

Latvijas Lauksaimniecības universitāte  
Tehniskā fakultāte  
Lauksaimniecības Enerģētikas institūts

Mg.sc.ing. **Vitālijs Osadčuks**

## **Autonomās kombinētās elektroapgādes vadības sistēmu modelēšana**

Promocijas darbs

Dr.sc.ing. zinātniskā grāda iegūšanai

Promocijas darba izstrādi līdzfinansējis  
Eiropas Savienības Sociālais fonds



Promocijas darba zinātniskais vadītājs:

Dr.sc.ing., asoc. prof.  
**Ainārs Galiņš**

Promocijas darbu izstrādāja:

Mg.sc.ing.  
**Vitālijs Osadčuks**

**Jelgava  
2012**

## ANOTĀCIJA

**Osadčuks V. Autonomās kombinētās elektroapgādes vadības sistēmu modelēšana: promocijas darbs lauksaimniecības inženierzinātņu doktora (Dr.sc.ing.) zinātniskā grāda iegūšanai, Jelgava, LLU, 2012.** Kopējais darba apjoms 166 lpp., 17 tabulas, 102 attēli un 12 pielikumi. Promocijas darbā izmantoti 113 informācijas avoti.

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Lauksaimniecības universitātes Tehniskās fakultātes Lauksaimniecības Enerģētikas institūtā no 2007. gada septembra līdz 2012. gada janvārim.

**Zinātniskā darba mērķis:** izveidot autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas automātiskās vadības imitāciju modeļu kopu, kas dod iespēju novērtēt un pilnveidot vadības algoritmus atjaunojamo energoresursu izmantošanas efektivitātes paaugstināšanai lauku teritorijās.

### **Darba mērķa sasniegšanai izvirzīti un risināti sekojoši uzdevumi**

1. Izstrādāt metodiku autonomās kombinētās elektroapgādes automātiskās vadības algoritmu darbības modelēšanai.
2. Izstrādāt un eksperimentāli validēt līdzstrāvas kopnes spēka interfeisu, ģeneratoru un enerģijas uzkrājēju imitāciju modeļus.
3. Izstrādāt autonomās kombinētās elektroapgādes kompleksa un segmentu līmeņa automātiskās vadības sistēmas un modelēto iekārtu klašu programmatūras objektu modeli.
4. Izstrādāt līdzstrāvas kopnes un spēka interfeisu fizikālos modeļus samazinātā mērogā, ar kura palīdzību pārbaudīt automātiskās vadības sistēmas objektu modeļa darbību reāllaikā.
5. Aprobēt izstrādāto modeļu kopu lauksaimniecības objekta autonomās vēja, saules un iekšdedzes motora ģeneratora kombinētās elektroapgādes sistēmas simulācijā un analizēt automātiskās vadības algoritmu darbību pēc atjaunojamo resursu kombinētās izmantošanas efektivitātes kritērija.

### **Darbs ir strukturēts 4 nodaļās**

1. Nodaļā analizēta problemātika saistībā ar atjaunojamo resursu izmantošanu mikro mēroga autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmās lauku teritorijās un iespējamie risinājumi, izmantojot pilnveidotas enerģijas plūsmas vadības sistēmas, formulēta darba hipotēze mērķis un uzdevumi.
2. Nodaļā dota pētījumu struktūra, teorētiski izstrādāta metodika autonomās kombinētās elektroapgādes vadības algoritmu novērtēšanai, izstrādāti un eksperimentāli validēti galveno atjaunojamās enerģijas iekārtu imitāciju modeļi.
3. Nodaļā veikta izstrādātās metodikas un modeļu kopas eksperimentālā validācija.
4. Nodaļā izstrādāta metodika vadības algoritmu novērtēšanai aprobēta ar liellopu fermas autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas darbības simulāciju.

Pētījumu rezultātā ir apstiprinājies hipotēze, ka, izmantojot modelēšanas pieeju, kur controlleris ir reāla iekārta vai atsevišķa datorprogramma, un vadības objekts ir virtuāls vai fizikāls modelis, iespējams kontrolētos apstākļos pilnveidot esošos un izstrādāt jaunus kompleksa un segmentu līmeņa vadības algoritmus un stratēģijas konkrētajai autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas konfigurācijai.

## ANNOTATION

**Osadčuks V. Modelling of autonomous hybrid power supply control systems: Ph.D. thesis in agriculture engineering sciences, Jelgava, LUA, 2012.** The paper contains 166 p., 17 tables, 102 figures, 12 appendices and 113 references.

The doctoral thesis was designed in the Institute of Agricultural Energetics, Faculty of Engineering, Latvia University of Agriculture from September 2007 up to January 2012.

**The aim of the research is** to develop a set of simulation models of autonomous hybrid power control systems, which allow evaluating and improving control algorithms to increase the effectiveness of utilization of renewable energy sources in rural territories.

### **The main tasks of the research**

1. To develop methodology for simulating operation of energy flow control algorithms of autonomous hybrid power supply.
2. To develop and experimentally validate simulation models of direct current power interfaces, generators and accumulators.
3. To develop software object model of complex and segment level control software of autonomous hybrid power system and modeled equipment classification.
4. To develop physical models of direct current bus and power interfaces in reduced scale and to use them in verification of control system object model operation in real time.
5. To approbate the developed set of models in simulation of autonomous wind, photovoltaic and combustion motor generator hybrid power system of agricultural facility and to analyze operation of control algorithms with respect to effectiveness of combined resource utilization.

### **The paper consists of 4 chapters**

In chapter 1 problems related to use of renewable energy sources in micro scale autonomous hybrid power systems in rural areas, as well as possible solutions using control of improved energy flow are analyzed. In this chapter aim and tasks of the research are defined.

In chapter 2 structure of the research is given, methods for evaluation of autonomous hybrid power system control algorithms are designed, simulation models of the main types of renewable energy equipment are developed and validated experimentally.

In chapter 3 developed methods and set of models are validated experimentally.

In chapter 4 methods for evaluation of control algorithms were approbated with simulation of autonomous hybrid power system of a cattle farm.

The results of research prove true the hypothesis that by using modeling approach where controller is a real device or discrete software program and control object is a virtual or physical model, it is possible to improve existing and to develop new control algorithms and strategies of complex and segment level automation of autonomous hybrid power systems in a controlled environment.

# SATURS

Vispārīgā informācija .....	6
Attēlu saraksts .....	8
Tabulu saraksts .....	12
Pielikumu saraksts .....	13
Akronīmi un saīsinājumi .....	14
Programmatūras klašu nosaukumu skaidrojums .....	15
Apzīmējumi shēmās un formulās .....	16
Ievads .....	19
1. Situācijas apskats autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmās, to modelēšanā un automātiskajā vadībā .....	20
1.1. Atjaunojamo elektroenerģijas resursu izmantošanas problemātika autonomajā elektroapgādē .....	20
1.2. Kombinētās elektroapgādes tīklu apskats un klasifikācija .....	24
1.3. Tehnoloģiskās iekārtas atjaunojamo resursu kombinētās sistēmās .....	30
1.3.1. Ģeneratori .....	30
1.3.2. Enerģijas uzkrājēji .....	32
1.3.3. Spēka interfeisa iekārtas .....	34
1.4. Kombinēto elektroapgādes sistēmu automātiskā vadība .....	35
1.4.1. Kombinētās elektroapgādes automātiskās vadības hierarhiskā struktūra .....	35
1.4.2. Automātiskā vadība dalītajā elektroapgādē ar līdzstrāvas kopni .....	36
1.4.3. Kombinēto elektroapgādes sistēmu modelēšana .....	41
1.5. Automātiskās vadības kontūrs un tā daļu modelēšana un simulācija .....	44
1.5.1. HIL un SIL modeļi un simulācijas metodes .....	44
1.5.2. Vadības kontūra daļu modelēšana kombinētās elektroapgādes pētījumos .....	46
Situācijas apskata kopsavilkums, darba mērķis un uzdevumi .....	48
2. Autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas, tās vadības pētījumi un modeļu izstrāde .....	50
2.1. Autonomās kombinētās elektroapgādes un AVS modeļu izstrādes metodiskā struktūra .....	50
2.2. Autonomās kombinētas elektroapgādes sistēmas un vadības kontūra imitāciju modelis ar AVS interfeisu .....	51
2.2.1. Vienvirziena darbības spēka interfeisu modeļi .....	53
2.2.2. Elektrisko slodžu un divvirzienu darbības spēka interfeisu modeļi .....	58
2.2.3. Kombinētās elektroapgādes sistēmas imitāciju modeļa kopskats .....	63
2.2.4. AVS interfeisa realizācija .....	65
2.3. AVS objektu modelis .....	71
2.4. Galveno ģenerējošo un uzkrājošo iekārtu modeļi .....	75
2.4.1. Ķīmiskais akumulators .....	75
2.4.2. Iekšdedzes motora ģenerators .....	80
2.4.3. Fotoelektriskais ģenerators .....	88
2.4.4. Vēja ģenerators .....	97
2.4.5. Iekārtu modeļu kopskats .....	98
Nodaļas kopsavilkums un secinājumi .....	102
3. Modeļu kopas eksperimentāla validācija .....	104
3.1. Teorētisko modeļu salīdzināšana ar līdzstrāvas kopnes fizikālo modeli .....	104

3.1.1. Spriegumu pazeminošā līdzstrāvas pārveidotāja un tā kontrolera teorētiskais modelis .....	104
3.1.2. Spriegumu pazeminošā līdzstrāvas pārveidotāja un tā kontrolera fizikālais modelis.....	106
3.1.3. Eksperimentālais stends un eksperimentu veikšanas metodika.....	110
3.1.4. Automātiskās vadības kontūra darbības rezultāti SIL un HIL režīmā.....	112
3.2. Teorētisko modeļu salīdzināšana ar saules baterijas uzlādes kontrolera eksperimentālajiem mērījumiem .....	113
3.2.1. Eksperimentālais stends un eksperimentu veikšanas metodika.....	113
3.2.2. Rezultātu analīze un novērtējums .....	117
Nodaļas kopsavilkums un secinājumi .....	121
4. Autonomās kombinētas elektroapgādes sistēmas un AVS modeļa aprobācija.....	123
4.1. Ieejas datu apraksts .....	123
4.2. Simulācija ar līdzstrāvas kopnes un AVS modeļi .....	127
4.3. Rezultātu analīze un novērtējums.....	131
Nodaļas kopsavilkums un secinājumi.....	140
Secinājumi .....	142
Informācijas avoti .....	143
Pielikumi.....	150

## VISPĀRĪGĀ INFORMĀCIJA

**Darba izpilde:** pētījumi veikti laika posmā no 2007. gada līdz 2012. gadam Latvijas Lauksaimniecības universitātes Tehniskās fakultātes Lauksaimniecības Enerģētikas institūtā.

**Promocijas darba vadītājs:** Dr.sc.ing., asoc.prof. Ainārs Galiņš.

**Zinātniskā darba aprobācija:** dotajā laika posmā publicēti 8 zinātniskie raksti, no kuriem 6 ir vispāratzītos recenzējamos izdevumos. Par rezultātiem ziņots 6 starptautiskās zinātniskās konferencēs, kuras notika Latvijā, Grieķijā un Turcijā. Darba rezultāti izmantoti 2 zinātniskos projektos.

### Publikācijas vispāratzītos recenzējamos izdevumos

1. Osadčuks V., Galiņš A. (2007) Application of the object oriented approach in the research of autonomous power supply systems. **In:** *Engeneering for rural development: Proceedings of the 5th International Scientific Conference*. Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering, Jelgava 2007. pp. 64-69.
2. Osadčuks V., Galiņš A. (2008) Hardware-in-the-loop approach in the development of small-scale renewable energy based hybrid power systems. **In:** *Information and Communication Technologies in Bio and Earth Sciences: Proceedings of the 4th International Conference*. HAICTA, Athens 2008, Greece. pp. 48-53.
3. Osadčuks V., Galiņš A. (2009) Review of industrial communication networks in the control of small-scale autonomous power supply systems. **In:** *Research for rural development: Proceedings of Annual 15th International Scientific Conference*. Latvia University of Agriculture, Jelgava 2009. pp. 332-337.
4. Osadčuks V., Galiņš A. (2010) GIS based evaluation of renewable energy sources for small-scale electrical power grids. **In:** *Proceedings of the 5th International EGE Energy Symposium and Exhibition (IEESE-5)*. Pamukkale University, Denizli 2010, Turkey.
5. Pentjuss A., Ermuiza A., Arhipova I., Smits I., Osadcuks V. (2010) Improving the energy efficiency in dwelling buildings using multi-agents moduls. **In:** *Applied Information and Communication Technologies: Proceedings of the 4th International Scientific Conference*. Latvia University of Agriculture Faculty of Information Technologies, Jelgava 2010, Latvia. pp. 301-309.
6. Osadčuks V., Pecka A., Lojāns A. (2011) Hardware and software environment for evaluation of control algorithms and strategies of hybrid power systems. **In:** *Engeneering for rural development: Proceedings of the 10th International Scientific Conference*. Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering, Jelgava 2011, Latvia. pp. 311-316.

### Citas publikācijas

1. Osadčuks V., Galiņš A. (2006) The Real-time control system in combined electric power supply. **In:** *Information Technologies for Rural Development: Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to 5<sup>th</sup> anniversary of the Faculty of Information Technologies*. Latvia University of Agriculture, Jelgava 2006, Latvia. pp. 208-212.
2. Osadčuks V., Galiņš A. (2009) Implementation and evaluation of energy efficient artificial lightning control system. **In:** *Students on their way on science: Collection*

of abstracts from the 4th International Scientific Conference. Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering, Jelgava 2009, Latvia. p. 8.

### **Uzstāšanās starptautiskās zinātniskās konferencēs**

1. The Real-time control system in combined electric power supply. International Scientific Conference dedicated to 5<sup>th</sup> anniversary of the Faculty of Information Technologies “*Information Technologies for Rural Development*”, October 19-20, 2006, Jelgava, Latvia.
2. Application of the object oriented approach in the research of autonomous power supply systems. 5th International Scientific Conference “*Engeneering for rural development*”. May 24-25, 2007, Jelgava, Latvia.
3. Hardware-in-the-loop approach in the development of small-scale renewable energy based hybrid power systems. 4th International Conference on “*Information and Communication Technologies in Bio and Earth Sciences HAICTA*”. September 18-20, 2008, Athens, Greece.
4. Review of industrial communication networks in the control of small-scale autonomous power supply systems. 16th International Conference “*Research for rural development*”. May 20-22, 2009, Jelgava, Latvia.
5. GIS based evaluation of renewable energy sources for small-scale electrical power grids. “*The 5th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-5)*”, June 27-30, 2010, Denizli, Turkey.
6. Hardware and software environment for evaluation of control algorithms and strategies of hybrid power systems. 10th International Scientific Conference “*Engeneering for rural development*”. May 26-27, 2011, Jelgava, Latvia.

### **Citas konferences un semināri**

Pētījumu rezultātu prezentēšana seminārā “Gudro māju tehnoloģijas: apzinātās iespējas”. LU Matemātikas un Informātikas Institutā, 2008. gada 16. decembrī. Semināra organizatori: Ventspils augstskolas inženierpētniecības centrs, LLU TF Lauksaimniecības Enerģētikas institūts un SIA “Mikro dators”. Ziņojuma nosaukums: “Energoefektivitātes paaugstināšana ar “SmartHouse” tehnoloģijām. Apgaismes vadība ar M-bus”.

### **Dalība līgumdarbos**

1. LLU pētnieciskais projekts “Energoefektivitātes paaugstināšana ar SmartHouse tehnoloģijām”, Nr. XP134. Dalība projektā: 01.03.2008. – 31.12.2008.
2. ERAF projekts “Elektroenerģijas izmantošana privāto, personu spēkratos” vienošanās Nr.2010/0305/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/130”. Dalība projektā: 01.01.2011. – 31.08.2011.

Darbs akceptēts LLU Tehniskās fakultātes Lauksaimniecības Enerģētikas institūta paplašinātajā sēdē 2012. gada 21. februārī, protokols Nr. 4.

## ATTĒLU SARAKSTS

1.1. Atjaunojamo resursu sadalījums pēc kopējās jaudas pasaulē un ES 2009. gadā.....	21
1.2. Elektroapgādes sistēmu klasifikāciju pēc enerģijas avotu izvietojuma un veida .....	24
1.3. Dalītās ģenerēšanas un kombinētu sistēmu piemēri.....	25
1.4. Vispārīga dalītās ģenerēšanas sistēmas blokshēma: bultiņas norāda enerģijas plūsmas virzienu.....	26
1.5. Vairāku enerģijas veidu DGS un to pieslēgšana kopējiem elektriskajam, siltuma un aukstuma apgādes tīkliem.....	27
1.6. Tradicionālā un nākotnes elektroapgāde (pēc Bayod-Rujula, 2009) .....	27
1.7. Kombinētas elektroapgādes sistēmas elementu savstarpējo slēgumu biežāk lietotās arhitektūras (pēc Ortjohann, 2003).....	30
1.8. Superkondensatoru klasifikācija (pēc Hadjipaschalis et.al., 2009) .....	33
1.9. Dažādu ģeneratoru un patērētāju savienošana caur līdzstrāvas kopni ar spēka interfeisu palīdzību (pēc Chakraborty et.al., 2009) .....	35
1.10. Kombinēto elektroapgādes sistēmu automātiskās vadības hierarhiskā struktūra atbilstoši rūpniecisko objektu automatizācijas hierarhijai (pēc Кругляк, 2002) ..	36
1.11. Centralizētās līdzstrāvas kopnes autonomās elektroapgādes sistēmas un tās enerģijas plūsmas blokshēma .....	37
1.12. Reālu strāvas un sprieguma avotu paralēlā slēguma varianti (pēc Huang and Tse, 2007).....	38
1.13. Paralēlu sprieguma avotu slēgums ar strāvas dalīšanas regulatoru tīklu.....	38
1.14. Paralēlu sprieguma un strāvas avotu slēgums ar vedēja – sekotāja regulēšanu strāvas dalīšanai.....	39
1.15. Paralēlu strāvas avotu slēgums ar strāvas dalīšanas regulatoru tīklu un kopnes sprieguma regulēšanu .....	40
1.16. Automātiskās vadības kontūrs ar atgriezenisko saiti, tā modelis, spēka HIL modelis, kontrolera HIL modelis un SIL modelis.....	45
1.17. Spēka un kontrolera HIL simulācija.....	46
2.1. SIL un HIL metožu izmantošana centralizētās līdzstrāvas kopnes kombinētā elektroapgādes sistēmas AVS darbības novērtēšanai un testēšanai dažādos izstrādes posmos.....	51
2.2. Līdzstrāvas kopnes ekvivalentā shēma.....	52
2.3. Līdzstrāvas kopnes modeļa funkcionālā blokshēma .....	52
2.4. Sprieguma un strāvas avota funkcionālā blokshēma.....	53
2.5. Sprieguma un strāvas avoti ar ģeneratora jaudas ieeju.....	54
2.6. Līdzstrāvas pārveidotāja Simulink modelis ar konstantu lietderības koeficientu .....	54
2.7. Modelētā līdzstrāvas pārveidotāja izejas strāva no uzdotās strāvas .....	55
2.8. Spēka interfeisa modelis ar sprieguma regulētu strāvas avotu izejā un konstantu iekšējo pretestību .....	56
2.9. Līdzsprieguma barošanas avota shēma spēka interfeisa modeļu validācijai.....	57



2.10. Pārejas procesa simulācija.....	58
2.11. Slodze ar konstantu pretestību un ar konstantu jaudu .....	60
2.12. Divvzienu darbības spēka interfeisa modelis .....	61
2.13. Ideāla uzkrājēja modelis .....	62
2.14. Divu centrālo kopņu saslēgšanas koncepts ar divvzienu darbības spēka interfeisu modeļiem .....	62
2.15. Abstrakts līdzstrāvas kopnes modelis HPS0 ar spēka interfeisu, slodzi un ideālu uzkrājēju.....	63
2.16. Abstraktas sistēmas simulācijas rezultāti .....	64
2.17. AVS modeļa simulācijas vide, izmantojot SIL metodi .....	66
2.18. HPS0 modelis ar mainīgo vektoriem informācijas apmaiņai SIL režīmā.....	67
2.19. Metadatu faila fragments spēka interfeisam.....	67
2.20. HPS0 simulācijas konfigurācijas datu fails .....	68
2.21. SIL simulācija ar AVS interfeisu, signālu plūsma uz laika ass.....	70
2.22. Klase Matlab Simulink un .NET vides sasaistei .....	70
2.23. Izpildiekārtas klases instances (objekta) sasaiste ar reālu izpildiekārtu objektorientētajā AVS (pēc Коуд и.др., 1999) .....	71
2.24. Kombinētās elektroapgādes sistēmas iekārtu klašu semantiskas tīkls .....	73
2.25. “HardwareInterface” abstraktā klase un tās realizācijas .....	74
2.26. Akumulatora FIAMM FG20451 izlādes/uzlādes raksturlīknes .....	76
2.27. Ķīmiskā akumulatora funkcionālā shēma (pēc Battery. Implement generic..., 2011).....	77
2.28. Ķīmiskā akumulatora modelis.....	78
2.29. Akumulatora FIAMM FG20451 eksperimentāli uzņemtās un modelētās izlādes/uzlādes raksturlīknes .....	79
2.30. Akumulatora modelis ar jaudas izeju pieslēgšanai līdzstrāvas kopnei caur divvzienu darbības līdzstrāvas pārveidotāju .....	80
2.31. Svina-skābes akumulatora klase.....	80
2.32. Iekšdedzes motora ģenerators modelis.....	81
2.33. Degvielas patēriņa eksperimentā izmantotie ģeneratori.....	82
2.34. Eksperimentālais stends .....	83
2.35. Degvielas patēriņa eksperimentu rezultāti .....	85
2.36. Iekšdedzes motora ģenerators klase .....	87
2.37. Fotoelementa ekvivalentā shēma (pēc Chu and Chen, 2009) .....	88
2.38. Fotoelektriskā ģenerators modelis.....	90
2.39. Eksperimentāls saules baterijas panelis ar jaudu 1 W un saules baterijas panelis Kioto KPV 195 PE ar jaudu 195 W .....	90
2.40. Elektromagnētiskais saules starojums uz horizontālas virsmas $G_s$ , acs jutības empīriskais sadalījums $V_e(\lambda)$ un aproksimācija ar Gausa funkciju $V_m(\lambda)$ .....	91
2.41. Saules bateriju simulācijas un eksperimentālo mērījumu salīdzinājums eksperimentālajam 1 W un Kioto KPV 195 PE panelim .....	92
2.42. Perturbāciju un novērojumu algoritms MPPT kontrolera blokā .....	95
2.43. Fotoelektriskā ģenerators imitāciju modelis ar jaudas izeju .....	96

2.44. Fotoelektriskā ģenerators klase .....	96
2.45. Vēja ģenerators modelis ar vēja ātruma-izejas jaudas sakarību .....	97
2.46. Vēja ģenerators klase .....	98
2.47. HPS1 iekārtu slēgums .....	99
2.48. Slodžu un vēja ātruma grafiki .....	100
2.49. HPS1 slēgumam ekvivalents Simulink modelis.....	100
2.50. HPS1 simulācijas rezultāti.....	101
3.1. Līdzstrāvas kopnes fizikālā modeļa shēma .....	104
3.2. Kontrollera savienojums ar enerģijas avotu un līdzstrāvas kopni.....	105
3.3. Spriegumu pazeminošā pārveidotāja ciparu kontrollera teorētiskais modelis ....	106
3.4. Līdzstrāvas pārveidotāja “Buck1” funkcionālā blokshēma.....	107
3.5. “Buck1” kontrollera stāvokļu diagramma.....	108
3.6. “Buck1” un dažādu spēka interfeisu modeļu izejas regulēšanas pārejas process .....	109
3.7. “Buck1” un dažādu spēka interfeisu modeļu izejas regulēšanas pārejas process .....	109
3.8. “Buck1” līdzstrāvas pārveidotājs un releju bloks slodzes pakāpju regulēšanai .....	110
3.9. Eksperimentālais stends .....	110
3.10. SIL un HIL eksperimenta funkcionālā blokshēma un datu plūsmas.....	111
3.11. Eksperimentālā stenda Simulink modelis ar idealizētajiem spēka interfeisiem..	111
3.12. Fizikālā modeļa simulācijas rezultāti .....	112
3.13. Saules bateriju uzlādes kontrollera un akumulatora eksperimentālais stends .....	114
3.14. Saules baterijas uzlādes kontrollera eksperimentālā stenda slēguma shēma .....	114
3.15. PR3030 uzlādes kontrollera, saules baterijas, akumulatora un slodzes ekvivalentā modeļa shēma.....	117
3.16. Eksperimentāli uzņemtie, modelētie sistēmas mainīgie un kvadrātiskās kļūdas (diena, mainīgs mākoņu daudzums) .....	118
3.17. Eksperimentāli uzņemtie, modelētie sistēmas mainīgie un kvadrātiskās kļūdas (saulriets, mainīgs mākoņu daudzums).....	119
3.18. Eksperimentāli uzņemtie, modelētie sistēmas mainīgie un kvadrātiskās kļūdas (saulriets, skaidrs laiks).....	120
3.19. $U_{batt}$ un $I_{batt}$ signālu dinamikas salīdzinājums.....	121
4.1. Kopējā iekārtu jauda un elektroenerģijas patēriņš dienā 3 elektroapgādes variantiem, sagrupēts pa MPS “Vecauce” liellopu fermas objektiem.....	123
4.2. Vēja ātruma izmaiņas 2007. gada laikā Dobelē .....	124
4.3. Saules starojuma jaudas izmaiņas 2007. gada laikā Dobelē .....	125
4.4. Temperatūra 2007. gada laikā Dobelē.....	125
4.5. Meteoroloģisko datu laika rindas un slodzes profili atsevišķām dienām.....	126
4.6. Meteoroloģiskie dati un slodzes profili laika periodā 21.05. līdz 27.05.2007.....	126

4.7. Meteoroloģiskie dati un slodzes profili laika periodā 05.11. līdz 11.11.2007.....	127
4.8. Liellopu fermas autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas iekārtu slēgums .....	127
4.9. Liellopu fermas autonomās kombinētās elektroapgādes imitāciju modelis ar AVS interfeisu .....	128
4.10. Akumulatora cikliskās uzlādes algoritms.....	129
4.11. Modificētais slodzes sekošanas – cikliskās uzlādes algoritms.....	129
4.12. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 15.02.2007. akumulatora cikliskās uzlādes algoritmam.....	132
4.13. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 15.02.2007. modificētajam slodzes sekošanas algoritmam.....	133
4.14. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 21.03.2007. akumulatora cikliskās uzlādes algoritmam.....	134
4.15. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 21.03.2007. modificētajam slodzes sekošanas algoritmam.....	134
4.16. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 30.06.2007. akumulatora cikliskās uzlādes algoritmam.....	135
4.17. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 30.06.2007. modificētajam slodzes sekošanas algoritmam.....	135
4.18. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 03.11.2007. akumulatora cikliskās uzlādes algoritmam.....	136
4.19. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 03.11.2007. modificētajam slodzes sekošanas algoritmam.....	136
4.20. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 21.05.2007. – 27.05.2007. akumulatora cikliskās uzlādes algoritmam.....	138
4.21. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 21.05.2007. – 27.05.2007. modificētajam slodzes sekošanas algoritmam.....	138
4.22. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 05.11.2007. – 11.11.2007. akumulatora cikliskās uzlādes algoritmam.....	139
4.23. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 05.11.2007. – 11.11.2007. modificētajam slodzes sekošanas algoritmam.....	139

## TABULU SARAKSTS

1.1.	Plašāk izmantoto fotoelementu tehnoloģiju apkopojums .....	31
1.2.	Dalītā ģenerēšanā izmantoto uzkrāšanas tehnoloģiju kopsavilkums (pēc Hadjipaschalis et.al., 2009) .....	33
1.3.	Dažādu paralēlo līdzstrāvas avotu slēgumu priekšrocības un trūkumi (pēc Huang and Tse, 2007) .....	40
2.1.	Pārī slēgto divvirziena darbības spēka interfeisu vadības signālu patiesumvērtību tabula .....	62
2.2.	Modelēto līdzstrāvas kopnes iekārtu kopsavilkums .....	64
2.3.	Simulācijas procesā izmantotie Matlab mainīgie .....	69
2.4.	Komandu sistēma saziņai ar Simulink vidē modelētām iekārtām .....	75
2.5.	Ottomatora piedziņas ģeneratoru eksperimenta kļūdu aprēķinu rezultāti .....	85
2.6.	Regresijas modeļu kļūdu statistiskā analīze.....	86
2.7.	Eksperimentos izmantoto saules paneļu tehniskie dati .....	90
2.8.	Fotoelektriskā ģeneratora modeļa parametru optimizācija.....	94
2.9.	Kioto KPV 195 PE pases datu un modeļa izeju salīdzināšana raksturīgajos $UI$ un $P$ līknes punktos .....	94
2.10.	Modelēto iekārtu kopsavilkums.....	98
3.1.	Līdzstrāvas pārveidotāja “Buck1” komandu kopsavilkums .....	107
3.2.	Galvenās “Buck1” īpašības un funkcijas .....	108
3.3.	Stenda mērījumu kļūdu aprēķina rezultāti .....	116
4.1.	Kopējā maksimālā jauda vidējais diennakts elektroenerģijas patēriņš .....	124
4.2.	HPS2 sistēmas simulācijas rezultātu kopsavilkums atsevišķām dienām.....	136
4.3.	HPS2 sistēmas nedēļas simulācijas rezultātu kopsavilkums .....	140

## PIELIKUMU SARAKSTS

1.	Autonomās kombinētās elektroapgādes vadības programmatūras klašu diagramma .....	151
2.	Programmatūras klases “E1UnidirectConverter“, “E1BidirectConverter“, “E1Inverter“, “E1Heater“ un “E1IdealAccumulator“ .....	153
3.	IEC870 vedējiekārtas programmatūras klašu diagramma.....	155
4.	Akumulatora FIAMM FG20451 izlādes tabulas.....	156
5.	Vēja ģeneratora ECO-3000W izejas jaudas raksturlīkne .....	157
6.	Līdzstrāvas pārveidotāja “Buck1” elektriskā shēma .....	158
7.	Programmatūras klase “Buck1” .....	159
8.	Vadības programmas logs līdzstrāvas kopnes fizikālajam modelim.....	160
9.	Saules bateriju un akumulatora uzlādes kontrolera Steca PR3030 tehniskie dati .....	161
10.	MPS “Vecauce” tipa liellopu fermas elektroenerģijas patērētāju tabula .....	162
11.	Vēja ģeneratora Fuhrländer 100 kW izejas jaudas raksturlīkne.....	164
12.	Liellopu fermas autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas vadības simulācijas programmas koda fragmenti.....	165

## AKRONĪMI UN SAĪSINĀJUMI

ACP	analogciparu pārveidotājs
AS	atgriezeniskā saite
ASCII	American Standart Code for Information Interchange
AVS	automātiskā vadības sistēma
CIGRE	Council on Large Electric Systems – Starptautiskā Lielo Elektrisko Sistēmu padome
COM	Component Object Model – interfeiss informācijas apmaiņai starp procesiem Windows vidē
DGS	dalītā ģenerēšanas sistēma
ECDL	Electro-Chemical Double Layer – elektroķīmiskais dubulta slāņa superkondensators
EDS	elektrodzinējspēks
HARPSIM	Hybrid Arctic Remote Power Simulator – kombinēto sistēmu simulācijas un optimizācijas programma
HIL	Hardware In the Loop – modelēšanas un simulācijas metode, kur vadības kontūra posmi ir gan reālas iekārtas, gan virtuāli modeļi
HOMER	Hybrid Optimization Model for Electric Renewables – kombinēto sistēmu simulācijas un optimizācijas programma
ICSP	In-Circuit Serial Progamming – iekšshēmas virknes programmēšana
ICSP	In-Circuit Serial Progamming – iekšshēmas virknes programmēšana
IEA	World Energy Agency – Starptautiskā Enerģētikas aģentūra
IEC870	datu posma līmeņa ciparu tīklu standarts
IKT	informācijas un komunikācijas tehnoloģijas
KNX	tīklu protokols, pēc EN 50090, ISO/IEC 14543
MCU	Micro Controller Unit – mikrokontroleris
MIL	Hardware In the Loop – modelēšanas un simulācijas metode, kur vadības kontūrs veidots kā viens vesels modelis
MPPT	Maximum Power Point Tracking – saules bateriju maksimālās jaudas punkta sekošana
MPS	mācību pētnieciskā saimniecība
MPS	Mācību Pētnieciskā saimniecība
NREL	National Renewable Energy Laboratory –nacionālās atjaunojamās enerģētikas laboratorija (ASV)
OSI	Open Systems Interconnection – vairāklīmeņu modelis informācijas apmaiņai ciparu tīklos
P&O	Perturbation and Observation – perturbāciju un novērojumu algoritms
PC	Personal Computer – personālais dators
PID	proporcionālais integrālais diferenciālais regulators
PLC	Programmable Logic Controller – programmējams loģiskais kontroleris
RS485	virknes datu apmaiņas standarts
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition – augstākā līmeņa vadības un datu uzkrāšanas sistēmas

SIL	Software In the Loop – modelēšanas un simulācijas metode, kur atsevišķi vadības kontūra posmi ir virtuāli modeļi dažādās vidēs
USB	Universa Serial Bus – universāla virknes kopne
VTB	Virtual Test Bed – dinamiskās simulācijas vide
XML	Extensible Markup Language – paplašināma iezīmju valoda

## PROGRAMMATŪRAS KLAŠU NOSAUKUMU SKAIDROJUMS

<i>HardwareInterface</i>	aparatūras interfeiss
<i>HybridPowerSystem</i>	kombinētā elektroapgādes sistēma
<i>Device</i>	iekārta
<i>PowerDevice</i>	spēka iekārta
<i>EnergyStorage</i>	vispārīgs enerģijas uzkrājējs
<i>ElectricLoad</i>	vispārīgs elektriskā slodze
<i>PowerInterface</i>	vispārīgs spēka interfeiss
<i>WindGenerator</i>	vispārīgs vēja ģenerators
<i>PhotoVoltaic</i>	vispārīga fotoelektriskā saules baterija
<i>EILeadAcid</i>	svina skābes akumulators
<i>EIWindG</i>	vēja ģenerators
<i>BackUpGenerator</i>	vispārīgs fosilās degvielas ģenerators
<i>EIPhotoV</i>	fotoelektriskā saules baterija
<i>EIIdealAccumulator</i>	ideāls uzkrājējs
<i>KR100</i>	releju bloks
<i>Buck1</i>	spriegumu pazeminošais līdzstrāvas pārveidotājs
<i>EIHeater</i>	sildītājs
<i>EIFuelG</i>	dīzeļģenerators
<i>EIInverter</i>	sprieguma invertors
<i>EIUnidirectConverter</i>	vienvirziena darbības spēka interfeiss
<i>EIBidirectConverter</i>	divvirzienu darbības spēka interfeiss
<i>MBusInterface</i>	datu apmaiņas interfeiss pēc IEC870 protokola
<i>HPSimInterface</i>	datu apmaiņas interfeiss ar Matlab Simulink
<i>COMPortInterface</i>	datu apmaiņas interfeiss ar virknes portu ASCII kodā
<i>Voltmeter</i>	vispārīgs voltmeters
<i>Ammeter</i>	vispārīgs ampērmeters
<i>PowerMeter</i>	vispārīgs vatmeters
<i>EnergyMeter</i>	vispārīgs elektroenerģijas skaitītājs
<i>Anemometer</i>	vispārīgs anemometrs
<i>Pyrometer</i>	vispārīgs pirometrs
<i>FuelMeter</i>	vispārīgs degvielas tilpuma mērītājs
<i>Thermometer</i>	vispārīgs termometrs

