



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Justas Stankevičius**

**KURO ELEMENTO IR ŽEMO DAŽNIO KEITIKLIO  
ELEKTROS ENERGIJOS KONVERSIJOS PROCESŲ  
TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Lekt. dr. Povilas Norkevičius

**KAUNAS, 2016**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**  
**ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA**

**KURO ELEMENTO IR ŽEMO DAŽNIO KEITIKLIO  
ELEKTROS ENERGIJOS KONVERSIJOS PROCESŲ  
TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Studijų programos pavadinimas (kodas 621H63003)

**Vadovas**

Lekt. dr. Povilas Norkevičius

**Recenzentas**

.....

**Projektą atliko**

Justas Stankevičius

**KAUNAS, 2016**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

Justas Stankevičius

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija 621H63003

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Kuro elemento ir žemo dažnio keitiklio elektros energijos konversijos procesų tyrimas“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m.           gegužės           23 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Justo Stankevičiaus** baigiamasis projektas tema „Kuro elemento ir žemo dažnio keitiklio elektros energijos konversijos procesų tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Stankevičius, Justas. Kuro elemento ir žemo dažnio keitiklio elektros energijos konversijos procesų tyrimas. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Povilas Norkevičius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2016. 62 psl.

### **SANTRAUKA**

Šio darbo tikslas ištirti ir optimizuoti kuro elemento ir žemo dažnio keitiklio elektros energijos konversijos sistemą. Tyrimas atliekamas imitacinio modeliavimo programa „MATLAB Simulink“.

Pirminė elektros energijos konversijos sistema papildoma energijos kaupikliu, transformatoriumi ir srovės lygintuvu. Optimizuojamas energijos tiekimas sistemai iš energijos kaupiklio derinant su kuro elementu. Į sistemos grandinę įvedamas LC rezonansinis kontūras, sustiprinti 50 Hz harmoniką. Pateikiamos imitacinio modelio darbo režimų procesų charakteristikos.

*Reikšminiai žodžiai: kuro elementas, energijos kaupiklis, rezonansinis kontūras, atsinaujinančioji energetika.*

Stankveičius, Justas. Research on Fuel Cell and Low-Frequency Inverter Electric Power Conversion Processes. Final project of *master degree* / supervisor lect. dr. Povilas Norkevičius; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electric Power System

Kaunas, 2016. 62 p.

### **SUMMARY**

The aim of this study is research and optimize the Fuel Cell and the Low-Frequency Inverter power conversion system. The research was accomplished using simulation program MATLAB Simulink.

Primary energy conversion system is additional energy storage device, a transformer and rectifier. Optimized energy supply system from an energy storage device in combination with a fuel cell. Into circuit connected the LC resonant circuit for strengthen 50Hz harmonic. Presented characteristics of simulation process.

*Keywords: Fuel Cell, Energy Storage Device, Resonant Circuit, Renewable Energy.*

# Turinys

SANTRUMPŲ ŽODYNAS .....	6
LENTELIŲ SĄRAŠAS .....	7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS .....	8
ĮVADAS .....	10
1. VANDENILIO ENERGETIKA.....	11
1.1. Vandenilio gamybos technologijos ir resursai.....	12
1.2. Vandenilio panaudojimo galimybės ir perspektyvos pasaulyje.....	14
2. KURO ELEMENTAS.....	16
2.1. Kuro elementų technologijos .....	16
2.2. KE charakteristikos.....	18
3. KURO ELEMENTŲ TIPAI.....	21
3.1. Protonų mainų membranos kuro elementas.....	22
3.2. Kieto oksido elektrolito kuro elementas .....	23
3.3. Fosforo rūgšties elektrolito kuro elementas.....	24
3.4. Išlydytų karbonatų elektrolito kuro elementas.....	25
3.5. Šarminis kuro elementas.....	27
3.6. Tiesioginio metanolio kuro elementas .....	28
4. GALIOS ELEKTRONIKA IR DIDELĖS GALIOS PUSLAIDININKINIAI ĮTAISAI ....	30
4.1. Pagrindiniai keitiklių tipai .....	32
4.2. Diodai.....	33
5. ELEKTRINIAI FILTRAI .....	35
6. ELEKTROS ENERGIJOS KAUPIKLIAI .....	37
7. ELEKTROS ENERGIJOS KONVERSIJOS STRUKTŪRA IR IMITACINIS PROCESŲ MODELIS .....	38
8. ELEKTROS ENERGIJOS KONVERSIJOS IMITACINIS MODELIAVIMAS.....	42
8.1. Sistemos optimizavimas .....	42
8.2. Procesų tyrimas.....	50
IŠVADOS.....	58
NAUDOTOS LITERATŪROS IR KITI INFORMACINIAI ŠALTINIAI .....	59
PRIEDAI .....	61
Priedas 1. Pagrindinių kuro elementų tipų technologijų palyginimas .....	61
Priedas 2. Imitacinis sistemos modelis .....	62

## SANTRUMPŲ ŽODYNAS

KE – kuro elementas (angl. *Fuel cell*)

PEM – KE su polimerinio elektrolito membrana (angl. *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell PEMFC*);

KOE – KE su kieto oksido elektrolitu (angl. *Solid Oxide Fuel Cell SOFC*);

FRE – KE su fosforo rūgšties elektrolitu (angl. *Phosphor Acid Fuel Cell PAFC*);

IKE – KE su išlydyto karbonato elektrolitu (angl. *Moulted Carbonate Fuel Cell MCFC*);

ŠKE – šarminis KE (angl. *Alkaline Fuel Cell AFC*);

TM – tiesioginio tiekimo metanolio KE (angl. *Direct Methanol Fuel Cell DMFC*).

N.v.k – naudingo veikimo koeficientas (naudingumo koeficientas)

DC – nuolatinė srovė (angl. *Direct Current*)

AC – kintamoji srovė (angl. *Alternating Current*)

DGD – didelės galios diodas

THD – netiesinių iškreipimų faktorius (angl. *Total Harmonic Distortion*)

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

3.1 lentelė. Pagrindinių kuro elementų tipai technologiniai parametrai [22 psl.];

6.1 lentelė. Mažos galios energijos kaupiklių palyginimas [37 psl.];

7.1 lentelė. Inverterio tranzistorių suveikimo laiko momentai [41 psl.];

8.1 lentelė. Apkrovos įtampos, įtampos THD ir srovės THD vertės esant skirtingam perjungimo dažniui [43 psl.];

8.2 lentelė. Apkrovos įtampos, įtampos THD ir srovės THD vertės esant skirtingai kondensatoriaus Cd talpai [47 psl.];

8.3 lentelė. LC kontūro induktyvumo ir talpumo kombinacijos [49 psl.];

8.4 lentelė. Apkrovos įtampos vertės prie skirtingų transformacijos koeficientų visoms LC kombinacijoms [49 psl.].

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

- 1.1 pav. Vandenilio technologijų blokinė schema [11 psl.];
- 2.1 pav. Kuro elemento veikimo schema [17 psl.];
- 2.2 pav. Kuro elemento įtampos priklausomybė nuo srovės tankio [18 psl.];
- 2.3 pav. Įtampos ir galios tankio priklausomybės nuo srovės tankio [20 psl.];
- 3.1 pav. Protonų mainų membranos kuro elemento veikimo schema [23 psl.];
- 3.2 pav. Kieto oksido elektrolito kuro elemento veikimo schema [24 psl.];
- 3.3 pav. Išlydytų karbonatų elektrolito kuro elemento veikimo schema [27 psl.];
- 3.4 pav. Šarminio kuro elemento veikimo schema [28 psl.];
- 3.5 pav. Tiesioginio metanolio kuro elemento veikimo schema [29 psl.];
- 4.1 pav. Apibendrinta galios elektronikos sistema [30 psl.];
- 4.2 pav. Jungiklio galia perjungimo metu [31 psl.];
- 4.3. pav. Detalizuota galios elektronikos sistema [32 psl.];
- 4.4 pav. Didelės galios diodo struktūra [33 psl.];
- 4.5 pav. Didelės galios diodo voltamperinė charakteristika. [34 psl.];
- 5.1 pav. Rezonansinių filtrai: a, b – nuoseklūs; c, d – lygiagretūs; e – mišrus [36 psl.];
- 7.1 pav. Pirminė energijos konversijos sistema [38 psl.];
- 7.2 pav. Pirminės energijos konversijos sistemos KE ir apkrovos efektinių įtampų ir srovių kitimas laike [39 psl.];
- 7.3 pav. Tiriamos sistemos modelis [40 psl.];
- 8.1 pav. Generuojamo dažnio priklausomybė nuo apkrovos įtampos ir srovės THD [43 psl.];
- 8.2 pav. Generuojamo dažnio priklausomybė nuo apkrovos įtampos vidutinės vertės [44 psl.];



8.3 pav. Apkrovos įtampa, įtampos THD ir srovės THD be kondensatoriaus  $C_d$  [45 psl.];

8.4 pav. Apkrovos įtampa, įtampos THD ir srovės THD su kondensatoriumi  $C_d=0,1 \mu\text{F}$  [46 psl.];

8.5 pav. Apkrovos srovės ir įtampos THD priklausomybė nuo kondensatoriaus  $C_d$  talpos [47 psl.];

8.6 pav. Apkrovos įtampos priklausomybė nuo kondensatoriaus  $C_d$  talpos [48 psl.];

8.7 pav. Apkrovos įtampos priklausomybė nuo LC kontūro induktyvumo prie skirtingų transformacijos koeficientų [49 psl.];

8.8 pav. Apkrovos įtampos priklausomybė nuo LC kontūro talpumo prie skirtingų transformacijos koeficientų [50 psl.];

8.9 pav. Apkrovos įtampos priklausomybė nuo apkrovos galios [51 psl.];

8.10 pav. EK srovės  $I_{EK}$  priklausomybė nuo laiko  $t$ , kai inverteris dirba tuščios veikos režime [52 psl.];

8.11 pav. Inverterio išėjimo įtampos priklausomybė nuo laiko, kai jis dirba tuščiosios veikos režimu [53 psl.];

8.12 pav. Apkrovos srovės  $I_a$  priklausomybė nuo laiko  $t$  [54 psl.];

8.13 pav. Vienfazis trumpas jungimas  $K^{(1)}$  [54 psl.];

8.14 pav. Dvifazis trumpas jungimas  $K^{(2)}$  [55 psl.];

8.15 pav. Dvifazis trumpas jungimas su žeme  $K^{(1,1)}$  [56 psl.];

8.16 pav. Trifazis trumpas jungimas  $K^{(3)}$  [56 psl.].

## IVADAS

Keliasdešimt pastarųjų metų akivaizdžiai pastebimas iškastinio kuro mažėjimas ir brangimas. Taip pat dėl iškastinio kuro degimo proceso atliekų, padidėjo aplinkos užteršimas, kuris kelia susirūpinimą ateities kartų sveikata. Dėl to vis dažniau susimąstoma apie alternatyvius energijos šaltinius, kuriais pakeitus esamas energijos išgavimo formas būtų galima apsaugoti mūsų aplinką nuo taršos. Vienas iš alternatyvios energijos šaltinių yra kuro elementai.

Kuro elementas (angl. *Fuel cell*), tai elektrocheminis įrenginys, kuriame tam tikro kuro cheminė energija tiesiogiai keičiama į elektros energiją elektrocheminių reakcijų metu. Kuro elementai (KE) yra ekologiški, veikimo metu į aplinką neišskiriami teršalai, o išskiriamas tik vanduo skysčio ar garų pavidalu. Tačiau kaip ir kiekviena energijos išgavimo technologija, taip pat ir KE, turi trūkumų. Esminis KE trūkumas, jų kaina, dėl to šiuo metu plačiai juos naudoti sudėtinga. Stengiamasi toliau įvairiapusiška tobulinti šį elektros energijos generavimo tipą, padarant jį patrauklesniu vartojimui.

Generuojant bet kokios kilmės elektros energiją į elektros tinklą, reikalaujama, kad ši atitiktų kokybės reikalavimus. Pagrindiniai elektros kokybės parametrai: tinklo dažnis ( $50 \text{ Hz} \pm 1 \text{ proc.}$ ), įtampos asimetrija (trifazės sistemos kampai tarp fazių turi būti vienodi ir lygūs  $120^\circ$ ), sinusoidiškumas (įtampos nesinusoidiškumas negali būti didesnis nei 8 proc.). Kuro elemento pagaminamos elektros energijos srovė nėra „švarios“ sinusoidinės formos signalas, kuris būtų tinkamas tiekti į tinklą. Norint signalą „apvalyti“ nuo susidariusių nereikalingų trikdžių naudojamos tam tikros keitiklių filtrų sistemos, apdorojančios elektrinius signalus ir suformuojančios kokybišką sinusoidinę kreivę.

Darbo tikslas: Sudaryti kuro elemento ir keitiklio imitacinį modelį ir ištirti elektros energijos konversijos stacionariusius ir pereinamuosius procesus bei identifikuoti charakteristikas optimaliam keitiklio reaktyviųjų elementų parinkimui.

Darbo uždaviniai:

1. Sudaryti tiriamos elektros energijos konversijos sistemos modelį.
2. Elektros energijos perdavimo iš kuro kaupiklio į apkrovą bei energijos kaupiklį optimizavimas.
3. Imitacinio modelio pagalba ištirti sistemos darbo režimų procesus.

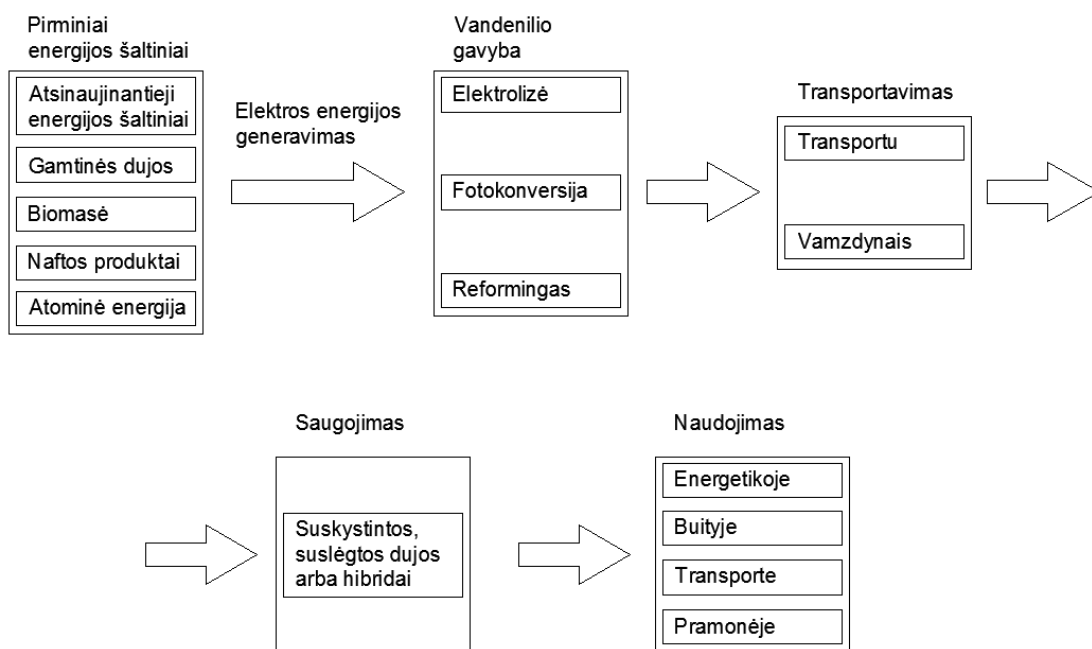
# 1. VANDENILIO ENERGETIKA

Didėjant žmonijos socialinei ir fizinei gerovei, didėja ir žmonijos poreikiai. Nuolat ieškoma galimų sprendimų, kaip apsirūpinti energija ir sumažinti neigiamą įtaką aplinkai, o vienas iš galimų būdų yra vandenilio energetika ir su ja siejama kuro elemento technologija. Energetikoje vandenilis yra laikomas energijos šaltiniu (kuru), kurio naudojimas gali radikaliai pakeisti energijos gamybos, perdavimo ir vartojimo sritis. Ypatingai daug vilčių dedama kuriant visiškai švarias transporto priemones, kuriose naudojamas vandenilio kuras. Transporto priemonėse vandenilis gali būti naudojamas dviem būdais:

- Elektrinėse transporto priemonėse, turinčiose kuro elementus, vandenilis elektrocheminių reakcijų metu konvertuojamas į elektros energiją;
- Transporto priemonėse su vidaus degimo varikliu, vandenilis greitos oksidacijos reakcijos metu konvertuojamas į mechaninę energiją ir šiluminę energiją.

Šių vykstančių reakcijų šalutinis produktas yra vanduo arba vandens garai, kurie neteršia aplinkos.

Vandenilis nėra pirminis energijos šaltinis, toks kaip naftos produktai ar anglis. Vandenilis yra gaminamas naudojant daugelį pirminių energijos šaltinių – atsinaujinančiuosius energijos šaltinius, gamtines dujas, naftą ir atominę energiją (1.1 pav.).



1.1 pav. Vandenilio technologijų blokinė schema

Vandenilis yra labiausiai paplitęs cheminis elementas Visatoje, tačiau Žemėje jis neegzistuoja laisva forma, o yra randamas organiniuose junginiuose ir vandenyje. Norint panaudoti vandenilį energetinėse sistemose, reikia jį išskirti iš cheminių junginių. Tam reikalingas pirminės energijos šaltinis, kurio energija būtų naudojama vandenilį turinčioms medžiagoms skaidyti. Pagrindinis vandenilio privalumas yra tas, kad jo, kaip kuro, degimo produktas yra švarus vanduo. Tikimasi, kad vandenilis, kurį galima kaupti ir prireikus naudoti, leis daug efektyviau išnaudoti nepastovios energijos šaltinius, tokius kaip vėjas, saulė, bangų energija. Dėl savo savybių šie atsinaujinantys šaltiniai yra sunkiai integruojami į dabartinę elektros energijos tiekimo sistemą, kurioje pasiūla turi tiksliai atitikti paklausą. Vandenilio kaupimo sistemų kūrimas sudarytų sąlygas atsirasti rinkai, kuri atsinaujinančiųjų šaltinių naudojimą padarytų ekonomiškai patrauklesniu. Galiausiai, vandenilio naudojimas miesto transporto sistemose padėtų sumažinti oro taršą.

### **1.1. Vandenilio gamybos technologijos ir resursai**

Šiuo metu apie 90 proc. vandenilio gaunama iš gamtinių dujų, anglies ir naftos produktų. Vandenilis taip pat gaunamas iš vandens, atliekant elektrolizę arba aukštatemperatūrį vandens garo skaidymo procesą. Vandenilį išgaunant iš organinio kuro tradiciniais termocheminiais metodais į aplinką išmetama daug CO<sub>2</sub> dujų, todėl šiuo metu daugiau dėmesio skiriama vandens skaidymo ir kitoms technologijoms. Tiriamos arba jau naudojamos šios technologijos:

- Vandens elektrolizė, naudojant elektrą, gaminimą iš branduolinės energijos ir atsinaujinančių šaltinių;
- Biomasės dujinimas ir vandenilio išskyrimas iš gautų dujų;
- Tiesioginė vandens fotolizė naudojant saulės energiją;
- Vandens skaidymas naudojant modernius biotechnologinius procesus.

Tačiau visos išvardintos technologijos, išskyrus elektrolizę, yra fundamentinių tyrimų stadijos. Jų energetinis efektyvumas dar gana žemas. Todėl praeis nemažai laiko, kol bus sukurta vandenilio ekonomika, galinti konkuruoti su tradicine, organiniu kuru paremta ekonomika. Ekspertų nuomone, vandenilis ryškesnę vietą energetikoje ir transporte užims tik tuomet, kai prasidės aiškus iškastinio organinio kuro stygius. Todėl mažai tikėtina, kad šios perspektyvios technologijos paplistų per artimiausius 20 metų.

Gamtinės dujos, nafta, anglis šiuo metu yra pagrindiniai vandenilio gamybos šaltiniai. Angliavandenilių suskaidymui dažniausiai taikomi šie trys termocheminiai metodai: katalitinis reformingas (dehidrinimas) vandens garais, dalinė oksidacija ir autoterminis reformingas. Reformingu vadinamas toks vandenilio gamybos būdas, kuomet vandenilis išskiriamas iš angliavandenilio kuro ( $C_nH_m$ ), kartu naudojant vandens garus arba/ir deguonį.

Reformingas panaudojant garą yra efektyviausia ir geriausiai išvystyta technologija, išsiskirianti aukštu konversijos laipsniu. Vandens garams sąveikaujant su kuru išskiriamas vandenilis. Vandenilis išgryninamas naudojant specialias membranas ir jį separuojant. Metodo trūkumas, kad šis procesas yra endoterminis, t.y. jam vykdyti yra reikalinga šiluma.

Kitas reformingo tipas, tai dalinės oksidacijos reformingas. Dalinės oksidacijos reakcijose išsiskiria šiluma, todėl papildomos energijos vandeniliui išskirti šiuo metodu reikia nedaug. Tačiau šio metodo efektyvumas yra mažesnis už angliavandenilių reformingą garu.

Autoterminiamu reformingu siekiama sujungti abu šiuos metodus taip, kad dalinės oksidacijos šiluma būtų panaudojama palaikyti reformingo reakcijoms, vykstančioms naudojant vandens garus. Ši vandenilio išskyrimo technologija buvo sėkmingai išbandyta skaidant gamtines dujas, metanolį, šviesius naftos produktus. Tačiau lieka neišspręsti svarbūs uždaviniai – technologijos pritaikymas vandenilio gamybai iš didesnę anglies dalį turinčių ir sunkiau įsisavinamų angliavandenilių išteklių – t. y. iš biokuro, naftos perdirbimo atliekų – mazuto, naftos produktų atliekų – naudotos alyvos, panaudotų padangų ir pan.

