



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Biomedicinska instrumentacija



Biomedicinska instrumentacija

P4 – Elektrostimulatori srca



Ak.god. 2010./2011.

prof.dr.sc. Ratko Magjarević

Elektrostimulatori srca

- Terapijski električki uređaji koji generiraju električne impulse namijenjene podraživanju srca radi uspostave i/ili održavanja normalnog srčanog ritma odnosno cirkulacije krvi
- Sistematizacija elektrostimulatora srca:
 - po položaju elektroda
 - vanjski (eksterni)
 - s površinskim elektrodama
 - transezofagijski (elektrode u jednjaku)
 - s elektrodnim kateterom uvedenim u srce putem krvožilnog sustava
 - ugradbeni (implantabilni)
 - po trajanju stimulacije
 - privremeni -> vanjski
 - trajni -> ugradbeni (postaju ugrađeni ili usađeni ili implantirani)
 - po načinu rada
 - asinkroni
 - sinkroni
 - frekvencijski adaptivni ili fiziološki

Implantabilni elektrostimulatori srca

- Implantabilni elektrostimulator srca – engl. implantable cardiac pacemaker; hrv. kolokvijalno *pacemaker*
- Jedna od najuspješnijih primjena tehnologije u medicini do sada
- 600.000 implantacija godišnje u svijetu
- Prva implantacija u čovjeka 1958. g.
- Danas implantirani stimulatori stimuliraju, senziraju, komuniciraju i samostalno donose odluke o terapiji
- Zasnovani na mikroračunalima (računalne snage približno jednak osobnom računalu)
- Frekvencija (repeticija) impulsa prilagođuje se fizičkoj aktivnosti/ potrebama pacijenta
- Danas se govori o “menadžmentu” srca (ne više o elektrostimulaciji)

Prvi implantirani elektrostimulator srca



- Rune Elmquist razvio je prvi implantirani pacemaker 1958. g.
- amplituda impulsa - 2 V
- širina impulsa - 1.5 ms
- stalna frekvencija 70-80 impulsa/min
- masa 180 g
- napajanje – 2 Ni-Cd ponovno punjive baterije + vanjski oscilator frekvencije 150 kHz s kružnom antenom

Terapija srčanih bolesti

Cilj terapije srčanih bolesti je održavanje koordinirane funkcije srca prilagođene potrebama pacijenta, a postiže se:

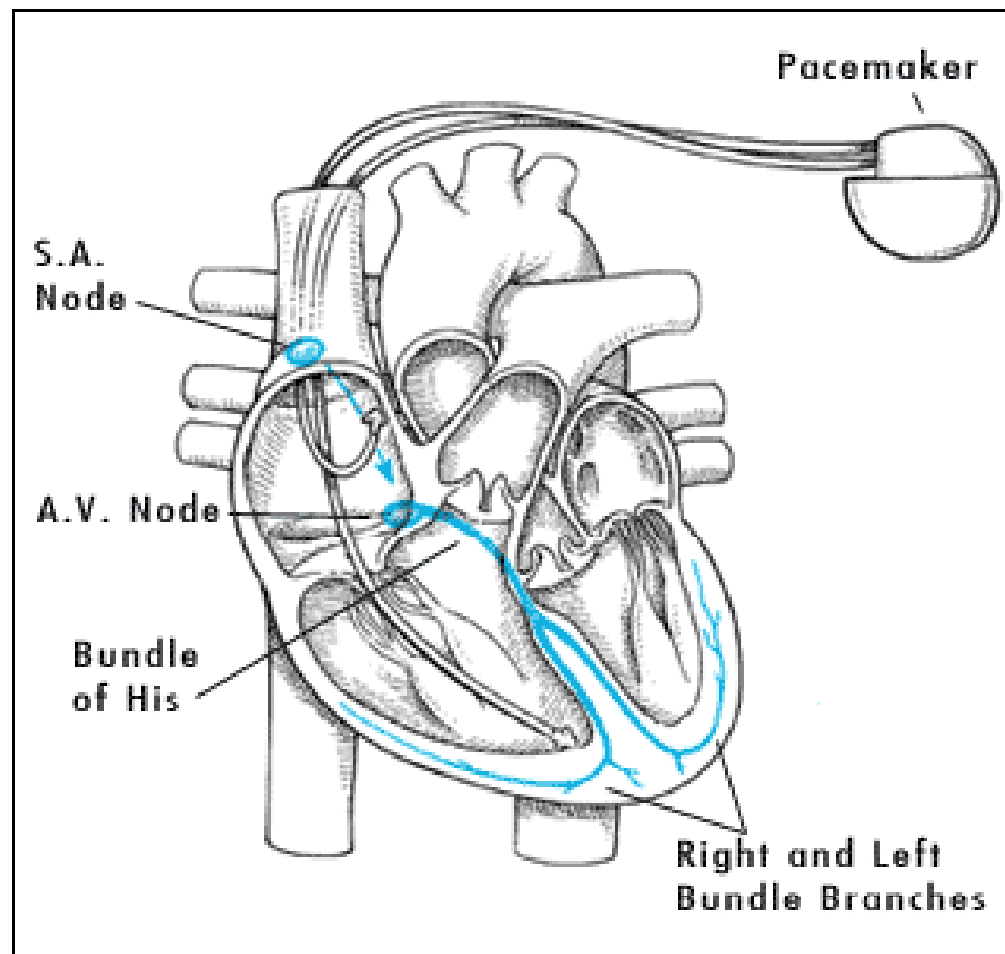
- održavanjem repetitivih kontrakcija srca,
- smanjivanjem poteškoća uzrokovanih nepravilnim radom srca,
- zaštitom pacijenata od mogućih komplikacija bolesti i terapije,
- poboljšavanjem kvalitete života pacijenata.

Terapija srčanih bolesti

Terapija srčanih bolesti može se provesti:

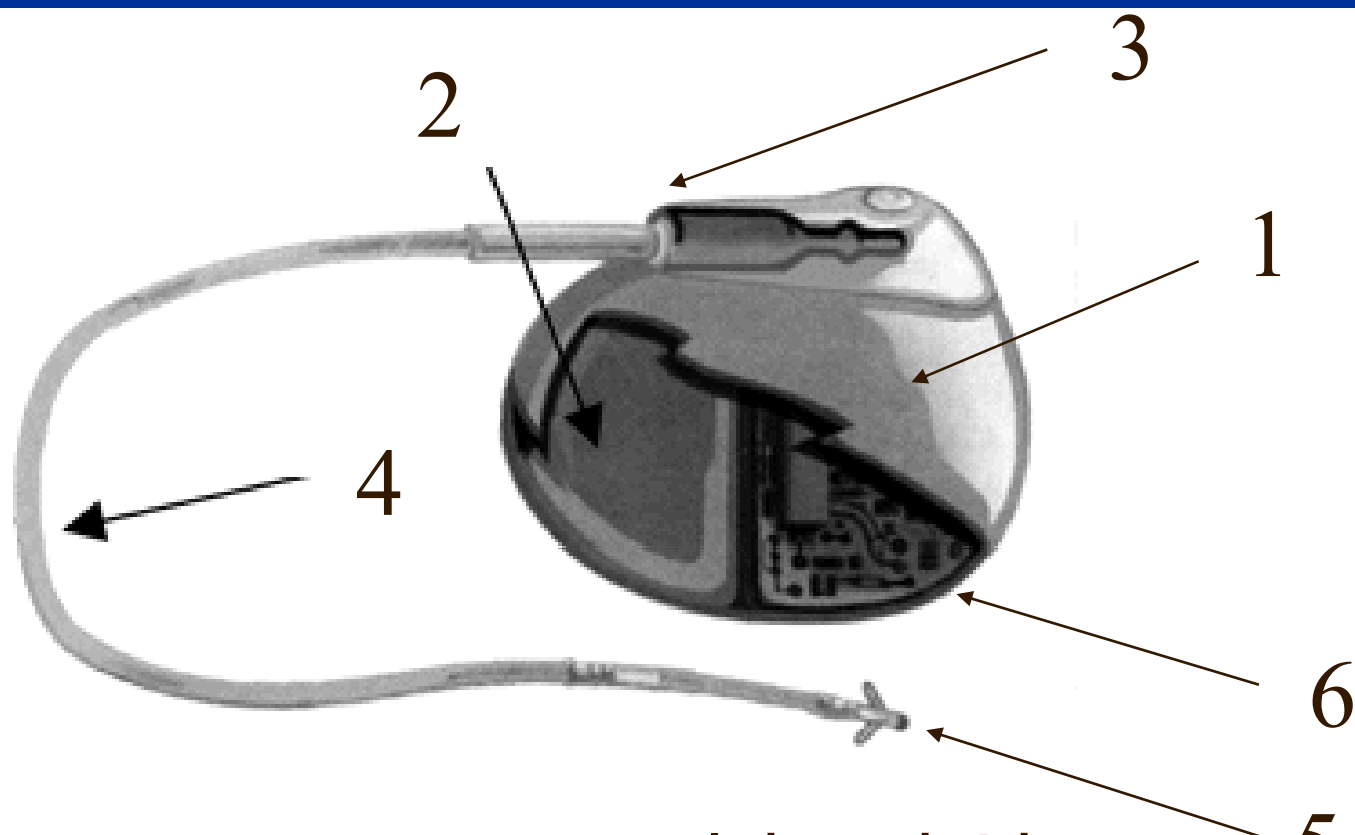
- lijekovima,
- kirurški,
- **električkom stimulacijom srca:**
 - akutna elektrostimulacija (npr. defibrilacija)
 - privremena elektrostimulacija (vanjska)
 - trajna elektrostimulacija
 - implantirani elektrostimulatori (pacemaker)
 - implantirani kardioverteri/ defibrilatori

Implantabilni elektrostimulatori srca



Položaj elektroda i elektrodnih katetera pri ugradnji dvo-komornog elektrostimulatora: elektrode su ugrađene u desnu pretklijetku i desnu klijetku (LA i LV)

Glavni dijelovi implantabilnog pacemakera

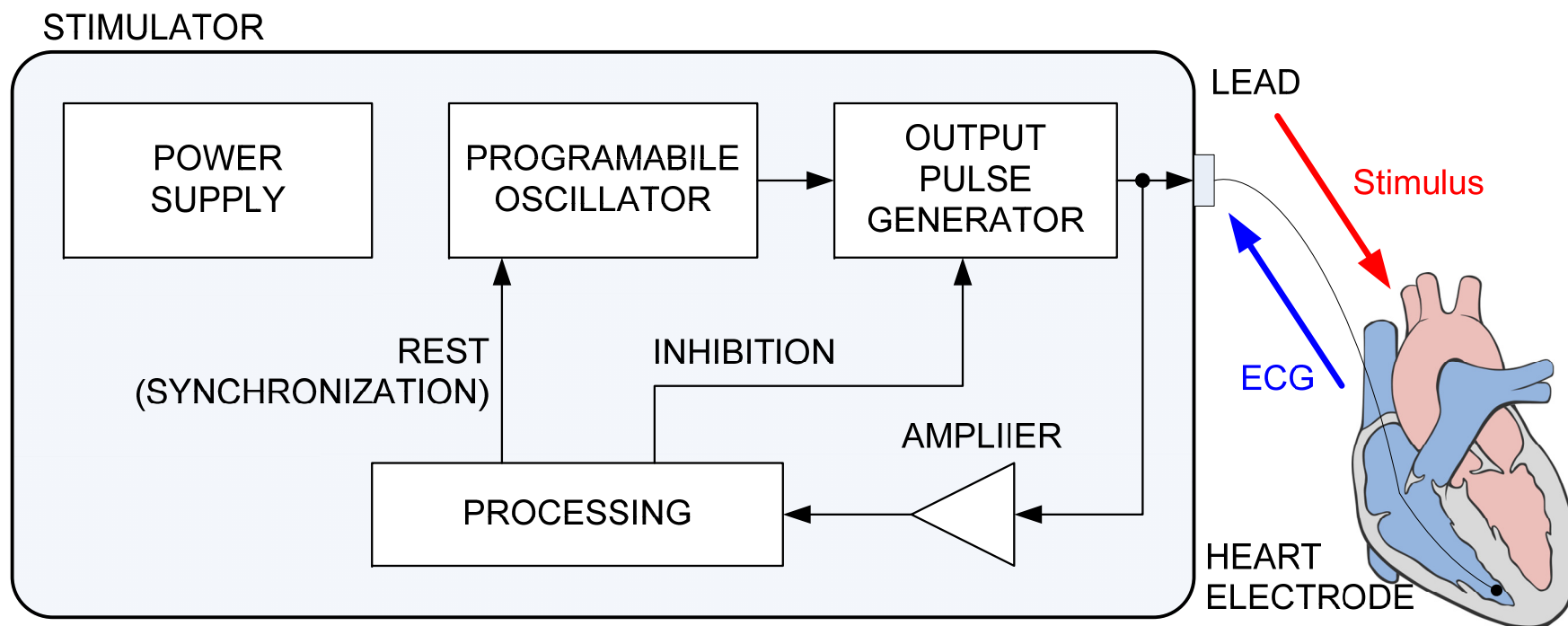


- | | | |
|--------------------|--------------------------|---|
| 1. Kućište | 4. Elektrodni kateter | 5 |
| 2. Izvor napajanja | 5. Elektrode | |
| 3. Konektor | 6. Elektronički sklopovi | |