## APZĪMĒJUMI SHĒMĀS UN FORMULĀS

$A_b$	akumulatora eksponenciālais sprieguma faktors	$i_{batt}$	akumulatora strāvas signāls
$A_D, B_D$	diodes idealitātes faktori	$I_{batt}$	akumulatora strāva
$B_b$	akumulatora eksponenciālais strāvas faktors	$I_{bus}$	līdzstrāvas kopnes
$C_A$	akumulatora maksimālās uzlādes strāvas koeficients	$I_{chmax}$	maksimālā uzlādes strāva
$C_{dc}$	līdzstrāvas kopnes kapacitāte	$I_D$	diodes strāva vadāmības virzienā
$C_f$	degvielas tilpums	$I_{dc}$	summārā līdzstrāvas kopnes strāva
$C_{finit}$	sākotnējais degvielas tilpums	$I_{dch}$	izlādes strāva
$C_{fmax}$	maksimālais degvielas tilpums	$I_{dchmax}$	maksimālā izlādes strāva
$C_p$	vēja izmantošanas koeficients	$I_G$	avota strāva
$E_0$	nominālais EDS	$I_{Gmax}$	maksimālā ģenerators strāva
$E_{batt}$	akumulatora elektrodzinējspēks	$I_{Li}$	slodzes strāva
$e_k$	procesa regulēšanas kļūda	$I_{load}$	slodzes strāva
$FF$	fotoelementa piepildījuma faktors	$I_{max}$	maksimālā strāva
$f_k$	procesa mainīgais k-tajā ciklā	$i_o$	izejas strāvas signāls
$G_a$	apgaisojuma intensitāte	$I_{oumax}$	maksimālā izejas strāva
$G_{ar}$	apgaisojuma intensitāte standarta apstākļos	$I_{out}$	izejas strāva
$G_r$	kopējais redzamais starojums	$I_{outmin}$	minimālā izejas strāva
$G_{Rmax}$	maksimālais redzamais gaismas starojums	$I_P$	strāva paralēlajā pretestībā
$G_s(\lambda)$	elektromagnētiskais saules starojums kā funkcija no viļņa garuma	$I_{Ph}$	gaismas ietekmes rezultātā radītā fotostāva vienam fotoelementam
$I$	strāva	$I_{PV}$	fotoelementu moduļa izejas strāva
$i$	strāvas signāls	$i_r$	strāvas regulēšanas signāls
$I'_G$	avota strāva bez ģenerators primārā resursa jaudas ierobežojuma	$I_{rs}$	diodes piesātinājuma strāva bloķēšanas virzienā
$I_0$	moduļa piesātinājuma strāva	$I_{SC}$	īsslēguma strāva
		$I_{SCr}$	īsslēguma strāva standarta apstākļos
		$I_{SCr}$	fotoelementu moduļa īsslēguma strāva standarta apstākļos
		$K$	polarizācijas spriegums (sprieguma kritums pie slodzes)
		$K^2$	kvadrātiskā kļūda
		$K_i$	strāvas temperatūras koeficients



$k_{lux \rightarrow W/m^2}$	redzamā – pilnā saules starojuma pārrēķina koeficients	$p_r$	jaudas regulēšanas signāls
$K_{max}$	maksimālā kļūda	$P_s$	iekārtas pašpatēriņa jauda
$K_{min}$	minimālā kļūda	$P_S$	saules bateriju stacijas jauda
$K_p, K_i, K_d$	proporcionālā, integrālā un diferenciālā koeficienta skaitītājs	$P_{tot}$	kopējā jauda
$K_{pD}, K_{iD}, K_{dD}$	proporcionālā, integrālā un diferenciālā koeficienta saucējs	$P_V$	vēja stacijas jauda
$K_{vid}$	vidējā kļūda	$Q$	kapacitāte
$m$	masa	$Q_c$	degvielas patēriņš
$Mode$	iekārtas darba režīma signāls	$Q_{cwu}$	degvielas patēriņš iesilšanas laikā
$MPPT_{ts}$	MPPT kontrolera diskretizācijas frekvence	$Q_{cwup}$	degvielas patēriņa pieaugums iesilšanas laikā
$MPPT_{vb}$	MPPT kontrolera pastiprinājuma koeficients	$Q_{in}$	ieplūstošais daudzums
$MPPT_{vi}$	MPPT kontrolera sākuma stāvoklis	$R$	pretestība
$N_{batt}$	saules paneļu skaits	$R^2$	determinācijas koeficients
$N_p$	skaits paralēli	$R_i$	iekšējā pretestība
$N_s$	skaits virknē	$R_{ich}$	iekšējā pretestība uzlādei
$Off$	vadības signāls “izslēgt”	$R_{idch}$	iekšējā pretestība izlādei
$On$	vadības signāls “ieslēgt”	$R_{ii}$	strāvas avota iekšējā pretestība
$P_{chmax}$	maksimālā uzlādes jauda	$R_{iu}$	sprieguma avota iekšējā pretestība
$P_{dchmax}$	maksimālā izlādes jauda	$R_l$	slodzes pretestība
$P_{el}$	elektriskā jauda	$R_p$	paralēlā pretestība
$P_{exc}$	nepatērētā jauda	$R_s$	virtnes pretestība
$P_{excG}$	nepatērētā ģenerators jauda	$R_{vid}$	vidējā relatīvā kļūda
$P_{excS}$	nepatērētā saules bateriju stacijas jauda	$S$	laukums
$P_{excV}$	nepatērētā vēja stacijas jauda	$SDC$	akumulatora pašizlāde
$P_G$	pieejamā ģenerators jauda	$SOC$	uzlādes līmenis
$P_{in}$	ieejas jauda, slodzes jauda	$SOC_{init}$	sākuma uzlādes līmenis
$P_{load}$	slodzes jauda	$T$	temperatūra
$P_{loadtot}$	kopējā jauda	$T_n$	simulācijas periods
$P_{los}$	zudumu jauda	$T_r$	temperatūra standarta apstākļos
$P_{max}$	maksimālā jauda	$T_r$	temperatūra standarta apstākļos
$P_{maxr}$	maksimālā jauda standarta apstākļos	$t_{sim}$	simulācijas laiks
$P_{nom}$	nominālā jauda	$T_{wu}$	iesilšanas laiks
$P_{out}$	izejas jauda	$U$	spriegums
		$u$	sprieguma signāls
		$U_{batt}$	akumulatora spriegums
		$U_{battmax}$	maksimālais akumulatora spriegums
		$U_{battmin}$	minimālais akumulatora spriegums
		$U_{che}$	uzlādes beigu spriegums

$u_{cr}$	kompensējošā sprieguma regulēšanas signāls	$U_{outmin}$	minimālais izejas spriegums
$U_D$	diodes sprieguma kritums vadāmības virzienā	$U_{PV}$	fotoelementu moduļa izejas spriegums
$U_{dc}$	līdzstrāvas kopnes spriegums	$u_r$	sprieguma regulēšanas signāls
$u_{dc}$	līdzstrāvas kopnes sprieguma signāls	$U_{SCR}$	fotoelementu moduļa atvērtas ķēdes spriegums
$U_{dcaxt}$	maksimālais līdzstrāvas kopnes spriegums	$V(\lambda)$	standarta apstākļos cilvēka acs spektrālās jutības koeficients pie dotā viļņa garuma
$U_{dcmin}$	minimālais līdzstrāvas kopnes spriegums	$v_{nom}$	nominālais vēja ātrums
$u_{dcr}$	līdzstrāvas kopnes sprieguma regulēšanas signāls	$W_{exc}$	nepatērētā enerģija
$u_e$	sprieguma kļūdas signāls	$W_{tot}$	kopējā enerģija
$U_{in}$	ieejas spriegums	$F_c, F_a, F_p, F_t$	kontroltera, izpildiekārtas, objekta un sensora pārvades funkcijas
$U_{init}$	sākuma spriegums	$x_a$	izpildiekārtas iedarbes signāls
$U_{inmax}$	maksimālais ieejas spriegums	$x_c$	vadības iedarbes signāls
$U_{inmin}$	minimālais ieejas spriegums	$x_p$	regulējamā parametra stāvoklis
$u_k$	vadības iedarbe k-tajā ciklā	$x_r$	regulējošais signāls
$U_{max}$	maksimālais spriegums	$x_t$	atgriezeniskās saites signāls
$U_{OC}$	atvērtās ķēdes spriegums	$\eta$	lietderības koeficients
$U_{OCr}$	atvērtās ķēdes spriegums standarta apstākļos	$\lambda$	viļņa garums
$U_{oumaxt}$	maksimālais izejas spriegums	$\rho_f$	degvielas blīvums
$U_{out}$	izejas spriegums	$\sigma$	standartnovirze
		$\tau$	laika konstante

## IEVADS

Pēc Eiropas Vides aģentūras atzinuma Eiropas Savienībai un Latvijai ir raksturīga ievērojama atkarība no pašmāju un aizrobežu dabas kapitāla un ekosistēmām (State of the environment..., 2010). Viens no veidiem energoneatkarības paaugstināšanai ir lokāli pieejamo atjaunojamo resursu izmantošana.

2009. gadā pēc Eurostat datiem (Share of renewable..., 2011) Latvijā aptuveni 34.3 % patērētās enerģijas tika iegūta no atjaunojamajiem resursiem, kas ir trešais labākais rādītājs Eiropā pēc Zviedrijas un Somijas pie vidējā ES rādītāja 11.7 %. Latvijā patērētās atjaunojamās elektriskās enerģijas daļa ir 38.7 %. Tomēr kopējais valsts enerģijas pašnodrošinājums ir tikai 29.6 % (Latvijas enerģētika skaitļos..., 2009). Saskaņā ar Latvijas ilgtspējīgas attīstības stratēģiju (Latvijas ilgtspējīgas attīstības..., 2010) līdz 2030. gadam viens no valsts mērķiem ir energoresursu pašnodrošinājuma paaugstināšana, izmantojot atjaunojamās enerģijas resursus un uzlabojot energoefektivitāti. Šī mērķa sasniegšanai izvirzītie uzdevumi ir atjaunojamo energoresursu avotu un piegādes maršrutu diversifikācija, kā arī inovācijas un pētniecība atjaunojamās enerģētikas jomā.

Lokāli pieejamie atjaunojamie enerģijas resursi dod iespēju veidot autonomās jeb pašpietiekamās elektroapgādes sistēmas. Autonomās elektroapgādes sistēmas tiek izmantotas gadījumos, kad nav pieejams elektriskais tīkls, pieslēguma jauda ir nepietiekama un pieslēguma izbūve vai modernizācija nav ekonomiski pamatota. Ja ir ierobežota atjaunojamo resursu pieejamība laikā (neregulārs vēja ātrums un saules starojums), vairāki resursi tiek kombinēti vienā autonomā sistēmā un izmantoti kopā ar ķīmiskajiem akumulatoriem, fosilo resursu ģeneratoriem un perspektīvām enerģijas uzkrāšanas iekārtām: spararatiem, ūdeņraža iekārtām, superkondensatoriem u.c.

Neregulārs un grūti prognozējams slodzes jaudas sadalījums diennakts laikā un sezonāli ir īpaši raksturīgs lauksaimniecības kompleksiem, piemēram, saimniecībām, kuras specializējas uz bioloģiskiem procesiem: piena un gaļas liellopu, cūku, sīkdzīvnieku audzēšanu, siltumnīcām ar automatizētu augu laistīšanu un mēslošanu u.c. Pareiza enerģijas plūsmas pārdales stratēģija starp neregulāri pieejamiem atjaunojamiem un fosilajiem resursiem, akumulatoru lādēšanu un slodzi hipotētiski ļautu efektīvāk izmantot pieejamos resursus, samazināt dīzeļģeneratora darbības laiku un nodrošināt nepārtrauktu elektroenerģijas padēvi patērētājam.

Eiropas Kopienų komisijas paziņojumā "Energoefektivitātes paaugstināšana ar informācijas un sakaru tehnoloģijām" (Briselē, 13.5.2008, COM(2008)) informācijas un komunikācijas tehnoloģijas (IKT) tiek minētas kā līdzeklis visu tautsaimniecības nozaru energoefektivitātes paaugstināšanai. IKT apakšnozares ir datorvadība, sistēmu analīze un modelēšana, kas aizvien plašāk tiek izmantotas tehnoloģisko procesu efektivitātes paaugstināšanai gan tradicionālajā elektroenerģijas ražošanā un elektroapgādē un sadalē, gan arī elektroenerģijas iegūšanā no atjaunojamajiem resursiem. Viens no IKT virzieniem ir autonomu kombinēto jeb hibrīdo atjaunojamo resursu elektroapgādes sistēmu automātiskās vadības pētījumi, modelēšana un praktiska realizācija. Tiek apsvērtas arī tādu IKT sniegto iespēju izmantošana, kā meteoroloģiskās prognozes izmantošana atjaunojamo resursu jaudas prognozēšanai, sistēmas pielāgošanās lietotāja profilam, izmantojot mākslīgā intelekta elementus, piedalīšanās brīvajā enerģijas tirgū u.c.

Promocijas darbs ir starpdisciplinārs, iekļauj IKT un atjaunojamās enerģētikas nozares tematiku un risina jautājumus saistībā ar individuālu mājsaimniecību un lauksaimniecības ražotņu mikro mēroga autonomo kombinēto elektroapgādi.

# 1. SITUĀCIJAS APSKATS AUTONOMĀS KOMBINĒTĀS ELEKTROAPGĀDES SISTĒMĀS, TO MODELĒŠANĀ UN AUTOMĀTISKAJĀ VADĪBĀ

Atjaunojamās enerģētikas aktualitāte un izmantošanas nozīmīgums tautsaimniecībā saistībā ar fosilo resursu pastiprinātu patēriņu un ar to saistītām ekoloģiskām un ekonomiskām sekām ar laiku tikai palielinās. Pēc Starptautiskās Enerģētikas aģentūras (IEA) 2010. gada Pasaules Enerģētikas pārskata (World Energy Outlook, 2010) prognozētais kopējais visu veidu primāro enerģijas avotu patēriņš, ieskaitot atjaunojamos resursus, no 2008. līdz 2035. g. pieaugs par 27 % (no 12271 līdz 16748 milj. t. naftas ekvivalentā). Pie tam vislielākais pieaugums tiek prognozēts kodolenerģijai (2.2 % gadā) hidroenerģijai (2 % gadā), biomasai un enerģētiskajiem atkritumiem (1.7 % gadā) u.c. veida atjaunojamajiem resursiem, tajā skaitā, saules un vēja enerģijai (7.9 % gadā). Elektroenerģijas patēriņa pieaugums šajā pašā periodā pie pašreizējās patēriņa politikas tiek prognozēts 49 % līmenī (no 16819 TWh 2008. g. uz 32922 TWh 2035. g.). Turklāt, pēc ANO uzstādījuma par siltumnīcas efektu izraisošo gāzu koncentrāciju atmosfērā saglabāšanu 450 ppm (0.045 %) līmenī CO<sub>2</sub> ekvivalentā, enerģijas patēriņš līdz 2035. g. būtu jā saglabā 27629 TWh robežās.

Viens no veidiem energoapgādes drošības un pašnodrošinājuma paaugstināšanai ir panākt lielāku lokālo atjaunojamo resursu izmantošanas daļu. Neapstrīdami, ka atjaunojamo resursu ieviešanai jābūt aktuālai ne tikai fosilo resursu taupīšanas un ekoloģiskās situācijas uzlabošanas ziņā, noteicošs ir arī ekonomiskais faktors.

Atjaunojamo resursu izmantošanas nozīmību parāda valsts atbalsta programmas un investīcijas gan ģenerējošo jaudu paplašināšanai, gan arī zinātniskajos pētījumos. Pēc 2010. gada Pasaules Enerģētikas pārskata (World Energy Outlook, 2010) kopumā atjaunojamo resursu tehnoloģijās laika periodā 2010-2035. gadam paredzēts investēt 5704 milj. USD pēc 2009. gada cenām, ja gada vidējais enerģijas patēriņa pieauguma temps būs 1.2 % robežās. Pašreizējais patēriņa pieauguma temps ir 1.4 %, bet pēc scenārija, kas paredz atmosfēras CO<sub>2</sub> līmeņa noturēšanu 0.045 % robežās, enerģijas patēriņa pieaugums nedrīkst pārsniegt 0.7 %. Absolūtajos skaitļos vislielākie plānotie ieguldījumi atjaunojamajā enerģētikā ir ES un Ķīnā, pārsniedzot 1200 milj. USD.

Tomēr ir jāņem vērā, ka mūsdienu atjaunojamās enerģijas tehnoloģijas, izņemot lielos HES un vēja parkus atsevišķos klimatiski labvēlīgos reģionos, vēl nespēj nodrošināt pietiekošu jaudas blīvumu, kas ir nepieciešams energoietilpīgiem rūpnieciskiem, pilsētu mikrorajoniem, sabiedriskā transporta komunikācijām u.c. objektiem un tādējādi aizvīdot tradicionālos fosilos resursus un atomenerģiju. Pie tam no atjaunojamajiem resursiem pieejamā enerģija ir nevienmērīgi sadalīta laikā.

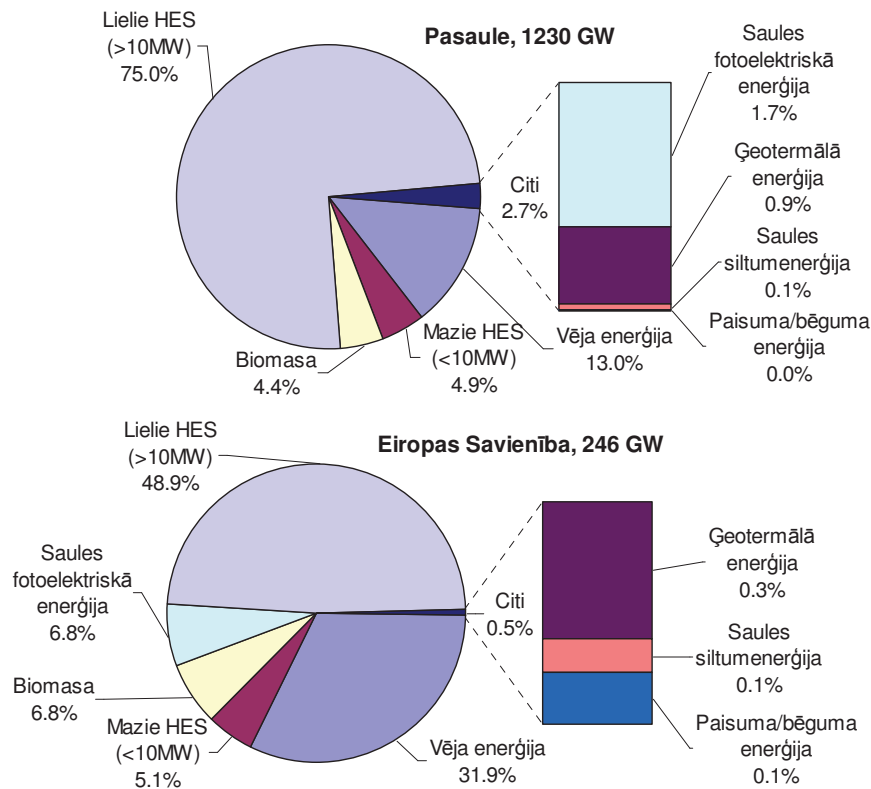
Šajā nodaļā apskatīta problemātika, pašreizējie risinājumi un datormodelēšanas pielietojums saistībā ar atjaunojamo resursu ģeneratoru un uzkrājēju izmantošanu autonomā kombinētā elektroapgādes sistēmā un to automātisko vadību.

## 1.1. Atjaunojamo elektroenerģijas resursu izmantošanas problemātika autonomajā elektroapgādē

Atjaunojamo enerģiju bieži saista ar jēdzienu “alternatīvā enerģija”. Atjaunojamās alternatīvas enerģijas un tās ieguves avotu būtību skaidro vairākas definīcijas. “Atjaunojamās enerģijas avots ir ilgtspējīgs un tīrs enerģijas avots, kas atjaunojas dabiskā veidā” (Huang and Wu, 2007). “Atjaunojamā alternatīvā ir enerģija, kas netiek plaši lietota un pretstatā fosilajai tiek iegūta no atjaunojamiem dabiskajiem resursiem”

(Glossary of Environmental..., 2007). “Par atjaunojamajiem alternatīvās enerģijas avotiem ir uzskatāmi vējš, ūdens plūsma, saules starojums un biomasas, kuri neatstāj tādu negatīvu iespaidu uz apkārtējo vidi kā tas ir fosilo kurināmo gadījumā” (Thomson Nelson glossary, 2007). Tāpat tiek minēti arī avoti, kas netiek plaši izmantoti ģeogrāfisko un sezonālo apstākļu dēļ: paisuma – bēguma un ģeotermālā enerģija (geizeri, zemes dzīļu siltums). Dažos gadījumos pie alternatīvās tiek pieskaitīta arī kodolenerģija, kura pēc būtības nav atjaunojama un jaunie enerģijas ieguves veidi, tādi kā ūdeņraža, kodoltermiskā (kodolsintēze) u.c. Atjaunojamo resursu sadalījums enerģētikā visiem enerģijas veidiem pēc kopējās ģenerētās jaudas ES un pasaulē parādīts 1.1. att.

Plašāk izplatītie un mūsdienās vislabāk apgūtie atjaunojamās enerģijas avoti pēc lielajiem HES ir vējš un saule. Ģenerējušo jaudu palielināšanai un ar vēja un saules enerģētiku saistītos pētījumos tiek novirzītas ievērojamas investīcijas. Pēc 2010. gada Pasaules Enerģētikas pārskata (World Energy Outlook, 2010) datiem saules un vēja enerģijas attīstībā tiek ieguldīts attiecīgi 53 % un 16 % no kopējā pasaules atjaunojamās enerģētikas pētniecībai piešķirtā finansējuma.



1.1. att. Atjaunojamo resursu sadalījums pēc kopējās jaudas pasaulē un ES 2009. gadā

Avots: REN21, Renewables 2010 Global Status Report. Parīzē, 2010

No definīcijām izriet galvenās priekšrocības elektroenerģijas ieguvei no atjaunojamajiem avotiem: resursi agrāk vai vēlāk atjaunojas dabiskā ceļā un tie ir brīvi pieejami. Kapitālieguldījums saistās galvenokārt tikai ar ieguves aprīkojuma uzstādīšanu un uzturēšanu.

Svarīgākie trūkumi ir atsevišķu resursu veidu nepastāvīga pieejamība telpiski un atkarībā no laika, kas apgrūtina atjaunojamo resursu elektroapgādes sistēmu veiktspējas novērtēšanu, optimizāciju un vadību (Georgilakis and Katsigiannis, 2009). Pie

trūkumiem ir minami arī sistēmu relatīvi lielās ierīkošanas izmaksas un zemas kopējais sistēmas lietderības koeficients, kas saistās gan ar procesa tehnoloģiskajām nepilnībām, gan arī ar principiāliem ierobežojumiem. Piemēram, Betca (Betz) kritērijs vēja enerģijas izmantošanā (Klemen, 2001), pēc kura vēja ģeneratoram nav iespējams simtprocentīgi izmantot pieejamo gaisa plūsmas enerģiju, jo tādējādi plūsma turbīnā faktiski tiek apturēta un vējš apiet ģeneratoru kā šķērslī, tāpat vēja enerģija netiek izmantota, ja gaisa plūsma turbīnā ir brīva. Optimālais vēja enerģijas izmantošanas sliekšnis starp plūsmas apiešanu ap turbīnas darba virsmām un iedarbību uz tām ir 59.6 %, kas arī ir maksimāli pieejamā gaisa plūsmas enerģija.

Savukārt fotoelektrisko elementu lietderības robeža pie standarta saules spektra un starojuma jaudas  $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , ja netiek lietoti koncentrējoši spoguļi vai lēcas, ir aptuveni 33 % (Markvart and Castaner, 2005).

Praktiski visi mūsdienās izmantojamie atjaunojamie resursi, to atjaunošanās laiks un pieejamība ir tieši atkarīgi no sezonālītātes un klimatiskajiem apstākļiem konkrētā reģionā. Ir grūti nodrošināt elektroenerģijas patērētāju, lietojot tikai viena veida atjaunojamus resursus. Īpaši tas izpaužas pie elektroģeneratoru skaita un jaudas ziņā nelielām autonomām sistēmām ar slodzes jaudu līdz 50 kW ar patēriņa svārstībām salīdzināmām ar maksimālo ģenerējošo jaudu. Piemēram, vēja enerģijas izmantošanas gadījumā vēja ātruma svārstības no bezvēja līdz maksimāli pieļaujamajam izraisa plaša diapazona svārstības vēja turbīnas jaudai un saražotās elektroenerģijas apjomam. No otras puses ir svārstības slodzē. Piemēram, vēja ģeneratoram ar nominālo jaudu 3 kW pieslēdzot 1000 W patērētāju (ūdens sildītājs, elektromotors), pieprasījuma pieaugums ir 30 % no nomināli pieejamās jaudas.

Līdz ar to rodas nepieciešamība kombinēt vairākus savstarpēji papildinošus atjaunojamās enerģijas avotus, filtrējošus elementus – akumulatorus un pastāvīgi pieejamus avotus, kuri izmanto uzkrātu fosilo vai biodegvielu, piemēram, dīzeļģenerators vai ģenerators, kura piedziņai izmanto ar gāzi darbināmu iekšdedzes dzinēju.

Praksē tiek ieviesti dažādi kombinēti risinājumi jeb hibrīdās elektroapgādes sistēmas, kurās izmanto uzreiz vairākus atjaunojamus avotus. Papildus ģeneratoram, patērējot ierobežotu daudzumu degvielas, spēj nodrošināt laikā ierobežotu elektroenerģijas padevi sistēmā, visiem atjaunojamajiem avotiem esot nepieejamiem vai tiem strādājot ar pazeminātu jaudu. Akumulatori tiek izmantoti enerģijas uzkrāšanai, kad atjaunojamie resursi spēj dot vairāk jaudas nekā sistēma patērē, kā arī īslaicīgu svārstību slāpēšanai un darbības stabilitātes nodrošināšanai. Visu šo iekārtu darbības saskaņošana ar mainīgu slodzi, ģenerētās, uzkrātās un patērētās jaudas plūsmas vadība ir galvenais kombinētās elektroapgādes automātiskās vadības sistēmas (AVS) uzdevums.

Pētījumos ir pierādīties, ka autonomas kombinētas elektroapgādes sistēmas parasti izmaksā lētāk un ir drošākas par tikai vienu resursu izmantojošām sistēmām (Celik, 2001, Asharia et al., 2001). Biežāk lietotās kombinācijas ir fotoelektriskās baterijas, vēja ģeneratori un akumulatori vai fotoelektriskās baterijas, dīzeļģeneratori un akumulatori (Bernal-Agustin and Dufo-Lopez, 2007).

Neskatoties uz minētajām problēmām, ir situācijas, kad uz alternatīviem atjaunojamajiem resursiem balstītas autonomas sistēmas ierīkošana ir vienīgais tehniski iespējamais risinājums vai arī ir ekonomiski pamatotāks nekā pieslēgšanās kopējam elektriskajam tīklam. Īpaši tas ir raksturīgi lauku teritorijām, kur ir nepieciešams ierīkot elektrotīkla pieslēgumu vai palielināt tā jaudu.

Pēc AS “Sadales tīkls” 2010. gada sadales sistēmas būvdarbu vidējām faktiskajām izmaksām gaisvadu līniju izbūve atkarībā no vadu veida izmaksā 12383 –

14003 LVL·km<sup>-1</sup>, bet kabeļu līnijas lauku apvidos bez cietā ielas seguma – 26506 LVL·km<sup>-1</sup>. Balsta tipa transformatoru apakšstaciju vidējās izbūves izmaksas atkarībā no balsta veida un jaudas ir 4802 – 6801 LVL, bez PVN (2010. gada sadales sistēmas būvdarbu vidējās., 2010). Pie tam izbūves izmaksām ekonomisko procesu un inflācijas ietekmē ir tendence pieaugt. Apskatīto izmaksu pozīciju izmaksu pieaugums, salīdzinot ar 2006. gadu vidēji ir 26 % (2006. gada sadales sistēmas būvdarbu vidējās., 2006). Pie tam ir projekta plānotajā periodā ir jāierēķina elektroenerģijas tarifs.

Ņemot vērā atjaunojamo resursu galveno priekšrocību – brīvu primārā enerģijas avota pieejamību, atjaunojamās elektroapgādes sistēmas izmaksas saistās pamatā ar sākotnējiem ieguldījumiem: iekārtu iegādi un uzturēšanu. Pēc Starptautiskās Enerģētikas aģentūras fotoelektrisko tehnoloģiju attīstības prognozēm (Solar Photovoltaic Roadmap, 2010) saules bateriju sistēmas kopējās instalācijas izmaksas individuāliem dzīvojamajiem objektiem, salīdzinot ar 6000 USD·kW<sup>-1</sup> 2010. gadā, samazināsies līdz 1200 USD·kW<sup>-1</sup> 2050. gadā, bet elektroenerģijas ražošanas sektorā izmaksas samazināsies līdz 800 USD·kW<sup>-1</sup>. Tāpat tiek prognozēta saules bateriju efektivitātes paaugstināšanās. Tradicionālajām monokristālu un polikristālu silīcija baterijām 2050. gadā līdz 25 % un 21 % attiecīgi, bet koncentrējošus spoguļus vai lēcas izmantojošām iekārtām – līdz 40 %. Iekārtu maksimālais kalpošanas laiks ir 30 gadi.

Vēja enerģētikas iekārtu uzstādīšanas izmaksu kritums netiek prognozēts tik straujš: 2030. gadā instalācijas izmaksas samazināsies līdz 790 EUR·kW<sup>-1</sup> pie pašreizējām cenām aptuveni 1000 EUR·kW<sup>-1</sup> (Zervos and Kjaer, 2009).

Tāpat pastāvīgi tiek attīstītas jau esošās un izstrādātas jaunas enerģijas uzkrāšanas tehnoloģijas, kuras ir tieši izmantojamas elektroapgādes sistēmās: ķīmiskie akumulatori, spara rati, superkondensatori, ūdeņraža tehnoloģijas, pneimatiskā un ar masu potenciālās enerģijas uzkrāšanu saistītās tehnoloģijas (Hadjipaschalis et.al., 2009).

Paaugstinoties prasībām pret siltumnīcas efektu izraisošo gāzu izmešiem un ar CO<sub>2</sub> kvotu ieviešanu, vairākās ES valstīs kļūst izdevīgi pieslēgt lokālas atjaunojamo resursu elektriskās ģenerēšanas sistēmas (vietējās nozīmes tīklus jeb mikrotīklus) kopējam tīklam. Ir realizēti vairāki šāda veida pilotprojekti: Mainhemā Vācijā – saules paneļi un koģenerācijas stacija, 40 kW kopējā jauda; Kitno salā (Kythnos isl.) Grieķijā – 12 kW saules paneļi un dīzeļģenerators, Derio Spānijā – 170 kW saules paneļi, dīzeļģeneratori, vēja ģeneratori un mikroturbīnas u.c. Enerģijas plūsma starp kopējo tīklu un šādu lokālu sistēmu var būt divvirzienu, kas ļauj attīstīties brīvajam enerģijas tirgum. Pie tam svarīga ir iespēja darboties arī autonomā režīmā, nodrošinot patērētāju ar no tīkla neatkarīgu nepārtrauktu elektroenerģijas padevi. Mikrotīklu koncepts kā viedo tīklu sastāvdaļa tiek uzskatīts par vienu no nākotnes elektrisko tīklu attīstības virzieniem (Bayod-Rujula, 2009).

Līdz ar to var secināt, ka tuvākajos 10-20 gados saules, vēja u.c. atjaunojamo resursu izmantošana ir ekonomiski pamatots, perspektīvs un uz ilgtspējīgu attīstību vērsts enerģētikas virziens. Atjaunojamo resursu elektroapgādes sistēmu izmantošanas scenāriji ietver gan pilnībā autonomu elektroapgādi, gan arī risinājumus ar pieslēgumu tīklam: enerģijas pārdošanai tīklā, rezerves barošanas un papildus ģenerējošās jaudas nodrošināšanai gadījumā, ja tīkla pieslēgums ir nekvalitatīvs vai ar nepietiekamu jaudu. Atjaunojamo resursu elektroapgādes sistēmu izbūvi var paredzēt gan kā alternatīvu tīkla pieslēgumam jauniem objektiem lauku teritorijās, gan kā pieejamās ģenerējošās jaudas palielināšanas variantu.

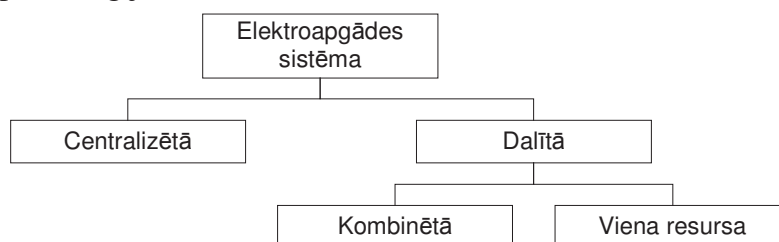
## 1.2. Kombinētās elektroapgādes tīklu apskats un klasifikācija

Atjaunojamās enerģētikas pētījumus var nosacīti iedalīt trīs lielās grupās. Pirmajā grupā ietilpst atsevišķu iekārtu pētījumi, kas saistās ar enerģijas iegūšanu no atjaunojamā resursa un tās nogādāšanu patērētājam. Šīs grupas pētījumu objekti ietver ģeneratorus, uzkrājējus, spēka interfeisa iekārtas un enerģijas pārvades līnijas.

Otrai grupai atbilst pētījumi saistībā ar enerģijas patērējošo iekārtu energoefektivitātes paaugstināšanu. Patēriņa energoefektivitāte ir papildus faktors, kas ļauj uzskatīt atjaunojamos resursus izmantojošas mikro mēroga energoapgādes sistēmas par ekonomiski pamatotu alternatīvu tradicionālajiem centralizētajiem risinājumiem. Tas attiecas gan uz elektriskajiem patērētājiem, gan siltumapgādes sistēmām dažādos tautsaimniecības objektos.

Trešajā grupā var ietvert pētījumus, kas saistās ar elektroapgādes sistēmas kā iekārtu kopuma efektivitātes paaugstināšanu. Tiek pētīti jautājumi par atsevišķu ģenerējošo, patērējošo, uzkrājošo un spēka interfeisa iekārtu optimālu darbību vienotā sistēmā. Tāpat tiek veikta dažādu kombinētu risinājumu un to darbības scenāriju izpēte, inteligentu vadības algoritmu izstrāde. Šajā grupā ietilpst ar kombinēto elektroapgādi saistītie pētījumi. Promocijas darba pētījumu tematika ir attiecināma uz šo grupu.

Līdzās kombinētām elektroapgādes sistēmām, ar kurām parasti saprot vairāku veidu atjaunojamo resursu izmantošanu, zinātniskajā un tehniskajā literatūrā tiek plaši lietoti termini “dalītās elektroapgādes sistēmas” un “dalītā ģenerēšana” (*distributed generation*). Dalītā ģenerēšana pēc Starptautiskās Lielo Elektrisko Sistēmu padomes (CIGRE) definīcijas ir vairāki vienotā sistēmā slēgti mazjaudas ģeneratori, kuri parasti tiek izmantoti pieslēgumā kopējam elektriskajam tīklam, bet elektroenerģijas avotu izvietojums un darbība netiek plānoti, vadīti un kontrolēti centralizēti (CIGRE working group 37-23, 1999). Dalīto ģenerēšanu definē arī kā nelielu (1 kW – 1 MW) ģenerējošo vienību izmantošanu patērētāju tiešā tuvumā (bez augstsprieguma pārvades līnijām), pretstatā centrālai ģenerēšanai ar spēkstacijām virs 100 MW, kas parasti ir novietoti tālu no patērētāja (Bayod-Rujula, 2009). Dalītā ģenerēšana pēc būtības ir plašāks jēdziens, kas ietver arī savstarpēji papildinošus atjaunojamos resursus izmantojošas kombinētās elektroapgādes sistēmas. No dotajām definīcijām var izveidot elektroapgādes sistēmu klasifikāciju pēc enerģijas avotu skaita un veida (skat. 1.2. att.).



1.2. att. Elektroapgādes sistēmu klasifikāciju pēc enerģijas avotu izvietojuma un veida

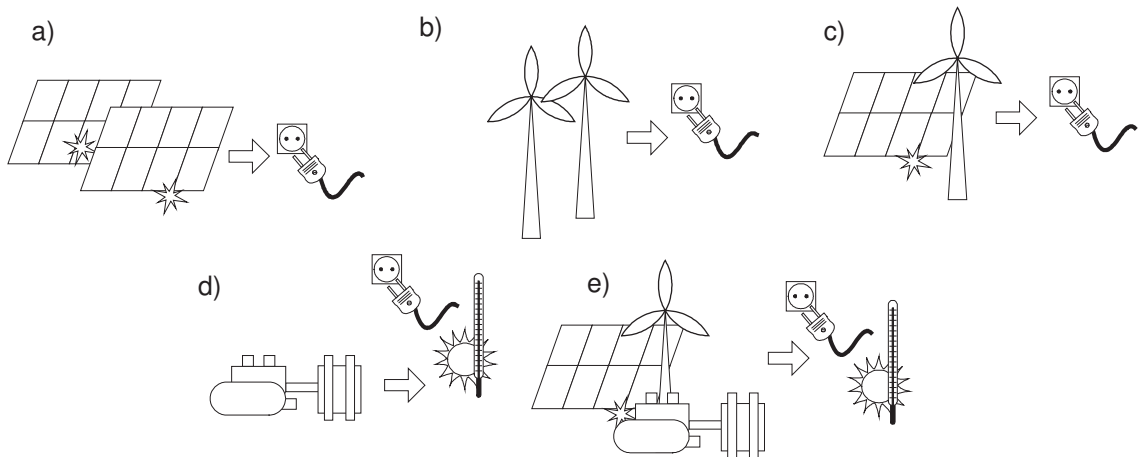
Kad tiek pētīta vairāku enerģijas veidu iegūšana sistēmā, tad dalītās ģenerēšanas jēdzienu paplašina ar koģenerēšanu, triģenerēšanu un vispārīgā gadījumā – multiģenerēšanu. Ja dalītā ģenerēšana ir viena enerģijas veida iegūšana ar vairākiem vienotā sistēmā saslēgtiem ģeneratoriem, kas izmanto vienu vai vairāku veidu primāros resursus, tad multiģenerēšanu definē kā vairāku enerģijas veidu (elektro, siltuma, dzesēšanas enerģijas, ūdeņraža u.c. ķīmisku enerģijas nesēji) vienlaicīgu ražošanu no viena primārā resursa. Kombinētās un dalītās koģenerēšanas piemēri parādīti 1.3. att.