Angliavandenilių skaidymo procesas turi būti organizuotas taip, kad kuo daugiau jo palaikymui reikalingos šilumos būtų gaunama iš anglies oksidacijos, o vandenilis liktų produktuose, kurie besibaigiant procesui (galutinėje stadijoje) yra lengviau suskaidomi ir atskiriami. Vandenilis yra gaunamas iš bet kurio angliavandenilinio kuro, t.y. gali būti naudojamas, metanolis, etanolis, gamtinės dujos, naftos distiliatas, skystas propanas ir gazifikuota akmens anglis. Šis metodas plačiai naudojamas ten, kur vandeniliui saugoti nėra tinkamų sąlygų.

Vandenilis gali būti išskiriamas naudojant bakterijas ir dumblius. Ciano bakterija – plačiai paplitęs vienaląstis organizmas, kuris savo veikloje išskiria vandenilį. Ši bakterija gali būti auginama ore arba vandenyje. Ji naudoja energiją, gaunamą iš saulės spindulių ir skaido vandens

molekules. Proceso metu išsiskiria vandenilis. Iš kuro elementų grįžtantis vanduo vėl gali būti naudojamas bakterijų „maistui“ taip sukuriant uždara ciklą.

Naudojant saulės, vėjo ir kitus atsinaujinančiosios energijos šaltinius elektrai gaminti, vandenilį galima gauti iš vandens elektrolizės būdu. Gautas vandenilis yra energijos šaltinis. Ši energijos šaltinį galima transportuoti iš generavimo vietos į naudojimo vietą ir jį naudoti energijai gaminti kiekvienu atveju, kai tik energija yra reikalinga. Šio proceso metu nevyksta jokia tarša.

## **1.2. Vandenilio panaudojimo galimybės ir perspektyvos pasaulyje**

Vandenilį galima naudoti elektros ir šilumos energijai gaminti, bet visų pirma vandenilis gali būti panaudojamas kaip tradicinis kuras įprastiniuose vidaus degimo varikliuose, kurie naudojami transporte. Pavykus rasti vieną ar keletą būdų pigiai gaminti vandenilį, jis bus plačiai naudojamas vidaus degimo varikliuose. Vandenilis gali būti ir jau yra naudojamas įprastose dujų turbinose, bet tik labai specifiniams tikslams, pavyzdžiui, pikiniui elektros generavimui.

Plačiau vertėtų panagrinėti kitą vandenilio naudojimo elektrai ir šilumai gaminti technologiją – kuro elementus, kuriuose vykstant tiesioginei cheminei vandenilio ir deguonies jungimosi reakcijai generuojama elektra ir šiluma. Kuro elementų patrauklumas glūdi jų technologiniame paprastume ir energetiniame efektyvume. Jei vidaus degimo variklyje ne daugiau kaip 40 proc. kuro energijos virsta mechanine, tai kai kurių tipų kuro elementų kuro panaudojimo efektyvumas siekia iki 90 proc. Be to, kuro elementai yra visiškai betriukšmiai lyginant su vidaus degimo varikliais.

Vandenilio energetika gali tapti vienu iš efektyviausių būdų siekiant išspręsti susidariusias globalines aplinkosaugos ir energijos tiekimo problemas. Vandenilis yra unikalus energijos išteklius, kurio naudojimas gali radikaliai pakeisti dabartines energijos gamybos, skirstymo ir vartojimo technologijas. Šiam energijos šaltiniui būdingos unikalios savybės:

- Gaminant vandenilį atmosferą teršiančių cheminių junginių emisija gali būti minimali,
- Vartojant vandenilį gaminama elektros ir šilumos energija, o galutiniai produktai yra vanduo arba vandens garai,
- Vandenilis gali būti gaminamas naudojant daugelį pirminių šaltinių (naftos produktai, atsinaujinantys energijos šaltiniai, atominė energetika).

1993 metais buvo inicijuotas „WE-NET“ projektas Japonijoje, kurio pagrindinis tikslas – 2020 metais pereiti prie vandeniliu pagrįstos energetikos. Europoje tyrimai vandenilio energetikos srityje intensyviausiai vykdomi Bendrųjų Programų (BP, angl. *Framework Program*) rėmuose. Finansavimas šioje srityje kito labai sparčiai: nuo 8 milijonų eurų BP2 etapui (1988-1992) ir 54 milijonų eurų BP4 etapui (1994-1998) iki 130 milijonų eurų BP5 etapui. BP6 etapui ši suma buvo padidinta daugiau kaip dvigubai – iki 315 milijonų eurų, o BP7 etapui skirta arti pusės milijardo eurų – 470 milijonų. Visgi daugiausiai tyrimus vandenilio energetikos sektoriuje pasaulyje finansuoja privatus sektorius. Aktyviausi šioje srityje yra automobilių ir energijos gamintojai, kurie įvertino ir tolimesnio pasitikėjimo iškastiniu kuru pavojus, ir naujas galimybes, kurias jiems siūlo besivystanti vandenilio energetika. Tokią išvadą patvirtina skaičiai, rodantys, kad per 2001 m. Europos Sąjungos valstybės paskyrė 200 mln. eurų, Jungtinės Amerikos Valstijos – 150 mln. eurų, tuo tarp kai vien tik koncernas „Daimler Chrysler“ per 4 metus į kuro elementus investavo 1600 milijonų eurų. Žvelgiant viso pasaulio mastu, privatus sektorius į vandenilio energetikos technologijų vystymą investuoja maždaug tris kartus daugiau pinigų negu valstybinis sektorius. [1]

## 2. KURO ELEMENTAS

### 2.1. Kuro elementų technologijos

Kuro elementai rinkoje yra gana naujas ir pasaulinėje praktikoje dar mažai naudojamas elektrocheminis energijos šaltinis, elektrocheminiu būdu gaminantis elektros energiją ir šilumą. Ateinantiems keliems dešimtmečiams prognozuojamas intensyvus šio energijos šaltinio įsisavinimas ir atėjimas į rinką. Šiuo metu kai kurie kuro elementai jau yra pasiekę brandžių technologijų lygį, o kiti dar tobulinami ir jau yra arti komercializavimo slenksčio. KE yra išbandomi kaip energijos šaltiniai nešiojamuose kompiuteriuose, telefonuose, transporto priemonėse (automobiliai, laivai, krautuvai) ir stacionariuose energijos gamybos įrenginiuose (elektros energijos ir šilumos tiekimas namų ūkiams ir pramonei). KE struktūra yra artima energijos kaupiklių (baterijų, akumuliatorių) struktūrai, tik jų nereikia įkrauti, o veikia tol, kol jiems yra tiekiamas vandenilis ir deguonis. Šiuose įrenginiuose vandenilio konversija į energiją vyksta be spartaus degimo (oksidacijos) proceso ir būdingas didelis efektyvumas, neteršia aplinkos, nesukelia triukšmo bei vibracijų. Kuro elementuose vyksta vadinamasis „šaltas degimas“ – cheminė vandenilio ir deguonies reakcija – lėtas vandenilio oksidacijos procesas, kurio metu išsiskiria elektros bei šilumos energija ir susidaro vanduo arba vandens garai.

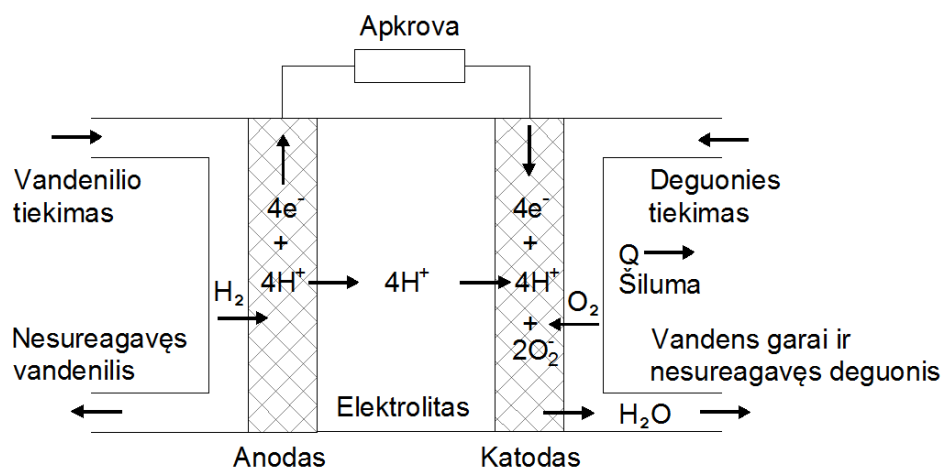
Vandenilio kuro elementų mokslas yra žinomas jau daugiau kaip 160 metų. 1838 metais William Grove sukūrė bateriją, kuri buvo pavadinta „Grove celė“. Šiame elemente vykdavo reversinis vandens elektrolizės procesas. Keraminiai kuro elementai atsirado 1899 metais, Valteriui Nernstui išradus kieto oksido elektrolitus. Nuo 1945 metų, trys mokslinės grupės (JAV, Vokietijos ir buvusioje TSRS) intensyviai dirbo vandenilio kuro elementų srityje. Dėl šiame darbe pateiktų išvadų buvo suformuluotos „Siemens“ ir „Pratt&Wittney“ kuro elementų koncepcijos. Vandenilio kuro elementai buvo plačiai pritaikyti NASA „Apollo“ programoje 1960 metais. Nuo 1980 metų JAV, Kanados ir Japonijos vyriausybės labai padidino vandenilio energetikos programų finansavimą. Pastaruoju metu intensyviai kuriamos vandenilio energetikos technologijos, kurios leistų naudoti vandenilį kaip energijos šaltinį stacionariuose elektros energijos generavimo sistemose ir visų rūšių transporte: sausumos, vandens ir oro.[2]

Kuro elementų sukūrimas nėra tiek didelis techninis iššūkis, kiek socialinis ir ekologinis, susijęs su energijos poreikiais ir kenksmingų medžiagų patekimu į aplinką. Kuro elementų poveikis aplinkai ir energetikos pramonei, atsinaujinančių energijos šaltinių privalumai ir trūkumai lyginant su iškastinio kuro naudojimu tradicinėje energetikoje yra svarbiausi klausimai.

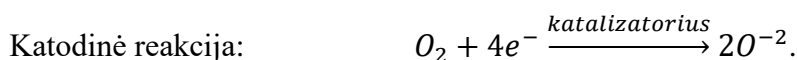
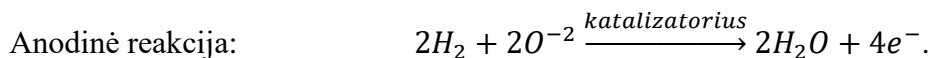


Ekologiškos energijos kūrimas ir atsinaujinantys energijos šaltiniai yra būtini žingsniai norint užtikrinti pasaulinės ekonomikos gerovę ir sumažinti šiltnamio efekto grėsmę. Kuro elementai yra tokius standartus atitinkanti technologija. Naudojant vandenilį ir naujas energijos konversijos (virsmo) formas, galima efektyviai gaminti energiją, praktiškai nedarant žalingo poveikio aplinkai.

Tipinė kuro elemento sandara ir jo veikimo principas pavaizduoti 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Kuro elemento veikimo schema



Kuro elementas susideda iš 2 sandūrų elektrodas – membrana ir dviejų lauko srauto plokštelių. Vandenilis teka per kanalus į anodo lauko plokštelę. Kanaluose naudojamas katalizatorius, kuris padeda atsiskirti protonams ir elektronams. Vandenilis gali būti tiekiamas į kuro elementą tiesiogiai arba gautas iš gamtinių dujų, metanolio ar naftos naudojant kuro reformerius, kurie angliavandenilius paverčia vandeniliu ir anglies dvideginiu naudojant cheminės katalizės reakciją. Kiekvienas KE turi du elektrodus (anodą ir katodą), prie kurių yra priklijuotas labai plonas katalizatoriaus sluoksnis. Oro srautas kanalais paduodamas į katodo plokštumą. Vandenilio protonai migruoja per membraną ir jungiasi su deguonimi sudarydami vandens molekules, o elektronų srautas prateka išorine grandine sudarydamas elektros srovę. Reakcijos metu išsiskiria šiluminė energija. Vandenį elektrocheminio proceso metu pašalina oro tėkmė. Siekiant padidinti gamybinius KE parametrus, sudedama keletas KE į vieną junginį, toks kompleksas vadinamas KE paketu. Vandenilis (dujų būsenoje) ir deguonis (oro pavidalu)

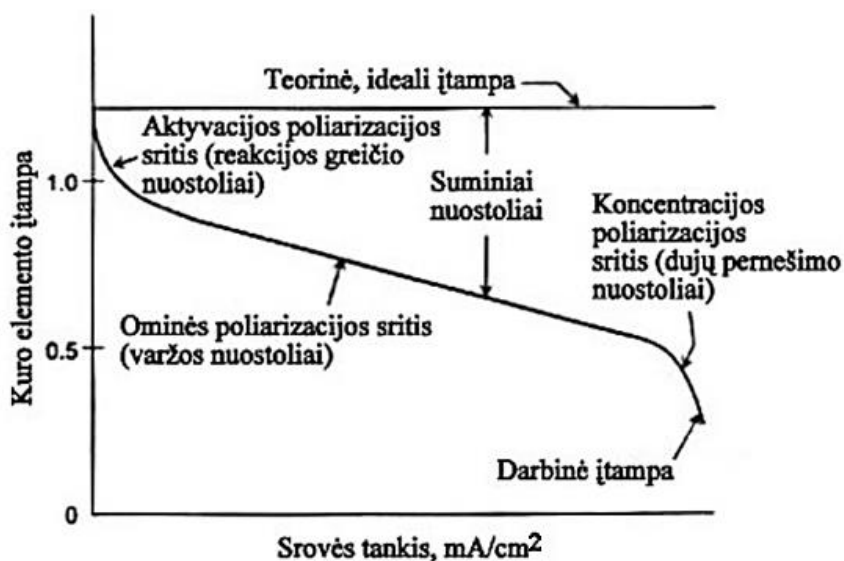
tiekami specialiai KE pakete tam padarytais kanalais. Pagaminama elektros galia priklauso nuo kuro elementų paketo dydžio: įtampos dydis priklauso nuo KE skaičiaus pakete, o generuojama srovė priklauso nuo veikimo ploto.

Kuro elementų efektyvumas yra daug didesnis, negu tradicinių elektros gamybos būdų. Jėginių su kuro elementais elektrinis efektyvumas dabar siekia apie 40 – 60 proc., o bendras kuro panaudojimo efektyvumas (kuomet taip pat panaudojama ir reakcijos metu išsiskirianti šilumos energija) – iki 90 proc. Kuro elementai elektros energiją generuoja tiesiogiai vykstant katalizinėms elektrocheminėms reakcijoms – vandenilio oksidacijai ant anodo ir deguonies redukcijai ant katodo protonus pernešant per laidžią membraną.

## 2.2.KE charakteristikos

Viena iš pagrindinių KE elektrines savybes nusakančių charakteristikų yra šio elemento įtampos priklausomybė nuo srovės tankio. Srovės tankis, tai dydis nusakantis KE generuojamos srovės dydį tenkantį vienam kuro elemento cheminės reakcijos skerspjuvio ploto vienetui. Paveiksle 2.2 pateikta ši priklausomybė, palyginant teorinį įtampos kitimą su realiomis sąlygomis vykstančiu įtampos kitimu. Esant realioms sąlygoms, akivaizdžiai pastebimas įtampos kritimas, kuri įtakoja įvairūs nuostoliai. Šių nuostolių įtaką charakteristikai galima suskirstyti į tris sritis:

- Aktyvacijos poliarizacija ( $\eta_{akt}$ );
- Ominė poliarizacija ( $\eta_{om}$ );
- Koncentracijos poliarizacija ( $\eta_{konc}$ ).



2.2 pav. Kuro elemento įtampos priklausomybė nuo srovės tankio [3, 17psl.]

**Aktyvacijos poliarizacija:** aktyvacijos poliarizacija vyksta, kai elektrocheminės reakcijos greitis elektrodo paviršiuje yra valdomas elektrodo inertine kinetika (aktyvacijos poliarizacija yra tiesiogiai susijusi su elektrocheminių reakcijų greičiu). Elektrocheminių reakcijų atvejis, kai  $\eta_{akt} \geq 50-100$  mV,  $\eta_{akt}$  yra aprašomas lygtimi [4]:

$$\eta_{akt} = \frac{\bar{R}T}{nFi_o} i; \quad (2.1)$$

Kur:  $\bar{R}$  – universali dujų konstanta ( $8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $T$  – temperatūra (K),  $n$  – perkeltų elektronų kiekis,  $F$  – Faradėjaus konstanta ( $96485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),  $i_o$  – mainų srovės tankis ( $\text{A}/\text{m}^2$ ),  $i$  – kuro elemento srovės tankis ( $\text{A}/\text{m}^2$ ).

**Ominė poliarizacija:** ominiai nuostoliai atsiranda dėl pasipriešinimo jonų srautui elektrolite ir elektrodo medžiagoje, t.y. dėl jų vidinės varžos. Ominiai nuostoliai per elektrolitą gali būti sumažinami, sumažinant atstumą tarp elektrodo ir elektrolito bei padidinant elektrolito joninį laidumą. Kadangi ir elektrolitui, ir kuro elemento elektrodams galioja Omo dėsnis, ominiai nuostoliai gali būti išreiškiami lygtimi [4]:

$$\eta_{om} = iR; \quad (2.2)$$

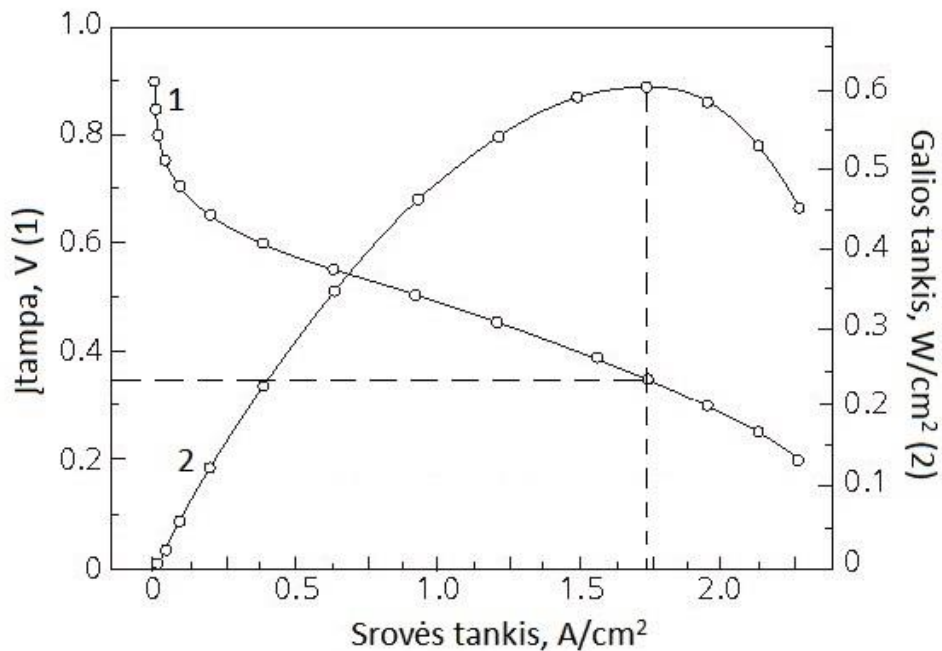
Kur  $R$  – elektrolito joninė varža.

**Koncentracijos poliarizacija:** kadangi elektrode elektrocheminėms reakcijoms naudojamas reagentas, atsiranda potencialo nuostolių, dėl medžiagos nesugebėjimo išlaikyti pradinę skysčio koncentraciją. Tuomet suformuojama koncentracijos gradientai. Koncentracijos gradientai atsiranda dėl suvartojamų reagentų, elektrocheminių reakcijų metu. Koncentracinę poliarizaciją gali sukelti keletas procesų: lėta dujinės fazės difuzija, reagentų ar produktų skilimas ar neskylimas arba reagentų ar produktų difuzija per elektrolitą į ar iš elektrocheminės reakcijos vietas. Lėtas reagentų ar produktų pernešimas yra didžiausias koncentracinės poliarizacijos sukėlėjas. Dėl srovės tekėjimo kuro elementu padidėja anodo potencialas, tuo būdu sumažėja katodo potencialas, kartu sumažėja ir kuro elemento įtampa. Elemento įtampa priklauso nuo poliarizacijos ir anodo, bei katodo potencialo. Kuro elemente srovės tekėjimas mažina elemento įtampą, tai yra dėl ominės poliarizacijos ir elektrodo poliarizacijos. Galima teigti, kad lėtas reagentų ar produktų pernešimas į ar iš elektrocheminės reakcijos vietas yra pagrindinis koncentracijos poliarizacijos veiksnys [4]:

$$\eta_{konc} = \frac{RT}{nF} \ln \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right); \quad (2.3)$$

čia  $i_L$  – atvirkštinė trukdanti srovė.

Kita svarbi kuro elemento charakteristika, tai galios tankio priklausomybė nuo srovės tankio. Galios tankis yra santykinis dydis nusakantis KE generuojamos galios dydį tenkantį vienam kuro elemento cheminės reakcijos skerspjūvio ploto vienetui. Galios tankio priklausomybė nuo srovės tankio pateikta paveiksle 2.3. Iš šios charakteristikos galime rasti KE maksimalios galios tašką, o sugretinus abi charakteristikas galima lengvai surasti kokiai įtampai esant generuojama didžiausia KE galia. Šios charakteristikos gali kisti tam tikrose ribose, kadangi KE generuojamos energijos kiekiui turi įtakos darbo temperatūra, slėgis ir kuro kokybė.



2.3 pav. Įtampas ir galios tankio priklausomybės nuo srovės tankio [5]

### 3. KURO ELEMENTŲ TIPAI

Kuro elementų sritis yra vis dar besivystanti, todėl nuolat išrandamos vis naujesnės jų technologijos. Dėl šios priežasties tikslų kuro elementų rūšių skaičių apibrėžti sudėtinga. Praktikoje plačiausiai naudojami šeši KE tipai.

