

FIGURE 5.

Wave forms of the current and of the voltage during simulation on knots 13 and 16 (v. Fig. 2)

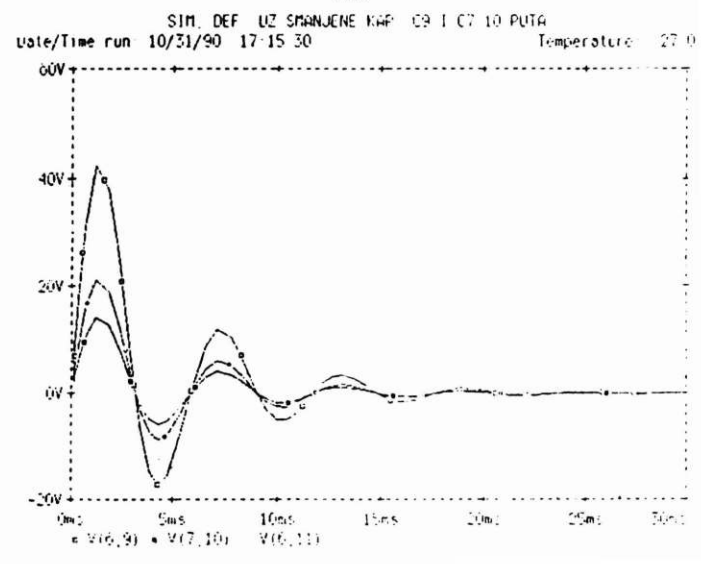
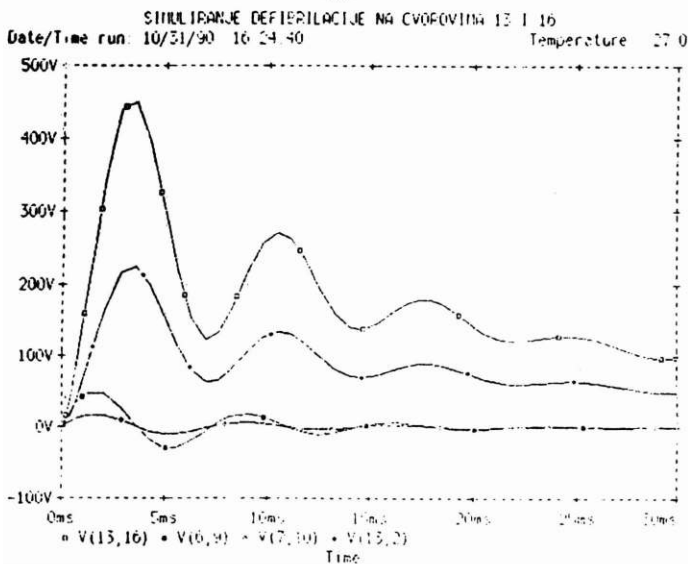
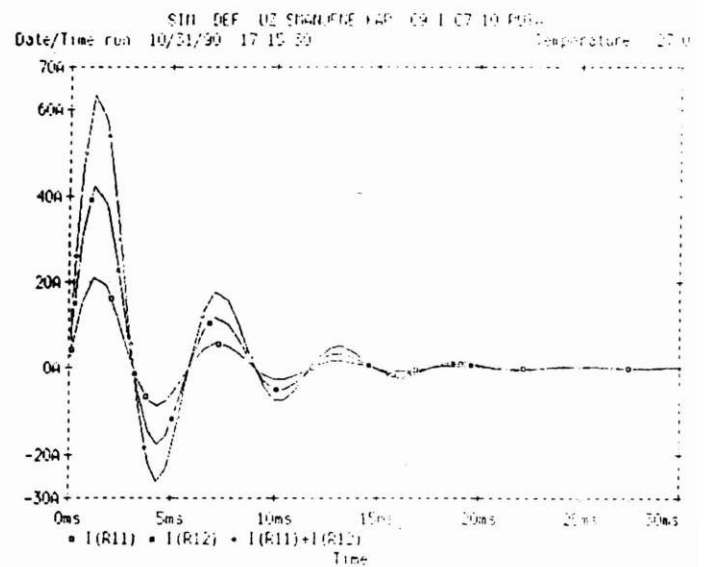
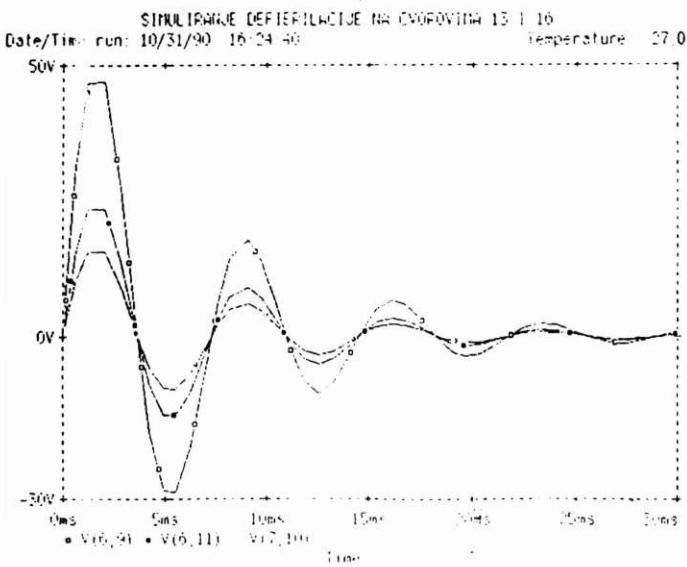
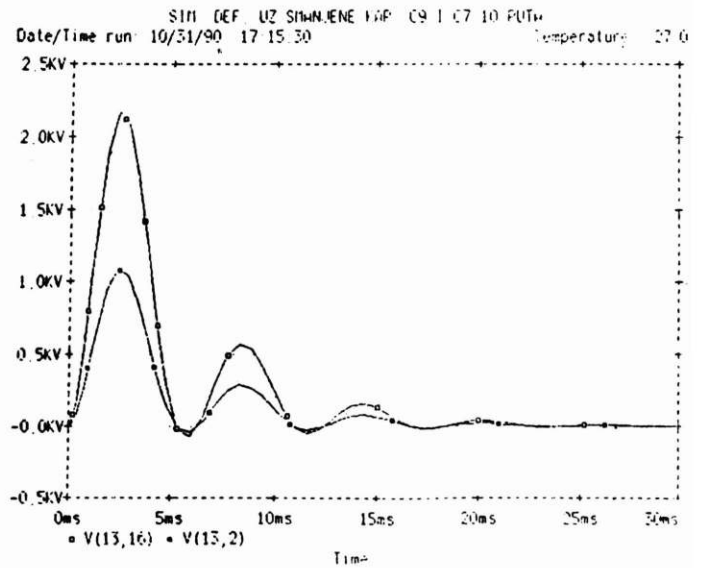


