



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
**Biomedicinska instrumentacija**



# Biomedicinska instrumentacija

## P4 – Elektrostimulatori srca



Ak.god. 2011./2012.

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.

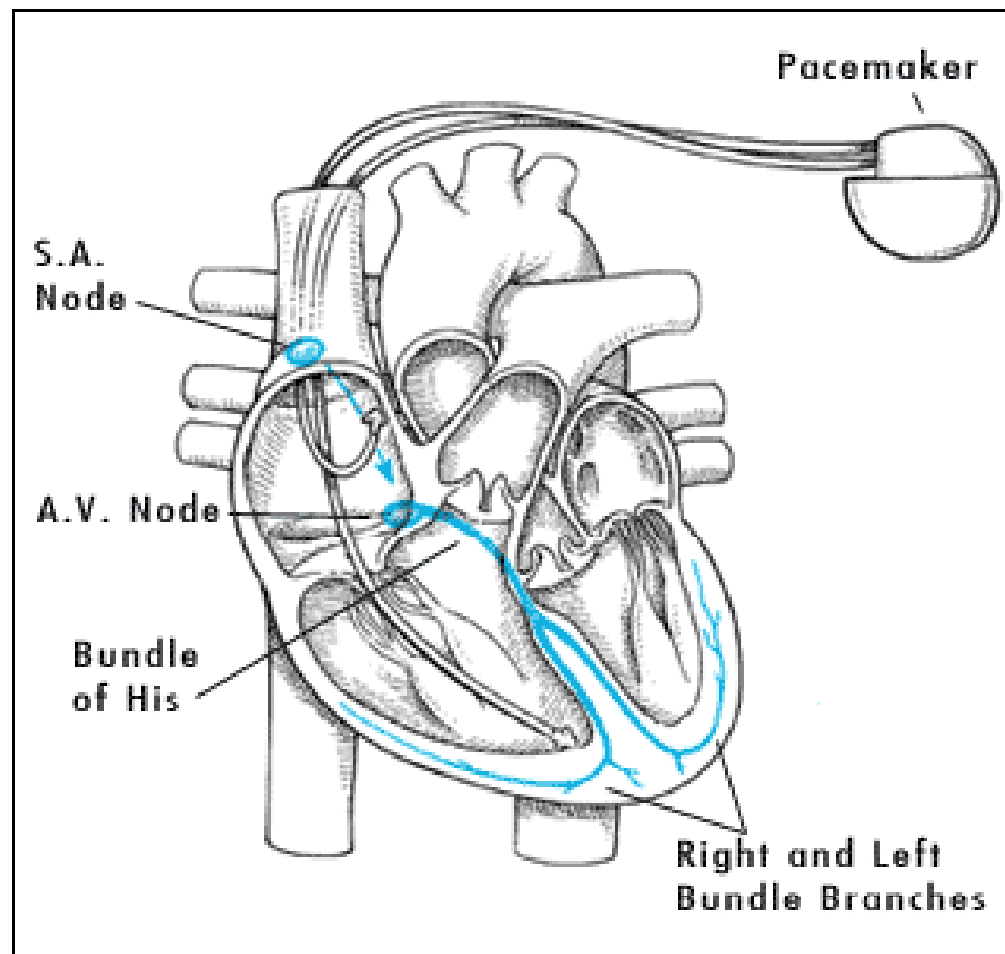
# Terapija srčanih bolesti

---

Terapija srčanih bolesti može se provesti:

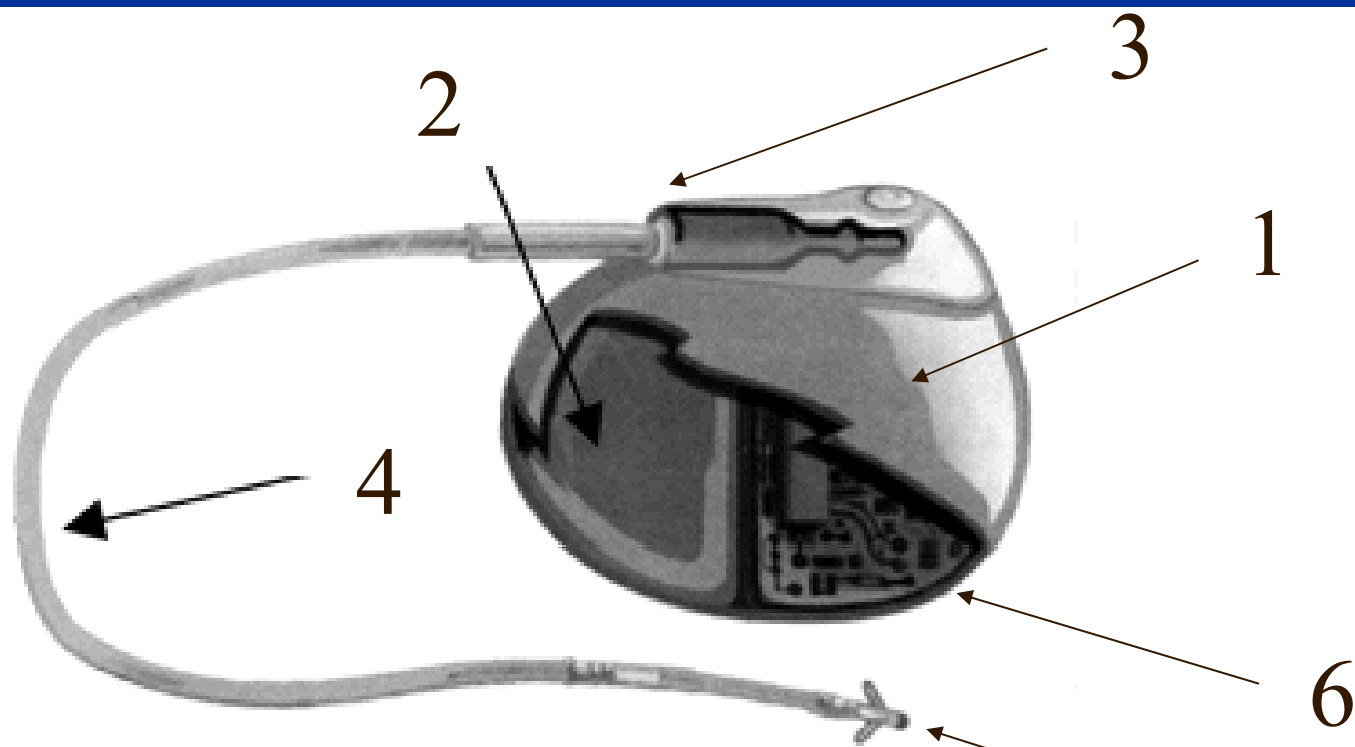
- lijekovima,
- kirurški,
- **električkom stimulacijom srca:**
  - akutna elektrostimulacija (npr. defibrilacija)
  - privremena elektrostimulacija (vanjska)
  - trajna elektrostimulacija
    - implantirani elektrostimulatori (pacemaker)
    - implantirani kardioverteri/ defibrilatori

# 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

2. Izvor napajanja

3. Konektor

4. Elektroдни kateter

5. Elektrode

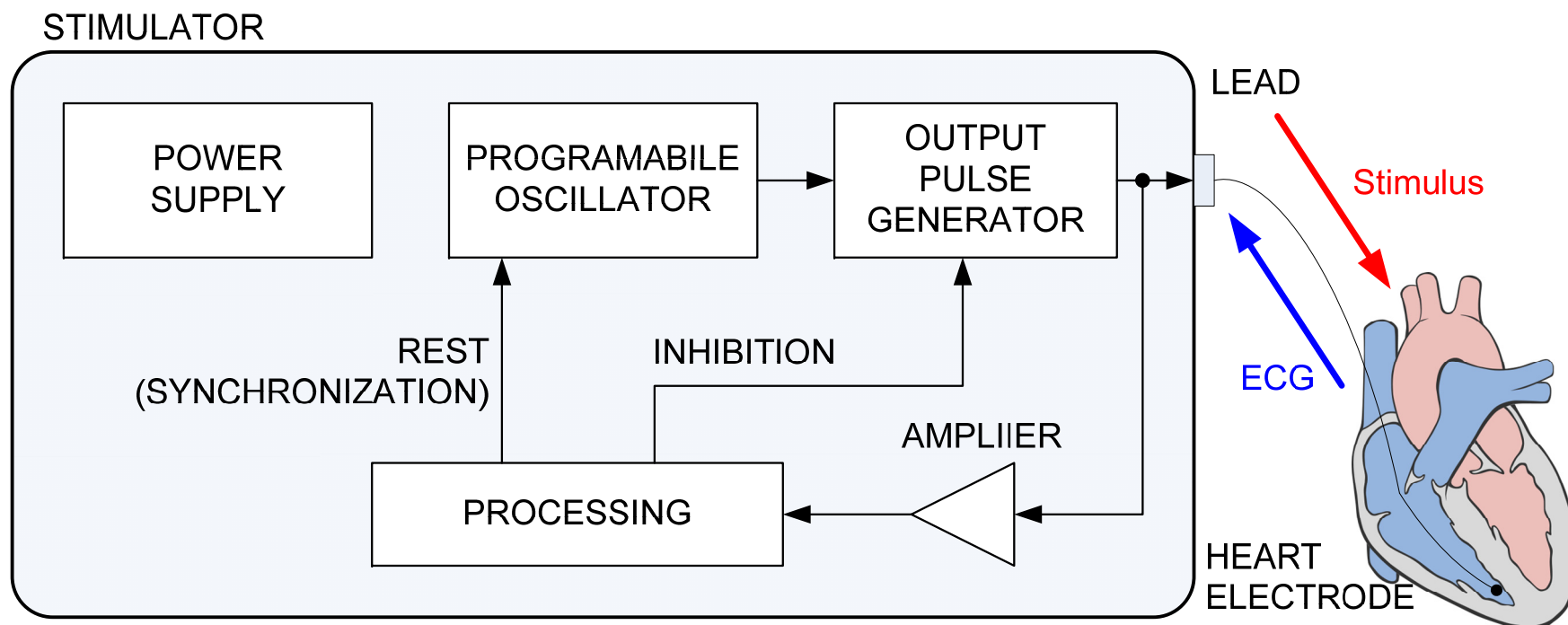
6. Elektronički sklopovi

# Načini rada elektrostimulatora srca

---

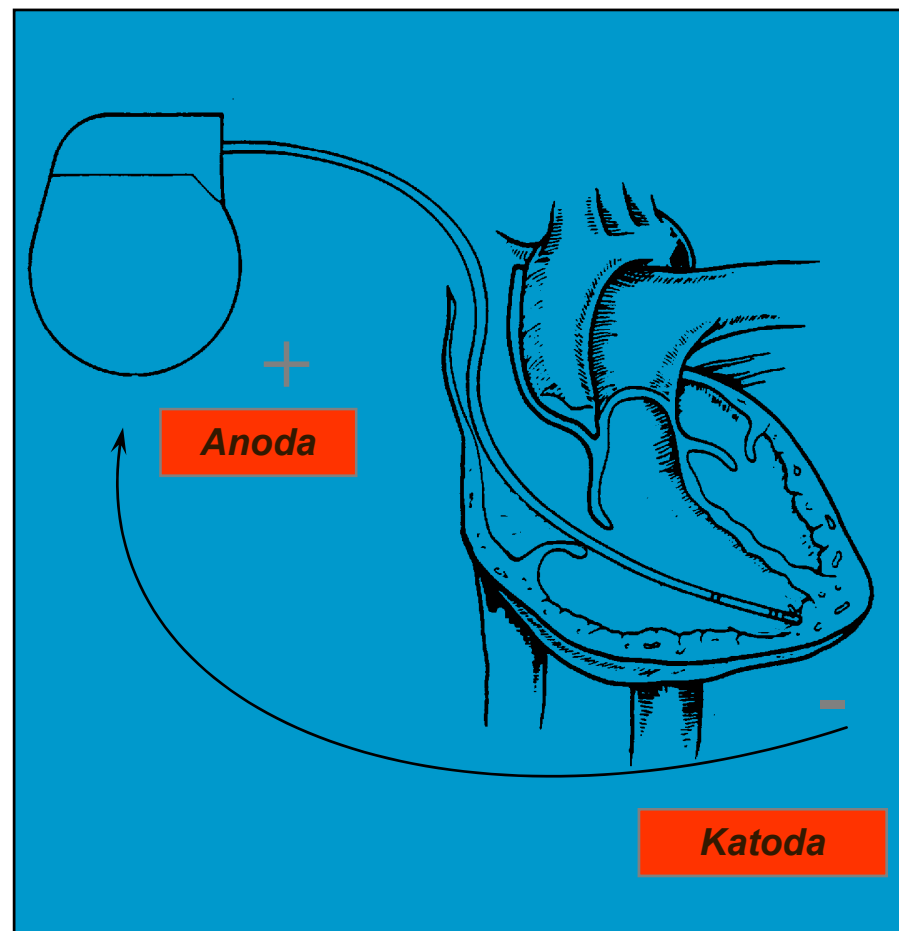
- Asinkroni (kompetitivni)
- Sinkroni (ne-kompetitivni):
  - sinkroni
    - na R val
    - inhibirajući na R val (on demand)
    - na P val
- Fiziološki, frekvencijski adaptivni = repeticija stimulusa prilagođuje se fizičkoj aktivnosti pacijenta