- PEM – KE su polimerinio elektrolito membrana;
- KOE – KE su kieto oksido elektrolitu;
- FRE – KE su fosforo rūgšties elektrolitu;
- IKE – KE su išlydyto karbonato elektrolitu;
- ŠKE – šarminis KE;
- TM – tiesioginio tiekimo metanolio KE.

Kuro elementai skirstomi pagal darbinę temperatūrą į žemos (iki 100 °C), vidutinės (10 – 250 °C) ir aukštos temperatūros (nuo 550 °C) elementus. KE temperatūra priklauso nuo naudojamo elektrolito: iki 250 °C – rūgščių arba šarmų elektrolitai, nuo 550 °C – druskų lydalai. Kuro elementai taip pat gali būti skirstomi į dvi grupes, vieniems elementams būtinas grynas vandenilis arba su galimomis minimaliomis priemaišomis, kitiems KE – angliavandeniliai ar gamtinės dujos iš kurių vandenilis išskiriamas pačiame elemente.

Pagrindinių KE tipų elektrolitų rūšys, darbinės temperatūros, naudojamas kuras, reakcijų oksidatoriai ir naudingumo koeficientai pateikiami 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Pagrindinių kuro elementų tipai technologiniai parametrai

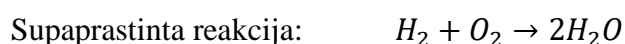
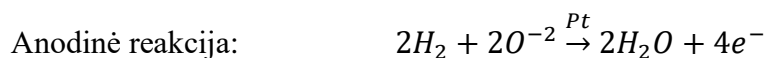
Elemento tipas	Elektrolitas	Darbo temperatūra	Kuras	Oksidatorius	Naudingo veikimo koeficientas elektrai
Polimerinio elektrolito membranos (PEM)	Polimeras, protonų mainų membranos	50-80 <sup>0</sup> C	Grynas vandenilis	O <sub>2</sub> /oras	40-50%
Kieto oksido elektrolito (KOE)	Keramikos	600-1000 <sup>0</sup> C	Gamtinės dujos ar propanas	O <sub>2</sub> /oras	45-60%
Fosforo rūgšties elektrolito (FRE)	Fosforo rūgštis	160-210 <sup>0</sup> C	Vandenilis iš alkoholio	O <sub>2</sub> /oras	40-50%
Išlydyto karbonato elektrolito (IKE)	Išlydytos druskos Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	630-650 <sup>0</sup> C	Vandenilis, anglies monoksidas, gamtinės dujos	CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /oras	50-60%
Šarminis (ŠKE)	Kalio šarmas KOH	50-200 <sup>0</sup> C	Grynas vandenilis	O <sub>2</sub> /oras	50-55%
Tiesioginio tiekimo metanolio (TM)	Polimeras	60-200 <sup>0</sup> C	Metanolis	O <sub>2</sub> /oras	20-40%

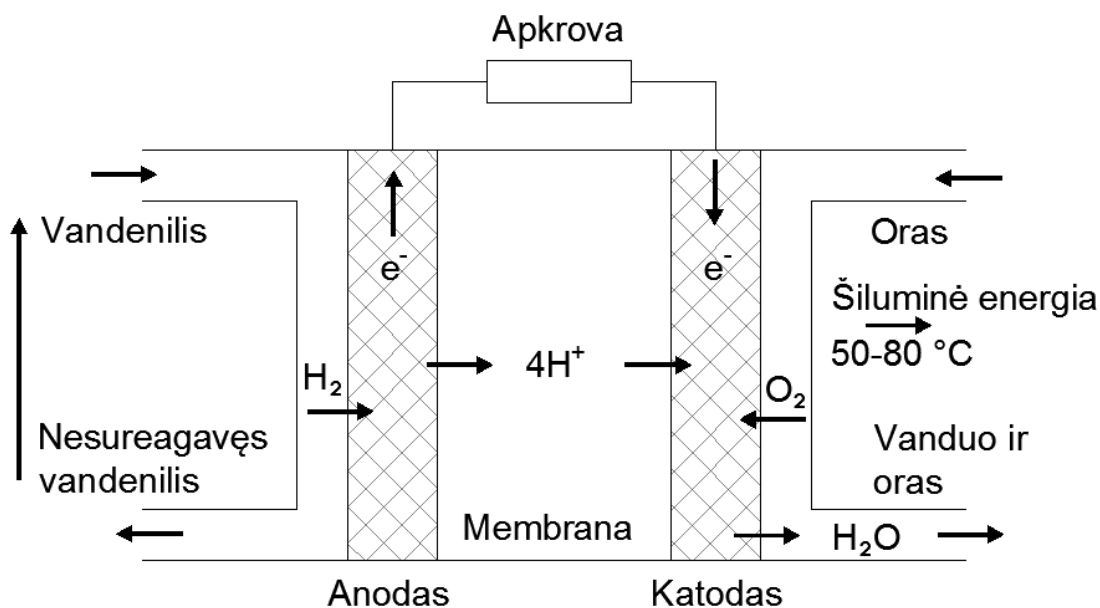
### 3.1. Protonų mainų membranos kuro elementas

PEM kuro elementuose naudojama protonų mainų membrana – tai plona, elastinga plėvelė, praleidžianti vandenilio jonus. Membrana iš abiejų pusių yra padengta poringos anglies elektrolitais su platinos dalelėmis, kuri yra reakcijos katalizatorius. Kietos būsenos elektrolitas yra pranašesnis už skystą, nes sumažina korozijos problemas.

Paveiksle 3.1 pateikta PEM KE veikimo schema. Vandenilis kanalu yra tiekiamas į anodą, kuris sulaiko vandenilio atomus, išskiria elektronus ir vandenilio jonus (protonus). Tuo pat metu, protonai difunduoja pro membraną į katodą, kur vandenilio atomai rekombinuoja ir reaguoja su deguonimi, sudarydami vandenį ir pabaigdami procesą. Atitrūkę nuo vandenilio jonų, elektronai teka prie anodo prijungtu laidininku, taip sukurdami nuolatinę elektros srovę.

PEM kuro elemente vykstančios cheminės reakcijos:





3.1 pav. Protonų mainų membranos kuro elemento veikimo schema

Protonų mainų membranos kuro elementas – dar vadinamas polimerinės membranos elektrolito KE – priskiriamas prie žemos temperatūros kuro elementų, jo darbinė temperatūra 50-80 °C. Dėl palyginus žemos darbinės temperatūros šis KE yra pranašesnis, nei aukštų temperatūrų kuro elementai. Žema darbinė temperatūra suteikia sąlygas greičiau pradėti veikti KE (mažesnė užšilimo trukmė), taip pat mažina dėvėjimąsi, o tai suteikia ilgaamžiškumo. Šio tipo kuro elementai yra jautrūs kuro kokybei. Kure esant anglies monoksido (CO), jis reaguoja su deguonimi, taip sumažindamas KE naudingumą. PEM KE galingumas nuo mažiau nei 1 kW iki 250 kW. Šio tipo kuro elementai leidžia prisitaikyti prie greitai kintančio elektros energijos poreikio, todėl ypač tinka taikyti transporte ir buityje. Šio tipo kuro elementai naudojami lengvuosiuose automobiliuose, autobusuose, nedideliuose pastatuose, taip pat smulkesniems poreikiams buityje, vietoje įkraunamų akumuliatorių. [6]

### 3.2. Kieto oksido elektrolito kuro elementas

Kieto oksido elektrolito kuro elementas (angl. *solid oxide fuel cell*) yra perspektyvus panaudojimui stambesnėse pramoninėse ir elektros generavimo jėgainėse. KOE kuro elemente vietoje skysto elektrolito paprastai naudojamas kieta keraminė medžiaga cirkonio oksidas, tai supaprastina konstrukciją. Ši medžiaga leidžia darbinę kuro elementų temperatūrą pakelti iki maždaug 1000°C. Elektros generavimo efektyvumas siekia 60 proc. Nenaudojami brangūs katalizatoriai, o kuras gali būti angliavandeniliai. Pasaulyje yra tik keli demonstraciniai šio tipo kuro elementų pavyzdžiai. [7]

KOE KE yra priskiriami prie perspektyviausių alternatyviųjų elektros energijos šaltinių stacionariam naudojimui, nes kogeneruoja šiluminę energiją (kurią galima panaudoti apšildymui), nėra jautrūs apnuodijimui CO (CO oksiduojasi aukštoje elemento darbo temperatūroje  $\approx 1000$  K), nereikalauja ypatingo švarumo vandenilio (vyksta savaiminis angliavandenių reformingas. Trūkumas, kad CO yra naudojamas kaip kuras, o anglies dioksidas tik atskiedžia kurą, t.y. nepageidaujama, bet ne žalinga medžiaga. [7])

KOE kuro elemente vykstančios cheminės reakcijos:

Gamtinių dujų skaidymas:  $CH_4 + Q (1000^\circ C) \rightarrow H_2 + CO$ ;

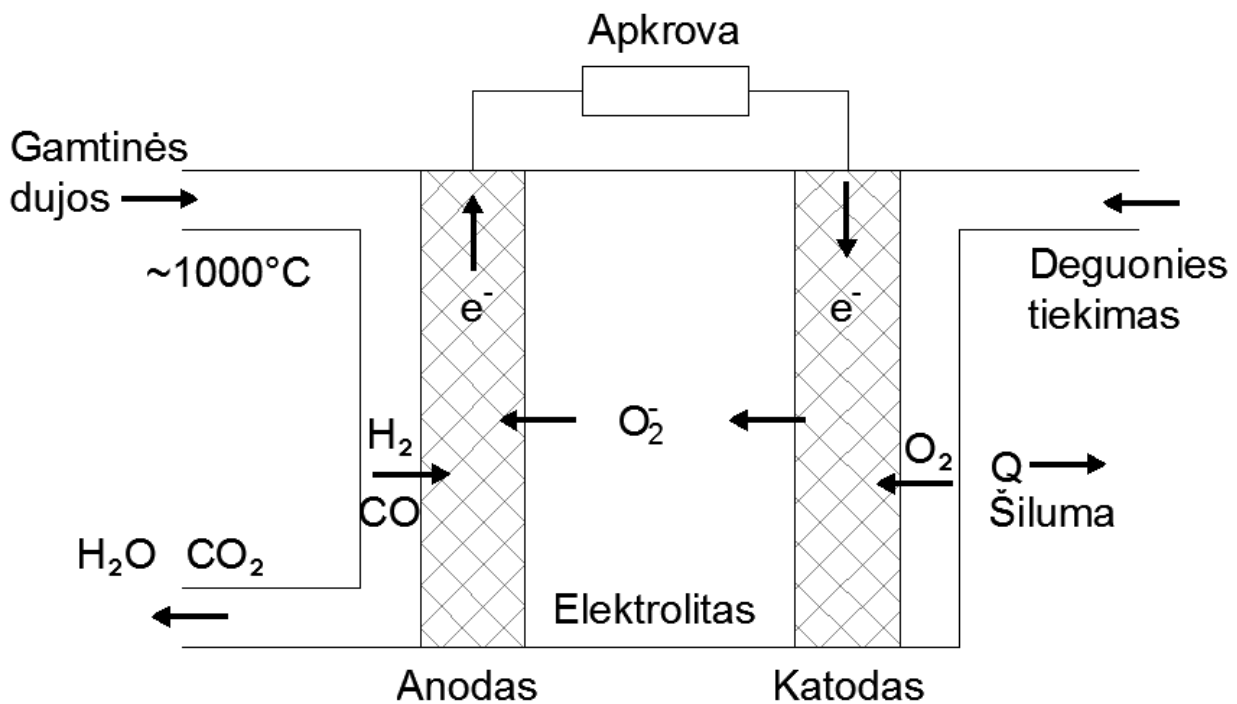
Anodinės reakcijos:  $H_2 + O^{-2} \rightarrow H_2O + 2e^{-}$ ;

$CO + O^{-2} \rightarrow CO_2 + 2e^{-}$ ;

Katodinė reakcija:  $O_2 + 4e^{-} \rightarrow 2O^{-2}$ ;

Supaprastinta reakcija:  $H_2 + CO + O_2 \rightarrow H_2O + CO_2$ .

Kieto oksido elektrolito kuro elemento veikimo schema pateikta 3.2 paveiksle.



3.2 pav. Kieto oksido elektrolito kuro elemento veikimo schema

### 3.3. Fosforo rūgšties elektrolito kuro elementas

Fosforo rūgšties elektrolito kuro elementas (angl. *phosphoric acid fuel cell*) yra pirmieji pradėti naudoti komerciniais tiksliais ir iki šiol labiausiai išvystytos technologijos kuro

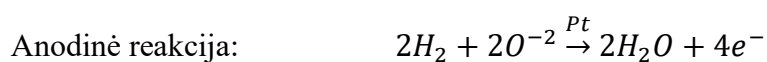


elementai. Generuojama galia nuo 100 kW iki 400 kW, todėl gali būti naudojamos, kaip mažos elektrinės arba energijos rezervo šaltiniai pastatams. Pasaulyje įrengti daugiau nei 200 šio tipo kuro elementų sistemų pastatų reikmėms, taip pat yra keletą pavyzdžių, kuomet FRE KE elektrinė yra integruota transporto priemonėse. Nors šių elementų darbinė temperatūra ganau aukšta – 150-200°C, tačiau jiems vis tiek reikalingi katalizatoriai, o tam naudojama platina ir jos lydiniai. Elektrolitas yra 100 proc. fosforo rūgštis, supilta į matricą, kuri laidu protonams, bei mažai jautri kure esančioms CO<sub>2</sub> ir CO dujoms, kurioms leidžiama sudaryti iki 1,5 proc. bendro kuro kiekio. [8]

Šių kuro elemento trūkumai yra – brangaus platinos katalizatoriaus naudojimas, palyginus nedidelis elektros generavimo efektyvumas, šie įrengimai yra dideli ir sunkūs. Taip pat šie elementai generuoja mažą srovę ir energiją. FRE KE naudingumo koeficientas yra 40 – 45 proc., bet gali siekti 85 proc., kai pagaminti kuro elemente garai yra naudojami kogeneracijai. Žemėjant temperatūroms, fosforo rūgščiai būdinga vis mažesnis joninis laidumas, o anglies monoksidas užteršia platinos katalizatorių prie anodo. Dar keletas trūkumų: brangūs komponentai, mažas energijos tankis, agresyvus elektrolitas. [8]

Fosforo rūgšties kuro elemento veikimo schema yra identiška protonų mainų membranos kuro elemento veikimo schemai (3.1 pav). Vienas skirtumas tarp šių schemų, kad FRE KE išskiriam šiluma yra aukštesnės temperatūros – 150-200°C.

FRE kuro elemente vykstančios cheminės reakcijos:



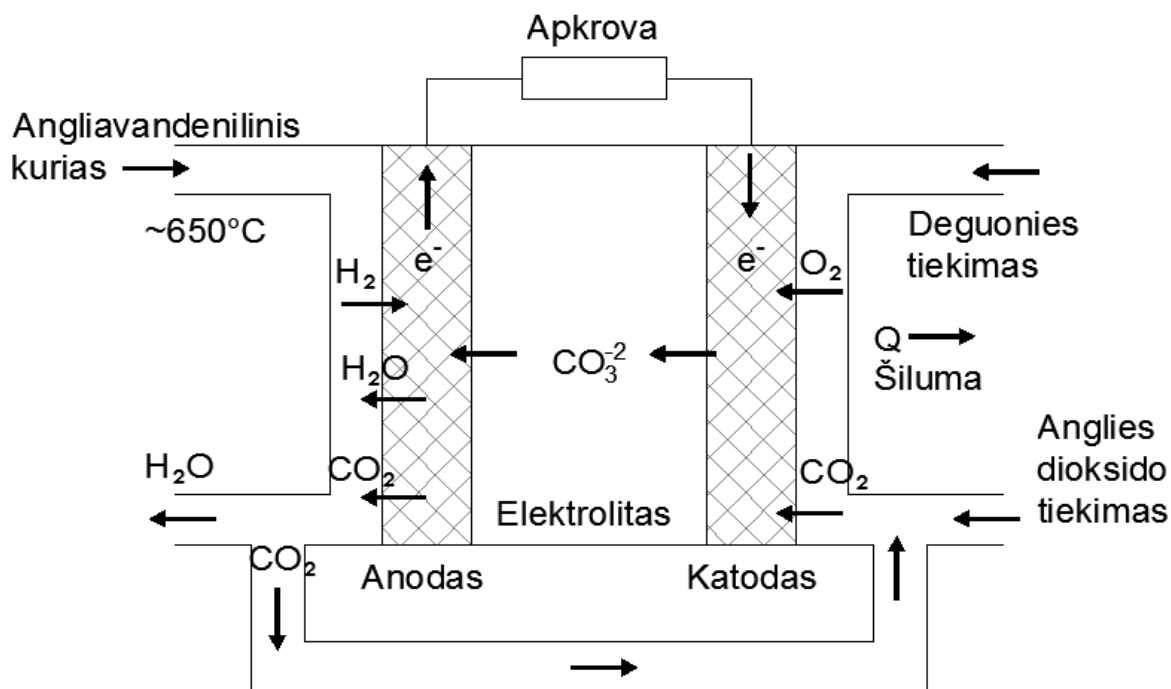
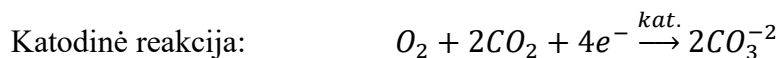
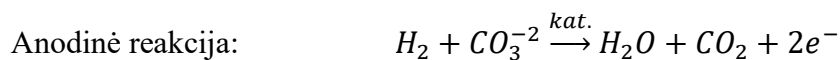
### **3.4. Išlydytų karbonatų elektrolito kuro elementas**

Išlydytų karbonatų elektrolito kuro elementuose (angl. *Molten carbonate fuel cell*) yra naudojamas skystas ličio, natrio ir kalio karbonatų tirpalas išmirkytoje matricoje. Didelė darbinė temperatūra, siekia maždaug 650°C. Aukšta temperatūra yra reikalinga, norint padidinti elektrolito laidumą, bei leidžia naudoti paprastesnius katalizatorius. Iki šiol lydyto karbonato kuro elementai buvo panaudoti įrenginiuose, naudojančiuose vandenilį, anglies monoksidą,

gamtines dujas, propaną, biudujas, dyzelinį kurą, anglies gazifikavimo metu gautas dujas. Šio tipo kurų elementų naudingumo koeficientas elektrai panašus kaip ir kitų pagrindinių KE – nuo 50 iki 60 proc. Tačiau atliekant kogeneraciją, kuomet išsiskyrusi KE šiluma panaudojama patalpų šildymui, energijos generavimo koeficientas gali siekit apie 80 proc. Yra bandomieji įrengimai nuo 10 kW iki 2 MW galingumo. Numatoma, kad šio tipo kuro elementai yra ypač perspektyvūs stambesnėse elektros generavimo jėgainėse. Demonstraciniai pavyzdžiai buvo sėkmingai įrengti Japonijoje ir Italijoje. [9]

Esminis trūkumas, tai kad dėl aukštos darbinės temperatūros, šarminių metalų karbonatų elektrolitas, paspartina korozija, tai sutrumpina atskirų elementų tarnavimo laiką. Taip pat netinkami mobilioms sistemoms, nes pradeda normaliai veikti tik po kelių ar keliolikos valandų. Būtinoms papildomoms sistemoms, oro ir kuro šildytuvai, keraminiai elementai elektrolito matricai. Didelė bendra KE kaina ir matmenys, kai pavyzdys: 250kW KE su visomis sistemomis sveria apie 40 tonų. [10] Išlydytų karbonatų elektrolito kuro elemento veikimo schema pateikta 3.3 paveiksle.

IKE kuro elemente vykstančios cheminės reakcijos:



3.3 pav. Išlydytų karbonatų elektrolito kuro elemento veikimo schema

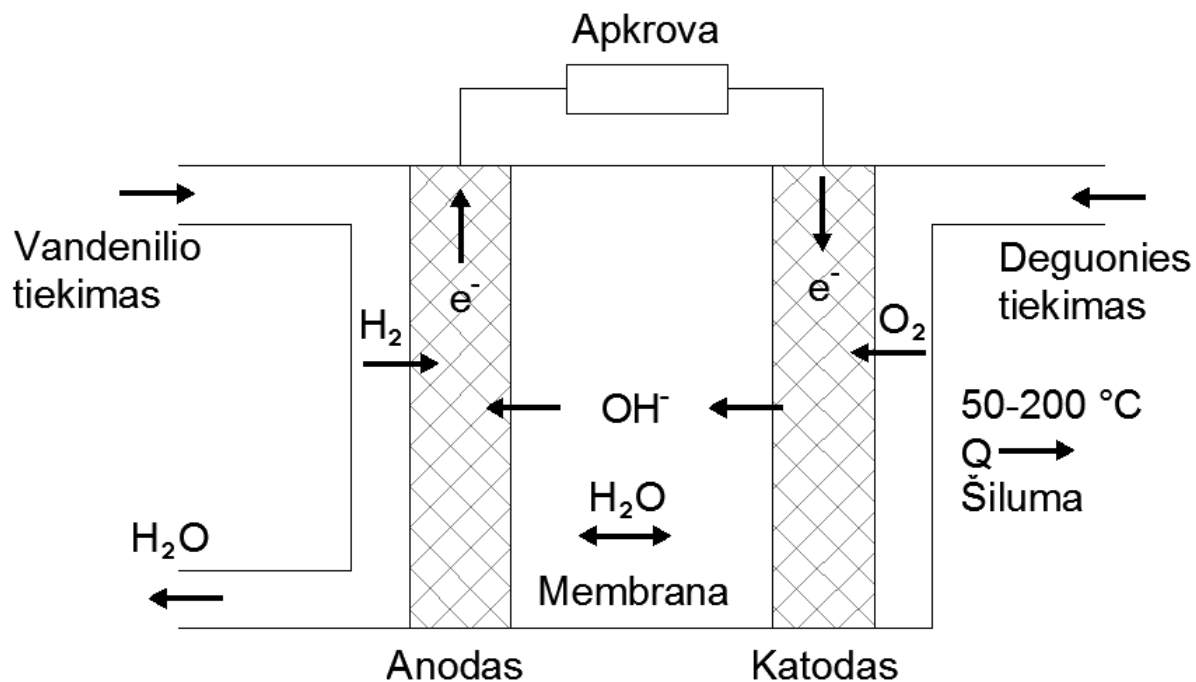
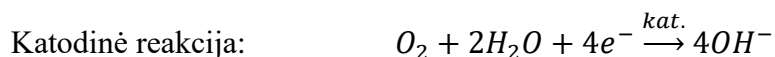
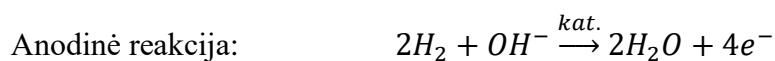
### 3.5. Šarminis kuro elementas

Šarminio kuro elementas (angl. *Alkaline fuel cell*) buvo pirmasis modernus KE, kuris buvo naudojamas kosminėse misijose erdvėlaivius aprūpinti elektros energijai ir vandeniui. Šio tipo KE išsiskiria geromis dinaminėmis savybėmis, t.y. greit pradeda veikti nominaliomis sąlygomis. Darbinė temperatūra gana žema 50–200°C. Elektros siekia 70 proc., o galia nuo 300 W iki 5 kW. Gali būti naudojami pigesni katalizatoriai. Vietoje elektrolito naudojami OH<sup>-</sup> jonams ir vandeniui laidanti membrana, taip sumažinami KE matmenys. [11 43-45 psl., 12]

Šarminis kuro elementas jautrus kuro kokybei ir didžiausias naudingumas pasiekiamas tiekiant gryną vandenilį. Negryname kure esantis anglies dioksidas reaguoja su kalio hidroksido elektrolitu ir sudaro kietą karbonatą, kuris sutrikdo jonų mobilumą. [11 245-268 psl.]