Načini rada elektrostimulatora srca

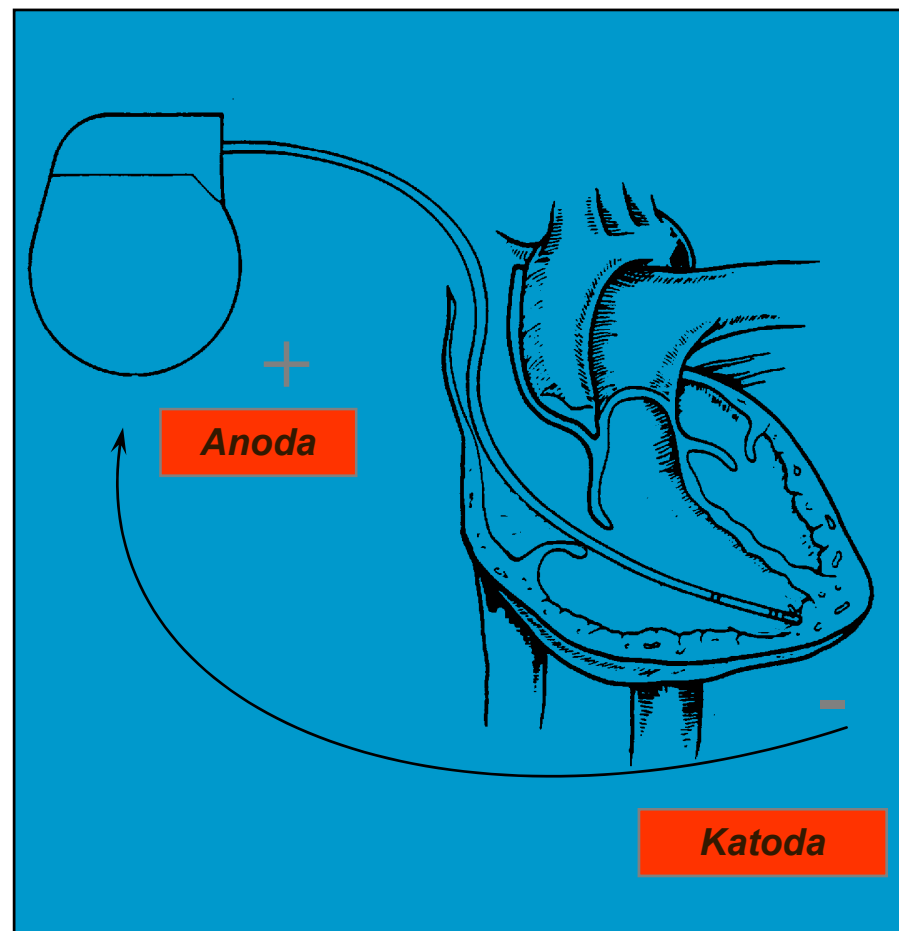
- Asinkroni (kompetitivni)
- Sinkroni (ne-kompetitivni):
 - sinkroni
 - na R val
 - inhibirajući na R val (on demand)
 - na P val
- Fiziološki, frekvencijski adaptivni = repeticija stimulusa prilagođuje se fizičkoj aktivnosti pacijenta

Blok shema elektrostimulatora srca



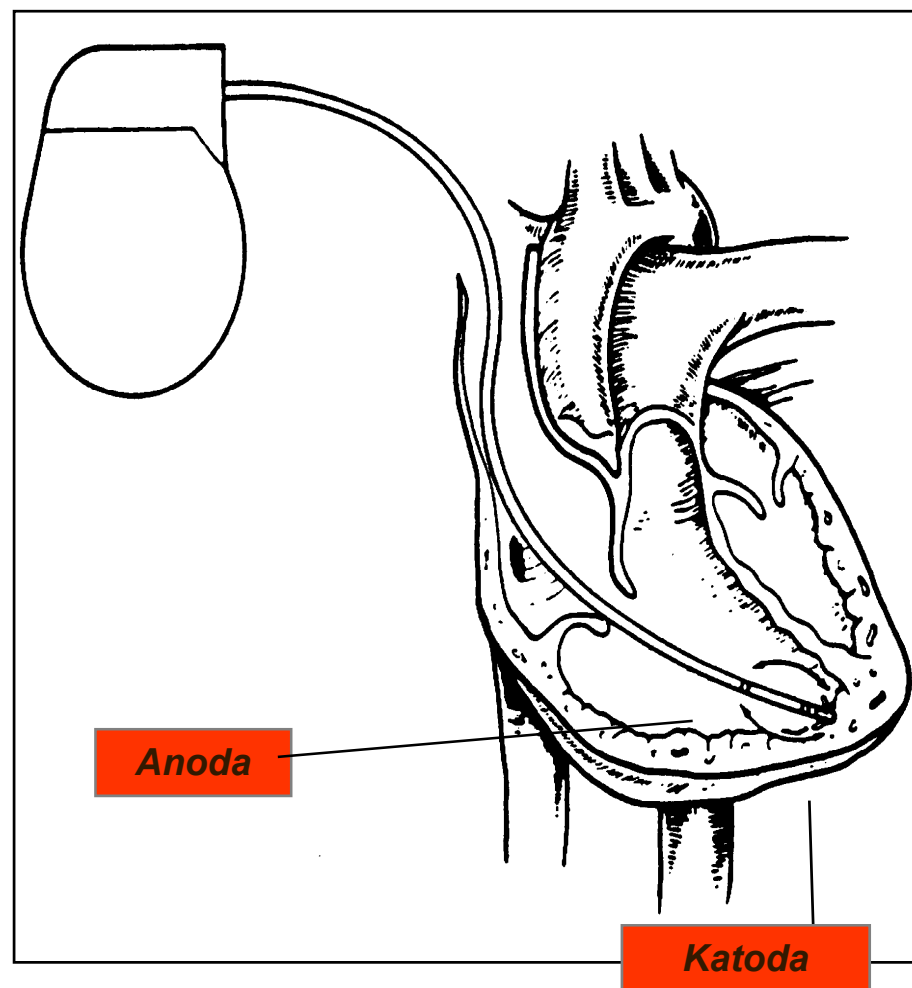
Monopolarna (unipolarna) elektrostimulacija

- Elektrodni kateter ima samo jednu elektrodu priključenu na vrh katetera, a neutralna elektroda je kućište stimulatora
 - elektroda – katoda, postavljena je u vrh desne klijetke (apex)
 - gustoća struje je najveća na površini elektrode, a na kućištu stimulatora je zanemariva i u pravilu nema vidljivih fizioloških učinaka

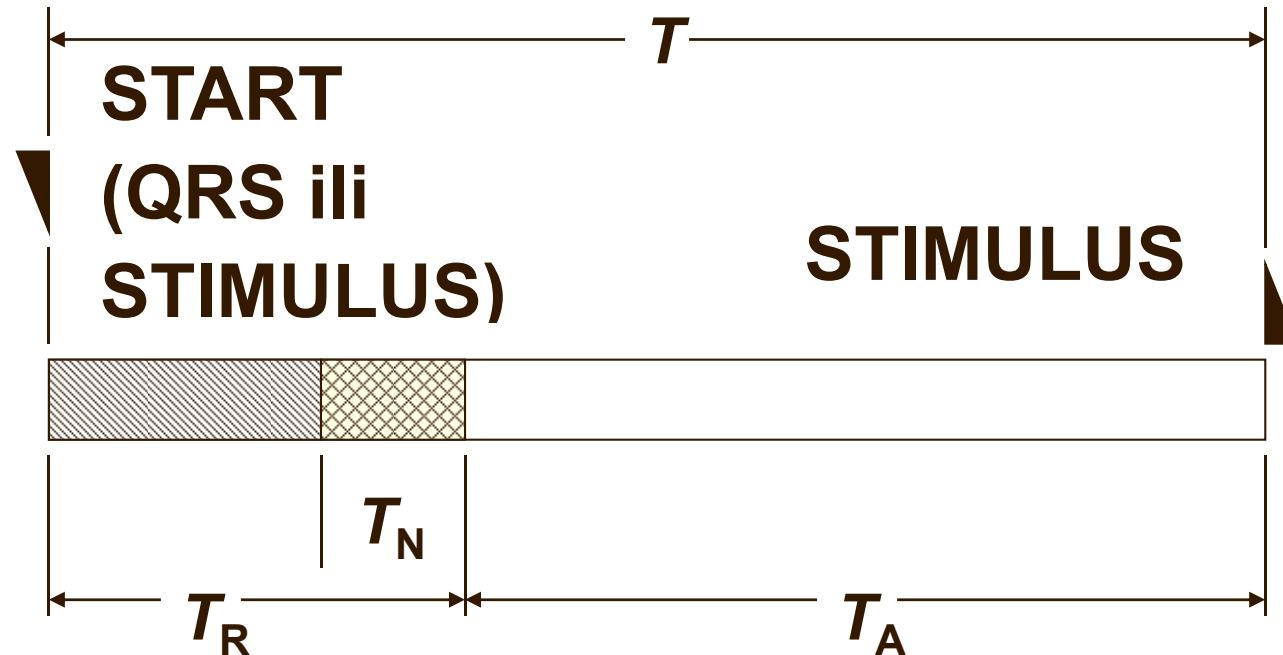


Bipolarna elektrostimulacija

- Dvije elektrode postavljene su na elektrodni kateter
 - katoda je postavljena u vrh desne klijetke, a prstenasta anoda nalazi se na udaljenosti od 10-20 mm od katode
- Diskusija: prednosti mono- i bipolarne stimulacije



VREMENSKI DIJAGRAM – inhibirajući na R val



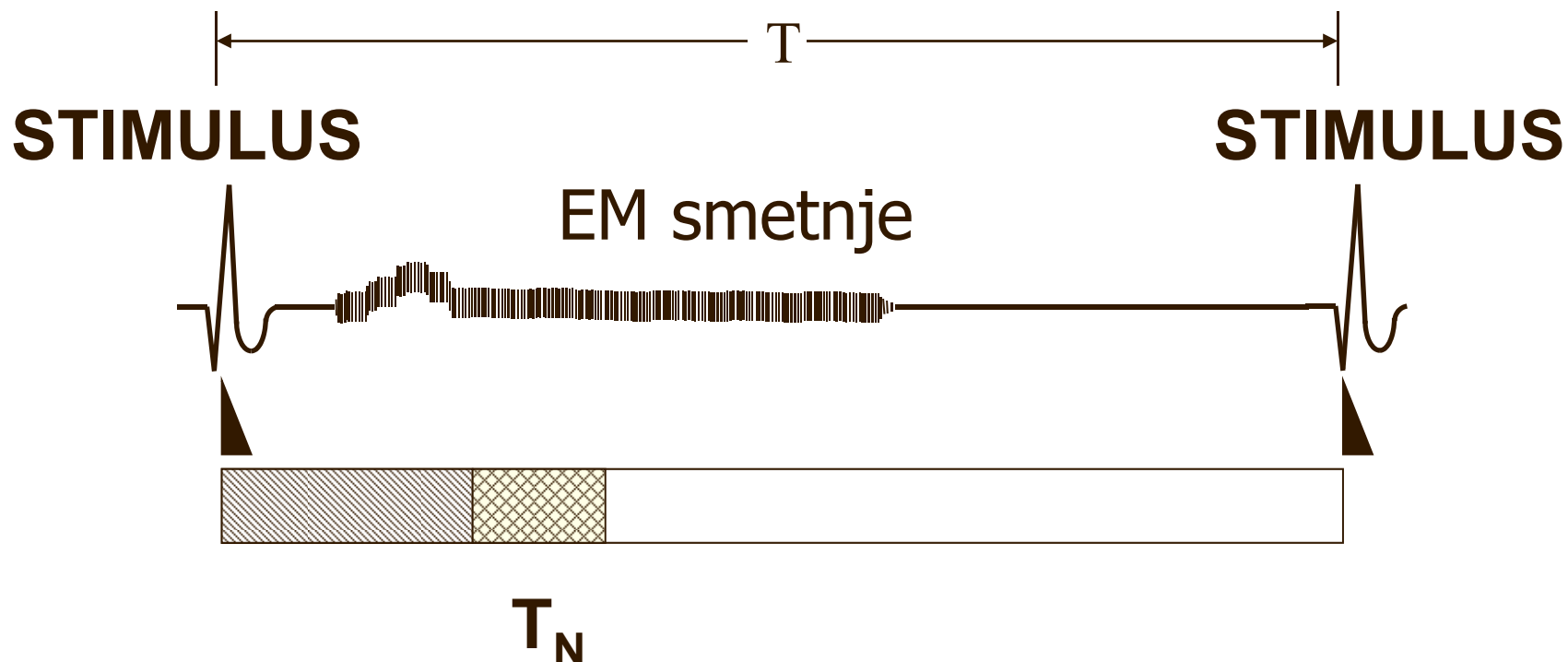
Pacemaker ima namještenu minimalnu vrijednost frekvencije izlaznih impulsa T (tipično 60 – 72 imp/min), kojim se u slučaju izostanka normalnog sinusnog ritma srca, osigurava opskrba organizma krvlju. Unutar jednog ciklusa između dvije kontrakcije klijetki T , bez obzira jesu li kontrakcije uzrokovane spontanim radom srca ili stimulusom, razlikujemo tri vremenska perioda:

T_R – refrakterni period (refractory period)

T_N – ispitni period (period mjerenja) okoline (noise sampling period)

T_A – period pripravnosti (alert period)