# Blok shema elektrostimulatora srca



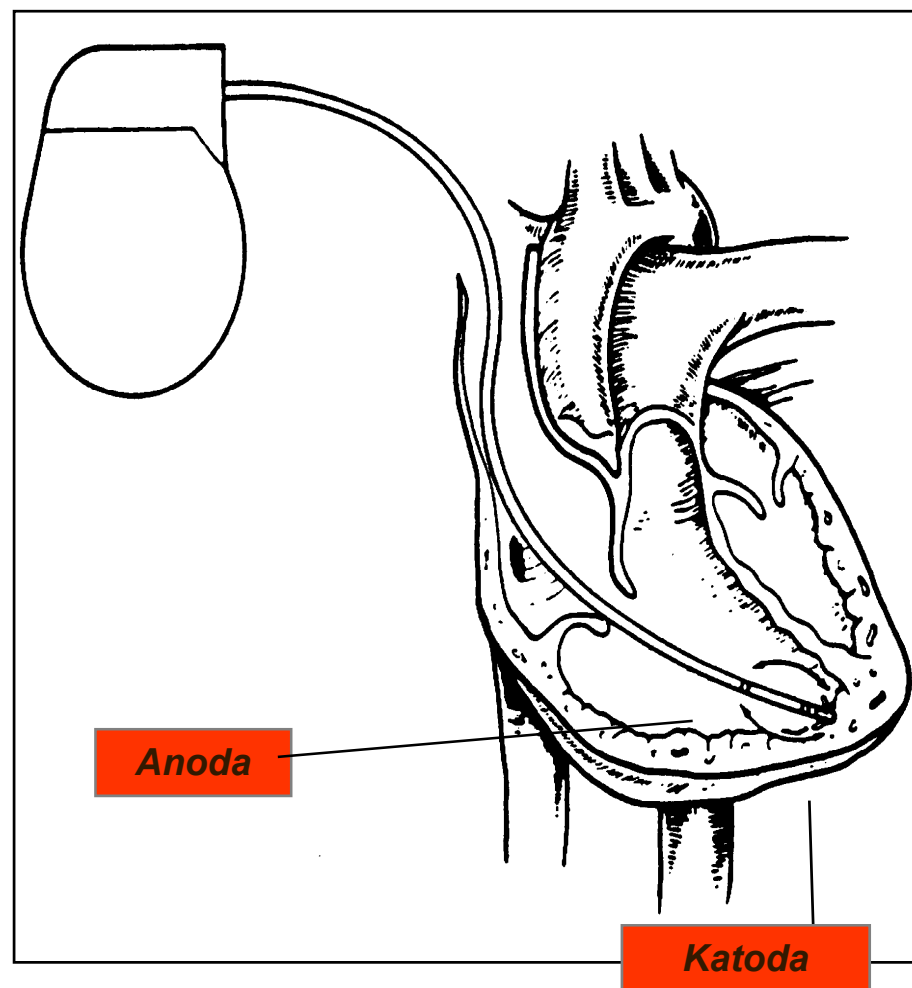
# Monopolarna (unipolarna) elektrostimulacija

- 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

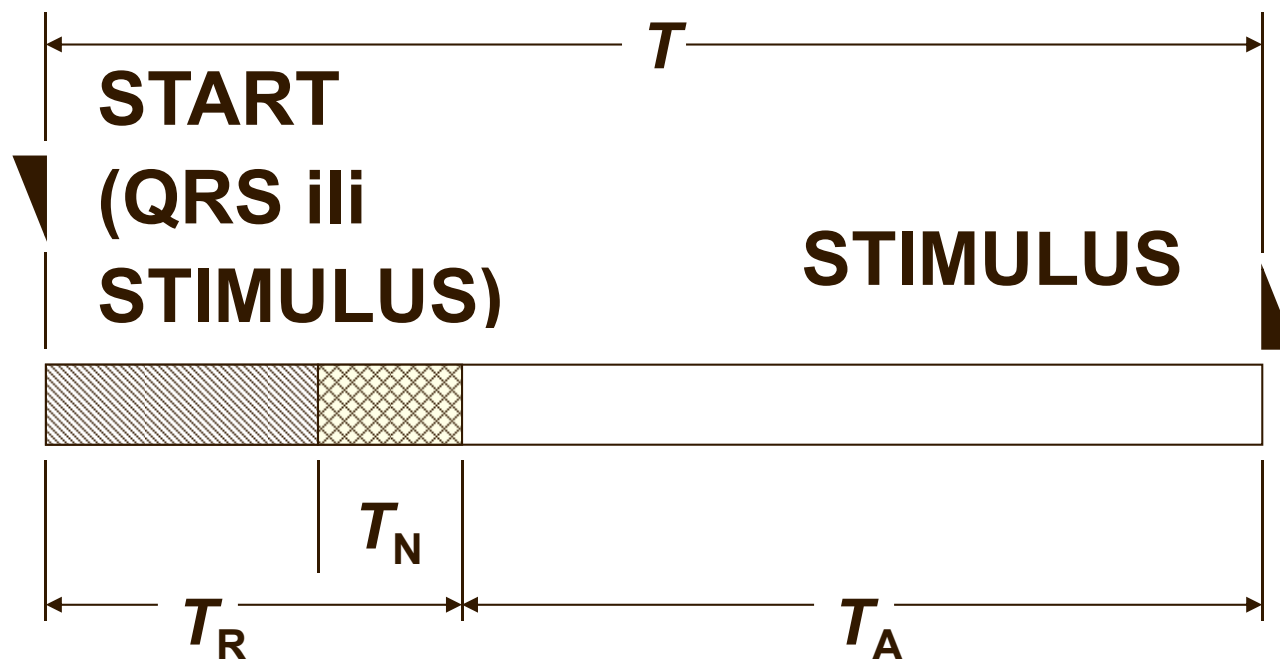


# Bipolarna elektrostimulacija

- 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



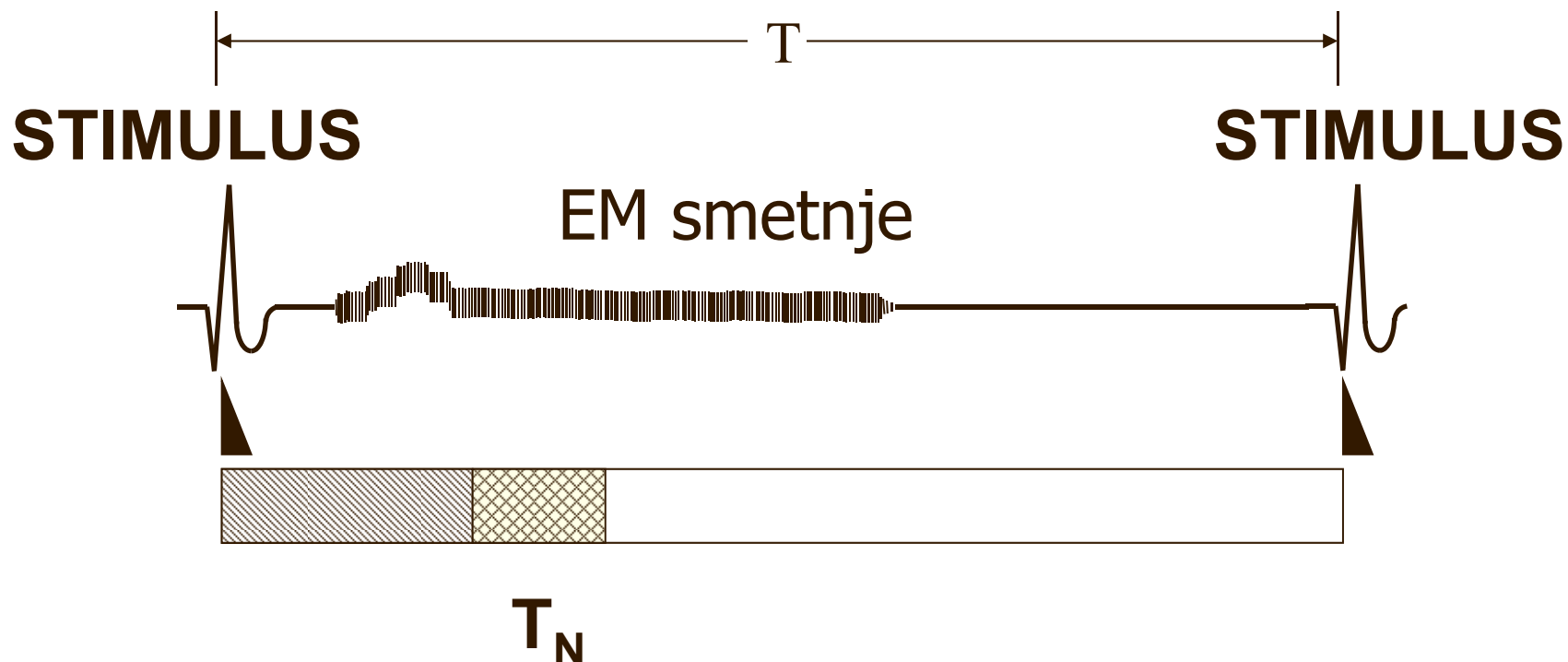
Pacemaker ima namještenu minimalnu vrijednost frekvencije izlaznih impulsa  $T$  (tipično 60 – 72 imp/min), kojim se u slučaju izostanka normalnog sinusnog ritma srca, osigurava opskrba organizma krvlju. Unutar jednog ciklusa između dvije kontrakcije klijetki  $T$ , bez obzira jesu li kontrakcije uzrokovane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