Šarminio kuro elemento veikimo schema pateikta 3.4 paveiksle.

ŠKE kuro elemente vykstančios cheminės reakcijos:



3.4 pav. Šarminio kuro elemento veikimo schema

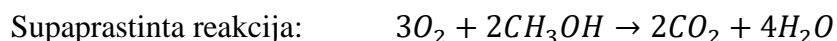
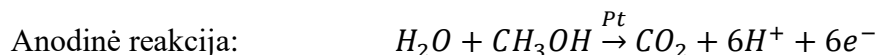
### 3.6. Tiesioginio metanolio kuro elementas

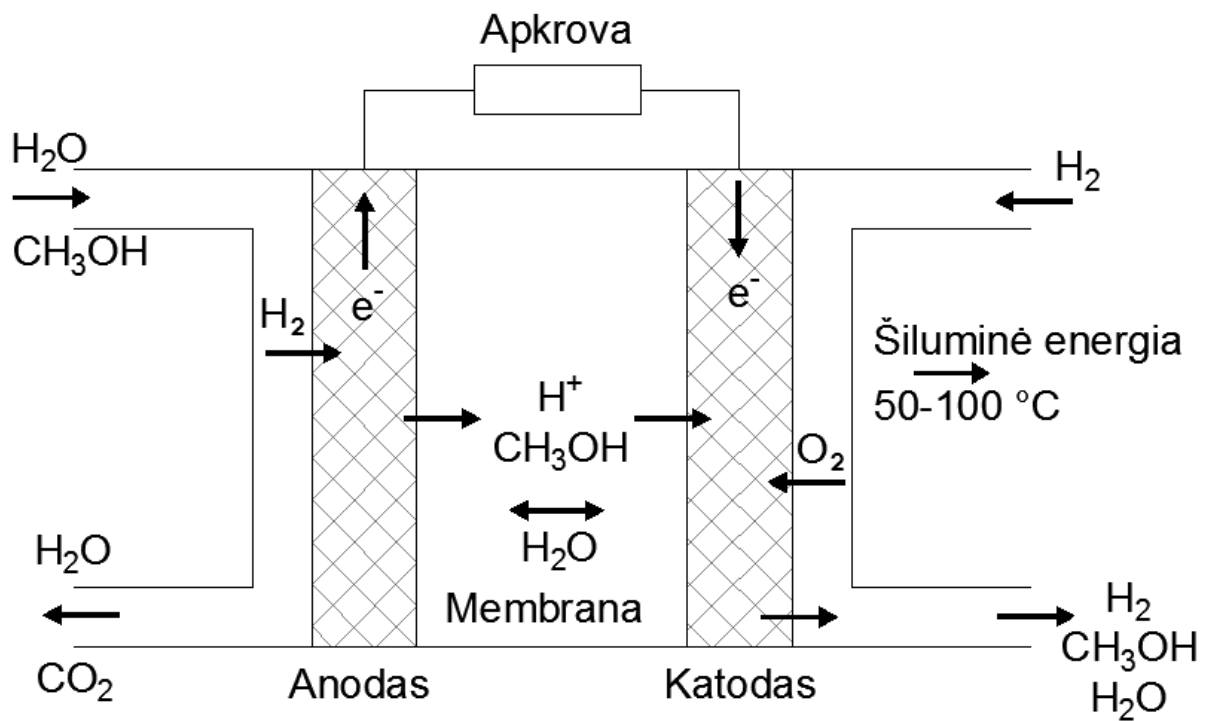
Tiesioginio metanolio kuro elementai (angl. *Direct methanol fuel cell*), yra panašūs į protonų mainų membranos kuro elementus kadangi čia taip pat kaip elektrolitas naudojama polimerinė membrana. Tačiau šiame KE, anodo katalizatorius pats savaime pritraukia vandenilį iš skysto metanolio, taigi prie kuro elementų nereikia įrengti kuro reformerio. Šio tipo KE galia lyginant su jo dydžių (galios tankis) yra gana didelė – nuo 25W iki 5kW. Naudingo veikimo koeficientas elektrai – 20-40 proc., KE veikiant 50-100°C temperatūroje. Dėl žemos darbinės temperatūros perspektyvus yra šio tipo kuro elementų panaudojimas nešiojamuose įrenginiuose, tokiuose kaip kompiuteriai ar mobilieji telefonai. Metanolio kuro elemente panaudojamos dvigubos plokštės, kurios gali būti padarytos iš nemetalinių lengvo svorio, lanksčių medžiagų, tokiu kaip polimerai, kurios yra žymiai pigesnės nei metalinės medžiagos, taip pat šiam KE nereikalingos vėdinimo ir šildymo plokštės. Skystą kurą taip pat galima laikyti, kaip šio tipo elementų privalumą. [13 2-9psl., 14]

Viena iš eksploatacinių problemų yra neefektyvus kuro panaudojimas, apie 40 proc. metanolio nesureaguoja chemiškai, pereina per membraną ir prasiskiedžia išeinančiu vandeniu. Tai stipriai mažina tokio tipo įrenginių našumo koeficientą. O pagrindinis trūkumu – neaiškumas kaip nustatyti pastovios koncentracijos metanolio tirpalo papildymą kuro elemente. Kadangi vandenilis išgaunamas iš metanolio prieš pat reakciją, tai prailgina virsmų seką, lyginant kuomet iškart paduodamas vandenilis. Taip pat kaip trūkumą galima laikyti reikalingus brangius platinos katalizatorius. [13 53-59psl., 14]

Tiesioginio metanolio kuro elemento veikimo schema pateikta 3.5 paveiksle.

TM kuro elemente vykstančios cheminės reakcijos:



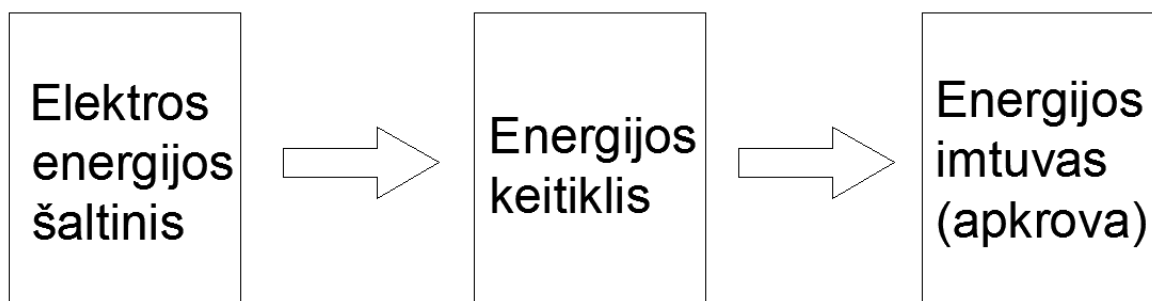


3.5 pav. Tiesioginio metanolio kuro elemento veikimo schema

Aprašytų pagrindinių kuro elementų tipų technologijų palyginimas, atsižvelgiant į privalumus ir trūkumus pateikiamas 1 priede.

## 4. GALIOS ELEKTRONIKA IR DIDELĖS GALIOS PUSLAIDININKINIAI ĮTAISAI

Galios elektronikos objektas – elektroniniai elektros energijos keitikliai (angl. *Converters*), kurie elektros energiją, gaunamą iš standartinio elektros tinklo ar kitokių savybių šaltinio, perduoda apkrovai (vartotojui) tokioje formoje, kurios reikalauja apkrovos įtaisais bei jo vykdoma funkcija. Tokiu būdu, bendriausią galios elektronikos sistemą (4.1 pav.) sudaro elektros energijos šaltinis, energijos keitiklis ir imtuvas.



4.1 pav. Apibendrinta galios elektronikos sistema

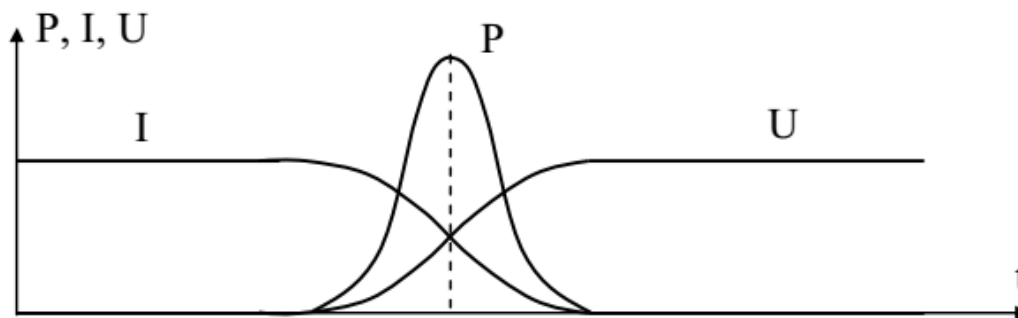
Energijos keitikliams keliami šie pagrindiniai reikalavimai:

1. Perduoti apkrovai reikiamą galią, kuri neretai būna labai didelė;
2. Perduoti apkrovai elektros energiją su galimai mažesniais nuostoliais. Šiuolaikinėse sistemose pageidaujama, kad energijos keitiklio naudingumo koeficientas būtų artimas 100 proc. (nuostoliai neviršytų keleto procentų);
3. Užtikrinti reikiamą apkrovai perduodamos elektros energijos formą ir parametrus bei operatyvų jų keitimą, priklausomai nuo energijos imtuvo vykdomos užduoties.

Pirmieji du reikalavimai – didelė galia ir didelis naudingumo koeficientas lengviau pasiekiami, kai keitikliuose naudojami puslaidininkiniai įtaisai veikia perjungimo režimu. Kai įtaisas yra įjungtas (yra laidžioje būsenoje, žymėsime indeksu *on*) juo gali tekėti gana stiprios srovės  $I_{on}$ , tačiau dėl mažos įtaiso atviros būsenos liekamosios varžos, įtampos kritimas įtaise  $U_{on}$ , o tuo pačiu ir išsklaidoma galia  $P_{on}=I_{on} U_{on}$  bus maža. Kai įtaisas yra išjungtas (nelaidžioje būsenoje, žymėsime indeksu *off*) jį gali veikti gana aukštos įtampos  $U_{off}$ , tačiau liekamoji srovė  $I_{off}$  bus labai maža ir dėl to išsklaidoma galia  $P_{off}=U_{off} I_{off}$  taip pat bus maža. Tuo tarpu veikiant

tiesiniu (stiprinimo) režimu nuostoliai puslaidininkiniuose įtaisuose (pavyzdžiui tranzistoriuose) sudaro iki kelių dešimčių procentų. [15]

Veikiant puslaidininkiniams įtaisams perjungimo režimu be nuostolių, dėl liekamosios būsenos įtampos bei liekamosios uždaros būsenos srovės, papildomi nuostoliai susidaro įtaiso perjungimo metu, tuomet tam tikru momentu jų įtampos ir srovės būna pakankamai didelės (4.2 pav.).

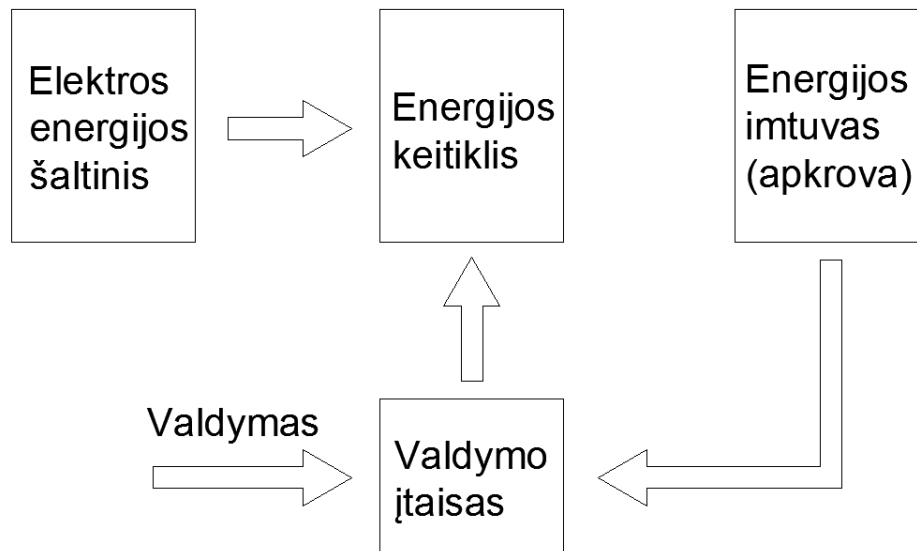


4.2 pav. Jungiklio galia perjungimo metu

Siekiant sumažinti perjungimo nuostolius, jungiklio perjungimo laikas turi būti galimai trumpesnis – tai yra, naudojamų puslaidininkinių įtaisų leistinas darbo dažnis turi būti galimai aukštesnis.

Trečiasis reikalavimas siejamas su dinamišku perduodamos elektros energijos formos ar kiekybinių jos parametrų keitimu. Tam dažnai reikia turėti galimybę keitiklio elementuose trumpam sukaupti elektros energiją ir reikiamu laiku perduoti ją apkrovai. Laikinas elektros energijos kaupimas atliekamas reaktyviniuose keitiklio elementuose. Todėl be jungiklių, svarbiais daugumos keitiklių elementais būna kondensatoriai, induktyvumo ritės, o kartais ir transformatoriai.

Siekiant užtikrinti reikiamą pastovų ar kintamą keitiklio darbo režimą, jo jungiklių valdymui reikalinga valdymo schema. Pati valdymo įtaiso darbo schema nėra energetinės elektronikos objektas. Dažnai jomis būna specializuoti ar standartiniai valdikliai. Tačiau jų darbo algoritmas – tvarka, kuriai esant duotam keitiklio darbo režimui į jo jungiklius turi būti paduodami valdymo signalai, yra energetinės elektronikos objektas. Įvertinant tai, galima detalizuoti 4.1 paveiksle pateiktą galios elektronikos sistemą (4.3 pav.)



4.3. pav. Detalizuota galios elektronikos sistema

## 4.1. Pagrindiniai keitiklių tipai

**1. Lygintuvai.** Kintamąją srovę keičia į nuolatinę.

**Nevaldomieji lygintuvai.** Lyginimo elementais naudojami diodai. Išlygintos įtampos  $U_a$  didumas priklauso tik nuo kintamos įtampos didumo ir lyginimo schemos. Todėl norint ją keisti, reikia keisti kintamąją įėjimo įtampą.

**Valdomieji lygintuvai.** Lyginimo elementais naudojami tiristoriai. Išlygintos įtampos didumą lengvai galima keisti, keičiant jų atidarymo laiką (kampą).

**2. Inverteriai.** Nuolatinę srovę keičia į reikiamo dažnio ir reikiamo fazių skaičiaus kintamąją.

**Autonominiai inverteriai.** Nuolatinę srovę keičia į kintamąją ir perduoda ją autonominei (atskirai, pavienei) apkrovai.

**Priklausomi (tinklo valdomi) inverteriai.** Skirti nuolatinės srovės elektros energiją perduoti į elektros tinklą. Turi būti griežtai sinchronizuoti su tinklu, kuriam perduodama energija.

**3. Reversiniai keitikliai.** Tai tam tikra valdomojo lygintuvo ir priklausomojo inverterio kombinacija. Skirti maitinti nuolatinės srovės reversinius (kintamos sukimosi krypties, kuri priklauso įtampos poliarumo) elektros variklius, kurie stabdymo metu pervedami veikti



elektros generatoriaus režimu ir grąžina energija atgal į maitinimo tinklą (rekuperacinis stabdymas).

**4. Kintamos įtampos keitikliai.** Keičia kintamos įtampos dažnį ir (arba) fazių skaičių. Kai keičia tik dažnį, vadinami **dažnio keitikliais**.

**Keitikliai su nuolatinės srovės grandimi.** Sudaromi nuosekliai sujungiant valdomąjį lygintuvą ir autonominį inverterį.

**Betarpiško keitimo keitikliai.** Sudaromi panaudojant dvikrypčius tiltelius, kuriuos reikiamu būdu komutuojant suformuojamos reikiamo dažnio kintamosios įtampos.

**5. Nuolatinės įtampos keitikliai.** Skirti keisti poliarumą, didinti ar mažinti nuolatinės įtampos šaltinio įtampą.

**Keitikliai su kintamosios įtampos grandimi.** Sudaromi nuosekliai paprastai per transformatorių sujungiant autonominį inverterį ir valdomąjį lygintuvą.

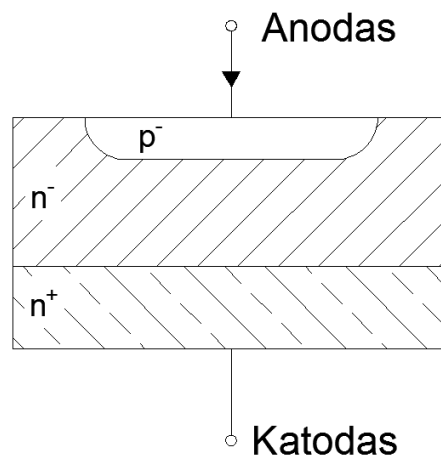
**Betarpiško keitimo keitikliai.** Sudaromi panaudojant jungiklius, kondensatorius ir induktyvias rites, kuriuos reikiamu būdu komutuojant iš turimos nuolatinės įtampos šaltinio suformuojamos reikiamo poliarumo ir reikiamo didumo nuolatinės įtampos.

## 4.2. Diodai

Diodai – tai dviejų elektrodų puslaidininkiniai įtaisai, srovę praleidžiantys tik viena kryptimi. Didelės galios diodai (DGD) sudaromi panaudojant  $PN$  arba Šotkio sandūrą.

### Konstrukcija.

Tipinė didelės galios diodo struktūra, sudaryto panaudojant  $PN$  sandūrą, parodyta 4.4 pav.

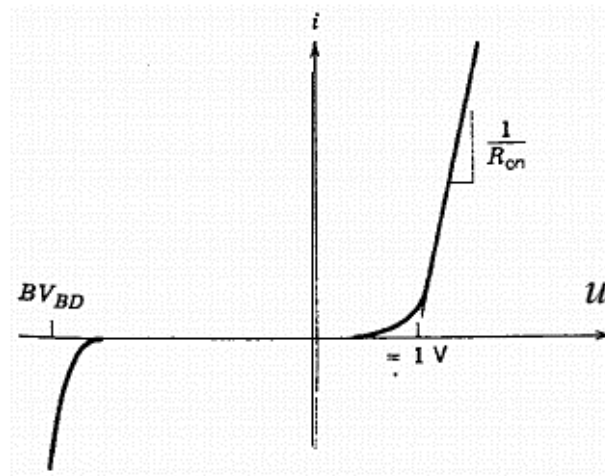


4.4 pav. Didelės galios diodo struktūra

Didelės galios diodo struktūrai būdinga tai, kad joje  $n$  sritį sudaro didelės priemaišų koncentracijos pagrindo plokštelės sritis  $n^+$  ir mažos priemaišų koncentracijos  $n^-$  dreifo sritis. Dreifo srities paskirtis – padidinti atgalinę diodo pramušimo įtampą, bet dėl didelės šio sluoksnio varžos, padidėja tiesioginė sandūros varža, o tuo pačiu ir atviros būsenos nuostoliai.

### **Voltamperinė charakteristika.**

Nuo įprastinės mažos galios diodo charakteristikos didelės galios diodo voltamperinė charakteristika (4.5 pav.) skiriasi tuo, kad esant tiesioginei įtampai  $U_F$ , didesnei už slenkstinę įtampą  $U_0$ , jos srovę auga ne eksponentiškai, o beveik tiesiškai. Taip yra todėl, kad šio diodo tiesioginės įtampos  $U_F = U_0 + I_F r_{F(on)}$  komponentė  $I_F r_{F(on)}$ , sąlygota įtampos kritimo tiesioginėje  $PN$  darinio sluoksnių varžoje, paprastai yra pastebimai didesnė už įtampos kritimą pačioje sandūroje, kuri yra ne daug didesnė už sandūros slenkstinę įtampą. [15]



4.5 pav. Didelės galios diodo voltamperinė charakteristika.