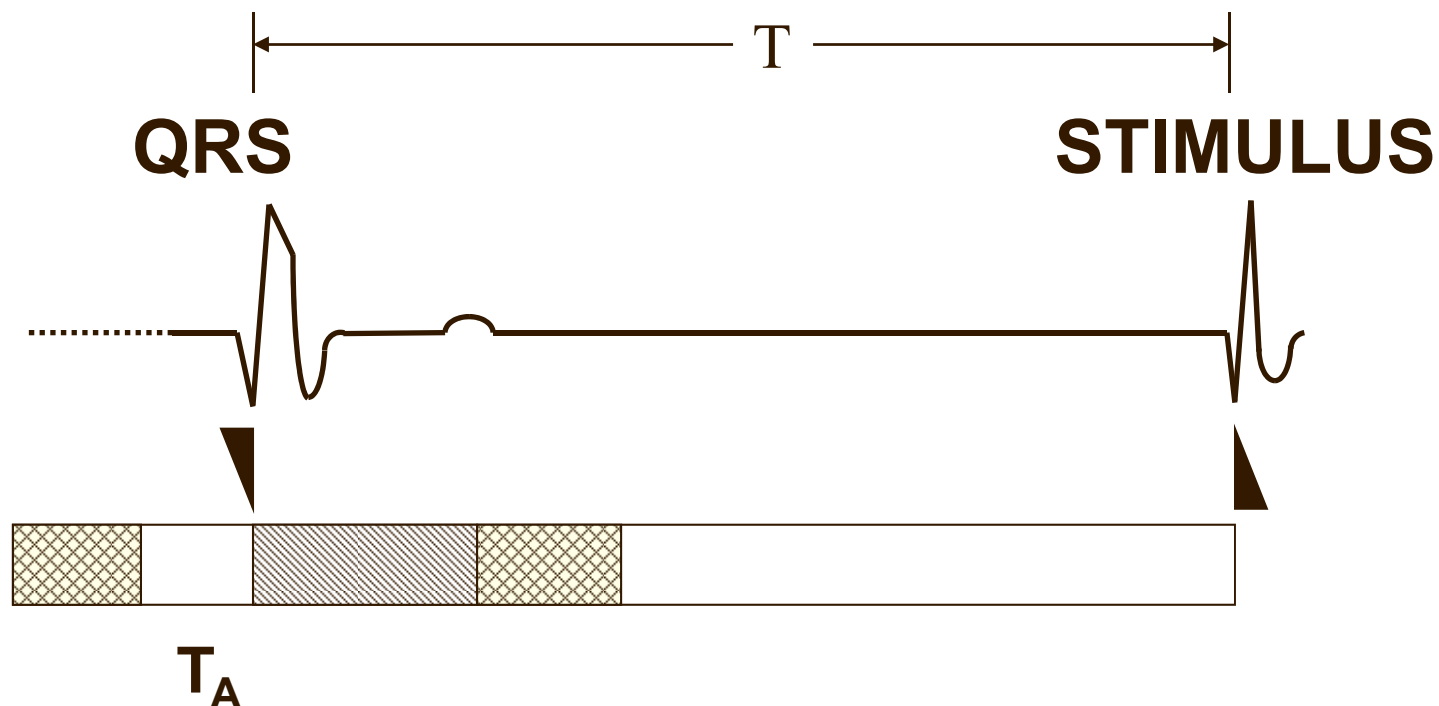
Ispitni period



Ispitni period namijenjen je ispitivanju prisutnosti utjecaja elektromagnetskih smetnji u okolini pacijenta.

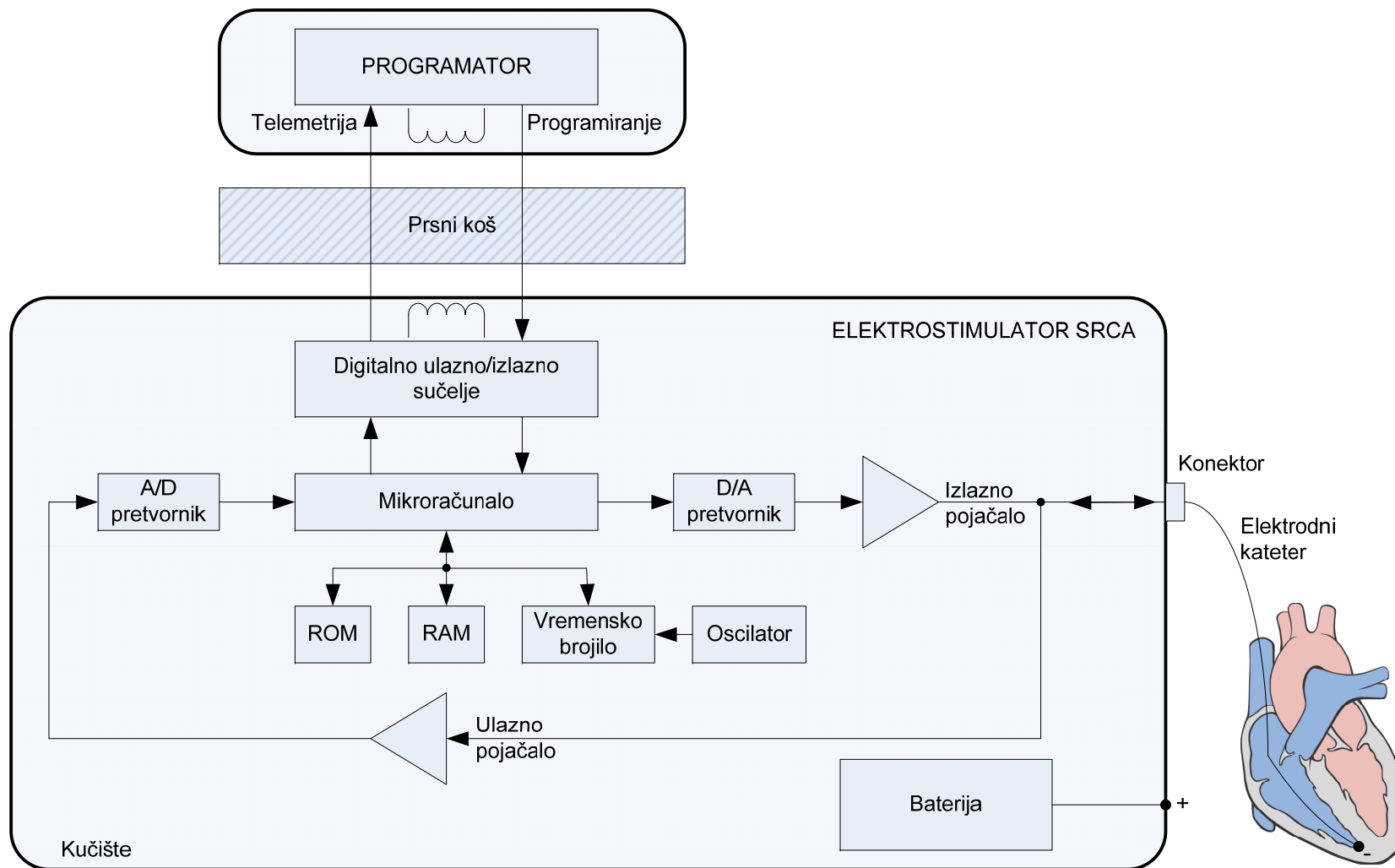
U slučaju detekcije pojave elektromagnetskih smetnji tijekom ispitnog perioda T_N , na kraju ciklusa T izlazni stupanj pacemakera generirati će stimulus. Pojava spontane aktivnosti srca (QRS) u periodu pripravnosti se zanemaruje.

Period pripravnosti



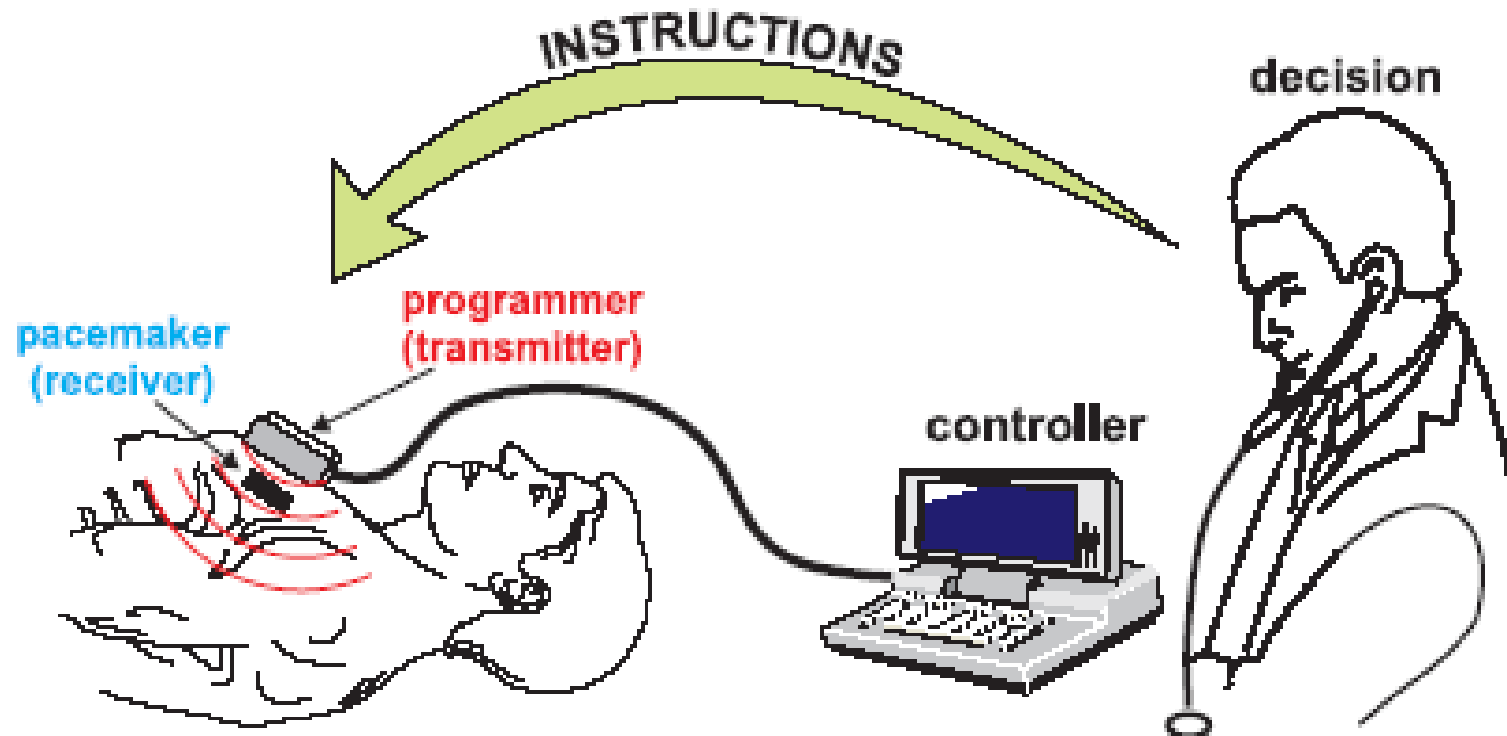
Pojava spontane aktivnosti srca (QRS) tijekom perioda pripravnosti T_A prekida (resetira) temeljni ciklus trajanja T i započinje novi ciklus