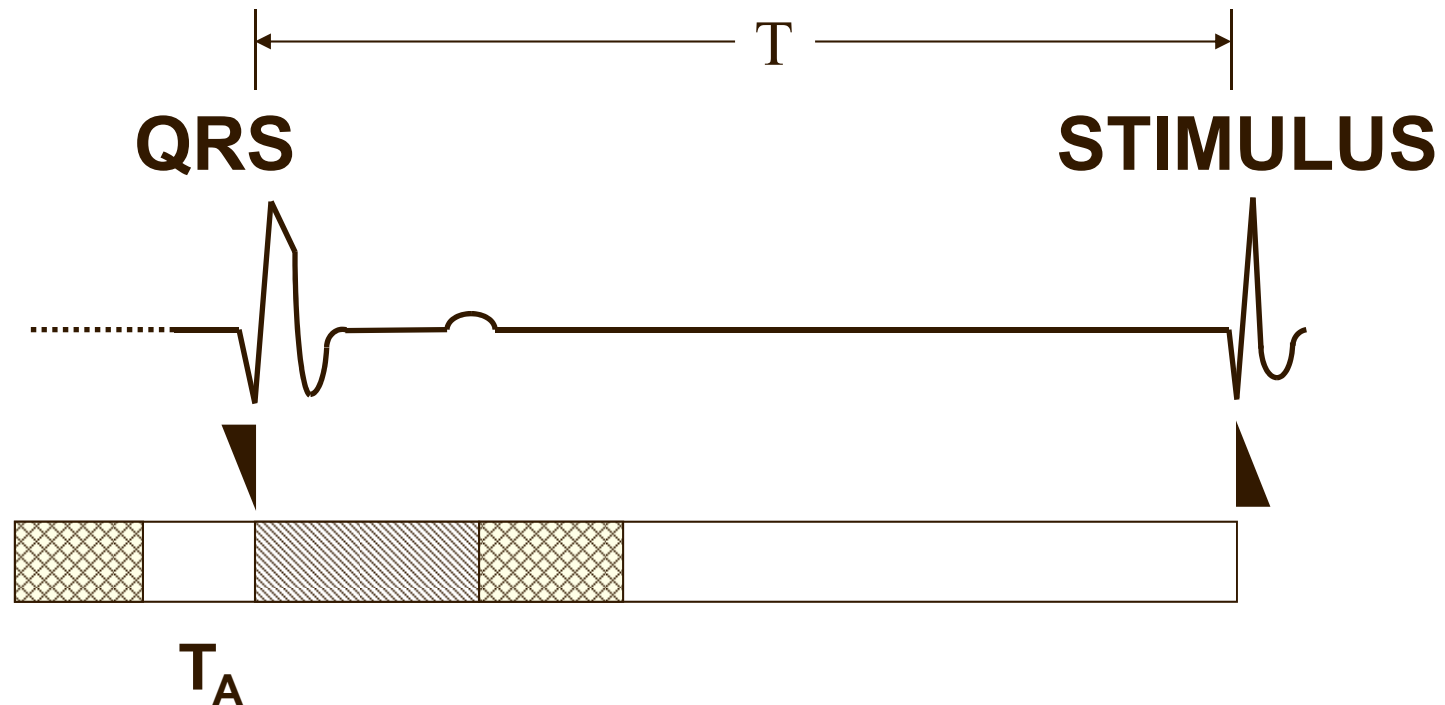
# Ispitni period



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

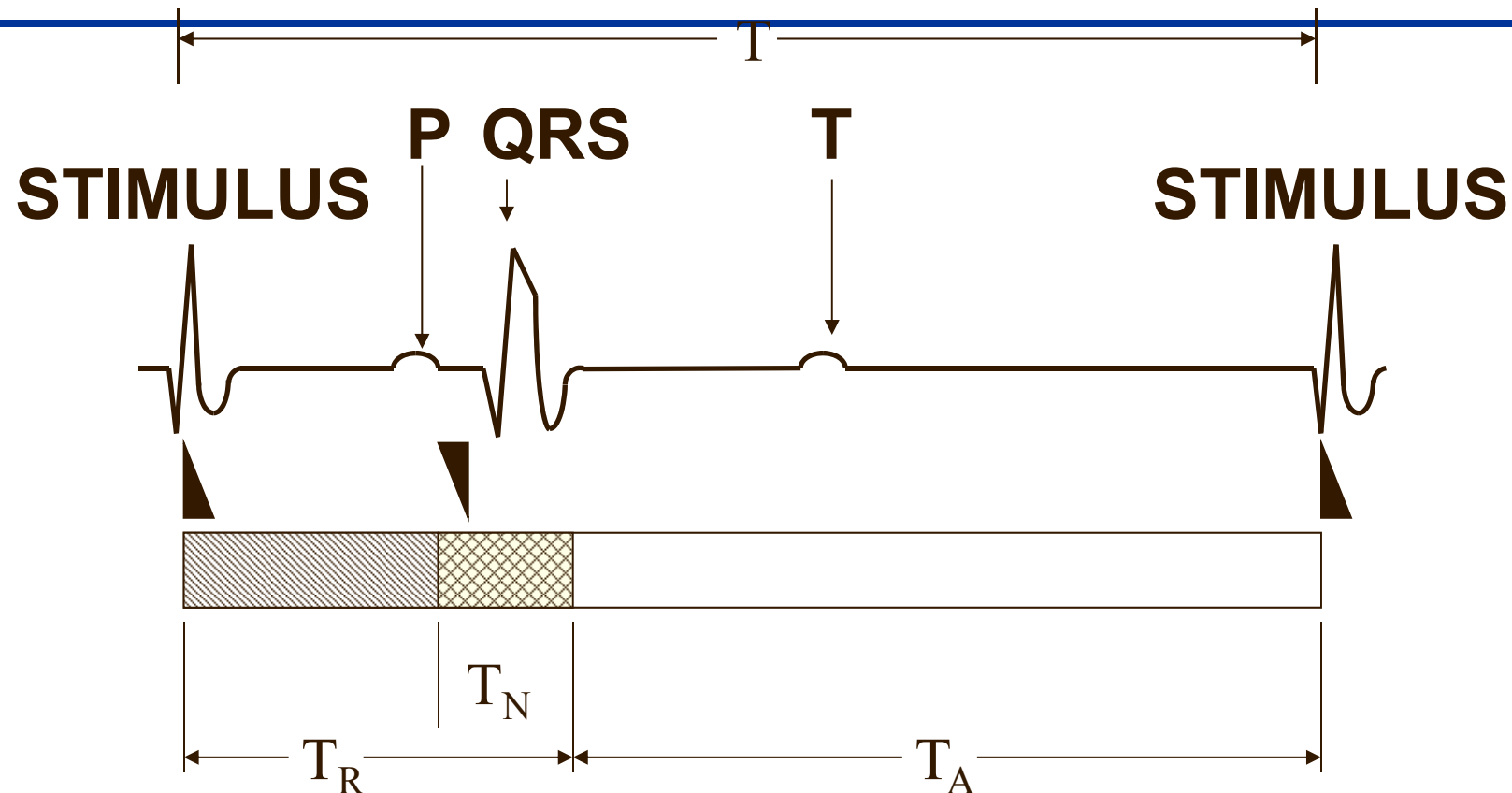
U slučaju detekcije pojave elektromagnetskih smetnji tijekom ispitnog perioda  $T_N$ , na kraju ciklusa  $T$  izlazni stupanj pacemakera generirati će stimulus. Pojava spontane aktivnosti srca (QRS) u periodu pripravnosti se zanemaruje.

# Period pripravnosti



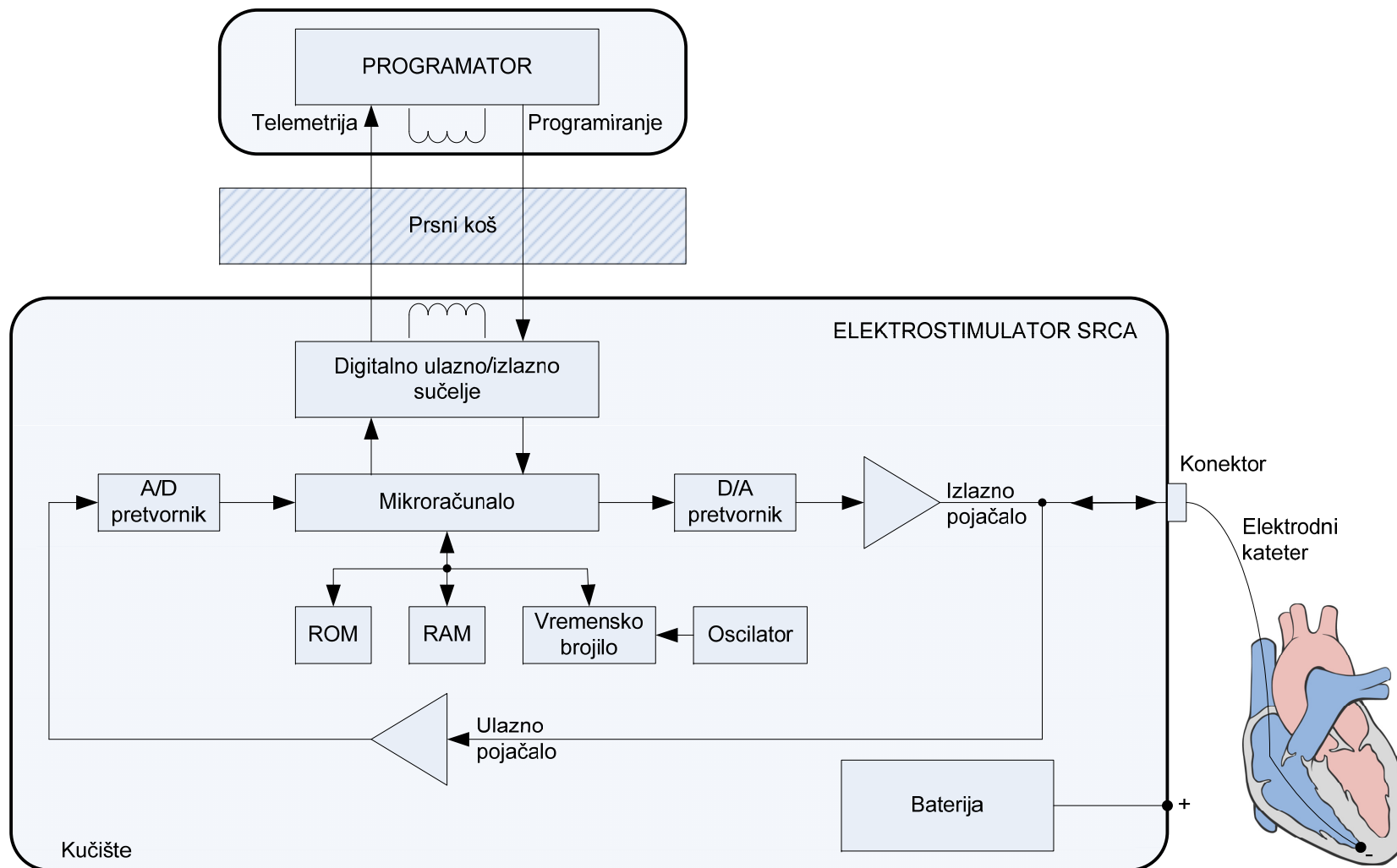
**Pojava spontane aktivnosti srca (QRS) tijekom perioda pripravnosti  $T_A$  prekida (resetira) temeljni ciklus trajanja  $T$  i započinje novi ciklus**

# Ispitni period - spontani QRS



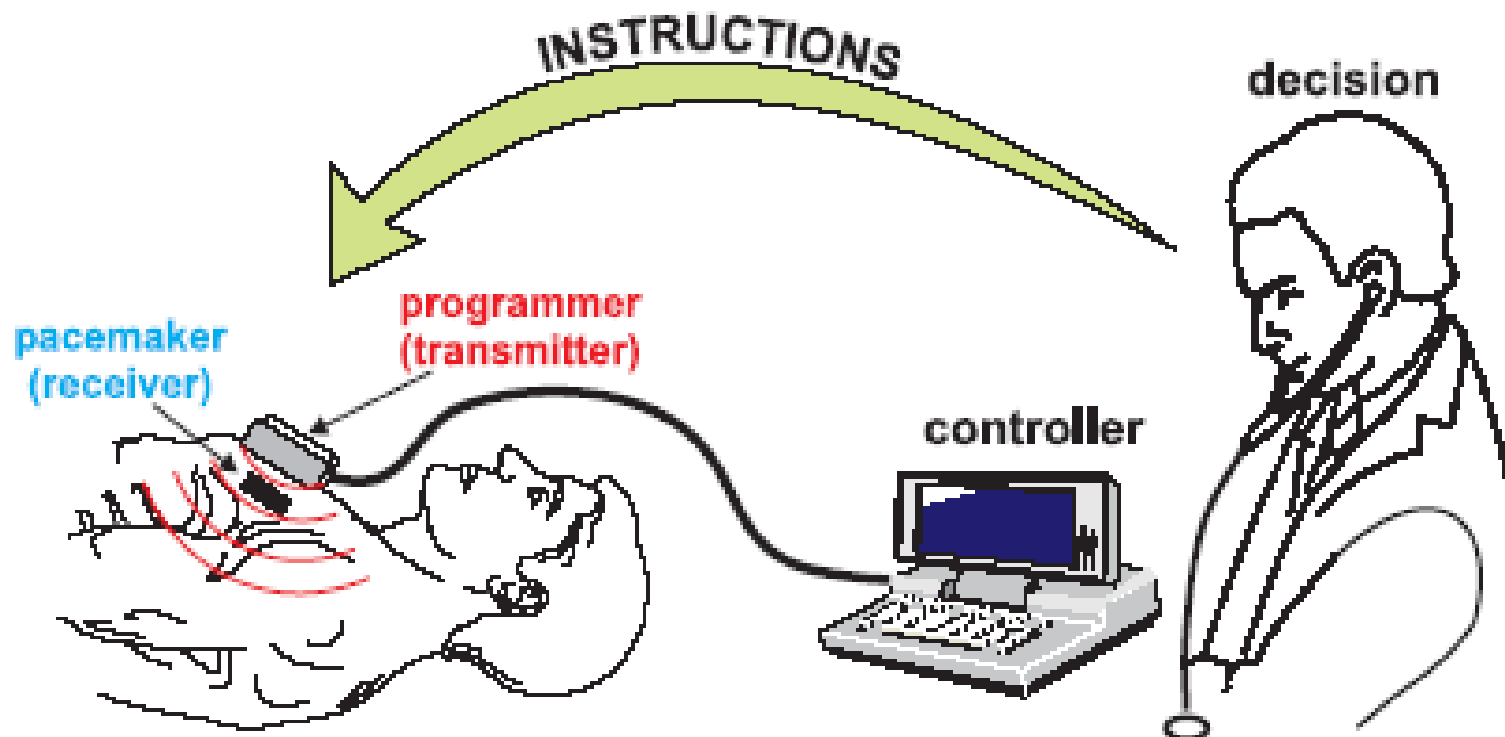
**Pojava spontane aktivnosti u ispitnom periodu interpretira se na isti način kao i pojava smetnje, tj. uzrokuje pojavu stimulusa na kraju ciklusa**