## 5. ELEKTRINIAI FILTRAI

Elektrinis filtras, tai kondensatoriaus (C), induktyvumo ritės (L) ir rezistoriaus (R) tam tikra kombinacija grandinėje, filtruojanti įtampos ar srovės pulsacijas. Filtrai naudojami apsaugoti maitinantį tinklą nuo keitiklio kuriamų trikdžių, sumažinti išlygintos įtampos pulsacijas arba pagerinti autonominių inverterių išėjimo įtampos formą.

### Rezonansiniai filtrai

Rezonansiniai filtrai yra labai efektyvūs filtruojant atskiras harmonikas. Šie filtrai naudojami po lygintuvų ir inverterių bei tinklui apsaugoti nuo keitiklio kuriamų aukštesniųjų harmonikų. Rezonansinių filtrų veikimas paremtas lygiagrečių ir nuoseklių rezonansinių kontūrų savybėmis. Lygiagretūs rezonansiniai kontūrai turi labai didelę varžą harmonikai atitinkančiai jų rezonansinį dažnį  $\omega$  ir šios harmonikos nepraleidžia. Nuoseklūs rezonansiniai kontūrai, priešingai lygiagretiems, šuntuoja atitinkamą harmoniką.

Nuoseklus rezonansinis filtras (5.1 pav. a), mažinantis išlygintos srovės pulsacijas, sudaromas lygiagretų LC kontūrą jungiant nuosekliai su apkrova. Atsižvelgiant į induktoriaus ir kondensatoriaus aktyviasias varžas  $r_L$  ir  $r_C$ , rezonansinio kontūro varža bet kuriai harmonikai apskaičiuojama šia formule:

$$Z = \frac{1}{\frac{r_L}{r_L^2 + (\omega L_F)^2} + \frac{r_C}{r_C^2 + (\omega C_F)^2}}. \quad (5.1)$$

Kontūro rezonansinis dažnis randamas šia formule:

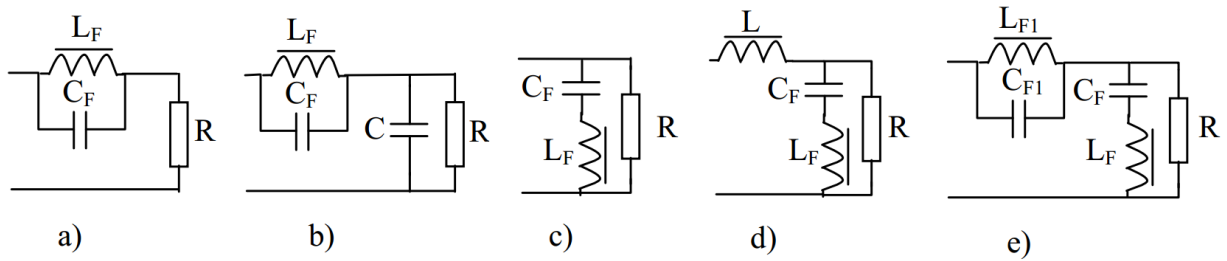
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_F C_F}} \left( \frac{\frac{L_F}{C_F} - r_L^2}{\frac{L_F}{C_F} - r_C^2} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (5.2)$$

Kontūro varža  $Z_0$  ir filtracijos koeficientas  $s$  rezonansinei harmonikai, kai  $r_C \cdot r_L \ll \frac{L_F}{C_F}$ :

$$Z_0 = \frac{L_F}{C_F(r_C + r_L)}, \quad (5.3)$$

$$s = \frac{\omega C_F L_F}{C_F(r_C + r_L)}. \quad (5.4)$$

Sujungus kelis filtrus, suderintus skirtingiems dažniams, galima filtruoti keltą harmonikų.



5.1 pav. Rezonansinių filtrai: a, b – nuoseklūs; c, d – lygiagretūs; e – mišrus

Lygiagretus rezonansinis filtras (5.1 pav., c), kuris mažina išlygintos srovės pulsacijas, sudaromas nuoseklų LC kontūrą, jungiant lygiagrečiai su apkrova. Rezonansinės grandinės  $L_F C_F$  varža rezonansinei harmonikai yra lygi tos grandinės aktyviajai varžai  $r_C + r_L$ . Lygiagretaus rezonansinio filtro sudaryti ir  $L$  ir  $L_F C_F$  (5.1 pav. d), filtracijos koeficientas apskaičiuojamas taip:

$$s = \frac{\omega L_F}{r_C + r_L}. \quad (5.4)$$

## 6. ELEKTROS ENERGIJOS KAUPIKLIAI

Pasaulyje sukurta labai daug įvairių rūšių elektros energijos kaupiklių. Visi jie turi išskirtinių savybių ir charakteristikų. Pagal paskirtį elektros energijos kaupikliai gali būti skirstomi į šias grupes:

- Energijos kokybės užtikrinimo kaupikliai – šie kaupikliai aprūpina vartotoją energija po sekundės arba dar greičiau, naudojami kuomet reikia nenutrūkstamo energijos tiekimo.
- Trumpalaikės perjungimo energijos kaupikliai – šie kaupikliai aprūpina vartotoją energiją laiko intervale nuo keleto sekundžių iki keliasdešimt minučių, nuo poreikio atsiradimo. Šie kaupikliai naudojami kuomet perjungiamas energijos tiekimas iš vieno šaltinio ir prijungiamas kitas.
- Energijos valdymo kaupikliai – šie kaupikliai kaupia energiją, kuomet yra jos perteklius ir tiekia, kuomet atsiranda jos trūkumas. Taip pat šie kaupikliai tam tikram laikotarpiui gali užtikrinti sistemos autonomiškumą, kuomet netenkama pagrindinio šaltinio.

Kadangi darbe bus naudojamas mažos galios energijos kaupiklis, toliau apžvelgiami pagrindiniai mažos galios energijos kaupikliai, jų palyginimas pateikiamas 6.1 lentelėje.

6.1 lentelė. Mažos galios energijos kaupiklių palyginimas

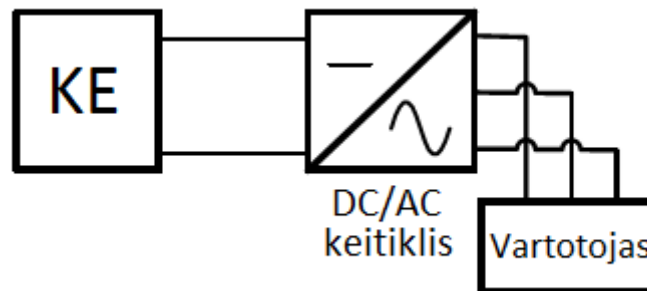
Kaupiklio tipas	Pranašumai	Trūkumai	N.v.k. %
Li-jonų baterijos	Dideli galios ir energijos tankiai bei efektyvumas	Brangi gamyba	90-95
Superkondensatoriai	Didelis įkrovos/iškrovos ciklų skaičius, didelis efektyvumas	Mažas energijos tankis	95-97
NiMH baterijos	Didelis galios tankis ir efektyvumas	Nedidelis energijos tankis	80-90
NaS baterijos	Didelis galios tankis ir efektyvumas	Brangi gamyba Pavojingas aplinkai	80-90
NiCd baterijos	Dideli galios ir energijos tankiai	Trumpamžikumas	60-70
Rūgštinės švino baterijos	Maža kaina	Mažas įkrovos/iškrovos ciklų skaičius, kai gilios iškrovos	50-75

Vertinant lentelėje pateiktų mažos galio energijos kaupiklių savybes, būsimam modeliui geriausia rinktis Li-jonų bateriją. Šio tipo EK pasižymi dideliais galios ir energijos tankiais bei aukštu naudingo veikimo koeficientu.

## 7. ELEKTROS ENERGIJOS KONVERSIJOS STRUKTŪRA IR IMITACINIS PROCESŲ MODELIS

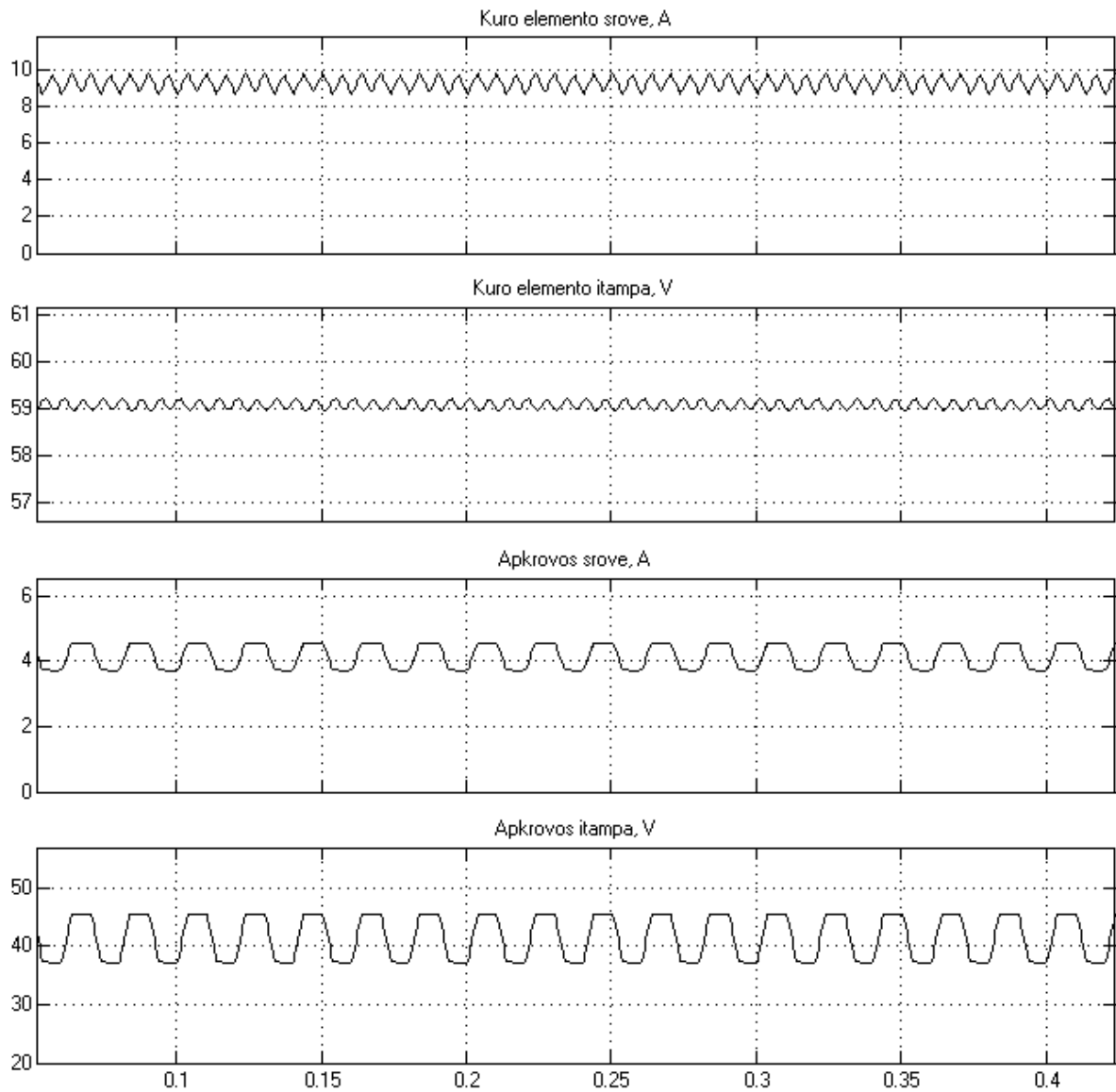
Kuro elemento generuojama elektrinė galia nėra standartinė ir dėl to tiesiogiai yra mažai kur panaudojam. Naudojant keitiklių sistemas, kuro elemento (ar jų junginių) pagamintą energiją galima konvertuoti į tinkamą naudoti vartotojui ar generuoti į elektros tinklą. Kadangi kuro elementas yra brangios technologijos ir nepastovaus darbo, tai keitiklių sistemą turi sugebėti susitvarkyti su pagaminamos elektros energijos parametrų kitimais bei būti pigi.

Paprasčiausia energijos konversijos sistema, tai kuomet naudojamas tik DC/AC keitiklis (dar vadinamas inverteriu, DC – nuolatinė srovė, AC – kintamoji srovė) tiesiogiai konvertuojantis KE pagamintą nuolatinę srovę į trifazę kintamąją. Ši sistema yra pati paprasčiausia, tačiau neužtikrinanti harmoningų kintamos įtampos ir srovės verčių. KE generuojama nepastovių parametrų energija, atsikartoja ir keitiklio generuojamoje įtampoje bei srovėje. Struktūrinė vienos pakopos keitiklio schema pateiktą 7.1 paveiksle.



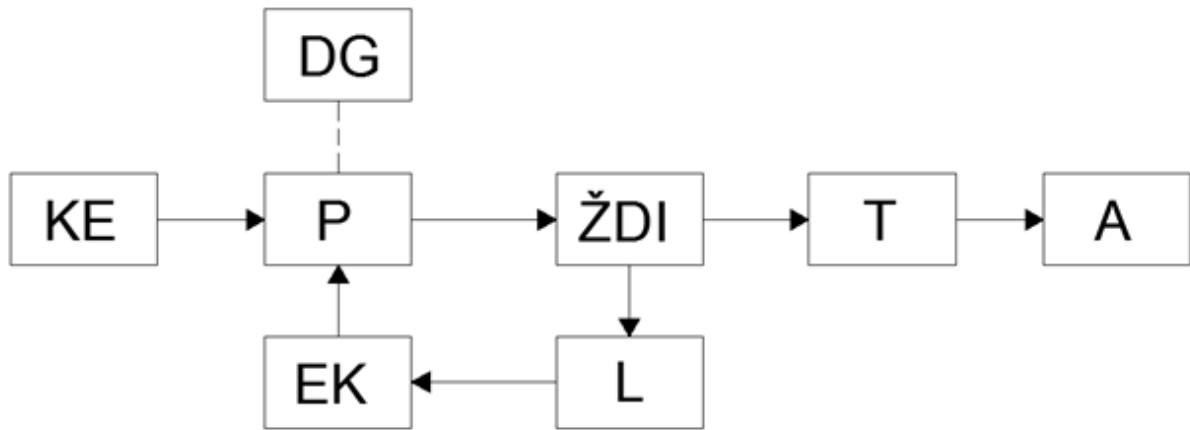
7.1 pav. Pirminė energijos konversijos sistema

Atlikus pirminės konversijos sistemos modeliavimą programinio paketo „Matlab“ papildinio „Simulink“ aplinkoje, buvo matuojamos KE ir inverterio srovių ir įtampų efektinės vertės (7.2 pav.). Pastebimas inverterio išėjime generuojamų efektyvių įtampos ir srovės nepastovumas, kurį įtakoja KE nepastovus veikimas.



7.2 pav. Pirminės energijos konversijos sistemos KE ir apkrovos efektyviųjų įtampų ir srovių kitimas laike

Siekiant patobulinti pirminės sistemos veikimą, buvo įvesta kelta elementų. Tiriamos sistemos struktūrinis modelis pateiktas paveiksle 7.3. Modelį sudarantys elementai: KE – kuro elementas; DG – dažnio generatorius; P – perjungiklis; EK – energijos kaupiklis; ŽDI – žemo dažnio inverteris; L – lygintuvas; T – transformatorius; A – apkrova.



7.3 pav. Tiriamos sistemos modelis

Kompensuoti nepastovų kuro elemento veikimą padės energijos kaupiklis. Energijos kaupiklis, tai ličio jonų akumuliatorius, kuris prijungiamas lygiagrečiai KE. Dažnio generatorius perduoda tam tikro dažnio impulsus į perjungiklį, kuri vienu laiko momentu prie sistemos prijungia KE, o kitu – EK. Tokiu būdu KE generuojamos galios kritimai kompensuojami iš EK.

Iš perjungiklio tiekiamą nuolatinės srovės energija, žemo dažnio inverteris konvertuoja į kintamos srovės trifazę. Žemo dažnio, o būtent 50 Hz dažnio, inverteris pasirinktas siekiant sumažinti kaštus, atsisakant dažnio keitiklio. Didžioji dalis energijos generuojama į transformatorių, kuris ją pakeičia standartinė trifaze 400 V. Likusioji energijos dali tiekiamą srovės lygintuvui, kuri kintamą srovę pakeičia nuolatine ir ją įkraunamas EK.

Pasirinktos sistemos modelio tyrimas bus atliekamas, programinio paketo „Matlab“ papildinio „Simulink“ aplinkoje suprojektuotu imitaciniu modeliu. Imitacinio modelio pagalba bus simuliuojami darbo režimai siekiant surasti atskirų elementų vertes, kurioms esant optimaliausiai veiktų sistema. Taip pat modeliu imituojant tam tikrus procesus (trumpasis jungimas, tuščioji veika), bus gaunamos reikiamos charakteristikos. Imitacinis sistemos modelio schema programos aplinkoje, pateikiama 2 priede.

Imitacinio modelio sandara:

- **Lygintuvas**, tai modeliavimo programoje esanti ruošinys Universalus tiltelis (angl. *Universal Bridge*). Ruošinio nustatymuose, parenkamas diodinio tipo trifazis tiltelis, likusieji parametrai paliekami standartiniai. Po srovės lygintuvo liekančias įtampos pulsacijas filtruoja kondensatorius C7.



- **Energijos kaupiklis**, taip pat programos ruošinys, tai akumuliatorius (angl. *Battery*). Simuliacinio modelio nustatymuose pasirinktas Ličio jonų (angl. *Lithium-ion*). Energijos kaupiklio nominali įtampa 48V.

- **Kuro elementas**, tai programos pakete paruoštas kompleksinis elementas, programoje pavadintas angl. *Fuel Cell Stack*. Pasirinktas PEM tipo 6kW galios KE, kurio nominali įtampa 45 V, nominali srovė 133 A. KE paketą sudaro 65 kuro elementai (celės).

- **Diodas**, esantis tarp kuro elemento ir energijos kaupiklio, skirtas, kad EK nebūtų kraunamas tiesiogiai iš KE.

- Modelyje esantys **jungikliai**: „Jungiklis7“ ir „Jungiklis8“ atlieka perjungiklio funkciją, o **impulsų generatoriai**: „Impulsu generatorius7“ ir „Impulsu generatorius7“ atitinka dažnio generatorių.

- **Kondensatorius Cd** paskirtis, išsikraunant išlaikyti įtampą, kai KE atjungiamas ir prie inverterio prijungiamas EK.

**Inverteris** yra sudarytas iš šešių grupių elementų, ir kondensatorių C1 ir C2. Pulso generatoriai ir jungikliai atitinka tranzistorius. Pulsų generatoriuose nustatytais skirtingais laiko periodais generuojami impulsai, kurie uždarinėja jungiklius. Atitinkamais momentais jungikliams užsidarius, kondensatoriai C1 ir C2 išsikrauna, taip sukurdami kintamą srovę. Apskaičiuojamos impulsų laiko vertės.

$$f = \frac{1}{T}. \tag{7.1}$$

Kai  $f=50$  Hz, gauname viso periodo trukmę,  $T=0,02$  s. Kadangi inverteris šešių pakopų, tai trys impulsai seka vienas po kito, o sekantis prasikeis su trečiuoju ir likusieji du seks toliau paskui ketvirtą. Taip išgaunama sinusoidiška kreivė. Impulsų laiko momentai pateikti 7.1 lentelėje.

7.1 lentelė. Inverterio tranzistorių suveikimo laiko momentai

Pulso generatoriaus numeris	1	2	3	4	5	6
Laiko momentas, s	0	0,0067	0,0134	0,01	0,0167	0,0234

Elementai **L1, L2, L3, C4, C5** ir **C6** sudaro rezonansinius kontūrus, kurie optimizuos inverterio išėjimo parametrus. **Transformatoris**, naudojamas simuliacinės programos ruošinys trifazis transformatorius (angl. *Three-Phase Transformer* ). Nustatymuose parenkamas dviejų apvijų transformatorius, su įžemintomis neutralėmis. **Apkrovą** sudaro trys lygiagrečiai sujungtos varžos.

## 8. ELEKTROS ENERGIJOS KONVERSIJOS IMITACINIS MODELIAVIMAS

Bus atliekamas elektros energijos perdavimo iš kuro elemento į apkrovą bei energijos kaupiklį optimizavimas, siekiant minimizuoti nuostolius ir kuo efektyviau išnaudoti energijos šaltinį. Taip pat bus atliekami įvairių priklausomybių tyrimas pateikiant charakteristikas. Optimizavimas ir priklausomybių tyrimai vyks pagal susidarytą planą:

1. Į grandinę, lygiagrečiai KE įvedamas energijos kaupiklis. Naudojant perjungiklį, nustatyti optimaliausia perjungimo tarp KE ir EK dažnį.
2. Į grandinę, kuro elemento išėjime, prieš inverterį, įvedamas kondensatorius.
3. Nustatomas optimalus kondensatoriaus prijungimo dažnis, ištiriant apkrovos įtampos  $U_a$  ir srovės  $I_a$  harmoninę sandarą.
4. Inverteriui sudaroma LC kontūro parinkimo inžinerinė metodika ir nustatoma optimali  $L$  ir  $C$  verčių kombinacija.
5. Ištiriama apkrovos įtampos  $U_a$  priklausomybė nuo apkrovos galios  $P_a$ .
6. Energijos kaupiklio srovės  $I_{EK}$  priklausomybė nuo laiko  $t$ , kai inverteris dirba tuščios veikos režime.
7. Inverterio išėjimo gnybtų įtampos  $U_{Inv}$  priklausomybė nuo laiko  $t$ , kai inverteris dirba tuščios veikos režime.
8. Apkrovos srovė  $I_a$  priklausomybė nuo laiko  $t$ , kai apkrovoje trumpasis jungimas.