Koģenerācija ir ekonomiski izdevīgāka par viena veida enerģijas, piemēram, elektroenerģijas ražošanu. Koģenerācijas ietaišu efektivitāti var vēl vairāk paaugstināt, ieviešot triģenerācijas sistēmas (elektroenerģija, siltums un kondicionēšana). Sīkāk ar multiģenerēšanu saistītie pētījumi apskatīti (Chicco and Mancarella, 2009).

Tāpat literatūrā tiek lietots formāls jēdziens par brīvu enerģijas veidu konvertēšanu. Enerģijas veidu konvertēšanu izmanto:

- lai iegūtu no lokāli ģenerētā enerģijas veida pašreiz nepieciešamo veidu, piemēram, elektrisko sildelementu izmantošana elektroenerģijas pārvēršanai siltumā vai liekā siltuma izmantošana absorbcijas tipa aukstuma iekārtās;
- lai iegūtu papildus vērtību, piemēram, ar vēja-saules sistēmu ģenerēt elektroenerģiju, ar kuras palīdzību darbināt siltumsūkni;
- pieejamā primārā resursa enerģijas pārpalikuma uzkrāšanai, piemēram, ūdeņraža veidā vai spararatos mehāniskā veidā uzkrāt nepatērēto vēja un saules enerģiju.



### 1.3. att. Dalītās ģenerēšanas un kombinētu sistēmu piemēri

a, b – dalītā ģenerēšana; c – dalītā kombinētā ģenerēšana (elektroenerģija); d – koģenerēšana (siltums un elektroenerģija); e – dalītā kombinētā ģenerēšana (siltums un elektroenerģija)

Dalītās ģenerēšanas sistēmām (DGS) pastāv vairākas klasifikācijas pēc dažādiem kritērijiem. (Chicco and Mancarella, 2009) tiek apskatīta klasifikācija pēc pielietojuma sfēras:

- autonoma lauku un attālināto rajonu elektroapgāde – vairāku avotu (gan atjaunojamo, gan fosilo) kombinēta pielietošana;
- rezerves barošanas sistēmas sensitīvu pirmās un otrās kategorijas patērētāju (Vanags, 2002) nodrošināšanai tīkla padeves pārrāvumu gadījumā: ārstnieciskie objekti, drošības sistēmas, datu glabāšana utt.;
- koģenerācija ar elektroenerģijas nodošanu tīklā, ja saražotā jauda pārsniedz pieprasīto (papildpeļņas nolūkos);
- pieprasītās jaudas lēcieni un kritumu kompensēšana un tīkla parametru (frekvence un spriegums) kvalitātes uzlabošanai;
- elektroenerģijas ražošana un nodošana tīklā (pamatpeļņas nolūkos).

DGS klasifikācija pēc uzbūves un iekļaušanas veida kopējā tīklā:

- pilnībā autonomas sistēmas bez projektēta pieslēguma kopējam tīklam;
- virtuālās spēkstacijas – no pieslēguma un kopējās tīkla vadības stratēģijas viedokļa DGS darbojas kā atsevišķa spēkstacija (Awerbuch and Preston, 1997);

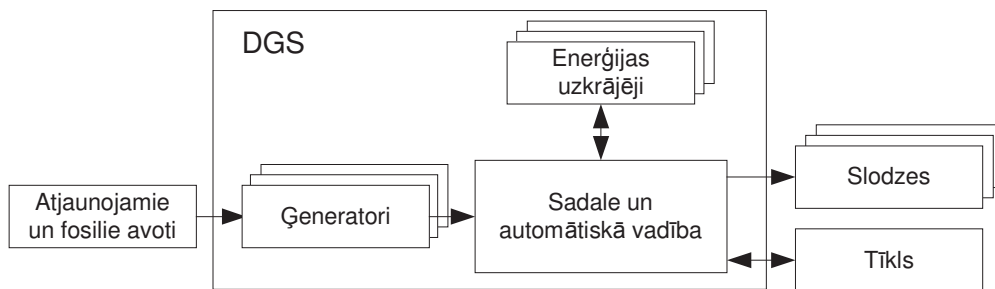
- mikrotīkli – DGS, kas netiek centralizēti vadīti no kopējā tīkla un var darboties gan ar pieslēgumu tīklam, gan neatkarīgi autonomā režīmā (Hatzargyrio et.al., 2006);
- viedie elektrotīkli – visu kopējā tīkla dalībnieku (lielo spēkstaciju DGS un patērētāju) reāllaika informācijas apmaiņa tīkla vadības lēmumu pieņemšanai.

Klasifikācija pēc elektroenerģijas pārvades veida:

- līdzstrāvas kopnes;
- maiņstrāvas kopnes;
- jauktais maiņstrāvas un līdzstrāvas, atkarībā no tīkla posma.

Pēc Latvijā izmantotās klasifikācijas (Vanags, 2002) elektriskās DGS var uzskatīt par vietējas nozīmes elektrisko tīklu, kur spriegums nepārsniedz 20 – 35 kV un darbības rādiuss 15 – 30 km.

Balstoties uz iepriekš apskatītajām definīcijām un jēdzieniem, var izveidot vispārīgu viena enerģijas veida kombinētās DGS un tās enerģijas plūsmas blokshēmu (1.4. att.). Kombinētā sistēma vispārīgā gadījumā var izmantot gan nepastāvīgi pieejamos atjaunojamos resursus, gan izsmeļamos fosilos resursus, enerģijas uzglabāšanas risinājumus, nodrošināt vairākas lokālas slodzes un izmantot pieslēgumu kopīgajam tīklam. Ja pieslēgums tīklam netiek realizēts, tad šāda kombinēta sistēma ir uzskatāma par autonomu.



1.4. att. Vispārīga dalītās ģenerācijas sistēmas blokshēma

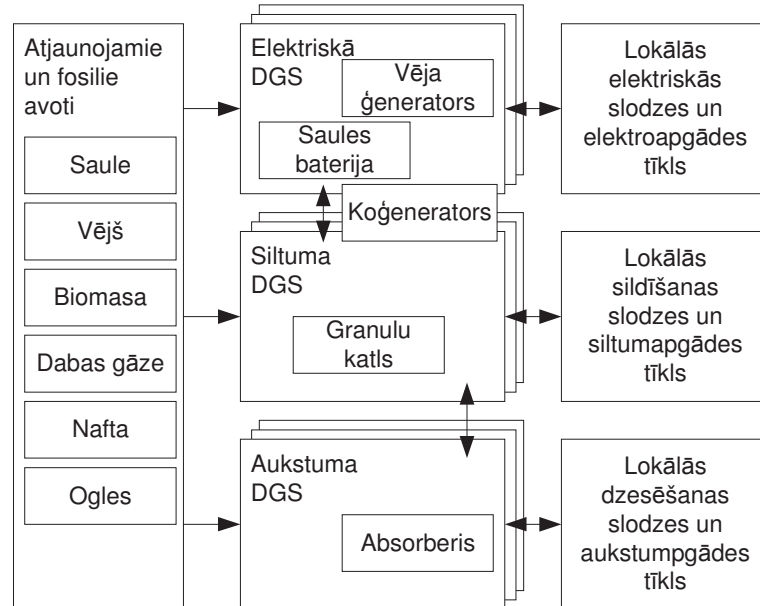
Bultiņas norāda enerģijas plūsmas virzienu

Pie dažādu veidu energoapgādes tīkliem var pieslēgt vairākas attiecīgā enerģijas veida DGS. Pie tam var tikt izmantots aprīkojums vairāku enerģijas veidu vienlaicīgai iegūšanai. Piemērs ar elektriskam, siltuma un aukstuma apgādes tīklam pieslēgtajām DGS parādīts 1.5. att. Shēmā iekļauta arī koģenerācijas iekārta, kas pieslēgta divu veidu DGS un absorberis, kas izmanto siltumu dzesēšanas ciklā. Sīkāk par dzesēšanas sistēmām, kas izmanto siltumu, to veiktspēju un ekonomisko efektu aprakstīts (Mroz, 2006).

Dalītā un multiģenerēšana tiek uzskatīts par pamatvirzienu lokālo energoapgādes sistēmu efektivitātes paaugstināšanai (Lopes et.al., 2007, Bayod-Rujula, 2009). Lokāli pieejamo atjaunojamo resursu apvienošanai DGS un pieslēgšanai tīklam, ir vairākas priekšrocības:

- tiek panākta enerģijas resursu diversifikācija un samazināta atkarība no energoģenerācijas importa, kas kā iepriekš tika minēts ir īpaši aktuāli ES teritorijā;
- samazinās kopējais fosilo resursu patēriņš un siltumnīcas efektu izraisošo gāzu izmeši;
- tiek nodrošināta stabilāka tīkla darbība patēriņa lēcieni stundās un uzlabota attālinātu patērētāju energoapgādes kvalitāte;
- izmantojot lokāli pieejamos resursus, var samazināt energopārvades zudumus;

- dalītā elektroģenerēšana ir viens no variantiem, kā panākt elektroenerģijas sadales kapacitātes paaugstināšanu, nepārbūvējot pašreizējās pārvades un sadales līnijas, kas ir īpaši aktuāli, paplašinoties elektrotransporta lietošanai;
- dalītā ģenerēšana dod iespēju attīstīt enerģijas tirgu un mazināt lielo energouzņēmēju monopola stāvokli.

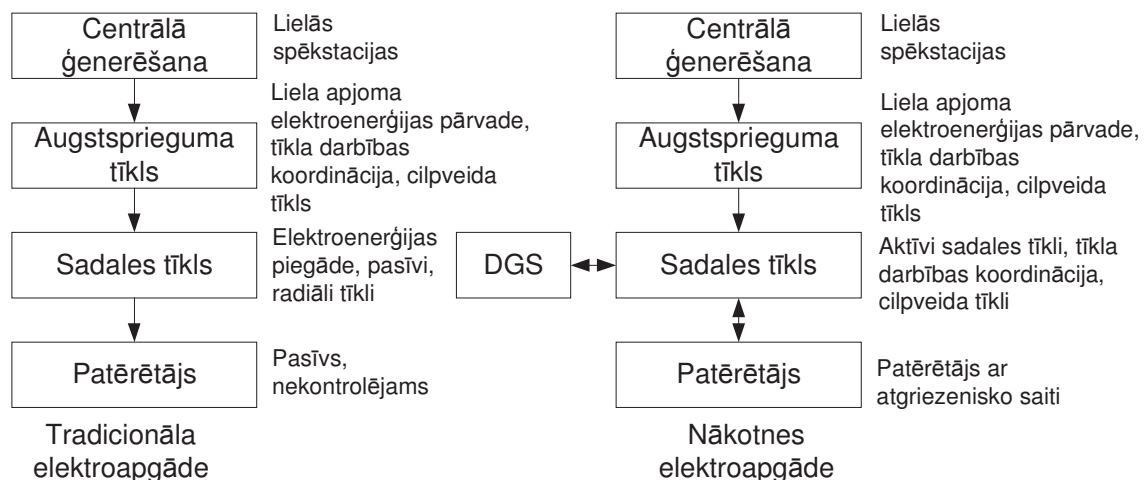


1.5. att. Vairāku enerģijas veidu DGS un to pieslēgšana kopējiem elektriskajam, siltuma un aukstuma apgādes tīkliem

Bultiņas norāda enerģijas plūsmas virzienu

Galvenās DGS ieviešanas tehniskās problēmas saistās ar tīkla pieslēguma aprīkojuma standartizēšanu, DGS ietekmi uz tīkla parametriem, kas ir īpaši būtiski elektroapgādes sistēmām (sprieguma un frekvences noturēšana, sinhronizācija, spriegumu paaugstinošo impulsa pārveidotāju radītais augstfrekvences fons u.c.), un kopējo apakštīklu darbības menedžmentu.

Kas attiecas uz dalīto elektroģenerēšanu, tad tā zinātniskajā literatūrā tiek minēta kā viens no nākotnes publisko elektroapgādes tīklu pētījumu virzieniem sadales tīklu līmenī (skat. 1.6. att.) (Bayod-Rujula, 2009).



1.6. att. Tradicionālā un nākotnes elektroapgāde (pēc Bayod-Rujula, 2009)

Zinātniskajā literatūrā, kur pētījuma objekts ir lokāla tipa autonomas un tīklam pieslēgtās dalītās ģenerēšanas sistēmas nav skaidri izdalīta vienota klasifikācija pēc sistēmu mērogiem, gan komponentu skaita ziņā, gan to kopējās jaudas ziņā. Līdz ar to kā orientieris tika piemērota koģenerācijas staciju klasifikācija. Tika izmantota Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīvā 2004/8/EK pieejamā koģenerācijas staciju klasifikācija (Direktīva 2004/8/EK), pēc kuras mikro koģenerācijas stacijas atbilst 50 kW maksimālajai jaudai. Darbā pētītās elektroapgādes sistēmas pēc jaudas atbilst šai grupai. Citos avotos šādas jaudas dalītās elektroapgādes sistēmas tiek apzīmētas arī kā “maza mēroga”. (Kirkham et.al., 1981) minēts, ka maza mēroga sistēma ir ar jaudu zem 1 MW, bet (Bayod-Rujula, 2009) norāda, ka maza mēroga sistēmas izmanto teritoriāli nodalītus DGS ģeneratorus ar jaudu 1 kW – 1 MW.

Dalītās elektroapgādes sistēmu teorētiskie pamati ir apskatīti jau pagājušā gadsimta astoņdesmito gadu sākumā (Dugan et.al., 1984, Kirkham, et.al., 1981) tomēr tā laika tehnoloģiju attīstība vēl neļāva veidot efektīvus risinājumus. Dalītās ģenerēšanas sistēmas šajā laikā tika ieviestas galvenokārt kā rezerves barošanas un pilnīgi autonomas darbības nodrošināšanai industriālajām, militārajām un municipālajām vajadzībām, taču mūsdienās tas kļūst aktuāli arī individuāliem, ne industriāliem un mājas lietotājiem.

Chicco un Mancarella (Chicco and Mancarella, 2009) ir apkopojuši galvenos pēdējo gadu zinātniskajā literatūra apskatītos jautājumus un problēmas saistībā ar dalītās ģenerēšanas sistēmu ieviešanu:

1. dalītā ģenerēšana kā līdzeklis atjaunojamo resursu izmantotās daļas palielināšanai attiecībā pret tradicionālajiem enerģijas ieguves veidiem;
2. dalīto resursu izmantošana, lai novilcinātu vai atsevišķos gadījumos likvidētu ilgtermiņa investīciju nepieciešamību lielas jaudas energoapgādes centru izveidei, kas būtu nepieciešami nelielu reģionālu komerciālu projektu realizēšanai;
3. lokāli pieejamo resursu izmantošana, lai novērstu zudumus energopārvades līnijās un līniju uzturēšanas izmaksas;
4. lokāla pašpietiekama energoapgādes sistēma, kas paaugstina gan reģionālo energoneatkarību, gan nodrošina pret enerģijas transportēšanas zudumiem un pārrāvumiem;
5. kopējam tīklam pieslēgtajam klientam tiek radīta iespēja aktīvi piedalīties tirgū kā enerģijas piedāvātājam gan atdodot lokāli ģenerēto kopējā tīklā, gan izvēloties izdevīgākus nosacījumus enerģijas paņemšanai no tīkla, tādējādi paaugstinot konkurenci;
6. lokālo resursu pieslēgšana kopējam tīklam paaugstina tā drošumu un piegādātās enerģijas kvalitāti pārējiem klientiem;
7. attīstoties lokālās dalītās ģenerēšanas sistēmām, rodas nepieciešamība pārskatīt drošības prasības un standartus šādu sistēmu autonomai darbībai un pieslēgšanas kopējam tīklam;
8. intensīva lokālo ģenerēšanas sistēmu izmantošana, pat ja tās tiek balstītas uz atjaunojamiem resursiem, var radīt atsevišķa rakstura ar tradicionālo oglekļa piesārņojumu nesaistītas ekoloģiskas problēmas, piemēram, vēja turbīnu radītais trokšņa piesārņojums, tāpat ir jāreķinās arī ar sociāliem un kultūrvēsturiskās ainavas saglabāšanas aspektiem.

Atjaunojamo enerģijas resursu izmantošanu sekmē arī pētījumi “gudrās mājas” tehnoloģiju jomā (Dounis and Carascos, 2009). Ir gatavi uz datorvadību balstīti komerciāli ieviesti risinājumi, piemēram, Eiropā tas ir Siemens, ABB u.c. ražotāju atbalstītais KNX standarts. Tie ļauj realizēt praktiski visu ēku sistēmu vadību, un tos var

izmantojot visu enerģijas veidu patēriņa atgriezeniskās saites veidošanai. Citiem vārdiem, ir iespēja veikt visu ēku sistēmu darbības detalizētu monitoringu un plānot optimālus darbības scenārijus atkarībā no nepastāvīgo atjaunojamo resursu pieejamības dotajā laika momentā. Pēdējā laikā parādās tendence iekļaut lokālās energoapgādes sistēmas gan rezerves, gan papildus un pilnīgi autonomai energoapgādei “gudrās mājas” projektos zem vienotas vadības sistēmas, tādējādi rodot jaunas iespējas visu komponentu darbības optimizēšanai. Taču kopējo izmaksu, sarežģītās konfigurēšanas (pamatā tiek izmantoti tipveida PLC (programmējamais loģiskais kontroleris) risinājumi ēku automatizācijai), kā arī ar pašu atjaunojamās enerģijas iekārtu izmantošanu saistīto problēmu dēļ, praksē šādas sistēmas parādās reti.

Ir izstrādāti tipveida autonomu kombinētas elektroapgādes risinājumi ģenerējošajai un uzkrājošajai daļai. Šāda veida sistēmas pašlaik tiek pārsvarā veidotas, orientējoties uz konkrēto situāciju un izmantojot atbilstošas komponentes elektroenerģijas ģenerēšanai, uzkrāšanai un tās parametru pārveidošanai pēc patērētāja prasībām. Tā, piemēram, itāļu uzņēmums Carlo Gavazzi piedāvā saules, vēja un akumulatora rezerves barošanas risinājumu televīzijas torņiem, kuru ekspluatācijas periodā darbojas ar konstantu jaudu, un tādēļ ir iespējams salīdzinoši viegli izplānot nepieciešamo iekārtu jaudu.

Turpmāk darbā tiek pētītas DGS speciālais gadījums: mikro mēroga autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas, kas izmanto vairāku veidu primāros atjaunojamās enerģijas resursus.

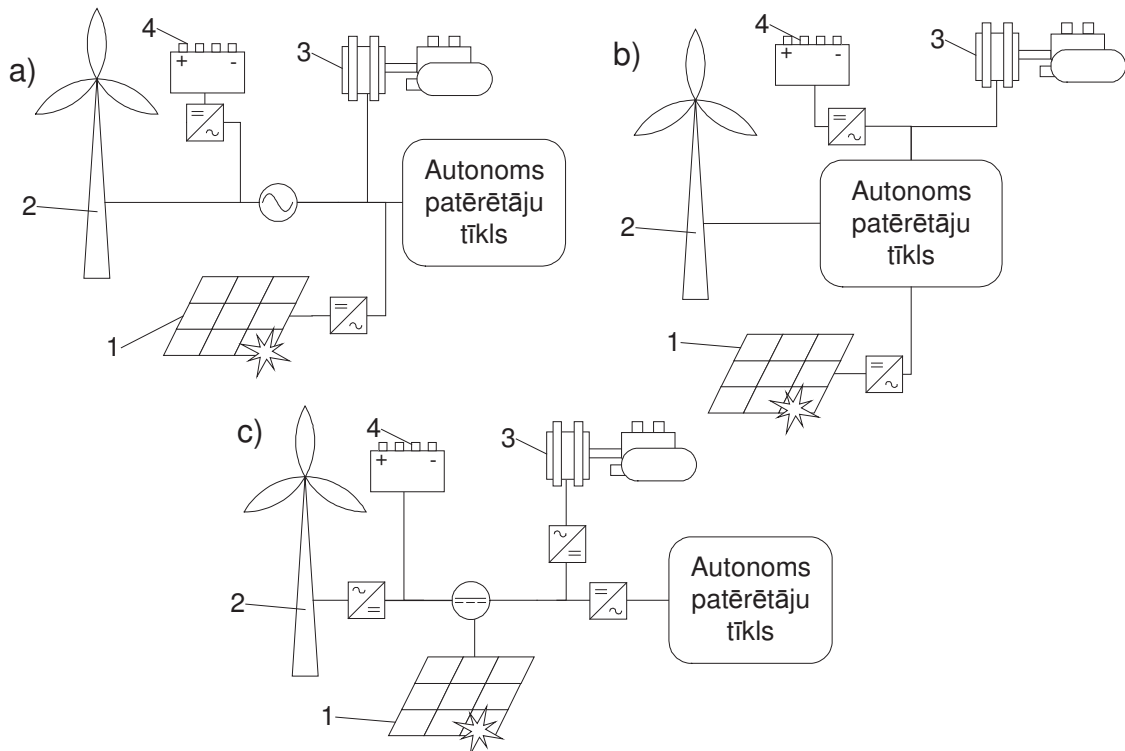
Vispārīgā gadījumā elektroapgādes apgādes sistēma ir elektriskais tīkls, kas sastāv no viena vai vairākiem elektroģeneratoriem – enerģijas avotiem, stabilizējošiem elementiem ar uzkrāto enerģiju (akumulatoriem) un enerģijas patērētājiem. Pie tam atkarībā no darba režīma uzkrājējus var apskatīt gan kā patērētājus, gan kā ģeneratorus.

Vienkāršs autonomās sistēmas piemērs ir dažāda veida transporta elektroiekārta, kas sastāv no viena ģenerators, viena elektroenerģijas uzkrājēja un vairākiem patērētājiem. Arī kopējais elektriskais tīkls pēc būtības ir uzskatāms par autonomu sistēmu, tikai daudz lielākos mērogos. Transporta līdzekļu elektrosistēmās ar vienu elektroenerģijas avotu tīkla parametrus ietekmē tikai avota sniegtā un patērētāju pieprasītā jauda, visas radušās svārstības slāpē akumulators. Gadījumos, kad nav iespējams nodrošināt pieprasīto jaudu, krītas spriegums, pieaug patērētā strāva. Kopējā elektriskajā tīklā patērētāju pieprasītās jaudas svārstības laikā attiecībā pret kopējo piedāvāto ir relatīvi zemas, un pieslēdzot vai atslēdzot papildus avotus notiek tīkla pašregulēšanās, tīkla uzkrājēja funkciju pilda spēkstaciju inerce.

Mikro mēroga atjaunojamo resursu autonomās elektroapgādes sistēmas elementu savstarpējā slēguma arhitektūrai ir vairāki varianti, biežāk lietotie ir (Ortjohann, 2003):

- centralizētās maiņstrāvas kopnes arhitektūra – visi elektroenerģijas ražošanas un uzkrāšanas elementi atrodas teritoriāli vienuviet un ir saslēgti vienotā maiņstrāvas kopnē, kura tiešā veidā vai caur sprieguma transformatoru ir pieslēgta patērētāju tīklam;
- dalītās maiņstrāvas kopnes arhitektūra (mikrotīkls) – visi elektroenerģijas ražošanas un uzkrāšanas elementi var būt izvietoti teritoriāli atstātus, atkarībā no atjaunojamo resursu pieejamības (piemēram, vēja ģeneratori klajā vējainā vietā, atsevišķi no saules baterijas un rezerves ģeneratoriem) un pievienoti patērētāju tīklam pēc to atrašanās vietām;
- centralizētā līdzstrāvas kopnes arhitektūra – visi elektroenerģijas ražošanas un uzkrāšanas elementi atrodas teritoriāli vienuviet un ir saslēgti vienotā līdzstrāvas kopnē, kura caur invertoriem ir pieslēgta patērētāju tīklam.

Arhitektūru slēgumu piemēri ir parādīti 1.7. att. Tīkla segmentācijai ir izmantoti strāvu pārveidojošie elementi jeb spēka interfeisi. Atkarībā no elektroenerģijas ražošanas un uzglabāšanas tehnoloģijas ģeneratori un uzkrājēji var izmantot gan līdzstrāvu, gan mainīgas frekvences maiņstrāvu.



1.7. att. **Kombinētas elektroapgādes sistēmas elementu savstarpējo slēgumu biežāk lietotās arhitektūras (pēc Ortjohann, 2003)**

a – centralizētā maiņstrāvas kopne; b – dalītā maiņstrāvas kopne; c – centralizētā līdzstrāvas kopne;  
 1 – saules baterijas (līdzsprieguma avoti); 2 – vēja ģeneratori (mainīgas frekvences maiņsprieguma avoti);  
 3 – iekšdedzes motoru ģeneratori (konstantas frekvences maiņsprieguma avoti); 4 – akumulatori

### 1.3. Tehnoloģiskās iekārtas atjaunojamo resursu kombinētās sistēmās

Šajā nodaļā apkopota informācija par atjaunojamo resursu kombinētās elektroapgādes sistēmās izmantoto tehnoloģisko iekārtu grupām. Apskata nolūks ir dot īsu kopsavilkumu par elektroenerģijas ražošanai, pārveidošanai un uzkrāšanai izmantotajām tehnoloģijām un iekārtām, kā arī izcelt īpašības, kas ietekmē kombinētās sistēmas darbību un vadības stratēģijas izvēli. Daba ietvaros modelēto iekārtu (vēja, fotoelektriskā, iekšdedzes motora piedziņas ģeneratoru un svina skābes akumulatoru, kā arī spēka interfeisa iekārtu) funkcionalitāte sīkāk pētīta 2.2 un 2.4. nodaļās.

#### 1.3.1. Ģeneratori

Elektroenerģijas ģeneratorus var klasificēt pēc primārās enerģijas avota veida: atjaunojamus dabas resursus izmantojošie (saules baterijas, vēja ģeneratori, hidroģeneratori) un uzkrātos resursus izmantojošie (ūdeņraža elementi, dīzeļģeneratori). Pie tam uzkrātais resurss ir enerģijas nesējs, kurš var būt gan fosils, gan arī iegūstams, izmantojot atjaunojamo enerģiju. Kombinētās sistēmas AVS uzdevums ir nodrošināt pastāvīgu maksimālu atjaunojamo resursu ģeneratoru noslodzi un samazināt uzkrāto resursu ģeneratoru izmantošanas laiku.

Visu vēja ģeneratoru darbības pamatā ir vēja plūsmas darbināts rotors, kuru savienota ar ģeneratoru, izmantojot mehānisko pārvadu. Jaunākās konstrukcijās pārsvarā tiek lietoti daudzpolu pastāvīgo magnētu sinhronie ģeneratori. Mūsdienās izmantotās vēja iekārtas pēc jaudas klasificē mazās (10 – 25 kW), vidējās (50 – 150 kW), lielās (250 – 1000 kW) un ļoti lielās (2 – 4 MW) (Galiņš u.c., 2008), kuras biežāk tiek lietotas vēja parkos elektroenerģijas ražošanai rūpnieciskos apjomos pārdošanai tīklā. Praksē individuālām vajadzībām autonomu vai rezerves elektroapgādes sistēmu izveidei attālos lauku rajonos tiek lietoti arī ļoti mazas jaudas vēja ģeneratori (1 – 5 kW un mazāki). Vēja ģeneratora izejas jaudu raksturo rotora šķērsriezuma laukums, bet vēja izmantošanas koeficientu – vēja turbīnas konfigurācija: horizontāla vai vertikāla, lāpstiņu skaits, ģeometrija un leņķis pret vēju. Vēja izmantošanas koeficients parāda, kādu daļu no caurplūstošās gaisa plūsmas enerģijas izmanto vēja turbīna. Maksimālo vēja izmantošanas koeficienta vērtību  $C_p = 0.5926$  nosaka Betca kritērijs, jo paņemot lielāku jaudu no gaisa plūsmas, tā tiek bremsēta. No rotora konfigurācijas ir atkarīgs arī minimālais iegriešanās vēja ātrums, kas ir aktuāli Latvijas apstākļiem. Lielākais gada vidējais vēja ātrums Baltijas jūras piekrastē nepārsniedz  $5.1 - 5.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  10 m augstumā. Teritorijas vidienē tas ir aptuveni  $4.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pie svārstībām atsevišķos gados  $\pm 20\%$  (Latvijas vēja enerģijas..., 2001). Vairāklāpstiņu horizontālajām un vertikālajām turbīnām iegriešanās vēja ātrums ir sākot ar  $1.5 - 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , trīslāpstiņu turbīnām – no  $3 - 3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ar maksimālo jaudu attiecīgi pie  $5 - 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  un  $9 - 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pie tam visaugstākais vēja izmantošanas koeficients ir trīslāpstiņu turbīnām (Galiņš u.c., 2008). Līdz ar to praksē vēja ģeneratoru vidējā jauda gadā nepārsniedz  $25 - 30\%$  no nominālās (Galiņš u.c., 2008, Kirubakaran et.al., 2009), kas ir jāierēķina, projektējot vēja ģeneratoru uzstādīšanu.

Saules bateriju jeb fotoelektrisko ģeneratoru pamatā ir fotoelementu baterijas. Fotoelementi ir pusvadītāju kristāli, kas pārveido uz tiem krītošo elektromagnētisko starojumu elektroenerģijā tiešā veidā. Praktiskai izmantošanai fotoelementi tiek savienoti virknē un paralēli, apvienojot tos moduļos jeb baterijās ar nepieciešamajiem sprieguma un strāvas raksturlielumiem. Moduļu lietderības koeficients un maksimālā izejas jauda tiek dota pie standarta apstākļiem: apgaismojums  $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , AM 1.5 spektrālais etalons un pie  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  moduļa temperatūras (Reference Solar Spectral..., 2010). 1.1. tabulā dots mūsdienās plašāk izmantoto fotoelementu tehnoloģiju apkopojums. Viena no galvenajām fotoelektrisko ģeneratoru priekšrocībām ir elektroenerģijas iegūšana pusvadītājā bez kustīgām daļām, no kā izriet minimālas ekspluatācijas izmaksas un salīdzinoši ilgs kalpošanas laiks.

1.1. tabula

### Plašāk izmantoto fotoelementu tehnoloģiju apkopojums

Fotoelementa tehnoloģija	Lietderības koeficients <sup>1</sup> (%)	Lietderības koeficients <sup>2</sup> (%)	Ekspluatācijas laiks <sup>3</sup> (g)
Monokristāla silīcijs	$24.7 \pm 0.5$	14 – 20	30
Polikristālu silīcijs	$19.8 \pm 0.5$	13 – 15	30
Vara-indija diselenīds (CIS), vara-indija-gallija diselenīds (CIGS)	$18.4 \pm 0.5$	10 – 12	5
Kadmija tellurīda (CdTe)	$16.5 \pm 0.5$	9 – 11	15

Fotoelementa tehnoloģija	Lietderības koeficients <sup>1</sup> (%)	Lietderības koeficients <sup>2</sup> (%)	Ekspluatācijas laiks <sup>3</sup> (g)
Amorfais silīcijs (aSi)	10.1 ± 0.2	6 – 9	20
Silīcija plēves	16.6 ± 0.4	6 – 9	25

<sup>1</sup>Maksimālais laboratorijas apstākļos pēc ASV nacionālās atjaunojamās enerģētikas laboratorijas (NREL) datiem uz 2010. gadu (Best research-cell..., 2010).

<sup>2</sup>Komerciāli pieejamos moduļos pēc Starptautiskās Enerģētikas aģentūras (IEA) datiem 2010. gadu (Technology Roadmap: Solar..., 2010).

<sup>3</sup>Pēc Tiwari and Dubey, 2010.

Līdzās iekšdedzes motoru ģeneratoriem (dīzeļa un ottomotoru) un turbīnu ģeneratoriem pie uzkrātos resursus izmantojošiem ģeneratoriem tiek pieskaitīti arī degvielas elementi. Pēc sākotnējiem kapitālieguldījumiem degvielas elementi ir dārgākā no pašlaik izmantotajām ģeneratoru tehnoloģijām, taču lietošanas un tehniskās apkopes izmaksas ir fotoelektrisko bateriju līmenī (Kirubakaran et.al., 2009). Var minēt arī citus elektroenerģijas iegūšanas veidi, kas dēļ zemā lietderības koeficienta vai sarežģītības apkalpošanā nav plaši izplatīti: Peltjē elementi, Stīrlinga dzinējs, pjezoelementi u.c.

### 1.3.2. Enerģijas uzkrājēji

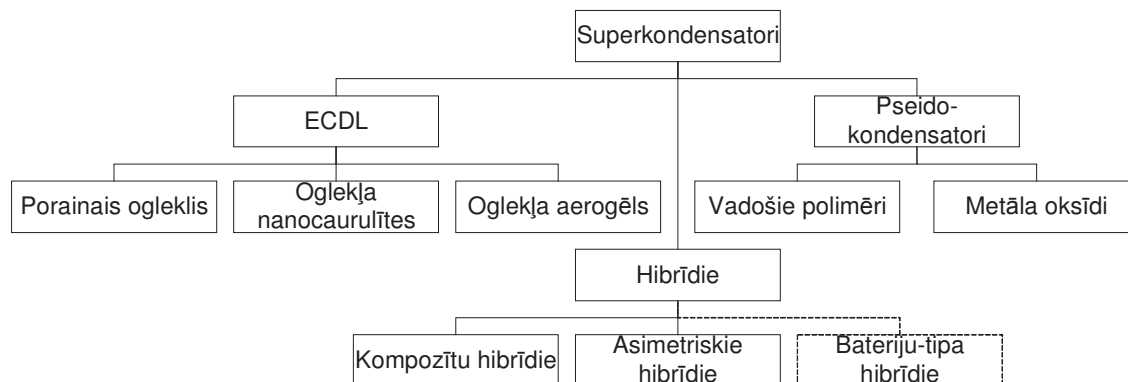
Galvenais enerģijas uzkrājēju izmantošanas mērķis ir nodrošināt patērētāju ar nepārtrauktu elektroenerģijas piegādi. Patēriņa lēcienus filtrējošo uzkrājēju izmantošana ļauj samazināt nepieciešamo maksimālo ģenerējošo iekārtu jaudu, kas ir īpaši aktuāli pie neregulāra slodzes sadalījuma. Biežāk izmantotie enerģijas uzkrāšanas veidi ir elektroķīmiskais, elektrostatisks (superkondensatori) un mehāniskais. Vispārējie enerģijas uzkrājējus raksturojošie parametri ir lietderības koeficients, enerģijas blīvums (raksturo kapacitāti), jaudas blīvums (raksturo maksimāli pieejamo jaudu), uzlādes un izlādes ciklu skaits, pašizlāde, noturība pret pārlādēšanu un pārāk dziļu izlādi, kura rezultātā negatīvi ietekmē pārējos parametrus (Hadjipaschalis et.al., 2009).

Elektroķīmiskie elementi un to sistēmas jeb baterijas dod iespēju glabāt elektrisko enerģiju ķīmiskā veidā. Ķīmiskās reakcijas noris elementā ar pievienotu slodzi vai barošanas avotu, kā rezultātā elektroni plūst starp diviem elektrolītā novietotiem elektrodiem: no anoda (pozitīvā elektroda) uz katodu (negatīvo elektrodu) uzlādes režīmā pie pieslēgta ārējā sprieguma, kas ir lielāks par ķīmiskā elementa elektrodzinējspēks (EDS) un pretējā virzienā izlādes režīmā pie pieslēgtas slodzes. Baterijas tiek veidotas, saslēdzot vairākus elementus paralēli un/vai virknē, atkarībā no nepieciešamā sprieguma, kapacitātes un strāvas. Praksē kombinētās elektroapgādes rezerves barošanas, autonomās un tīklam pieslēgtās sistēmās plašāk tiek lietotas trīs tipu ķīmiskās baterijas: svina-skābes, niķeļa-kadmija un litija-jonu baterijas. Pateicoties salīdzinoši augstam enerģijas un jaudas blīvumam (skat. 1.2. tabulu), visu elektroķīmisko bateriju tipiskais pielietojums ir ilgtermiņa elektroenerģijas glabāšana un vidēji jaudīgu slodžu barošana.

