



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**FUNDAMENTALIŲJŲ MOKSLŲ FAKULTETAS**  
**TAIKOMOSIOS MATEMATIKOS KATEDRA**

**Tomas Rastenis**

**KOLATERALINĖS KRAUJOTAKOS**  
**SMEGENYSE MODELIŲ SUDARYMAS**

Magistro darbas

**Vadovas**  
**prof. habil. dr. H. Pranevičius**

**KAUNAS, 2012**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**FUNDAMENTALIŲJŲ MOKSLŲ FAKULTETAS**  
**TAIKOMOSIOS MATEMATIKOS KATEDRA**

**TVIRTINU**  
**Katedros vedėjas**  
**doc. dr. N. Listopadskis**  
**2012 06 04**

**KOLATERALINĖS KRAUJOTAKOS**  
**SMEGENYSE MODELIŲ SUDARYMAS**

Taikomosios matematikos magistro baigiamasis darbas

**Vadovas**  
**prof. habil. dr. H. Pranevičius**  
**2012 06 04**

**Recenzentas**  
**prof. dr. J. Rimas**  
**2012 06 04**

**Atliko**  
**FMMM-0 gr. stud.**  
**T. Rastenis**  
**2012 06 04**

**KAUNAS, 2012**

## KVALIFIKACINĖ KOMISIJA

**Pirmininkas:** Rimantas Rudzkis, profesorius (VU MII)

**Sekretorius:** Eimutis Valakevičius, docentas (KTU)

**Nariai:** Jonas Valantinas, profesorius (KTU)

Vytautas Janilionis, docentas (KTU)

Vidmantas Povilas Pekarskas, profesorius (KTU)

Zenonas Navickas, profesorius (KTU)

Arūnas Barauskas, dr., vice-prezidentas projektams (UAB „BalticAmadeus“)

**Rastenis T. Creating Models of Collateral Circulation in the Brain: Master's work in applied mathematics / supervisor prof. habil. dr. H. Pranevicius; Department of Business Informatics, Faculty of Informatics, Kaunas University of Technology. – Kaunas, 2012. – 43 p.**

## **SUMMARY**

Brain circulation confusion (stroke) is in the third place of disablement cause in Lithuania:

1. Injury diseases;
2. Oncological diseases;
3. Strokes;

Mortality of strokes are about 30 – 40 percents of patients.

Organism ability to give blood flow through the secondary ways in the tissues and cells, which don't get necessary blood flow (or don't got any blood flow), when main veins are in occlusion, calls collateral circulation. Collateral circulation is very important blood autoregulation process. It's able reduce or completely remove results of stroke, but generally collateral circulation don't work properly.

We used electrical circuits theory to create collateral circulation models, which simulates collateral circulation in partial occlusion and in complete occlusion. We determined electrical circuits equivalence to define blood flow in the brain. We found when veins of ischemic region press up and blood flow stops and venous blood flow out from ischemic region when venous pressure raises. We sets requirements what to do in stroke time, that violations for brain tissue to minimal.

In the event of breach of stroke brain tissue, it swells up after the damage as the water passes into the tissues, thus increasing the external tissue pressure. The object of this work - to create the current redistribution of blood flow during the stroke, dependent on the venous pressure in the blood vessels surrounding tissues to different pressures.

The development of collateral blood flow patterns in close co-operation and consultation with the New York Queen's Hospital anaesthesiologists Osvaldas Pranevicius and Albert Einstein College of Medicine Head of Anesthesiology Mindaugas Pranevicius.

## SANTRAUKA

Galvos smegenų kraujotakos sutrikimai (insultas) Lietuvoje yra trečioje vietoje kaip invalidumo priežastis:

1. Traumatologinės ligos;
2. Onkologinės ligos;
3. Galvos smegenų ligos.

Insulto mirtingumas yra 30 – 40 % sergančiųjų.

Kolateralinė kraujotaka tai organizmo sugebėjimas teikti kraują per antrinius kanalus į tuos audinius ir ląsteles, kurios negauna reikiamo kraujo kiekio (arba išvis negauna) užsikimšus pagrindinėms kraujagyslėms. Kolateralinė kraujotaka yra labai svarbus kraujo autoreguliacijos procesas galintis sumažinti ar visai panaikinti insulto pasekmes, bet dažniausiai kolateralinė kraujotaka tinkamai neveikia.

Šiame darbe pasinaudojus elektrinių grandinių teorija buvo sukurti kolateralinės kraujotakos modeliai, imituojantys kolateralinės kraujotakos cirkuliaciją dalinai užsikimšus ir visiškai užsikimšus pagrindinėms kraują tiekiančioms arterijoms į smegenų audinius išeminio insulto metu. Nustatyti elektrinių grandinių ekvivalentumai nusakantys kraujotaką smegenyse. Buvo surasta kada išeminės srities kraujagyslės užsispaudžia ir kraujo tėkmė sustoja, bei kada pakilus veniniam spaudimui išteka veninis kraujas iš išeminės srities. Nustatyti reikalavimai ką reikia padaryti insulto metu, jog pažeidimai smegenų audiniui būtų minimalūs arba visai neliktų jokių pasekmių.

Įvykus insultui pažeidžiami galvos smegenų audiniai, jie po pažeidimų paburksta, nes vanduo pereina į audinius, taip padidėja išorinių audinių spaudimas. Darbo rezultatai parodė, jog norint išvengti sunkių insulto padarinių reikia padidinti arterinį kraujo spaudimą. Taip padidės kolateralinės kraujotakos teikiamas kraujo kiekis į išeminio insulto sritį. Kai kraujagyslės išeminiame regione yra užspaustos reikia padidinti veninį kraujo spaudimą. Padidinus veninį spaudimą iki reikiamo kiekio išeminio insulto sritį užpildo veninis kraujas, taip papildomai maitindamas galvos smegenų audinius.

Kuriant kolateralinės kraujotakos modelius glaudžiai bendradarbiauta ir konsultuotasi su Niujorko karalienės ligoninės (Hospital Queens Flushing, NY) gydytoju anesteziologu Osvaidu Pranevičiumi ir Alberto Einšteino medicinos kolegijos (Albert Einstein College of Medicine) anesteziologijos skyriaus vadovu Mindaugu Pranevičiumi.

# TURINYS

Kvalifikacinė komisija.....	3
Summary.....	4
Santrauka .....	5
Turinys.....	6
Lentelių sąrašas .....	7
Paveikslų sąrašas .....	8
Įvadas.....	10
1. Teorinė dalis.....	11
1.1. Fiziologija.....	11
1.1.1 Galvos smegenų kraujotaka .....	11
1.1.2 Insultas.....	12
1.1.3 Kraujagyslių užsikimšimo sukelti padariniai ir jų šalinimas .....	13
1.2. Elektrinių grandinių teorija.....	14
1.2.1 Nuolatinės srovės elektros grandinių dėsniai ir analizės metodai.....	14
1.2.2 Pereinamieji procesai tiesinėse elektros grandinėse.....	16
1.2.3 Pereinamieji procesai tiesinėse elektros grandinėse.....	18
1.3. Starlingo rezistorius .....	18
1.3.1 Teorija.....	18
1.3.2 Starlingo rezistoriaus Modelis .....	19
1.4. Kolateralinės kraujotakos modelis.....	21
1.5. Kolateralinės kraujotakos modeliavimas elektrinėmis grandinėmis .....	23
1.6. Skaičiavimų instrukcija Micro-Cap programine įranga .....	25
2. Tiriamoji dalis .....	29
Išvados .....	40
Literatūros sąrašas .....	41
1 priedas.....	42

## **LENTELIŲ SĄRAŠAS**

1 lentelė. Fiziologinių elementų atitikmenys elektrinių grandinių elementams .....	25
2 lentelė. Elektrinių schemų parametrai .....	29
3 lentelė Starlingo rezistoriaus varžos kitimas priklausomai nuo per jį tekančio kraujo spaudimo ir išorinio audinių spaudimo .....	42

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

5 pav. Grandinės dalis be elektrovaros šaltinių.....	15
6 pav. Grandinės dalis su elektrovaros šaltiniu.....	15
7 pav. Grandinės kontūras .....	16
8 pav. Starlingo rezistorius (Armitstead J.P. (1990), Masters Thesis "A Study of the Bifurcation Behaviour of a System of Three Ordinary Differential Equations Modelling Flow Through a Collapsible Tube Using the AUTO-86 Software Package.").....	19
9 pav. Ryklė yra atvira, dalinai atvira arba uždara priklausomai nuo proksimalinio spaudimo (Pproximal), distalinio spaudimo (Pdistal) ir aplinkinių audinių spaudimo (Ptissue) (Stalford, 2004, 2).....	20
10 pav. a) Kraujo tekėjimas per dalinai užkimštas kraujagysles. B) Kraujo tekėjimas, visiškai užsikimšus pagrindinėms kraujagyslėms, įsijungus kolateraliniam šaltiniui. Kolateralinė jungtis $R_{kol}$ atsirado iš kolateralinio šaltinio ir tiekia reikalingą kraujo kiekį į išeminę sritį. Starlingo rezistoriai $R_{pen}$ ir $R_c$ reiškia išėminės srities penumbra ir centrinę dalis su atitinkamais išorinių audinių spaudimais $V_{pen}$ ir $V_c$ . Pi yra bendras pratekėjimo spaudimas į centrinę ir išorinę (penumbra – išorė) dalis, distalinis (distalinis [lot. dist(antia) — atstumas + (centr)alis — centrinis], anat. tolimasis, esantis toliau nuo kūno centro arba vidurio linijos.) kolateralinei jungčiai. $P_{kol}$ proksimalinis (proksimalinis [lot. proximus — artimiausias], anat. esantis arčiau kūno vidurio) spaudimas kolateralinės jungties pabaigoje. ....	22
11 pav. Kraujo tekėjimo kraujagyslėmis elektrinių grandinių schema ekvivalenti 10 pav. fiziologinei schemai .....	24
12 pav. Micro-Cap pradinis programos langas .....	26
13 pav. Micro-Cap braižymo laukas .....	26
14 pav. Micro-Cap varžos elemento reikiamų nustatymų langas .....	27
15 pav. Micro-Cap galimi elektrinių grandinių tyrimų metodai .....	27
16 pav. Micro-Cap Transient Analysis nustatymų langas .....	27
17 pav. Dalinės kraujagyslių okliuzijos išorinio spaudimo įtampos ir įtampos .....	30
18 pav. Dalinės kraujagyslių okliuzijos Starlingo rezistorių varžų kitimas, kai $V_{pen} = V_c = 20$ V .....	30
19 pav. Kairėje pavaizduota srovių stipriai ant Starlingo rezistorių, dešinėje – ant kondensatorių. ....	30
20 pav. Kondensatorių krūvių kitimas kairėje ir jų talpumas dešinėje, kai $V_{pen} = V_c = 20$ V 30	30
21 pav. Dalinės kraujagyslių okliuzijos išorinio spaudimo įtampos ir įtampos ant Starlingo rezistorių, .....	32
22 pav. Dalinės kraujagyslių okliuzijos Starlingo rezistorių varžų kitimas, kai $V_{pen} = 20$ V, $V_c = 50$ V. Dešinėje pavaizduota tas pats grafikas, bet ordinačių ašies mastelis yra 5000:1 ..	32
23 pav. Starlingo rezistorių varžomis tekantys srovių stipriai, kai $V_{pen} = 20$ V, $V_c = 50$ V. Dešinėje tas pats grafikas su ordinačių ašies masteliu 1000000:1 .....	32
24 pav. Kairėje pavaizduota kondensatorių srovės stipriai,.....	33
25 pav. Kondensatorių talpumas, kai $V_{pen} = 20$ V, $V_c = 50$ V .....	33
26 pav. Visiškos okliuzijos Starlingo rezistorių varžų ir išorinio spaudimo įtampos, kai $V_{pen} = V_c = 20$ V .....	34
27 pav. Visiškos kraujagyslių okliuzijos Starlingo rezistorių varžų kitimas, kai $V_{pen} = V_c = 20$ V. Dešinėje tas pats grafikas su ordinačių ašies masteliu 5000:1 .....	34
28 pav. Visiškos kraujagyslių okliuzijos srovės ant Starlingo rezistorių varžų kairėje ir kondensatorių dešinėje, kai $V_{pen} = V_c = 20$ V .....	35
29 pav. Visiškos kraujagyslių okliuzijos kondensatorių krūviai, kai $V_{pen} = V_c = 20$ V .....	35
30 pav. Visiškos okliuzijos Starlingo rezistorių varžų ir išorinio spaudimo įtampos, kai $V_{pen} = 20$ V, $V_c = 50$ V .....	36



31 pav. Visiškos kraujagyslių okliuzijos Starlingų rezistorių varžų kitimas, kai $V_{pen} = 20 \text{ V}$ , $V_c = 50 \text{ V}$ . Dešinėje tas pats grafikas su ordinačių ašies masteliu 5000:1.....	36
32 pav. Visiškos kraujagyslių okliuzijos srovės ant Starlingo rezistorių varžų kairėje ir kondensatorių dešinėje, kai $V_{pen} = 20 \text{ V}$ , $V_c = 50 \text{ V}$ .....	37
33 pav. Visiškos kraujagyslių okliuzijos kondensatorių krūviai kairėje ir kondensatoriaus talpumas dešinėje, .....	37
34 pav. Arterinio spaudimo sinusoidinis kitimas atitinkantis širdies dūžius - dažnis 1 s, amplitudė 10 V.....	38
35 pav. Visiškos okliuzijos Starlingo rezistorių varžų ir išorinio spaudimo įtampos, kai $V_{pen} = 20 \text{ V}$ , $V_c = 50 \text{ V}$ ir arterinis kraujo spaudimas kinta sinusoide. ....	38
36 pav. Visiškos kraujagyslių okliuzijos Starlingų rezistorių varžų kitimas, kai $V_{pen} = 20 \text{ V}$ , $V_c = 50 \text{ V}$ ir arterinis kraujo spaudimas kinta sinusoide. Dešinėje tas pats grafikas su ordinačių ašies masteliu 5000:1 .....	38
37 pav. Visiškos kraujagyslių okliuzijos srovės ant Starlingo rezistorių varžų kairėje ir kondensatorių dešinėje, kai arterinis kraujo spaudimas kinta sinusoide ir $V_{pen} = 20 \text{ V}$ , $V_c = 50 \text{ V}$ .....	39
38 pav. Visiškos kraujagyslių okliuzijos kondensatorių krūviai kairėje ir kondensatoriaus talpumas dešinėje, kai arterinis kraujo spaudimas kinta sinusoide ir $V_{pen} = 20 \text{ V}$ , $V_c = 50 \text{ V}$ .....	39
41 pav. Starlingo varžos kitimo grafikas, kai išorinis spaudim .....	43

## IVADAS

Insultas yra labai labai sunki ir dažna liga, todėl labai svarbu sukurti galvos smegenų kraujotakos modelį insulto metu, kas įgalintų geriau suprasti ten vykstančius procesus ir paskatintų naujų gydymo priemonių ir metodų suradimą, kurie neleistų stipriai pažeisti smegenų. Tai leistų daugybei žmonių išvengti poinsultinių paralyžių, įvairių funkcijų sutrikimų (regėjimas, klausa, kalba, rijimas, kvėpavimas) ar psichikos sutrikimų.

Kuriant kolateralinės kraujotakos modelį panaudojome Starlingo rezistoriaus, bei elektrinių grandinių teoriją. Starlingo rezistorius pasižymi kintančia varža, kuri priklauso nuo išorinio aplinkos spaudimo, kai išorinis spaudimas didėja tai Starlingo rezistoriaus varža didėja, bet tas didėjimas nėra tiesinis. Mūsų atveju Starlingo rezistorius didėja eksponentiškai ir yra priklausomas nuo per jį tekančios elektrinės įtampos, išorinio spaudimo ir pradinio pasipriešinimo. Starlingo rezistorius taip pat naudojamas kvėpavimo modeliams kurti.

Norint panaudoti elektrinių grandinių elementus kuriant kolateralinės kraujotakos fiziologinių procesų modelį, reikia surasti ekvivalentinius šiems procesams elektrinių grandinių elementus. Elektrinė įtampa atstoja kraujo arterinį ir veninį spaudimą, elektrinė srovė atitinka kraujo tėkmės stiprumą, kondensatorius atitinka kraujagyslės tūrį, kondensatoriaus krūvis atitinka kraujo kiekį kraujagyslėse. Starlingo rezistorius atstos insulto metu vykstančius procesus, kraujagyslių užspaudimą ir kraujo tėkmės sustojimą. Laikysime, kad per kraujagyslę neteka kraujas, kai Starlingo rezistoriaus reikšmė begalinė. Kraujagyslė turi užsispausti tuo metu, kai išorinis audinių spaudimas pasidaro didesnis už vidinį audinių spaudimą. Audinių spaudimas padidėja insulto metu – įvyksta vadinama smegenų edema, audiniai pritvinksta vandens ir paburksta, visa tai užspaudžia kraujagysles ir sustabdo kraujo tėkmę. Kuriant modelius remtasi straipsniu: Pranevicius Osvaldas, Pranevicius Mindaugas, Pranevicius Henrikas, Libeskind David S. Transition to Collateral Flow After Arterial Occlusion Predisposes to Cerebral Venous Steal. 2012.