### 8.1. Sistemos optimizavimas

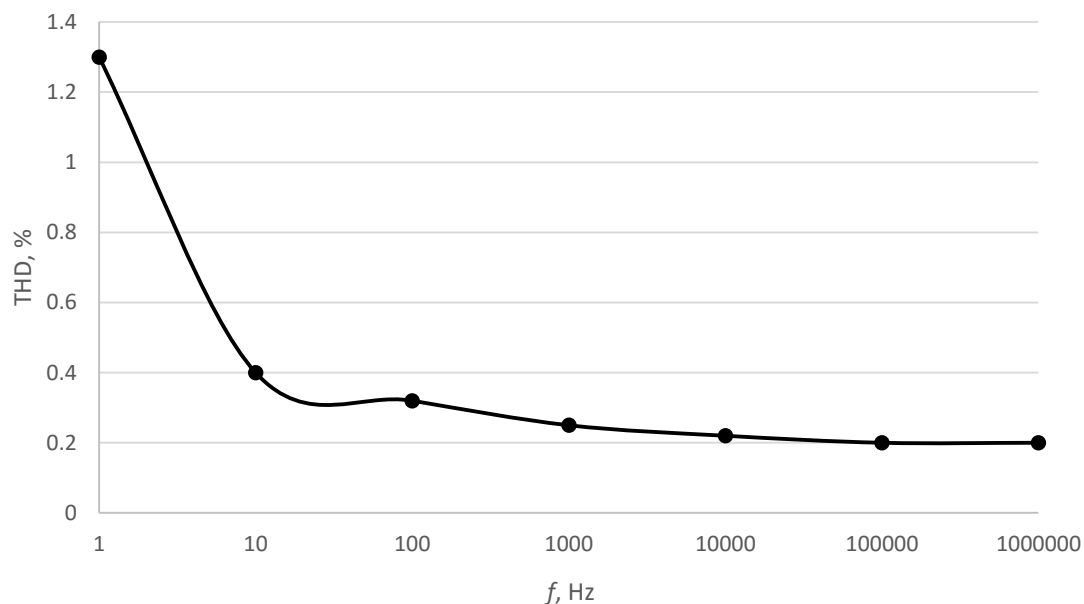
Į grandinę, lygiagrečiai KE įvedamas energijos kaupiklis, kuris tieks energiją inverteriui tokiu dažniu, koku KE įtampa pasiekia mažiausią vertę. Perjungiklis paskirtis nurodytu dažniu prie inverterio prijungi KE arba EK. Koku dažniu atlikti perjungimą nurodo dažnio generatorius. Modelyje, perjungiklį imituoja du jungiklio (schemoje: Jungiklis7 ir Jungiklis8) elementai, dažnio generatorių – du impulsų generatoriai (schemoje: Impuslu generatorius7 ir Impuslu generatorius7). Impulsų generatoriuose nustatomas periodas, kuris pagal 7.1 formulę yra atvirkščiai proporcingas dažniui.

Keičiant dažnį nuo 1Hz iki 1GHz, ieškomas optimaliausias dažnis, kuriam esant apkrovos įtampa būtų didžiausia, o apkrovos srovės THD ir įtampos THD vertė neviršijančios leistinos normos. Atliekant simuliacijas, buvo pastebėta, kad esant aukštesniųjų dažnių (10 MHz, 100

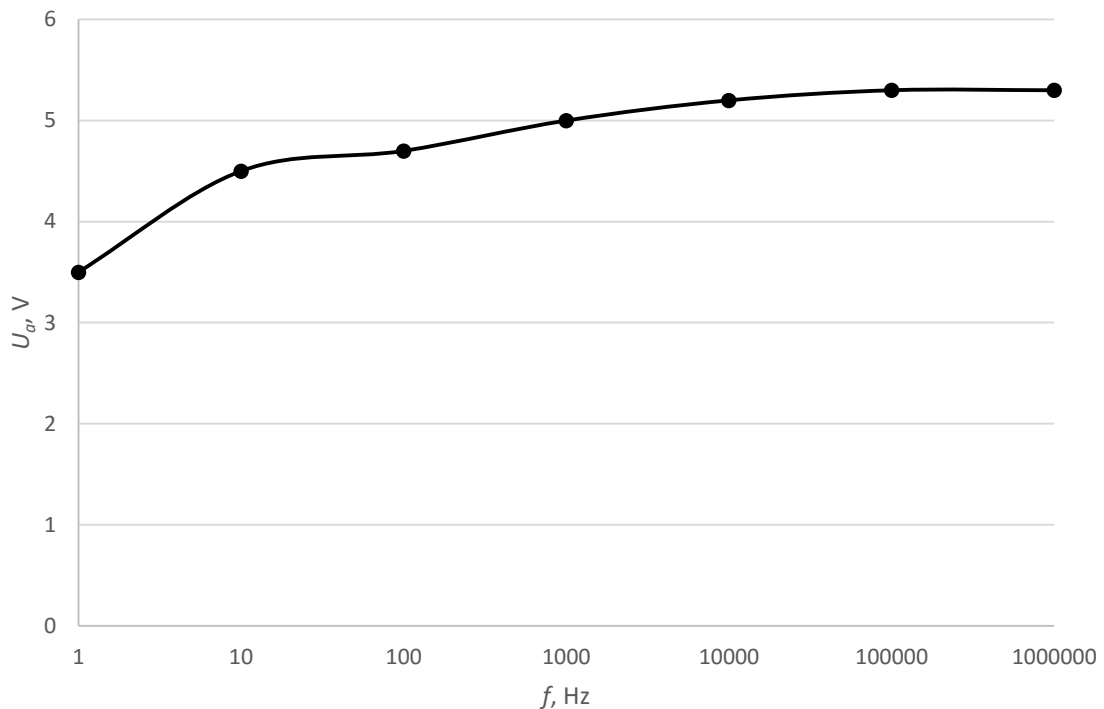
MHz, 1 GHz) vertėms simuliacinė programa nebesuskaičiuoja rezultatų. Tuomet dažnis bus tiriamas ribose nuo 1Hz iki 1MHz.

8.1 lentelė. Apkrovos įtampos, įtampos THD ir srovės THD vertės esant skirtingam perjungimo dažniui

Dažnis, Hz	Apkrovos srovės THD, %	Apkrovos įtampos THD, %	Apkrovos įtampa, V	Apkrovos įtampos vidutinė vertė, V
1	1,3	1,3	1,5 – 5,5	3,5
10	0,4	0,4	3,5 – 5,5	4,5
100	0,32	0,32	4,3 – 5,1	4,7
1000	0,25	0,25	4,6 – 5,4	5
10000	0,22	0,22	4,7 – 5,7	5,2
100000	0,2	0,2	4,9 – 5,7	5,3
1000000	0,2	0,2	4,9 – 5,7	5,3



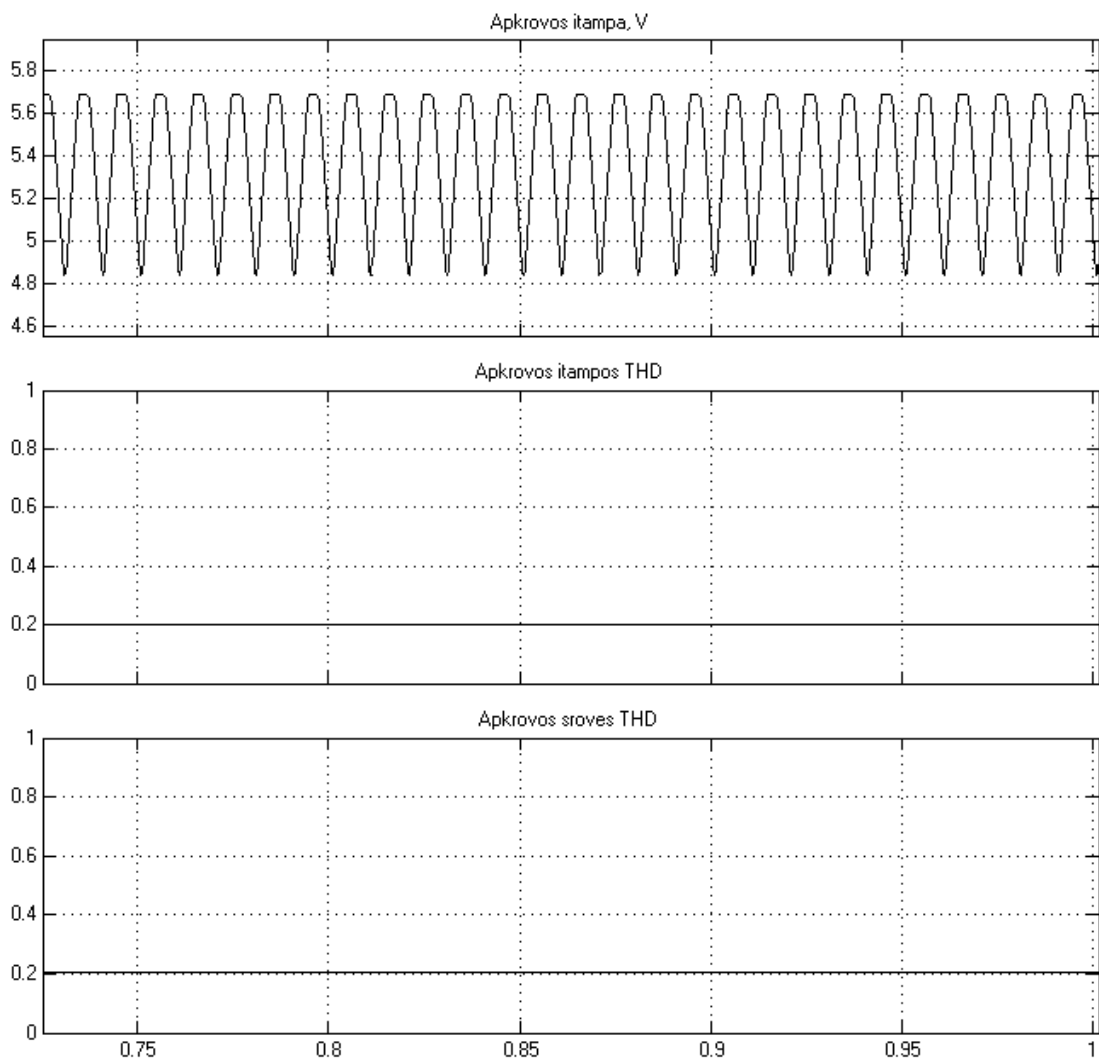
8.1 pav. Generuojamo dažnio priklausomybė nuo apkrovos įtampos ir srovės THD



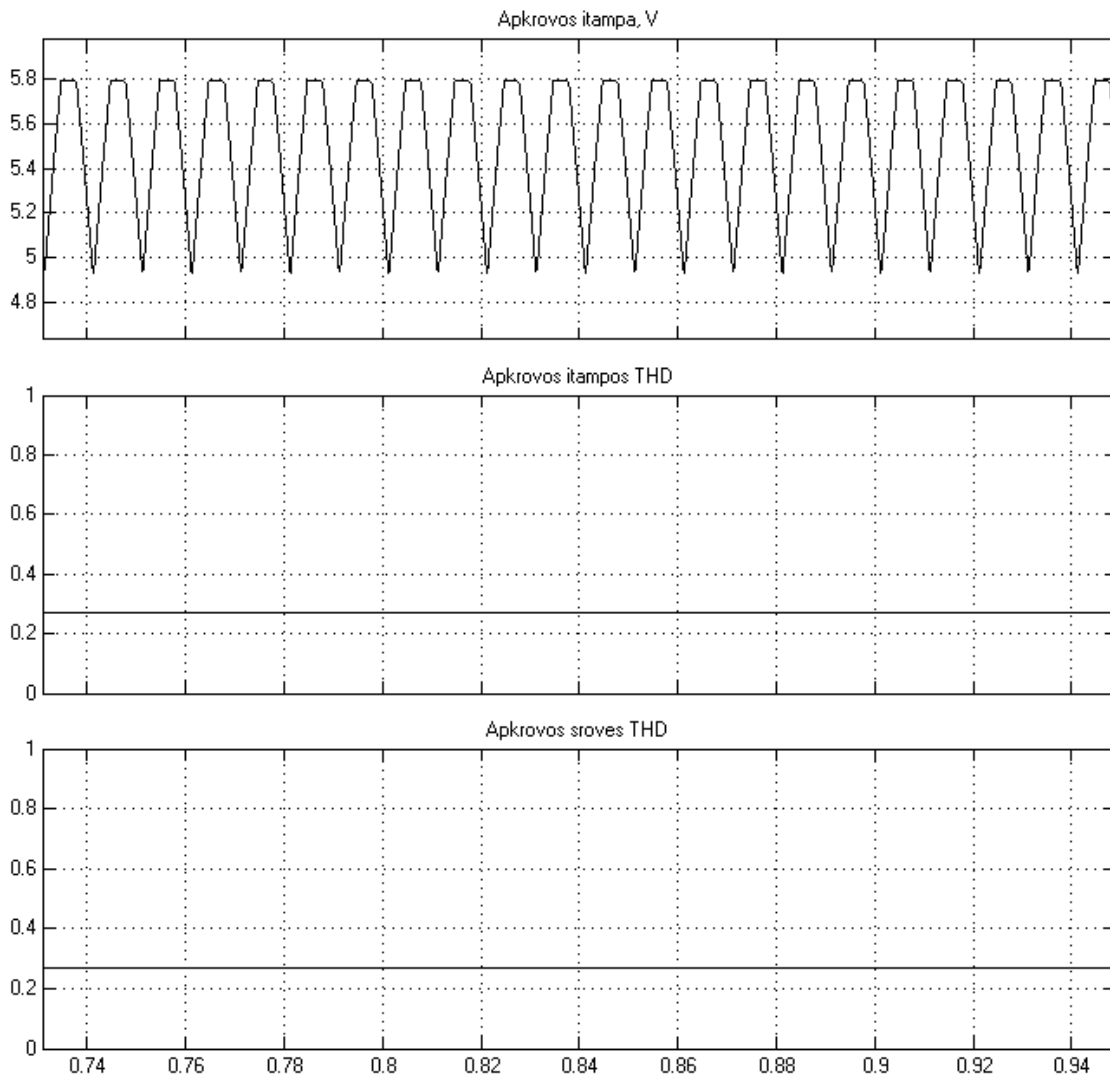
8.2 pav. Generuojamo dažnio priklausomybė nuo apkrovos įtampos vidutinės vertės

Iš lentelės 8.1 matome, kad visų dažnių atvejais apkrovos įtampos vertės svyruoja. Atsižvelgiant į apkrovos įtampų svyravimo leistina  $\pm 10\%$  normą, atmetami 1 Hz ir 10 Hz variantai, kuriems esant įtampa viršija nustatytą normą. Iš paveikslo 8.1 matome, kad visais atvejais leistina 8 proc. THD vertė neviršijama. Iš paveikslo 8.2 ir lentelės 8.1 matome, kad apkrovoje įtampa didžiausia, esant 100kHz ir 1MHz dažniams. Jei mažesnio dažnio elementas dar vienodą įtaką sistemai, kaip ir didesnio dažnio elementas, tuomet tas didesnio dažnio elementas tam tikrais momentais atlieka nereikšmingą darbą, todėl tolesniuose tyrimo etapuose bus naudojamas 100kHz dažnio generatorius.

Į turimo modelio grandinę, kuro elemento išėjime, prieš inverterį, prijungiamas kondensatorius, kurio paskirtis, išsikraunant išlaikyti įtampą, kai KE atjungiamas ir prie inverterio prijungiamas EK. Pirmiausia įvertinama, kokią įtaką sistemai daro šis įvedamas kondensatorius (modelyje pažymėtas Cd). Vertinamos apkrovos įtampos, apkrovos įtampos THD ir apkrovos srovė THD charakteristikos (paveikslai 8.3 ir 8.4). Pastebima, kad įvestas kondensatorius Cd padidina apkrovos įtampą, tačiau padidina ir THD vertes.



8.3 pav. Apkrovoji įtampa, įtampos THD ir srovės THD be kondensatoriaus Cd

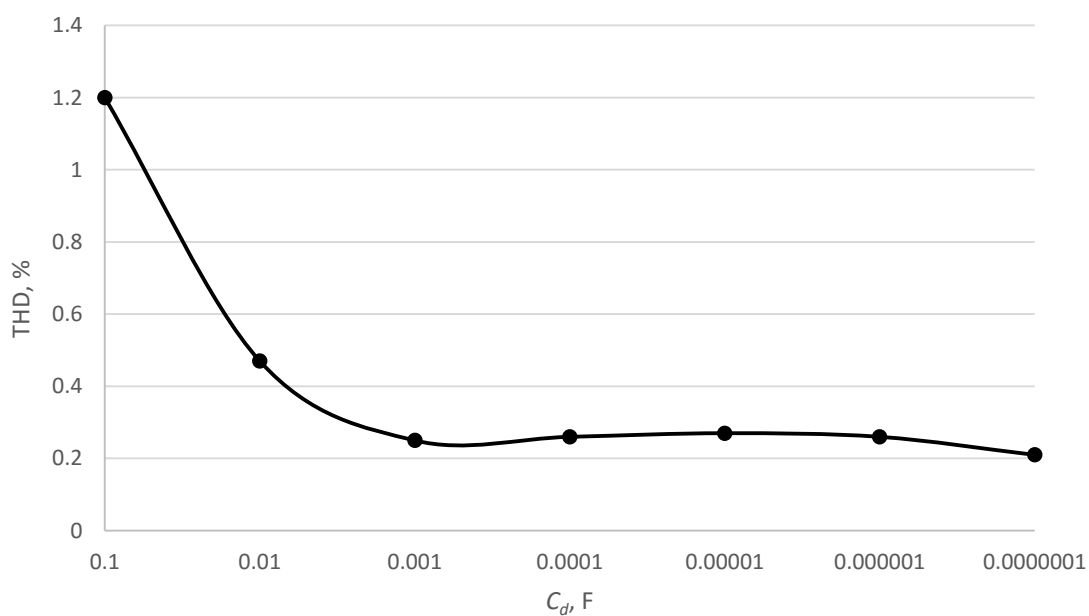


8.4 pav. Apkrovos įtampa, įtampos THD ir srovės THD su kondensatoriumi  $C_d=0,1 \mu\text{F}$

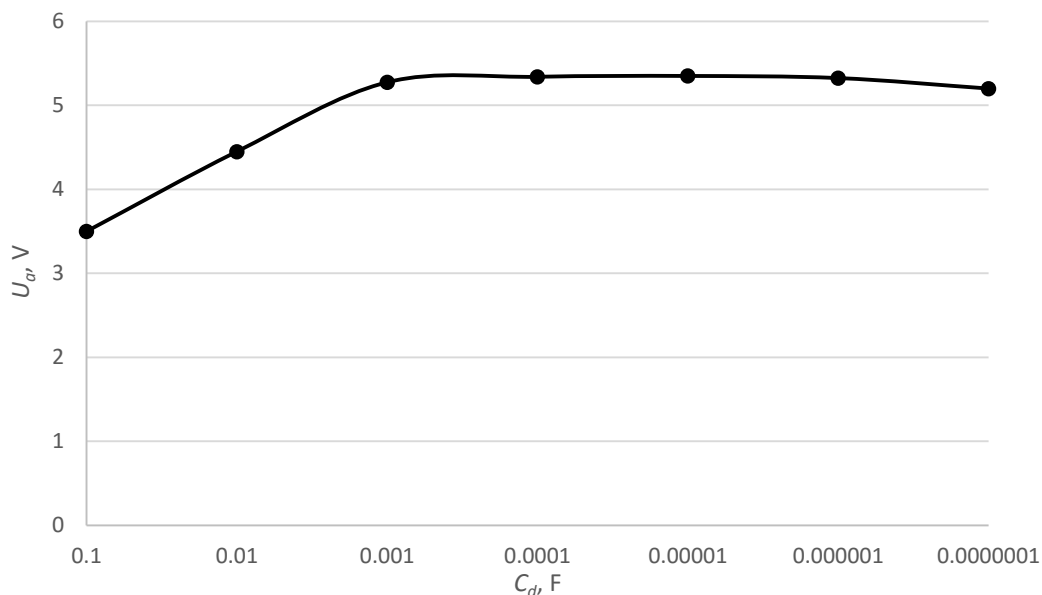
Su pasirinktu KE ir EK perjungimo dažniu, nustatomas optimaliausia kondensatorius  $C_d$  talpa  $C_d$ , ištiriant apkrovos įtampos ir srovės harmoninę sandarą. Simuliacija atliekama su kondensatorių vertėmis nuo  $0,1 \mu\text{F}$  iki  $0,1 \text{ F}$ . Apkrovos įtampos ir THD charakteristikos, pateikiamos paveiksluose 8.5 ir 8.6.

8.2 lentelė. Apkrovos įtampos, įtampos THD ir srovės THD vertės esant skirtingai kondensatoriaus  $C_d$  talpai

Kondensatoriaus talpa $C_d$	Apkrovos srovės THD	Apkrovos įtampos THD	Apkrovos įtampa, V	Apkrovos įtampos vidutinė vertė, V
100 nF	0,21	0,21	4,75-5,65	5,2
1 $\mu$ F	0,26	0,26	4,9-5,75	5,325
10 $\mu$ F	0,27	0,27	4,9-5,8	5,35
100 $\mu$ F	0,26	0,26	4,9-5,78	5,34
1 mF	0,25	0,25	4,8-5,75	5,275
10 mF	0,47	0,47	3,95-4,95	4,45
100 mF	1,2	1,2	0,5-6,5	3,5



8.5 pav. Apkrovos srovės ir įtampos THD priklausomybė nuo kondensatoriaus  $C_d$  talpos



8.6 pav. Apkrovos įtampos priklausomybė nuo kondensatoriaus  $C_d$  talpos

Vertinant 8.5 pav. charakteristiką, visų tipų kondensatoriai tinkami, kadangi jiems esant neviršijama 8 proc. vertė. Atsižvelgiant į 8.6 pav. charakteristiką ir lentelės 8.2 duomenis, optimaliausi yra nuo 1 mF iki 1  $\mu$ F, kadangi esant tokio talpumo kondensatoriams, apkrovoje įtampa didžiausios vertės ir neviršija įtampų svyravimo leistinos  $\pm 10\%$  normos. Pasirenkamas 10  $\mu$ F talpos kondensatorius, kuriam esant apkrovoje įtampa pati didžiausia.