Superkondensatori ir kondensatori ar ļoti lielu elektrodu virsmu, kas ļauj uzglabāt statisko elektrisko lādiņu vairakkārt lielāku kā parastiem kondensatoriem un nelielu ar spriegumu, tiek izmantoti superkondensatori ar kapacitāti līdz 5000 F, 3 V (atsevišķiem moduļiem) (Burke, 2000). Atkarībā no izmantotajiem materiāliem un tehnoloģiskā procesa superkondensatorus iedala elektroķīmiskajos dubulta slāņa (ECDL), pseidokondensatoros un hibrīdajos (skat. 1.8. att.). Pateicoties tehnoloģijas



vienkāršumam, pašlaik izplatītākie ir ECDL tipa superkondensatori. Superkondensatoru tipiskie izmantošanas varianti ir īstermiņa enerģijas glabāšana, slodzes lēcienu izlīdzināšana, jaudīgu slodžu īslaicīga barošana, motoru palaišana u.c.



1.8. att. Superkondensatoru klasifikācija (pēc Hadjipaschalis et.al., 2009)

Elektrisko enerģiju uzkrāj arī mehāniskā veidā, izmantojot spararatus. Spararatos elektriskā enerģija tiek pārveidota kinētiskajā, izmantojot elektrisko mašīnu, kuras ass savienota ar gultņos novietotu spararatu. Ja ir nepieciešams enerģiju uzglabāt, tad elektriskā mašīna tiek darbināta motora režīmā, kas iegriež spararatu. Kad elektroenerģija ir jāpaņem, elektriskai mašīnai tiek pielikta slodze un tā sāk darboties kā ģenerators, noņemot kinētisko enerģiju no spara rata.

1.2. tabula

Dalītā ģenerēšanā izmantoto uzkrāšanas tehnoloģiju kopsavilkums (pēc Hadjipaschalis et.al., 2009)

Tehnoloģija	Enerģijas glabāšanas vide	Ekspluatācijas laiks (gadi)	Uzlādes un izlādes ciklu skaits	Pasīzlāde	Dziļas izlādes un pārlādes izturība	Lietderības koeficients (%)	Enerģijas blīvums (Wh·kg <sup>-1</sup> )	Jaudas blīvums (W·kg <sup>-1</sup> )
Svina-skābes	ķīmiska	3..12	<1500	2 %/mēn	ļoti zema	85..90	30	180
NiCd	ķīmiska	15-20	<3000	10 %/mēn	zema	65..80	15..50	50..1000
LiIo	ķīmiska	N/A	<1500	5 %/mēn	ļoti zema	90	80..150	500..2000
ECDL superkondensators	elektrostatiska	<12	>500000	14 %/mēn	augsta	85..98	5	10000
Spararats	kinētiska	>20	<10 <sup>7</sup>	20 %/h	augsta	90	5 (tērauda), 100 (kompozītu)	1000 (kompozītu)

Spararatos pārsvarā tiek izmantotas pastāvīgo magnētu sinhronās mašīnas. Pēc ātruma spararatus iedala divās grupās: zema ātruma (līdz 6000 apgr<sup>-1</sup>), kurus veido no parastos lodīšu vai rullīšu gultņos ievietota tērauda diska, un augsta ātruma (līdz 50000 apgr<sup>-1</sup>) no magnētiskajos gultņos un vakuumā vai inertas gāzes vidē ievietota kompozītu materiāla diska. Elektriskā enerģija tiek pievadīta un novadīta no spararata ar divvirzienu darbības spēka interfeisa palīdzību (skat. 1.3.3. nodaļu). Tā kā kinētiskā enerģija ir tieši proporcionāla masai un leņķiskā ātruma kvadrātam, bet inerces slodzes ir mazākas vieglākiem materiāliem, tad par perspektīvākiem tiek uzskatīti liela ātruma (un vieglāki) oglekļa kompozīta rotoru (Hadjipaschalis u.c., 2009). Spararatu tipiskie

izmantošanas varianti ir līdzīgi superkondensatoriem: īstermiņa enerģijas glabāšana, frekvences un sprieguma kritumu kompensēšana maiņstrāvas tīklos slodžu komutācijas laikā, motoru palaišana u.c. Spararatu enerģijas glabāšanas iekārtas ir pieejamas plašā jaudu diapazonā: no dažiem kilovatiem līdz 2 – 3 MW (Bolund u.c., 2007).

Pie mehāniskās enerģijas uzkrāšanas veidiem var minēt arī ūdens potenciālās enerģijas uzkrāšanu. Sūknējot ūdeni rezervuārā, tiek patērēta pašreiz neizmantotā elektriskā enerģija, uzkrāto potenciālo enerģiju pārvērš elektriskajā ar ūdens turbīnas un ģeneratora palīdzību.

### 1.3.3. Spēka interfeisa iekārtas

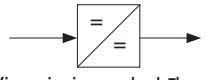
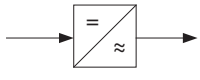

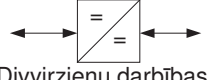
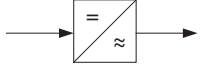

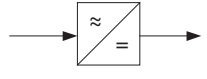
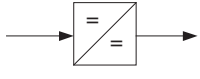

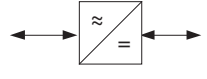
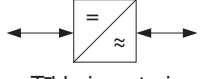

Ja autonoma elektroapgādes sistēma tiek veidota pēc vairāku primāro resursu kombinācijas principa, tad ir nepieciešams savstarpēji salāgot dažādu ģeneratoru ražoto un patērētājiem nepieciešamo elektroenerģiju. Salāgošana ir nepieciešama starp dažādu atšķirīgu parametru elektriskajiem kontūriem: līdzstrāva un maiņstrāva, dažādu spriegumu un/vai frekvences maiņstrāva, līdzstrāva un mainīgas frekvences maiņstrāva u.c. kombinācijas.

Spēka pusvadītāju ierīču un uz to pamata veidotu elektroenerģijas pārveidotāju attīstība ir viens no faktoriem, kas sekmēja atjaunojamo resursu izmantošanu kombinētās elektroapgādes sistēmās. Faktiski tiek veidots interfeiss starp dažādas formas un parametru elektroenerģijas tīkliem, tāpēc literatūrā bieži tiek lietots termins “spēka interfeiss”. Vairāki autori savos darbos uzsver, ka spēka interfeisi ir galvenās izpildiekārtas kombinēto elektroapgādes sistēmu AVS izstrādņēs (Jiayi et.al., 2008, Noroozian et.al., 2009, Lagorse et.al., 2009, Perina et.al., 2009).

Šī darba ietvaros spēka interfeisa termins lietots, lai apzīmētu spēka pusvadītāju iekārtas, ar kuru palīdzību elektriskā enerģija tiek pārvadīta starp atšķirīgu parametru elektriskajiem kontūriem. Pēc uzbūves un funkcionalitātes var izdalīt trīs spēka interfeisa iekārtu grupas: taisngrieži, invertori un līdzstrāvas pārveidotāji. Pēdējā grupā tiek izmantoti gan taisngrieža, gan invertora elementi. Spēka interfeisa iekārtas izšķir arī pēc enerģijas plūsmas virziena: divvirzienu darbības un divvirzienu darbības. Divvirzienu darbības iekārtas tiek izmantotas vietās ar divvirzienu elektroenerģijas plūsmu: pie interfeisa veidošanas ar elektroenerģijas uzkrājējiem un pieslēgumā pie kopējā elektriskā tīkla, ja ir paredzēts gan patērēt elektroenerģiju, gan ražot un nodot to atpakaļ tīklā.

Atkarībā no novietojuma dalītās elektroapgādes sistēmas tīklā spēka interfeisi tiek realizēti arī papildus funkcionalitāte. Kā piemērus var minēt maksimālās jaudas punkta sekošana saules baterijās, ierosmes nodrošināšana asinhronajiem ģeneratoriem, ģenerētā maiņsprieguma sinhronizācija ar publisko elektrisko tīklu vai atsevišķu lokālo maiņsprieguma kopni, uzlādes/izlādes kontrolleri dažādiem ķīmiskajiem akumulatoriem u.c. Sīkāk spēka interfeisu papildus funkcionalitāti ar ģenerējošām un uzkrājošām iekārtām apskata (Chakraborty et.al., 2009).

Literatūrā ir apkopoti un klasificēti pēc izmantotā ģeneratora veida, elektroenerģijas parametru un plūsmas tipveida arhitektūras varianti spēka interfeisu izmantošanai ar kopējo līdzstrāvas savienojumu (Chakraborty et.al., 2009). Dotā klasifikācija ir autora papildināta ar sīkāk izdalītiem patērētājiem un maiņstrāvas tipa uzkrājēja klasi (skat. 1.9. att).

Ģeneratori/uzkrājēji	Ģenerators/uzkrājēju interfeiss	Līdzstrāvas kopne	Patērētāju interfeiss	Patērētāji
Saules baterijas, ūdeņraža elementi, līdzstrāvas ģeneratori	 Vienvirziena darbības līdzstrāvas pārveidotāji		 Invertori	 Vienfāzes maiņstrāvas patērētāji
Ķīmiskās baterijas, superkondensatori	 Divvirzienu darbības līdzstrāvas pārveidotāji		 Invertori	 Trīsfāžu maiņstrāvas patērētāji
Dažādas piedziņas (vējš, hidro, mikroturbīna) sinhronie un asinhronie ģeneratori	 Taisngrieži		 Līdzstrāvas pārveidotāji	 Līdzstrāvas patērētāji
Spararati ar sinhrono un asinhrono piedziņu	 Divvirzienu darbības invertori/taisngrieži	 Tīkla invertori, divvirzienu darbības tīkla invertori/taisngrieži	 Elektriskais tīkls	

1.9. att. Dažādu ģenerators un patērētāju savienošana caur līdzstrāvas kopni ar spēka interfeisu palīdzību (pēc Chakraborty et.al., 2009)

#### 1.4. Kombinēto elektroapgādes sistēmu automātiskā vadība un modelēšana

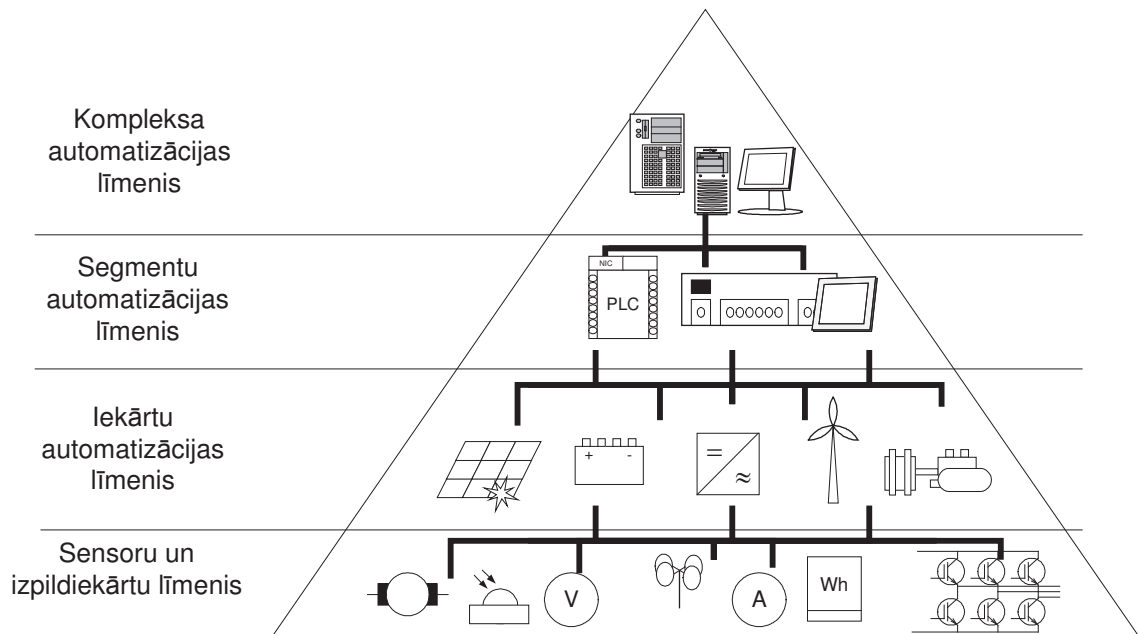
Velkot paralēles ar rūpniecisko objektu automatizācijas hierarhiju, kā arī ar programmatūras izstrādes metodiku (sistēma kā melnā kaste, objektorientētā pieeja, intelektuālo aģentu pieeja u.c.), kombinēto elektroapgādes sistēmu AVS var nosacīti sadalīt vairākos abstrakcijas līmeņos. Vairāklīmeņu struktūra dod iespēju izdalīt un pētīt atsevišķas kopējās kompleksa automatizācijas daļas pēc to funkcionālajām un reāllaika prasībām.

##### 1.4.1. Kombinētās elektroapgādes automātiskās vadības hierarhiskā struktūra

Dalīto vai vairāku primāro enerģijas avotu izmantošanas gadījumā kombinēto elektroapgādes sistēmu automātiskās vadības struktūra atbilstoši rūpniecisko objektu automatizācijas hierarhijai (pēc Кругляк, 2002) parādīta 1.10. att. Sensori un izpildiekārtas nodrošina iekārtu automatizācijas līmeņa elementu darbību. Rūpnieciskās automatizācijas sistēmām sensorus un izpildiekārtas pārsvarā izmanto kā atsevišķas iekārtas, konstruktīvi atdalītas no AVS objekta. Turpretī klasiskā kombinētās elektroapgādes sistēmā sensoru un izpildiekārtas bieži ir konstruktīvi iestrādāti jau automātiskās vadības objektos iekārtu automatizācijas līmenī: spēka interfeisos, ģeneratoros un uzkrājējos. Piemēram, no spēka interfeisa var nolasīt tā ieejas un izejas elektrisko lielumu sensoru rādījumus. Iekārtu automatizācijas līmenī tiek izmantotas lokālas AVS katra objekta vadībai, piemēram, saules baterijas maksimālās jaudas punkta sekošana vai līdzstrāvas pārveidotāja izejas sprieguma un strāvas regulēšana.

Segmentu automatizācijas līmenī notiek visu pie vienas kopnes slēgto spēka iekārtu darbības saskaņošana: kopnes parametru regulēšana un slodzes strāvas dalīšana starp dažādiem ģeneratoriem. Kompleksa automatizācijas līmenī ir augstākā līmeņa vadības un datu uzkrāšanas sistēmas (SCADA). Šis līmenis aptver vienotā sistēmā vairākas elektriskās un citu enerģijas veidu DGS, kā arī var nodrošināt ar enerģētiku nesaistītu AVS objektu augstākā līmeņa vadību, piemēram, “gudrās mājas” elementus.

Tāpat kompleksa automatizācijas līmenī tiek uzdots atsevišķu DGS segmentu darbības stratēģija: akumulatoru uzlādes izlādes režīmi, dīzeļģeneratora ieslēgšanas un atslēgšanas nosacījumi u.c.



1.10. att. **Kombinēto elektroapgādes sistēmu automātiskās vadības hierarhiskā struktūra atbilstoši rūpniecisko objektu automatizācijas hierarhijai (pēc Кругляк, 2002)**

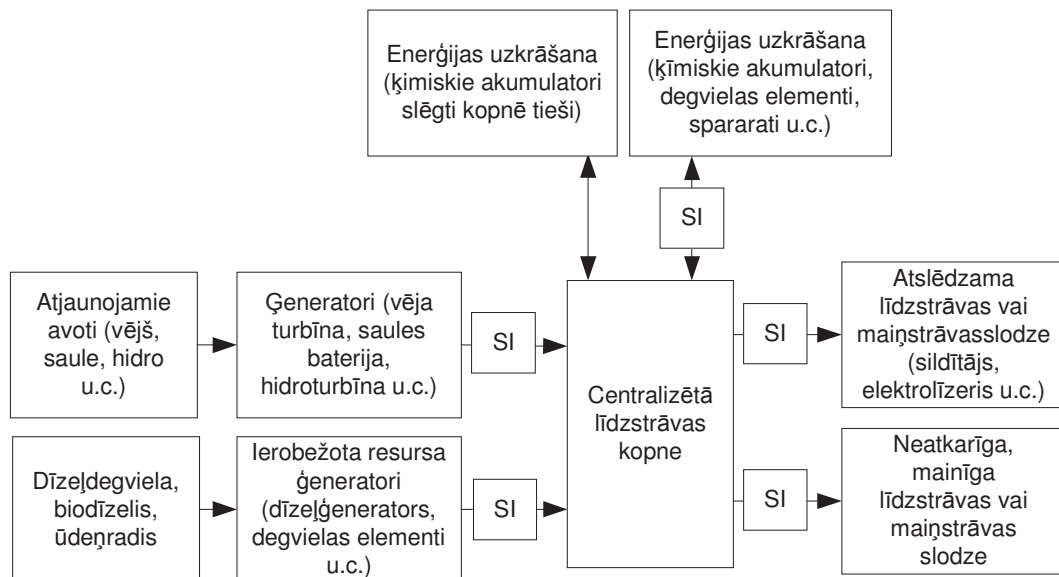
#### 1.4.2. Automātiskā vadība dalītajā elektroapgādē ar līdzstrāvas kopni

Promocijas darba pētījuma objekts ir mikro mēroga kombinētās elektroapgādes sistēmas, kurām jādarbojas mainīgas slodzes un primāro energoresursu pieejamības apstākļos. Ņemot vērā maksimālās jaudas ierobežojumu līdz 50 kW, ir pieļaujams izmantot zemsprieguma līdzstrāvas kopni (1.7. att.), kuras galvenās priekšrocības salīdzinājumā ar maiņstrāvas kopni ir vienkāršota elektroenerģijas avotu ieslēgšana, un galvenais regulējamais parametrs ir tikai kopnes spriegums, kā arī iespēja bez papildus spēka interfeisa ieslēgt kopnē akumulatorus. Tiek prognozēts, ka, pateicoties spēka elektronikas attīstībai, līdzstrāvas kopnes izmantošana DGS realizācijā tuvākajos gados tikai paplašināsies (Manwell et.al., 2006). Uzskaitītās līdzstrāvas kopnes īpašības hipotētiski ļauj uzskatīt, ka līdzstrāvas kopne, salīdzinot ar maiņstrāvas kopni, kur pastāvīgi nepieciešams sinhronizēt vairāku spēka interfeisu frekvenci, ir labāk piemērota autonomu vai no tīkla atslēdzamu mikrotīkla tipa elektroapgādes sistēmas risinājumiem. Īpaši aktuāli tas ir izteikti periodiskam lauku saimniecību dienas elektriskās slodzes profilam, kuru ietekmē tādi patērētāji kā slaukšanas iekārtas, piena dzesētāji, kūstsmēslu transportieri u.c. un pie neregulāras atjaunojamo resursu pieejamības rodas nepieciešamība periodiski darbināt papildus ģeneratorus. Centralizētās līdzstrāvas kopnes arhitektūras piemērotību mikro mēroga kombinētām sistēmām efektīvai enerģijas plūsmas vadībai no dažādiem avotiem ir pamatota vairāku autoru darbos (Omari et.al., 2003, Paska et.al., 2009, Zhou and François, 2011).

Centralizētās līdzstrāvas kopnes autonomās elektroapgādes sistēmas un tās enerģijas plūsmas blokshēma parādīta 1.11. att. Tiek izmantota komplicēta vairāklīmeņu automātiskā vadība. Segmentu automatizācijas līmeņa AVS objekts ir līdzstrāvas kopne, kurā nepieciešams noturēt uzdoto spriegumu. Spriegums kopnē tiek noturēts, regulējot pieejamo strāvu no primārajiem enerģijas avotiem: nevienmērīgi

pieejamajiem atjaunojamajiem (saule, vējš), pastāvīgi pieejamiem atjaunojamajiem un fosilajiem resursiem ar enerģijas daudzuma ierobežojumu (dīzeļdegviela, biogāze), kā arī uzkrājējiem (spara rats, degvielas elements, superkondensatoru baterija). Papildus regulējošo efektu var panākt ieslēdzot vai atslēdzot elektrisko slodzi vai veicot enerģijas uzkrāšanu. Sprieguma stabilizēšanai un augstas frekvences svārstību kompensēšanai tiek izmantoti kopnē tieši slēgti akumulatori. Turklāt ir jābūt iespējai dinamiski regulēt primārā avota saražoto un uzkrājējā patērēto enerģiju, lai varētu realizēt dažādas fosilo resursu patēriņa un akumulatoru darba resursa pagarināšanas stratēģijas. Piemēram, (Fakham, et.al., 2011) piedāvā izmantot caur spēka interfeisu pieslēgtu superkondensatoru bateriju īslaicīgu slodzes lēcieni kompensēšanai, neizlādējot ķīmisko akumulatoru.

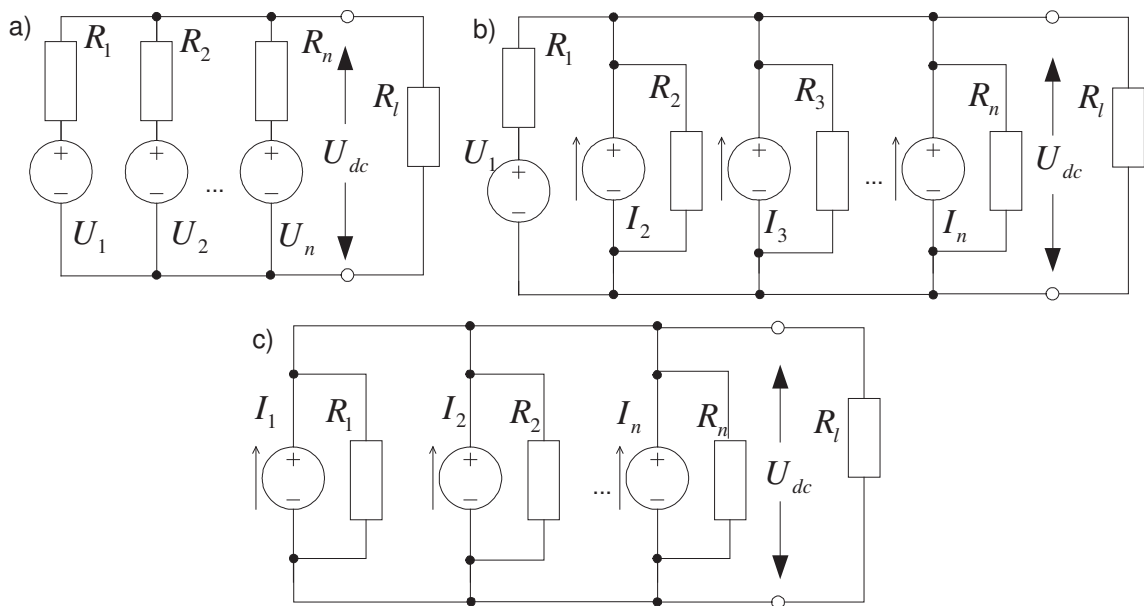
Izpildiekārtas ir līdzstrāvas kopnē paralēli slēgti spēka interfeisi. Augstākā (segmentu) līmeņa AVS nodrošina līdzstrāvas kopnes vadību, iestatot spēka interfeisu darba režīmus (ieslēgšana/atslēgšana, izejas sprieguma un strāvas regulēšanas signāli). Spēka interfeisu darba režīmu, izejas strāvas un sprieguma vērtības un pārējo iekārtu (ģeneratoru, enerģijas uzkrājēju) automātisko vadību nodrošina lokālās vadības sistēmas, kuras kopumā veido iekārtu automatizācijas līmeni.



1.11. att. **Centralizētās līdzstrāvas kopnes autonomās elektroapgādes sistēmas un tās enerģijas plūsmas blokshēma**

Līdzstrāvas kopnē paralēli slēgtus spēka interfeisus atkarībā no darba režīma var uzskatīt par sprieguma vai strāvas avotiem. Reālu strāvas un spriegumu avotu (ekvivalentajā shēmā – ideāls avots un iekšējā pretestība virknē vai paralēli sprieguma vai strāvas avotam attiecīgi) paralēlai ieslēgšanai līdzstrāvas kopnē biežāk tiek pielietoti trīs varianti: tikai sprieguma avoti – pirmais tips, viens sprieguma avots, pārējie strāvas avoti – otrais tips un tikai strāvas avoti – trešais tips (Huang and Tse, 2007). Slēguma shēmas ir parādītas 1.12. att. Katrā no slēguma variantiem tiek pielietota specifiska kopnes sprieguma regulēšanas metode.

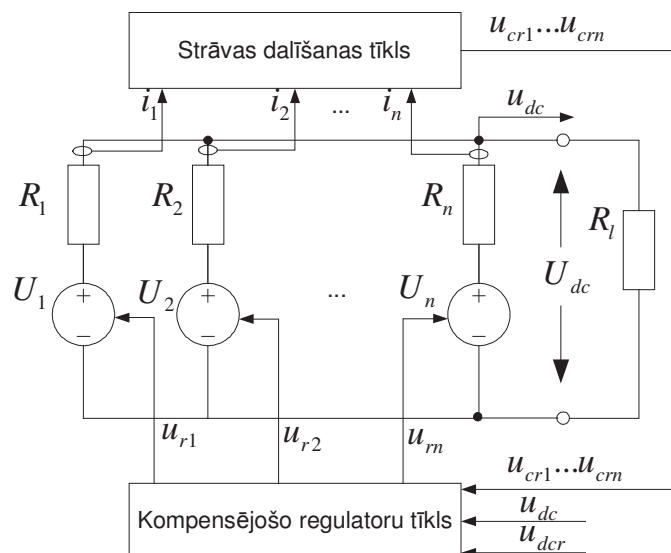
Pirmā tipa (1.12. att., a) slēgumā kopnes sprieguma  $U_{dc}$  regulēšana un  $n$  avotu strāvu  $I_i$  dalīšana tiek veikta ar spriegumu kritumu metodi. Literatūrā šī metode bieži tiek apskatīta kā risinājums paralēlu slēgtu līdzsprieguma barošanas avotu strāvas regulēšanai (Irving and Jovanović, 2000). Katra paralēli slēgtā sprieguma avota strāva tiek regulēta, iestatot tā izejas spriegumu.



1.12. att. **Reālu strāvas un sprieguma avotu paralēlā slēguma varianti (pēc Huang and Tse, 2007)**

a – paralēli slēgti sprieguma avoti; b – viens sprieguma avots, pārējie – strāvas avoti (vedēja sekotāja princips); c – paralēli slēgti strāvas avoti

Lai sprieguma avotiem uzdotu noteiktas izejas strāvas vērtības, tiek veidots vadības kontūrs ar strāvas atgriezenisko saiti uz strāvas dalīšanas tīklu, kas pēc būtības ir komplicēta AVS (skat. 1.13. att.) (Huang and Tse, 2007). Katra avota strāvai proporcionāls signāls  $i_n$  tiek padots uz strāvas dalīšanas tīklu. Tīklā tiek ģenerētas atbilstošas kompensējošā sprieguma regulēšanas signāla vērtības  $u_{cr1} \dots u_{crn}$ , kuras saskaita ar kopnes sprieguma atgriezenisko saiti  $u_{DC}$  un kopnes sprieguma regulēšanas signālu  $u_{dcr}$ . Tādējādi iegūst katra avota nepieciešamo sprieguma regulēšanas signālu  $u_{r1} \dots u_{rn}$ . Spriegumu kritumu metode sīkāk tiek pētīta (Karlsson, 2002; Karlsson and Svensson, 2003).

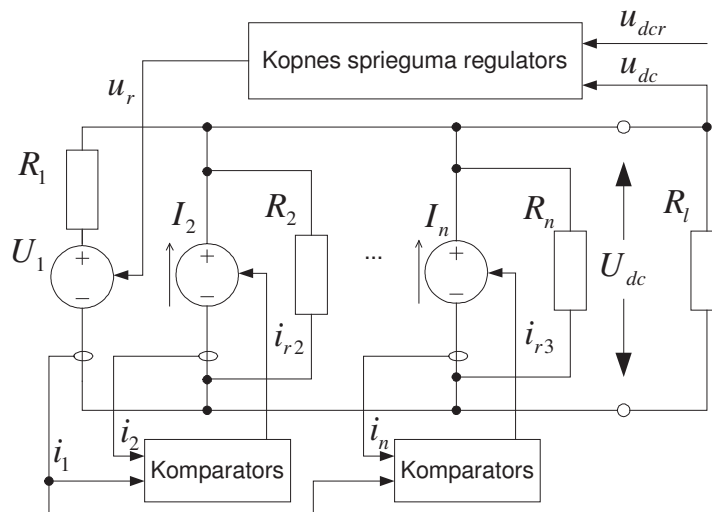


1.13. att. **Paralēlu sprieguma avotu slēgums ar strāvas dalīšanas regulatoru tīklu**

Otrā tipa (1.12. att., b) slēgumā kopnes sprieguma  $U_{dc}$  regulēšana un avotu strāvu  $I_i$  dalīšana tiek panākta, kombinējot abu tipu avotus. Viens sprieguma avots izmanto atgriezeniskās saites signālu no kopnes sprieguma  $u_{dc}$  un regulē  $U_{dc}$  pēc uzdotās

regulēšanas signāla vērtības  $u_{dcr}$ , pārējie – strāvas avoti izmantot strāvas atgriezenisko saites  $i_2...i_n$  katrs no sava zara un regulē padoto strāvu atkarībā no sprieguma avota strāvas  $i_1$ . Šo metodi sauc par vedēja-sekotāja strāvas dalīšanas principu, kur sprieguma avots ir vedējs, kurš uzdod strāvas avotiem – sekotājiem regulēšanas signāla vērtības (Lagorse et.al., 2009; Huang, Tse, 2007).

Praktiski vedēja-sekotāja regulēšanas pieeja tiek izmantota kombinētās sistēmās ar centralizēto līdzstrāvas kopni, kur viens no avotiem ir pastāvīgi (determinēti) pieejams (rezerves ģenerators, superkondensators, akumulatoru baterija u.c.). Kā piemēru var minēt (Noroozian et.al., 2009) apskatīto saules bateriju – akumulatoru – invertoru sistēmu, kur kā pastāvīgi pieejamais avots ir izmantota akumulatoru baterija netieši pievienota līdzstrāvas kopnei ar spēka interfeisa palīdzību. Regulēšanas shēma, vadības un atgriezeniskās saites signālu plūsmas parādītas 1.14. att.

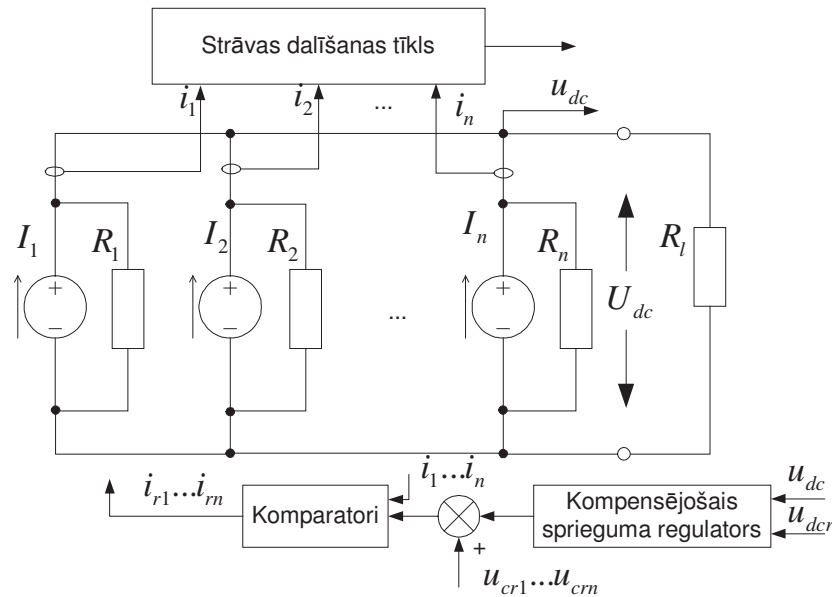


1.14. att. **Paralēlu sprieguma un strāvas avotu slēgums ar vedēja – sekotāja regulēšanu strāvas dalīšanai**

Trešā tipa (1.12. att., c) slēgumā tiek izmantoti tikai strāvas avoti. Šajā slēgumā konstanta sprieguma nodrošināšanai var tikt izmantota gan vedēja-sekotāja, gan vidējās strāvas vadības metode (Huang and Tse, 2007). Strāvas dalīšanas tīkls ģenerē dalīšanas kļūdas kompensēšanas signālus sprieguma veidā  $u_{cr1}...u_{crn}$ , kurus saskaita ar kompensējošā kopnes sprieguma regulatora vadības signālu un padod kā strāvas regulēšanas signālus  $i_{r1}...i_{rn}$  strāvas avotiem. Regulēšanas shēma un signālu plūsmas parādītas 1.15. att.

Kā speciāli gadījumi literatūrā tiek apskatītas arī citas  $U_{dc}$  regulēšanas metodes. Piemēram, (Zhang et.al., 2005) parāda variāciju ar sprieguma atgriezeniskās saites paralēli slēgtiem līdzstrāvas pārveidotājiem, kas darbojas vienādranga sprieguma avotu režīmā, atbilstoši 1.12. att. (a), bet (Pica et.al., 2007) apskata virknē slēgtu līdzstrāvas pārveidotāju slēgumu zema sprieguma dalītās ģenerēšanas sistēmās. (Noroozian et.al., 2010) parāda kombinētu publiskajam tīklam piesaistītu dalītās ģenerēšanas sistēmu, kurā kopnes sprieguma regulācija tiek veikta ar sprieguma kritumu metodi. Ir pētījumi, kuros strāvas dalīšanai starp neatkarīgiem līdzstrāvas izejas spēka interfeisiem sprieguma avota režīmā tiek piedāvāts izmantot uz ģenētiskajiem algoritmiem balstītus proporcionālos integrālos diferenciālos (PID) kontrollerus (Cheng et.al., 2010). Katram no paralēlo slēgumu veidiem ir savas priekšrocības un trūkumi, kurus jāizvērtē pie dalīto elektroapgādes sistēmu arhitektūras izstrādes ar līdzstrāvas savienojošo kopni.

1.3. tabulā dots trīs paralēlo slēgumu galveno īpašību apkopojums (pēc Huang and Tse, 2007).



1.15. att. **Paralēlu strāvas avotu slēgums ar strāvas dalīšanas regulatoru tīklu un kopnes sprieguma regulēšanu**

Principiāli vairāku enerģijas avotu vadības pieejas vienā kopē neatšķiras arī maiņstrāvas gadījumā. Literatūrā tiek minētas paralēlo invertoru vadības pieejas strāvas dalīšanai ar atsevišķu atgriezenisko saiti katram invertoram un centrālo strāvas dalīšanas tīklu, kā arī vedēja un sekotāja invertoru pieeja, kur sekotāju izejas strāva (un jauda) ir atkarīga no vedēj-invertora izejas strāvas (Green and Prodanovic, 2007).

1.3. tabula

**Dažādu paralēlo līdzstrāvas avotu slēgumu priekšrocības un trūkumi (pēc Huang and Tse, 2007)**

Slēguma veids	Priekšrocības	Trūkumi
<b>Tikai paralēli sprieguma avoti</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• laba modularitāte un mērogojamība, iespēja viegli paplašināt esošo elektroapgādes sistēmu;</li> <li>• laba kopnes sprieguma regulācija;</li> <li>• laba strāvas dalīšana pie nelielām kopnes parametru izmaiņām;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nav izmantojams pie lielām slodzes izmaiņām;</li> <li>• relatīvi lēna strāvas dalīšanas dinamika;</li> </ul>
<b>Viens sprieguma avots un paralēli strāvas avoti</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• viegli paplašināt esošo elektroapgādes sistēmu, pievienojot jaunus strāvas avotus;</li> <li>• laba kopnes sprieguma regulācija;</li> <li>• laba strāvas dalīšana</li> <li>• salīdzinoši labāka strāvas dalīšanas dinamika;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• strāvas dalīšanas precizitāte ir tieši atkarīga no sprieguma avota (vedēja) strāvas izmaiņām, kā rezultātā pasliktinās trokšņu noturība;</li> </ul>
<b>Tikai paralēli strāvas avoti</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• precīza strāvas dalīšana;</li> <li>• laba izejas sprieguma regulēšana plašos diapazonos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sarežģīta automātiskās vadības struktūra;</li> <li>• sarežģīti paplašināt sistēmu ar jauniem jaudas moduļiem, jo nepieciešama saite starp strāvas regulēšanas cilpām.</li> </ul>



### 1.4.3. Kombinēto elektroapgādes sistēmu modelēšana

Attīstoties alternatīvai atjaunojamai enerģētikai, parādoties jaunām iekārtām un attīstot vecās tehnoloģijas (degvielas elementi, lielas kapacitātes kondensatori, jaunu konstrukciju vēja turbīnas utt.), standarta kombinētās elektroapgādes risinājumus ir jāpārskata.

Augstākā, segmentu un kompleksa automatizācijas līmeņa kombinētās elektroapgādes vadības sistēmām ir jānodrošina stabils centralizētās kopnes spriegums, ņemot vērā neatkarīgi mainīgu elektrisko slodzi un to, ka praktiski visi dabiski atjaunojamie enerģijas avoti ir ar nevienmērīgu jaudas pieejamību laikā. Kombinēto elektroapgādes tīklu un to automātiskās vadības sistēmu pētījumi ir saistīti ar ģeneratoru un slodzes kontrolleru izstrādi, dažādu vadības stratēģiju, alternatīvu arhitektūru izstrādi, tehnisku un komerciālu risinājumu integrāciju, standartizāciju, pilotprojektu izstrādi un sistēmu ekonomisko novērtējumu.