Šiame darbe sprendžiami uždaviniai:

1. Dviejų Starlingo regionų su skirtingu išoriniu spaudimu tyrimas, kai pagrindinė kraują tiekianti kraujagyslė yra dalinai užkimšta.
2. Dviejų Starlingo regionų su skirtingu išoriniu spaudimu insulto metu tyrimas, kai pagrindinė kraują tiekianti kraujagyslė visiškai užkimšta ir padidėja lokalusis Starlingo regionų veninis spaudimas.
3. Dviejų Starlingo regionų su skirtingu išoriniu spaudimu insulto metu tyrimas, kai arterinis spaudimas kinta sinusoide.

# 1. TEORINĖ DALIS

## 1.1. FIZIOLOGIJA

### 1.1.1 GALVOS SMEGENŲ KRAUJOTAKA

„Žmogaus galvos smegenys yra pats jautriausias deguonies stygiui žmogaus organas. Nors jos sudaro tik 2 procentus žmogaus kūno masės, tačiau sunaudoja iki 20 procentų minutinio širdies išmetamo kraujo tūrio.” (Jacikevičius, 2010, 1)

“Jungdamosis priekine ir užpakalinėmis jungiančiosiomis arterijomis, visos pagrindinės smegenų arterijos yra apjungtos į smegenų arterinį žiedą (circulus arteriosus cerberi Willis). Pilnai suformuotas Willis ratas stebimas tik 18% atvejų. Dažnai stebima vienos ar kitos arterijos hipoplazija ar aplazija. Nustatyta, kad vienos ar abiejų užpakalinių jungiančių arterijų (a. communicans posterior) hipoplazija būna 30%, o trumpa priekine jungiančiąja arterija (a. communicans anterior) - 25% atvejų. Willis arterinis žiedas – tai pagrindinis kolateralinis kraujo tėkmės kelias galvos smegenyse. Būna atvejų, kai šio arterinio žiedo dėka galvos smegenys aprūpinamos arteriniu krauju, nors praeinama yra tik viena iš 4 pagrindinių smegenis maitinančių arterijų. Kitas kolateralinės kraujotakos kelias galvos smegenyse – tai kraujagyslinės anastomozės tarp intrakranijinių ir ekstrakranijinių arterijų (a. ophthalmica, raumeninių a. vertebralis šakų ir kt.) šakų.” (Jacikevičius, 2010, 1)

Smegenų kraujo tėkmė pastovi esant vidutiniam kraujospūdžiui nuo 50 iki 160 mmHg, šis pastovumas vadinamas smegenų kraujotakos autoreguliacija. Vidutinis kraujo srautas yra 50 ml/100g smegenų audinio per minutę. Su krauju smegenys gauna ne tik deguonį, bet ir kitas medžiagas (maisto medžiagas, medžiagų apykaitos produktus, vitaminus, hormonus), kaip gliukozę. Smegenyse nuolat vyksta intensyvus darbas ir greita medžiagų apykaita. Smegenų ląstelės nuolat reikalauja deguonies ir gliukozės, kuriuos atneša kraujas. Jos labai jautrios šių medžiagų apykaitos sutrikimui. Pačios jautriociaus pagumburio ląstelės be deguonies išgyvena vos iki 5 minučių. Sumažėjus kraujo srautui vystosi neurologiniai sutrikimai. Jei kraujo srautas sumažėja iki mažiau 30 ml/100g – atsiranda neurologinio deficito požymiai, kai mažiau 18 ml/100g išnyksta elektrinis aktyvumas, mažiau 15 ml/100g – išnyksta sukelti potencialai, galiausiai kai srautas tampa mažiau už 10 ml/100g – ląstelė žūsta.

“Smegenų penumbra – tai centre esančią išeminę sritį supantis smegenų audinys, kuriame dar nėra struktūrinių pokyčių, bet ji jau yra elektriškai neaktyvi. Visais atvejais gydant smegenų kraujotakos sutrikimus, stengiamasi kaip galima labiau išsaugoti šią sritį.” (Jacikevičius, 2010, 1)

## 1.1.2 INSULTAS

Insultas - tai kraujotakos sutrikimas smegenyse. Insultas pažeidžia smegenų ląsteles ir sukelia neurologinę simptomatiką bei sutrikdo paciento sveikatą, sukelia grįžtamus ar negrįžtamus pokyčius, o kartais baigiasi mirtimi. Insultas skirstomas į hemaroganiinį (kai kraujas išsilieja smegenyse) ir išeminį (kai užsikemša smegenų kraujagyslė). Šiame darbe kalbėsime apie išeminį insultą ir kursime kolateralinės kraujotakos modelį įvykus išeminiam insultui.

Išeminio insulto pagrindinė priežastis - tai ateroskleroziniai pakitimai smegenų kraujagyslėse. Paprasčiau tariant, kraujagyslės smegenyse susiaurėja, o kraujo tėkmė jose sulėtėja. Neuronai (smegenų ląstelės) pradeda badauti - joms trūksta deguonies ir gliukozės. Toje sutrikusios kraujotakos zonoje prasideda uždegimas ir ląstelė žūva. Kraujagyslės gali užsikimšti krešuliu, atkeliavusiu iš, pavyzdžiui, širdies (embolizacija). Kartais pasitaiko ir retų priežasčių (riebalinė embolija, oro embolija, kraujagyslių spazmas), o kai kuriais atvejais priežasties nepavyksta nustatyti. Insulto rizikos faktoriai - tie patys kaip ir aterosklerozės (rūkymas, nutukimas, cholesterolio kiekio padidėjimas, cukrinis diabetas, fizinio aktyvumo stoka, stresas).

Insulto požymiai priklauso nuo smegenų vietos, kurioje sutriko kraujotaka:

- Vienos pusės paralyžius;
- Regos, žvilgsnio sutrikimai;
- Veido paralyžius;
- Kalbėjimo ir kalbos supratimo, erdvinių, vizualinių ryšių suvokimo sutrikimas;
- Pusiausvyros sutrikimas;
- Sąmonės sutrikimas;
- Gyvybinių funkcijų - kvėpavimo, širdies ritmo sutrikimai.

Išeminio insulto atveju minėti simptomai vystosi iš lėto, be skausmo. Paprastai ligonis pats net nepajunta (arba nesugeba objektyviai įvertinti), kad jam, pavyzdžiui, nusviro lūpos kampas, ar nebevaldo rankos.

Atskiras ligos tipas - praeinantis smegenų išemijos priepuolis. Šiuo atveju minėti simptomai trunka trumpai, iki 24 val. (dažniausiai praeina per 15 min.), o po to praeina be pasekmių. Praeinantis smegenų išemijos priepuolis paprastai nesutrikdo sąmonės ir kitų gyvybinių funkcijų.

Išeminio insulto gydymas: pirmiausia turi būti koreguojamos gyvybinės funkcijos: kraujospūdis, gliukozės kiekis kraujyje, deguonies terapija, temperatūros palaikymas. Svarbu užtikrinti skysčių balansą. Kartais vien nuo skysčių infuzijos būklė ženkliai pagerėja.

„Per pirmąsias valandas nuo insulto pradžios švirkščiami trombolitikai (alteplazė) - vaistai, kurie ištirpdo krešulį užkimšusį kraujagyslę. Skiriami ir kiti vaistai, slopinantys kraujo krešumą - antiagregantai (aspirinas), antikoagulantai (heparino grupės vaistai).

Svarbu iš karto pradėti reabilitaciją. Kartais tenka iš naujo mokytis kalbėti, vaikščioti, skaityti, dirbti kasdienes darbus, apsitarnauti ir pan. Kartu su gydytojais dirba didelė specialistų komanda: masažistai, kineziterapeutai, reabilitologai, logopedai, psichologai, socialiniai darbuotojai.

Insulto prognozė priklauso nuo pažeistos smegenų vietos, nuo užsikimšusios kraujagyslės dydžio. Kai kurie pacientai visiškai pasveiksta, kitiems lieka įvairių funkcijų ar psichiko sutrikimai. Jei insultas apima svarbias zonas, pacientas gali ir neišgyventi.“ (Viliūšienė, 2008, 1)

### **1.1.3 KRAUJAGYSLIŲ UŽSIKIMŠIMO SUKELIAMI PADARINIAI IR JŲ ŠALINIMAS**

Žmogaus smegenys normalioje būsenoje aprūpinamos krauju keturių pagrindinių arterijų, kurios turi glaudų ryšį su Viliso ratu<sup>1</sup>. Kai šis ratas yra pilnai suformuotas ir sveikas, tada jis gali aprūpinti labai geru kolateraliniu tinklu, apsaugančiu galvos smegenis nuo ekstrakranijinės arterinės<sup>2</sup> okliuzijos. Šio tinklo nepaprastas pobūdis akivaizdus kai vertinami atsitiktiniai pacientai kurie gali veikti gana tinkamai tik su viena pagrindine ekstrakranijine arterija.

Pirmiausia gydytojas kuris gydo pacientus su laikinomis išeminėmis problemomis ar insultais privalo bandyti nustatyti okliuzinės ligos vietą kuri iššaukia problemą. Arterinė okliuzija gali įvykti arba vienoje arba keliuose vietose. Kokiu mastu ligos procesas yra klinikinių problemų priežastis visiškai priklauso nuo kolateralinės kraujotakos egzistavimo ir jos gebėjimo gabenti reikiamą kraujo srautą.

Širdies ir kraujagyslių chirurgijoje yra keletas sričių kuriose daug painiavos ir neaiškumų, kaip pavyzdžiui pagrindinių ekstrakranijinių arterijų aterosklerozės srityje ir jos tikslios funkcijos smegenų kraujotakos išemijos pradžioje. Neaiškumai egzistuoja dėl mūsų nesugebėjimo kiekybiškai įvertinti vieno ar keletos pažeidimų vaidmens ir jų priklausomybės nustatytiems klinikiniams sindromams. Dabar žinoma, jog simptomai siejami su viena smegenų sritimi gali kilti iš okliuzinio pažeidimo tolumoje pagrindinėje kraujagyslėje ar kolateralinės kraujotakos kelyje. (Strandness, 1969, 537)

Šiuo metu yra priimta tokia klinikinio vaizdo terminologija įvykus neurologiniams negalavimams.

---

<sup>1</sup> vertimas “Circle of Willis”

<sup>2</sup> Ekstrakranijinė arterija aprūpina galvos smegenis krauju

1. „Visiškas insultas“<sup>3</sup> (Strandness, 1969, 546) apibrėžiamas kaip neurologinio trūkumo atsiradimas iškart po insulto kai būklė išlieka stabili arba laikui bėgant laipsniškai šis trūkumas mažėja.
2. „Besivystantis insultas“<sup>4</sup> (Strandness, 1969, 546) tai neurologinio deficito pradžia kuri dažniausiai progresuoja iki visiško insulto. Šis procesas yra palyginti retas, bet kai procesas prasidėjęs, visiškas klinikinio vaizdo atstatymas yra labai retas.
3. „Trumpalaikiai išeminiai priepoliai“<sup>5</sup> (Strandness, 1969, 546) būdingi staiga prasidėjusiems neurologiniams simptomams su visišku atsistatymu užtrunkančiu nuo keletos minučių iki keletos valandų. Yra dideli atsirandantys išeminės apimties skirtumai ir smegenų medžiagos kiekio apėmimas lemiantis žymiai besiskiriantį klinikinį vaizdą.

Didelį susirūpinimą kelia dalinė miego arterijos okliuzija ir reikiamo galvos smegenų kraujo srauto palaikymas per kolateralinius kanalus. Tai paskatino skirtingų metodų plėtrą kurie sukurti atlikti tą pačią užduotį – kolateralinės kraujotakos palaikymą. Kai kurie chirurgai teikia pirmenybę atlikti procedūrą taikant vietinę nejautrą, naudojant vidinę miego arterijos okliuziją dešimties minučių laikotarpiui, kad patikrinti gaunamą kraujo srautą per kitus kanalus. Jei užspaudimo laikotarpis yra toleruotinas, endarterektomija<sup>6</sup> atliekama be papildomos palaikomosios kraujo dozės. Dešimties minučių okliuzijos laikotarpis nėra patikimas šiuo atveju, nes kartais pacientams nutinka smegenų išemija atliekant procedūrą. Tada reikia atlikti bendrąją nejautrą ir vidinį šuntą<sup>7</sup>.

## 1.2. ELEKTRINIŲ GRANDINIŲ TEORIJA

### 1.2.1 NUOLATINĖS SROVĖS ELEKTROS GRANDINIŲ DĖSNIAI IR ANALIZĖS METODAI

Elektros grandinė sudaryti iš tiesinių elementų vadinama tiesine grandine. Elementai kurių parametrai nepriklauso nuo per juos tekančios srovės ar įtampos didumui vadinami tiesiniais. Elektrinės grandinės pasižymi Omo, Kirchhofo dėsniais, o jų elementų parametru apskaičiavimui dažniausiai naudojami Kirchhofo lygčių metodas, mazgų potencialų metodas ir kontūrų srovių metodas.

Omo dėsnis:

Omo dėsnis grandinės daliai be elektrovaros šaltinių aprašomas šia priklausomybe:

<sup>3</sup> vertimas “Completed stroke”

<sup>4</sup> vertimas “Stroke in evolution”

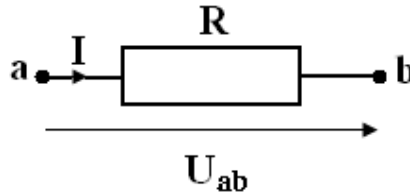
<sup>5</sup> vertimas “Transient ischemic attacks”

<sup>6</sup> Operacija, kurios metu iš miego arterijos pašalinama atrosklerozinė plokštelė

<sup>7</sup> Naujas kraujo kanalas sukurtas tekėti aplink užsikimšusias kraujagysles.

$$I = \frac{U_{ab}}{R} \quad 1$$

Elektros grandinių schemose pažymimos srovės tekėjimo ir įtampos kryptis (5 pav.)

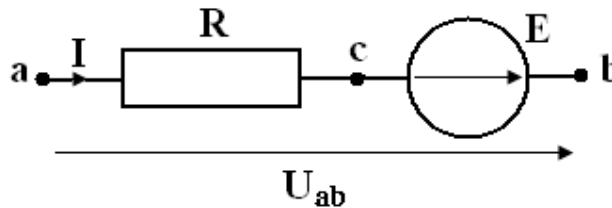


1 pav. Grandinės dalis be elektrovaros šaltinių

Jei sutampa įtampos ir srovės kryptis, tai 1 formulėje rašomas plusas, jei šios kryptys yra priešingos – minusas.

Omo dėsnis grandinės daliai su elektrovaros šaltiniais aprašomas šia priklausomybe:

$$I = \frac{U_{ab} + E}{R} \quad 2$$



2 pav. Grandinės dalis su elektrovaros šaltiniu

Esant daugiau elektrovaros elementų į 2 formulę reikia įstatyti suminę elektrovaros elementų reikšmę, taip pat esant daugiau varžos elementų – suminę grandinės dalies varžą.

$$I = \frac{U_{ab} + \sum_a^b E}{R_{ab}} \quad 3$$

### Kirchhofo dėsniai:

Visoms grandinės dalims, bet kuriuo laiko momentu galioja Kirchhofo dėsniai.

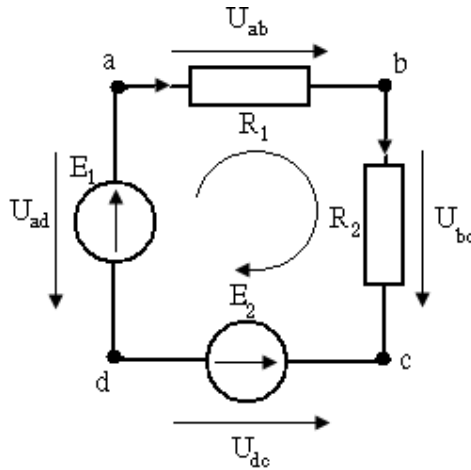
I Kirchhofo dėsnis yra taikomas grandinės mazgams: bet kokio elektros grandinės mazgo  $n$  srovių algebrinė suma lygi 0 arba į elektros grandinės mazgą įtekančių srovių suma lygi iš jo ištekančių srovių sumai.

$$\sum_n I = 0 \quad 4$$

II Kirchhofo dėsnis taikomas grandinės kontūrams. Bet kuriame uždarame grandinės kontūre  $K$  įtampų kritimų algebrinė suma lygi elektrovarų algebrinei sumai:

$$\sum_{(K)} IR = \sum_{(K)} E \quad 5$$

Laisvai pasirenkame kontūro apėjimo kryptį, tada sumuojame įtampas kritimus ir elektrovaras. Jei srovės kryptis sutampa su kontūro apėjimo kryptimi rašome pliusą, jei nesutampa – minusą. Elektrovaros kryptis jei sutampa su kontūro apėjimo kryptimi taip pat rašome pliusą, jei ne – minusą.