Blok shema - Multiprogramabilni stimulator



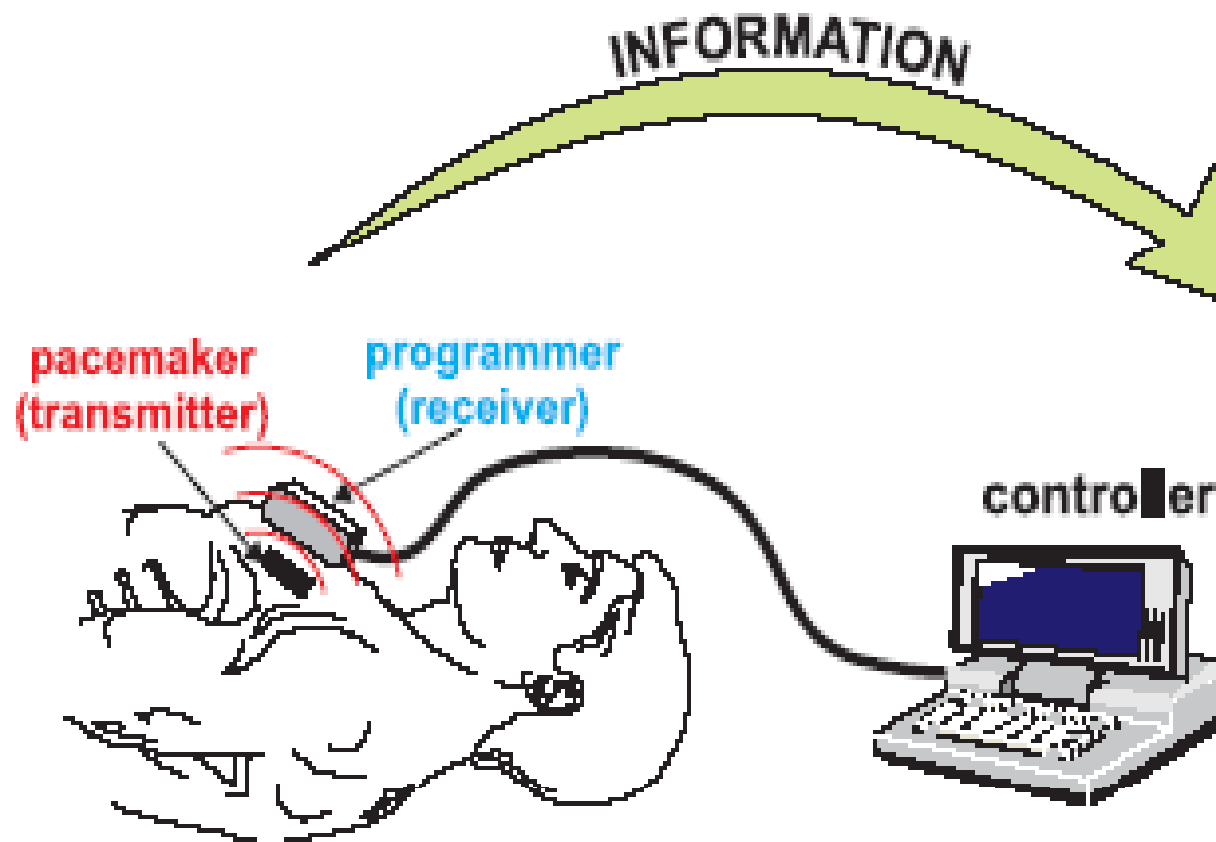
Programiranje pacemakera

PROGRAMMING : from controller to pacemaker



Source: SS Barold, Cardiac Pacemakers Step by Step, Blackwell, 2004

Telemetrija – prijenos izmjerenih podataka



Source: SS Barold, Cardiac Pacemakers Step by Step, Blackwell, 2004

Elektrode

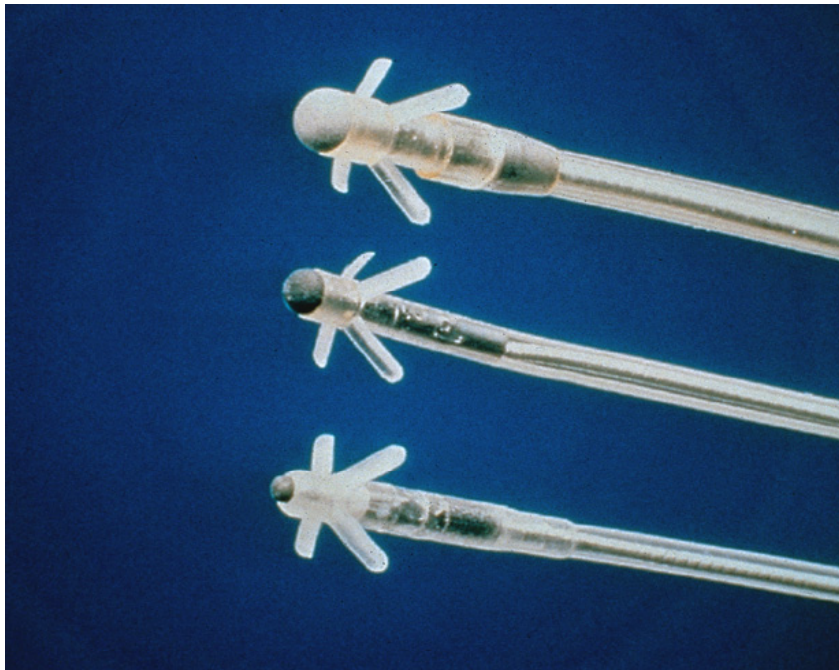


Intramiokardijalna elektroda

Načini pričvršćivanja:

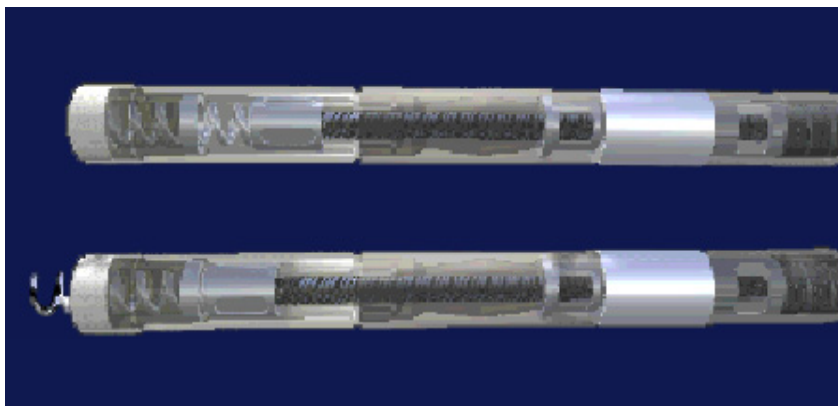
- epikardijalni (na površini srca)
- intramiokardijalni – pričvršćeni u unutrašnju stijenku srca
- endokardijalni ili intraluminarni - pritisnuti na unutrašnju stijenku srca

Endokardijalna elektroda



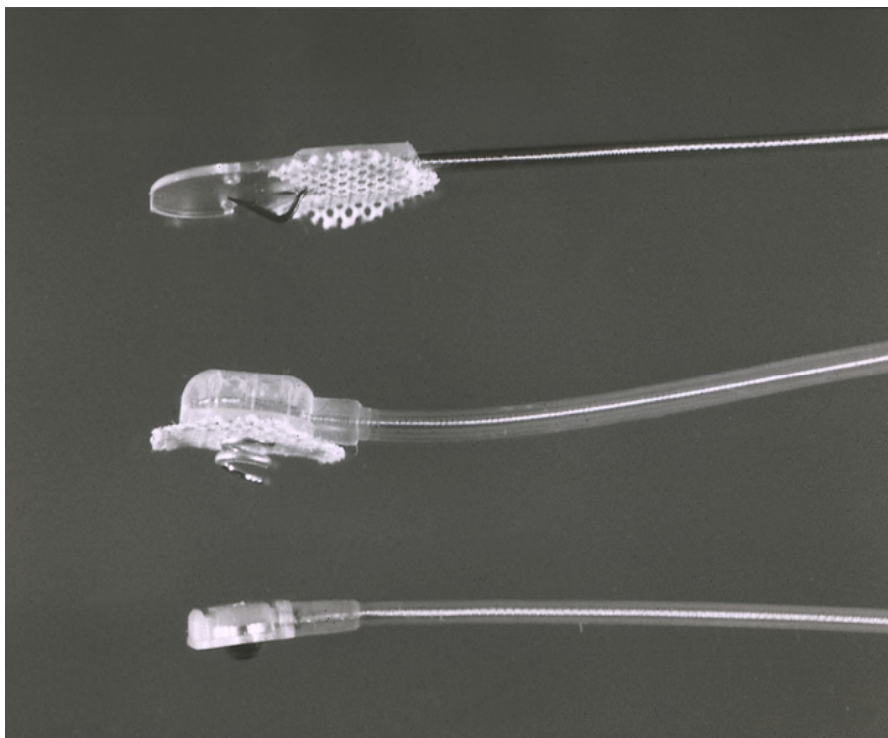
- Naziva se i elektrodom s pasivnim pričvršćivanjem (passive fixation)
- Hvataljke se poput sidra uhvate za vlakna s unutrašnje strane klijetke (trabeculae, (fibrozna vlakna))

Intramiokardijalna elektroda



- Spiralni vrh elektrode se s pomoću posebnog alata uvije u untrašnju stijenkku srca.
- Postupak se prati nekim postupkom medicinskog oslikavanja, najčešće fluoroskopijom ili UZV
- Elektrodu je moguće postaviti na bilo koju točku unutar desno srca

Miokardijalne / Epikardijalne elektrode



- Elektrode se postavljaju na površinu srca
- Zahtijeva kirurški zahvat otvaranja prsnog koša, jako invazivan zahvat, te se stoga danas epikardijalne elektrode ugrađuju jako rijetko
- Koristile su se u ranim implantacijama, u 60-tim godinama

Elektrode – biokompatibilnost i materijali

Svako strano tijelo, pa tako i ugrađena elektroda elektrostimulatora srca izaziva upalnu reakciju tkiva u okolini. Biokompatibilni materijali imaju svojstvo da izazivaju slabu reakciju odbacivanja stranog tijela. Zato je izbor materijala za elektrode elektrostimulatora srca važan.

Materijali: platina i njene slitine; titan i njegove slitine; iridij; vitreous (stako+ metal + ugljik), nehrđajući čelik

Značajke materijala: biokompatibilnost, inertnost na kemijske reakcije, otpornost na koroziju

Površina elektrode: efektivna površina namjerno se povećava i čini hrapavom kako bi se smanjila gustoća struje

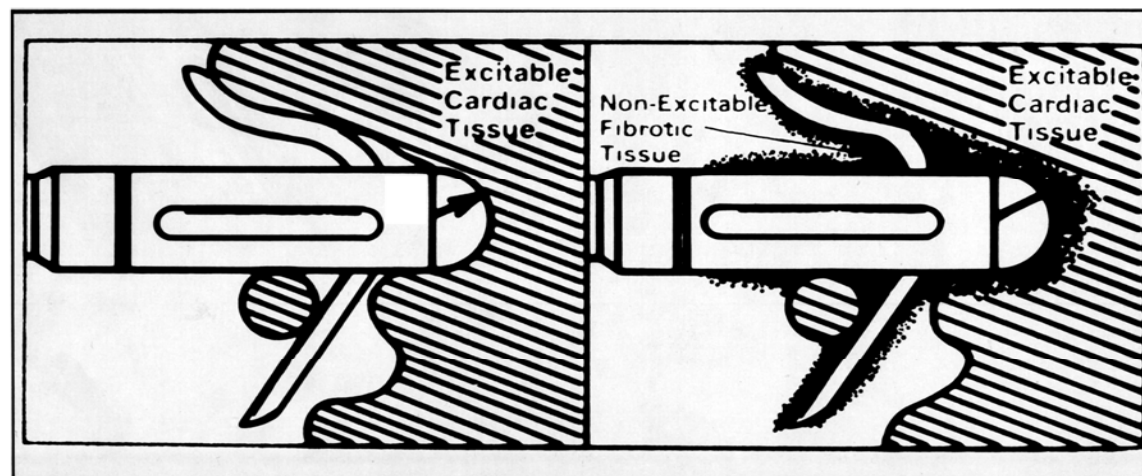
Porozna površina: omogućuje se polagano izlučivanje steroida* iz malih spremnika smještenih u unutrašnjosti vrha elektrode

(U vrhu elektrode od silikonske gume pohranjen je cca. 1 mg steroida)

*steriodi su lijekovi koji djeluju na smanjivanje upalnih procesa

Proces nakon implantacije

- Oko endokardijalne elektrode stvara se kao posljedica ugradnje vezivno (fibrozno) tkivo
- Vezivno tkivo nije dobro vodljivo i nije podražljivo
- U nekoliko tjedana poslije ugradnje raste impedancija elektrode i prag podražljivosti srčanog mišića

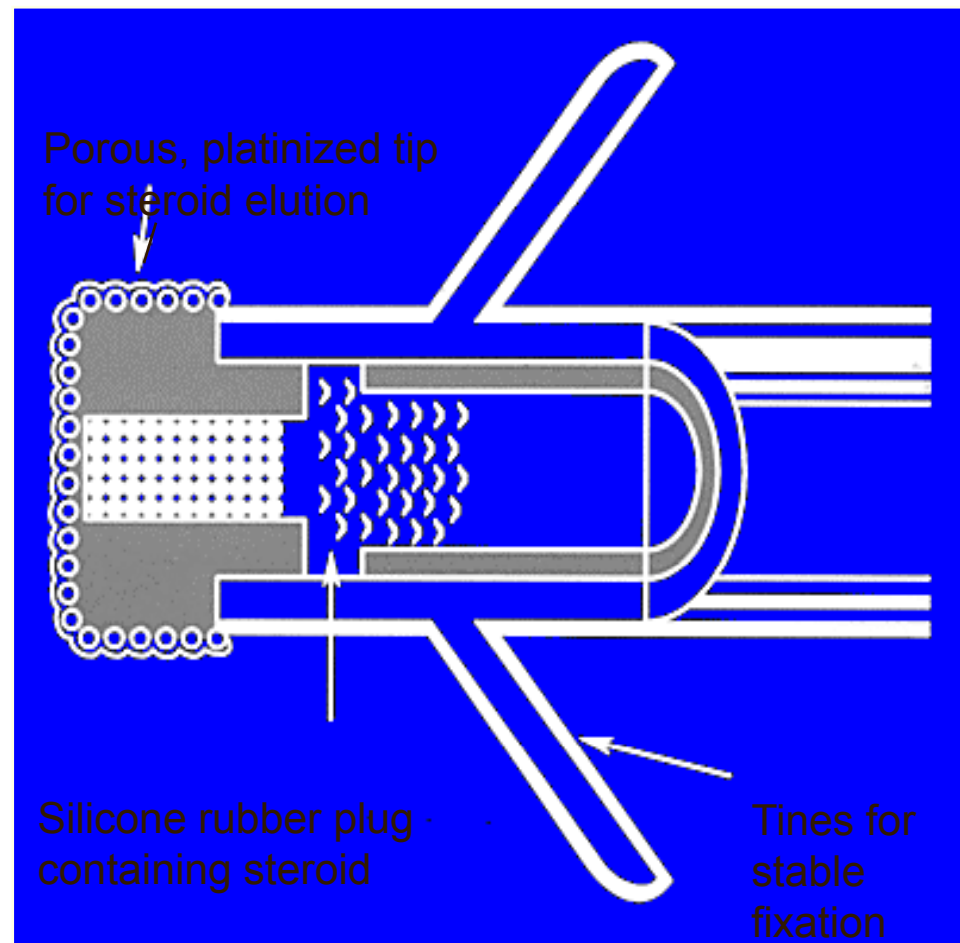


Acute

Chronic

Elektrode s izlučivanjem steroida

- Elektrode s izlučivanjem steroida smanjuju upalni proces i zahvaljujući tome rast vezivnog tkiva je manji, a time i povećanje praga podražljivosti



Prag podražljivosti

Za postizanje stimulacije srčanog mišića, gustoća struje **J** mora prema Ohmovom zakonu biti:

$$\mathbf{J} = \kappa \mathbf{E}$$

gdje je κ specifična vodljivost srčanog mišića, a **E** jakost električnog polja.