# Blok shema - Multiprogramabilni stimulator



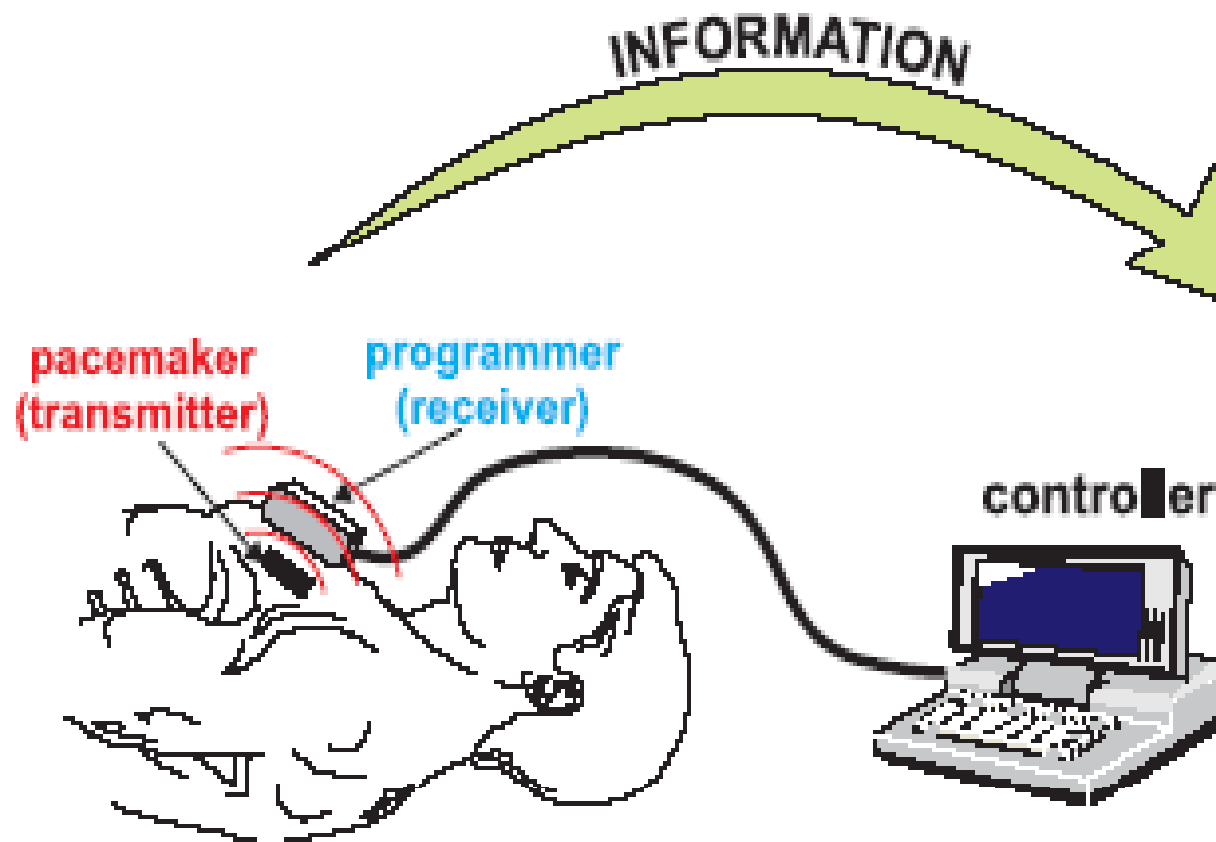
# Programiranje pacemakera

**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

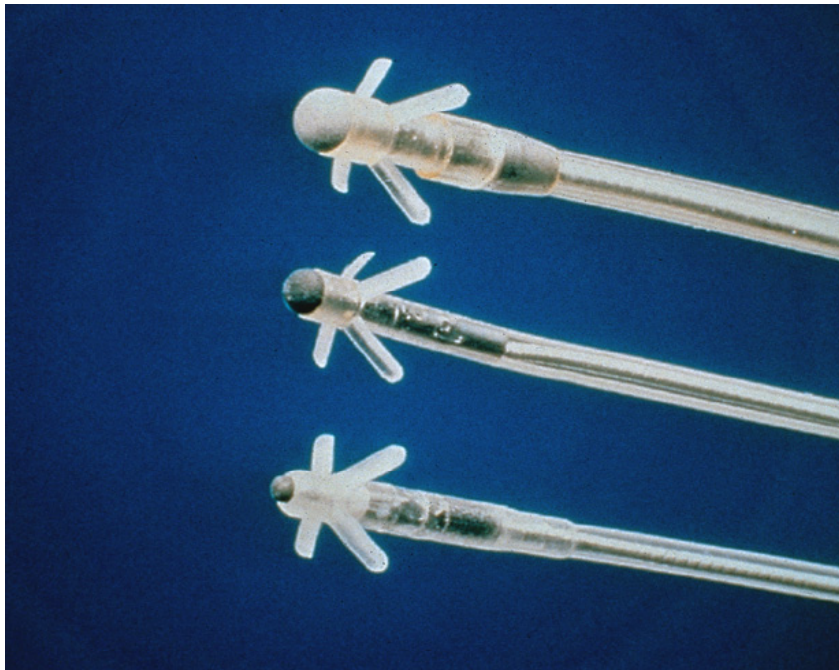


Intramiokardijalna elektroda

Načini pričvršćivanja:

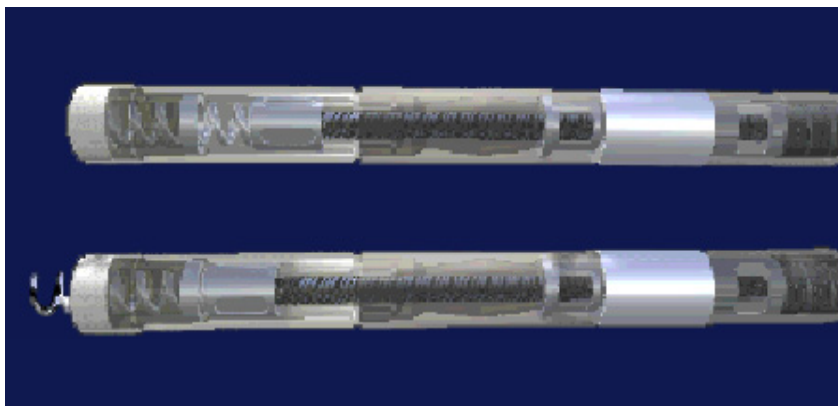
- epikardijalni (na površini srca)
- intramiokardijalni – pričvršćeni u unutrašnju stijenku srca
- endokardijalni ili intraluminarni - pritisnuti na unutrašnju stijenku srca

# Endokardijalna elektroda



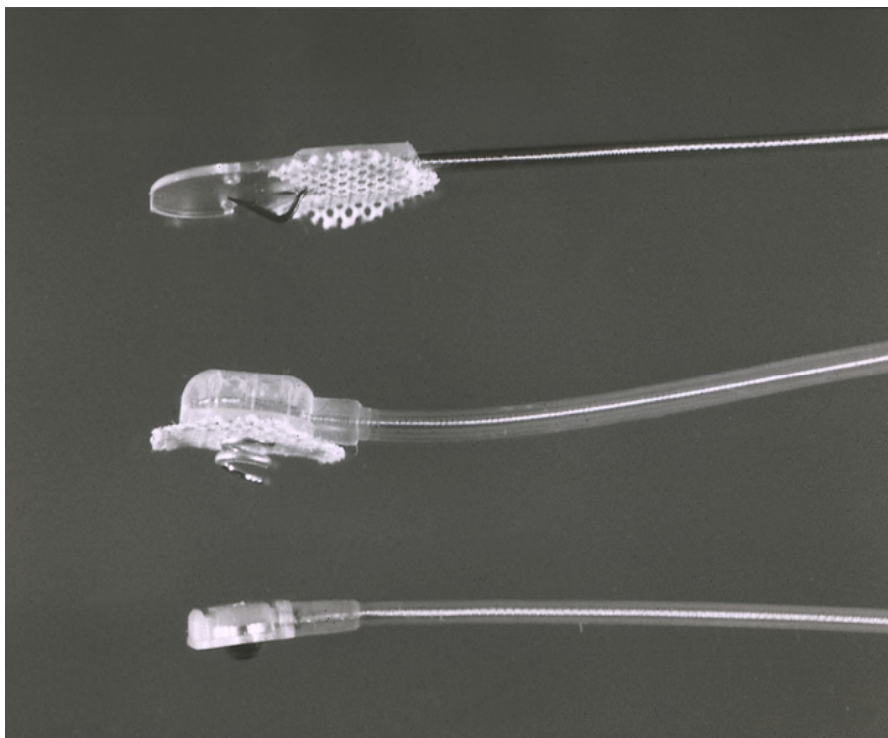
- Naziva se i elektrodom s pasivnim pričvršćivanjem (passive fixation)
- Hvataljke se poput sidra uhvate za vlakna s unutrašnje strane klijetke (trabeculae, (fibrozna vlakna))

# 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

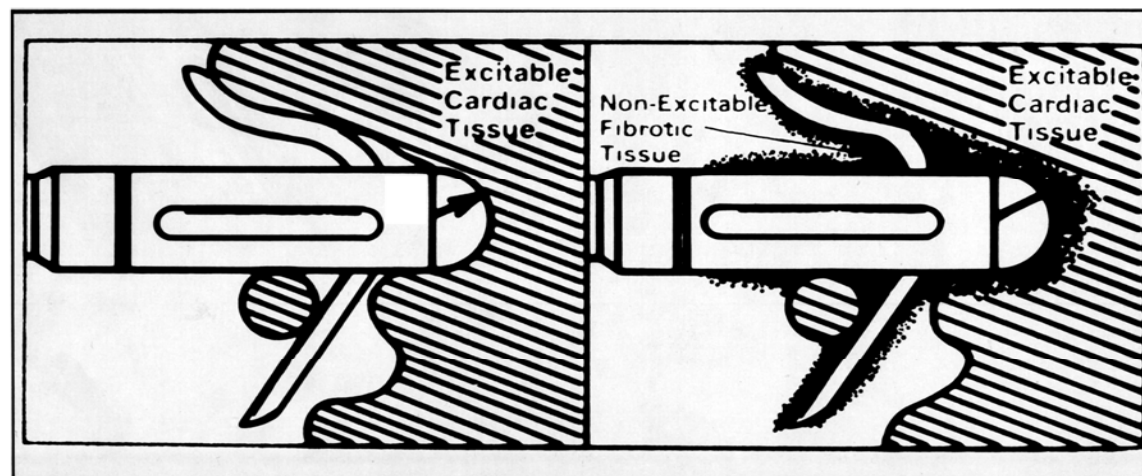
Porozna površina: omogućuje se polagano izlučivanje steroida\* iz malih spremnika smještenih u unutrašnjosti vrha elektrode