3 pav. Grandinės kontūras

Užrašykime 3 pav. pavaizduotos grandinės Kirchhofo lygtį:

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 = -E_2 + E_1 \quad 6$$

(Pukys, Stonys, Virbalis, 2004), (Pukys, 2000)

### 1.2.2 PEREINAMIEJI PROCESAI TIESINĖSE ELEKTROS GRANDINĖSE

Ankstesniuose paragrafuose aprašyti dėsniai naudojami stacionarių arba kitaip sakant nusistovėjusių grandinių skaičiavimui. Realiose grandinėse prijungiant ar atjungiant šaltinius ar imtuvus, t.y. pakitus grandinės schemai stacionarus (nusistovėjęs) režimas sutrinka. Šuoliškas grandinės pasikeitimas vadinamas komutacija. Tada grandinė pereina iš vieno stacionaraus režimo į kitą. Nestacionarūs procesai vykstantys grandinėje perinant nuo vieno stacionaraus proceso prie kito vadinami pereinamaisiais procesais.

Momentą kai įvyksta komutacija vadiname pereinamojo proceso pradžia. Komutacijos metu  $t = 0$ , laiko momentas prieš komutaciją žymimas  $t = -0$ , o po komutacijos  $t = +0$ . Analogiškai žymime sroves ir įtampas prieš komutaciją  $i(-0)$ ,  $u(-0)$  ir po komutacijos  $i(+0)$ ,  $u(+0)$ .

I komutacijos dėsnis. Srovė induktyvume ir srovės sukurtas magnetinis srautas tuoj po komutacijos išlieka toks pats koks buvo prieš komutaciją:  $i_L(+0) = i_L(-0)$  ir  $\Psi(+0) = \Psi(-0)$ . Jei laikytume, kad induktyvume komutacijos metu  $t = 0$  galimas srovės ir magnetinio srauto staigus pokytis, tai šuoliu pakistų induktyvumo magnetiniame lauke sukauptą energiją

$W_m = \frac{Li_L^2}{2}$  ir induktyvumo galia  $p = \frac{dW_m}{dt}$  išaugtų iki begalybės. Taip yra todėl, nes energija



$W_m$  yra tolydinė laiko funkcija ir negali turėti šuolių, tuo pačiu šuoliu negali kisti ir srovė  $i_L$ . Ši prielaida neturi fizikinės prasmės, nes realių energijos šaltinių ir induktyvumo galia visuomet baigtinė.

II komutacijos dėsnis. Įtampa talpoje ir sukauptas elektros krūvis talpoje tuoj po komutacijos išlieka tokie patys kokie buvo prieš komutaciją:  $u_c(+0) = u_c(-0)$ ,  $q(+0) = q(-0)$ . Jei laikytume, kad komutacijos momentu  $t = 0$  galimas įtampos ir joje sukaupto krūvio staigus kilimas, tai turėtų šuoliu pakisti talpos elemente sukaupta energija

$$W_e = \frac{Cu_c^2}{2} \text{ ir jog galia } p = \frac{dW_e}{dt} \text{ išaugtų iki begalybės, o tai yra neįmanoma.}$$

Sroves induktyvume ir įtampas talpoje komutacijos momentu vadiname nepriklausomomis pradinėmis sąlygomis. Kitų srovių ir įtampų, bei jų išvestinių reikšmes tuoj pat po komutacijos vadiname priklausomomis pradinėmis sąlygomis (dydžiai  $i_R(+0)$ ,  $u_R(+0)$ ,  $\left. \frac{du_L}{dt} \right|_{t=+0}$ , ir tt.). Priklausomas pradines sąlygas randame iš Kirchhofo lygčių, sudarytų grandinės režimui po komutacijos atsižvelgiant į žinomas nepriklausomas pradines sąlygas  $i_L(+0)$ ,  $u_C(+0)$ .

Bendruoju atveju tiesinėje pastovių  $R$ ,  $L$ ,  $C$  parametrų grandinėje pereinamieji procesai analizuojami integruojant  $n$ -tojo laipsnio diferencialinę lygtį. Ją gauname pagal Kirchhofo dėsnius iš diferencialinės ir integralinės lygčių sistemos eliminuojant visus  $n - 1$  nežinomuosius. Pavyzdžiui sujungus nuosekliai RLC grandinę prie šaltinio  $e$ , joje vykstančius procesus aprašo diferencialinė ir integralinė lygtis:

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = e \quad 7$$

Išdefirencijavę 11 lygtį gauname antrojo laipsnio diferencialinę lygtį:

$$L \frac{d^2i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = \frac{de}{dt} \quad 8$$

Šios lygties sprendinys bus lygus nehomogeninės diferencialinės lygties atskirojo sprendinio ir homogeninės diferencialinės lygties bendrojo sprendinio sumai. Atskiras nehomogeninės diferencialinės lygties sprendinys aprašo grandinės nusistovėjusį režimą, kurį sukuria grandinės šaltiniai po komutacijos. Nusistovėjusio režimo dydžius žymime  $i'$ ,  $u'$ . Homogeninės diferencialinės lygties bendrasis sprendinys aprašo elektromagnetinius procesus grandinėje po komutacijos, kai joje neveikia elektros energijos šaltiniai. Šį grandinės režimą vadiname kaisvuoju ir jo dydžius žymime  $i''$ ,  $u''$ .

(Pukys, 2000), (Bartkevičius, Lazauskas, Pukys, Stonys, Virbalis, 1996)

### 1.2.3 PEREINAMIEJI PROCESAI TIESINĖSE ELEKTROS GRANDINĖSE

Netiesinėse elektros grandinėse pereinamieji procesai iš esmės skiriasi nuo tokių pat procesų tiesinėse grandinėse. Jei tiesinėse grandinėse įvykus komutacijai įmanoma viena pusiausvyros būseną, tai netiesinėse grandinėse nusistovėjęs režimas priklauso nuo pradinių sąlygų. Gali būti ir kelios pusiausvyros būsenos. Taip pat galimas naujas reiškinys – savaiminiai svyravimai. Jų dažnis bendruoju atveju skiriasi nuo grandinėje esančių šaltinių dažnio. Pereinamieji procesai netiesinėse grandinėse aprašomi netiesinėmis lygtimis neturinčiomis bendrą sprendimo metodų. Šiuo atveju negalime skaidyti proceso į laisvąjį ir nusistovėjusį.

Dauguma metodų susiję su vienokiu ar kitokiu netiesinės charakteristikos aproksimavimu arba diskretizavimu. Plačiausiai žinomi linerizacijos, sąlyginės linerizacijos, grafinio inegravimo, analizinės aproksimacijos, nuosekliųjų laiko intervalų metodai.

(Bartkevičius, Lazauskas, Pukys, Stonys, Virbalis, 1996)

## 1.3. STARLINGO REZISTORIUS

### 1.3.1 TEORIJA

Starlingo rezistorius (8 pav.) buvo išrastas Anglų fiziologo Ernesto Starlingo (Ernest Starling). Prietaisą sudarė elastingas skysčiu užpildytas sujungiamas vamzdelis sumontuotas tam tikroje oru užpildytoje kameroje. Statinis spaudimas kameros viduje buvo panaudotas vamzdelio išardymo laipsnio kontrolei, o visa tai lėmė šio elemento netiesinę varžą. Ši varža panaudojama modeliuoti bendrą periferinį kraujagyslių pasipriešinimą<sup>8</sup> (TPR).

Starlingo rezistorius naudojamas dvejose srityse – kaip įdomių fiziologinių reiškinių (pvz. miego apnėja) tyrinėjimo instrumentas ir vertingas fiziologinių reiškinių šaltinis panaudojamas kitose srityse. Netiesiškumas būdingas dviem atvejais, pirmas – „krioklio efektas“<sup>9</sup> kur po vamzdelio suspaudimo srautas per vamzdelį pasidaro nepriklausomas nuo spaudimo srovės krypties ir antras atvejis – pačio sužadinti virpesiai.

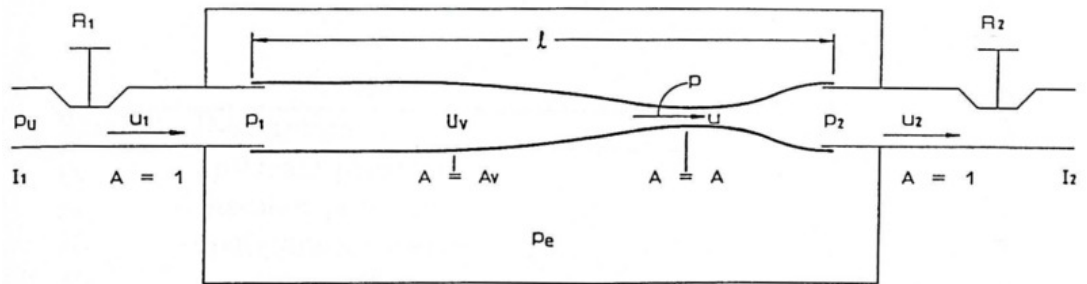
Franko ir Starlingo (Frank-Starling) širdies dėsnis teigia jog insulto intensyvumas iš širdies didėja reaguojant į širdies kraujo užpildymo apimtį. Padidėjęs kraujo tūris skilvelio sienos ruože sukelia širdies raumens ryžtingesnius susitraukimus (tai ir vadinama Frank-Starling mechanizmu). Insulto intensyvumas taip pat gali padidėti dėl didesnio širdies raumenų kontraktiškumo<sup>10</sup>, nepriklausomai nuo galinio diastolinio<sup>11</sup> talpumo.

---

<sup>8</sup> TPR - total peripheral (vascular) resistance

<sup>9</sup> Vertimas „waterfall effect“

<sup>10</sup> kontraktiškumas - raumenų audinio gebėjimas susitraukti, kai jų storis ir plonumas gijos slankioja viena kita



**4 pav.** Starlingo rezistorius (Armitstead J.P. (1990), Masters Thesis "A Study of the Bifurcation Behaviour of a System of Three Ordinary Differential Equations Modelling Flow Through a Collapsible Tube Using the AUTO-86 Software Package.")

### 1.3.2 STARLINGO REZISTORIAUS MODELIS

Šiame skyriuje pateiksiu Starlingo rezistoriumi modeliuojamą obstrukcinę miego apnėją. Pasinaudojant šiais principais kuriamas kolateralinės kraujotakos modelis. Šis modelis buvo aprašytas Katerinos B. Stalford straipsnyje „Starlingo rezistorius: modelis aiškinant ir gydant obstrukcinę miego apnėją“.

Obstrukcinės miego apnėjos <sup>12</sup> dažnumas yra 16 procentų visos žmonių populiacijos. Rimtos pooperacinės kvėpavimo komplikacijos ir mirtys buvo pastebėtos šioje populiacijoje. Anestetikai prisidėjo prie šių komplikacijų ūmia ir išliekama įtaka kvėpavimo takų kompleksiniam valdymui ir refleksams dalyvaujantiems kvėpavimo takų praeinamume.

Starlingo rezistoriaus modelis atvaizduoja teorinius reiškinius kurie gali būti taikomi oro srautui viršutiniuose kvėpavimo takuose ir skysčio srautui per koronarines <sup>13</sup> arterijas, t.y cirkuliacija galvos smegenyse, ir epidurinė erdvė. Modelis gali būti aprašytas laikantis

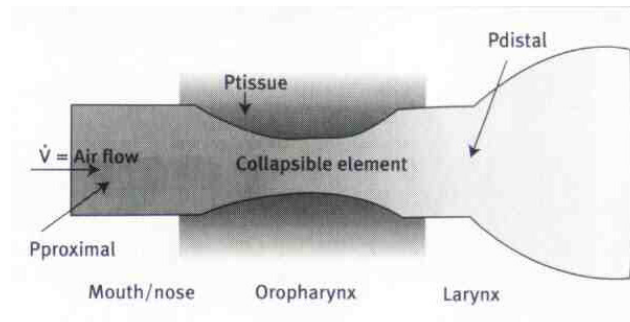
<sup>11</sup> Arterinis kraujo spaudimas (AKS) – tai kraujo slėgis, spaudžiantis vidinę arterijos sienelę. Kraują širdis turi išstumti tam tikru spaudimu, kad jis pasiektų vidaus organus. Kraujo tėkmės jėga kiekvieno širdies susitraukimo pradžioje didėja, o vėliau mažėja. Todėl kraujo spaudimas, matuojamas gyvsidabrio stulpelio milimetrais (mmHg), išreiškiamas dviem skaičiais:

- pirmasis, didesnysis skaičius, rodo širdies susitraukimo sukurtą spaudimą ir yra vadinamas *sistoliniu*;
- antrasis, mažesnis skaičius, rodo spaudimą kraujagyslėse tarp širdies susitraukimų ir yra vadinamas *diastoliniu*.

<sup>12</sup> Obstrukcinė miego apnėja – tai liga, kai miegodamas žmogus trumpam (nuo kelių sekundžių iki kelių minučių) nustoja kvėpuoti. Miegant atsipalaiduoja gerklės raumenys, ir ji susiaurėja. Jei kvėpavimo takai siauresni nei įprasta, miegant jie gali būti iš dalies arba visiškai užblokuojami, ir miegančiajam ima trūkti oro. Dėl kraujyje sumažėjusios deguonies koncentracijos dirginamos smegenys, miegantysis kelioms akimirkoms pabunda ir vėliau to nepamena, tačiau to pakanka kvėpavimo takams išsiplėsti. Tuomet dažniausiai girdimas garsus įkvėpimas. Sergant obstrukcine miego apnėja tokie užmigimo-oro trūkumo-prabudimo ciklai kartojasi visą naktį. Sudėjęs visus apnėjos epizodus miegantysis nekvėpuodamas gali išbūti net iki kelių valandų per parą

<sup>13</sup> Koronarinis – vainikinis, supantis organą vainiku; susijęs su širdies vainikinėmis arterijomis

sąlygos, jog ryklė yra sudaryta iš sudedamų vamzdelių esančių tam tikrų kamerų (erdvių) viduje. Atsižvelgiant į kvėpavimo takų jungčių pratekėjimo problemas išskylančias dėl obstrukcinės miego apnėjos arba per anestetikų valdymą, išivaizduokime ryklę kaip sudedamą vamzdelį ir supamą kaklo audinių kameros (erdvės). (5 pav.)



**5 pav.** Ryklė yra atvira, dalinai atvira arba uždara priklausomai nuo proksimalinio spaudimo ( $P_{proximal}$ ), distalinio spaudimo ( $P_{distal}$ ) ir aplinkinių audinių spaudimo ( $P_{tissue}$ ) (Stalford, 2004, 2)

Čia ryklė išlieka atvira, dalinai uždara arba visiškai uždara, kaip įvairių jėgų rezultatas: proksimalinis arba atidarymo spaudimas nosies ir burnos lygmenyje, distalinės arba pabaigos slėgis trachėjoje ir žemiau, slėgis kuris taikomas ryklei kaip supančių audinių rezultatas.

Kaip parodyta 9 pav. audinių spaudimas ( $P_{tissue}$ ) tiesiogiai atitinka aplinkinių audinių supančių ryklę spaudimą viršutiniam kvėpavimui. Didelio atidarymo slėgis ( $P_{proximal}$ ) padės įveikti supančių audinių spaudimą. Žemiau balso stygų ( $P_{distal}$ ) žemas arba neigiamas slėgis, kuris atsiranda dėl kvėpavimo pastangų, prisidės prie kvėpavimo žlugimo, jeigu audinių spaudimas ( $P_{tissue}$ ) padidėjęs. Kai pakankamas raumenų tonusas operacinis, audiniuose supančiuose sudedamą vamzdelį, poveikis „pakeliamo audinio“ yra atokiau nuo sudedamo vamzdelio, audinių spaudimas ( $P_{tissue}$ ) neprisideda prie kvėpavimo žlugimo.

Kadangi ryklė yra sudedamas segmentas esantis tarp prieš srovę esančio nosies ir gerklės segmento ir pasroviui einančio trachėjos segmento. Tėkmė priklauso nuo priešsrovinio spaudimo ir spaudimo supančio sudedamą segmentą. Nesėkmingas banguojantis spaudimas, pernelyg neigiamas kvėpavimo spaudimas ir perdėtas audinių spaudimas gali skatinti žlugimą. Nustatytos trukmės nervo ir raumenų koordinacijos sudėtingoje orkestruotėje ryklės nervai kvėpavimo fazės stadijoje kuri eina tik prieš diafragminę stadiją, kuri rengia ryklės kvėpavimo takus neigiamam spaudimui kvėpavimo metu. (Stalford, 2004, 2)

#### 1.4. KOLATERALINĖS KRAUJOTAKOS MODELIS

Insultinio audinio centrinėje dalyje spaudimas padidėja ir penumbra lemia „regioninį galvos smegenų perfuzinį“<sup>14</sup> spaudimą<sup>15</sup> (RCP) (Pranevičius O.; Pranevičius M.; Pranevičius H.; Liebeskind D. S.; 2012, 2), apibrėžiamą kaip skirtumą tarp vietinio pritekėjimo spaudimo ir veninio ar audinių spaudimo, kuris yra didesnis. Veninio spaudimo sumažėjimas iki žemesnio lygio nei spaudimas insultinio audinio centre lemia kraujo tekėjimo aplinkinį kelią. Išstirsime kaip perėjimas į kolateralinę kraujotaką po visiškos arterinės okliuzijos<sup>16</sup> paveikia galvos smegenų perfuzinio spaudimo pasiskirstymą.