Električno polje u okolini točkastog izvora struje obrnuto je proporcionalno kvadratu udaljenosti r od izvora

$$E = J / 4\pi \kappa r^2$$

Realni očkasti izvor ima malu makroskopsku površinu elektrode. Efektivna površina elektrode na elektrodnom kateteru pacemakera je 10mm^2 to 100mm^2 .

Prag podražljivosti

Energija potrebna za stimulaciju miokarda ovisi o podražljivosti miokarda (pojedinačnog pacijenta) i o impedanciji sučelja elektroda – miokard.

Za određivanje nadomjesne sheme sučelja elektroda – miokard koristi se troelementna nadomjesna shema.

Impedancija sučelje bit će to manja što je veća efektivna površina elektrode.

Makroskopski se podražljivost miokarda opisuje krivuljom podražljivosti (I-t krivuljom).

Modeliranje krivulje podražljivosti

Modeli:

Hiperbolni (eksperimentalni)

$$I = I_r \left(1 + \frac{t_c}{t} \right)$$

I_r – struje reobaze

t_c – vrijeme kronaksije

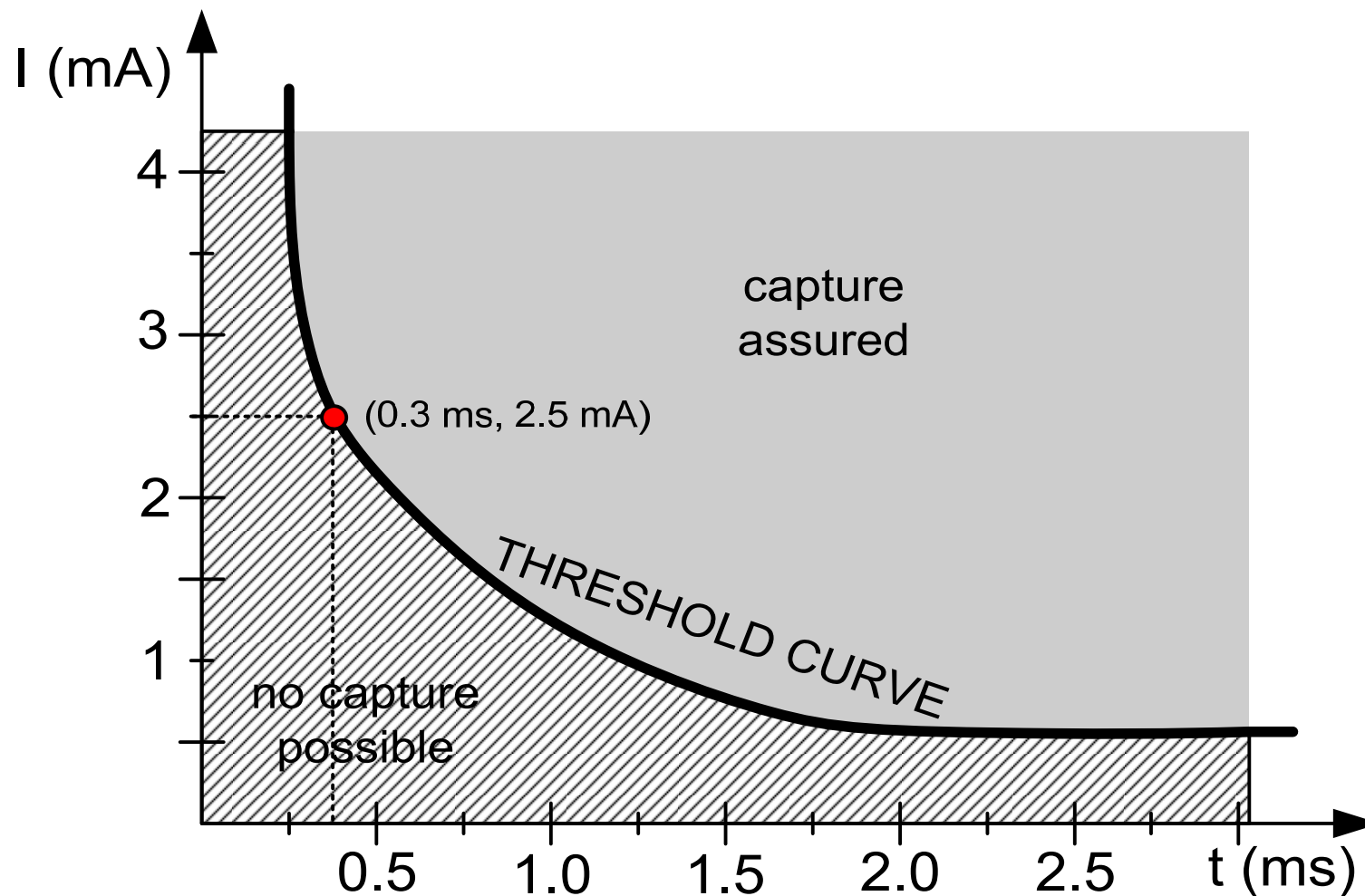
Eksponencijalni (teorijski)