(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

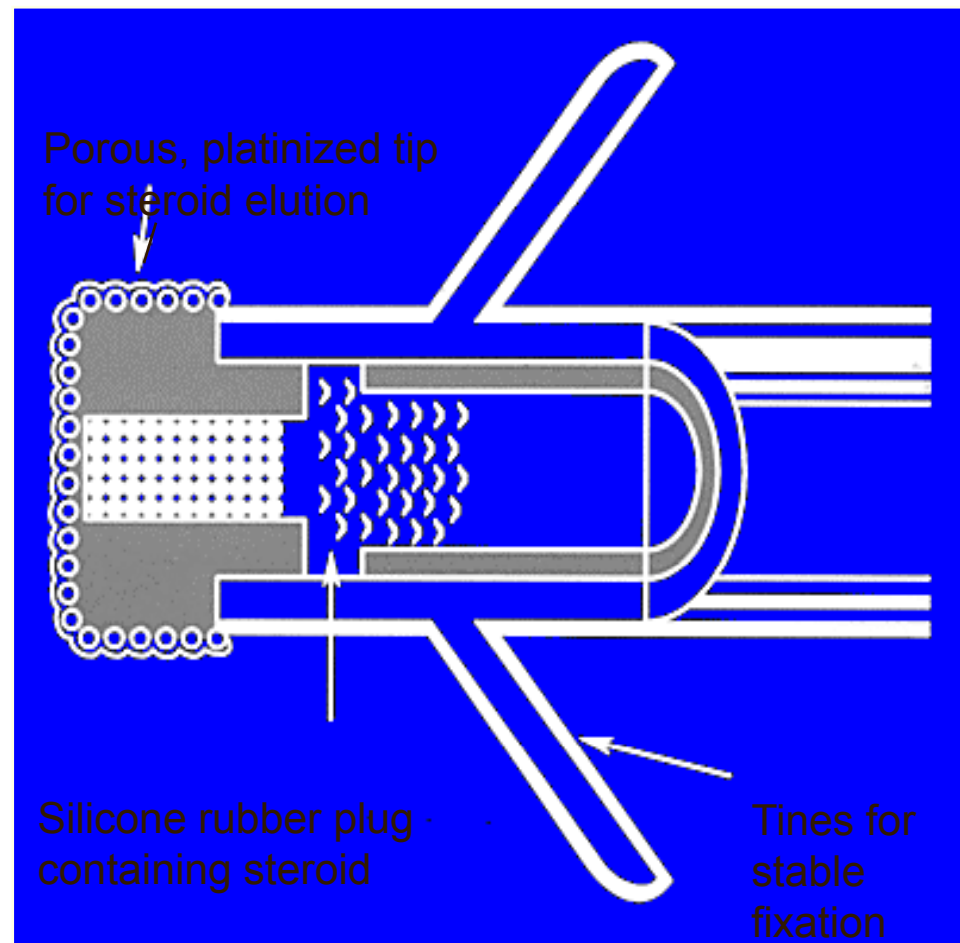


**Acute**

**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  $\kappa$  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  $10\text{mm}^2$  to  $100\text{mm}^2$ .

# 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

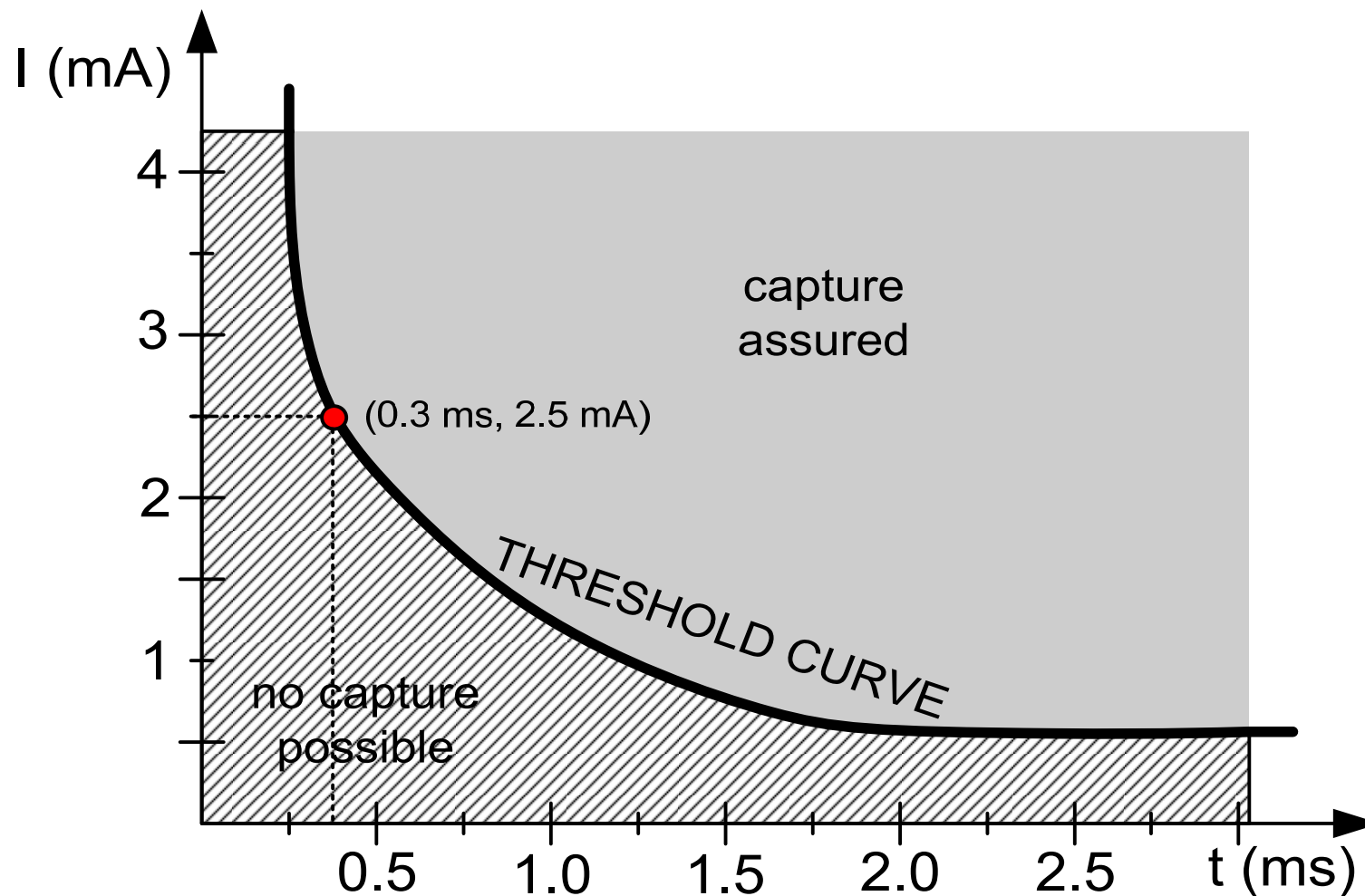
Eksponencijalni (teorijski)