Tinkamai veikdamos giminingos kraujagyslės turėtų intuityviai neutralizuoti poveikį smegenų arterijoms, netgi po išeminio insulto, bet dažniausiai taip nenutinka. Kolateralinė cirkuliacija gali būti apibrėžta kaip kraujo tėkmė kuri tiekama per antrinius kanalus užsikimšus pagrindinio kanalo arterijoms tiekiančioms kraują smegenims. Reikia ištirti kolateralinės kraujotakos nepakankamumo pagrindus. Perėjimas į papildomą tekėjimo srautą po arterijos užsikimšimo nebūtinai atstato srautą, bet priešingai – per tas kraujagysles, per kurias turėtų atkeliauti kraujas į insulto sritį, gali ištekėti veninis kraujas iš insulto srities, taip dar pablogindamas padėtį.

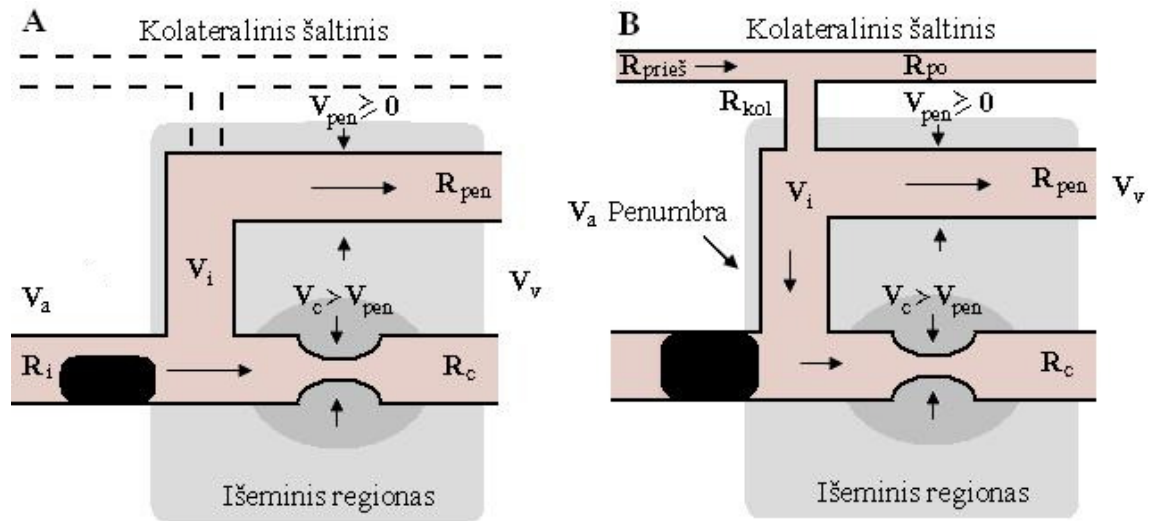
Išeminį insulto regioną pakeičiame dviem lygiagrečiais Starlingo resistoriais, kad galėtume imituoti nuo dalinio pratekėjimo okliuzijos iki visiško pratekėjimo okliuzijos su kolateraliniu srautu (6 pav.). Išeminė sritis atvaizduojama dviem Starlingo resistoriais  $R_c$  ir  $R_{pen}$  su išoriniais spaudimais  $V_c$  ir  $V_{pen}$  ir bendru tekėjimo spaudimu  $V_t$ . Darome prielaidą jog galvos smegenų kraujotaka yra nustatoma pagal regioninį galvos smegenų perfuzinį spaudimą (RCP), apibrėžtą Starlingo rezistoriumi.

---

<sup>14</sup> perfūzija [lot. perfusio — perliejimas], fiziol. tirpalo, kraujo, jo pakaitalo arba kt. skysčio leidimas organo, kūno dalies arba viso organizmo kraujagyslėmis

<sup>15</sup> Vertimas - “regional cerebral perfusion pressure“

<sup>16</sup> okliūzija [lot. oclusio — uždarymas, paslėpimas]: 1 med. užakimas, nepraeinamumas, pvz., žarnyno, kraujagyslių ir kt.



**6 pav.** a) Kraujo tekėjimas per dalinai užkimštas kraujagysles. B) Kraujo tekėjimas, visiškai užsikimšus pagrindinėms kraujagyslėms, įsijungus kolateraliniam šaltiniui. Kolateralinė jungtis  $R_{kol}$  atsirado iš kolateralinio šaltinio ir tiekia reikalingą kraujo kiekį į išeminę sritį. Starlingo rezistoriai  $R_{pen}$  ir  $R_c$  reiškia išeminės srities penumbrą ir centrinę dalis su atitinkamais išorinių audinių spaudimais  $V_{pen}$  ir  $V_c$ .  $P_i$  yra bendras pratekėjimo spaudimas į centrinę ir išorinę (penumbra – išorė) dalis, distalinis (distalinis [lot. dist(antia) — atstumas + (centr)alis — centrinis], anat. tolimasis, esantis toliau nuo kūno centro arba vidurio linijos.) kolateralinei jungčiai.  $P_{kol}$  proksimalinis (proksimalinis [lot. proximus — artimiausias], anat. esantis arčiau kūno vidurio) spaudimas kolateralinės jungties pabaigoje.

$$RCPP_c = 0, \text{ jei } V_c > V_i$$

$$RCPP_c = V_i - V_c, \text{ jei } V_i > V_c > V_v, \text{ kur } V_v - \text{veninis spaudimas} \quad 9$$

$$RCPP_c = V_i - V_v, \text{ jei } V_c < V_v$$

Galime Starlingo rezistorių netiesiškumą išreikšti viena formule:

$$R_{pen} = \frac{R_x}{1 - \frac{V_{R_{pen}}}{|V_{pen}|}}, \quad R_c = \frac{R_x}{1 - \frac{V_{R_c}}{|V_c|}}, \quad 10$$

kur  $R_x$  yra konstanta. Šią Starlingo rezistoriaus varžos priklausomybę gauta pagal Mindaugo Pranevičiaus skaičiavimus pateiktus 1-ame priede.

Kai  $V_{pen} = |V_{R_{pen}}|$ , tada  $R_{pen} \rightarrow \infty$ , todėl modeliuojant įvedžiau Starlingo rezistoriaus varžos viršutinį apribojimą – 10 MΩ.

Kondensatoriaus talpumas kuris apibūdina kraujagyslės talpumą (tūrį) gali turėti dvi būsenas, t.y. arba turėti talpumą arba ne. Talpumas bus lygus 0, kai nėra kraujo kraujagyslėje, todėl kai įtampa einanti per kondensatorių bus mažesnė už 0, talpumą laikysime 0, kitu atveju kondensatoriaus talpumas konstanta.

Modelis apibūdina regioninį galvos smegenų perfuzinio spaudimo pasiskirstymą. Modelis prisiima išnaudotą kraujo autoreguliaciją, kurios būtų galima tikėtis iš karto po visiškos arterijų okliuzijos ir intraluminalaus<sup>17</sup> slėgio sumažėjimo su perėjimu į kolateralinę kraujo tėkmę. Liekamoji autoreguliacija, jei tokia yra, kompensuoja sumažėjusį regioninį galvos smegenų perfuzijos spaudimą, bet autoreguliacija retai, jei išvis kada nors, pasitaiko išemijos srityje. Visiškoje kraujo tėkmės okliuzijoje (6 pav. b dalis) visas srautas į išeminę sritį ateina per kolateralines jungtis  $R_{kol}$  iš nepaveiktų lygiegrečių kraujagyslių tinklų (kolateralinių šaltinių). Kolateralinis spaudimas padalijime yra  $V_{kol}$ , o kraujo tekėjimo spaudimas išeminėje kolateralinės jungties distalinio galo srityje yra  $V_l$ . Kolateralinio šaltinio dalis prieš kolateralinės jungties pasidalinimą turi pasipriešinimą -  $R_{prieš}$ , o po pasidalinimo -  $R_{po}$ .

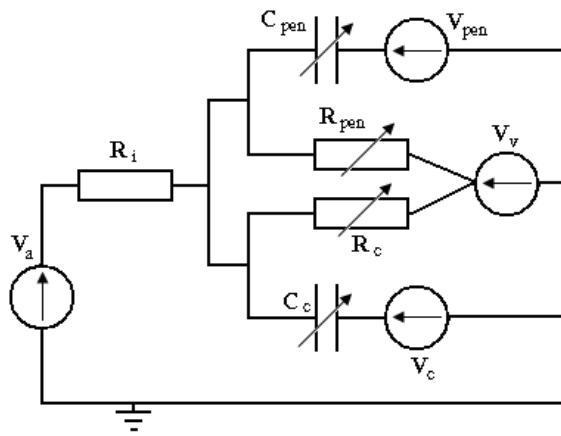
Visiškai nukreipus srautą gauname  $R_{CPP_c} = 0$  ir tai apibrėžiame kaip tašką be jokio atsinaujinančio pratekėjimo. Išorinis spaudimas  $V_c$  taške be atsinaujinančio pratekėjimo yra minimalus  $V_c$  reikalingas visiškai sustabdyti centrinį pratekėjimą. Veninis spaudimas taške be atsinaujinančio pratekėjimo yra minimalus veninis spaudimas reikalingas atkurti srautą sustabdytą žinomo išorinio spaudimo  $V_c$ . (Pranevičius O.; Pranevičius M.; Pranevičius H.; Liebeskind D. S.; 2012)

## **1.5. KOLATERALINĖS KRAUJOTAKOS MODELIAVIMAS ELEKTRINĖMIS GRANDINĖMIS**

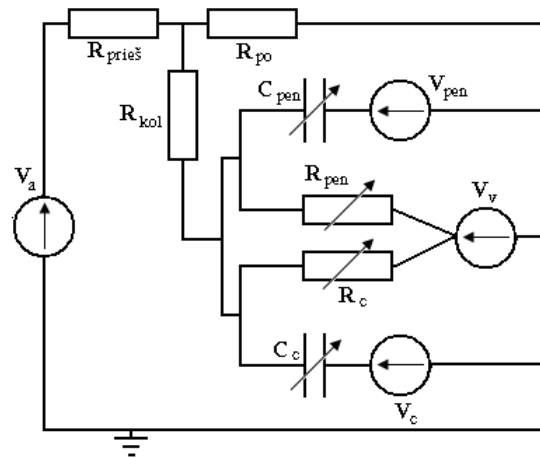
Kuriant kolateralinės kraujotakos modelį panaudojau elektrinių grandinių teoriją. Kraujagyslių užspaudimą imituoja Starlingo rezistorius. Kai kraujagyslė teikianti kraują į kokią nors smegenų sritį užsikemša, tada įvyksta tolimesnių kraujagyslių užspaudimas dėl aplinkinių audinių spaudimo padidėjimo. Taip kraujas sustoja tekėti, o tuo pačiu ir neteikiamos reikalingos medžiagos smegenų funkcijoms atlikti. Fiziologiniai procesai ir reiškiniai bus pakeisti elektrinių grandinių elementais. Įtampa laidininkuose sutapatinama su spaudimu esančiu kraujagyslėse, elektrinė srovė sutapatinama su kraujo tėkmės srove, elektrinis krūvis sutapatinamas su kraujagyslės tūriu.

Schema esanti 6 pav. atitinka ne dvi kraujagysles, bet ištisą ekvivalentinę kraujagyslių grupę išeminiame regione ir grupę kolateralinių šaltinių. Viena grupė kraujagyslių eina per išeminio regiono centrą, kita per penumbra, o užsikimšus pagrindinei arterijai tiekenčiai kraują įsijungia kolateralinis šaltinis (kaimyninių kraujagyslių grupė). Elektrinė grandinė atitinkanti 6 pav. schemą pavaizduota 7 pav.

<sup>17</sup> Intraluminalus - objekto ar struktūros erdvės viduje (kraujas yra intraluminalus venų atžvilgiu)



A. Dalinė okliuzija



B. Visiška okliuzija

**7 pav.** Kraujo tekėjimo kraujagyslėmis elektrinių grandinių schema ekvivalenti 6 pav. fiziologinei schemai

Dėl fiziologinių principų reikia įvesti keletą apribojimų. Kraujo spaudimas negali būti neigiamas dydis, todėl kai įtampa yra teigiama, laikome jog kraujas teka kryptimi iš širdies į širdį, t.y. arterinis kraujas pamaitintas deguonimi ir kitomis medžiagomis teka ir maitina ląsteles, bei grįžta atgal į širdį, kaip veninis kraujas atidavęs nešamas medžiagas ląstelėms, o kai įtampa neigiama, laikome jog kraujo tėkmė pakeičia kryptį. Taip nutinka kai veninis kraujo spaudimas viršina arterinį kraujo spaudimą, tada kraujas pradeda tekėti priešinga linkme.

Kraujas pro kraujagyslių sienelės ištekėti iš kraujagyslės gali, bet patekti į jas ne, todėl tūris visada turi būti teigiamas dydis, todėl kondensatoriaus talpumas taip pat tik teigiamas dydis, nes neigiamas kondensatoriaus talpumas reikštų kraujo patekimą į kraujagysles iš aplinkinių audinių.

Kai išorinis kraujagyslės spaudimas viršina įėjimo ir išėjimo spaudimą kraujagyslės dalyje, tai tos kraujagyslės pralaidumas lygus nuliui, o varža tuo pačiu tampa begalinė.

Starlingo rezistoriaus varža kinta priklausomai nuo pradinės jo varžos, nuo įtampos tekančios pro jį (nuo arterinio spaudimo) ir nuo įtampos sukeltos išorinio spaudimo. Taip pat jeigu išorinis spaudimas viršija arterinį spaudimą (pratekančio kraujo spaudimą pro būtent tą vietą kur viekia atitinkamas išorinis spaudimas), kraujagyslė užsispaudžia, o Starlingo rezistoriaus varža pasidaro begalinė.

Kondensatorius turi dvejus būsenas, jei spaudimas (įtampa) didesnė už nulį, tai talpumas yra konstanta, jei mažesnė už nulį – talpumas nulis (kraujagyslė užspausta).



Sekančioje lentelėje pateikiu kiekvieno elektrinės grandinės elemento paaiškinimą ir atitikmenį fiziologine prasme.

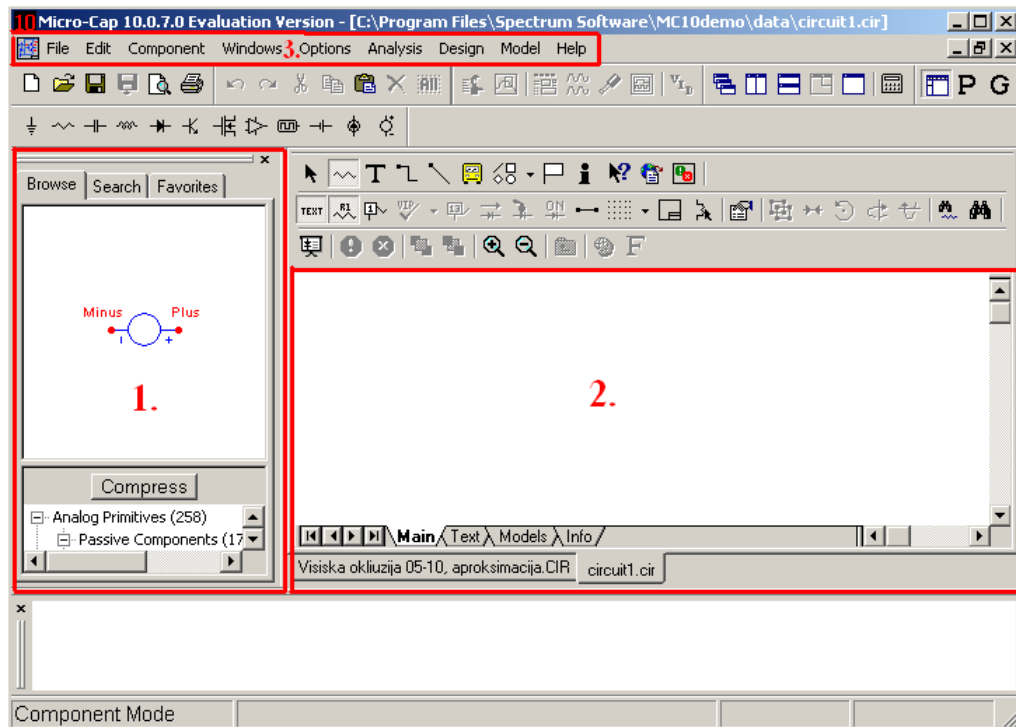
**1 lentelė.** Fiziologinių elementų atitikmenys elektrinių grandinių elementams

Elementas	Paaiškinimas
$V_a$	Elektrovaros šaltinis imituojantis arterinį spaudimą kraujagyslėse
$V_{pen}$	Elektrovaros šaltinis imituojantis išorinių kraujagyslių spaudimą penumbroje. Taip pat tai Starlingo rezistoriaus dalis.
$V_c$	Elektrovaros šaltinis imituojantis išorinių kraujagyslių spaudimą išeminės srities centrinėje dalyje. Taip pat tai Starlingo rezistoriaus dalis.
$V_v$	Elektrovaros šaltinis imituojantis veninį spaudimą kraujagyslėse
$R_i$	Varžos elementas imituojantis kraujagyslių pasipriešinimą kraujo pratekėjimui
$R_{prieš}$	Varžos elementas imituojantis kolateralinių kraujagyslių pasipriešinimą kraujo pratekėjimui prieš kolateralinę jungtį su išeminiu regionu pasipriešinimas
$R_{po}$	Varžos elementas imituojantis kolateralinių kraujagyslių pasipriešinimą kraujo pratekėjimui po kolateralinės jungties su išeminiu regionu pasipriešinimas
$R_{kol}$	Kolateralinės jungties pasipriešinimas kraujo pratekėjimui į išeminį regioną
$C_{pen}$	Netiesinis kondensatorius. Penumbros Starlingo rezistoriaus dalis
$C_c$	Netiesinis kondensatorius. Išeminio regiono centrinės dalies Starlingo rezistoriaus dalis
$R_{pen}$	Netiesinis varžos elementas. Starlingo rezistoriaus dalis.
$R_c$	Netiesinis varžos elementas. Starlingo rezistoriaus dalis.