$$I = \frac{\frac{U}{R_m}}{1 - e^{-\frac{t}{\tau_m}}}$$

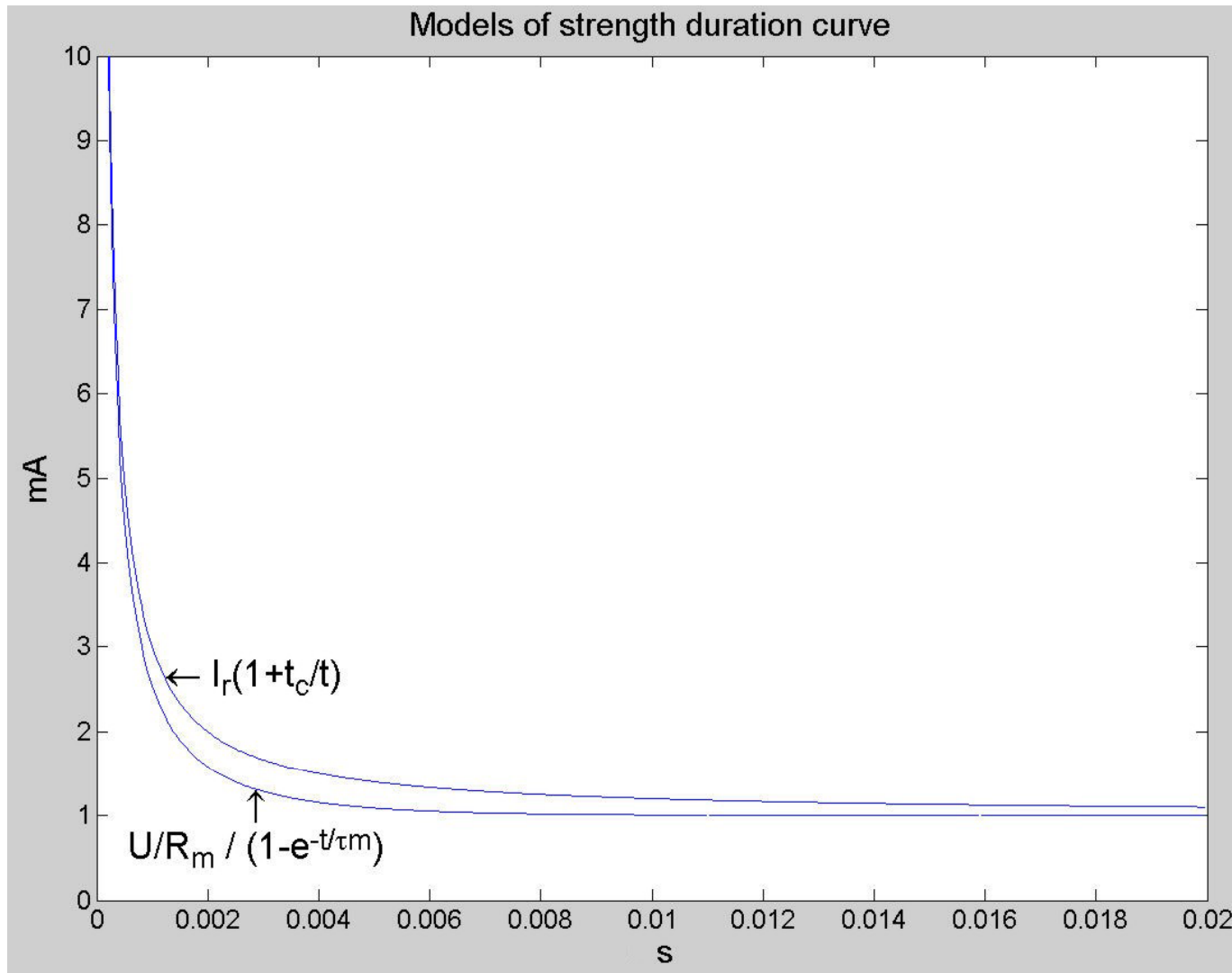
R_m – otpor membrane

τ_m – vremenska konstanta membrane

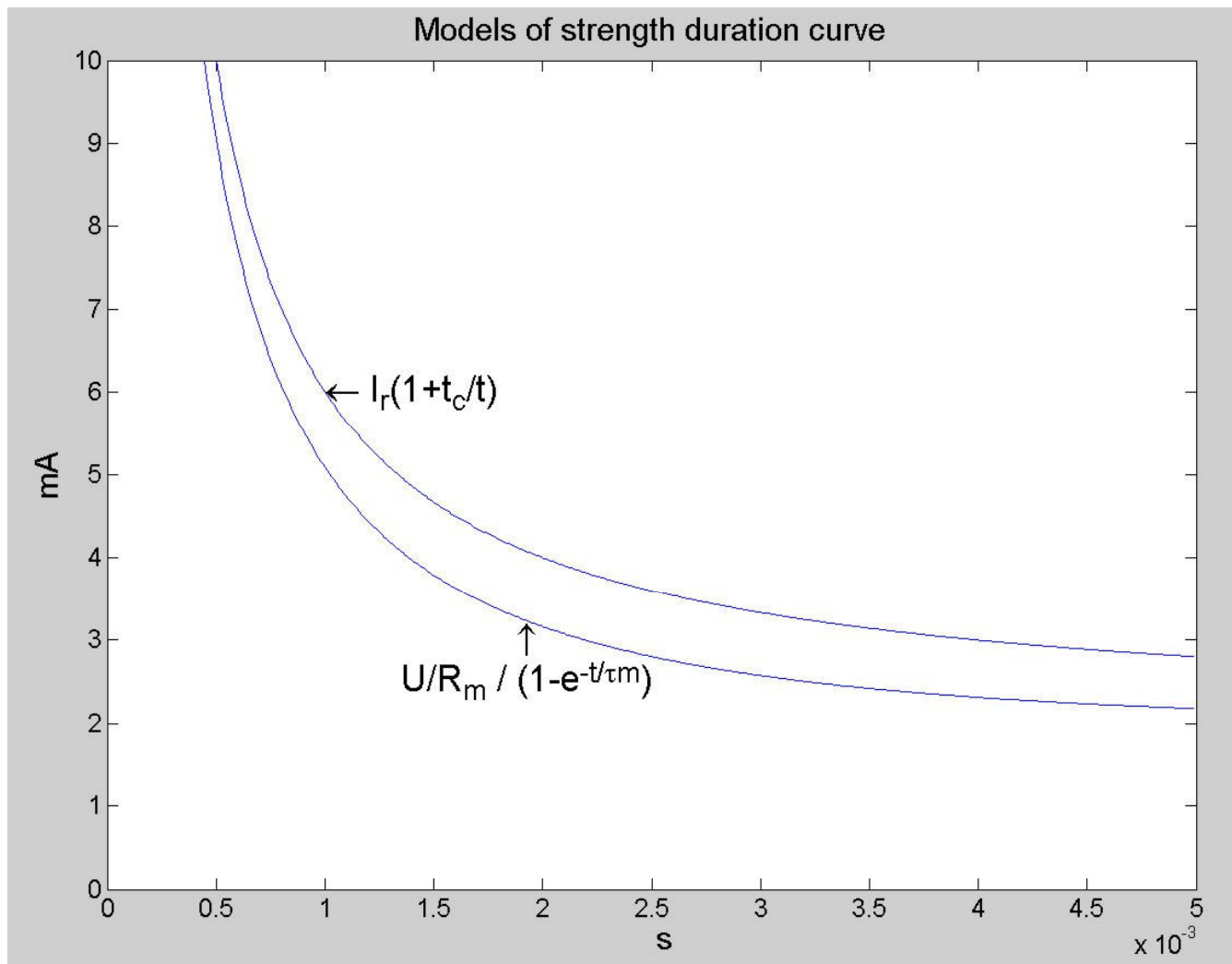
Krivulja podražljivosti



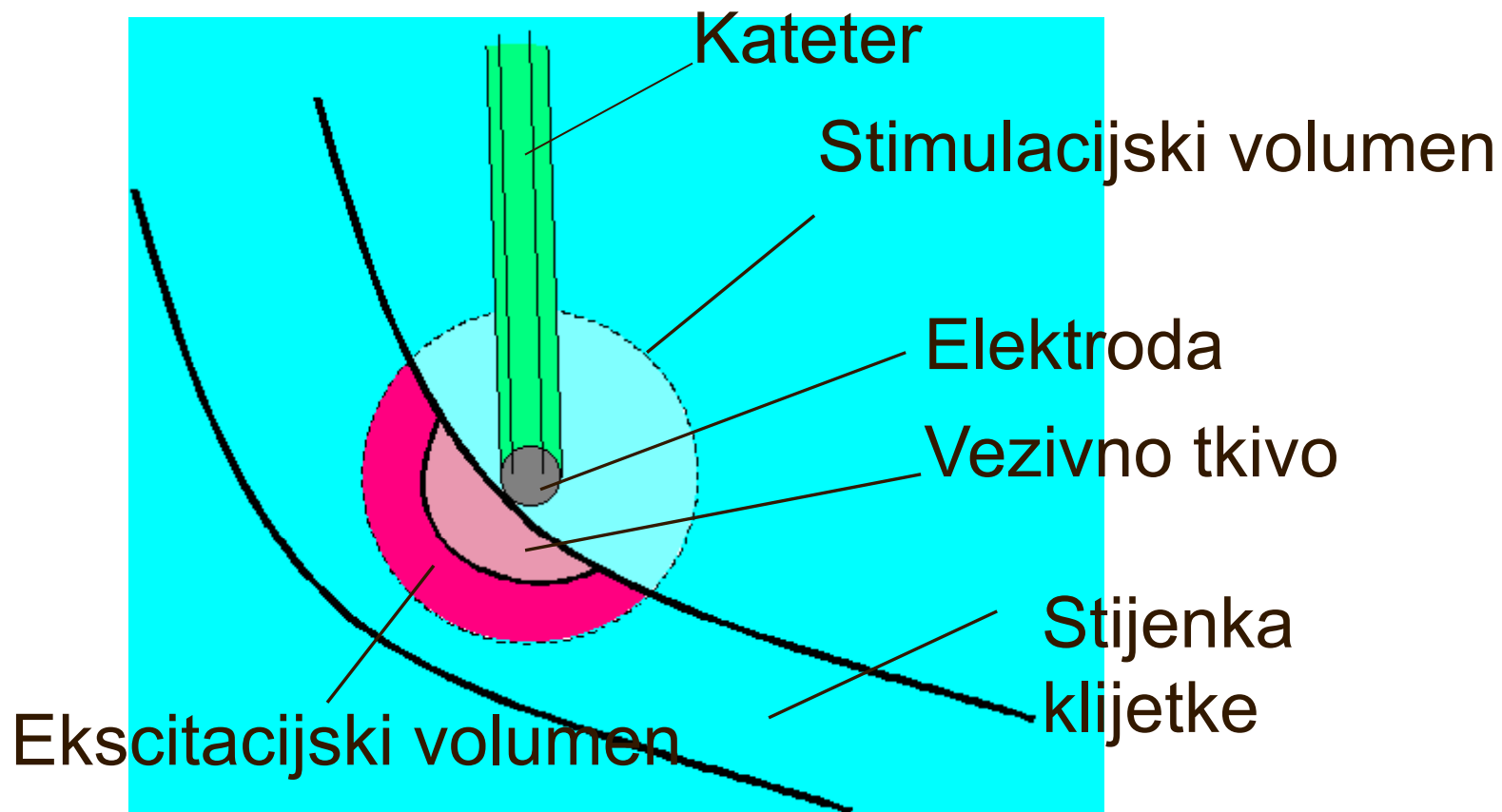
Razlika u modelima



Razlika u modelima - detalj



Eksitacijski volumen



Elektrodni kateteri

Vodiči

- Višežilni spiralno namotani vodiči od materijala sličnih materijalima za izradu opruga
- Mali otpor vodiča
- Materijali: slitine kobalta (35% Co, 35% Ni, 20% Cr, 10% Mo) sa srebrnom jezgrom
- čvrstoća, fleksibilnost i elastičnost (mogućnost ostvarenja dugotrajnosti)

Izolator

- Dobra izolacijska svojstva u agresivnoj sredini
- Biokompatibilnost
- Materijali: silikonska guma i poliuretan
- čvrstoća, fleksibilnost i elastičnost (mogućnost ostvarenja dugotrajnosti)

Pouzdanost

- ispituje se otpornost na savijanje i savitljivost (savijanje 15%)
- zahtjevi: 200×10^6 ciklusa bez narušavanja tehničkih značajki

Uz prosječni broj otkucaja srca 70/min

Predvidivi životni vijek elektrostimulatora 10 years

Broj savijanja:

$$N = 70 \times 60 \times 24 \times 365 \times 10 = 367.920.000$$

Izlazni stupanj – parametri impulsa

Parametri stimulacije:

- amplituda strujnih impulsa (tip.)

1mA, 2 mA, 4 mA, 8mA

ili naponskih impulsa

1V, 2V, 4V, 8V

- trajanje impulsa (tip.)

između 0,5 ms i 2 ms

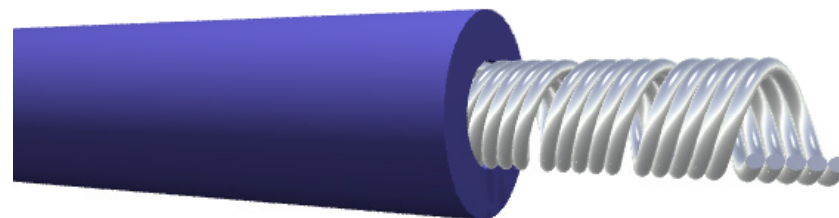
Prag podražljivosti mjeri se za vrijeme implantacije.

Amplituda impulsa postavlja se na vrijednost jednaku dvostrukoj izmjerenoj vrijednosti praga podražljivosti za neko trajanje radi povećane pouzdanosti.

Diskusija: uz poznavanje krivulje podražljivosti za elektrodu na ugrađenom elektrodnom kateteru, te zahtjevom za pouzdanom stimulacijom, kako biste odredili vrijednosti stimulusa uz minimizaciju potrošnje baterije?

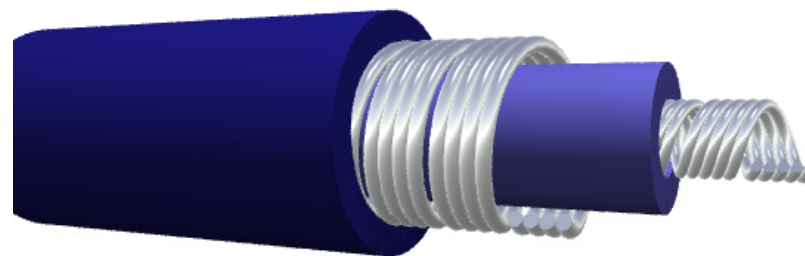
Građa monopolarnih katektera

- Načelno, monopolarni elektrodni kateteri su manjeg promjera od bipolarnih
- Na snimljenim elektrokardiogramima, impulsi monopolarnih stimulatora proizvode značajno veće artefakte



Građa bipolarnih katektera

- Bipolarni elektrodni kateteri manje su osjetljivi na smetnje i artefakte uzrokovane drugim bioelektričkim potencijalima (npr. EMG)
- Promjer 4-5 F (1French = 0,33mm)



**Izvedba
bipolarnih
katetera**

Izvor napajanja za implantabilne stimulatore

Baterije: članci zasnovani na litiju:

litij (-) / jod - poli-2-vinilpiridin (+)

Značajke

- Velika gustoća energije
- Izlazni napon neopterećenog izvora 2,8V, stalan tijekom uporabe; napajanje se postiže serijskim spajanjem 2 do 3 članka
- Kapacitet baterija - 1Ah do 3Ah
- Stimulator se zamjenjuje kad kapacitet padne ispod 0,09Ah
- Ne proizvodi se plin tijekom trošenja – mogućnost hermetičnog zatvaranja kućišta
- Relativno velik izlazni otpor

Potrošnja implantabilnih stimulatora

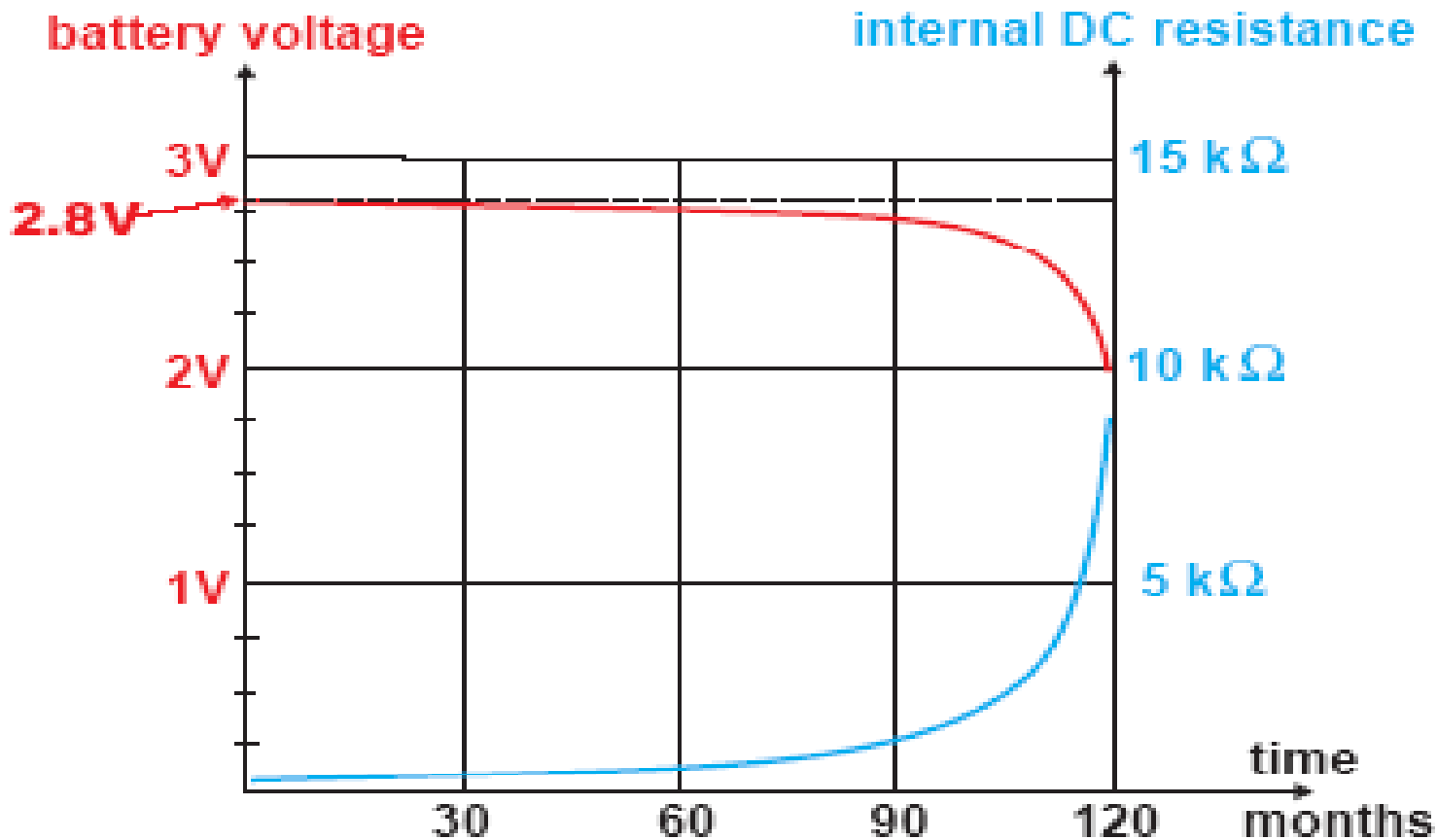
Elektronički sklopovi i mikroprocesor izvode se u tehnologiji male potrošnje, tipično CMOS

Prosječna potrošnja upravljačkog sklopovlja je $20\mu\text{A}$.

Svaki stimulus:

$$I_{SR} = I_p \times t_I \times f = 8\text{mA} \times 1\text{ms} \times 1\text{Hz} = 8\mu\text{A}$$

Značajke LiJ baterija



Source: SS Barold, Cardiac Pacemakers Step by Step, Blackwell, 2004

Međunarodno obilježavanje načina rada stimulatora

Kod sadrži četiri slova:

1. srčana komora koja se stimulira
 2. srčana komora u kojoj se senzira
- 0 – stimulacija nije uključena
A – pretklijetka (atrij)
V - klijetka (ventrikul)
D – obje komore (D = dual)

3. način rada (s obzirom na senziranje)

0 – senziranje isključeno (asinkrono)

I – inhibirajući

T – okidni način rada (triggered)

D – oba načina rada (I + T)

4. frekvencijska adaptivnost

0 – ne postoji

R - adaptivan

P - programabilan

M – multi-programabilan

C – mogućnost telemetrije (communicating)