Izmaksu un laika ziņā visefektīvākā pieeja dažādu sistēmu, tajā skaitā kombinēto elektroapgādes tīklu un to vadības izpētē un optimizācijā, ir matemātiskā modelēšana (Kaundinya et.al., 2009). Pētījumus, kuros tiek pielietota matemātiskā modelēšana, analītiskie un skaitliskie datormodeļi kombinētās elektroapgādes sistēmu darbības simulācijai var nosacīti iedalīt divās grupās: dinamiskie imitāciju modeļi un laicrindu modeļi.

Veidojot imitāciju modeļus, pēta pārejas procesus kopnē, ģenerējošās, uzkrājošās iekārtās un spēka interfeisos. Tiek pētīti gan tipveida atjaunojamo resursu kombinācijas, gan arī vispārīgi risinājumi. Autonomās kombinētās vēja-ūdeņraža (elektrolīzeris un degvielas elementi) sistēmas dinamiskā imitāciju modelēšana apskatīta (Iqbal, 2003, Khan and Iqbal, 2009). Autori prezentē Matlab Simulink vidē veidotu imitāciju modeli kombinētās sistēmas, atsevišķu iekārtu parametru dinamikas un izejas maiņsprieguma pētīšanai mainīgas slodzes apstākļos. Rakstā nav precīzi parādīta matemātisko modeļu realizācija Simulink vidē, taču tiek minēts, ka simulācija ir skaitļošanas resursu ietilpīga un izstrādātie modeļi ir praktiski izmantojami pārejas procesu pētīšanai laika periodos līdz 15 s. Autori pierāda izmantoto iekārtu saskaņotas darbības iespēju līdzstrāvas kopnē, taču norāda arī uz galvenajām kombinēto elektroapgādes sistēmu modelēšanas problēmām: apgrūtinātu vispārīgā modeļa validāciju izpildiekārtu standartizācijas trūkuma dēļ. Tāpat tiek atzīmēts, ka no praktiskā viedokļa, lai varētu izvērtēt tehniski-ekonomiskos kombinēto elektroapgādes sistēmu jautājumus, būtu nepieciešami garāki simulācijas periodi (vairākas stundas un dienas).

Līdzīgu pieeju vēja, saules bateriju, degvielas elementu un superkondensatoru kombinētās sistēmas pētīšanā izmanto (Onar et.al., 2008, Uzunoglu et.al., 2009). Tika lietoti vienkāršoti iekārtu dinamiskie modeļi Matlab Simulink vidē, sastāvoši no standarta bibliotēku blokiem (matemātiskās darbības, nepārtrauktās pārvades funkcijas, integratori u.c.), ar kuru palīdzību modelēti fizikālie procesi AVS objektos un izpildiekārtās, bet elektriskās daļas simulācijai izmantota Matlab paketes SimPowerSystems. Vienkāršotie modeļi ļāva samazināt simulācijas laiku, autori savā darbā apskata kombinētās sistēmas darbību ar reāliem ieejas datiem – vēja ātrumu, saules starojumu un slodzes profilu 24 h griezumā. Sistēmas simulācijas analīzei izmantota grafiskā pieeja: analizēta izmantotā jauda no visiem atjaunojamajiem resursiem, kā arī elektrolīzerī saražotais un degvielas elements patērētais ūdeņradis.

Tāpat sistēmas dinamikas datormodelēšana ar Matlab Simulink vai citām programmpaketēm izmantota pētījumos par vēja un saules kombinētām sistēmām (Ekren and Ekren, 2009), vēja un saules sistēmām, padziļināti pētīt saules bateriju maksimālās jaudas sekošanas kontrolleri (Skretas and Papadopoulos, 2009), vēja, saules

dīzeļģeneratora (Nfah et.al., 2007), vēja, saules, dīzeļģeneratora un tīkla pieslēguma sistēmām (Omari et.al., 2003) u.c.

Laikrindu modeļos tiek izmantotas atjaunojamo resursu pieejamības un slodzes diskretās laika rindas: attiecīgā lieluma definēta laikā ar noteiktu nemainīgu periodu. Pie tam visām laika rindām jābūt uzdotām ar vienu periodu. Sistēmas signāli (kopnes spriegums, patērētāju un slodžu strāvas, iekārtu stāvokļi u.c.) tiek aprēķināti no ieejām ar to pašu laika periodu. Laika rindu modeļus parasti izmanto kombinēto elektroapgādes sistēmu ilgstošu periodu simulācijai (solis – min, h; periods – d, mēn, g.) ar mērķi atrast optimālo iekārtu kombināciju pie dotajiem ierobežojumiem vai veikt kādas kombinācijas ekonomisko novērtējumu. Sistēmas darbība tiek apskatīta statistiskā režīmā un netiek modelēti elektriskie pārejas procesi.

Balstoties uz laikrindu pieeju, ir izstrādāti vairāki kombinēto elektroapgādes sistēmu imitācijas modeļi, un uz to pamata izveidota specializēta programmatūra. Viens no programmatūras rīkiem ir HOMER (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*), kurš dod iespēju veikt kombinētās elektroapgādes darbības simulāciju ar fiksētu 1 stundas periodu 1 gada garumā un satur bibliotēku ar izpildiekārtu modeļiem izejas jaudas statistisko raksturlīkņu veidā (Lilienthal et.al., 2004, Lambert et.al., 2006). Ar HOMER ir iespējams veikt arī simulācijas bāzētu optimizāciju pēc kopējām izmaksām izvēlētajā kombinētās elektroapgādes sistēmas darbības periodā un jutības analīzi, t.i. kā parametru izmaiņa ietekmē optimizācijas kritēriju. Simulācijas parametros var norādīt vienkāršus automātiskās vadības iestatījumus: dīzeļģeneratora ieslēgšanas stratēģiju (cikliskā akumulatoru uzlāde vai slodzes izmaiņu sekošana), kā arī papildus sildītāju automātisku pieslēgšanu atjaunojamo resursu enerģijas pārpalikuma gadījumā. Optimāla fosilo resursu izmantošanas stratēģijas elektroenerģijas nepārtrauktas padeves nodrošināšanai kombinētās elektroapgādes sistēmās sīkāk apskatītas (Barley et.al., 1995, Barley et.al., 1996). Kā alternatīvas var minēt arī laikrindas izmantojošus rīkus HARPSIM (*Hybrid Arctic Remote Power Simulator*), kur modeļa izstrādē arī izmantota Matlab Simulink vide un tas ir optimizēts izmantošanai ASV Aļaskas štātā (Agrawal et.al., 2007) un Hybrid2 (Manwell et.al., 2006). Laikrindu pieeju un lineāro programmēšanu optimālas kombinētās elektro un siltuma apgādes sistēmas konfigurācijas pētījumos izmanto (Hawkes and Leach, 2009).

Līdzās atjaunojamo resursu kombinācijas optimizācijai laika dimensijā (saražotās enerģijas maksimizēšana, minimizējot kopējās sistēmas izmaksas) atjaunojamo resursu izmantošanas iespēju izpētei var tikt lietotas arī ģeogrāfiskās informācijas sistēmas (Amadora and Dominguez, 2006, Osadčuks un Galiņš, 2010). Ar to palīdzību iespējams plānot mikro mēroga kombinēto elektroapgādes sistēmu telpisku izvietojumu, ievērtējot dažādus teritoriālos faktoros kartes slāņu veidā: dažāda veida resursu un elektriskā tīkla pieejamība, reljefs, ekoloģiskie un administratīvie ierobežojumi, komunikāciju pieejamība u.c. Ģeogrāfiskās informācijas sistēmas atjaunojamo resursu pieejamības izpētē sasaistē ar laika rindas izmantojošiem kombinēto elektroapgādes sistēmu optimizācijas modeļiem un lauku resursu kartēm (augšnes tipi, vietējā flora, nokrišņu daudzums, temperatūra u.c.) hipotētiski ļautu atrast efektīvāko resursu izmantošanas veidu lauksaimnieciskajām aktivitātītēm dotajā teritorijā.

Pētot kombinēto elektroapgādes sistēmu darbību garākos laika periodos (1 h un vairāk), izmantojot modelēšanas pieeju, ir jāapsver arī augstāko līmeņu automātiskā vadība. Bez iepriekš minētajām vienkāršajām akumulatoru lādēšanas stratēģijām un papildus sildīšanas slodzes pieslēgšanas, atjaunojamo resursu izmantošanas efektivitātes paaugstināšanai un kvalitatīvākas elektroenerģijas nodrošināšanai patērētājam, tiek piedāvāti alternatīvi segmentu un kompleksa automatizācijas līmeņa AVS risinājumi,

kas izmanto IKT un mākslīgā intelekta elementus. Piemēram, (Osadčuks, 2007, Bernal-Agustin and Dufo-Lopez, 2009) min perturbācijas prognozējošo apstādzes vadības metodi. Pēc šīs metodes lēmums par akumulatora lādēšanu no fosilā resursa, piemēram, dīzeļģeneratora tiek pieņemts, balstoties uz atjaunojamo resursu ģeneratoru pieejamās jaudas un slodzes jaudas prognozēm. Tā kā atjaunojamo resursu ģeneratoru, saules bateriju un vēja turbīnu, jaudu tieši ietekmē tikai laika apstākļi, tad pieejamu jaudu ar noteiktu varbūtību var paredzēt, izmantojot meteoroloģisko prognozi, kuru iegūst, piemēram, attālināti pieslēdzoties laika apstākļu serverim. Informāciju par gaidāmo slodzes jaudu var sniegt pats elektroenerģijas patērētājs vai arī var pielietot adaptīvo vadību, kas pielāgojas patēriņa jaudas profilam, izmantojot, piemēram, neironu tīklus.

Tiek pētīti arī automātiskās algoritmi, kas izmanto dažādu elektroenerģijas uzkrāšanas tehnoloģiju īpatnības (maksimālais uzlādes/izlādes ciklu skaits, maksimālā strāva, pašizlāde). Piemēram, (Fakham et.al., 2011) piedāvā izmantot caur spēka interfeisu pieslēgtus superkondensatorus vidēji ilgu (līdz 30 min) līdzstrāvas kopnes sprieguma lēcienu kompensēšanai, lai nodrošinātu maksimāli augstu pastāvīgu akumulatora uzlādes līmeni un pasargātu to no pārlādēšanās. Modeļa realizācijai tāpat tika izmantota Matlab Simulink vide un tas tika eksperimentāli validēts ar saules baterijas, superkondensatoru un akumulatora kombinētās sistēmas mērogā samazinātu fizikālo modeli.

Salīdzinoši jauns virziens informācijas tehnoloģijās, kuru sāk pielietot arī procesu automātiskajā vadībā, ir intelektuālie aģenti un daudzģentņu sistēmas (Wooldridge and Jennings, 1995, Weiss, 1999). Augstākā līmeņa AVS, kas izmanto daudzģentņu pieeju kombinētajā elektroapgādē ir pētīta vairāku autoru darbos. Daudzģentņu vadības sistēma vedēja-sēkotāja līdzstrāvas kopnes arhitektūrai un mikrotīklu gadījumā vispārīgi apskatīta (Oyarzabal et.al., 2005, Lagorse et.al., 2010). Katru atjaunojamo resursu ģeneratoru vai uzkrājēju reprezentē intelektuālais aģents. Visu aģentņu uzdevums ir, neatkarīgi no lietotāja savā starpā komunicējot, izvēlēties stabilāko avotu, kas regulēs kopnes spriegumu, kā arī panākt optimālu strāvas dalīšanu un akumulatoru uzlādes režīmu. Daudzģentņu sistēmas vadītas līdzstrāvas kopnes izpēti un modeļa izstrādi veic (Zhenhua, 2008). Autors prezentē decentralizētu lēmumu pieņemšanas metodi ar individuālu programmatisko aģentņu vadītām iekārtām (akumulators, degvielas elements, saules baterija un elektriskā slodze), sistēmas darbības simulācija tiek veikta VTB (*Virtual Test Bed*) vidē. Tāpat pie daudzģentņu izmantošanas autonomās un tīklam pieslēgtās sistēmās (mikrotīklos) strādā arī (van Dam et.al., 2008), realizējot līdzīgu pieeju, izmantojot vairākus koģeneratorus. Intelektuālie aģenti tiek izmantoti arī tīklam pieslēgtu kombinētās elektroapgādes sistēmu (autori ievieš terminu “maza mēroga enerģijas zonas”) kompleksa līmeņa automātiskajā vadībā un kā elektroenerģijas tirgus dalībnieki, optimizējot enerģijas plūsmu no un uz kopējo elektrisko tīklu pēc maksimālās peļņas kritērija (Trichakis et.al., 2008).

Visos apskatītajos gadījumos elektroapgādes sistēmas augstākā līmeņa AVS ir nepieciešams sakaru interfeisi vai papildus programmatiskie moduļi, kuru realizācija ir IT nozares uzdevums. Ņemot vērā, ka kombinēto elektroapgādes sistēmu izpildiekārtu, vadības objektu un sensoru izvietojums ir teritoriāli dalīts, tad praktiskajā AVS realizācijā, kur programmatūra līdz ar to arī fiziski atrodas vairākās iekārtās, rodas nepieciešamība pēc ātriem un drošiem datu apmaiņas kanāliem (Osadčuks un Galiņš, 2009).

## 1.5. Automātiskās vadības kontūrs un tā daļu modelēšana un simulācija

Iepriekšējā nodaļā apkopoto kombinētās elektroapgādes segmentu un kompleksa līmeņa vadības risinājumu praktiskajā realizācijā neizbēgami palielināsies automātiskās vadības sistēmu sarežģītība, saglabājoties prasībām pret to drošumu, izstrādes laiku un izmaksām.

Līdz ar to rodas nepieciešamība pēc jaunām metodēm komplicētu sistēmu un to kontrolleru darbības izpētei un testēšanai.

### 1.5.1. HIL un SIL modeļi un simulācijas metodes

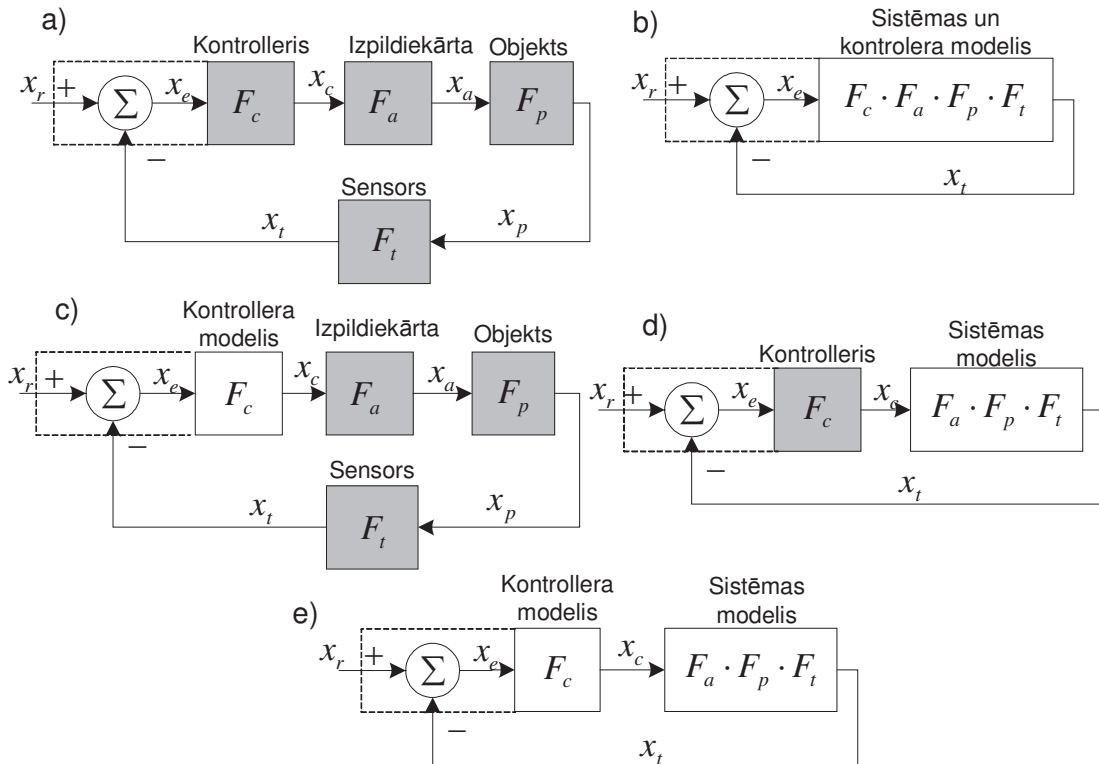
Zinātniskajā un praktiskajā literatūrā tiek apskatīta modeļu izstrādes un simulācijas metode, kura paredz atsevišķu vadības kontūra posmu, piemēram, vadības objekta vai sensora, aizvietošanu ar to virtuālajiem modeļiem – HIL (*Hardware In the Loop*), bet pārējās ir reālas iekārtas (Gomez, 2001, Dickens, 2005, Gutierrez, 2010). Galvenā HIL simulācijas ideja ir aizvietot vadības kontūra vienu vai vairākas tā posmus ar tādiem iekārtu virtuāliem modeļiem, kas spēj saņemt, apstrādāt un ģenerēt reālās sistēmas signālus atbilstoši modelētajam posmam ar noteiktu funkcionālu un laika precizitāti. Plašākā nozīmē HIL simulāciju definē arī kā metodi laika un resursu patēriņa ziņā efektīvai un vispusīgai sistēmas līmeņa iegulto automātiskās vadības iekārtu testēšanai ar testu automatizācijas un atkārtojamības iespēju (Ledin, 1999). Metodi izmanto procesu vadības sistēmu izstrādē un testēšanā, gadījumos, ja automātiskās vadības objekts ir komplicēta, konfigurācijas ziņā unikāla vai dārga sistēma, kuras darbināšana testa nolūkos nav iespējama, ir bīstama, resursietilpīga vai arī vēl atrodas izstrādes stadijā un nav pieejama (Ledin, 1999, Gomez, 2001).

Atkarībā no darba mērķa (vadības sistēmas izstrāde un testēšana, automātiskās vadības objektu, izpildiekārtu un sensoru darbības novērtēšana pie dažādiem vadības algoritmiem un režīmiem) HIL simulāciju iedala divās daļās: spēka un kontrollera HIL (Steurer et.al., 2007). Spēka HIL simulācija tiek lietota, kad nepieciešams pētīt automātiskās vadības kontūra izpildiekārtas, objekta un sensora posmus vai testēt automātiskās vadības algoritmus, izmantojot reālu sistēmu. Piemērs vienkāršam automātiskās vadības kontūram ar negatīvo atgriezenisko saiti dots 1.16. att., iekrāsotie posmi ir reālas iekārtas, neiekrāsotie – modeļi. Attēla (a) un (b) daļās parādītas reālas AVS un tās modelis viena objekta parametra regulēšanai. Praksē dotā metodika tiek izmantota arī komplicēto AVS ar vairākiem regulējamajiem parametriem izpētei un testēšanai.

Reālas vadības sistēmas visus posmus veido atsevišķas iekārtas, bet modelis tiek darbināts kā vienots vesels kontrolētā simulācijas vidē, piemēram, dinamisku sistēmu simulācijas vidēs Matlab Simulink vai Scilab Xcos.

Spēka HIL metode (1.16. att. (c)) paredz, ka kontrolleris ir lietotāja kontrolēts modelis, bet pārējā kontūra daļa – reālas iekārtas. Objekta regulējamā parametra stāvoklis  $x_p$  tiek nomērīts sensorā un padots kā atgriezeniskās saites signāls  $x_t$  uz kontrollera modeli, kur no  $x_t$  un regulējošā signāla  $x_r$  pēc dotā regulēšanas likuma tiek aprēķināts vadības iedarbes signāls  $x_c$ , kurš savukārt tiek padots uz izpildiekārtu vadības iedarbes  $x_a$  veikšanai objektā. Kontrollera modelis var tikt veidots kā dotam pētījuma objektam specifisks risinājums (piemēram, industriālais dators un speciāli izstrādāta programmatūra) vai jau gatavs produkts (piemēram, MathWorks Real Time Workshop un xPC rīki, (xPC Target. Perform..., 2010)), kuri nodrošina programmatiski realizētā kontrollera sasaisti ar izpildiekārtu un sensoru atbilstoši sistēmas funkcionālajām un reāllaika prasībām. Spēka HIL metode dod iespēju kontrolētos laboratorijas apstākļos

pētīt dažādu vadības algoritmu darbību sarežģītos scenārijos (lēcienvēda perturbāciju ietekme, kļūmes u.c.), kas potenciāli sniedz informāciju par reālās sistēmas darbību tās teorētisko modeļu pilnveidošanai un vadības algoritmu veikspēju (Steurer et.al., 2007). Vispusīgāk spēka HIL simulācijas pieeja un tās modifikācijas apskatītas ar spēka elektronikas iekārtu simulācijas piemēru, izmantojot VTB vidi (Lu et.al., 2007).



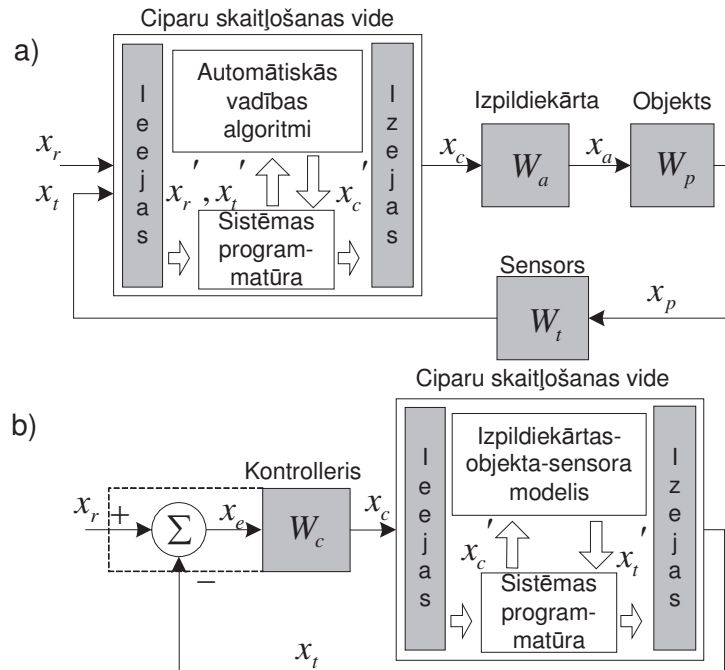
1.16. att. Automātiskās vadības kontūrs (a) ar atgriezenisko saiti, tā modelis (b), spēka HIL modelis (c), kontrolera HIL modelis (d) un SIL modelis (e)

Kontrolera HIL simulācijas modelis (1.16. att. (d)) tiek lietots, kad nepieciešams pētīt automātiskās vadības kontrolera darbību. Metode dod iespēju vispusīgi pārbaudīt gatava automātiskās vadības kontrolera darbību, iekļaujot tā aparatūras daļu (skaitļošanas mezgli, datu apmaiņas interfeisi ar vadības kontūru) un programmatūras daļu (iekārtu vadības dziņi, bibliotēkas un automātiskās vadības algoritmi) apstākļos, kas maksimāli pietuvināti reālai sistēmai (Steurer et.al., 2007). Kontroleris kā reāla iekārta tiek savienots ar pārējo automātiskās vadības kontūra posmu modeļiem, kuri tiek darbināti (simulēti) atsevišķā vidē. Spēka un kontrolera HIL simulācijas metodes ciparu skaitļošanas iekārtas izmantošanas detalizētāk parādītas 1.17. att.

Pirmajā gadījumā lietojuma līmenī ciparu skaitļošanas vide pilda kontrolera funkcijas, otrajā – izpildiekārtas, objekta un sensora modeļu simulāciju. Abos gadījumos tiek izmantota sistēmas programmatūra (modelēšanas programmatūra, operētājsistēma, dziņi) un aparatūriskie ieejas/izejas interfeisi (paplašinājuma plates ar analogciparu un ciparanalogiem pārveidotājiem, ciparu ieejas/izejas un komunikācijas portiem).

Pie HIL simulācijas metožu trūkumiem ir minams tas, ka simulācijas izpildes laikā parasti nav iespējams uz laiku apturēt procesus reālajā iekārtā, lai izdarītu izmaiņas vai fiksētu stāvokli modelētajā posmā. Tāpat ir problemātiski identificēt reālās iekārtas stāvokli, jo ir zināmi tikai tās ieejas un izejas signāli. Īpaši raksturīgi tas ir

kontrollera HIL simulācijai, kur ir nepieciešams pārbaudīt aparātiskā kontrollera darbību (Gomez, 2001).



1.17. att. Spēka (a) un kontrollera (b) HIL simulācija

Bez atsevišķu aparātisku vadības kontūra daļu aizvietošanas ar to modeļiem pastāv arī pilnībā programmatiskas vadības kontūra pētīšanas metodes SIL (*Software In The Loop*) (Youn u.c., 2007, Mauri, 2009) un MIL (*Model In The Loop*) (Plummer, 2006). MIL būtībā ir klasisks dinamiskais sistēmas un tās automātiskās vadības kontrollera modelis izstrādāts vienotā vidē, piemēram, Matlab Simulink. Turpretī SIL metode (skat. 1.16. att. (e) daļu) paredz izpildiekārtas, objekta un sensora modeļus veidot dinamiskās simulācijas vidē, bet kontrolleri realizēt kā atsevišķu programmu, piemēram, atsevišķā izpildfailā kompilētā no C valodas koda. Izpildes laikā kontrollera modelis tiek savienots ar dinamiskās sistēmas simulācijas vidi, izmantojot kādu no starpprogrammu datu apmaiņas mehānismiem (caur failu, MS ActiveX, OLE (*Object Linking and Embedding*), u.c.).

Ja HIL simulācijas metodēs, ņemot vērā to, ka tiek izmantotas reālas iekārtas, visi vadības kontūra posmi pamatā tiek pētīti reāllaika režīmā, tad simulācijas pēc SIL metodes var iedalīt gan reāllaika un funkcionālajās, gan tikai funkcionālajās (Youn et.al., 2007).

No apskatīto simulācijas metožu apraksta var secināt, ka HIL ir attiecināms pie sistēmu validācijas metodēm, bet SIL – pie verifikācijas.

### 1.5.2. Vadības kontūra daļu modelēšana kombinētās elektroapgādes pētījumos

Literatūrā ir apkopotas nozares, kurās mūsdienās biežāk tiek pielietotas HIL simulācijas metodes, kā arī tiek apsvērti potenciāli jauni virzieni: autoindustrijā elektronisko vadības mezglu izstrādē automašīnas transmisijā, bremžu sistēmā, hidrauliskajās sistēmās, klimatkontrolē; lielu ēku apsildes, ventilācijas un gaisa kondicionēšanas kontrolleru darbības testēšanā; aviācijā dzinēju vadības testēšanai, autopilotu izstrādē u.c. (Dickens, 2005).

Atjaunojamās enerģētikas iekārtu un DGS pētniecībā HIL un SIL simulācijas metodes tiek pielietotas salīdzinoši plaši. Atsevišķu DGS iekārtu ģenerējošo iekārtu un

tīkla pieslēguma simulācija izmantojot HIL metodi apskatīta (Steurer et.al., 2007). Autori veic pētījumus spēka un kontrolera HIL režīmā iekārtām ar jaudu līdz 5 MW: vēja un gāzes turbīnas ģeneratoriem, frekvenču pārveidotājiem u.c. Tāpat pie spēka interfeisu pētījumiem dalītajās ģenerēšanas sistēmās, izmantojot HIL metodes, tiek strādāts (Lu et.al., 2007, Mauri, 2009). Tiek pētītas arī atjaunojamās enerģijas elektromehāniskās sistēmas ar mērķi noskaidrot elektrisko mašīnu darbību slēgumā ar dažāda veida primārās mehāniskās enerģijas avotiem, piemēram, vēja vai hidroturbīna. Pētījuma objekts ir elektriskā mašīna, bet modelis – primārais mehāniskās enerģijas avots, praktiskajā realizācijā tas ir jaudas stends, piemēram (Galiņš un Leščevics, 2004, Osadčuks et.al., 2008, Bouscayrol et.al., 2006). Jaudas stenda gadījumā sistēmas posmu kontūrs nav noslēgts un satur tikai atsevišķu tā daļas, piemēram, vēja turbīnas matemātiskais modelis tiek izmantots, lai regulētu ar frekvenču pārveidotāju asinhrono motoru sinhronās mašīnas piedziņai. Mērķis ir noskaidrot sinhronās mašīnas darbības īpatnības ar dažādu konfigurāciju vēja turbīnām (Galiņš un Leščevics, 2004).

Autonomās kombinētās elektroapgādes sistēma, kas kā enerģijas avotus vienlaicīgi izmanto vairāku veidu atjaunojamo resursu veidus pēc būtības ir komplicēta sistēma ar stohastiskām perturbācijām, kas atbilst literatūrā apskatītajiem HIL un SIL izmantošanas gadījumiem. Tomēr jāatzīmē, ka literatūrā neparādās informācija par HIL un SIL metožu izmantošanu kombinētās elektroapgādes kompleksa un segmentu automatizācijas līmenī.

## Situācijas apskata kopsavilkums, darba mērķis un uzdevumi

No zinātniskās un nozares tehniskās literatūras analīzes var secināt, ka elektroenerģētikā atjaunojamais resursus izmantojošo spēkstaciju iekļaušana kopējā tīklā tiek organizēta galvenokārt vidējā sprieguma līmenī. Nākotnes elektroapgādes tīkli tiek orientēti uz dalīto ģenerēšanu un mikrotīkliem, kur uzsvars tiek likts nevis uz centrālajām spēkstacijām, bet uz plašā teritorijā izvietotām mazas jaudas, (dažādos avotos tiek minēts 1 – 1000 kW līdz 10 MW) spēkstacijām, kas darbojas no vēja, saules, biomasas u.c. lokāli pieejamajiem atjaunojamās enerģijas avotiem.

Viens no mikrotīklu attīstības virzieniem ir autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas bez pastāvīga tīkla pieslēguma. Ņemot vērā straujo atjaunojamās enerģētikas tehnoloģiju, īpaši saules bateriju, elektroķīmisko u.c. enerģijas uzkrāšanas veidu un elektronisko spēka interfeisu attīstību, autonomās elektroapgādes sistēmas kļūst par alternatīvu jauna elektriskā tīkla pieslēguma izbūvei mikro mēroga elektroapgādes sistēmām elektroenerģijas patērētājiem ar maksimālo vienlaicīgo jaudu līdz 50 kW (pēc Eiropas Parlamenta direktīvas 2004/8/EK klasifikācijas), piemēram, nelieli lauksaimniecības kompleksi, fermas, siltumnīcas, viensētas, tūrisma objekti, pētnieciskās stacijas u.c. Kā papildus faktors, kas var sekmēt elektroenerģijas ražošanas attīstību no lokāli pieejamiem resursiem, ir elektrotransporta attīstība, kas izmanto ātrās uzlādes akumulatorus. Tā rezultātā var būtiski palielināties noslodze uz esošo elektroapgādes tīklu maksimālās noslodzes stundās.

Ir veikti plaši zinātniskie pētījumi saistībā ar dažādu avotu izmantošanu kombinētajā tajā skaitā arī autonomajā elektroapgādē. Galvenie pētījumu virzieni saistās ar tīkla elektrisko parametru regulēšanu un elektriskajiem pārejas procesiem tipveida dalītās ģenerēšanas tīklos, elektronisko spēka interfeisu slēgumiem, to darbības ietekmi uz tīkla parametru kvalitāti, tiek piedāvāti dažādi automātiskās vadības algoritmi un stratēģijas uzkrājēju un papildus ģeneratoru optimālai izmantošanai, piemēram, atjaunojamo resursu enerģijas pieejamības un jaudas patēriņa prognozēšana. Tiek arī pētītas metodes optimālas spēka iekārtu kombinācijas izmantošanai dotajos apstākļos (resursu pieejamība, slodze profils, ekoloģiski un tiesiskie ierobežojumi u.c.).

Kombinēto elektroapgādes tīklu un to automātiskās vadības sistēmu pētījumos plaši tiek lietotas dažādas modelēšanas metodes un datorsimulācija. Viena no metodēm ir automātiskās vadības kontūra posmu modelēšana, t.i. atsevišķi vadības kontūra posmi, piemēram, kontrolleris vai objekts ir reālas iekārtas, bet pārējie – ar speciāliem vadības un/vai spēka signālu interfeisiem pievienoti datorā simulētie virtuālie modeļi. Līdzīgi savstarpēji tiek apvienoti arī pilnībā virtuāli modeļi, piemēram, AVS objekta modelis realizēts dinamiskās simulācijas vidē, bet kontrollera programmatiskais modelis kā atsevišķa programma. Jāatzīmē, ka zinātniskajā literatūrā šī pieeja nav apskatīta tieši autonomās kombinētās elektroapgādes segmentu un kompleksa līmeņa vadības algoritmu un stratēģiju pētījumos.

Atkarībā no lokāli pieejamiem resursiem un elektriskās slodzes grafika, autonomajos tīklos ir iespējams liels skaits dažādu iekārtu kombināciju gan funkcionāli, gan jaudas ziņā.

**Līdz ar to ir izvirzīta darba hipotēze:** izmantojot modelēšanas pieeju, kur kontrolleris ir reāla iekārta vai atsevišķa datorprogramma, un AVS objekts ir virtuāls vai fizikāls modelis, iespējams kontrolētos apstākļos pilnveidot esošos un izstrādāt jaunus kompleksa un segmentu līmeņa vadības algoritmus un stratēģijas konkrētajai autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas konfigurācijai.



Tāpat šī pieeja dotu iespēju vispusīgi pārbaudīt kontrolera darbību dažādos režīmos, pie mainīgas slodzes un pieejamās atjaunojamo ģeneratoru jaudas, kā arī nestandarta situācijās: neparedzēti ģenerētās/patērētās jaudas lēcieni, avārijas situācijas u.c. Izstrādātā un modelētā vidē testētā AVS programmatūra bez būtiskām izmaiņām var tik izmantota reālu izpildiekārtu vadībai.

**Zinātniskā darba mērķis:** izveidot autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas automātiskās vadības imitāciju modeļu kopu, kas dod iespēju novērtēt un pilnveidot vadības algoritmus atjaunojamo energoresursu izmantošanas efektivitātes paaugstināšanai lauku teritorijās.

#### **Darba mērķa sasniegšanai izvirzīti un risināti sekojoši uzdevumi.**

1. Izstrādāt metodiku autonomās kombinētās elektroapgādes enerģijas plūsmas vadības algoritmu darbības modelēšanai.
2. Izstrādāt un eksperimentāli validēt līdzstrāvas kopnes spēka interfeisu, ģeneratoru un enerģijas uzkrājēju imitāciju modeļus.
3. Izstrādāt autonomās kombinētās elektroapgādes kompleksa un segmentu līmeņa automātiskās vadības sistēmas un modelēto iekārtu klašu programmatūras objektu modeli.
4. Izstrādāt līdzstrāvas kopnes un spēka interfeisu fizikālos modeļus samazinātā mērogā, ar kura palīdzību pārbaudīt automātiskās vadības sistēmas objektu modeļa darbību reāllaikā.
5. Aprobēt izstrādāto modeļu kopu lauksaimniecības objekta autonomās vēja, saules un iekšdedzes motora ģeneratora kombinētās elektroapgādes sistēmas simulācijā un analizēt automātiskās vadības algoritmu darbību pēc atjaunojamo resursu kombinētās izmantošanas efektivitātes kritērija.

#### **Pētījuma ierobežojumi un priekšlikumi turpmākajam darbam.**

1. Pētījumā apskatītas mikro mēroga autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas ar centralizēto līdzstrāvas kopni un kopējo vienlaicīgo jaudu līdz 50 kW.
2. Darbā veiktos pētījumus var turpināt, papildinot elektroapgādes sistēmas modeli ar papildus elektriskām komponentēm (maiņstrāvas kopnes, tīkla pieslēgums, dažādi enerģijas uzkrāšanas veidi) un neelektriskās enerģijas veidu komponentēm (multiģenerēšana un enerģijas veidu pārveidošana), kā arī veikt modeļu validāciju ar pilna mēroga autonomu kombinētu elektroapgādes sistēmu.

## **2. AUTONOMĀS KOMBINĒTAS ELEKTROAPGĀDES SISTĒMAS, TĀS VADĪBAS PĒTĪJUMI UN MODEĻU IZSTRĀDE**

Darbā autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas izpildiekārtu un AVS modeļu kopas izstrādē izmantota atsevišķu vadības kontūra daļu – modelēšanas un simulācijas metodes ar pilnībā programmatiskajiem modeļiem (SIL) un fizikāliem modeļiem (spēka daļas HIL metode).