## 1.6. SKAIČIAVIMŲ INSTRUKCIJA MICRO-CAP PROGRAMINE ĮRANGA

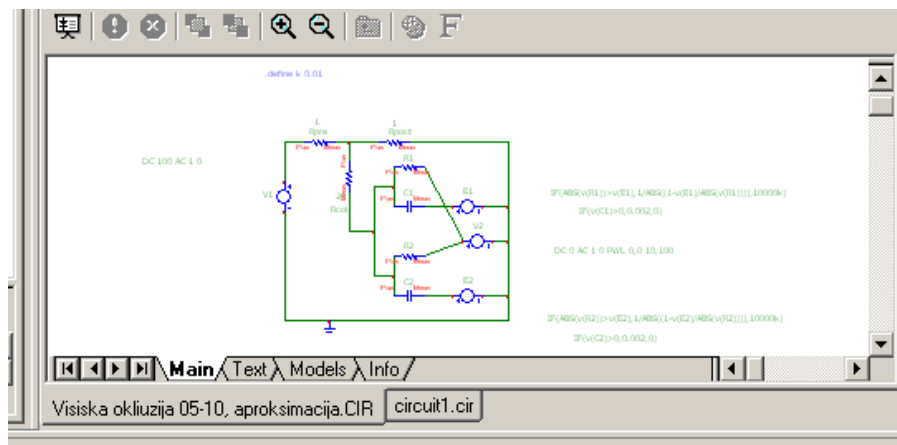
Sukūrus kolateralinės kraujotakos fiziologiją atitinkantį elektrinių grandinių modelį reikia atlikti šių grandinių skaičiavimus. Procesai vykstantys šioje grandinėje yra pereinamieji, kadangi grandinė proceso metu kinta, taip pat kinta elementų parametrai. Be viso to, keli elementai yra netiesiniai. Kadangi šios grandinės parametrų apskaičiavimas yra labai sudėtingas, todėl į pagalbą pasitelkiau elektrinių grandinių skaičiavimo programą Micro-Cap 10.0.7.0 versiją.

Pateiksiu šios programos naudojimo instrukciją. Pavaizduosiu kaip sukurti grandines, kaip atlikti tyrimus.



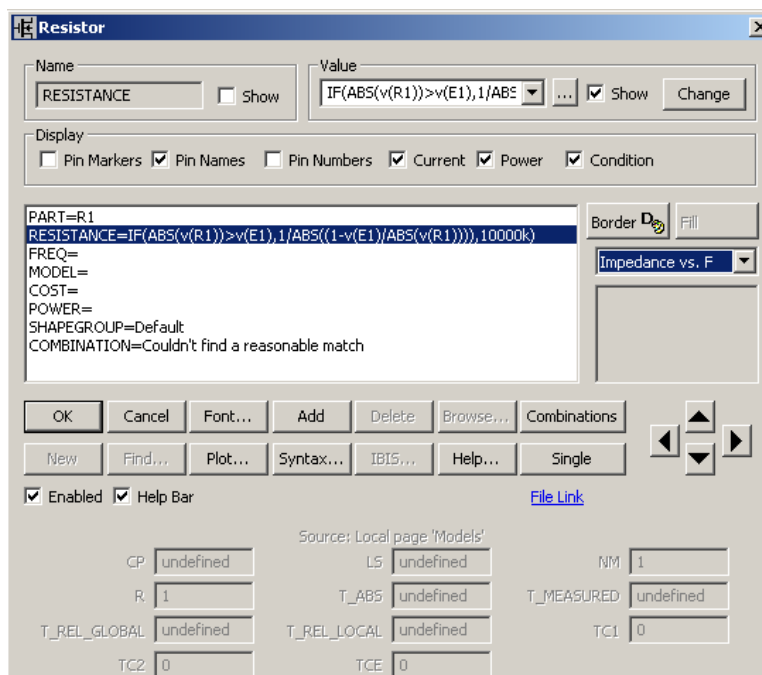
8 pav. Micro-Cap pradinis programos langas

Pagrindiniame programos lange pažymėjau svarbiausius komponentus. 1-ame lauke išsirenkame reikalingus elektrinių grandinių elementus. Juos 2-ame lauke sujungiame į reikalingas grandines (pvz. 13 pav.).



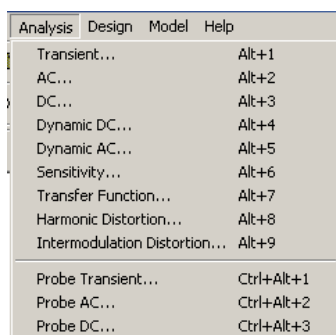
9 pav. Micro-Cap braižymo laukas

Nubraižius reikiamą grandinę ir aprašome kiekvieno elemento reikiamus parametrus (14 pav. rezistoriaus parametrų aprašymo pavyzdys).



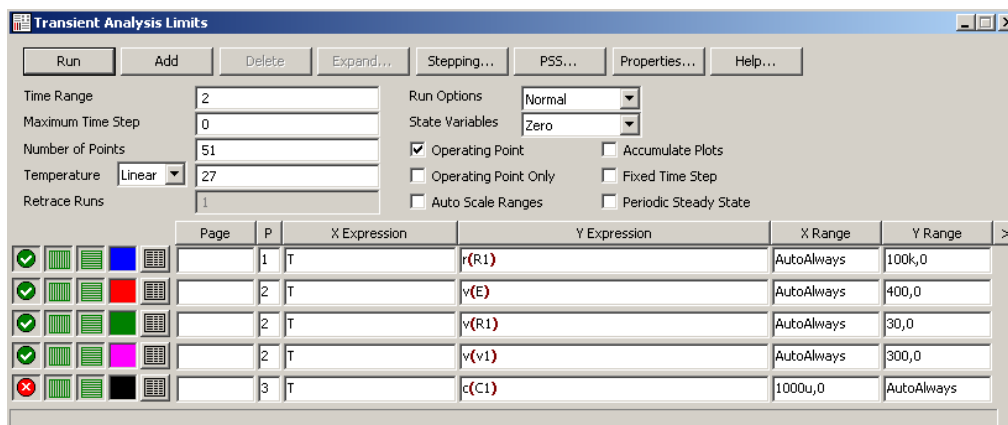
10 pav. Micro-Cap varžos elemento reikiamų nustatymų langas

Aprašius visus elementus galima pradėti atlikinėti tyrimus, skaičiuoti reikiamus elementų parametrus. Tyrimus skirta skiltis yra 3-iame lauke „Analysis“



11 pav. Micro-Cap galimi elektrinių grandinių tyrimų metodai

Mes renkamės „Transient Analysis“, nes kaip tik šis būdas skirtas skaičiuoti pereinamuosius elektrinių grandinių procesus.



12 pav. Micro-Cap Transient Analysis nustatymų langas

Šiame lange išsirenkame tyrinėjimo laiko trukmę. Taip pat surašome visus norimus grafiškai atvaizduoti parametrus. Galima išvesti ir jų skaitmenines reikšmes. Taip pat nustatome abscisių ir ordinačių ribas. Šiame lange nustatome vizualinius grafiko parametrus.

## 2. TIRIAMOJI DALIS

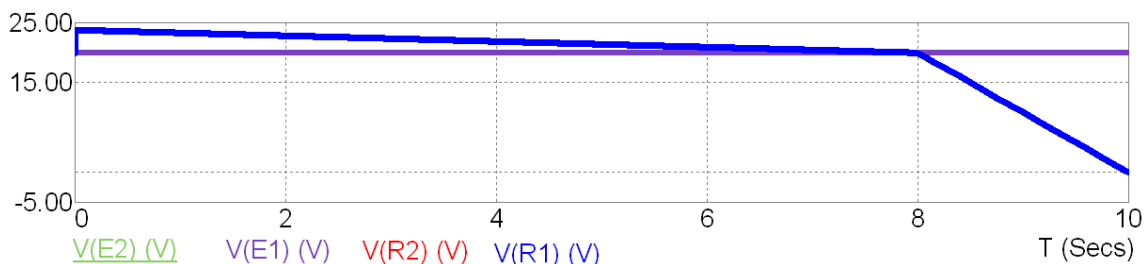
Atliekame dalinės okliuzijos ir visiškos okliuzijos skaičiavimus. Nustatome pradinius parametrus. Atliekant tyrimą bus keičiama išorinio spaudimo reikšmė ir stebima Starlingo rezistorių įtampos ir varžos, kondensatorių krūviai ir įtampos. 2 lentelėje išvardinti pasirinkti parametrai. Elektrinių grandinių elementų atitikmenys fiziologijoje paaiškinti 1 lentelėje.

**2 lentelė.** Elektrinių schemų parametrai

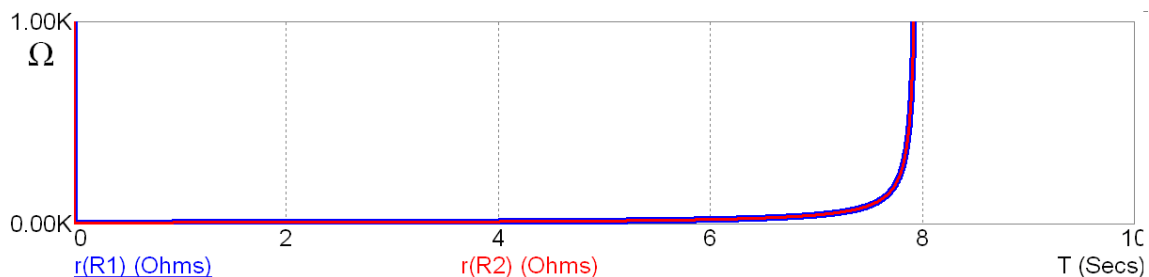
Elementas	Vertė
$V_a$	100 V
$V_{pen}$	Atliekant tyrimą bus bandomi įvairūs išorinio spaudimo variantai. 20 V, 50V
$V_c$	Atliekant tyrimą bus bandomi įvairūs išorinio spaudimo variantai. 20 V, 50V
$V_v$	Tolygiai didėjantis nuo 0V iki 100 V
$R_i$	10 $\Omega$
$R_{prieš}$	1 $\Omega$
$R_{po}$	1 $\Omega$
$R_{kol}$	20 $\Omega$
$C_{pen}$	Kol $V_{C_{pen}} > 0$ , $C_{pen} = 2$ mF, kitu atveju $C_{pen} = 0$
$C_c$	Kol $V_{C_c} > 0$ , $C_c = 2$ mF, kitu atveju $C_c = 0$
$R_{pen}$	Kol $V_{R_{pen}} > V_{pen}$ , $R_{pen} = \frac{1}{\left 1 - \frac{V_{pen}}{V_{R_{pen}}}\right }$ , kitu atveju $R_{pen} = 10$ M $\Omega$
$R_c$	Kol $V_{R_c} > V_c$ , $R_c = \frac{1}{\left 1 - \frac{V_c}{V_{R_c}}\right }$ , kitu atveju $R_c = 10$ M $\Omega$
T	Laiko periodas 10 s

**1 uždavinys. 1 dalis.** Dviejų Starlingo rezistorių su skirtingu išoriniu spaudimu tyrimas, kai kraujagyslė yra dalinai užkimšta. Grandinė pavaizduota 7 pav. A dalis. Grandinės parametrai aprašyti 2 lentelėje. Insulto srities centrinėje dalyje esančių kraujagyslių išorinis spaudimas ir penumbroje esančių kraujagyslių išorinis spaudimas tarpusavyje lygus – 20 V, o veninis spaudimas per visą tyrimo periodą (10 s) tolygiai didinamas nuo 0 iki 100 V. Keičiant veninį

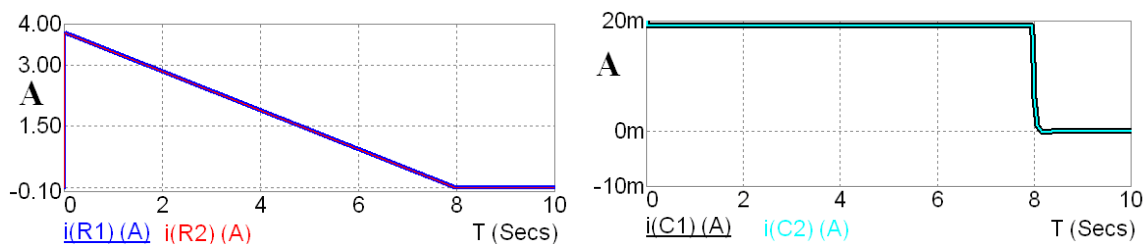
spaudimą stebėsime kaip kinta Starlingo rezistoriaus varža, įtampa, srovė. Taip pamatysime kada kraujas teka per Starlingo rezistorių, kada sustoja arba pakeičia tekėjimo kryptį.



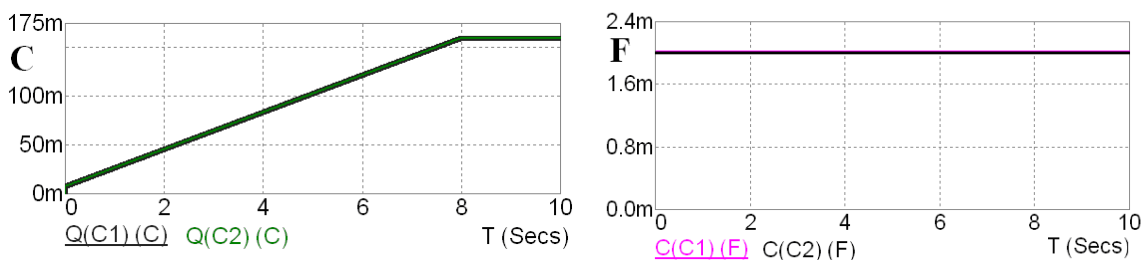
**13 pav.** Dalinės kraujagyslių okliuzijos išorinio spaudimo įtampos ir įtampos ant Starlingo rezistorių, kai  $V_{pen} = V_c = 20 \text{ V}$



**14 pav.** Dalinės kraujagyslių okliuzijos Starlingo rezistorių varžų kitimas, kai  $V_{pen} = V_c = 20 \text{ V}$



**15 pav.** Kairėje pavaizduota srovių stipriai ant Starlingo rezistorių, dešinėje – ant kondensatorių.



**16 pav.** Kondensatorių krūvių kitimas kairėje ir jų talpumas dešinėje, kai  $V_{pen} = V_c = 20 \text{ V}$

13 – 16 pav. matome dalinės okliuzijos elektrinės grandinės elementų parametrų kitimą. Šiuo atveju visi parametrai ant abiejų Starlingo rezistorių sutampa, nes išoriniai kraujagyslių spaudimai vienodi. Kai  $V_{pen} = V_c = 20 \text{ V}$ , o  $V_v$  didinamas nuo 0 iki 100, tai 8 eksperimento sekundę Starlingo rezistoriaus varžų įtampos sumažėja žemiau išorinio spaudimo reikšmės ir tai lemia kraujagyslių užspaudimą. Kitaip sakant kraujas nustoja tekėti per jas, nes išorinis

spaudimas, būdamas didesnis už vidinį spaudimą tiesiog jas užspaudžia ir kraujo tėkmė sustoja. Tarpusavyje šios įtampos yra lygios.

14 pav. matome Starlingo rezistorių varžų kitimą, jau maždaug nuo 7-tos sekundės matome ženklų varžos kilimą (tuo metu išorinis spaudimas būna tik šiek tiek mažesnis iš vidinį spaudimą), o 8-tą sekundę varža šoka į begalybę (nustatyčiau 10 M viršutinę ribą, kitu atveju skaičiavimų apimtys ir trukmė labai didelės). Didėjant varžai, t.y. padidėjus kraujo tekėjimo pasipriešinimui, kraujo tėkmė mažėja. Mažėjant tekmei tiekiami mažesnis kraujo kiekis nei reikalinga, atsiranda deguonies ir kitų medžiagų badas.

15 pav. stebime srovių ant Starlingo rezistoriaus varžos ir kondensatorių kitimą. Srovė tekanti per Starlingo rezistoriaus varžas mažėja ir galiausiai 8-tą sekundę pasidaro lygi nuliui. Šis mažėjimas rodo kraujo tekėjimo silpnėjimą, kol galiausiai visiškai sustoja.