SLIKA 6.

Valni oblici struje i napona uz smanjenje kapaciteta kože 10 puta

FIGURE 6.

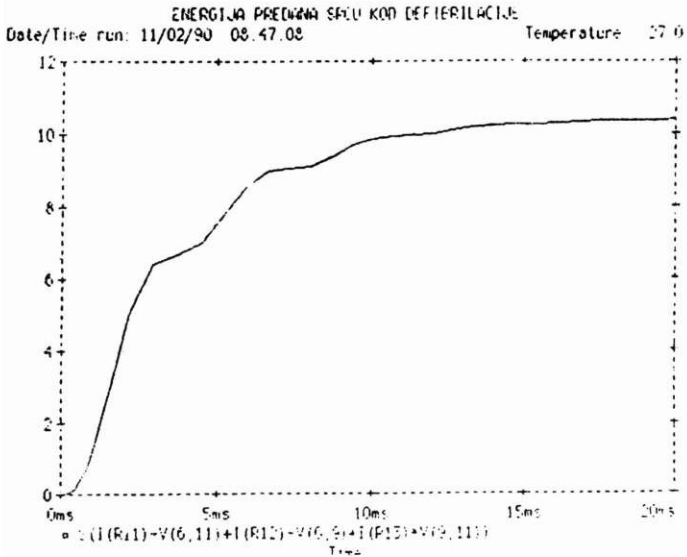
Wave forms of the current and of the voltage with decrease of skin capacitance by 90%