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

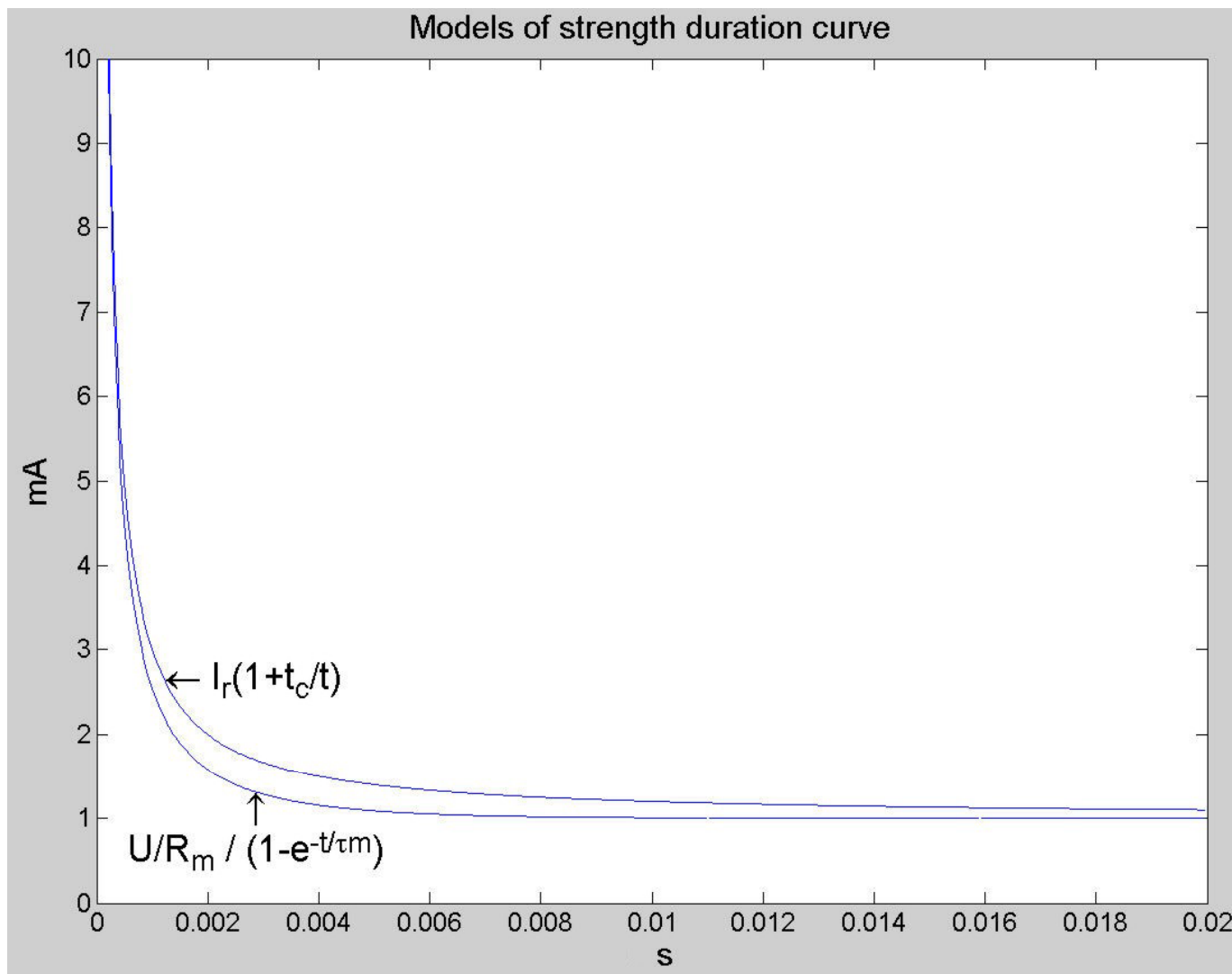
$R_m$  – otpor membrane

$\tau_m$  – vremenska konstanta membrane

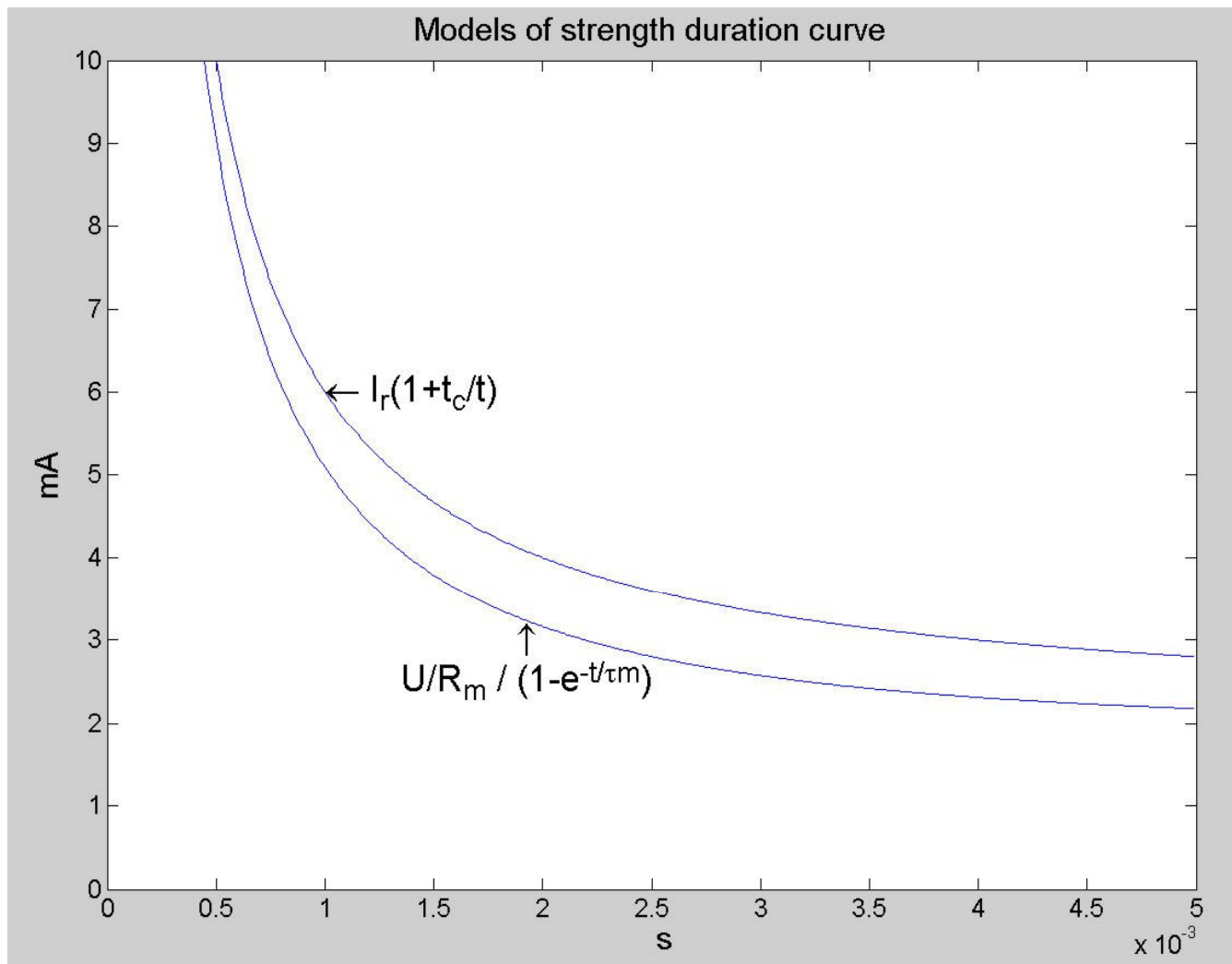
# Krivulja podražljivosti



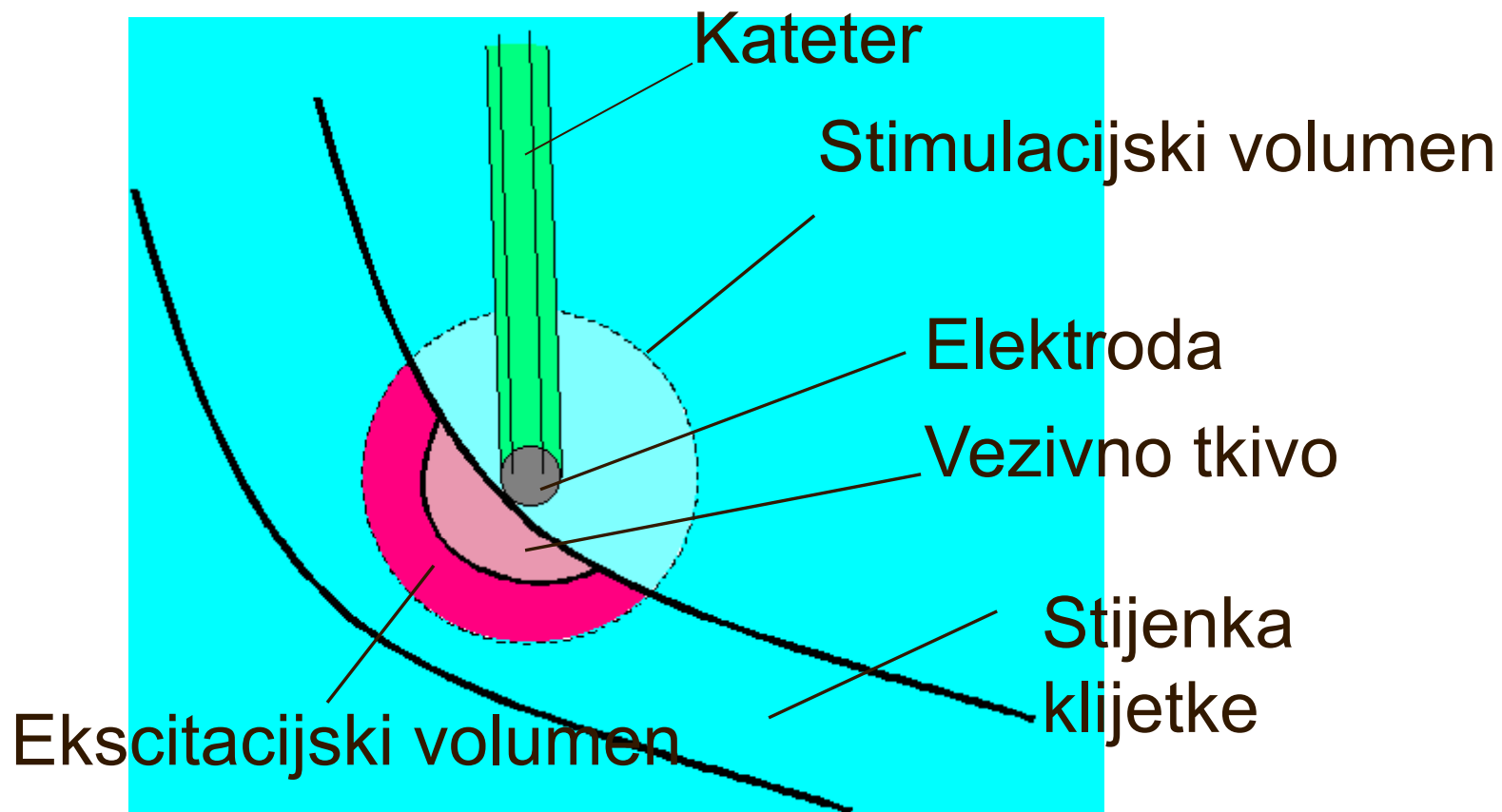
# Razlika u modelima



# 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:  $200 \times 10^6$  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

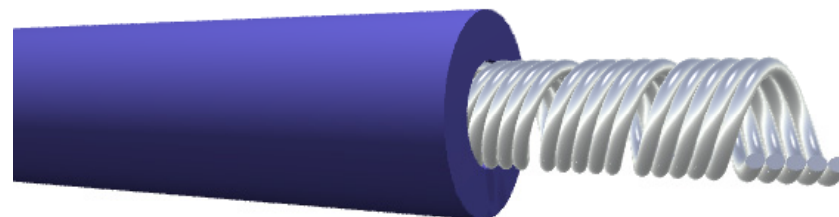
Prag podražljivosti mjeri se za vrijeme implantacije.

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?

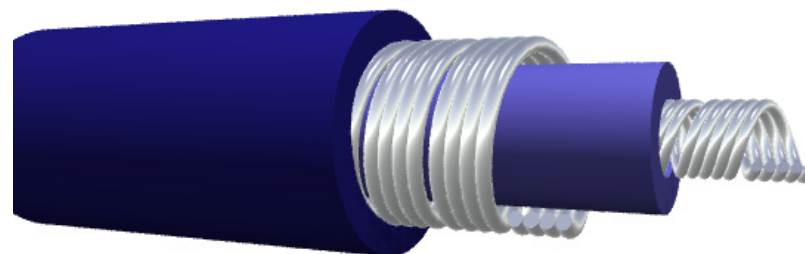
# Građa monopolarnih katektera

- 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

---

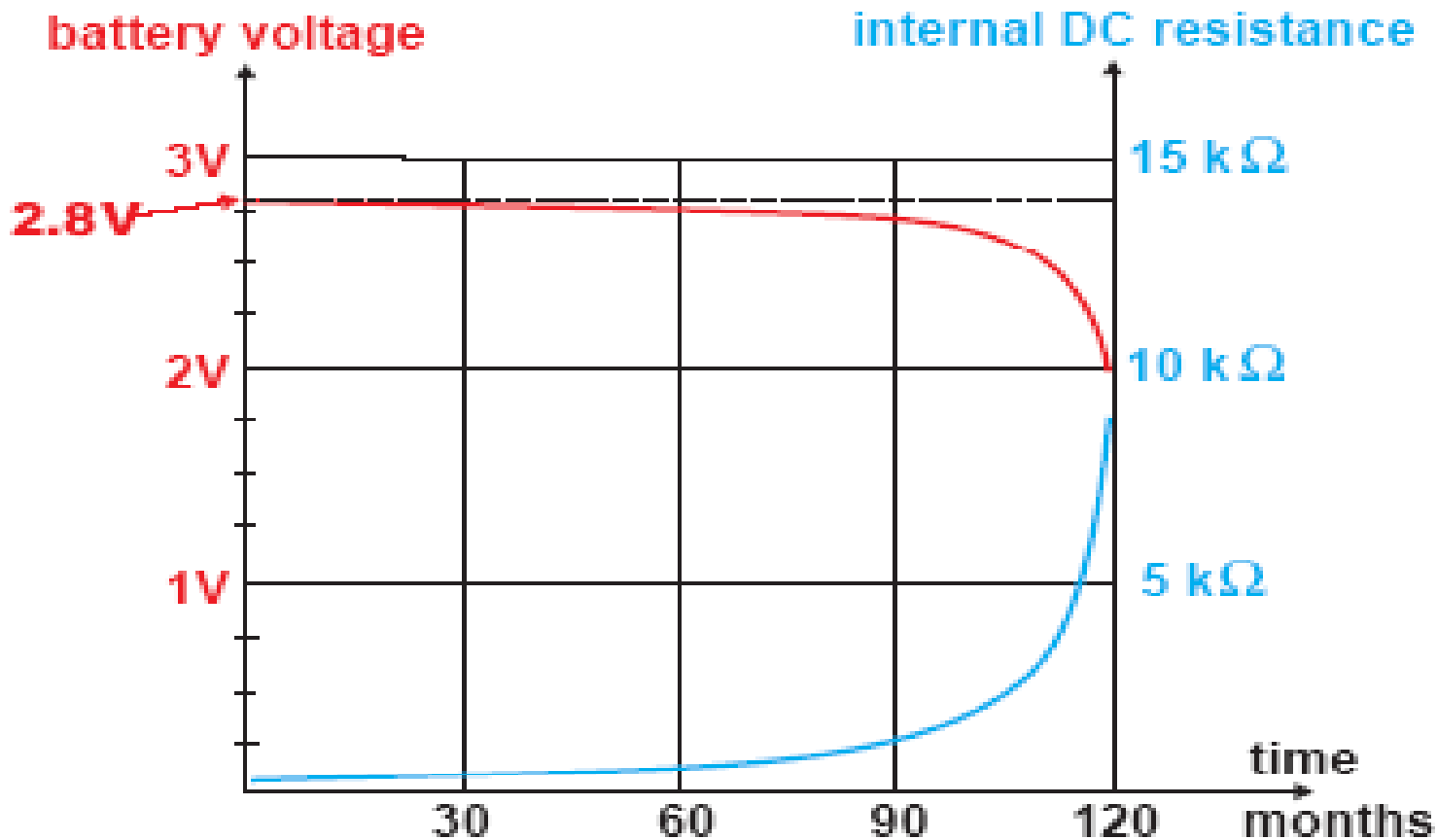
Elektronički sklopovi i mikroprocesor izvode se u tehnologiji male potrošnje, tipično CMOS