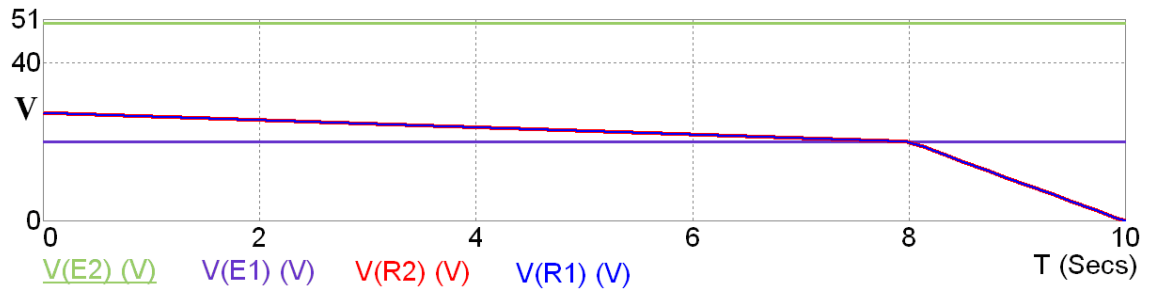
16 pav. pavaizduota kondensatorių krūviai kairėje ir jų talpumas dešinėje. Kaip ir buvo nurodyta modelio reikalavimuose – krūviai neneigiami dydžiai. Krūvis atspindi kraujo kiekį kraujagyslėse, jis didėja iki 8-tos sekundės, tada tampa pastoviu dydžiu. Tai reiškia jog kraujas kraujagyslėse sustoja. Talpumas nurodo kraujagyslės talpinamą kraujo kiekį.

Šio tyrimo metu stebime kaip pagrindinė kraują tiekianti arterija po truputį užsikemša, taip tiekia mažesnę kraujo kiekį (žr. 15 pav. kairėje). Kraujo srovė nuolatos mažėja kol 8-tą sekundę visiškai neprateka. Pradėjus silpnėti kraujo tekmei prasideda insultas, kuo mažesnis kraujo kiekis patenka į insulto sritį, tuo sunkesnis insultas ir jo padariniai.

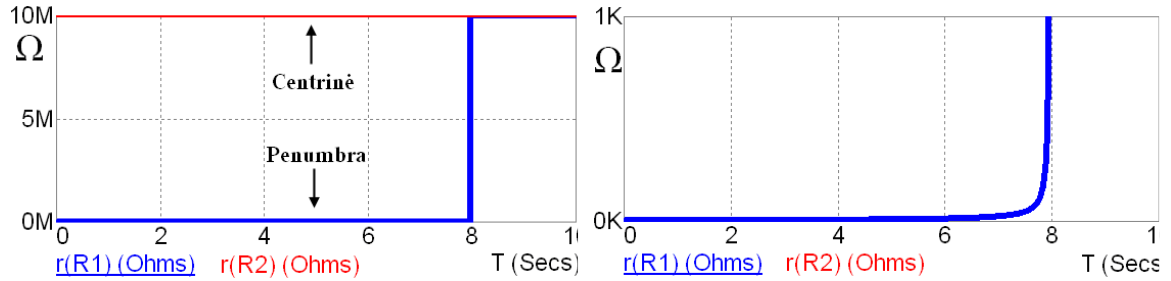
Kai išorinis spaudimas tiek centrinėje dalyje, tiek penumbroje yra vienodas, tai ir Starlingo rezistorių parametrai gaunami vienodi. Šias abi sritis vienodai veikia tiek arterinis, tiek veninis spaudimai. Pabandykime padidinti išorinį spaudimą centrinėje išeminio insulto dalyje ir stebėkime Starlingo rezistorių parametrus.

**1 uždavinys. 2 dalis.** Sprendžiame tą patį uždavinį, bet su skirtingais insulto srities centrinės dalies kraujagyslių ir penumbros kraujagyslių audinių spaudimais. Insulto srities centrinėje dalyje esančių kraujagyslių išorinis audinių spaudimas – 50 V, o penumbroje esančių kraujagyslių išorinis audinių spaudimas lygus – 20 V. Veninis spaudimas per visą tyrimo periodą (10 s), kaip ir pirmoje dalyje, tolygiai didinamas nuo 0 iki 100 V. Keičiant veninį spaudimą stebėsime kaip kinta Starlingo rezistoriaus varža, įtampa, srovė. Taip pamatysime kada kraujas teka per Starlingo rezistorių, kada sustoja arba pakeičia tekėjimo kryptį.

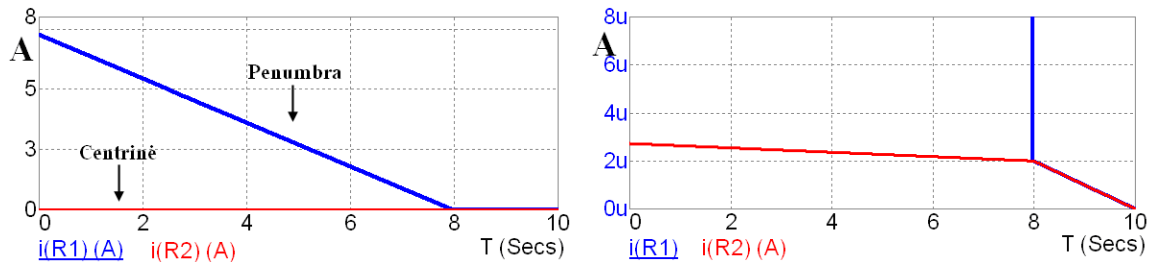
Padidinus išeminės srities centrinės dalies išorinio spaudimo reikšmę turėtume pastebėti susilpnėjusį kraujo tekėjimą per šią dalį, nes padidėja išorinis kraujagyslių spaudimas.



17 pav. Dalinės kraujagyslių okliuzijos išorinio spaudimo įtampos ir įtampos ant Starlingo rezistorių, kai  $V_{pen} = 20\text{ V}$ ,  $V_c = 50\text{ V}$



18 pav. Dalinės kraujagyslių okliuzijos Starlingo rezistorių varžų kitimas, kai  $V_{pen} = 20\text{ V}$ ,  $V_c = 50\text{ V}$ . Dešinėje pavaizduota tas pats grafikas, bet ordinačių ašies mastelis yra 5000:1



19 pav. Starlingo rezistorių varžomis tekantys srovių stipriai, kai  $V_{pen} = 20\text{ V}$ ,  $V_c = 50\text{ V}$ . Dešinėje tas pats grafikas su ordinačių ašies masteliu 1000000:1

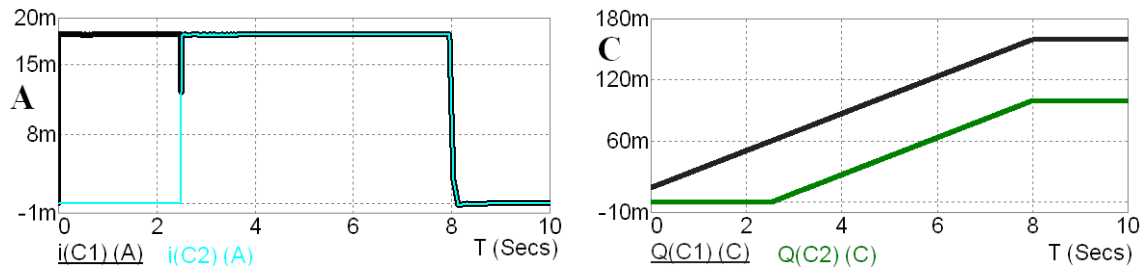
17 pav. stebime insulto srities centrinės dalies ir penumbros kraujagyslių išorinių audinių spaudimų ir Starlingo rezistorių varžų įtampų kitimą. Starlingo rezistorių varžų įtampos vienodos (kraujo spaudimas vienodas tose dalyse), nes įtampa vienodai veikia arterinis ir veniniai spaudimai. Insulto centrinės dalies kraujagysles supančių audinių spaudimas visada didesnis už kraujagyslės viduje esantį kraujo spaudimą. Kadangi išorinis spaudimas didesnis, tai centrinės dalies kraujagyslėmis kraujas neturėtų tekėti. Penumbroje esančių kraujagyslių spaudimas (įtampa) praėjus 8 sekundėms nuo bandymo pradžios tampa mažesnis už penumbros kraujagysles supančių audinių spaudimą, todėl po kraujas per penumbrą turėtų nustoti tekėti po 8-os sekundės.

Tuo įsitikiname pažvelgę į Starlingo rezistoriaus varžos kitimą (žr. 18 pav.). Insulto centrinės dalies Starlingo rezistoriaus varža visada begalybė (pasirinkau maksimalią varžos reikšmę  $10\text{ M}\Omega$ , tai pakankamai didelė reikšmė lyginant su šiame tyrime naudojamų įtampų

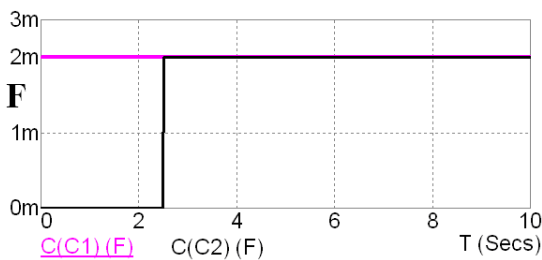


reikšmėmis, jog srovės tekėjimą per tokią varžą laikytume lygią 0), o penumbros, kaip ir manyta, Starlingo rezistoriaus varža tampa begalinė 8-tą tyrimo sekundę.

19 pav. papildo 17 ir 18 paveikslėlių išvadas. Čia parodyta kraujo tėkmė (elektros srovė elektrinėse grandinėse). Insulto centrinėje dalyje kraujas neteka, o kraujo tekėjimas per penumbra palapsniui silpnėja, kol 8-tą sekundę visiškai sustoja.



**20 pav.** Kairėje pavaizduota kondensatorių srovės stipriai, dešinėje kondensatorių krūviai, kai  $V_{pen} = 20\text{ V}$ ,  $V_c = 50\text{ V}$



**21 pav.** Kondensatorių talpumas, kai  $V_{pen} = 20\text{ V}$ ,  $V_c = 50\text{ V}$

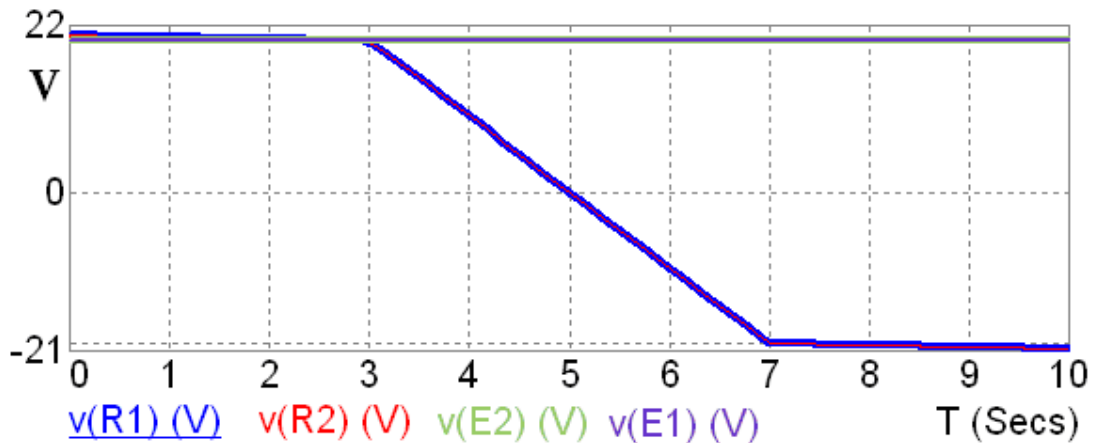
20 pav. kairėje matome kondensatoriaus srovės. Penumbros kondensatoriaus srovė po 8-tos sekundės tampa 0, o centrinės dalies 0 iki maždaug 2.5 tyrimo sekundės ir nuo nuo 8-tos sekundės. Analogiškai šio paveikslėlio dešinėje atvaizduoti krūviai ant kondensatorių. Iš jų pastebime: kai krūvis konstanta, tada kondensatoriaus srovė 0, kai krūvis didėja, tada atsiranda ir srovė, krūvis reiškia kraujo kiekį sistemoje.

Šiame uždavinyje stebėjome insulto progresą per dalinai užkimštą pagrindinę arteriją. Keisdami veninį spaudimą stebėjome kaip kinta kraujo tėkmė per insulto srities centrinę dalį ir penumbra. Pamatėme kada kraujagysles užspaudžia išoriniai audiniai, taip sustabdydami kraujo tekėjimą per jas.

**2 uždavinys. 1 dalis.** Dviejų Starlingo regionų su skirtingu išoriniu spaudimu insulto metu tyrimas, kai pagrindinė kraują tiekianti kraujagyslė visiškai užkimšta ir padidėja lokalus Starlingo regionų veninis spaudimas. Tyrinėjama fiziologinė schema pavaizduota 6 pav. B dalyje, o ekvivalentinė elektrinė grandinė pavaizduota 7 pav. B dalyje. Grandinės parametrai aprašyti 2 lentelėje. Kraujas į insulto sritį patenka per kolateralinius šaltinius. Insulto srities centrinėje dalyje esančių kraujagyslių išorinis spaudimas ir penumbroje esančių kraujagyslių išorinis spaudimas tarpusavyje lygus – 20 V, o veninis spaudimas per visą tyrimo periodą (10

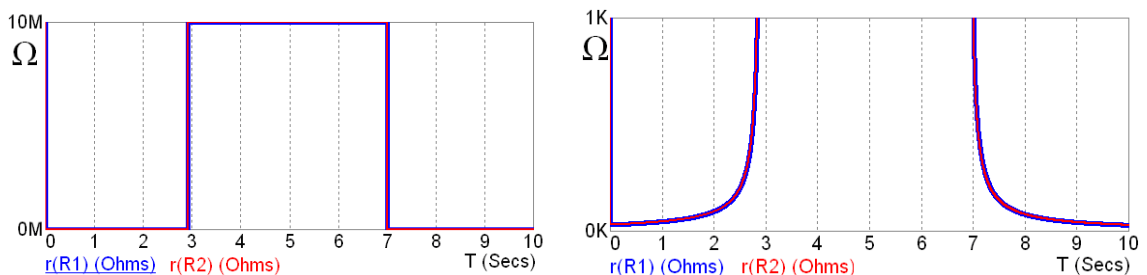
s) tolygiai didinamas nuo 0 iki 100 V. Keičiant veninį spaudimą stebėsime kaip kinta Starlingo rezistoriaus varža, įtampa, srovė. Taip pamatysime kada kraujas teka per Starlingo rezistorių, kada sustoja arba pakeičia tekėjimo kryptį.

Kadangi insulto srities tiek centrinės, tiek penumbros Starlingo rezistorių parametrai vienodi, taip pat juos vienodai veikia arterinis ir veniniai spaudimai, tai rezultatai turėtų būti panašūs 1-o uždavinio 1-os dalies rezultatams, t.y. vienu metu užsispaus kraujagyslės tiek centrinėje dalyje, tiek penumbroje, turi sutapti ir kraujo tėkmė (srovės) per šias kraujagysles.



22 pav. Visiškos okliuzijos Starlingo rezistorių varžų ir išorinio spaudimo įtampas, kai  $V_{pen} = V_c = 20$  V

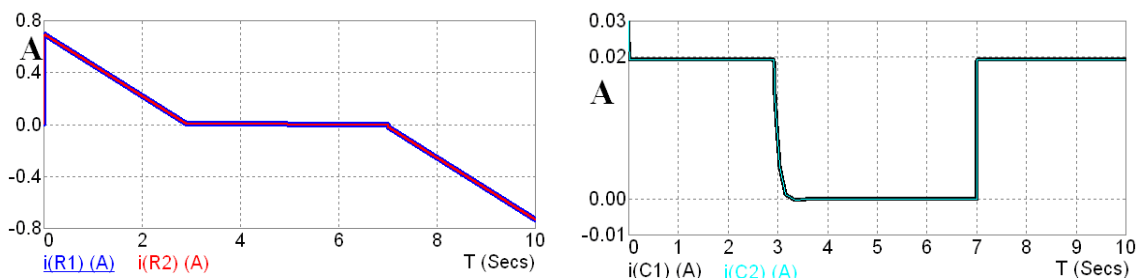
22 pav. matome Starlingo rezistorių abiejose insulto srityse varžų įtampas didesnės už išorinių audinių spaudimo įtampas maždaug iki 3-čios tyrimo sekundės, t.y. kraujo spaudimas į kraujagyslės sienelės yra didesnis už kraujagysles supančių audinių spaudimą į kraujagysles iki 3-ios tyrimo sekundės. Išoriniam spaudimui pralenkus vidinį kraujagyslės turi užsispausti ir kraujas per jas negali tekėti. Vėliau spaudimas kraujagyslių viduje mažėja, pasiekia ir neigiamas reikšmes. Neigiamos reikšmės reiškia jog kraujagyslėse sustojusį kraują stipriau veikia veninis spaudimas, nei arterinis spaudimas. Kraujas dėl neigiamo potencialo nori tekėti priešinga kryptimi, bet kraujagyslė yra užspausta išorinio spaudimo.