AVS kontrollera programmatiskā modeļa izstrādei ir lietota Microsoft .NET Framework vide, kas nodrošina plašas iespējas koda atkārtotai izmantošanai uz vairākām programmatiskajām platformām un pieļauj programmatūras izstrādi, izmantojot modeļu vadītu arhitektūru. Tajā skaitā arī iegultajos automātiskās vadības kontrolleros un industriālajos datoros, izmantojot .NET Compact Framework (.NET Framework Conceptual..., 2011). Līdz ar to SIL režīmā testēto vadības programmu ar minimālām izmaiņām ir iespējams lietot gatavā kontrollera iekārtā. AVS kontrollera programma rakstīta valodā C#. Kombinēto resursu tipa dalītās ģenerēšanas sistēma ar centrālo līdzstrāvas kopni, kuras automātiskā vadība ir jārealizē, tika veidota kā modelis Matlab Simulink dinamiskās modelēšanas vidē.

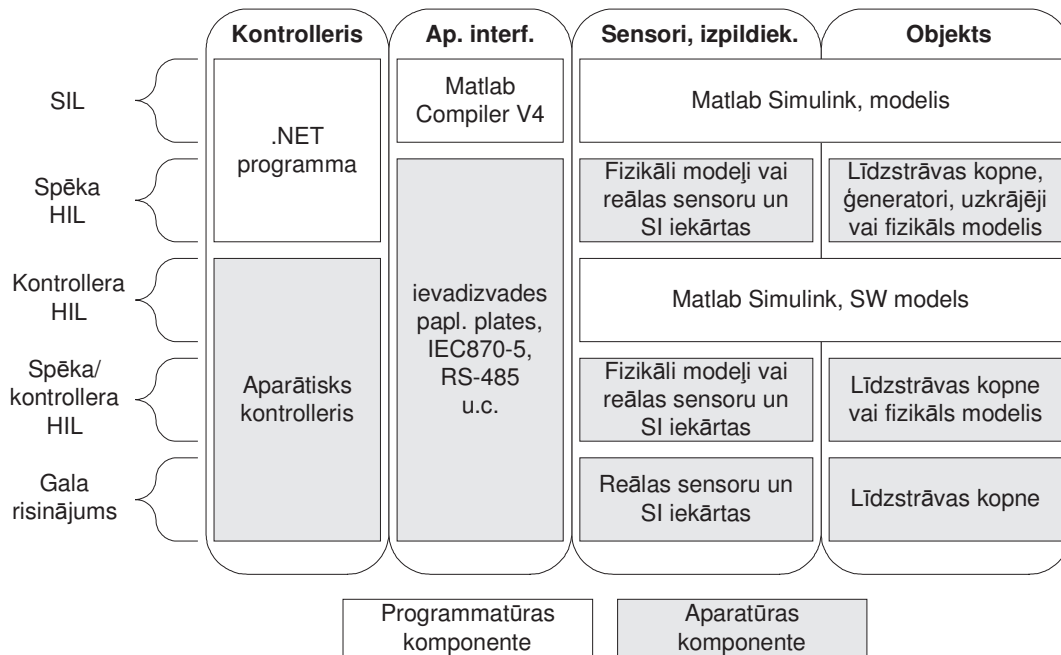
Lai realizētu vadības kontūra daļu modelēšanas metožu izmantošanu AVS darbības novērtēšanai, izstrādāta universāla Simulink bloku bibliotēka, kas dod iespēju simulēt dažādas elektroapgādes sistēmas izpildiekārtu konfigurācijas sasaistē ar .NET vidē realizēto automātiskās vadības kontrolleri. Bibliotēka ietver: līdzstrāvas kopnes, vienvirziena un divvirziena darbības spēka interfeisus, konstantas pretestības un konstantas jaudas slodzes, ķīmiskā akumulatora, fotoelektriskā ģeneratora (saules baterijas), vēja ģeneratora un iekšdedzes motora ģeneratora imitāciju modeļu blokus. Jāatzīmē, ka modeļu veidošanā Simulink vidē netika izmantotas pielietojuma specializētās bloku bibliotēkas, līdz ar to piedāvātie modeļi var tikt realizēti, tajā skaitā brīvi pieejamās dinamiskās simulācijas vidēs, piemēram, Scilab Xcos (Scilab. Free Open..., 2011). Simulācija Simulink vidē tiek veikta pa periodiem. Vadības programma nolasa datus katra perioda beigās un padod regulējošo iedarbi uz modeli nākamā perioda sākumā. Starp abām vidēm realizēts interfeiss, kas ļauj mainīt abu modeļu konfigurāciju un iestatījumus starp simulācijas iterācijām. Visas Simulink modeļu simulācijas tika veiktas, izmantojot mainīgu soli un “ode23tb” risinājuma algoritmu. Tā kā SIL režīmā .NET programma veic datu apmaiņu ar Simulink modeli tikai pēc simulācijas perioda beigām, tad netiek ņemta vērā kontrollera reāllaika darbība, t.i. tiek pētīta tikai kontrollera funkcionalitāte. SIL simulācijas metode, ievērtējot kontrollera programmatūras koda reāllaika izpildes īpašības sīkāk ir apskatīta (Youn et.al., 2007).

Darbojoties SIL režīmā, tiek uzkrāta visa informācija par modeļa darbību: katra bloka ieejas un izejas signālu dinamiskās raksturlīknes un inerciālie stāvokļi. Pie tam simulācijas laikā tiek uzkrāta arī tāda informācija, kura reālām iekārtām praksē nav pieejama vai ir tehniski sarežģīti iegūstama. Piemēram, ķīmiskā akumulatora precīza uzlādes pakāpe. HIL režīmā darbības signāli tiek iegūti no reālu mēraparātu rādījumiem vai izpildiekārtu ar iegulto vadības kontrolleri (piem., spēka interfeisu) ciparu datu apmaiņas interfeisiem.

### **2.1. Autonomās kombinētās elektroapgādes un AVS modeļu izstrādes metodiskā struktūra**

Kopējā autora piedāvātā vadības sistēmu modelēšanas struktūra parādīta 2.1. att. Aparātiskās un programmatiskās komponentes ir strukturētas pa rindām, vienlaicīgi parādot dažādus simulācijas veidus un attiecīgi orientējošus posmus sistēmas izstrādes

laikā. Kolonnās attēlotas AVS sistēmas komponentu grupas: kontrolleris; aparatūras interfeiss kontrollera datu apmaiņai ar pārējām vadības kontūra iekārtām; sensori un izpildiekārtas; automatiskās vadības objekts.



2.1. att. **SIL un HIL metožu izmantošana centralizētās līdzstrāvas kopnes kombinētās elektroapgādes sistēmas AVS darbības pētīšanai dažādos izstrādes posmos**

Attēlā dotie katra posma komponentu piemēri izmantoti darbā kombinētās elektroapgādes sistēmas SIL un HIL simulācijas modeļu izstrādē. 2.4.5. un 4.2. nodaļās apskatīta simulācija SIL režīmā, eksperimentālā validācija spēka HIL režīmā apskatīta 3.1. nodaļā. 3.2. nodaļā apskatīta reāla sistēma, kas sastāv no akumulatora, slodzes, saules baterijas un uzlādes kontrollera. Tika eksperimentāli pētīta tās darbība un rezultātos iegūtie dati izmantoti līdzstrāvas kopnes, spēka interfeisa, akumulatora un saules baterijas modeļu validācijai.

## 2.2. Autonomās kombinētas elektroapgādes sistēmas un vadības kontūra imitāciju modelis ar AVS interfeisu

Ģeneratoru, uzkrājēju un patērētāju apvienošanai ir izmantota līdzstrāvas kopne. Kopne modelēta kā elektriskais kontūrs ar paralēli slēgtiem avotiem un patērētājiem, kopnes kapacitāte ir konstants lielums. Darba ietvaros nav sīkāk pētīti jautājumi saistībā ar elektroenerģijas pārvadi, līdz ar to vadītāju pretestība un induktivitāte nav ņemta vērā. Vispārīga līdzstrāvas kopnes ekvivalentā shēma parādīta 2.2. att.

Galvenais līdzstrāvas kopnes regulējamais parametrs ir spriegums  $U_{dc}$ . Spriegumu kopnē ar kapacitāti var atrast, integrējot avotu un slodžu strāvu summu pēc laika un dalot ar kopnes kapacitāti (Shenkman, 2005):

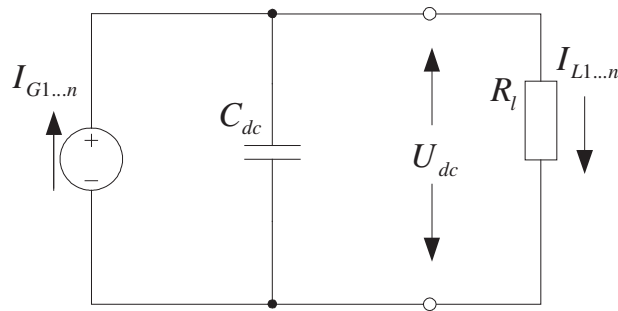
$$U_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int (\sum I_{Gi} - \sum I_{Li}) dt, \quad (2.1)$$

kur  $U_{dc}$  – līdzstrāvas kopnes spriegums;

$C_{dc}$  – līdzstrāvas kopnes kapacitāte;

$I_{Gi}$  – līdzstrāvas avotu strāvas;

$I_{Li}$  – slodžu strāvas.

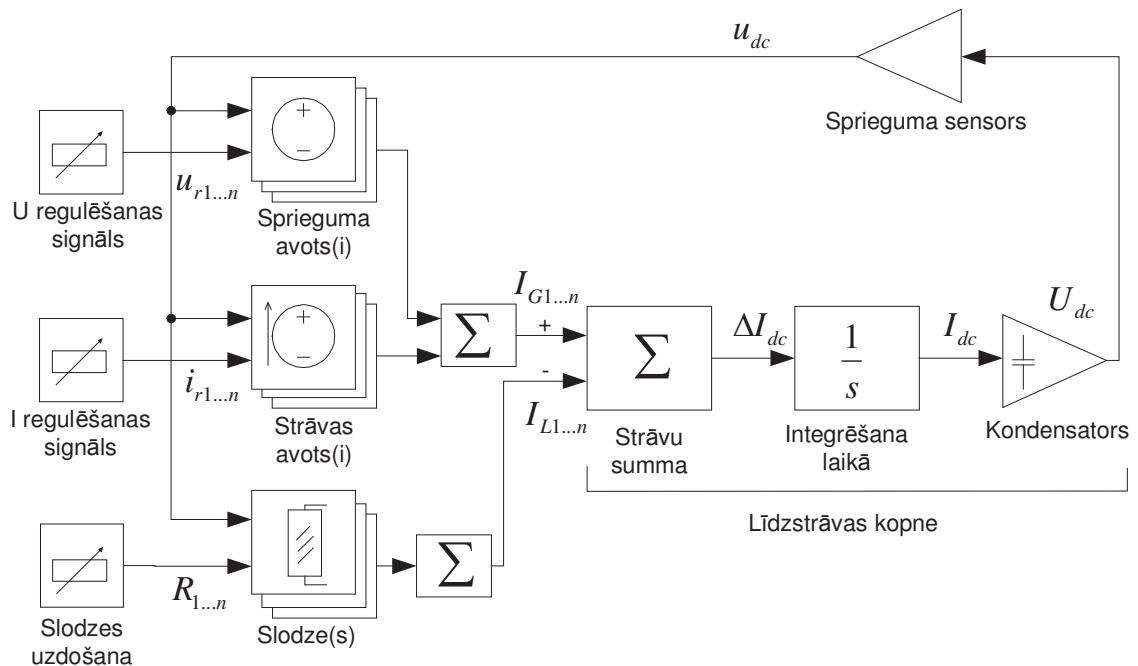


2.2. att. Līdzstrāvas kopnes ekvivalentā shēma

Kopnes un spēka interfeisu modeļi tika izstrādāti Matlab Simulink vidē. Tā kā pētījumā ir paredzēts modelēt kombinētās elektroapgādes sistēmas darbību dažādām līdzstrāvas kopnes konfigurācijām, tad kopējais sistēmas modelis tika sadalīts atsevišķās komponentēs: sprieguma un strāvas avoti, patērētāji un līdzstrāvas kopne.

Līdzstrāvas kopnes kombinētās sistēmas modelis tika izstrādāts trīs soļos. Pirmajā solī tika izveidota līdzstrāvas kopne ar avotiem, kam ir attiecīgi strāvas vai sprieguma ieeja un ir pieejama neierobežota jauda. Otrajā solī avotiem tika ieviests jaudas ierobežojums, kuru nosaka pievienotā ģenerators jauda. Trešajā solī sprieguma un strāvas avoti tika apvienoti spēka interfeisa iekārtu modeļos ar atsevišķu vadības ieeju kontrolera pieslēgšanai. Spēka interfeisu modeļi veidoti tā, lai varētu organizētu 1.4.2. nodaļā apskatītos paralēlu sprieguma un strāvas avotu slēgumus un realizēt atbilstošās kopnes sprieguma regulēšanas metodes.

Funkcionālā blokshēma kombinētajai elektroapgādes sistēmai ar līdzstrāvas kopni pirmajā solī parādīta 2.3. att. Sistēma sastāv no viena vai vairākiem sprieguma un strāvas avotiem, kā arī paralēli slēgtām slodzēm.



2.3. att. Līdzstrāvas kopnes modeļa funkcionālā blokshēma

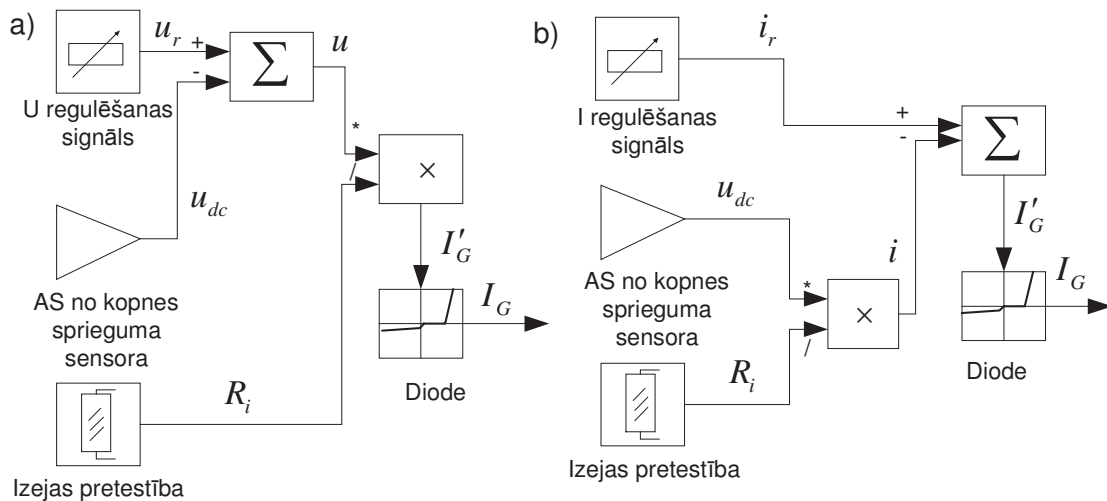
Kopnes spriegums  $U_{dc}$  tiek aprēķināts attiecībā pret kopējo nulles punktu. Strāvas un sprieguma avotiem var individuāli uzdot atbalsta vērtības, bet slodzēm norādīt

konstantu pretestību vai jaudu (skat. 2.2.2. nodaļu).  $U_{dc}$  caur atgriezenisko saiti tiek pievienots visiem avotiem un slodzēm, kur tiek aprēķinātas attiecīgās izejas strāvas.

### 2.2.1. Vienvirziena darbības spēka interfeisu modeļi

Vienvirziena darbības spēka interfeiss nodrošina elektriskās enerģijas plūsmu tikai vienā virzienā. Šajā nodaļā modelēti spēka interfeisi elektriskās enerģijas padošanai no ģeneratoriem un uzkrājējiem uz līdzstrāvas kopni, tie ietver regulējamus taisngriežus un līdzstrāvas pārveidotājus.

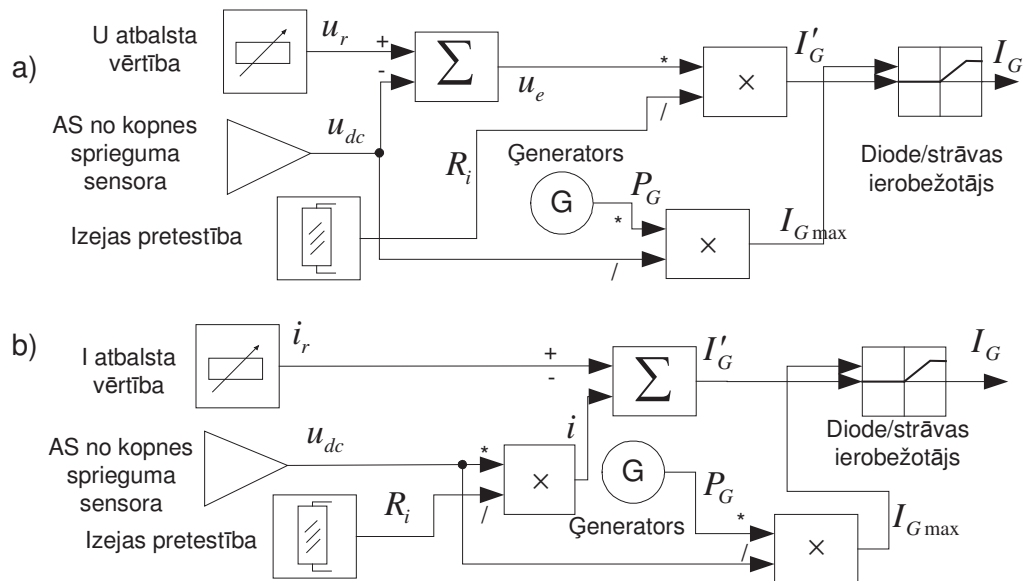
Sprieguma avots ar virknē slēgtu pretestību un strāvu  $I_G$  kā izeju realizēts atbilstoši blokhēmai 2.4. att., (a). Ieejas ir uzdotais spriegums (atbalsta vērtība)  $u_r$ , izejas virknes pretestība  $R$ , un atgriezeniskā saite caur sensoru no kopnes sprieguma  $u_{dc}$ , t.i. spriegums izejā tiek noturēts ar strāvas palīdzību un proporcionāla regulēšana notiek pēc kopnes sprieguma  $U_{dc}$ . Papildus modelī paredzēta virknē vadāmības virzienā slēgta diode, kuru modelē kā ideālu elementu bez sprieguma krituma. Diode nodrošina, ka avots nestrādā patērētāja režīmā. Taisngriešanu realizē ar nelineāra izeju piesātinājuma bloka palīdzību.



### 2.4. att. Sprieguma (a) un strāvas (b) avota funkcionālā blokhēma

Strāvas avota (2.4., b att.) ieejas ir uzdotā izejas strāva (atbalsta vērtība)  $i_r$ , kopnes spriegums atgriezeniskā saitē  $u_{dc}$  un paralēli slēgtā izejas pretestība  $R_i$ . Izejas strāva  $I_G$  tiek iegūta pēc oma likuma. Līdzīgi kā sprieguma avotam izejā tiek ieslēgta diode. Slodžu strāva izejā tiek aprēķināta no  $U_{dc}$  atgriezeniskās saites un uzdotās aktīvās pretestības. Paralēli slēgtām slodzēm strāvas summē ar pretējo zīmi ar ģeneratoru strāvām.

Lai ierobežotu sprieguma un strāvas avotu izejas jaudu atkarībā no uzdotās pieejamās ģeneratora jaudas  $P_G$ , izmantots nelineārs funkcijas bloks ar dinamisku augšējā līmeņa piesātinājumu (*saturation dynamic*), skat. 2.5. att. Maksimālo izejas strāvu  $I_{max}$  iegūst no pievadītās jaudas un pašreizējā sprieguma kopnē un salīdzināta ar attiecīgā avota izejas strāvu  $I'_G$  un izmanto, lai aprēķinātu avota izejas strāvu  $I_G$ , izmantotas sakarības (2.2) sprieguma avotam un (2.3) strāvas avotam.



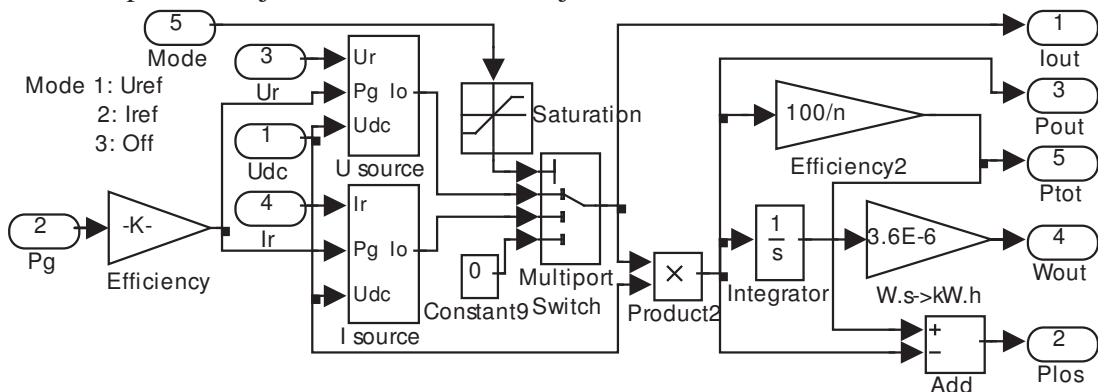
2.5. att. Sprieguma (a) un strāvas (b) avoti ar ģenerators jaudas ieeju

$$I_G = \begin{cases} \frac{u_r - u_{dc}}{R_i}, & \text{ja } I'_G < \frac{P_G}{u_{dc}} \\ \frac{P_G}{u_{dc}}, & \text{ja } I'_G \geq \frac{P_G}{u_{dc}} \end{cases}, \quad (2.2)$$

$$I_G = \begin{cases} i_r - \frac{u_{dc}}{R_i}, & \text{ja } I'_G < \frac{P_G}{u_{dc}} \\ \frac{P_G}{u_{dc}}, & \text{ja } I'_G \geq \frac{P_G}{u_{dc}} \end{cases}, \quad (2.3)$$

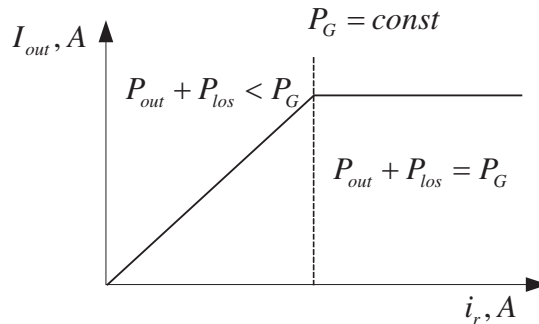
kur  $u_r, i_r$  – sprieguma un strāvas regulēšanas signāli;  
 $u_{dc}$  – kopnes sprieguma atgriezeniskās saites signāls;  
 $I'_G$  – izejas strāva;  
 $I_G$  – pēc ģenerators jaudas ierobežotā izeja strāva;  
 $P_G$  – ģenerators jauda;  
 $R_i$  – iekšējā pretestība.

Sprieguma un strāvas avoti ar ierobežotu maksimālo izejas jaudu izmantoti līdzstrāvas pārveidotāju modelēšanai nākamajā solī, skat. 2.6. att.



2.6. att. Līdzstrāvas pārveidotāja Simulink modelis ar konstantu lietderības koeficientu

Apskatītājā līdzstrāvas pārveidotāja modelī ir iespējami trīs darba režīmi: izeja ar sprieguma regulēšanu, izeja strāvas regulēšanu, kā arī atslēgta (augstas pretestības) izeja. Atbilstošie avoti ir pieslēgti ģenerators jaudas signālam un režīmu pārslēdz caur multipleksoru. Tāpat ir iespējams norādīt pārveidotāja lietderības koeficientu un izejā iegūt zudumu jaudu. Līdzsprieguma pārveidotāja modelī ir izmantoti sprieguma un strāvas avoti ar ģenerators jaudas ieeju (skat. 2.5. att.) un šāda veida spēka interfeiss patērēs ģenerators jaudu mazāku vai vienādu ar momentāno  $P_G$ , izejas strāvas statistiskā raksturlīkne atkarībā no uzdotās parādīta 2.7. att.



2.7. att. Modelētā līdzstrāvas pārveidotāja izejas strāva no uzdotās strāvas

Ģenerators slodzes atgriezeniskās saites nodrošināšanai pārveidotājam ir kopējās jaudas izeja  $P_{tot}$ , kas ir izejas jaudas  $P_{out}$  un zudumu jaudas  $P_{los}$  summa. Ar kopējās jaudas izejas palīdzību ir iespējams norādīt kopējo elektrisko slodzi uz pārveidotājam pieslēgto ģenerators. Pārveidotāja enerģijas daudzuma izeja  $W_{out}$  (kWh) parāda uz līdzstrāvas kopni padoto enerģijas daudzumu kopš simulācijas sākuma, neskaitot zudumus  $P_{los}$  (siltuma, pusvadītāju slēdžu komutācijas u.c. atkarībā no realizācijas). Pārveidotāja darbības efektivitāti definē ar konstantu lietderības koeficientu  $\eta$ . Funkcijas piesātinājuma bloks “Saturation” modeļa režīma norādes “Mode” ieejā nepieciešams, lai norādītu noklusēto režīmu (1 – sprieguma regulēšana) un nodrošinātu nekļūdīgu multipleksora bloka darbību pie Simulink modeļa “getInitialState” metodes (atgriež inerciālo bloku sākuma nosacījumus) izsaukšanas no Matlab darba vides (skat. 2.2.4. nodaļu).

Līdzstrāvas pārveidotāja spēka interfeisa modeļa ģenerators jaudas ieejā  $P_G$  tiek uzdots maksimālā no ģenerators pieejamā jauda. Līdz ar to līdzstrāvas pārveidotāja modeli ir iespējams izmantot kā universālu spēka interfeisu, kas ar  $P_G$  signālu var saņemt pieejamo jaudu gan no līdzstrāvas, gan maiņstrāvas avotiem. Līdzstrāvas avotu gadījumā, piemēram, fotoelektriskais ģenerators vai degvielas elements, spēka interfeisa modeli var pieņemt kā līdzstrāvas pārveidotāju, bet pie maiņstrāvas avota, piemēram, vēja turbīnas vai dīzeļģenerators darbināta sinhronā ģenerators spēka interfeiss darbojas kā barošanas taisngriezis ar regulētu izejas spriegumu. Ģenerators modelēšana un pieslēgšana līdzstrāvas kopnei, izmantojot apskatīto spēka interfeisa modeli, sīkāk apskatīta 2.4. nodaļā.

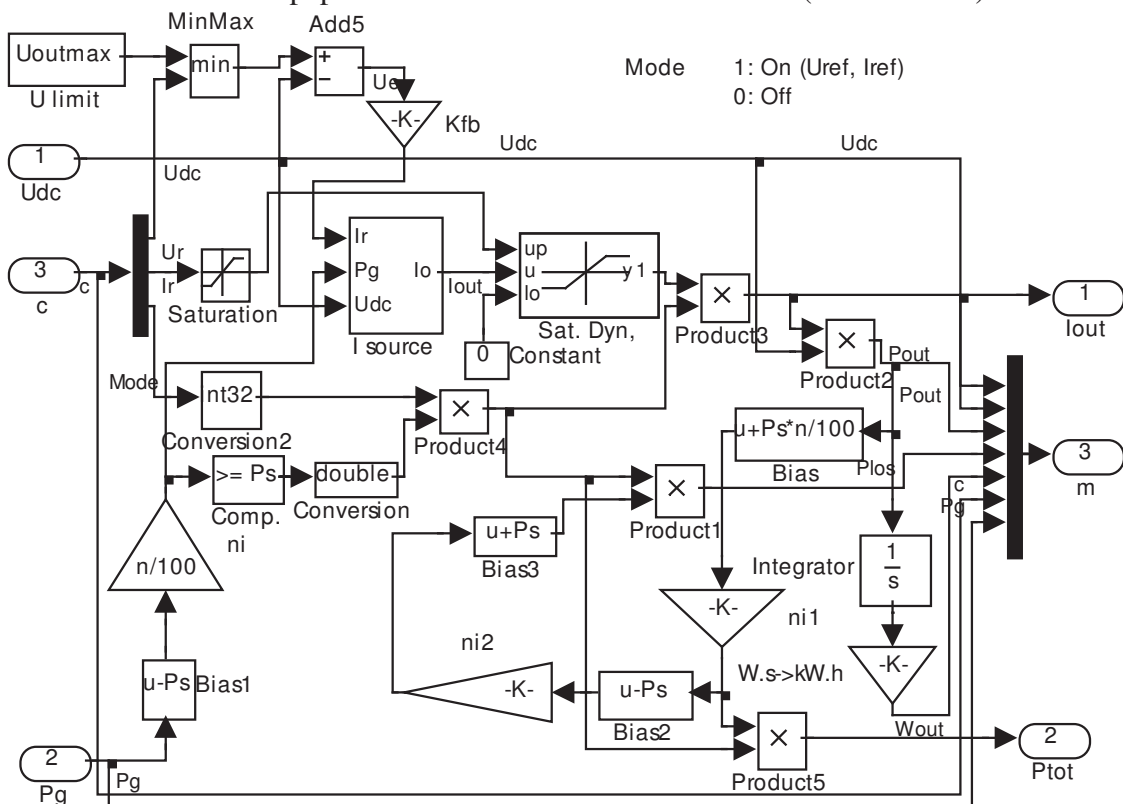
Lai būtu iespējams modelēt ķīmisko akumulatoru uzlādes kontrolleru darbību ar iepriekš apskatīto spēka interfeisa modeļa palīdzību, tas ir jāpapildina ar iestatāma maksimālā sprieguma un strāvas ierobežojuma funkciju. Tas ir nepieciešams, lai varētu nodrošināt dažādus līdzstrāvas kopnē tieši ieslēgtu akumulatoru uzlādes režīmus un pasargāt akumulatorus no uzlādes parametru pārsniegšanas (maksimālā sprieguma un pieļaujamās uzlādes strāvas).

Maksimālā sprieguma un strāvas iestatīšanai modelī tika apskatīti divi varianti: ar pārslēgšanos starp sprieguma un strāvas avotiem pie sasniegtā limita un ar sprieguma

regulētu strāvas avotu jeb strāvas avotu ar negatīvu sprieguma regulēšanas atgriezenisko saiti.

Pirmajā variantā spēka interfeisa izeja tiek vadīta ar sprieguma avotu, kamēr netiek sasniegts iestatītais strāvas ierobežojums. Brīdī, kad, spēka interfeisam darbojoties sprieguma avota režīmā, kopnē tiek patērēta strāva lielāka par iestatīto ierobežojumu, izejas regulēšana pārslēdzās uz strāvas avotu, kuram iestatīts dotais ierobežojums. Pretēji notiek ar sprieguma ierobežojumu: ja spēka interfeisam darbojoties strāvas avota režīmā tiek pārsniegts kopnes spriegums, izejas regulēšana pārslēdzas uz sprieguma avotu ar doto ierobežojumu. Simulācijas rezultātā atklājās, ka pie maksimālā sprieguma ierobežojuma pārveidotāja izejas spriegums un strāva sāk periodiski svārstīties. Tas izskaidrojams ar augstas frekvences pārslēgšanos starp sprieguma un strāvas avotu jeb starp strāvas izejas un sprieguma ierobežošanas stāvokļiem. Pārslēgšanās frekvence ir atkarīga no kopnes kapacitātes un slodzes. Līdz ar to simulācijas laikā automātiski tiek samazināts Simulink aprēķina solis, kas paildzina kopējo simulācijas laiku, kas ir galvenais šīs varianta trūkums.

Lai to novērstu, otrajā variantā spēka interfeisa izejā tika atstāts tikai konstants strāvas avots, kura atbalsta vērtību sprieguma izejas režīmam uzdod caur negatīvu atgriezenisku saiti no kopnes sprieguma, veidojot sprieguma regulētu strāvas avotu, bet maksimālo strāvu – ar papildus nelineāro ierobežošanas bloku (skat. 2.8. att.).



2.8. att. Spēka interfeisa modelis ar sprieguma regulētu strāvas avotu izejā un konstantu iekšējo pretestību

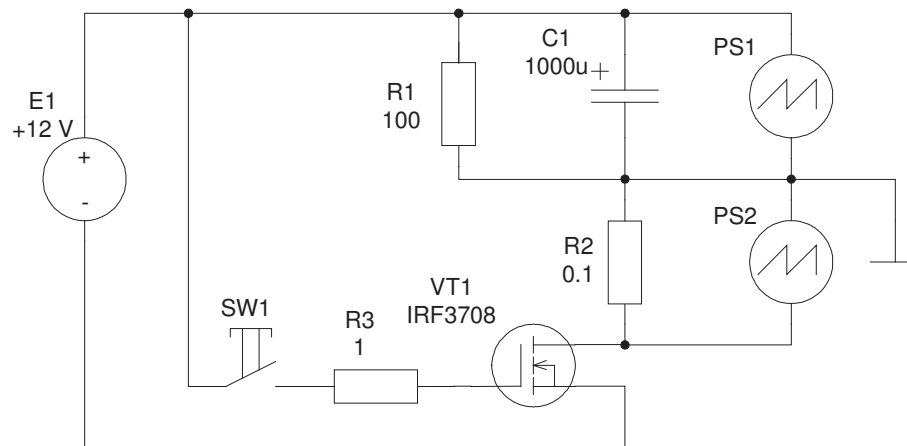
Šādā slēgumā modeļa ieejā ir jānorāda atbalsta spriegums un strāva, izejas ierobežošana tiek veikta pie mazākā regulējamā parametra, t.i., ja  $I_{out} \geq i_r$ , tad izeja tiks noturēta  $i_r$  līmenī, samazinot  $U_{dc}$ , bet, ja  $u_r \geq U_{dc}$ , tad  $-U_r$  līmenī, samazinot  $I_{out}$ . Līdz ar to iekārtai ir tikai divi darba režīmi: izejas regulēšana pēc uzdotajiem parametriem (ieslēgts) un augstas pretestības izeja (izslēgts). Tāpat tiek ņemti vērā arī konstanti tehniskie maksimālās strāvas un sprieguma ierobežojumi  $U_{outmax}$ ,  $I_{outmax}$ . Negatīvās



atgriezeniskās saites pastiprinājuma koeficients (2.8. att. bloks “Kfb”) nosaka regulēšanas statisko un dinamisko precizitāti: lielākas vērtības – lielāks pārregulējums, bet mazāka statistiskā kļūda, mazākas – samazinās pārregulējums, palielinoties statistiskajai kļūdai. Bez tam koriģētajā modelī vadības iedarbes ieejas signāli un mērījumu nolasīšanas izejas signāli tika organizēti kopņu veidā ar signālu multiplexoru palīdzību, lai atvieglotu shēmu veidošanu un unificētu modeļa sasaisti ar ārējām sistēmām. Visi izejas signāli tiek padoti kā masīvs portā “m”. Spēka interfeisam ir pievienots arī papildus parametrs – pašpatēriņš,  $P_s$ , kas ir konstants lielums un raksturo zudumus pārveidotāja automatiskās vadības, attālinātās vadības un monitoringa, dzesēšanas u.c. no slodzes tieši neatkarīgu apakšsistēmu barošanai.  $P_s$  tiek atņemts no pieejamās ģenerators jaudas  $P_G$ , tādējādi papildus ierobežojot sprieguma un strāvas avotu izejas. Kopnes, spēka interfeisu u.c. iekārtu, to signālu un parametru kopsavilkums dots 2.2. tabulā.

Spēka interfeisu modeļi ir pamatā turpmāk darbā apskatītajiem centralizētās līdzstrāvas kopnes kombinētās elektroapgādes sistēmām, tāpēc modeļu darbība pārbaudīta, salīdzinot to izejas dinamisko raksturlīkni pārejas procesā ar reāla sprieguma avota darbību lēcienveida slodzes izmaiņas brīdī.

Ekspērimētā izmantots līdzstrāvas barošanas avots Advantec PS3030. Slēguma shēma dota 2.9. att. Mērījumi – kopnes spriegums (uz slodzes) un strāva caur šuntu R2 – nolasīti, izmantojot osciloskopu.