SLIKA 7.
Energija koja se predaje pacijentu u toku defibrilacije u vremenu od 20 ms

FIGURE 7.

The amount of energy transferred to the patient in the course of defibrillation lasting 20 ms



entu u tijeku 20 ms (to je vrijeme u kome se kondenzator gotovo potpuno izbije). To je energija koja je približno jednaka energiji kod defibrilacije na otvorenom srcu. Dakle, ovom simulacijom nastojalo se pokazati kako kapacitet kože utječe na valni oblik impulsa na samom srcu. Strujni krug pražnjenja sa slike 3 svojim je priključcima D1 i D2 bio priključivan na čvorove 12 i 13 ili 13 i 16 (slika 2) i dobiveni su valni oblici sa slika 4, 5 i 6. U odnosu na izbijanje defibrilatora preko realnog otpora, postoji bitna razlika kada izbija-nje vršimo preko impedancije koja puno točnije opisuje pacijenta nego realan otpor.

Kao što je i navedeno, na valni oblik impulsa bitno utječe prigušnica koja se nalazi u strujnom krugu pražnjenja defibrilatora (slika 3). Na slici 8 prikazana je vremenska ovisnost struje kroz R 12 (slika 2) u ovisnosti o induktivitetu prigušnice u strujnom krugu pražnjenja defibrilatora.

Vidljivo je da se smanjenjem induktiviteta prigušnice javljaju veće amplitude strujnog impulsa i manje oscilacije (oscilacije kraće traju). Može se zaključiti da prigušnicu ne možemo jednoznačno odrediti za neki otpor, nego je potrebno prilagoditi prigušnicu s uzimanjem u obzir kapacitivnog svojstva kože.

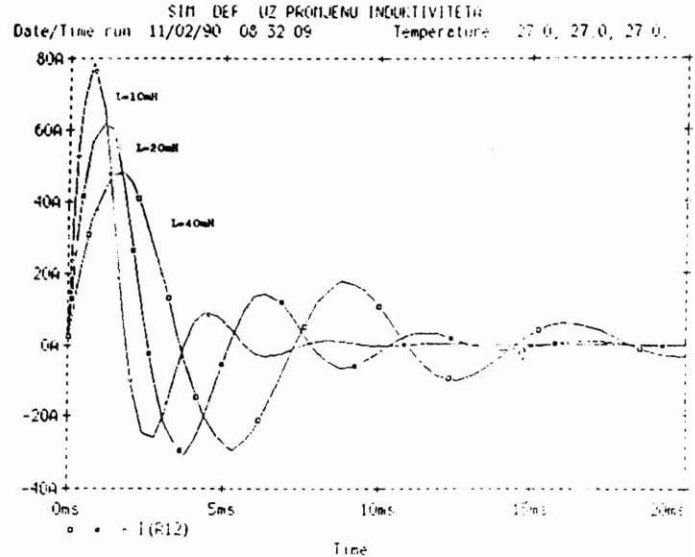
RASPRAVA

U radu je prikazano, da otpornost, odnosno impedanciju pacijenta, nikako ne možemo smatrati čisto radnim otporom. Uzimanje u obzir kapacitivnog svojstva kože, vidi se da se javljaju prilično velike oscilacije struje i

SLIKA 8.
Vremenska ovisnost struje srca o induktivitetu prigušnice u strujnom krugu pražnjenja defibrilatora

FIGURE 8.