23 pav. Visiškos kraujagyslių okliuzijos Starlingų rezistorių varžų kitimas, kai  $V_{pen} = V_c = 20$  V. Dešinėje tas pats grafikas su ordinačių ašies masteliu 5000:1

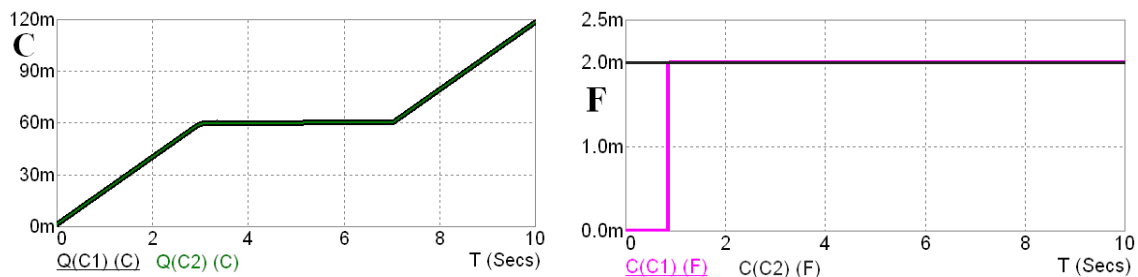
Kraujagyslių užspaudimu įsitikiname pasižiūrėję į 23 pav. kur pavaizduota Starlingo rezistorių varžų kitimas. Iki 3-čios sekundės buvusi maža varža staigiai šoka į begalybę, ir

tokia būna maždaug iki 7-tos sekundės (to momento kai Starlingo rezistoriaus varžos įtampa pasiekė mažesnę nei -20 V reikšmę). Po to kraujagyslė vėl atsidaro ir kraujas teka priešinga kryptimi.



**24 pav.** Visiškos kraujagyslių okliuzijos srovės ant Starlingo rezistorių varžų kairėje ir kondensatorių dešinėje, kai  $V_{pen} = V_c = 20$  V

24 pav. kairėje matomos srovės ant abiejų Starlingo rezistorių esančių centrinėje insulto dalyje ir penumbroje sutampa. Iki 3-ios sekundės jų reikšmė mažėja, taip insulto mastas didėja. Tada iki 7-os sekundės insulto srityje nevyksta jokia kraujo tėkmė, o nuo 7-os sekundės kraujas pradeda tekėti priešinga kryptimi. Kraujas priešinga kryptimi gali tekėti iki pagrindinės kraują tiekiančios arterijos trombo, taip kraujagysles užpildydamas veniniu krauju. Veninis kraujas savyje dar turi deguonies ir kitų medžiagų likučių, taip papildomai galima pamaitinti insulto regioną ir palengvinti insulto pasekmes.

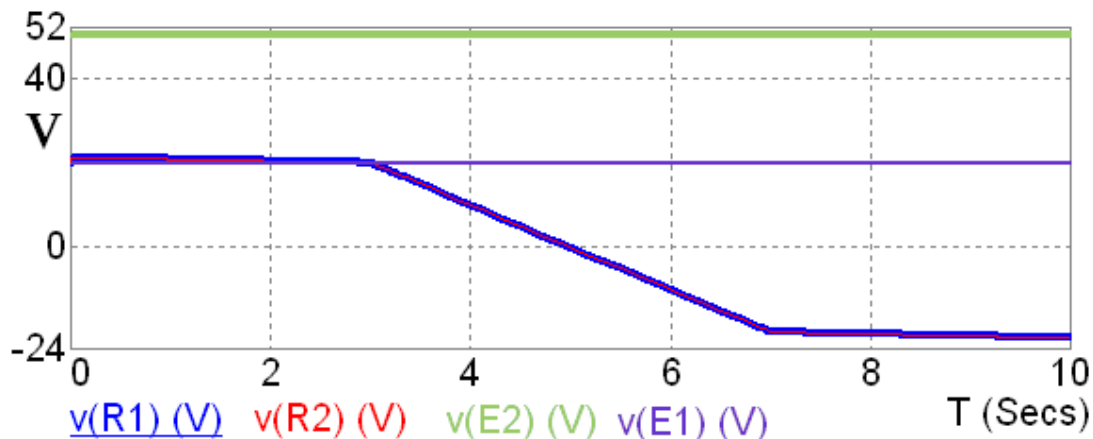


**25 pav.** Visiškos kraujagyslių okliuzijos kondensatorių krūviai, kai  $V_{pen} = V_c = 20$  V

Analogiškai kaip ir srovė per Starlingo rezistoriaus varžą, taip ir per kondensatorių srovė teka tada, kai kraujagyslė neužspausta. O 25 pav. pavaizduotas krūvio kitimas. Užspaudimo metu krūvis nekinta. Krūvis reiškia kraujo kiekį sistemoje.

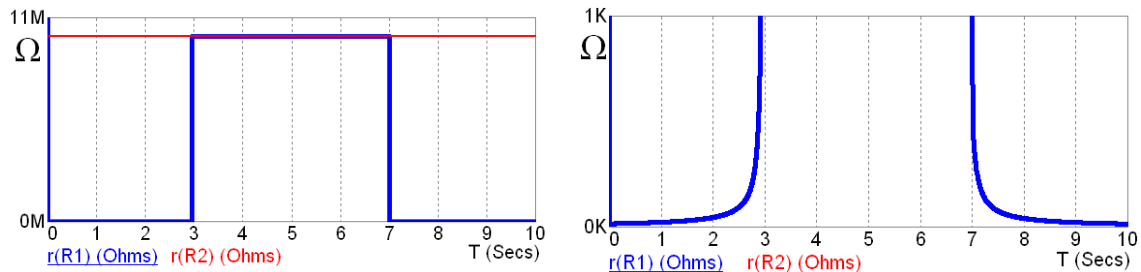
**2 uždavinys. 2 dalis.** Dviejų Starlingo regionų su skirtingu išoriniu spaudimu insulto metu tyrimas, kai pagrindinė kraują tiekianti kraujagyslė visiškai užkimšta ir padidėja lokalusis Starlingo regionų veninis spaudimas. Tyrinėjama fiziologinė schema pavaizduota 6 pav. B dalyje, o ekvivalentinė elektrinė grandinė pavaizduota 7 pav. B dalyje. Grandinės parametrai aprašyti 2 lentelėje. Kraujas į insulto sritį patenka per kolateralinius šaltinius. Insulto srities centrinėje dalyje esančias kraujagysles supančių audinių spaudimas – 50 V, penumbroje esančias kraujagysles supančių audinių spaudimas – 20 V, o veninis spaudimas per visą

tyrimo periodą (10 s) tolygiai didinamas nuo 0 iki 100 V. Keičiant veninį spaudimą stebėsime kaip kinta Starlingo rezistoriaus varža, įtampa, srovė. Taip pamatysime kada kraujas teka per Starlingo rezistorių, kada sustoja arba pakeičia tekėjimo kryptį.



**26 pav.** Visiškos okliuzijos Starlingo rezistorių varžų ir išorinio spaudimo įtampos, kai  $V_{pen} = 20 \text{ V}$ ,  $V_c = 50 \text{ V}$

26 pav. matome jog insulto centrinės dalies audinių spaudimas yra visada didesnis už centrinės dalies kraujagyslių vidinį spaudimą, todėl per šias kraujagysles kraujas negali pratekėti. Penumbroje esančių kraujagyslių spaudimas yra didesnis už penumbros audinių spaudimą iki 3-ios sekundės nuo eksperimento pradžios, vėliau jis krenta ir nuo 5-os sekundės įgauna neigiamas reikšmes. Maždaug ties 7-ta sekunde nusistovi ties  $-20 \text{ V}$  reikšme.

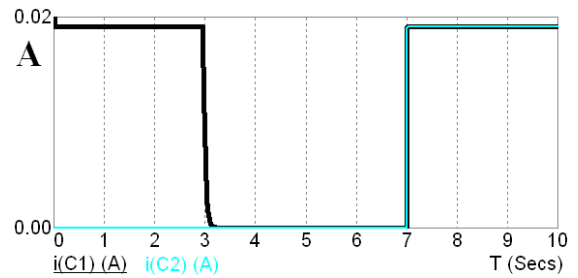
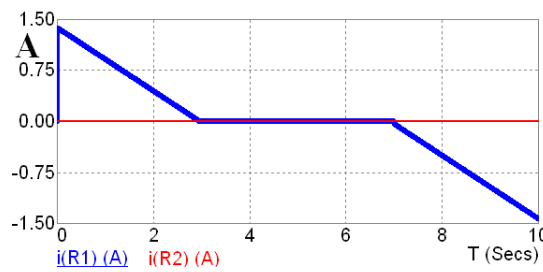


**27 pav.** Visiškos kraujagyslių okliuzijos Starlingų rezistorių varžų kitimas, kai  $V_{pen} = 20 \text{ V}$ ,  $V_c = 50 \text{ V}$ .

Dešinėje tas pats grafikas su ordinačių ašies masteliu 5000:1

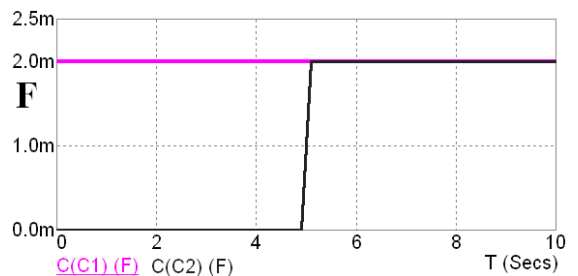
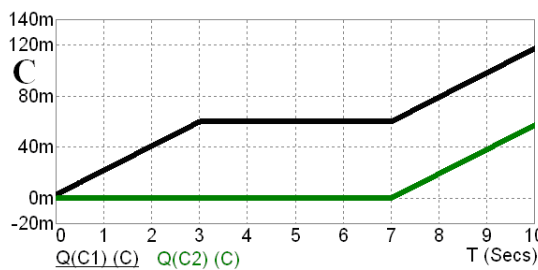
Padidinus insulto srities centrinės dalies kraujagyslių išorinį spaudimą iki  $50 \text{ V}$  jis visada didesnis už centrinės dalies kraujagyslių vidinį spaudimą, todėl centrinės dalies kraujagyslės yra užspaustos ir per jas kraujas neteka. Tą matome 31 pav.

Čia taip pat patvirtinama iš 26 pav. pateikta prielaida apie penumbros kraujagyslių pralaidumą iki 3-ios sekundės. Taip pat matome jog kraujagyslė neužspausta nuo 7-os sekundės. Tą lemia veninio spaudimo padidėjimas, t.y. sukeliamas toks veninis spaudimas, didesnis už penumbros srities kraujagysles supančių audinių spaudimą ir kraujas priteka į penumbra.



**28 pav.** Visiškos kraujagyslių okliuzijos srovės ant Starlingo rezistorių varžų kairėje ir kondensatorių dešinėje, kai  $V_{pen} = 20 \text{ V}$ ,  $V_c = 50 \text{ V}$

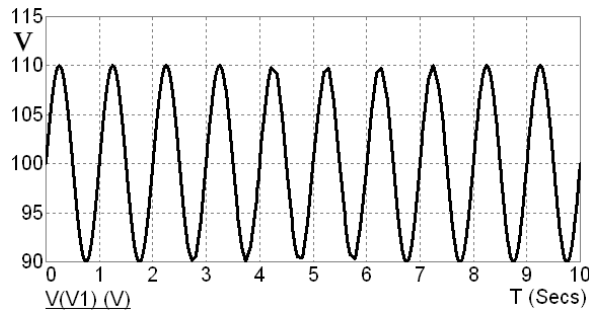
28 pav. patvirtina kraujo tėkmės prielaidas padarytas prieš tai. Per centrinę dalį kraujas neteka, o per penumbra sloopdamas teka arterinis kraujas iki 3-čios sekundės, ir nuo 7-os sekundės, atsidarius kraujagyslei, priteka į penumbra veninio kraujo.



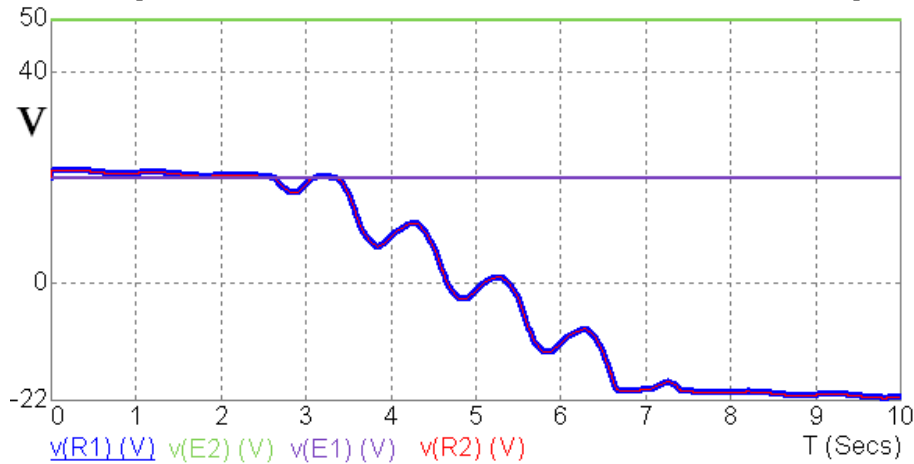
**29 pav.** Visiškos kraujagyslių okliuzijos kondensatorių krūviai kairėje ir kondensatoriaus talpumas dešinėje, kai  $V_{pen} = 20 \text{ V}$ ,  $V_c = 50 \text{ V}$

29 pav. matome kondensatorių krūvius. Pastebime iš visų tyrimų, kol krūvis konstanta – tada kraujagyslės užspaustos, kai krūvis kinta – tada vyksta kraujotaka. Na o dešinėje paveikslėlio dalyje pavaizduota kondensatoriaus talpumas. Centrinės dalies kondensatoriaus talpa atsiranda maždaug nuo 5-os sekundės.

**3 uždavinys.** Dviejų Starlingo regionų su skirtingu išoriniu spaudimu insulto metu tyrimas visiškios okliuzijos metu, kai arterinis spaudimas kinta sinusoide. Tyrinėjama fiziologinė schema pavaizduota 6 pav. B dalyje, o ekvivalentinė elektrinė grandinė pavaizduota 7 pav. B dalyje. Grandinės parametrai aprašyti 2 lentelėje, tik arterinis spaudimas kinta pagal 34 pav. grafiką. Arterinis kraujo spaudimas kinta pagal sinusoidę priklausomai nuo dažnio, t.y. pulso. Čia pasirinktas dažnis yra viena sekundė, tai atitiktų 60 širdies dūžių per minutę. Kraujas į insulto sritį patenka per kolateralinius šaltinius. Insulto srities centrinėje dalyje esančias kraujagysles supančių audinių spaudimas – 50 V, penumbroje esančias kraujagysles supančių audinių spaudimas – 20 V, o veninis spaudimas per visą tyrimo periodą (10 s) tolygiai didinamas nuo 0 iki 100 V. Keičiant veninį spaudimą stebėsime kaip kinta Starlingo rezistoriaus varža, įtampa, srovė. Taip pamatysime kada kraujas teka per Starlingo rezistorių, kada sustoja arba pakeičia tekėjimo kryptį.

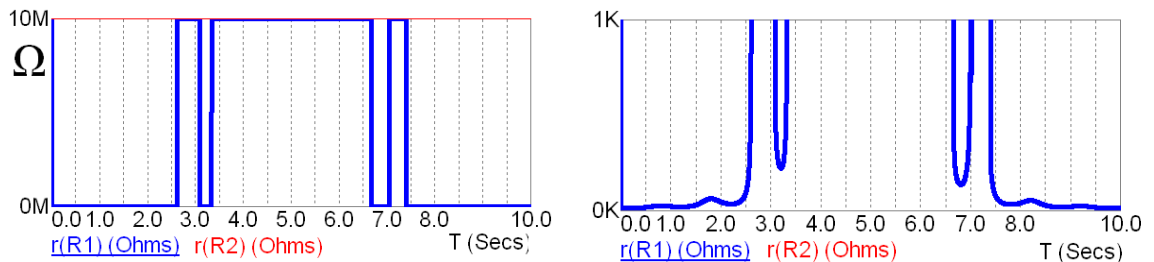


**30 pav.** Arterinio spaudimo sinusoidinis kitimas atitinkantis širdies dūžius - dažnis 1 s, amplitudė 10 V



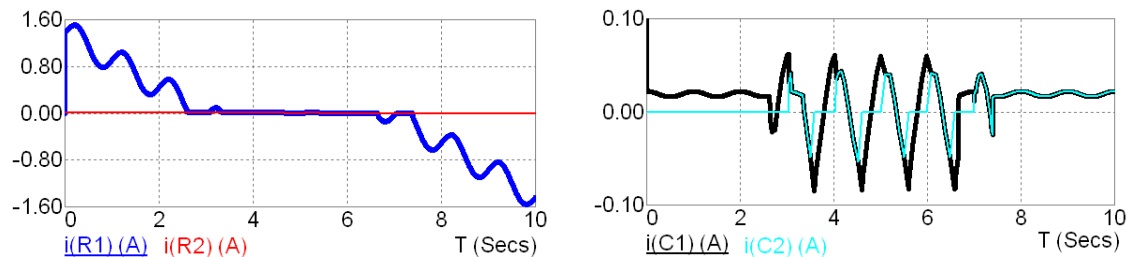
**31 pav.** Visiškos okliuzijos Starlingo rezistorių varžų ir išorinio spaudimo įtampos, kai  $V_{pen} = 20$  V,  $V_c = 50$  V ir arterinis kraujo spaudimas kinta sinusoide.