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

---

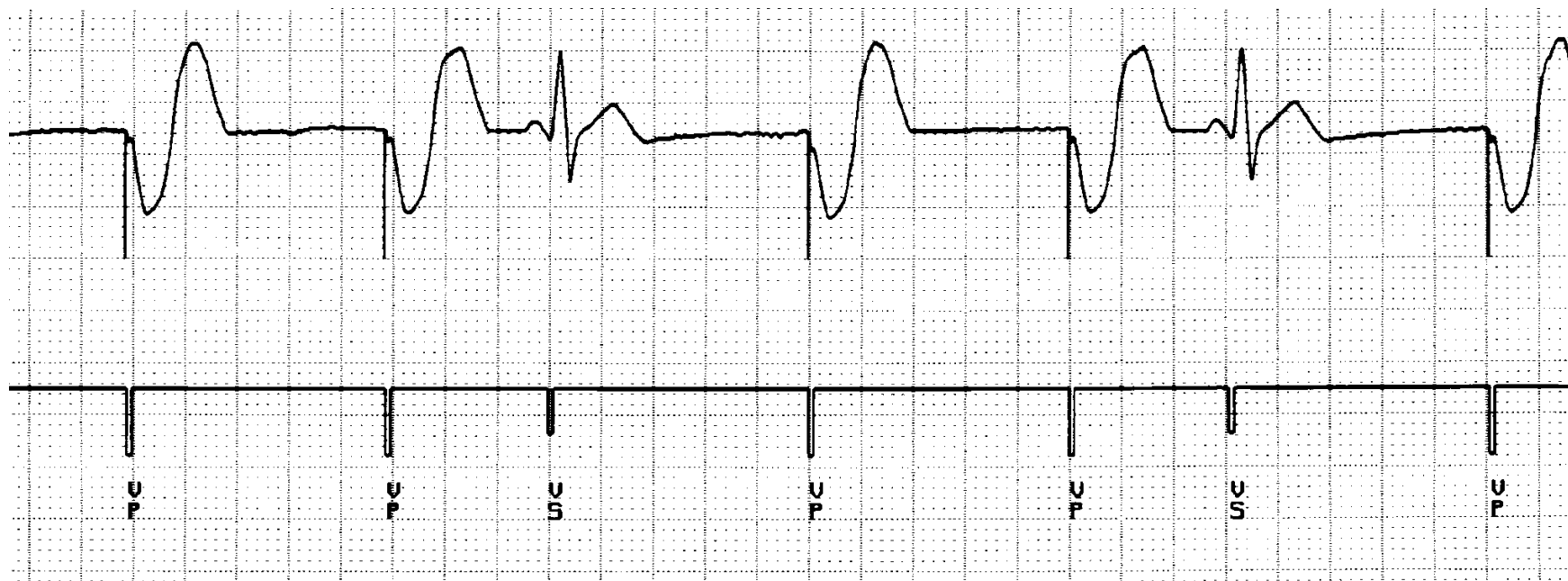
- Amplituda izlaznih impulsa
- Trajanje izlaznih impulsa
- Osjetljivost ulaznog pojačala
- Frekvencija izlaznih impulsa
- Način rada (asinkr., sinkr., ...)
- Trajanje refrekternog perioda
- Trajanje ispitnog perioda
- Trajanje perioda pripravnosti
- Algoritam koji se koristi za frekvencijsku adaptabilnost

# 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....

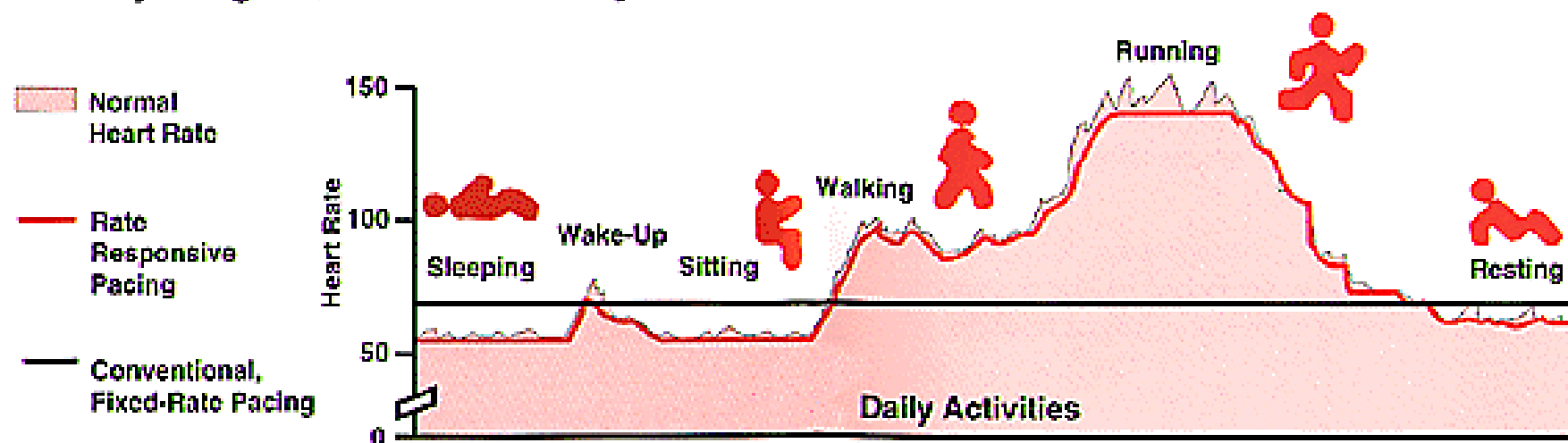
# Prepoznavanje stimulusa u površinskom EKG-u



VVI / 60

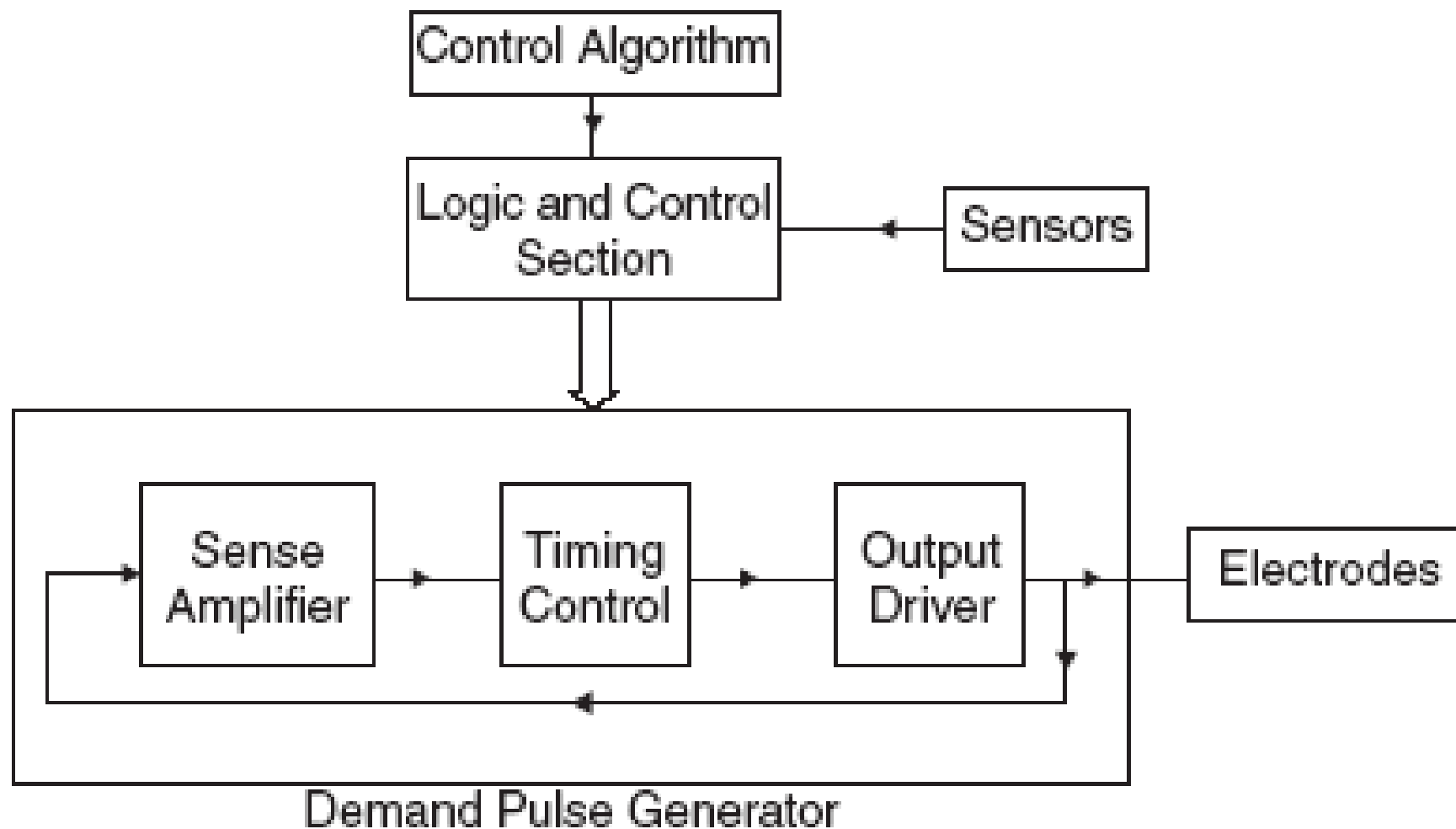
# Frekvencijski adaptabilni elektrostimulatori

## 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

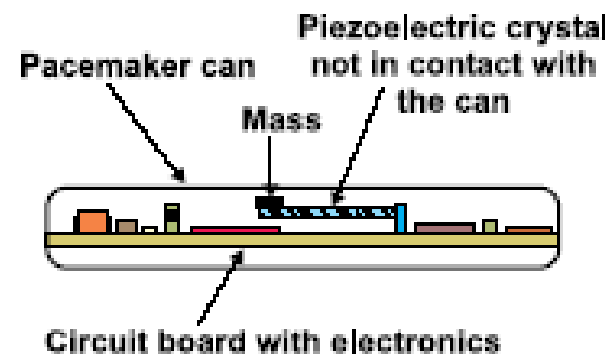
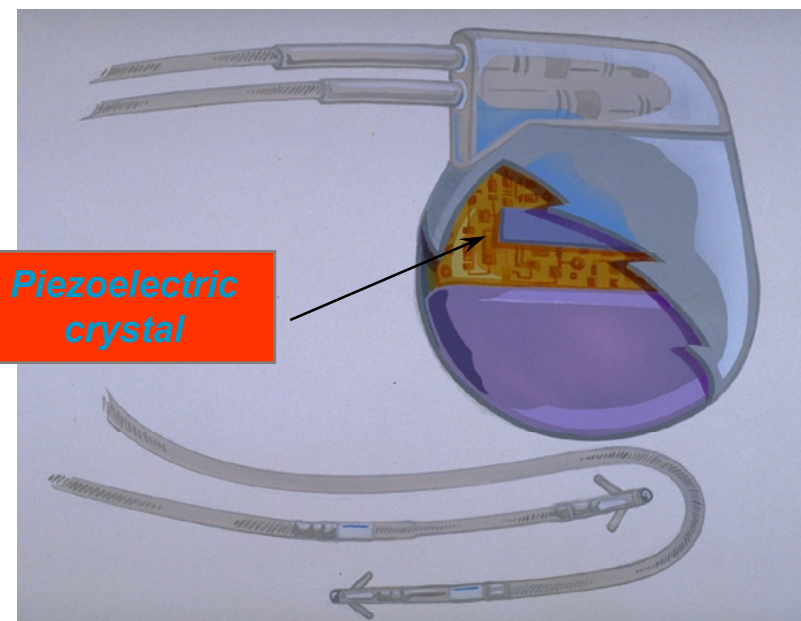
---

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

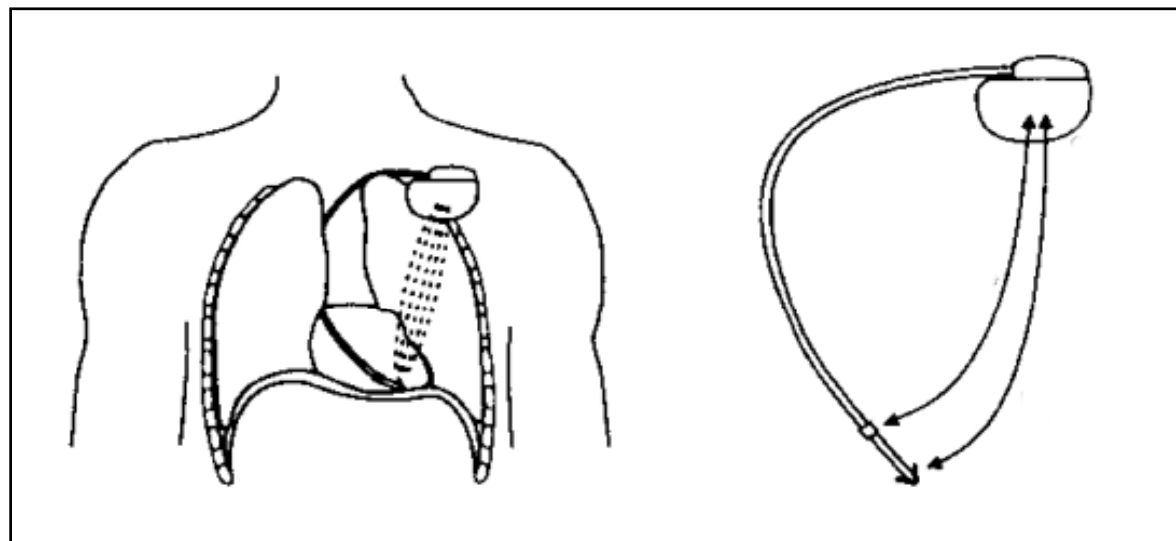
# Frekvencijski adaptivna elektrostimulacija srca