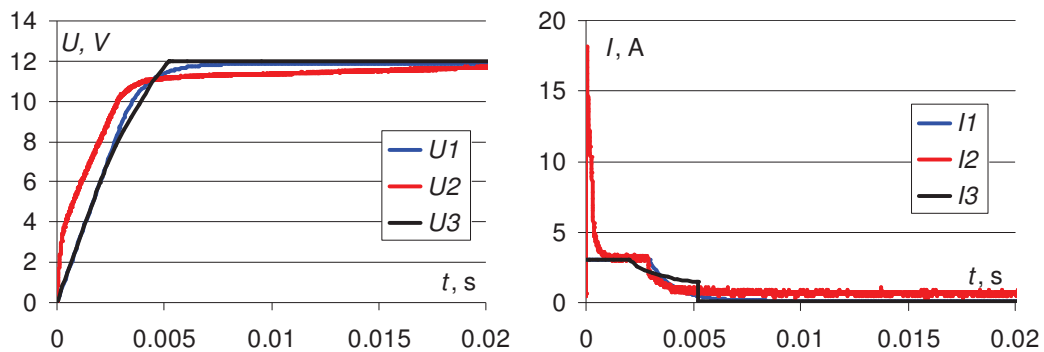
2.9. att. Līdzsprieguma barošanas avota shēma spēka interfeisa modeļu validācijai

Tika izpildīts scenārijs, kur sprieguma avota atbalsta vērtība iestatīta uz 12 V, pieslēgta līdzstrāvas kopne, kas sastāv no slodzes un paralēli slēgta kondensatora un uzņemts pārejas process. Veikta simulācija ar spēka interfeisu, kura pamatā ir sprieguma avots; spēka interfeisu ar sprieguma regulētu strāvas avotu un fizikālo modeli. Izmantota sekojoša iekārtu konfigurācija un iestatījumi:

- sprieguma izejas atbalsta vērtība  $u_r = 12$  V;
- strāvas izejas atbalsta vērtība  $i_r = 3$  A (šajā gadījumā – strāvas ierobežojums);
- slodze  $R = 100$   $\Omega$ ;
- kapacitāte kopnē  $C_{dc} = 1000$   $\mu$ F;
- modeļa ar sprieguma avotu iekšējā pretestība  $R_{iu} = 1.1$   $\Omega$  (iekļaujot šuntu);
- modeļa ar sprieguma regulētu strāvas avotu iekšējā pretestība  $R_{ii} = 100$  k $\Omega$ .

Simulācijas rezultāti parādīti 2.10. att. Fizikālajam modelim 90 % no iestatītās vērtības tiek sasniegts pēc 3.5 ms, bet 98.4 % pēc 24.6 ms. No grafika var redzēt, ka pārejas procesa sākumā reālam sprieguma avotam fizikālajā modelī ir strāvas lēcien

(18.1 A), kuru izraisa barošanas bloka izejas kondensatoru izlāde, iestatītā strāvas ierobežojuma vērtība tiek sasniegta tikai pēc 0.9 ms. Pēc pārejas procesa beigām fiksēta 1.6 % statistiskā kļūda. Modelī ar sprieguma avotu 90 % no iestatītās vērtības sasniegts pēc 4.1 ms, 99 % – pēc 7.5 ms, bet strāvas ierobežošana līdz 3 A tiek piemērota jau pašā procesa sākumā un atslēgta, kad izejas spriegums sasniedzis 74.8 % no iestatītās vērtības, statistiskā kļūda pārejas procesa beigās – 1.1 %. Modelī ar sprieguma regulētu strāvas avotu (atgriezeniskās saites pastiprinājums – 1000) 90 % tiek sasniegti pēc 4.7 ms, 99 % – pēc 5.4 ms, statistiskā kļūda – 0.1 %.



2.10. att. Pārejas procesa simulācija

$U_1, I_1$  – spēka interfeisa modelim ar sprieguma avotu;  $U_2, I_2$  – fizikālajam modelim;  
 $U_3, I_3$  – spēka interfeisa modelim ar sprieguma regulētu strāvas avotu

Grafiski var redzēt, ka reālo procesu labāk modelē pārveidotājs ar sprieguma avotu, taču, kā tika apskatīts iepriekš, tā izmantošana modelī ir sarežģīta un paildzina simulāciju, jo ir nepieciešams organizēt maksimālā sprieguma ierobežošanu strāvas izejas režīmam, un tas ir jākombinē ar strāvas avotu. Tāpēc spēka interfeisa modeļos izmantoti sprieguma regulēti strāvas avoti.

### 2.2.2. Slodžu un divvirzienu darbības spēka interfeisu imitācijas modeļi

Kombinētās elektroapgādes sistēmas modelī kā patērētāji tiek apskatītas pasīvas līdzstrāvas slodzes pieslēgtas tieši kopnei un aktīvas slodzes – līdzstrāvas pārveidotāj un invertori. Slodžu izejas strāvas līdzstrāvas kopnē tiek atņemtas no ģeneratoru kopējās strāvas, tāpat slodžu patērētās jaudas un enerģija pretēji iepriekš apskatītajiem kopnes avotiem arī ir negatīvi lielumi.

Pasīvas slodzes modelis veidots, izmantojot Oma likumu. Pretestība tiek norādīta ar atsevišķu ieeju kā konstants lielums, Matlab vides datu rinda, reprezentējot kādu slodzes profilu u.tml., vai arī ar signālu no AVS, imitējot reostatu. Bloka izeja ir pretestībā plūstoša strāva,  $I_{out}$  kuru aprēķina, izmantojot atgriezenisko saiti no kopnes sprieguma un maina zīmi ar bloku “Invert”, lai kopnes sprieguma aprēķina integrāli tā tiktu atņemta, t.i. modelis darbojas kā strāvas patērētājs (skat. 2.11. att., a). Modelim ir viena vadības ieeja slodzes attālinātai ieslēgšanai *Mode* (0 – izslēgts, 1 – ieslēgts), strāvas izeja pieslēgšanai pie spēka kopnes un kontroles signālu izeja uz AVS atgriezenisko saiti. Kontroles signāli ietver izejas strāvu  $I_{out}$ , A, slodzē patērēto jaudu  $P_{out}$ , W, lietderīgi patērēto enerģiju kopš simulācijas sākuma  $W_{out}$ , kWh un darba režīma vadības ieejas vērtību. Strāva, jauda un enerģija ir negatīvi lielumi.

Aktīvie patērētāji jeb slodžu spēka interfeisi nodrošina elektriskās enerģijas ar nepieciešamajiem parametriem pārvadīšanu no centrālās līdzstrāvas kopnes (spriegums, strāva, frekvence) uz dažādām slodzēm. Izmantojot dažādas konfigurācijas pusvadītāju pārveidotājus, neatkarīgi no sprieguma līmeņa svārstībām galvenajā kopnē noteiktās

robežās ir iespējams nodrošināt atbilstošu parametru elektroenerģiju izejā. Tāpēc aktīvais patērētājs tika modelēts kā konstantas jaudas patērētājs (2.11. att., b), t.i. notur konstantu jaudu  $P_{out}$  pie mainīga kopnes sprieguma  $U_{dc}$ , regulējot izejas strāvu  $I_{out}$ . Papildus ar konstantu parametru var norādīt patērētāja lietderības koeficientu, pēc kura modelis aprēķina un padod uz izeju zudumu jaudu. Slodzē patērētā strāva  $I_{out}$  jau iekļauj zudumus. Modelī pielietotās sakarības dotas (2.4).  $P_{load}$  bloka ieejā tiek uzdots kā pozitīvs lielums, taču tālāk aprēķinos tam maina zīmi, lai iegūtu negatīvus  $I_{out}$  kopnes sprieguma aprēķinam un slodzes jaudas un enerģijas mērījumus. Zudumu jauda ir pozitīvs lielums.

$$I_{out} = \frac{-P_{load} \left( 2 - \frac{\eta}{100} \right)}{U_{dc}}$$

$$W_{out} = 3.6 \cdot 10^{-6} \int_0^{t_{sim}} U_{dc} I_{out} dt, \quad (2.4)$$

$$P_{los} = \left( 2 - \frac{\eta}{100} \right) P_{load} - P_{load}$$

kur  $t_{sim}$  – simulācijas laiks, s  
 $\eta$  – spēka interfeisa lietderības koeficients, %

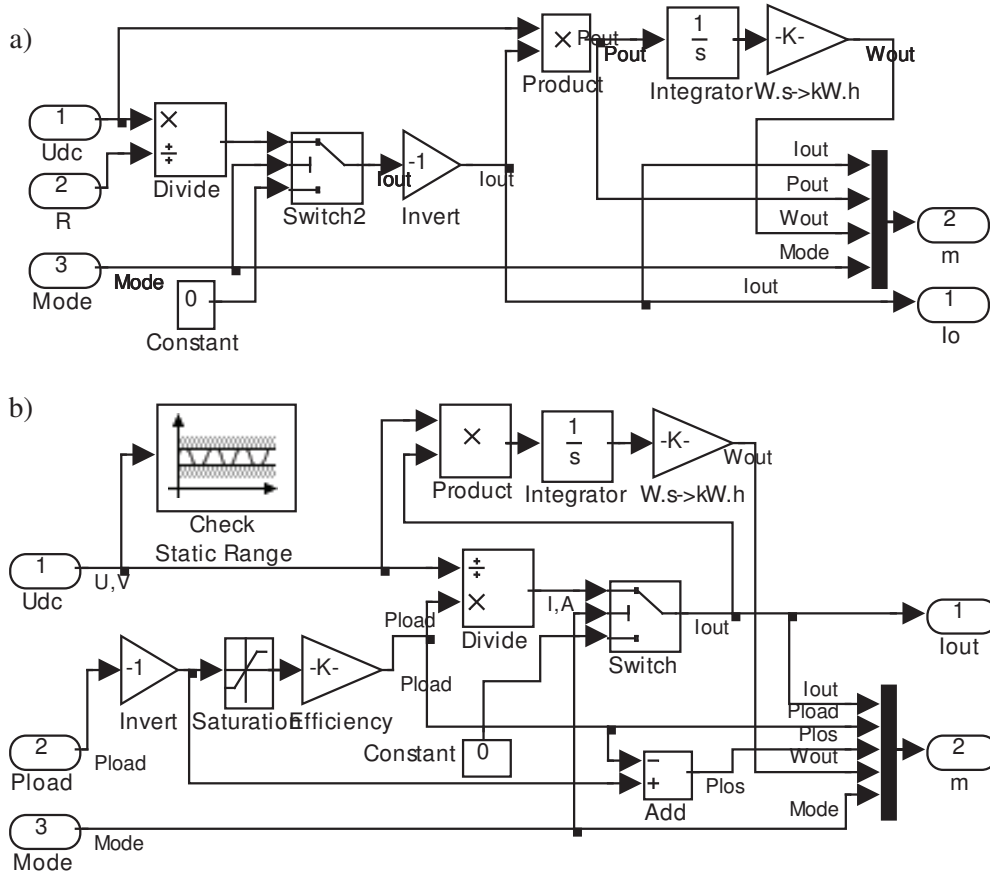
Modeļa ieejā uzdod kopnes spriegumu, pieprasīto patērētāja jaudu  $P_{load}$ ,  $W$  un vadības ieeju  $Mode$  ar tiem pašiem signāliem kā konstantas pretestības patērētājam. Izejā ir centrālajā kopnē patērētā strāva  $I_{out}$ ,  $A$  un kontroles signālu vektors: izejas strāva, pieprasītā patērētāja jauda, spēka interfeisa zudumu jauda  $P_{los}$ ,  $W$ , lietderīgi patērētā enerģija kopš simulācijas sākuma  $W_{out}$ , kWh un darba režīms  $Mode$ . Maksimālo pieprasīto jaudu  $P_{load}$  ieejā ierobežo ar piesātinājuma bloku.

Reālos spēka interfeisos tehniskajā dokumentācijā bez nominālā arī uzdod minimālo un maksimālo ieejas spriegumu, kurus pārsniedzot nav iespējams nodrošināt izejā elektroenerģiju ar definētiem parametriem. Ja šis diapazons centrālajā kopnē tiek pārsniegts, tas nozīmē, ka nav izpildīts AVS uzdevums –  $U_{dc}$  līmeņa nodrošināšana. Šajā gadījumā nav nozīmes turpināt simulāciju un tā tiek pārtraukta, izmantojot modeļa verifikācijas bloku  $U_{dc}$  signāla diapazonam. Simulācija tiek pārtraukta, ja  $U_{dc} \notin [U_{dc \min}; U_{dc \max}]$ .

Uzkrāt elektroenerģiju kombinētajā sistēmā ar līdžstrāvas kopni var divos veidos: izmantojot kopnē tieši slēgtus akumulatorus, kuru spriegums atbilst pārējo kopnē slēgto iekārtu nominālajam spriegumam vai izmantojot speciālus spēka interfeisus, kurš apvieno gan elektroenerģijas avota, gan patērētāja elementus un nodrošina enerģijas plūsmu gan virzienā uz centrālo kopni, gan uz uzkrājēju. Divvirzienu darbības spēka interfeisa modelis parādīts 2.12. att. Šeit un turpmāk “virzienā uz kopni” nozīmē, ka enerģijas plūsma spēka interfeisā ir no uzkrājēja uz kopni, bet “virzienā no kopnes” nozīmē, ka enerģijas plūsma ir no kopnes uz uzkrājēju.

Modelis sastāv no iepriekš apskatītajiem divvirziena spēka interfeisa un aktīvā patērētāja blokiem. Ieejā ir kopnes spriegums  $U_{dc}$ , pieejamā ģeneratora jauda  $P_G$ , jauda virzienā no kopnes  $P_{load}$  un vadības signālu masīvs  $c$ , kurš ietver  $u_r$ ,  $i_r$ , atbalsta vērtības virzienā uz kopni un no kopnes noņemamās un uz uzkrājēju padodamās jaudas atbalsta vērtību  $p_r$ , kā arī darba režīma ieeju  $Mode$  (0 – izslēgts, 1 – ieslēgts un darbojas virzienā uz kopni, 2 – ieslēgts un darbojas virzienā no kopnes).

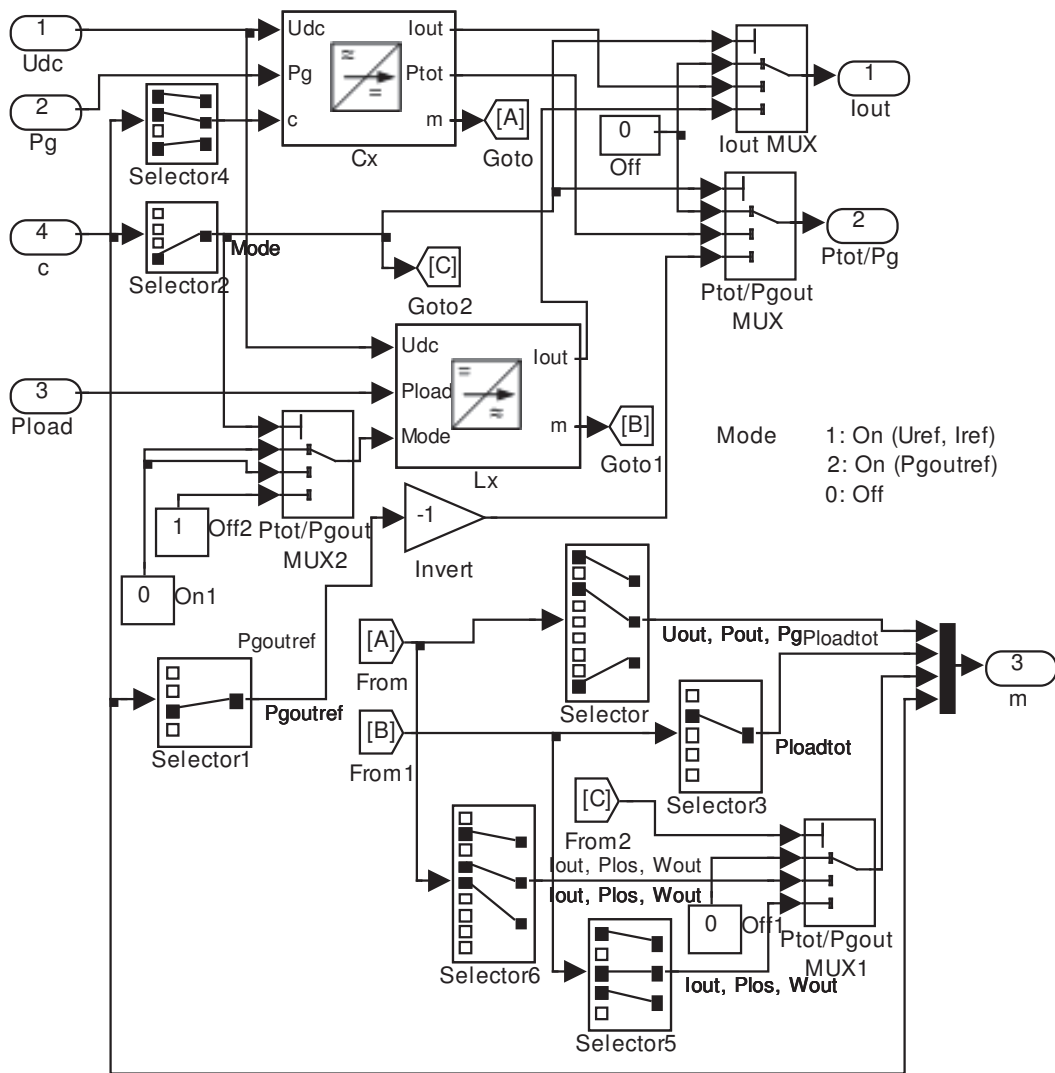
Modeļa izejas ir kopnē padotā vai patērētā strāva  $I_{out}$  un jaudas  $P_{tot}/P_G$ . Izejas signālu zīme ir atkarībā no darba režīma.  $P_{tot}$  parāda jaudu, ar kuru interfeiss slogo uzkrājēju,  $P_G$  – uzkrājēja uzlādei pieejamā jauda. Izeja  $P_{tot}/P_G$  nodrošina no kopnes patērētās un piegādātās jaudas signālu plūsmu uz pieslēgto ģeneratoru vai uzkrājēju. Kad spēka interfeiss darbojas virzienā no kopnes,  $P_{tot}/P_G < 0$  jeb uzkrājējs tiek uzlādēts un  $P_G$  ir konstanta uzdotā jaudas atbalsta vērtība, tā parāda jaudu, kura ir pieejama uzlādei. Kad spēka interfeiss darbojas virzienā uz kopni,  $P_{tot}/P_G > 0$  jeb uzkrājējs tiek izlādēts, signāls ir izejas elektriskās jaudas un zudumu jaudas summa no bloka “Cx”.



2.11. att. Slodze ar konstantu pretestību (a) un ar konstantu jaudu (b)

Kontroles izejā tiek apvienoti iepriekš aprakstītie abu pamatbloku kontroles mērījumu signāli, izņemot  $U_{out}$ ,  $P_{los}$  un  $W_{out}$ , kuri tiek multipleksēti abiem blokiem kopā un vadības signāla vektora kopiju, kura tiek padota no kopējās ieejas “c”. Kontroles signāls  $P_{tot}$  parāda kopējo no ģeneratora paņemto jaudu,  $P_{out}$  – spēka interfeisa izejas elektrisko jaudu, bet  $P_{loadtot}$  reprezentē no kopnes paņemto jaudu. Tāpat tiek apvienoti vienvirziena spēka interfeisa un slodzes parametri:  $R_{ii}$ ;  $P_s$ ;  $U_{outmax}$ ;  $I_{outmax}$ ; (darba režīmam virzienā uz kopni);  $P_{chmax}$ ;  $U_{inmin}$ ;  $U_{inmax}$  un lietderības koeficients  $\eta$  (%), kas attiecas uz darba režīmu virzienā no kopnes.

Enerģijas izeja  $W_{out}$  tiek integrēta neatkarīgi katram darba režīmam un kā signāls ir nolasāma tikai attiecīgajā režīmā. Divvirzienu spēka interfeisa pievienošana uzkrājējam parādīta 2.15. att., divvirzienu spēka interfeiss – BC1 un uzkrājējs – A1.

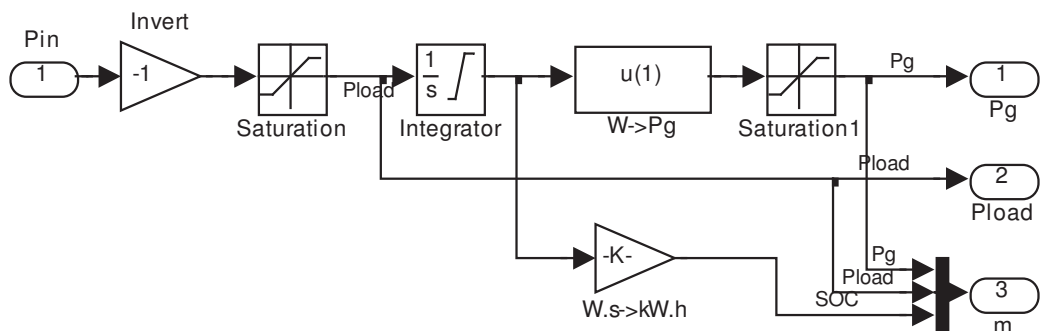


2.12. att. Divvirzienu darbības spēka interfeisa modelis

Lai pārbaudītu divvirzienu pārveidotāja darbību šajā modelēšanas posmā, tika izstrādāts vispārīgs ideāla uzkrājēja modelis. Uzkrājējs satur vienu jaudas ieeju, kuru ierobežo, lai modelētu maksimālo un minimālo uzkrājēja uzlādes jaudu, un maina zīmi, lai saskaņotu enerģijas integratoru ar divvirzienu spēka interfeisa izejas signālu  $P_{tot}/P_G$ , t.i.,  $P_{in} < 0$  uzlādei un  $P_{in} > 0$  – izlādei. Integratora vērtība parāda enerģijas daudzumu uzkrājējā,  $Ws$ . Funkcija  $P_G(W)$  aprēķina maksimālo pieejamo uzkrājēja izlādes jaudu  $P_G$  atkarībā no uzkrātās enerģijas daudzuma absolūtajās vienībās –  $SOC$ , kWh.  $P_G$  ierobežo līdz uzdotai maksimālai izlādes jaudai  $P_{dchmax}$  ar “Saturation1” un pievieno attiecīgajai divvirzienu spēka interfeisa ieejai. Izeja paredzēta spēka interfeisa darba režīmam virzienā uz kopni.

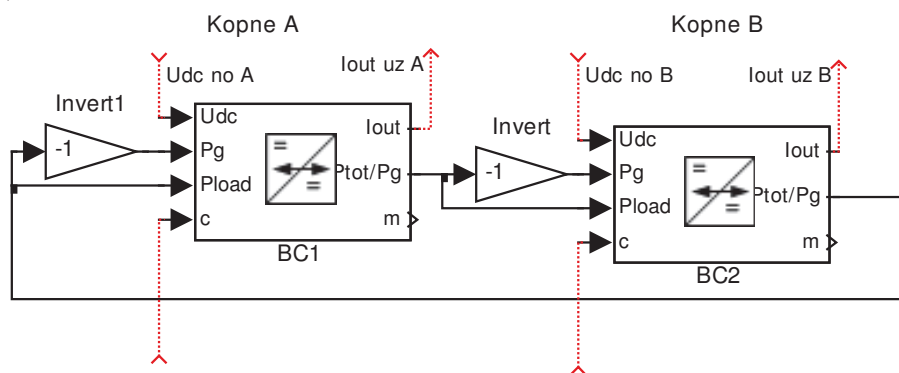
Izeja  $P_{load}$  parāda uzkrājēja uzlādei vai izlādei reāli patērēto jaudu (zīme pretēja  $P_G$ ). Signālu ierobežo “Saturation” bloks pēc robežām  $P_{dchmax}$  (maksimālā izlādes jauda) un  $P_{chmax}$  (maksimālā uzlādes jauda).

Uzkrājējam nav vadības signālu, uzlādes/izlādes procesu vada caur spēka interfeisu (praktiski tas tiek realizēts kā uzlādes kontroleris, piemēram, akumulatoram). Uzkrājējam nav vadības ieeju. Kontroles signālu vektorā “m” iekļauti pašreizējais uzkrātais enerģijas daudzums  $SOC$ . Vispārīgs ideāla uzkrājēja modelis parādīts 2.13. att.



2.13. att. Ideāla uzkrājēja modelis

Divvirzienu spēka interfeisa modelis veidots tā, lai to varētu izmantot ne tikai ar uzkrājējiem, bet arī pāros, kas dod iespēju paplašināt kombinētās elektroapgādes sistēmas modeli un organizēt divvirzienu enerģijas plūsmu starp divām kopnēm (skat. 2.14. att.).



2.14. att. Divu centrālo kopņu saslēgšanas koncepts ar divvirzienu darbības spēka interfeisu modeļiem

Šajā gadījumā vienam pārveidotājam vienmēr jādarbojas ģenerators režīmā, bet otram – patērētāja režīmam, t.i. *Mode* vadības signāliem jābūt pretējās fāzēs vai abiem izslēgtiem. Ieejas signāli  $P_{load}$  un  $P_G$  tiek ņemti vērā atbilstoši darba režīmam.  $P_G$  papildus tiek invertēts, jo sapārotā spēka interfeisa  $P_{tot}/P_G$  izeja ir negatīva, ja tas noņem jaudu no kopnes un padod uz otru pārveidotāju. 2.1. tabulā dota abu spēka interfeisu vadības signālu patiesumvērtību tabula un atbilstošā enerģijas plūsma starp kopnēm A un B.

Modelī savienojumam starp divām kopnēm tiek izmantoti divi nodalīti divvirzienu darbības spēka interfeisi, taču praktiskā realizācijā tā var būt viena iekārta. Jaudas signālus starp spēka interfeisiem var izmantot arī, lai modelī apvienotu līdzstrāvas un maiņstrāvas kopnes, taču tad ir jāveido spēka interfeisa modelis ar maiņstrāvas izeju (spriegums, strāva, frekvence, fāze).

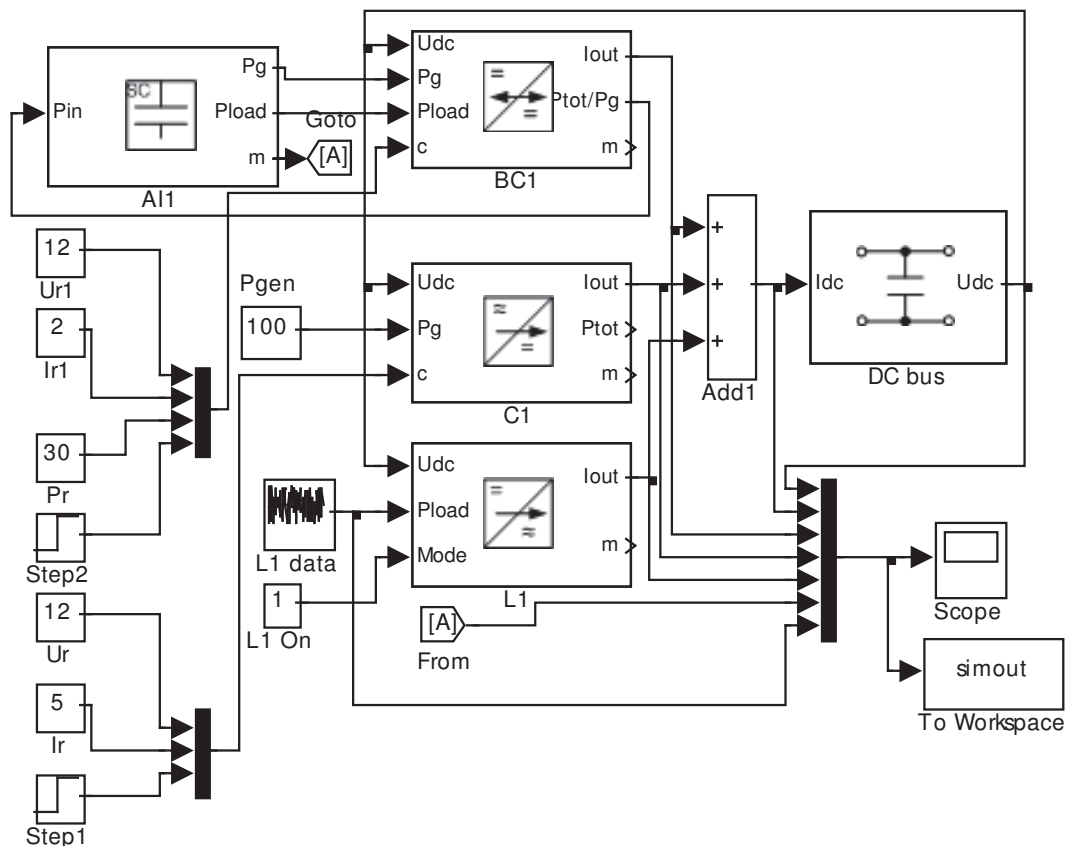
2.1. tabula

Pārī slēgto divvirzienu darbības spēka interfeisu vadības signālu patiesumvērtību tabula

BC1 signāli				BC2 signāli				Enerģijas plūsma starp kopnēm
<i>Mode</i>	$P_G$	$P_{load}$	$P_{out}$	<i>Mode</i>	$P_G$	$P_{load}$	$P_{out}$	
1	>0	N/A	>0	2	N/A	>0	$-p_r$	B→A
2	N/A	>0	$-p_r$	1	>0	N/A	>0	A→B
0	N/A	N/A	0	0	N/A	N/A	0	N/A

### 2.2.3. Kombinētās elektroapgādes sistēmas imitāciju modeļa kopskats

Šajā nodaļā dots kopsavilkums par līdzstrāvas kopnes iekārtu modeļiem, izveidots autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas abstrakts modelis HPS0 (skat. 2.15. att.). Modelī iekļauti: līdzstrāvas kopnes bloks “DC bus” vienvirziena darbības spēka interfeiss (līdzstrāvas pārveidotājs vai regulējams taisngriezis) C1 ar pieslēgtu ģeneratoru “Pgen” bloku ar maksimālo jaudu 100 W; pastāvīgi ieslēgta slodze L1, slodzes lielumu uzdod ar vienmērīgi sadalītu gadījuma skaitli intervālā 5..20 W ar diskretizācijas periodu 10 s; divvirzienu spēka interfeiss (divvirzienu līdzstrāvas pārveidotājs vai regulējams taisngriezis/invertors) un ideāls uzkrājējs ar maksimālo uzlādes/izlādes jaudu 100 W. Abiem spēka interfeisiem strāvas izejas iekšējā pretestība  $R_{ii} = 10^5 \Omega$ , pašpatēriņš  $P_s = 0.2 \text{ W}$ , izejas  $U_{max} = 60 \text{ V}$ ,  $I_{max} = 10 \text{ A}$ , BC1 efektivitāte virzienā no kopnes un slodzes pārveidotāja efektivitāte  $\eta = 95 \%$ . Visām iekārtām padoti vadības signāli – atbalsta vērtības un režīma pārslēgi. Kopnes kapacitāte ir 1000  $\mu\text{F}$ .

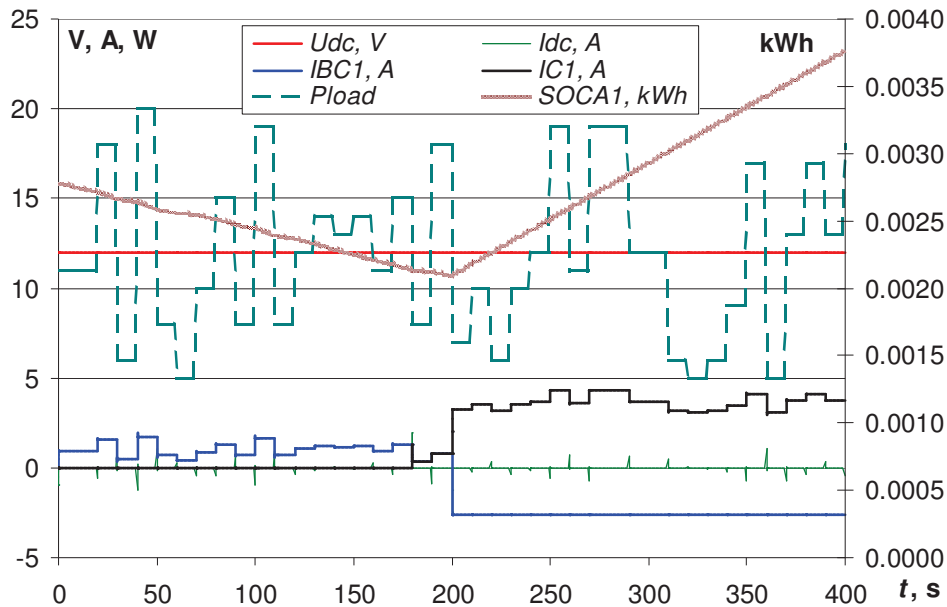


2.15. att. Abstrakts līdzstrāvas kopnes modelis HPS0 ar spēka interfeisu, slodzi un ideālu uzkrājēju

Shēmas darbības scenārijs ir sekojošs. Kopējais simulācijas ilgums – 400 s. Sākuma nosacījumi: BC1 – sprieguma avota režīmā ar  $u_r = 12 \text{ V}$  un strāvas ierobežojumu  $i_r = 2 \text{ A}$ , C1 – izslēgts, slodze L1 – ieslēgta, uzkrājējs A1 – ar 2.78 Wh sākuma enerģijas līmeni. Pēc 180 s tiek pieslēgts C1 ar  $u_r = 12 \text{ V}$ ,  $i_r = 5 \text{ A}$ . Vēl pēc 20 s BC1 tiek pārslēgts patērētāja režīmā ar  $p_r = 10 \text{ W}$  un sāk lādēt uzkrājēju (skat. 2.16. att.). Pieslēdzoties C1 180. sekundē (pie slodzes 8 W) pēc pārejas procesa uzdoto kopnes spriegumu 12 V joprojām notur BC1 ar strāvu 0.35 A, pārejas procesa laikā C1 kompensē BC1 izeju un C1 izejas strāva statistiskā režīmā arī kļūst 0.35 A (notiek avotu

strāvu dalīšana). Slodzes strāva pie uzdotās jaudas 8 W un 5 % zudumiem blokā L1 ir  $-0.7$  A.

Pēc 200 simulācijas sekundēm BC1 tiek pārslēgts uz virzienu no kopnes un sāk lādēt A1 ar jaudu  $p_r = 30$  W. No kopnes tiek patērēta konstanta strāva  $-2.63$  A, kopā ar 5 % zudumiem pie kopnes sprieguma 12 V tiek patērēti 31.5 W. Lādēšanas un kopnes slodzes jaudu (7 W 200. sekundē) kompensē C1 ar 3.25 A. Uzkrājējs līdz 200. sekundei izlādējās līdz 2.09 Wh, simulācijas beigās uzkrājējā ir 3.76 Wh.



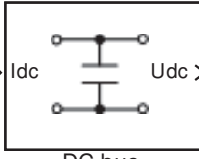
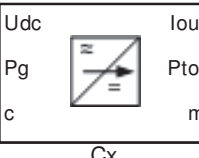
2.16. att. Abstraktas sistēmas simulācijas rezultāti

$U_{dc}$  – kopnes spriegums;  $I_{dc}$  – kopnes strāva;  $I_{BC1}, I_{C1}$  – attiecīgo spēka interfeisu strāvas;  $SOC_{A1}$  – enerģijas daudzums uzkrājējā;  $P_{load}$  – slodzes jauda

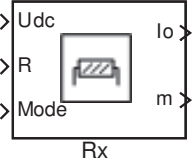
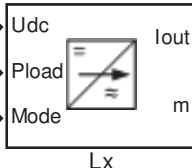
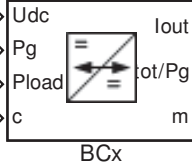
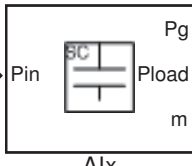
Modelēto spēka interfeisu, slodžu un līdzstrāvas kopnes ieeju, izeju un konstanto parametru kopsavilkums parādīts 2.2. tabulā.

2.2. tabula

Modelēto līdzstrāvas kopnes iekārtu kopsavilkums

Iekārta	Ieejas*	Izejas*	Parametri*	Apzīmējums
Līdzstrāvas kopne	$I_{dc}$	$U_{dc}$	$C_{dc}; U_{init}$	 DC bus
Vienvirziena darbības spēka interfeiss	<u>Modeļa signāli:</u> $U_{dc}; P_g$ . <u>Vadības signāli:</u> $u_r; i_r; Mode$ (0 – izslēgts, 1 – izejas regulēšana pēc $u_r, i_r$ ).	<u>Modeļa signāli:</u> $I_{out}; P_{tot}$ . <u>Kontroles signāli:</u> $U_{out}; I_{out}; P_{out}; P_{los}; W_{out}$ (kWh); vadības signālu vektors; $P_G$ .	$R_{ii}; P_s;$ $U_{outmax};$ $I_{outmax}$ .	 Cx



Iekārta	Ieejas*	Izejas*	Parametri*	Apzīmējums
Konstantas pretestības slodze	<u>Modeļa signāli:</u> $U_{dc}; R.$ <u>Vadības signāli:</u> $Mode$ (0 – izslēgts, 1 – ieslēgts).	<u>Modeļa signāli:</u> $I_{out}.$ <u>Kontroles signāli:</u> $I_{out}; P_{out}; W_{out}$ (kWh); $Mode.$	-	
Konstantas jaudas slodze	<u>Modeļa signāli:</u> $U_{dc}; P_{load}.$ <u>Vadības signāli:</u> $Mode$ (0 – izslēgts, 1 – ieslēgts).	<u>Modeļa signāli:</u> $I_{out}.$ <u>Kontroles signāli:</u> $I_{out}; P_{tot}; P_{los};$ $W_{out}$ (kWh); $Mode.$	$P_{max}; \eta$ (%); $U_{inmin}; U_{inmax}.$	
Divvirzienu darbības spēka interfeiss	<u>Modeļa signāli:</u> $U_{dc}; P_G; P_{load}$ <u>Vadības signāli:</u> $u_r; i_r; p_r; Mode$ (0 – izslēgts, 1 – izejas regulēšana pēc $u_r, i_r,$ 2 – izejas regulēšana pēc $p_r$ ).	<u>Modeļa signāli:</u> $I_{out}; P_{tot}.$ <u>Kontroles signāli:</u> $U_{out}; P_{out}; P_G;$ $P_{loadtot}; I_{out}; P_{los};$ $W_{out}$ (kWh); vadības signālu vektors.	$R_{ii}; P_s;$ $U_{outmax};$ $I_{outmax}; P_{chmax};$ $U_{inmin}; U_{inmax};$ $\eta$ (%).	
Ideāls enerģijas uzkrājējs	<u>Modeļa signāli:</u> $P_{in}.$	<u>Modeļa un kontroles signāli:</u> $P_G; P_{load}; SOC$ (kWh).	$P_{chmax};$ $P_{dchmax};$ $SOC_{init}$ (kWh).	