Išeminio regiono centrinės dalies ir penumbros kraujagyslių spaudimai sytampa, jie pažymėti mėlyna kreive. Centrinės dalies kraujagysles supančių audinių spaudimas (žalia kreivė) yra visada didesnis už kraujagyslių viduje esančio kraujo spaudimą, todėl centrinės dalies kraujagyslės užspaustos. Penumbroje esančių kraujagyslių spaudimas maždaug pasidaro mažesnis negu audinių spaudimas maždaug po 2.7 sekundės, bet dėl sinusoidinio arterinio spaudimo kitimo, maždaug 3 sekundę, kraujo spaudimas kraujagyslėje pasidaro didesnis už audinių spaudimą ir kraujas vėl trumpam pradeda tekėti. Šis pratekėjimas yra trumpalaikis, trunkantis vos keletą dešimtųjų sekundės dalių. Kraujo spaudimas penumbroje pamažu mažėja, įgauna neigiamas reikšmes. Maždaug po 7-os sekundės kraujo spaudimas nusistovi ties -20 V riba. Iš sekančių grafikų tiksliau pamatysime kada į išeminį regioną pradeda tekėti veninis kraujas.



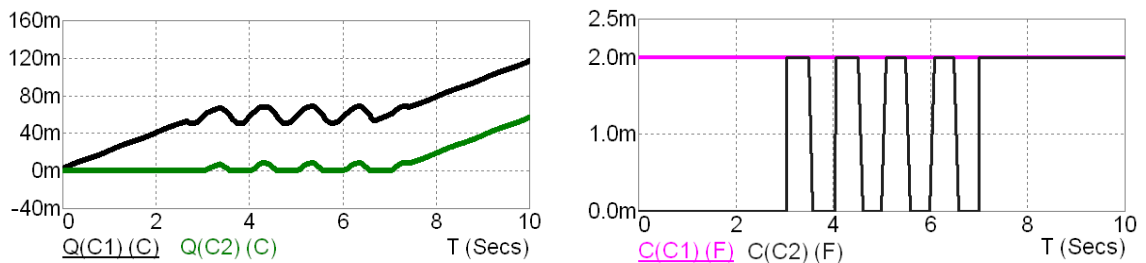
**32 pav.** Visiškos kraujagyslių okliuzijos Starlingų rezistorių varžų kitimas, kai  $V_{pen} = 20$  V,  $V_c = 50$  V ir arterinis kraujo spaudimas kinta sinusoide. Dešinėje tas pats grafikas su ordinačių ašies masteliu 5000:1

32 pav. pavaizduota Starlingo rezistorių varžos kitimas arba išeminio regiono centrinės dalies ir penumbros kraujagyslių užspaudimo momentai. Centrinėje dalyje esančios kraujagyslės visada yra užspaustos, nes varža labai didelė (raudona kreivė). Penumbros kraujagyslės šiuo atveju turi 4 skirtingus laiko tarpus kai nėra užspaustos ir kraujas per jas teka, bei 3 skirtingus užspaudimo laikotarpius kai kraujas neteka. Antras ir trečias pratekėjimo tarpsnis (maždaug ties 3-3.5 sekunde ir ties 6.5-7 sekunde) yra labai trumpas, bei varža ten yra gan aukšta (tą matome 36 pav. dešinėje), todėl tas laikinas pratekėjimas yra gana silpnas.



**33 pav.** Visiškos kraujagyslių okliuzijos srovės ant Starlingo rezistorių varžų kairėje ir kondensatorių dešinėje, kai arterinis kraujo spaudimas kinta sinusoide ir  $V_{pen} = 20 \text{ V}$ ,  $V_c = 50 \text{ V}$

33 pav. patvirtina daromas prielaidas apie penumbros kraujagyslių užspaudimo momentus (mėlyna kreivė parodo penumbros kraujagyslių kraujo tėkmę) ir visišką insulto srities centrinės dalies kraujagyslių užspaudimą. Maždaug nuo 7-os tyrimo sekundės veninis kraujas pradeda tekėti į insulto regioną. O kraujagyslės užspaudžiamos praėjus kiek mažiau nei 3 sekundėms nuo tyrimo pradžios.



**34 pav.** Visiškos kraujagyslių okliuzijos kondensatorių krūviai kairėje ir kondensatoriaus talpumas dešinėje, kai arterinis kraujo spaudimas kinta sinusoide ir  $V_{pen} = 20 \text{ V}$ ,  $V_c = 50 \text{ V}$

34 pav. kairėje pavaizduota kondensatorių talpumas. Jo reikšmės tik teigiamos, tai atitinka modelio reikalavimus. Krūvis parodo kraujo kiekį sistemoje, o neigiamas krūvis reiškia jog kraujas pro kraujagyslių sienelės patenka į jas, o to negali būti. Dešinėje pavaizduota Starlingo rezistoriaus kondensatorių talpumai. Pirmojo kondensatoriaus (penumbros kraujagyslių) talpumas visda vienodas, tai reiškia jog kraujas kraujagyslėse tiesiog sustoja.

## IŠVADOS

Sukurtas kolateralinės kraujotakos modelis imituoja kraujo tekėjimą ir jo pasiskirstymą išeminio insulto metu. Tyrimo rezultatai parodo galimas susidaryti situacijas išeminiame regione išeminio insulto metu.

Ištyrinėtos dvi skirtingos situacijos, kai pagrindinė kraują tiekianti arterinė kraujagyslė yra dalinai užkimšta (dalinė okliuzija) ir taip yra susilpninamas kraujo tiekimas, bei antroji situacija, kai arterinė kraujagyslė yra visiškai užkimšta (visiška okliuzija) ir izoliuotas .

Kai kraujagyslė dalinai užkimšta kraujas teka toliau ir insultas dar neįvyksta, nebent tai galima dirbtinai padaryti pakeliant veninį spaudimą, bei audinių spaudimą, kas normaliomis sąlygomis paprastai neįvyksta. Kraujagyslei pilnai užsikimšus įsijungia kolateralinis šaltinis kuris turi tiekti kraują į išeminį regioną ir taip jį apsaugoti nuo pažeidimų, bet kolateraliniais šaltiniais kraujui yra sunkiau tą padaryti. Centrinėje išeminio insulto dalyje audinių spaudimas yra didesnis negu penumbroje, todėl centrinėje dalyje kraujagyslės užsispaudžia greičiau, nei penumbroje ir per jas neteka kraujas. Kraujagyslės užsispaudžia tuo metu, kai vidinis jų kraujo spaudimas pasidaro mažesnis už išorinį audinių spaudimą.

Keliant veninį spaudimą visiškos okliuzijos atveju, veninio spaudimo reikšmė pralenkia audinių spaudimą ir taip kraujas pradeda tekėti į kitą pusę, taip dar pablogindamas situaciją, nes iš išeminės srities išteka veninis kraujas.

Išanalizavus tyrimų rezultatus galime daryti prielaidą, jog kolateralinė kraujotaka insulto metu veiktų tinkamai, jei galėtume padidinti arterinį spaudimą, taip išvengtume kraujagyslių užspaudimo, o tuo labiau veninio kraujo ištekėjimo iš išeminės srities.



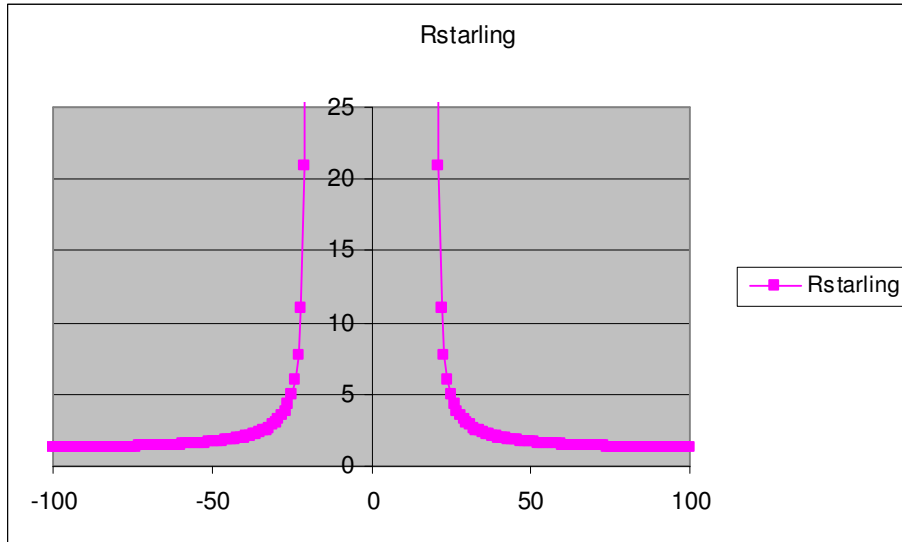
## LITERATŪROS SARAŠAS

1. Jacikevičius Kęstutis. Galvos smegenų kraujotakos ir jos autoreguliacijos principai. Iš *Neurochirurgas*. 2010. [žiūrėta 2011-10-15]. Prieiga per internetą: [http://www.neurochirurgas.lt/index.php?option=com\\_content&view=article&id=62:galvos-smegen-kraujotakos-ir-jos-autoreguliacijos-principai&catid=38:naudinga-informacija&Itemid=55](http://www.neurochirurgas.lt/index.php?option=com_content&view=article&id=62:galvos-smegen-kraujotakos-ir-jos-autoreguliacijos-principai&catid=38:naudinga-informacija&Itemid=55)
2. Viliūšienė Vilma. Išeminis galvos smegenų insultas. Iš *SOS03*. 2008. [žiūrėta 2011-10-15]. Prieiga per internetą: [http://www.sos03.lt/Ligos/Nervu\\_sistemas/Iseminis\\_galvos\\_smegenu\\_insultas](http://www.sos03.lt/Ligos/Nervu_sistemas/Iseminis_galvos_smegenu_insultas)
3. Wikipedija Laisvoji enciklopedija. *Rezistorius*. 2012 vasaris. – [žiūrėta 2012-04-20]. Prieiga per internetą: <<http://lt.wikipedia.org/wiki/Rezistorius>>
4. Wikipedija Laisvoji enciklopedija. *Kondensatorius (elektra)*. 2012 sausis. – [žiūrėta 2012-04-20]. Prieiga per internetą: <[http://lt.wikipedia.org/wiki/Kondensatorius\\_%28elektra%29](http://lt.wikipedia.org/wiki/Kondensatorius_%28elektra%29)>
5. Wikipedija Laisvoji enciklopedija. *Induktyvumas*. 2012 kovas. – [žiūrėta 2012-04-20]. Prieiga per internetą: <<http://lt.wikipedia.org/wiki/Induktyvumas>>
6. PUKYS, P.; STONYS, J.; VIRBALIS, A. *Teorinė elektrotechnika. Elektros grandinių teorijos pagrindai*. Kaunas, 2004. [4]
7. PUKYS, P. *Teorinė elektrotechnika I*. Kaunas, 2000 [5]
8. BARTKEVIČIUS, S.; LAZAUSKAS, V.; PUKYS, P.; STONYS, J.; VIRBALIS, A. *Teorinė elektrotechnika II*. Kaunas, 1996. [6]
9. STRANDNESS, D. E. *Collateral circulation in clinical surgery*. Philadelphia, 1969.
10. Pranevicius Osvaldas, Pranevicius Mindaugas, Pranevicius Henrikas, Libeskind David S. Transition to Collateral Flow After Arterial Occlusion Predisposes to Cerebral Venous Steal. Iš *Stroke Journal of The American Heart Association*. 2012 sausis. [žiūrėta 2012-02-10]. Prieiga per internetą: <http://stroke.ahajournals.org/content/early/2012/01/12/STROKEAHA.111.635037>
11. Stalford Catherine B. The Starling resistor: A model for explaining and treating obstructive sleep apnea. Iš *AANA Journal*. 2004 balandis.

## 1 priedas

**3 lentelė** Starlingo rezistoriaus varžos kitimas priklausomai nuo per jį tekančio kraujo spaudimo ir išorinio audinių spaudimo

1. Ui	1. PP	1. Rst	2. Ui	2. PP	2. Rst	3. Ui	3. PP	3. Rst	4. Ui	4. PP	4. Rst
-100	-80	1.25000	-50	-30	1.66667	0	0	10000	50	30	1.66667
-99	-79	1.25316	-49	-29	1.68966	1	0	10000	51	31	1.64516
-98	-78	1.25641	-48	-28	1.71429	2	0	10000	52	32	1.62500
-97	-77	1.25974	-47	-27	1.74074	3	0	10000	53	33	1.60606
-96	-76	1.26316	-46	-26	1.76923	4	0	10000	54	34	1.58824
-95	-75	1.26667	-45	-25	1.80000	5	0	10000	55	35	1.57143
-94	-74	1.27027	-44	-24	1.83333	6	0	10000	56	36	1.55556
-93	-73	1.27397	-43	-23	1.86957	7	0	10000	57	37	1.54054
-92	-72	1.27778	-42	-22	1.90909	8	0	10000	58	38	1.52632
-91	-71	1.28169	-41	-21	1.95238	9	0	10000	59	39	1.51282
-90	-70	1.28571	-40	-20	2.00000	10	0	10000	60	40	1.50000
-89	-69	1.28986	-39	-19	2.05263	11	0	10000	61	41	1.48780
-88	-68	1.29412	-38	-18	2.11111	12	0	10000	62	42	1.47619
-87	-67	1.29851	-37	-17	2.17647	13	0	10000	63	43	1.46512
-86	-66	1.30303	-36	-16	2.25000	14	0	10000	64	44	1.45455
-85	-65	1.30769	-35	-15	2.33333	15	0	10000	65	45	1.44444
-84	-64	1.31250	-34	-14	2.42857	16	0	10000	66	46	1.43478
-83	-63	1.31746	-33	-13	2.53846	17	0	10000	67	47	1.42553
-82	-62	1.32258	-32	-12	2.66667	18	0	10000	68	48	1.41667
-81	-61	1.32787	-31	-11	2.81818	19	0	10000	69	49	1.40816
-80	-60	1.33333	-30	-10	3.00000	20	0	10000	70	50	1.40000
-79	-59	1.33898	-29	-9	3.22222	21	1	21.00000	71	51	1.39216
-78	-58	1.34483	-28	-8	3.50000	22	2	11.00000	72	52	1.38462
-77	-57	1.35088	-27	-7	3.85714	23	3	7.66667	73	53	1.37736
-76	-56	1.35714	-26	-6	4.33333	24	4	6.00000	74	54	1.37037
-75	-55	1.36364	-25	-5	5.00000	25	5	5.00000	75	55	1.36364
-74	-54	1.37037	-24	-4	6.00000	26	6	4.33333	76	56	1.35714
-73	-53	1.37736	-23	-3	7.66667	27	7	3.85714	77	57	1.35088
-72	-52	1.38462	-22	-2	11.00000	28	8	3.50000	78	58	1.34483
-71	-51	1.39216	-21	-1	21.00000	29	9	3.22222	79	59	1.33898
-70	-50	1.40000	-20	0	10000	30	10	3.00000	80	60	1.33333
-69	-49	1.40816	-19	0	10000	31	11	2.81818	81	61	1.32787
-68	-48	1.41667	-18	0	10000	32	12	2.66667	82	62	1.32258
-67	-47	1.42553	-17	0	10000	33	13	2.53846	83	63	1.31746
-66	-46	1.43478	-16	0	10000	34	14	2.42857	84	64	1.31250
-65	-45	1.44444	-15	0	10000	35	15	2.33333	85	65	1.30769
-64	-44	1.45455	-14	0	10000	36	16	2.25000	86	66	1.30303
-63	-43	1.46512	-13	0	10000	37	17	2.17647	87	67	1.29851
-62	-42	1.47619	-12	0	10000	38	18	2.11111	88	68	1.29412
-61	-41	1.48780	-11	0	10000	39	19	2.05263	89	69	1.28986
-60	-40	1.50000	-10	0	10000	40	20	2.00000	90	70	1.28571
-59	-39	1.51282	-9	0	10000	41	21	1.95238	91	71	1.28169
-58	-38	1.52632	-8	0	10000	42	22	1.90909	92	72	1.27778
-57	-37	1.54054	-7	0	10000	43	23	1.86957	93	73	1.27397
-56	-36	1.55556	-6	0	10000	44	24	1.83333	94	74	1.27027
-55	-35	1.57143	-5	0	10000	45	25	1.80000	95	75	1.26667
-54	-34	1.58824	-4	0	10000	46	26	1.76923	96	76	1.26316
-53	-33	1.60606	-3	0	10000	47	27	1.74074	97	77	1.25974
-52	-32	1.62500	-2	0	10000	48	28	1.71429	98	78	1.25641
-51	-31	1.64516	-1	0	10000	49	29	1.68966	99	79	1.25316
									100	80	1.25000



**35 pav.** Starlingo varžos kitimo grafikas, kai išorinis spaudim