Time dependence of the heart current on inductivity of a damper in the discharge circuit of defibrillator



napona na srcu i da te oscilacije traju do 4 puta duže nego što bi trajao strujni impuls kada bismo impedanciju pacijenta smatrali čisto radnom. Simulacijom za dva različita položaja elektroda utvrđena je puno veća djelotvornost defibrilacije ako u strujni krug izbivanja defibrilatora ulazi veći dio prsa (veća struja kroz srce). Također se pokazalo da smanjenjem kapaciteta između kože i elektroda dobivamo oscilacije koje su prigušenije (kraće traju) dok se amplituda znatnije ne mijenja. Dokazano je i rasipanje struje u okolini srca ali ipak toliko malo da ga praktički možemo zanemariti (npr. I (R 17)). Vrlo je zanimljiv i podatak da se napon između elektroda defibrilatora znatno razlikuje (V (13, 16)) ako mijenjamo kapacitet kože, kojega ne možemo zanemariti, ali kao što je i navedeno, postoji vrlo velika varijabilnost parametara korištenog impedancijskog modela, pa je i taj parametar nužno analizirati i uzeti u obzir.

Ovom je simulacijom napravljena jedna kritična analiza strujnog impulsa defibrilatora, u literaturi nama nedostupna, koja upućuje na nužnost dorade ovog vrlo korisnog medicinskog instrumenta. Simulacija na PC-u omogućuje vrlo jednostavnu analizu uz neograničenu mogućnost mijenjanja parametara, što u eksperimentima nije moguće.

LITERATURA

1. A Guide to Circuit Simulation and Analysis Using PSpice, Prentice-Hall, ISBN 0-13-834607-0.
2. Bridges JE. Body Impedance of non-human Primates under Constant Voltage Shock Conditions, Proceedings, 133-50.
3. Bridges JE, Vaiberg M, Wills MD. I Impact of recent developments in biological electrical shock safety criteria, TEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, 1987; 238-48.
4. Gamulin S, Marušić M, Krvavica S. Patofiziologija, 1. izd., Zagreb, JUMENA, 1988; 651-5.
5. Petričić Ž. Analiza djelovanja električne struje na čovjeka s osvrtom na principe zaštite u elektroenergetskom postrojenju, Diplomski rad, Elektrotehnički fakultet Osijek, 1987.
6. Proceedings of the First International Symposium on Electrical Shock Safety Criteria, Toronto, 1983.
7. Tehnička enciklopedija, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, svezak 7.
8. Tehničko uputstvo za defibrilator B2P, proizvođač Elektronska industrija Niš, OOUR elektromedicinskih uređaja i aparata.

Abstract

DIGITAL SIMULATION OF WAVE SHAPE OF ELECTRIC IMPULSE WHICH APPEARS ON THE HEART DURING DEFIBRILATION

Dražen Lung, Aleksandar Včev and Ivica Bašić

Clinical Hospital Osijek and
Electro-technical Faculty Osijek

In this work impedance model of the human body, defibrillation of the heart has been analysed. The process of defibrillation was simulated on personal computer and we got a wave shape of the electric impulse which we can see on the heart during defibrillation. The analysis was done for 2 different positions of defibrillator electrodes. The time analysis of defibrillator impulses on the other parts of the body show existence of currents and tensions in enviros of the heart and because of that, during defibrillation we must be very careful.

The article show urgency of reduction of transitive resistance between skin and defibrillator electrodes because of Joulo's losses which appear here. The time analysis of impulses show that capacity characteristic of the skin has influence on wave shape of impulses, respectively on tension which appears on electrodes during defibrillation. This work on PC help us to see how simple is the analysis of the work by this instrument and also need to inovate it.

Key words: defibrillator, electrical impulse, impedance model of the human body

Received: 28th April, 1992