Inverteriui sudaroma LC kontūro parinkimo inžinerinė metodika ir nustatoma optimali  $L$  ir  $C$  verčių kombinacija. LC kontūras, tai rezonansinis filtras, kuris šiuo atveju ne filtruoja, o šuntuoja pasirinktąją harmoniką, ją atitinkančiu dažniu  $\omega$ . Keičiant  $L$  ir  $C$  prie skirtingų transformacijos koeficientų reikšmių, bus stebimas apkrovos įtampos kitimas. Į grandinę, prieš apkrovą, įvedamas trifazis įtampos transformatorius, kurio transformacijos koeficientas  $k$  bus keičiamas, siekiant surasti optimaliausią vertę.

Išrenkamos  $L$  ir  $C$  kombinacijos, kurioms esant  $f = 50$  Hz.  $L$  vertė pasirenkama iš dešimties mH eilės intervalo, kadangi didesnio induktyvumo elementai yra didelių gabaritų, o esant mažesnio induktyvumo reikia didesnio kondensatoriaus. Kondensatoriaus  $C$  talpa pasirenkama iš šimtų  $\mu$ F eilės intervalo, kadangi didesnio talpumo elementai yra brangūs.  $L$  ir  $C$  vertės randamos, naudojanti sekančiomis formulėmis ir pateikiamos 8.3 lentelėje:

$$\omega = 1/\sqrt{L \cdot C}; \quad (8.1)$$

$$2\pi f = 1/\sqrt{L \cdot C}. \quad (8.2)$$



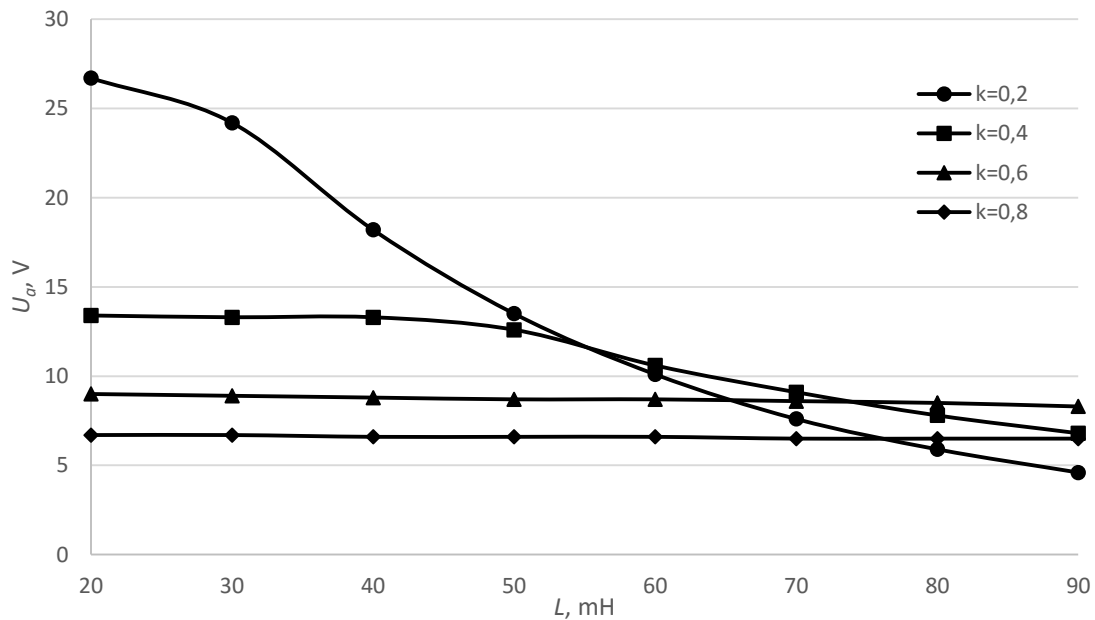
8.3 lentelė. LC kontūro induktyvumo ir talpumo kombinacijos

$L$ , mH	20	30	40	50	60	70	80	90
$C$ , $\mu\text{F}$	507	338	254	203	169	145	127	113

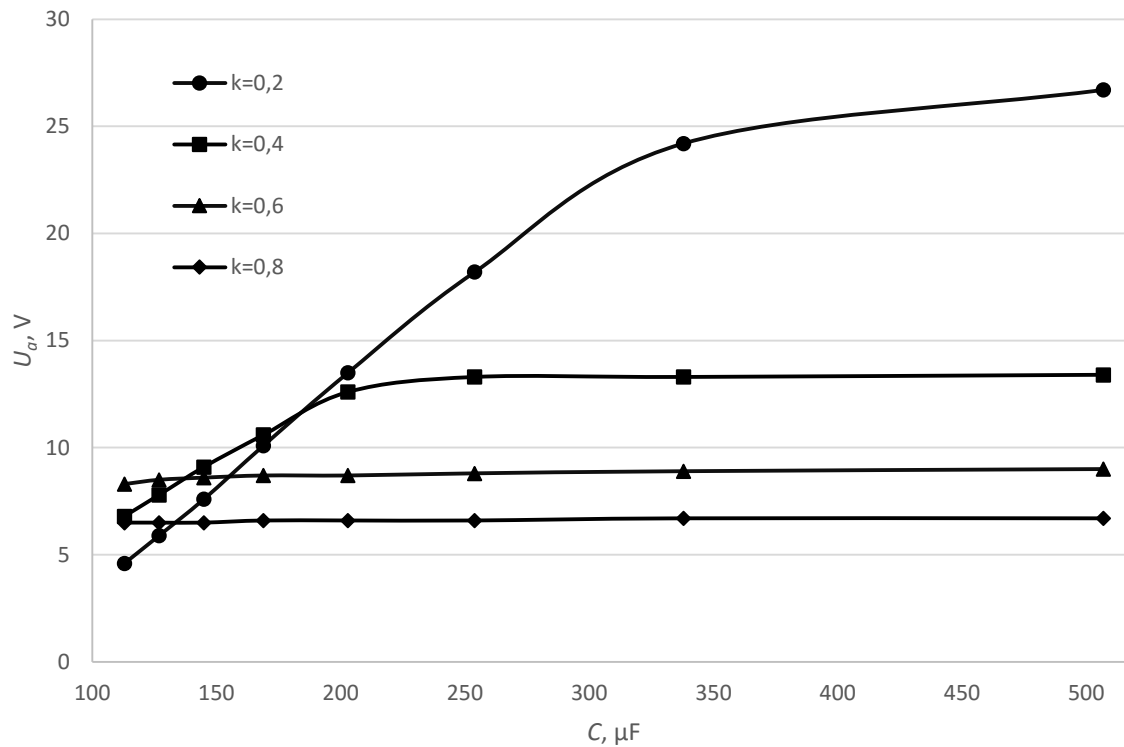
Su turimomis  $L$  ir  $C$  kombinacijomis atliekama simuliacija, keičiant transformatoriaus transformacijos koeficientą. Simuliacijų rezultatai pateikiami 8.4 lentelėje bei grafiškai pateikiami paveiksluose 8.7 ir 8.8.

8.4 lentelė. Apkrovos įtampos vertės prie skirtingų transformacijos koeficientų visoms LC kombinacijoms

$L$ , mH	$C$ , $\mu\text{F}$	$U_a$ , V			
		$k = 0,2$	$k = 0,4$	$k = 0,6$	$k = 0,8$
20	507	26,7	13,4	9	6,7
30	338	24,2	13,3	8,9	6,7
40	254	18,2	13,3	8,8	6,6
50	203	13,5	12,6	8,7	6,6
60	169	10,1	10,6	8,7	6,6
70	145	7,6	9,1	8,6	6,5
80	127	5,9	7,8	8,5	6,5
90	113	4,6	6,8	8,3	6,5



8.7 pav. Apkrovos įtampos priklausomybė nuo LC kontūro induktyvumo prie skirtingų transformacijos koeficientų

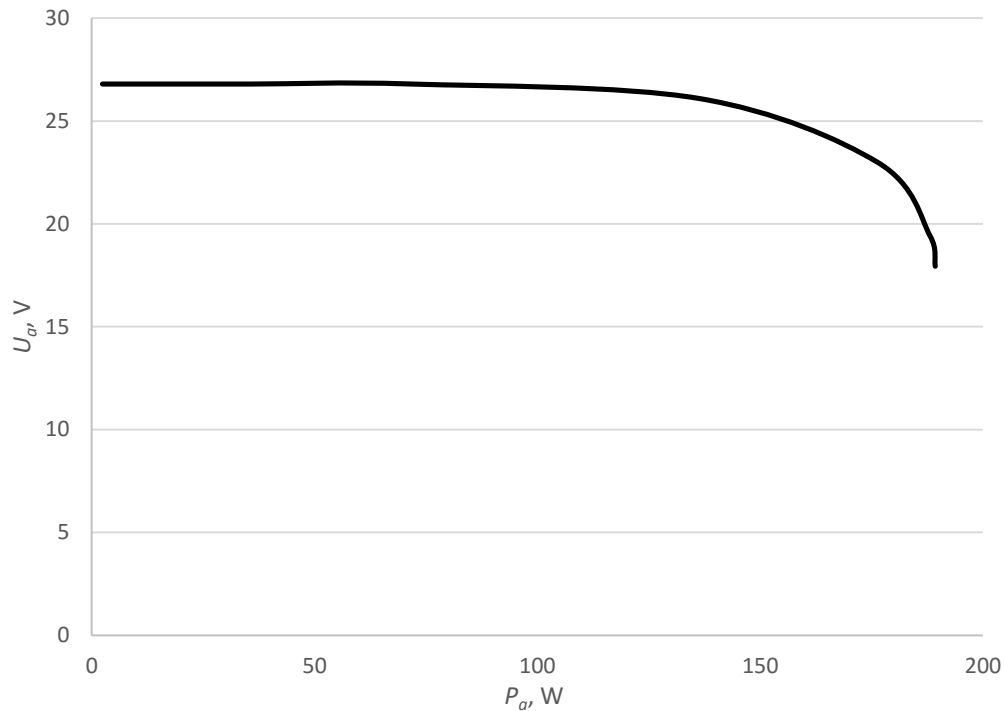


8.8 pav. Apkrovos įtampos priklausomybė nuo LC kontūro talpumo prie skirtingų transformacijos koeficientų

Vertinant gautus simuliacijos rezultatus, matome, kad didžiausia generuojama įtampa apkrovoje yra tuomet, kai LC kontūro induktyvumas – 20 mH, o talpumas – 507  $\mu\text{F}$ . Kadangi pasirinkta  $L$  ir  $C$  kombinacija yra kraštutinis variantas užsiduotų intervalų, patikrinamas LC kontūro varianta, kuomet  $L = 10$  mH, o  $C = 1014$   $\mu\text{F}$ . Gauta, kad apkrovos įtampa  $U_a = 26,8$  V, šis rezultatas yra tik 0,1 V didesnis už pasirinktojo varianto. Taip pat kondnesatoriaus  $C$  talpa padidėtų dvigubai, o tai reikalautų didesnių investicijų. Su pasirinktomis LC kontūro vertėmis, toliau bus atliekamas procesų tyrimas.

## 8.2. Procesų tyrimas

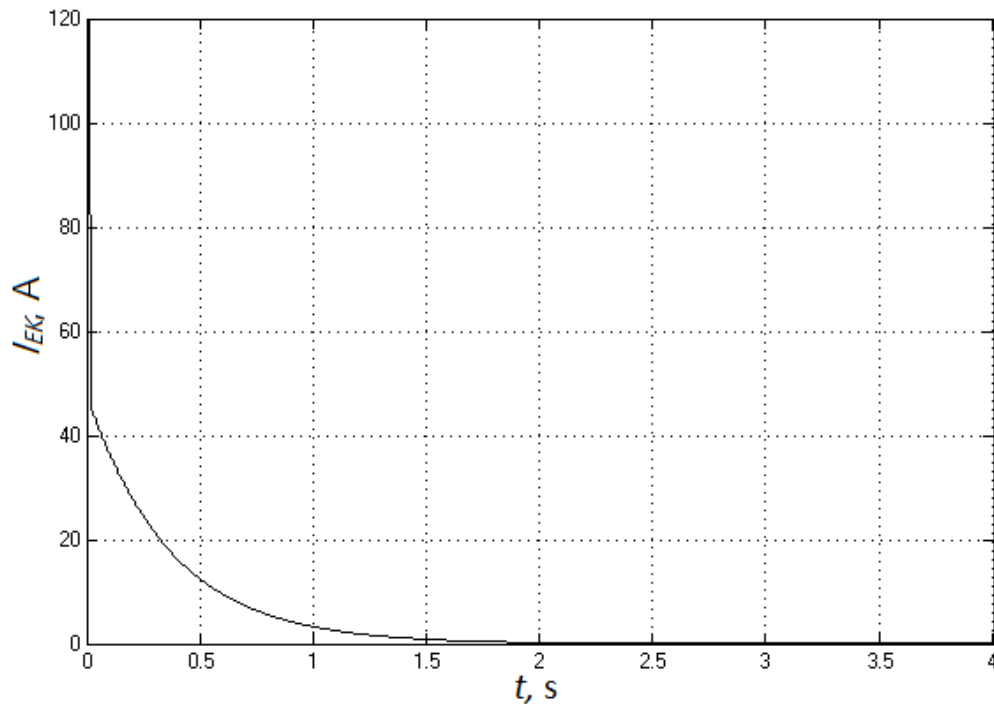
Ištiriama apkrovos įtampos  $U_a$  priklausomybė nuo apkrovos galios  $P_a$ . Apkrovos galia reguliuojama, modelyje keičiant apkrovos varžą. Apkrovos įtampos priklausomybės nuo apkrovos galios charakteristika pateikiame paveiksle 8.9.



8.9 pav. Apkrovos įtampos priklausomybė nuo apkrovos galios

Iš 8.9 paveikslo charakteristikos, matome, įtampa plačiam galios ruože išlieka stabili, tačiau pradeda mažėti esant didesnei nei apie 120 W galios suvartojimą.

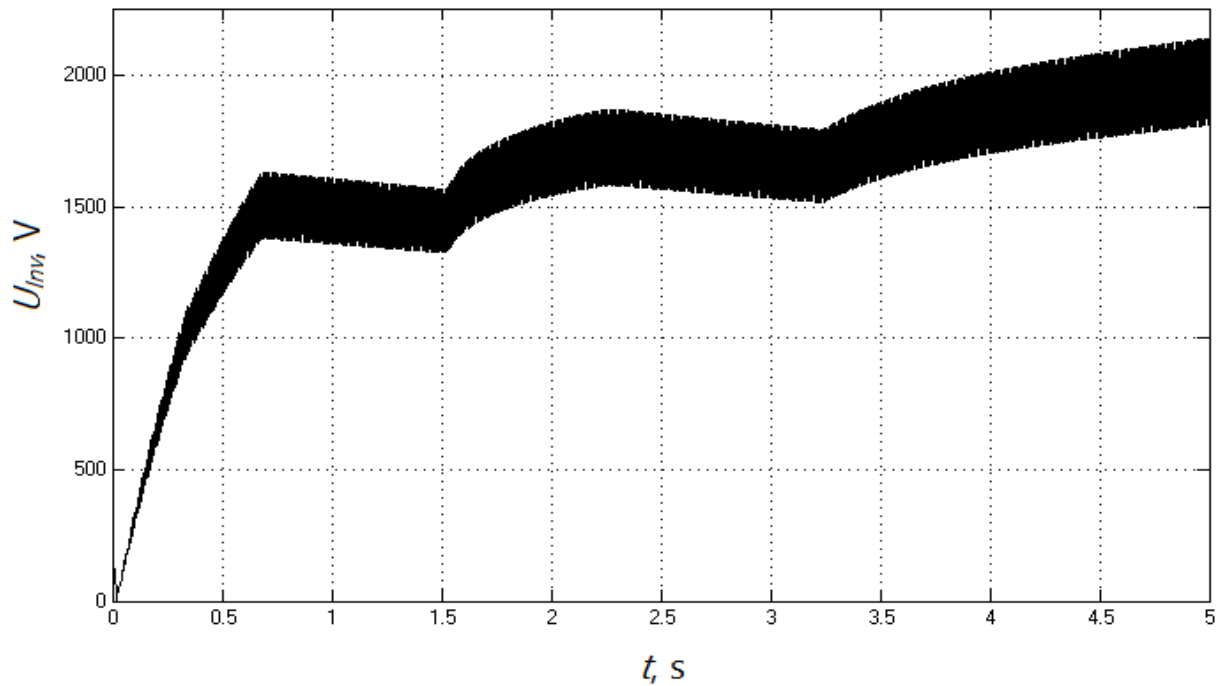
Atliekamas energijos kaupiklio srovės  $I_{EK}$  priklausomybė nuo laiko  $t$ , kai inverteris dirba tuščios veikos režime tyrimas. Atjungiami inverterio išėjimo gnybtai, į grandinę EK išėjime prijungiamas srovės matavimo elementas ir pradeda simuliacija. Simuliacijos rezultatai pateikiami grafiškai 8.10 paveiksle.



8.10 pav. EK srovės  $I_{EK}$  priklausomybė nuo laiko  $t$ , kai inverteris dirba tuščios veikos režime

Atsižvelgiant į 8.10 charakteristiką, galima teigti, kad EK nustoja generuoti srovę po 2 s, kadangi įtampa tampa labai artima nuliui.

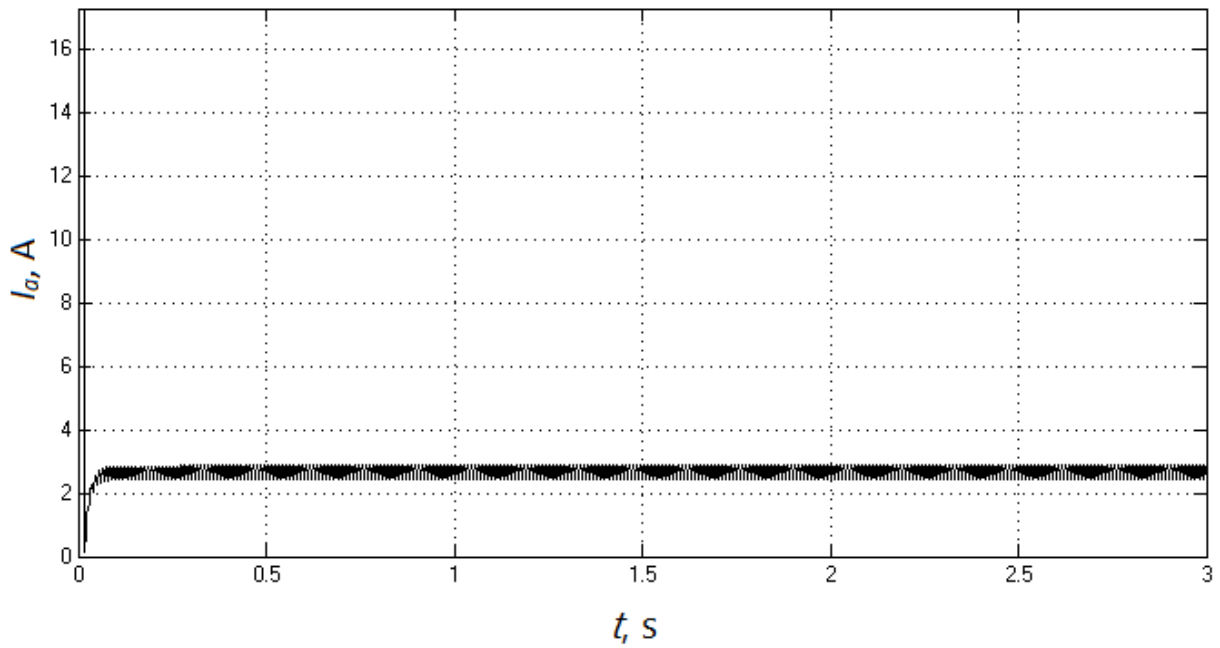
Tiriama inverterio išėjimo gnybtų įtampos  $U_{Inv}$  priklausomybė nuo laiko  $t$ , kai inverteris dirba tuščios veikos režime. Prie inverterio išėjimo vieno iš gnybto prijungiamas įtampos matavimo elementas. Įtampa matuojama, tarp vienos fazės gnybto ir žeminimo kontakto. Atliekamo tyrimo rezultatai pateikiami grafiškai paveiksle 8.11.



8.11 pav. Inverterio išėjimo įtampos priklausomybė nuo laiko, kai jis dirba tuščiosios veikos režimu

Iš 8.11 charakteristikos, matome, kad per pirmąją pusę sekundę įtampa staigiai kyla iki 1600V, o toliau pulsuojančiai didėja. Toks įtampos šuolis įvyksta dėl begalinės varžos tarp inverterio ir apkrovos.