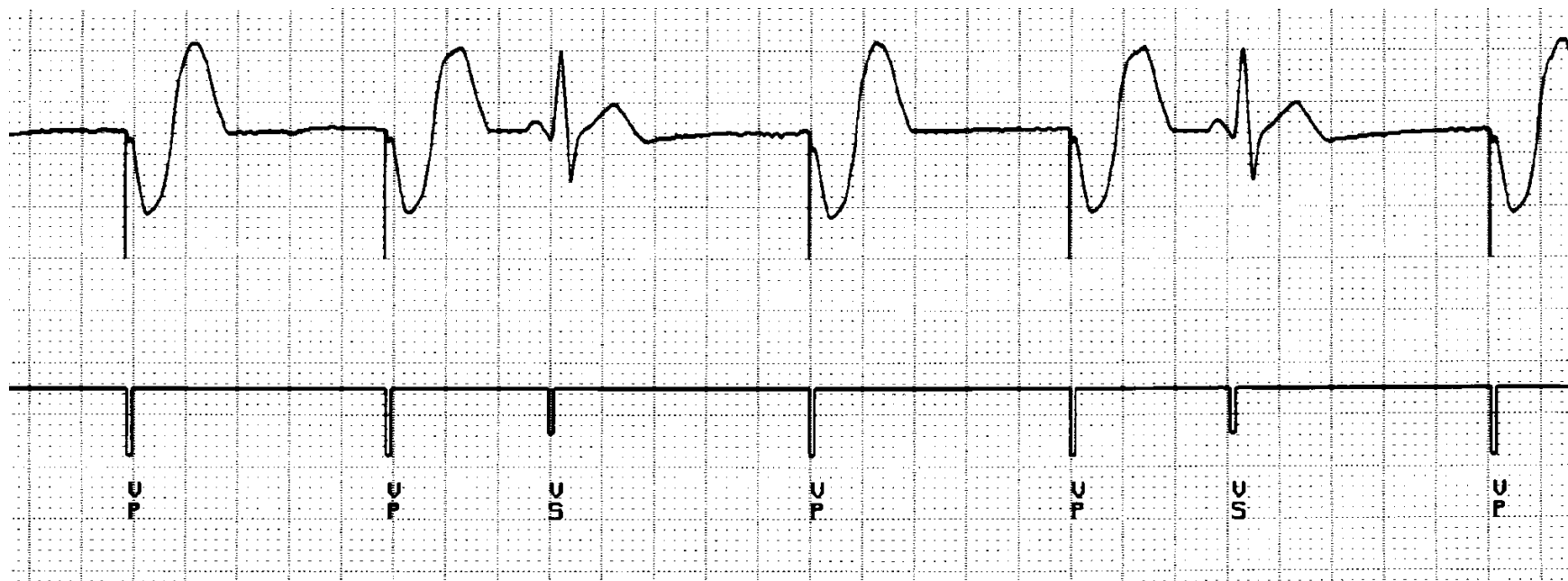
Programabilni parametri stimulatora

- Amplituda izlaznih impulsa
- Trajanje izlaznih impulsa
- Osjetljivost ulaznog pojačala
- Frekvencija izlaznih impulsa
- Način rada (asinkr., sinkr., ...)
- Trajanje refrekternog perioda
- Trajanje ispitnog perioda
- Trajanje perioda pripravnosti
- Algoritam koji se koristi za frekvencijsku adaptabilnost

Mjereni parametri (telemetrija)

- Prag podražljivosti
- Impedancija elektrode(a)
- Intrakardijalni ECG
- Napon baterije
- Unutarnji otpor baterije
- Periodi nepravilnog rada srca (pohranjeno u RAM-u)
- Broj stimulusa predan pacijentu (u određenom vremenu)
- Histogram patoloških događaja
- Podaci iz senzora adaptabilnih pacemakera....

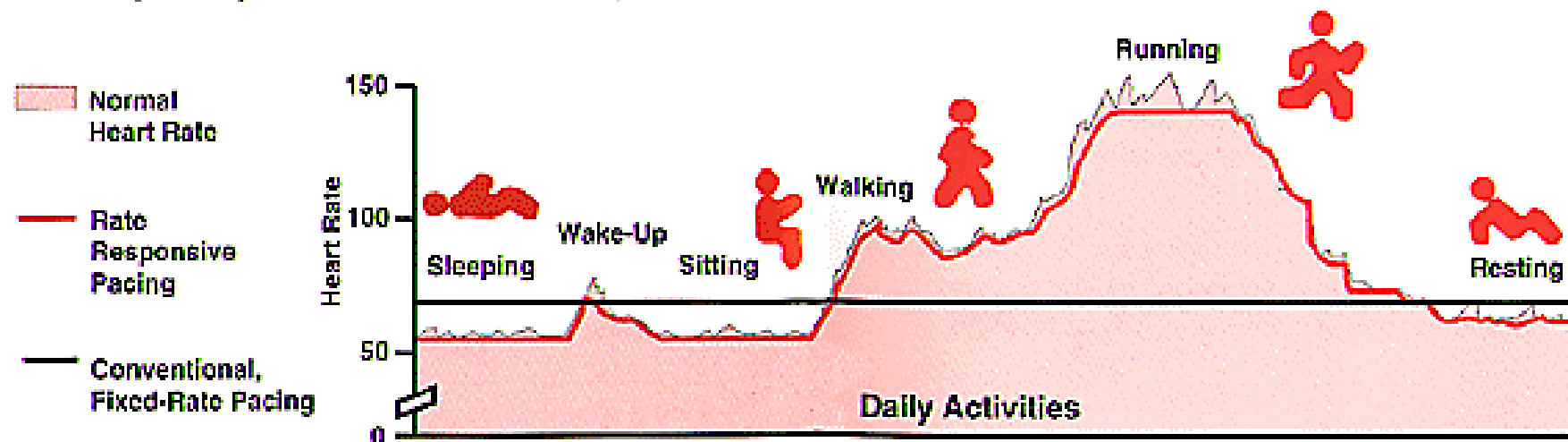
Prepoznavanje stimulusa u površinskom EKG-u



VVI / 60

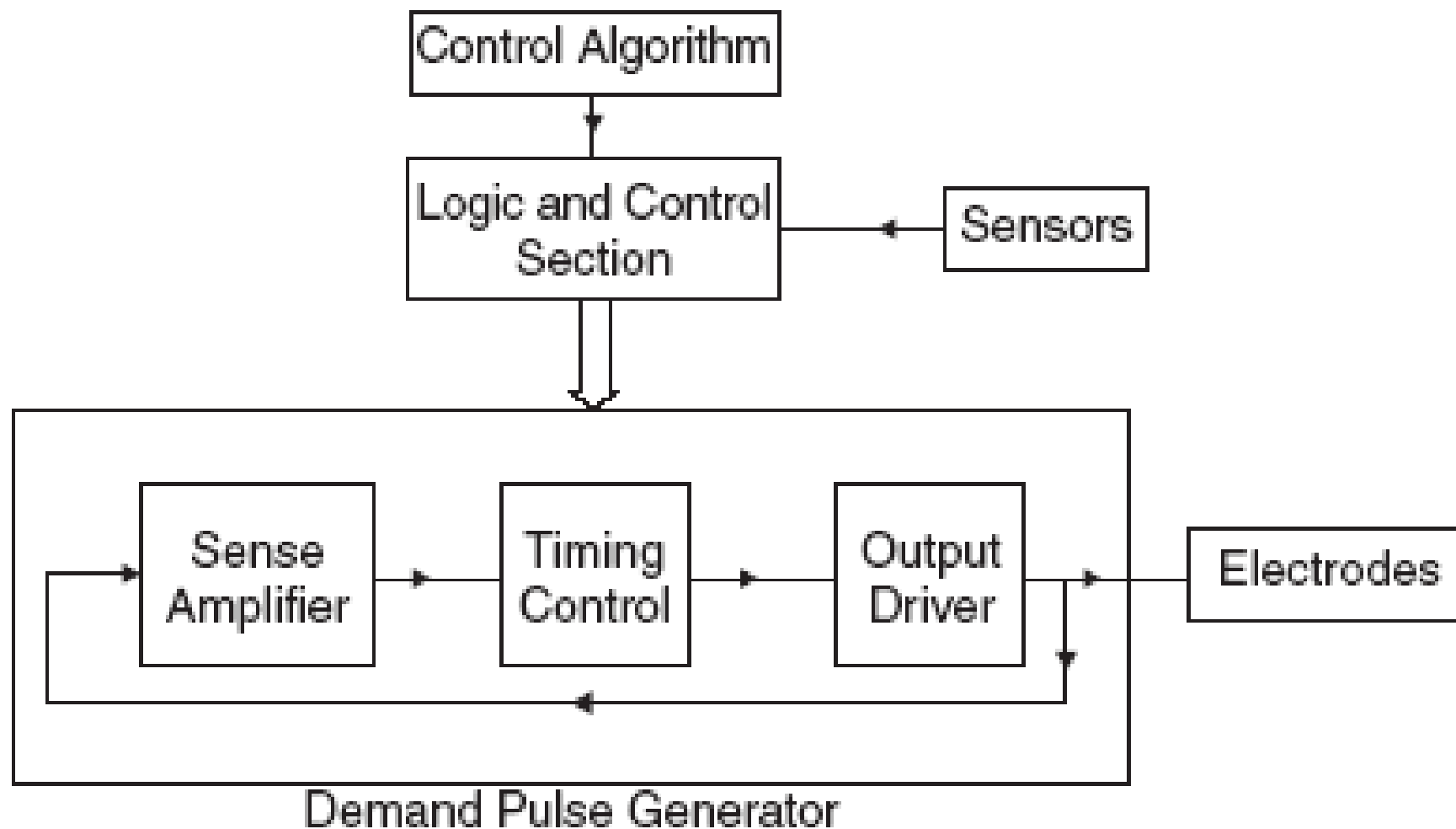
Frekvencijski adaptabilni elektrostimulatori

Adjusting Heart Rate to Activity



Usporedba rada pacemakera s fiksnom izlaznom frekvencijom i frekvencijski adaptabilnih pacemakera

Blok shema frekvencijski adaptabilnih pacemakera



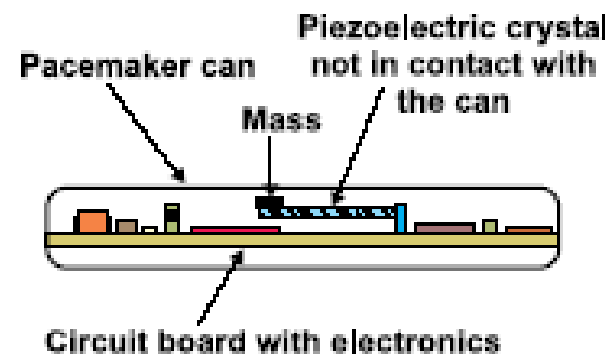
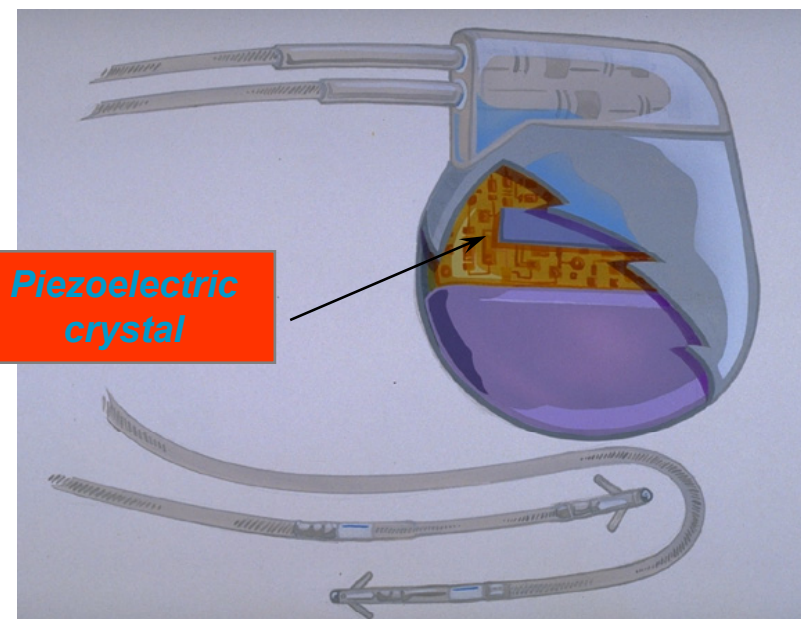
Senzori u frekvencijski adaptabilnim pacemakerima

Mjerenje:

- Akceleracija – pomicanje tijela, tjelesna aktivnost
 - Mikrofon – disanje – frekvencija disanja
 - Impedancijska pletismografija:
 - promjena volumena srca (uslijed kontrakcija)
 - frekvencija disanja / dubina (volumen) disanja
 - Intrakardijalni EKG (elektrode):
 - analiza QT segmenta
 - analiza R vala, površina
 - Krvni tlak
 - Termistori –temperatura krvi - protok
 - pH – koncentracija plinova
- Dvostruko senziranje – povećanje pouzdanosti

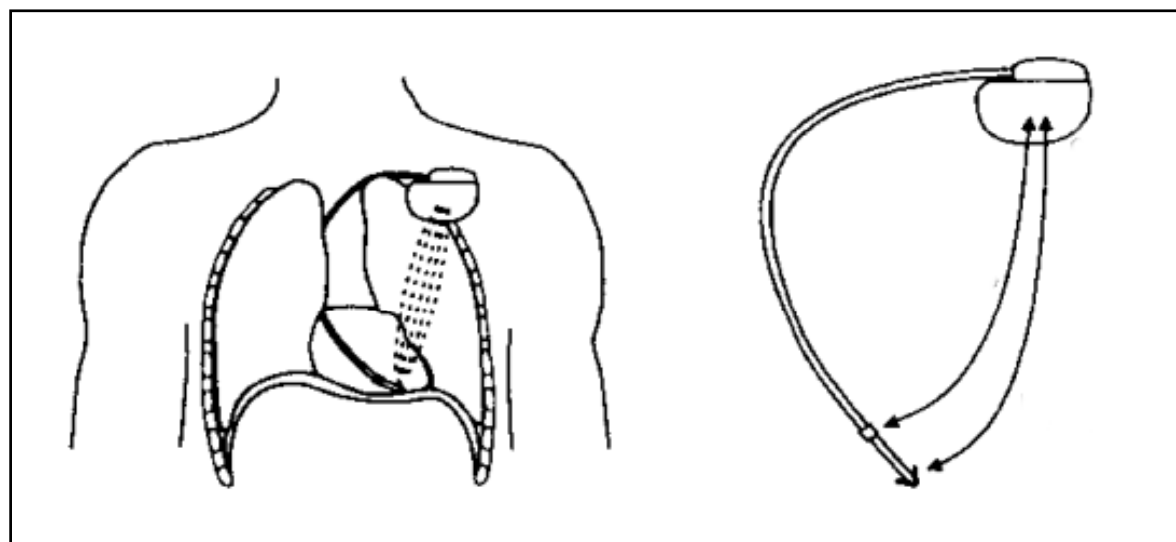
Frekvencijski adaptivna elektrostimulacija srca