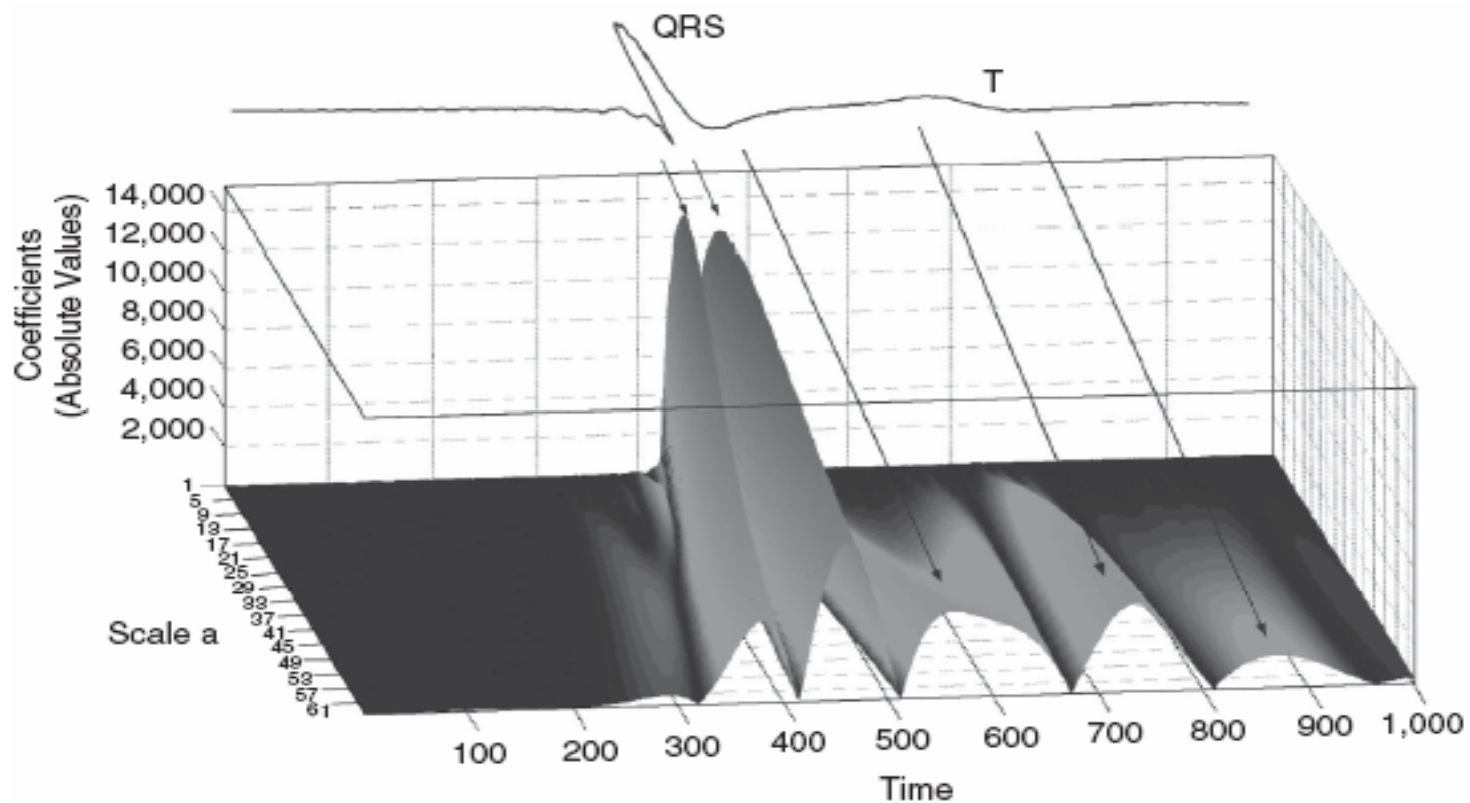
- Osjetilo aktivnosti s pomoću piezoelektričkog kristala koji mjeri signale proizvedene kretanjem pacijenta



# Frekvencijski adaptivna elektrostimulacija srca

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





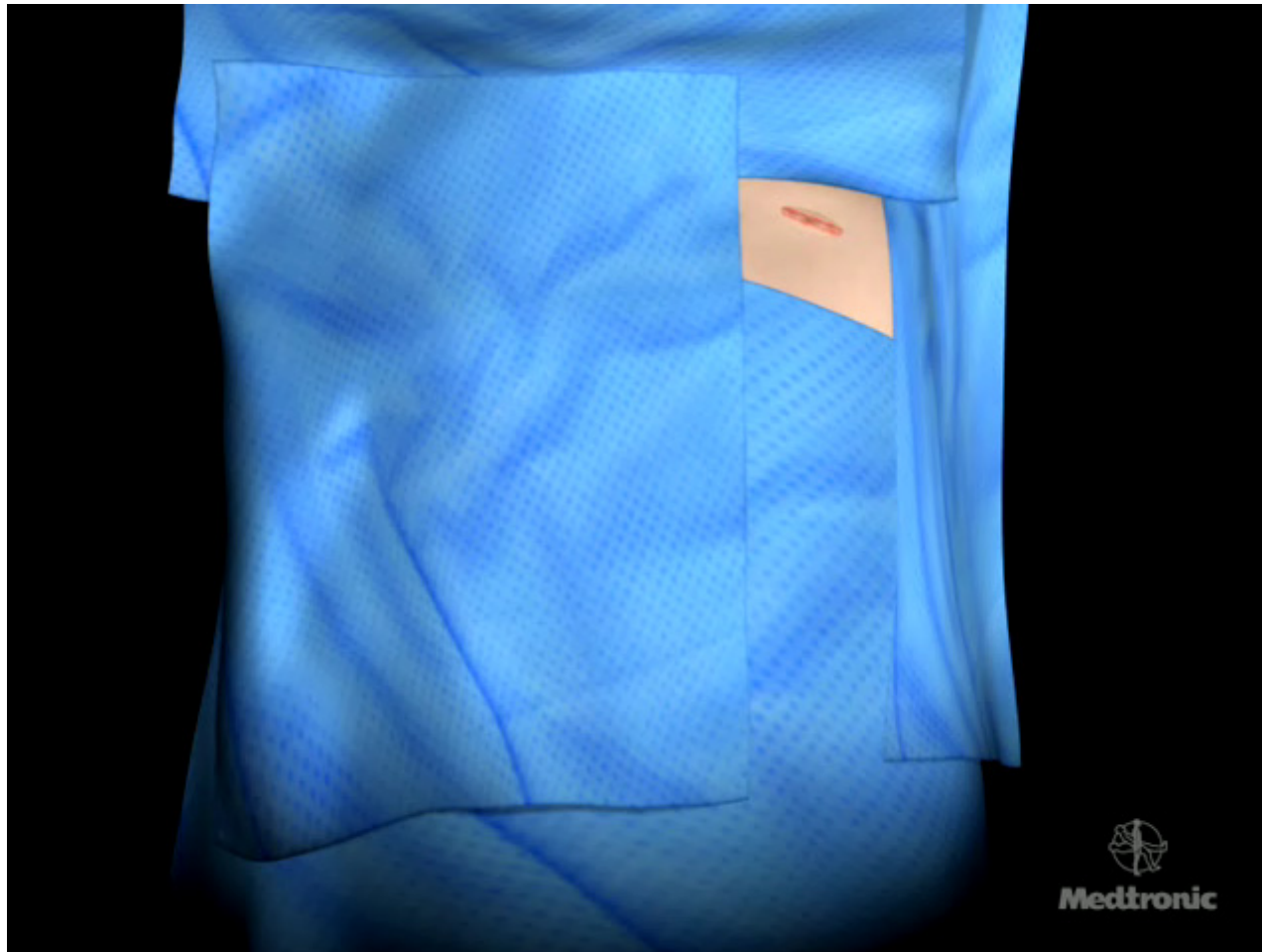
Obrada intrakardijalnog EKG-a:

Wavelet analysis of an intracardiac signal

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

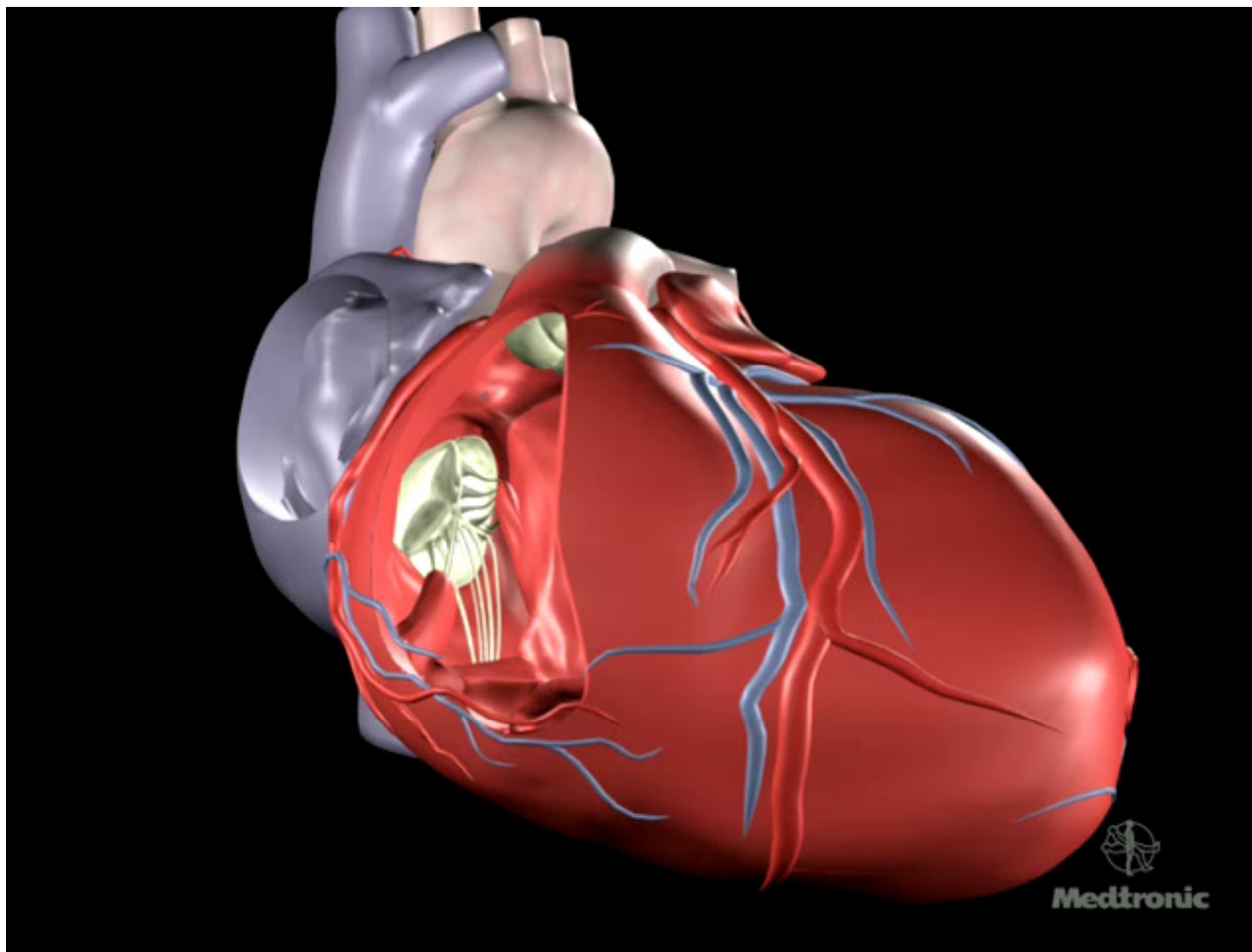
# Implantacija elektrodnog katatera

---



# 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