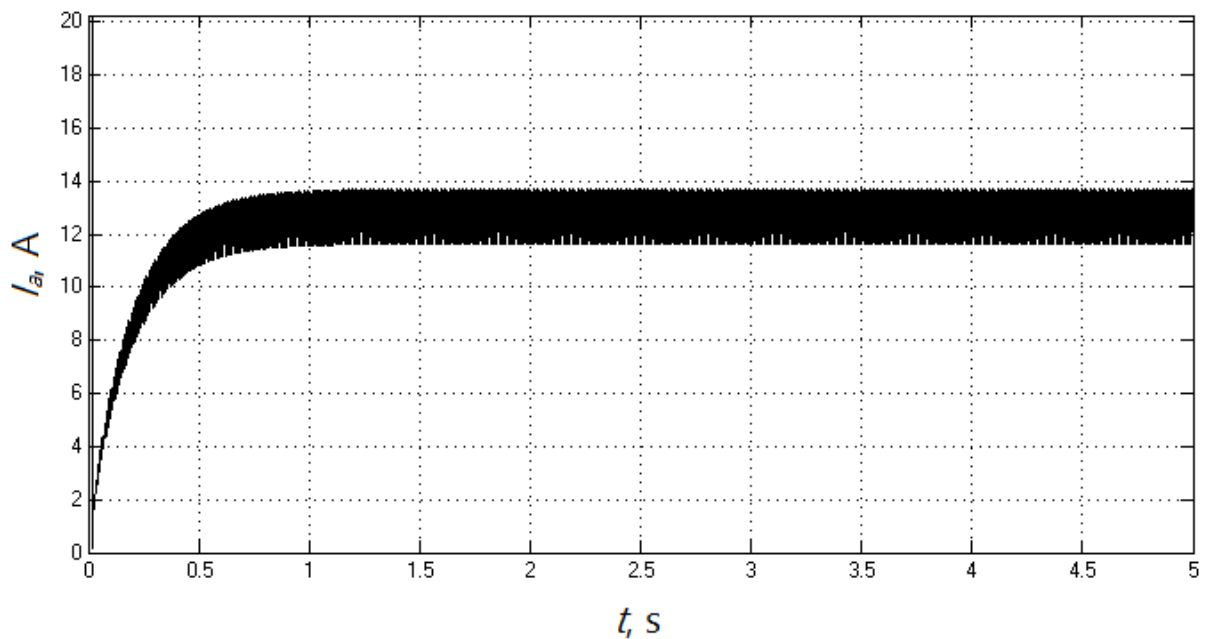
Toliau tiriamos apkrovos srovės  $I_a$  priklausomybės nuo laiko  $t$ , kai apkrovoje įvyksta įvairių tipų trumpieji jungimai. Pirmiausiai atliekama simuliacija, kuomet apkrovoje nėra trumpojo jungimo. Apkrovos srovės  $I_a$  priklausomybė nuo laiko  $t$ , pateikiama paveiksle 8.12.



8.12 pav. Apkrovos srovės  $I_a$  priklausomybė nuo laiko  $t$

Iš 8.12 charakteristikos, matome, kad apkrovoje nevykstant trumpajam jungimui, apkrovos srovė stabilizuojasi per trumpą laiką nuo įjungimo ir yra apie 2,5 A.

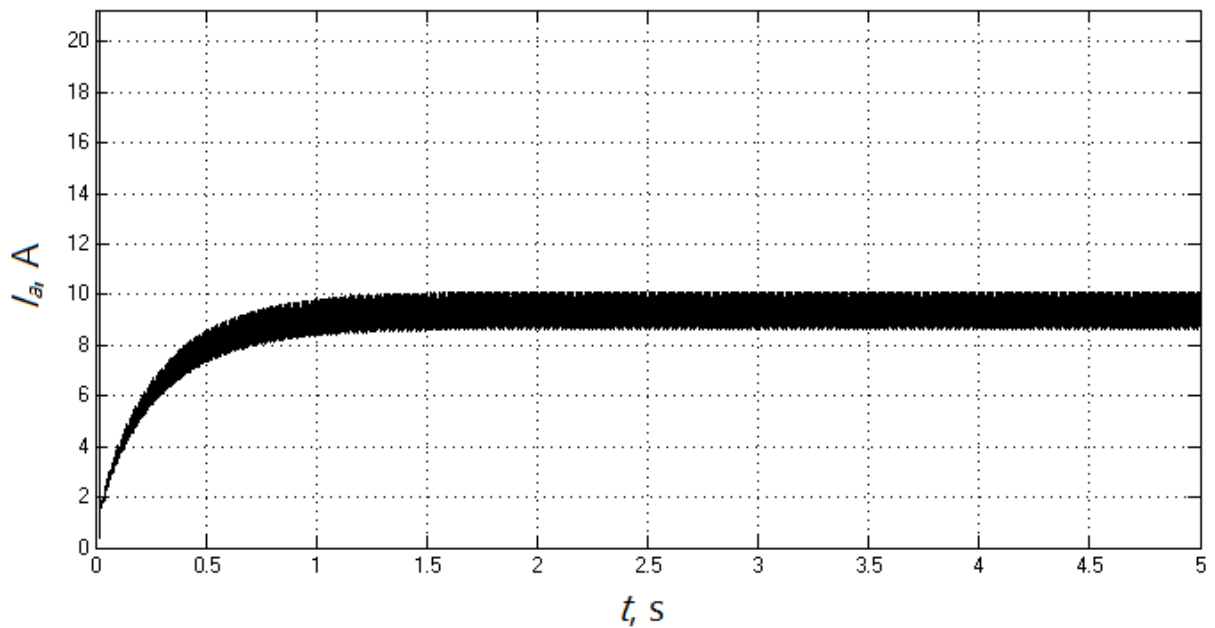
Simuliuojamas vienfazis trumpas jungimas  $K^{(1)}$ , kai vienas fazinis laidininkas susijungia su žeme arba nuliniu laidu. Rezultatai pateikiami grafiškai 8.13 paveiksle.



8.13 pav. Vienfazis trumpas jungimas  $K^{(1)}$

Simuliacija atliekama, vieną apkrovos laidininką įžeminant ir matuojant srovę tame laidininke. 8.13 paveiksle pateikiama charakteristika, kaip kinta srovė įvykus vienfaziai trumpajam jungimui. Matome, kad apkrovos srovė svyruoja nuo 11,5 A iki 13,5 A. Gautą charakteristiką lyginant su 8.12 apkrovos srovės charakteristika, matome, kad trumpojo jungimo atveju srovė padidėjo apie 5 kartus.

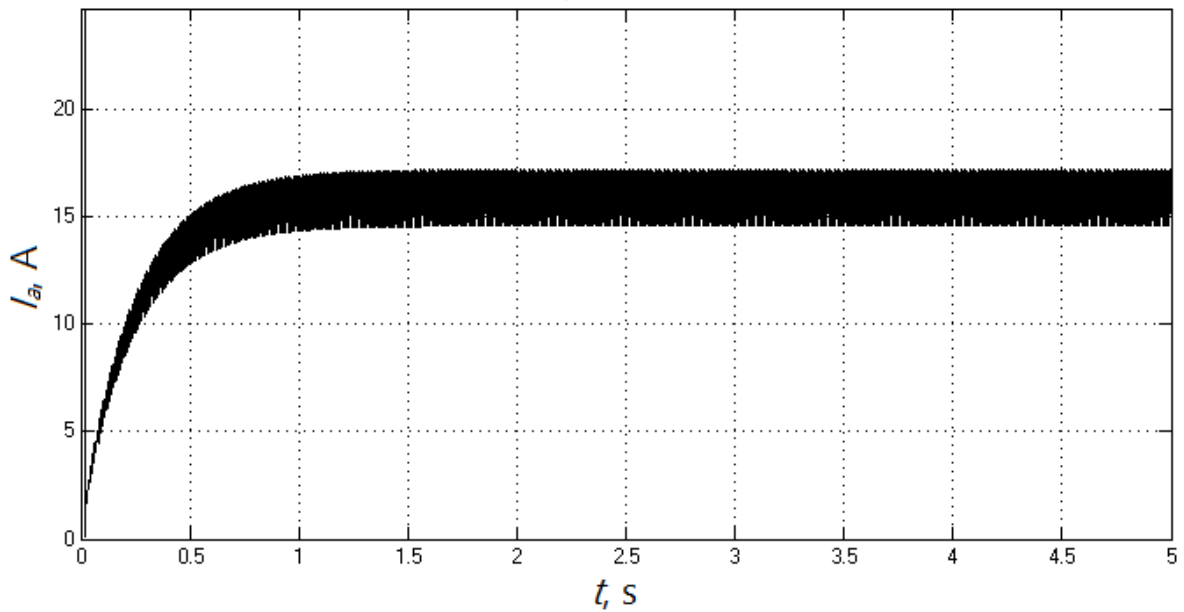
Simuliuojamas dvifazis trumpas jungimas  $K^{(2)}$ , kai du faziniai laidininkai susijungia tarpusavyje.



8.14 pav. Dvifazis trumpas jungimas  $K^{(2)}$

Iš 8.14 paveiksle pateikiamos charakteristikos, matome, kad apkrovos srovė svyruoja nuo 9,5 A iki 10 A. Gautą charakteristiką lyginant su 8.12 apkrovos srovės charakteristika, srovė padidėjo apie 4 kartus.

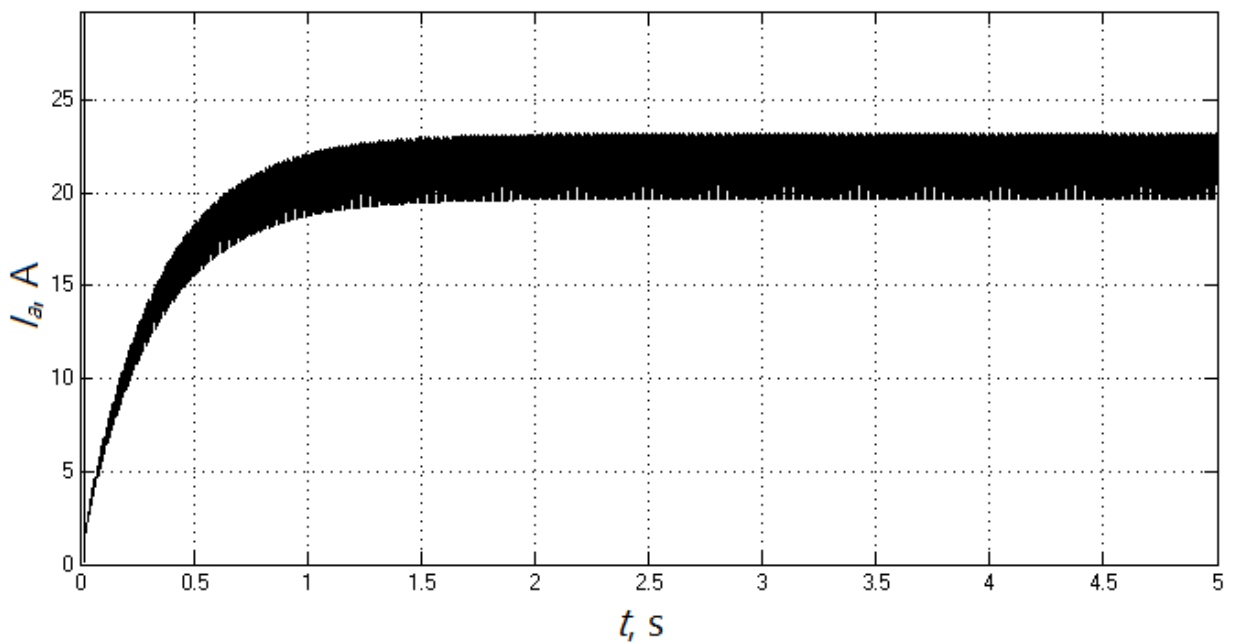
Simuliuojamas dvifazis trumpasis jungimas su žeme  $K^{(1,1)}$ , kai du faziniai laidininkai susijungia tarpusavį ir su žeme arba nuliniu laidu.



8.15 pav. Dvifazis trumpas jungimas su žeme  $K^{(1,1)}$

Pagal 8.14 paveiksle pateikiamą charakteristiką, apkrovos srovė svyruoja nuo 14,5 A iki 16 A. Šią charakteristiką lyginant su 8.12 apkrovos srovės charakteristika, srovė padidėjo apie 6 kartus.

Simuliuojamas trifazis trumpas jungimas  $K^{(3)}$ , kai visi trys faziniai laidininkai susijungia tarpusavyje.



8.16 pav. Trifazis trumpas jungimas  $K^{(3)}$



Simuliacija atliekama, visus tris laidininką tarpusavyje ir matuojant srovę viename laidininke. 8.16 paveiksle pateikta charakteristika, kaip kinta srovė įvykus trifaziui trumpajam jungimui. Apkrovos srovė svyruoja nuo 19 A iki 23 A. Trifazio trumpojo jungimo charakteristiką lyginant su 8.12 apkrovos srovės charakteristika, matome, kad trumpojo jungimo atveju srovė išaugo apie 8 kartus.

# IŠVADOS

1. Programinio paketo „MATLAB Simulink“ aplinkoje buvo sumodeliuotas kuro elemento ir žemo dažnio inverterio sistemos prijungtos prie tinklo modelis. Sistema papildyta lygintuvu ir energijos kaupikliu.
2. Buvo nustatytas optimalus pirminio šaltinio (kuro elemento) ir papildomo šaltinio (energijos kaupiklio) perjungimo dažnis, kuris yra 100 kHz. Sistema papildyta tarpiniu energijos kaupikliu (kondensatorius Cd) ir nustatyta optimaliausia jo talpa, kuri yra 10  $\mu$ F.
3. Sistema papildyta trifaziu transformatoriumi, o inverterio vidinė sistema buvo papildyta rezonansiniu kontūru, kurio tinkamų parametų variacijos buvo apskaičiuotos. Atlikus apkrovos įtampos priklausomybės nuo rezonansinio kontūro parametų ir transformacijos koeficiento tyrimą, pasirinktas optimaliausias kontūro parametų variantas –  $L = 20$  mH ,  $C = 507$   $\mu$ F ir transformacijos koeficientas –  $k = 0,2$ . Tuomet įtampa apkrovoje gaunama 26,7 V.
4. Imitacinio modelio pagalba ištirta apkrovos įtampos  $U_a$  priklausomybė nuo apkrovos galios  $P_a$ . Įvertinta, kad apkrovoje įtampa plačiame galios ruože išlieka stabili, tačiau pradeda mažėti esant didesniai nei apie 120 W galios apkrovimui.
5. Ištirta energijos kaupiklio srovės  $I_{EK}$  priklausomybė nuo laiko  $t$ , kai inverteris dirba tuščios veikos režime. Nustatyta, kad energijos kaupiklis nustoja generuoti srovę po 2 s.
6. Atliktas inverterio išėjimo gnybtų įtampos  $U_{Inv}$  priklausomybės nuo laiko  $t$ , kai inverteris dirba tuščios veikos režime tyrimas. Pastebėta, kad per pirmąją pusę sekundę įtampa staigiai kyla iki 1600V, o toliau pulsuoja didėja. Įvertinta, kad toks įtampos šuolis įvyksta dėl begalinės varžos tarp inverterio ir apkrovos.
7. Ištirtos apkrovos srovės  $I_a$  priklausomybės nuo laiko  $t$ , kai apkrovoje keturiais skirtingais atvejais įvyksta trumpieji jungimai. Įvykus vienfazim trumpajam jungimui  $K^{(1)}$ , apkrovos srovė padidėjo 5 kartus, lyginant su apkrovos srove nesant trumpojo jungimo. Įvykus dvifaziui trumpam jungimui  $K^{(2)}$ , srovė padidėjo 4 kartus. Įvykus dvifaziam trumpam jungimui su žeme  $K^{(1,1)}$ , srovė padidėjo 6 kartus. Įvykus trifaziam trumpam jungimui  $K^{(3)}$ , srovė padidėjo 8 kartus.

## NAUDOTOS LITERATŪROS IR KITI INFORMACINIAI ŠALTINIAI

1. MITSUGI Chiba, HARUMI Arai, KENZO Fukuda. WE-NET: Japanese hydrogen program. International Journal of Hydrogen Energy, Volume 23, Issue 3, March 1998, P.159–165 [žiūrėta 2016 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319997000426>
2. MILČIUVIENĖ, S., MILČIUS, D., PRANEVIČIUS, L., VASYS, A. Vandenilio energetikos plėtros perspektyvos. ENERGETIKA, 2004, P.62-68, [žiūrėta 2016 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.lmaleidykla.lt/publ/0235-7208/2004/1/E-62.pdf>
3. BAGDONAITĖ, E. Metanolio kuro elemento statinių charakteristikų tyrimas. Bakalauro darbas, Šiaulių universitetas, 2010 [žiūrėta 2016 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: [http://vddb.laba.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2010~D\\_20100902\\_233011-07391/DS.005.0.01.ETD](http://vddb.laba.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2010~D_20100902_233011-07391/DS.005.0.01.ETD)
4. CHAN, S. H., KHOR K. A., XIA Z. T. A Complete Polarization Model of a Solid Oxide Fuel Cell and its Sensitivity to the Change of Cell Component Thickness. Journal of Power Sources, Volume 93, Issues 1–2, 1 February 2001, P.130–140 [žiūrėta 2016 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775300005565>
5. POLLET G. Bruno., PASUPATHI Sivakumar, SWART Gerhard ir kiti. Hydrogen and Fuel Cell Technologies at the Hydrogen South Africa (HySA) Systems Competence Centre. Platinum Metals Review, 2004, Volume 58, P.68 [žiūrėta 2016 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.technology.matthey.com/article/58/2/68-81/>
6. VEZIROĞLU, T. Nejat. PEM Fuel Cells (Second Edition), 2013 [žiūrėta 2016 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780123877109>
7. ORMEROD, R. Mark. Solid oxide fuel cells. Chemical Society Reviews, 2003, Volume 32, P.17-28 [žiūrėta 2016 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2003/cs/b105764m>
8. SEONGYEON Won, KYEONGMIN Oh, HYUNCHUL Ju. Numerical degradation studies of high-temperature proton exchange membrane fuel cells with phosphoric acid-doped PBI membranes. International Journal of Hydrogen Energy, Volume 41, Issue 19, 25 May 2016, P.8296–8306 [žiūrėta 2016 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319916308667>

9. CAVALLAROA, S., MONDELLO, N., FRENIB, S. Hydrogen produced from ethanol for internal reforming molten carbonate fuel cell. Journal of Power Sources, Volume 102, Issues 1–2, 1 December 2001, P.198–204 [žiūrėta 2016 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877530100800X>
10. BISCHOFF, M., HUPPMANN, G. Operating experience with a 250 kW<sub>el</sub> molten carbonate fuel cell (MCFC) power plant. Journal of Power Sources, Volume 105, Issue 2, 20 March 2002, P.216–221 [žiūrėta 2016 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775301009429>
11. BLOMEN, L.J.M.J., MUGERWA, M.N., Fuel Cell Systems. Springer Science & Business Media, 1994 [žiūrėta 2016 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: [https://books.google.lt/books/about/Fuel\\_Cell\\_Systems.html?id=O0my-RESWYIC&redir\\_esc=y](https://books.google.lt/books/about/Fuel_Cell_Systems.html?id=O0my-RESWYIC&redir_esc=y)
12. RAYAA, I. P., ELLIS, M. W., HERNANDEZ-GUERRERO, A., ELIZALDE-BLANCASC, F. Modeling the effect of membrane conductivity on the performance of alkaline fuel cells. Journal of Power Sources, Volume 307, 1 March 2016, Pages 898–906 [žiūrėta 2016 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775315307539>
13. ZHANG JiuJun, LIU Hansan. Electrocatalysis of Direct Methanol Fuel Cells. John Wiley & Sons, 2009 [žiūrėta 2016 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: <https://books.google.lt/books?id=xHsJJieZIHwC&printsec=frontcover&hl=lt#v=onepage&q&f=false>
14. AKBARIA, E., BUNTATA, Z., NIKOUKAR, A. ir kiti. Sensor application in Direct Methanol Fuel Cells (DMFCs). Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 60, July 2016, Pages 1125–1139 [žiūrėta 2016 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116001878>
15. STARKUS Bangimantas. Galios elektronika. Kauno Technologijos Universitetas, 2003 [žiūrėta 2016 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/126/galios-elektronika/>

# PRIEDAI

**Priedas 1. Pagrindinių kuro elementų tipų technologijų palyginimas**

Kuro elementų tipas	Dažniausiai pasitaikantis elektrolitas	Tipinė sistemos galia	Pritaikymas	Privalumai	Trūkumai
Polimerinio elektrolito membranos (PEM)	Polimerinis	<1kW – 250kW	Transportas; Nešiojamas energijos šaltinis; Mažos galios	Kietas elektrolitas sumažina koroziją ir matmenis; Žema darbo temperatūra; Mažas paleidimo laikas	Reikia brangių katalizatorių; Jautrumas kuro užterštumui; Per žema temperatūra
Kieto oksido elektrolito (KOE)	Keramikos	5kW – 3MW	Atsarginis maitinimo šaltinis; Didelės galios generatorių	Didelis naudingumo n.v.k atliekant kogeneraciją; Kuro lankstumas; Kietas elektrolitas reikalauja mažiau priežiūros	Aukšta temperatūra padidina koroziją ir komponentų nusidėvėjimą;
Fosforo rūgšties elektrolito (FRE)	Matrica, užpildyta skysta fosforo rūgštimi	50kW – 1MW	Didelės galios generatorių sistemos; Transportas	Padidintas atsparumas vandeniui teršalams; Didelis n.v.k.	Brangus katalizatorius – platina; Dideli gabaritai ir masė;
Išlydyto karbonato elektrolito (IKE)	Matricoje patalpintos išlydytos ličio ar kalio druskos	<1kW – 2MW	Didelės galios generatorių sistemos	Didelis n.v.k atliekant kogeneraciją; Lankstumas kuro rūšiai; Didelis katalizatorių pasirinkimas	Aukšta temperatūra padidina koroziją ir komponentų nusidėvėjimą; Sudėtinga elektrolito priežiūra;
Šarminis (ŠKE)	Kalio šarmas (KOH)	10kW – 100kW	Astronominiai ir kariniai įrenginiai	Greit pradeda veikti; Žema darbo temperatūra; Maža medžiagų kaina;	Jautrus kure esančiam CO <sub>2</sub> ; Didelė matmenys lyginant su generuojama galia
Tiesioginio tiekimo metanolio (TM)	Polimerinis	25W – 5kW	Buitiniuose ir elektronikos prietaisuose	Mažų matmenų; Kuras neagresyvus aplinkai; Ilgaamžis, dėl žemos temperatūros	Ne visas kuras dalyvauja reakcijose; Mažas n.v.k.

**Priedas 2. Imitacinis sistemos modelis**