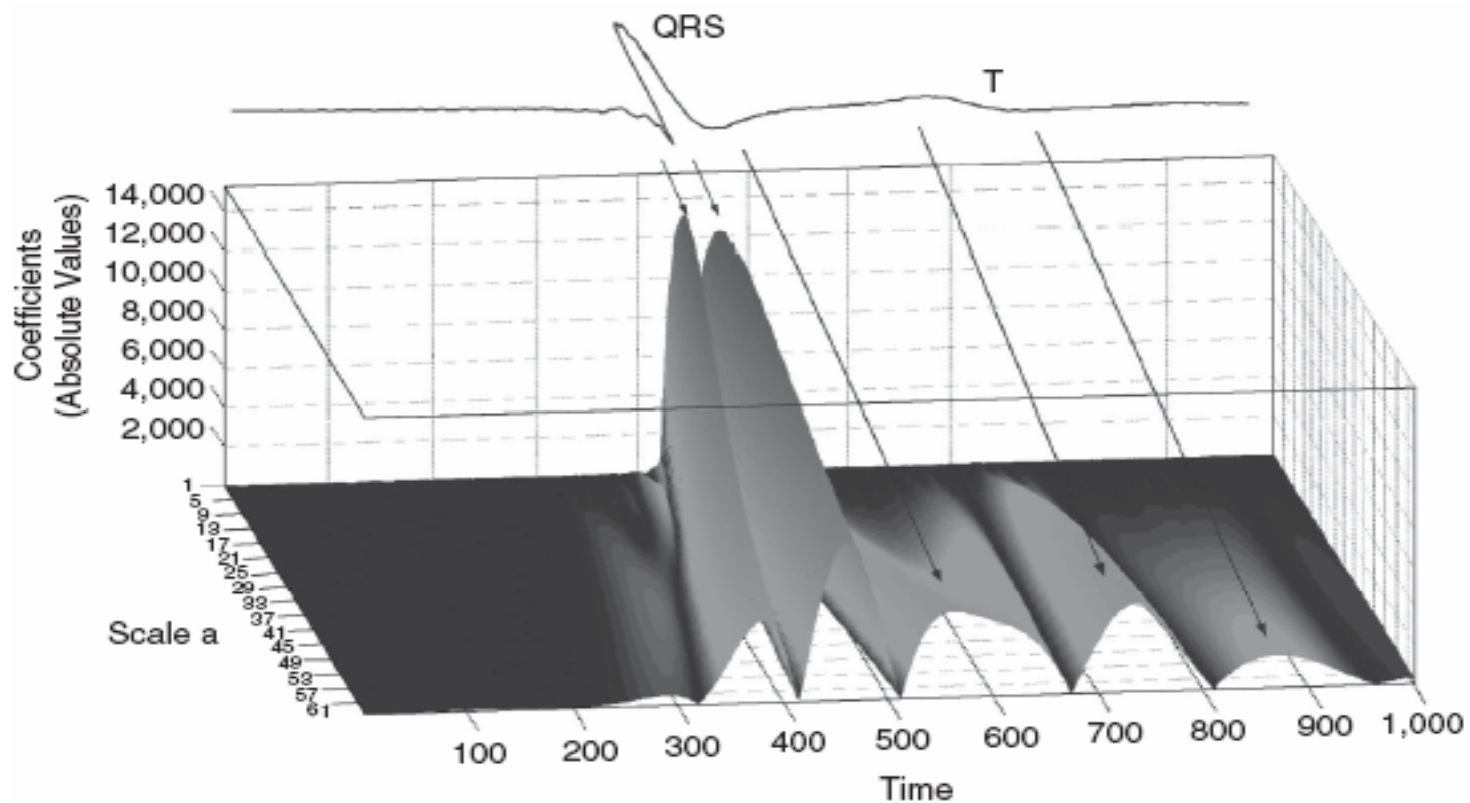
- Osjetilo aktivnosti s pomoću piezoelektričkog kristala koji mjeri signale proizvedene kretanjem pacijenta



Frekvencijski adaptivna elektrostimulacija srca

- Mjerenje minutnog volumena kod disanja može se postići mjerenjem promjena električne impedancije prsnog koša i izračunavanjem promjena volumena pluća



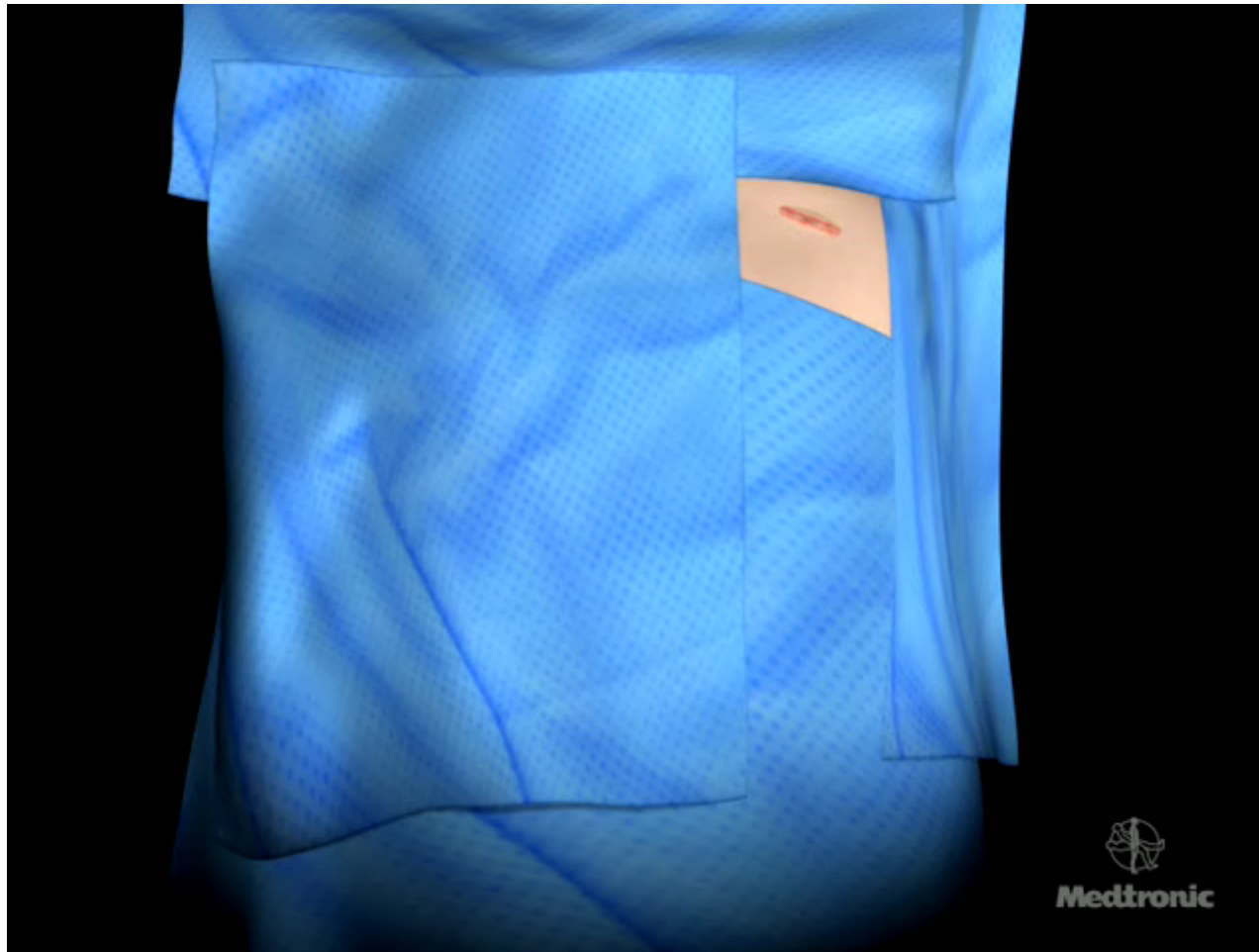


Obrada intrakardijalnog EKG-a:

Wavelet analysis of an intracardiac signal

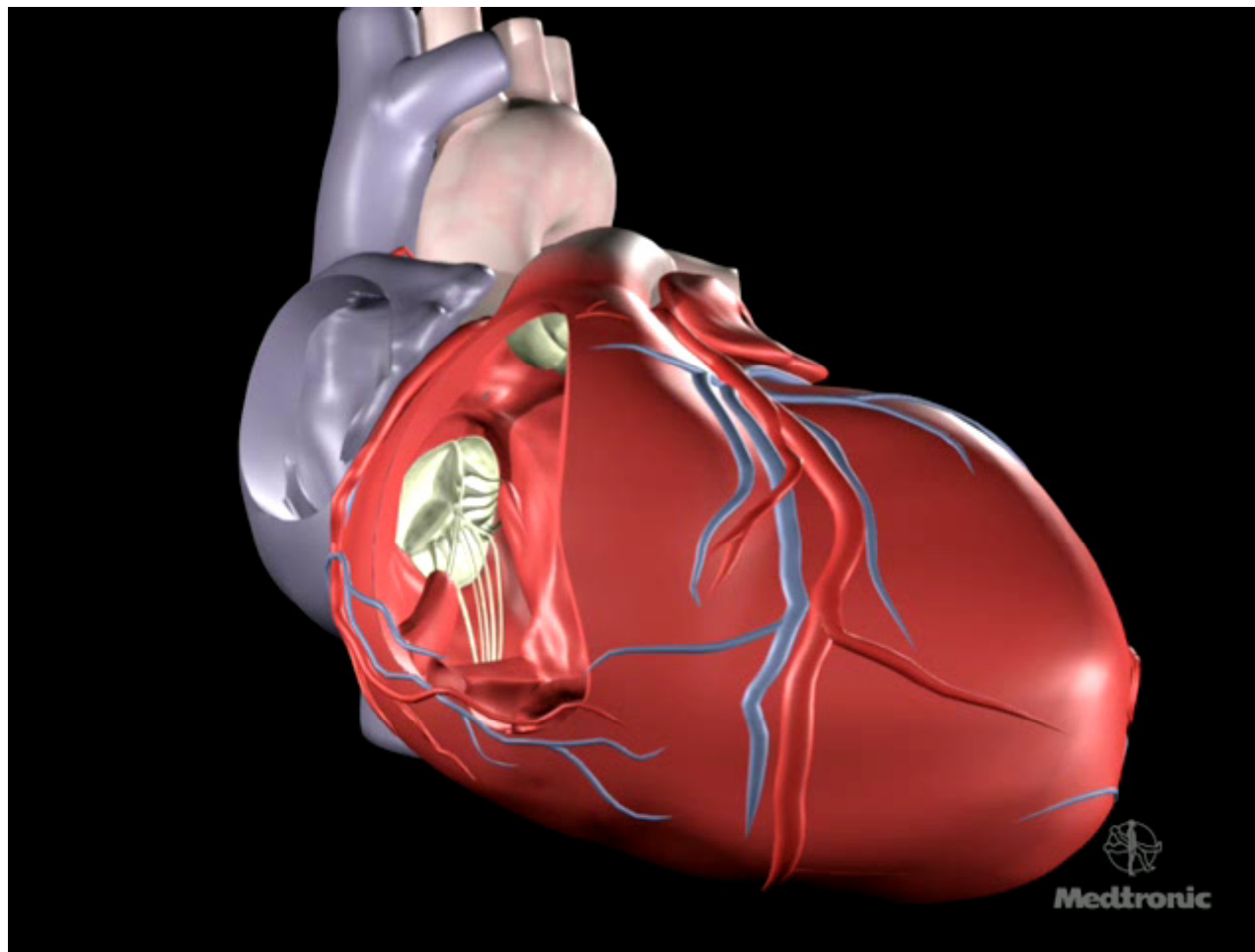
S. Haddad et al: The Evolution of Pacemakers, IEEE Magazine, May 2006

Implantacija elektrodnog katatera



Resinkronizacija rada srca

- Postavljanje elektroda za resinkronizaciju rada srca



Sažetak

- Električki impulsi koje generira sinus-atrijski čvor (prirodni pacemaker) stimuliraju srčani mišić i dovode do periodičkih kontrakcija kojima srce pumpa krv u krvožilni sustav.
- Kod nekih bolesti srca, dolazi do usporavanja (bradikardija) ili ubrzanja (tahikardija) rada srca. Obije pojave predstavljaju nepravilan rad srca.
- Elektrostimulator srca (pacemaker) zamjenjuje prirodnu električku aktivnost srčanih stanica i ubrzava rad bradikardičnog srca.
- Suvremeni pacemakeri mogu liječiti veliki broj bolesti msrca, pa i ubrzani ritam.
- Frekvencijski adaptivni pacemakeri stimuliraju srce frekvencijom sličnoj onoj koju pretpostavljamo da bi srce imalo u istim uvjetima fizičke aktivnosti pacijenta.

Literatura:

- Šantić, A., "Biomedicinska elektronika", Školska knjiga, Zagreb, 1995
- M. Schaldach: Advances in Pacemaker Technology, New York Univ Press, Monographs in Biomedical Engineering Series, 1994
- Brown, B.H. et al., "Medical Physics and Biomedical Engineering"., IoP Publishing, London, reprinted 2001.
- Webster, J.G. (Ed.), "Medical Instrumentation, Application and Design." 2nd ed., J. Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.
- Nelson, C.V., Geselowitz D.B., ur.: "The Theoretical Basis of Electrocardiography". Claredon Press, 1976.
- Webster, J.G. (Ed.), "Bioinstrumentation". John Wiley & Sons, Inc., New York, 2003