\*Visas mērvienības SI sistēmā, ja nav norādīts citādi

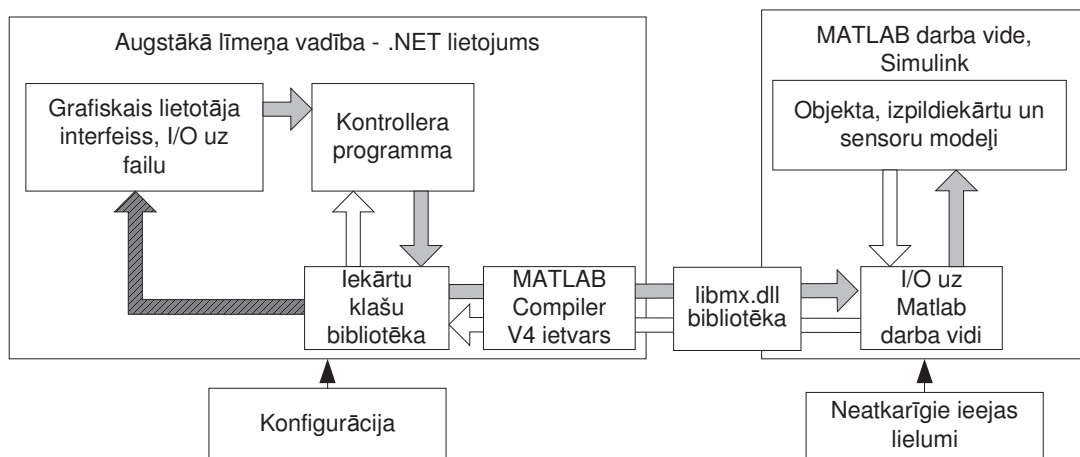
#### 2.2.4. AVS interfeisa realizācija

Ir trīs galvenie mehānismi, ar kuru palīdzību var veidot interfeisu un nodrošināt savstarpējo datu apmaiņu starp AVS modeli .NET vidē un dalītās ģenerēšanas sistēmas modeli Simulink vidē (Phan, 2004):

- nepieciešamās matemātiskās funkcijas, modeļi utt. tiek saglabāti Matlab M-failā, kuru nokompilē uz Windows \*.dll bibliotēku. C# kods veido interfeisu ar bibliotēku, izmantojot ietvarklasi (*wrapper*);
- C# kods ievada datus, izsauc funkcijas, veic citas darbības un nolasa datus tieši no Matlab darba vides, izmantojot jau gatavu ietvarklasi;
- C# kods izmanto COM (*Component Object Model*) objektu, kuru ģenerē no M-faila ar Matlab COM Builder, arī tiek izmantota ietvarklase.

.NET vidē izstrādātā AVS modeļa validācijas un testēšanas vajadzībām tika izvēlēta otra metode, jo tā ir visvienkāršāk realizējama, nav nepieciešamība veidot starpniekobjektus vai bibliotēkas. Tāpat šīs metodes priekšrocība ir tā, ka var viegli veikt izstrādes laika izmaiņas (uzlabošanu, atklūdošanu) paralēli abās vidēs. Ja Simulink modeli darbina pa solim, tad .NET vidē ir iespējams veikt arī izpildes laika atklūdošanu. Trūkums ir tas, ka šai metodei ir nepieciešama instalēta Matlab vide, bet tā kā AVS

interfeisu nav paredzēts izmanto gatavā lietojumprogrammas risinājumā, tad tas izvēli neietekmēja. Matlab funkciju izsaukšanai no C# koda izmantots Matlab Compiler V4 rīks (Version 4.0 (R14) Matlab Compiler), no libmx.dll bibliotēkas un UtilityMatlabCompilerVer4.MatlabCSharp ietvarklase (Phan, 2004). Piekļuve Simulink modelim savukārt realizēta ar Matlab vides standarta funkcijas SIM('model', timespan, options, ...) palīdzību. Funkcija saņem kā parametrus ceļu uz Simulink modeli, simulācijas laika periodu, konfigurāciju un ieejas vērtības; atgriež simulācijas rezultātu: laika un modeļa izejas signālu vektorus. Darbā apskatītā autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas AVS modeļa testēšanas vides elementi parādīti 2.17. att.



2.17. att. AVS modeļa simulācijas vide, izmantojot SIL metodi

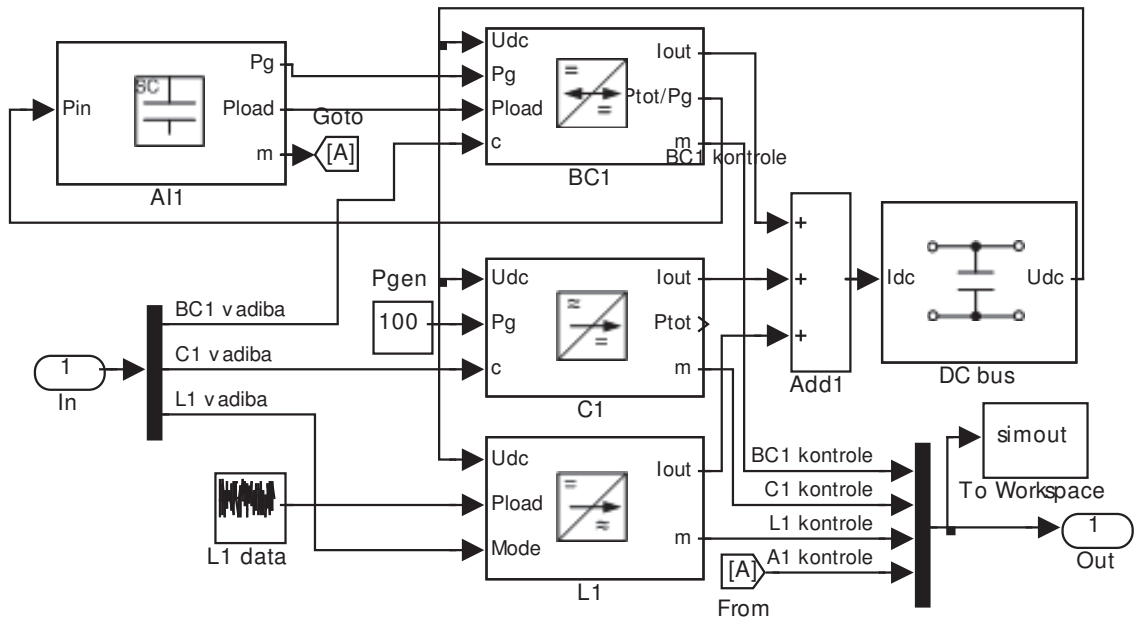
← – vadības un perturbāciju signāli; ← – atgriezeniskās saites signāli;  
 ← – simulācijas rezultāti; ← – simulācijas ieejas

Autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas modelis ir izveidots un simulēts Matlab Simulink vidē, bet testējamā AVS ir realizēta .NET vidē, izmantojot C# valodu un objektorientēto pieeju. Visi neatkarīgie ieejas lielumi (slodzes jaudas grafiks, vēja ātrumi, saules starojums u.c.) tiek padoti caur Matlab darba vides mainīgajiem.

Lai realizētu SIL pieeju un dotu iespēju testēt un atklūdot AVS programmatūru, kas tiek darbināta citā vidē, Simulink modelis ir veidots ar ieejas un izejas portiem, kas tiek savienoti ar Matlab darba vides mainīgajiem, norādot modeļa konfigurācijā (“Simulation>Configuration Parameters” dialoglogā) šo mainīgo nosaukumus – masīvi “In” un “Out”. Signāli tiek organizēti, izmantojot multipleksorus un ievērojot iekārtu pieslēgšanas secību, t.i. ieeju secībai jāsakrīt ar izejām. Sistēmas modelis atbilstošs 2.2.3. nodaļā apskatītajam ar AVS interfeisu parādīts 2.18. att. Slodzes avotam gadījuma skaitļa ģenerators vietā neatkarīgā ieejas lieluma demonstrācijas nolūkos izmantota ieeja no Matlab darba vides mainīgā, kas arī satur gadījuma skaitļu virkni ar periodu 10 s, 1000 s garumā. Ieejas multipleksorā norādīts, ka BC1 vadības signāla platumi ir 4, C1 – 3 un L1 attiecīgi 1.

Augstākā līmeņa vadības programmai ir nepieciešama informācija par Simulink modeli: modelī ietvertās iekārtas, to skaits, savstarpējie savienojumi, parametri, kā arī vadības un kontroles signāli. Teorētiski, izmantojot Matlab darba vides funkcijas, šo informāciju var iegūt automātiski tieši no norādītā Simulink modeļa, taču šādas funkcionalitātes realizācija izrādījās pārāk darbietilpīga, jo ir jāapskata un jāanalizē liels skaits dažādu Simulink bloku veidu. Līdz ar to šī darba ietvaros informācija par Simulink modeļa konfigurāciju, kas attiecas tieši uz pētījuma ietvaros izstrādātajiem HPS modeļu blokiem tiek padota uz .NET vides programmu speciāli izstrādātu XML (*Extensible Markup Language*) formāta konfigurācijas failu veidā. Ir izmantoti divu

veidu XML konfigurācijas faili: metadatu fails, kas satur informāciju par visiem pieejamajiem kombinētās elektroapgādes iekārtu modeļiem (līdzstrāvas kopne, spēka interfeisi, slodzes utt.); un datu fails, kas satur informāciju par konkrēto modeli.



2.18. att. HPS0 modelis ar mainīgo vektoriem informācijas apmaiņai SIL režīmā

Metadatu fails tika veidots, ņemot par pamatu 2.2. tabulu un pārējo līdzstrāvas kopnes iekārtu modeļus (skat. 2.4.nodaļu). Metadatu faila fragments, divvirzienu spēka interfeisam, kurš izmantots 2.2.3. nodaļā apskatītajā abstraktajā kombinētās elektroapgādes sistēmā, dots 2.19. att. Iekārta tiek identificēta ar tagu <SimulinkDevice>.

```

<SimConfigMetadata>
<SimulinkDevice>
<Description>Regulējams taisngriezis</Description>
<ModelNo>ElUnidirectConverter</ModelNo>
<RefDes>C</RefDes>
<InputsString>x_Ur;x_Ir;x_Mode;</InputsString>
<NullInputsString>0;0;0;</NullInputsString>
<OutputsString>x_Uout;x_Iout;x_Pout;x_Plos;x_Wout;
x_Ur;x_Ir;x_Mode;x_Pg;</OutputsString>
<ParametersString>x_Rii;x_Ps;x_Uoutmax;x_Ioutmax;
</ParametersString>
</SimulinkDevice>
.....
</SimConfigMetadata>

```

2.19. att. Metadatu faila fragments spēka interfeisam

Konkrētas sistēmas konfigurācijas fails tiek komponēts no modeļa informācijas un metadatos aprakstītajām iekārtām. Modeļa informācija ietver ceļu uz modeļa failu, modeļa nosaukums, nepieciešamās Matlab komandas, kuras ir jāizpilda pirms simulācijas, piemēram, neatkarīgo ieejas datu ielasīšana Matlab vides mainīgajos un Simulink bibliotēku ielāde. Faila paraugs, kas attiecas uz sistēmu 2.18. att. Dots 2.20. att.

Iekārtu parametri, piemēram, maksimālās jaudas vai lietderības koeficienti tiek norādīti XML failā ar tagu <Parameters> un pēc norādītajiem nosaukumiem nolasīti no Simulink modeļa ar funkciju “get\_param”.

```

<SimConfig>
<ModelPath>C:\...\HPS0\</ModelPath>
<ModelName>HPS0_csh_int</ModelName>
<AdditionalCommands>
Lldata=tdfread('C:\...\HPS0\Eksperiments1\Eksplieeja.txt');
open('c:\...\HPSlib.mdl'); </AdditionalCommands>
<Inputs>t_s;BC1_Ur;BC1_Ir;BC1_Pr;BC1_Mode;
C1_Ur;C1_Ir;C1_Mode;
L1_Mode</Inputs>
<NullInputs>0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;</NullInputs>
<Outputs>
t_s;BC1_Uout;BC1_Pout;BC1_Pg;BC1_Ptot;BC1_Iout;
BC1_Plos;BC1_Wout;BC1_Ur;BC1_Ir;BC1_Pr;BC1_Mode;
C1_Uout;C1_Iout;C1_Pout;C1_Plos;C1_Wout;C1_Ur;C1_Ir;C1_Mode;C1_Pg;
L1_Iout;L1_Ptot;L1_Plos;L1_Wout;L1_Mode;
A1_Pg;A1_Pload;A1_SOC;
</Outputs>
<Parameters>
BC1_Rii;BC1_Ps;BC1_Uoutmax;BC1_Ioutmax;BC1_Pmax;BC1_Udcmin;
BC1_Udcmax;BC1_n;
C1_Rii;C1_Ps;C1_Uoutmax;C1_Ioutmax;
L1_Pmax;L1_n;L1_Udcmin;L1_Udcmax;
A1_Pchmax;A1_n;A1_Pdchmax;A1_SOC0;</Parameters>
</SimConfig>

```

## 2.20. att. HPS0 simulācijas konfigurācijas datu fails

Simulācijas konfigurācijas parametri: simulācijas algoritma tips (diskrēts, nepārtraukts), skaitliskās risināšanas algoritma nosaukums (Eilera, Runge-Kutta, ekstrapolācija u.c.) un tā parametri, optimizācijas u.c. iestatījumi tiek norādīti modeļa failā, bet sākuma stāvokļus un kopējo simulācijas periodu padod tieši pirms simulācijas ar Matlab funkciju “simset()”. Bez tam pirms simulācijas ir nepieciešams norādīt modeļa konfigurācijā inerciālo (integrējošo un diferencējošo, diskrēto atmiņu, darba vides ieejas datu bloku u.c.) bloku sākuma stāvokļus, kā arī simulācijas saglabāt beigu stāvokļus Matlab vidē, lai izmantotu tos nākamajā simulācijas periodā.

Simulink modeļa simulācija tiek veikta pa uzdota garuma periodiem ar norādīto simulācijas algoritma veidu. Simulācijas periodi ir AVS sensoru lasīšanas un vadības iedarbju padošanas diskretizācijas periodi. Modeļa inicializācijas, izejas vērtību uzdošanas, simulācijas un rezultātu izgūšanas algoritms tiek realizēts .NET vidē caur UtilityMatlabCompilerVer4.MatlabCSharp ietvarklasi ir sekojošs.

1. Inicializē Matlab dzinēju.
2. Pāriet uz Simulink modeļa direktoriju: cd('C:\...modelis.mdl').
3. Atver nepieciešamās Simulink bloku bibliotēkas: open('C:\...HPSlib.mdl').
4. Ielasa modeļa ieejas datus no tabulas faila: dati=tdfread('C:\...dati.txt').
5. Aktivizē Simulink vidi un atver modeli: simulink; modelis.mdl.
6. Nolasa modeļa bloku parametrus:  
param = get\_param('Modela\_nosakums/Bloka\_nosaukums',  
Parametra\_nosaukums').
7. Piešķir modeļa pirmā soļa ieejas (Matlab vides mainīgais), kuras ir nepieciešamas, lai varētu aprēķināt sistēmas inerciālo bloku sākuma stāvokļus: In = [1 2, 2 3, ...].
8. Definē modeļa inerciālo bloku sākuma stāvokļu mainīgo, piešķir tam vērtību:  
nullStates = Simulink.BlockDiagram.getInitialState; xInitial = nullStates.

9. Veic sistēmas simulāciju ar laiku “periods”, uzdodot sistēmas sākuma stāvokļus: `sim('C:\.modelis.mdl', periods, simset('InitialState', xInitial,))`.
10. Saglabā simulācijas perioda beigu stāvokļus izmantošanai nākamā perioda sākuma stāvokļos: `xInitial = xFinal` (tādējādi tiek nodrošināta modeļa stāvokļu saglabāšana uz nākamo simulācijas periodu).
11. Nolasa simulācijas rezultātu (datu vektoru, kas reprezentē sistēmas mainīgos) no Simulink modeļa izejām caur Matlab vides mainīgajiem un saglabā .NET vides datu struktūrā (masīvā).
12. Padod simulācijas rezultātu masīvu AVS algoritmam, izpilda algoritmu un saglabā tā darba rezultātu (datu vektoru, kas reprezentē sistēmas vadības iedarbes), masīvā.
13. Ievieto vadības iedarbju vektoru modeļa ieejās In caur mainīgo Matlab darba vidē. Aprēķinātie vadības signāli tiks padoti uz modeļu ieejām nākamajā simulācijas periodā.
14. Ja turpina simulāciju ar nākamo periodu, pāriet uz 8. punktu, ja ir simulācijas pēdējais periods, saglabā rezultātus tālākai apstrādei.

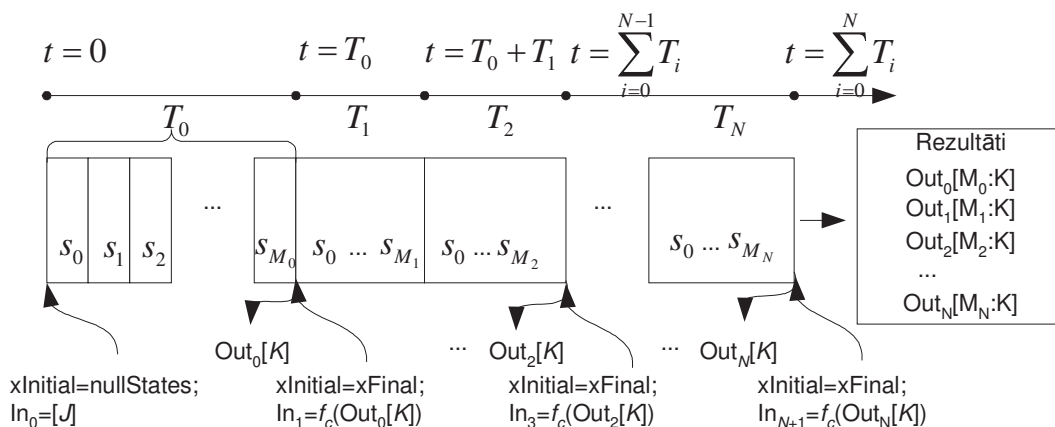
Simulācijas procesā izmantotie Matlab darba vides mainīgie apkopoti 2.3. tabulā.

2.3. tabula

### Simulācijas procesā izmantotie Matlab mainīgie

Nosaukums	Virziens	Apraksts
In	Ieeja	ieejas double tipa vektors, garums atbilst modeļa ieeju skaitam $J$
Out	Izeja	izejas datu struktūra
Out.time	Izeja	simulācijas soļu skaits, double tipa vektors, garumu nosaka izvēlētais simulācijas algoritms, tā iestatījumi un simulācijas perioda garums
Out.signals.values	Izeja	double tipa matrica $[M:K]$ , kur $M$ – simulācijas soļu skaits, $K$ – modeļa izejas signālu vektora garums
nullStates	Ieeja	struktūra – modeļa sākuma stāvokļi
nullStates.signals	Ieeja	struktūra – ietver visu ar modeļa inerciālajiem blokiem saistīto informāciju
xInitial	Ieeja	modeļa stāvokļi pirms un pēc kārtējā simulācijas perioda
xFinal	Izeja	

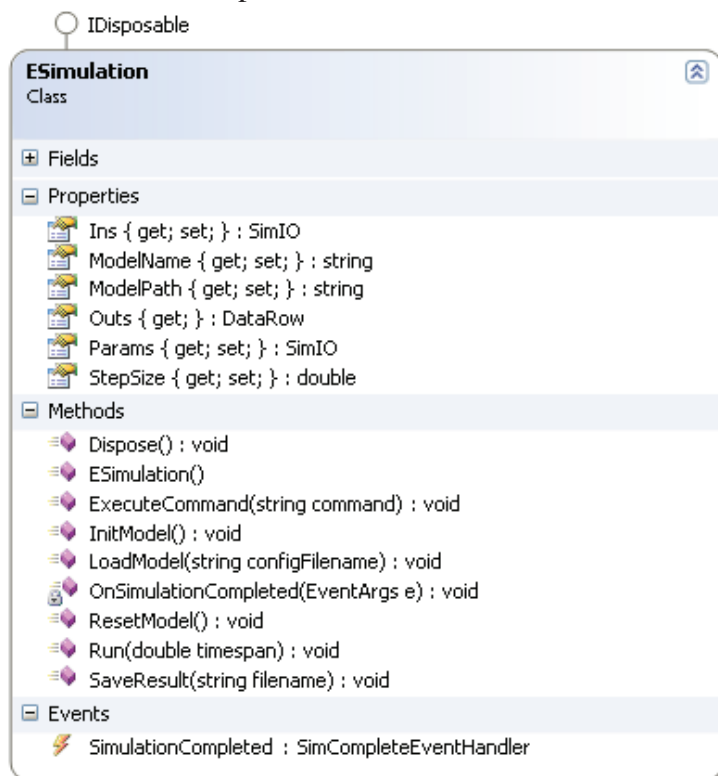
Simulācijas process detalizēti uz laika ass parādīts 2.21. att. Simulācijas periods  $T$ , kuru norāda pirms simulācijas, atkarībā no izvēlēta algoritma un modeļa signālu izmaiņas ātruma tiek sadalīts pa simulācijas soļiem  $s_m$ , līdz ar to vienāda garuma periodiem soļu skaits var atšķirties. Simulācijas sākumā tiek padotas izpildiekārtu ieejas iedarbes (vektors ar garumu  $J$ ). Izejas tiek nolasītas katra perioda beigās kā matrica  $[M_i:K]$ , kur  $M_i$  ir simulācijas soļu skaits periodā  $T_i$ , bet  $K$  – modeļa izejas signālu skaits. Funkcija  $f_c$  aprēķina nākamā perioda regulēšanas signālus tikai no iepriekšējā perioda pēdējā soļa izejas signāliem un atgriež vektoru ar garumu  $J$ , kuru nosūta uz modeli nākamā perioda sākumā. Tādā veidā tiek panākts, ka vadības sistēma nolasa vadāmā objekta stāvokļus ar periodu  $T$ , kas būtībā ir AVS darbības periods.  $T$  teorētiski var arī nebūt konstants lielums un to var pagarināt atkarībā no vadāmā objekta stāvokļa paredzamā izmaiņas ātruma. Tāpat katrā nākamajā periodā tiek norādīti Simulink inerciālo bloku iepriekšējā perioda beigu stāvokļi, lai simulācijas process būtu nepārtraukts. Simulācijas rezultāti tiek apvienoti kopā pa visiem periodiem, ieskaitot visus katra perioda soļus.



2.21. att. **SIL simulācija ar AVS interfeisu, signālu plūsma uz laika ass**

Ar Simulink modeļa interfeisu saistītā funkcionalitāte ir realizēta “Esimulation” klasē (2.22. att.). ESimulation tieši izmanto UtilityMatlabCompilerVer4.MatlabCSharp ietvarklasi, lai piekļūtu Matlab darba videi un papildina to ar Simulink modeļa darbināšanai nepieciešamajām komandām.

Klase ir veidota kā vispārīgs risinājums un informāciju par konkrētu modeli var nodot ar XML failu, izmantojot metodi “LoadModel”. Ir realizētas metodes “InitModel”, kas sagatavo Matlab vidi simulācijai, “Run” – veic simulāciju ar uzdoto periodu, “ResetModel” – atjauno modeļa iestatījumus, stāvokļus un ieejas uz sākuma vērtībām, “ExecuteComand” – izpilda norādīto Matlab darba vides komandu. Notikums “SimulationCompleted” paredzēts simulācijas beigu paziņošanai (kad metode “Run” beidz darbu) pārējiem programmas objektiem. Pie programmas aizvēršanas klase automātiski atbrīvo .NET vides nepārvaldītos resursus, aizver Matlab vidi.



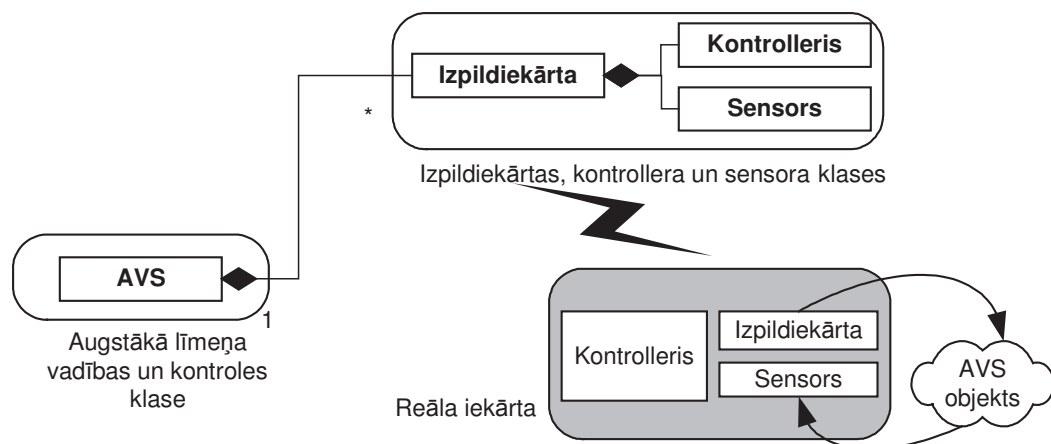
2.22. att. **Klase MATLAB Simulink un .NET vides sasaistei**

Lai realizētu 1.6.1. nodaļā apskatīto HIL/SIL simulācijas pieeju, ir nepieciešams loģiski atdalīt AVS kontrollera programmu no attiecīgi aparatūras/programmatūras komunikācijas realizācijas daļas, t.i. jānodrošina unificēts interfeiss jeb saskarne. Šāds interfeiss ļautu izmantot vienu un to pašu AVS ar dažādu aparatūru un simulācijas modeļiem, pie tam, veicot izmaiņas vai papildinot AVS programmu, nav nepieciešama informācija par konkrētu iekārtu realizāciju. Šo funkcionalitāti realizē “HardwareInterface” (aparatūras interfeisa) klase, kas ir sīkāk apskatīta 2.3. nodaļā.

### 2.3. AVS objektu modelis

AVS programmatūras realizācijā tika izmantota objektorientētā pieeja un kombinētās elektroapgādes sistēmas iekārtu (izplidiekārtas, sensori, komunikācijas iekārtas) vadībai nepieciešamās metodes un dati tika apvienoti klasēs. Programmas izpildes laikā tiek veidoti klašu objekti jeb instances, kas ir reālu iekārtu programmatiskās reprezentācijas. Noteiktas klases instance ļauj vadīt un kontrolēt tai piesaistīto iekārtu. Starp klasēm var realizēt divu veidu saites: mantošana jeb vispārīgas klase metodes un dati tiek izmantoti un papildināti ar jauniem citā klasē un agregācija jeb vienas klases iekļaušana citā. Objektorientētā pieeja un modeļu vadītā arhitektūra kombinēto elektroapgādes sistēmu modelēšanai un vadības programmatūras izstrādē ir lietota jau iepriekš (Zhu and Lubkeman, 1997, Agostini et.al., 2007, Osadcuks, 2007). Šajā darbā tipveida atjaunojamo resursu ģenerējošo un uzkrājošo iekārtu klašu struktūra tika papildināta ar iekārtu lokālo kontrolleru un interfeisu HIL un SIL simulācijas metožu realizācijai.

Klašu izstrādē tika lietota objektorientētas AVS pieeja, kas programmas statiskās struktūras vienkāršošanai paredz ietvert visas AVS kontūrā ietilpstošās iekārtas un veidot izpildiekārtu klases ar iekļautu lokālo kontrolleri un atgriezeniskās saites sensoriem (Койд и др., 1999, Douglass, 2007). Šāda pieeja ļauj augstāka līmeņa programmas kodā izmantot izpildiekārtas klasi un ietekmēt AVS objekta stāvokli bez nepieciešamības zināt par kontrollera uzbūvi, tā īpašību un metožu izmantošanu. Kontrolleris, sensori u.c. AVS kontūra iekārtas arī ir organizētas klasēs, un tiek iekļautas attiecīgās izpildiekārtas klasē kā agregācijas. Piemēram, līdzsprieguma izejas spēka interfeisa klases programmatiskajam objektam jeb instancei, ir piesaistīta reāla spēka interfeisa iekārta, kura sastāv no strāvas un sprieguma sensoriem, izejas strāvas un sprieguma kontrollera un komunikācijas interfeisa. Vispārinātā programmatūras klases instances un reālās iekārtas sasaiste (pēc Койд и др., 1999) parādīta 2.24. att.



2.23. att. Izpildiekārtas klases instances (objekta) sasaiste ar reālu izpildiekārtu objektorientētajā AVS (pēc Койд и др., 1999)

Izpildiekārtas klase un tās agregācijas dod piekļuvi reālās izpildiekārtas (AVS kontūra iekārtu grupas) vadības datiem un metodēm neatkarīgi no reālo iekārtu izpildījuma: centralizēta vai dalīta. Centralizētā izpildījumā kontrollera, sensora un izpildiekārtas funkcionalitāte tiek realizēta jau pašā spēka interfeisā. Piemēram, saules bateriju vadības un akumulatoru kontrolleri (līdzstrāvas izejas spēka interfeisi) Steca PR un Steca Solarix tiek veidoti vienotā blokā pieslēgšanai pie saules baterijas, līdzstrāvas slodzes un neatkarīgai akumulatoru lādēšanai. Dalītajā izpildījumā AVS kontūra daļas fiziski var neatrasties vienā iekārtā. Šajā gadījumā informācijas apmaiņa starp AVS kontūra iekārtām iespējama gan caur objektorientēto vadības sistēmu, izmantojot ciparu tīklu, gan arī neatkarīgi, izmantojot lokālu datu apmaiņas kanālu. Kā piemēru var minēt Steca Tarom un Power Tarom kombinēto sistēmu akumulatoru uzlādes kontrollerus, kuros paredzēta vienlaicīga akumulatoru lādēšana no vairākiem avotiem. Vadības atgriezeniskās saites realizācijai minētajos kontrolleros no katra akumulatora lādēšanas zara tiek izmantoti atsevišķi strāvas sensori.

Izpildiekārtas un uz to attiecināmā kontrollera un sensora (vai vairāku sensoru) apvienošana vienā klasē dod iespēju augstāka līmeņa vadības un kontroles programmai, kas izmantos šo klasi, ne tikai iestatīt elektriskās strāvas parametrus izejā un mainīt darba režīmus, bet arī nolasīt pašreizējo iekārtas sensoru statusu. Būtībā tiek realizēta mērinstrumenta funkcionalitāte, un nolasītais lielums var tikt izmantots arī citu klašu iekārtu vadībai. Tādējādi tiek panākts, ka atsevišķa izpildiekārtas klase dod piekļuvi atsevišķai apakšsistēmai ar lokālo automātisko vadību. Šāda apakšsistēma ir daļa no komplicētas sistēmas ar dalītu automātisko vadību. Centralizētas elektriskās kopnes gadījumā katrs spēka interfeiss atsevišķi var ietekmēt kopnes kā AVS objekta elektriskos lielumus, balstoties uz lokālo vadības likumu. Augstākā līmeņa AVS uzdevums ir saskaņot visu elektriskajai kopnei pieslēgto iekārtu darbību, panākot nepieciešamo enerģijas plūsmu starp ģeneratoriem, patērētājiem un uzkrājējiem.

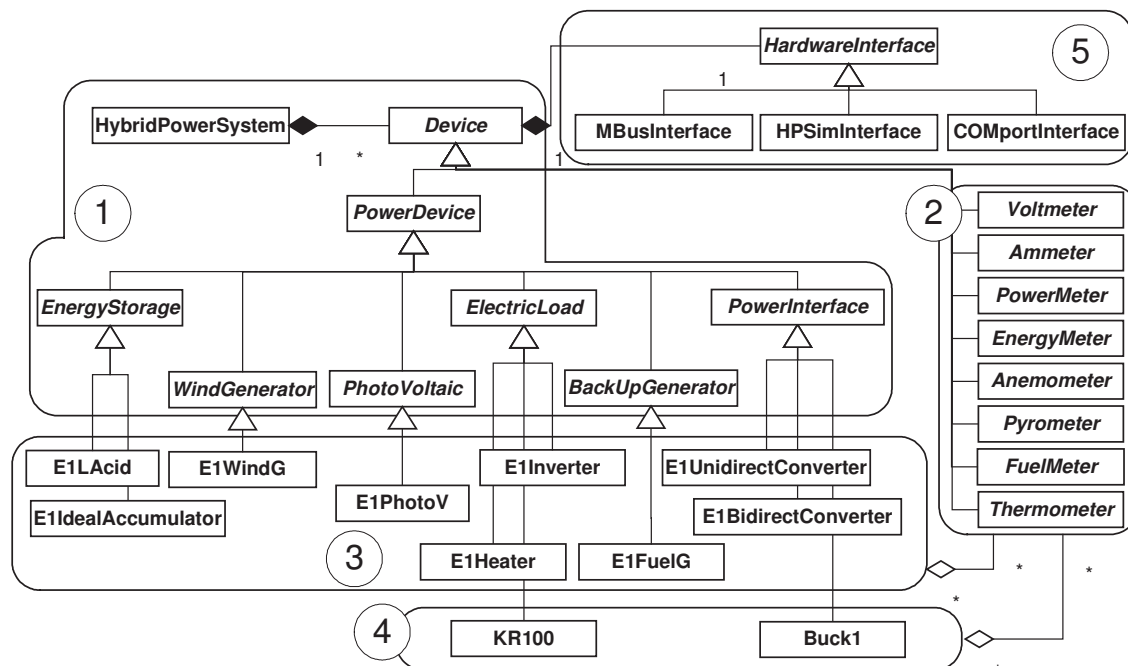
2.25. att. parādīts vienkāršots vadības programmā izmantoto klašu semantiskais tīkls. Izvērstā izstrādās programmas statiskā struktūra .NET klašu diagrammas veidā dota 1. pielikumā. Iekārtu klasifikācijas pamatā ir abstrakta klase "Device" (abstrakta klase ir paredzēta tikai programmas koda strukturēšanai, programmā nav iespējams veidot abstraktas klases instances). Lai nodrošinātu unificētu datu apmaiņas mehānismu ar AVS kontūra iekārtām vai to imitāciju modeļiem, "Device" satur aparatūras interfeisu veidojošo abstrakto klasi "HardwareInterface" (skat. 2.25. att.). Bez tam klasē "Device" iekļautas metodes un dati, kuri attiecināmi uz visām iekārtām: ieslēgšana, izslēgšana, modelis, lietderības koeficients, identifikators slēguma shēmā, karodziņi darbības stāvokļa norādei (iekārta izslēgta vai darbojas, kļūme komunikācijā vai darbībā), kā arī notikumi iekārtas stāvokļa izmaiņu apziņošanai programmā (Osadčuks un Galiņš, 2007).

Klase "HybridPowerSystem" satur "Device" tipa sarakstu, kuru programmas izpildes laikā aizpilda ar konkrētā sistēmā lietoto iekārtu (vēja ģenerators, dīzeļģenerators, akumulators, sprieguma, strāvas sensori utt.) klašu instancēm. Kombinētās elektroapgādes segmentu līmeņa vadības un kontroles funkcionalitāte, tiek realizēta "HybridPowerSystem" līmenī un paliek nemainīga, neatkarīgi no tā, vai Device instancēm piesaistītas reālas iekārtas, to fizikālie vai virtuālie modeļi.

No "Device" manto jeb to paplašina klases "PowerDevice", kas ir visu spēka izpildiekārtu vispārinājums, un dažādu veidu sensori. Abstraktā klase "PowerDevice" satur iekārtas nominālās, maksimālās un momentānās jaudas laukus. No "PowerDevice" savukārt manto dažāda veida kombinētās elektroapgādes iekārtu grupas reprezentējošas abstraktās klases enerģijas uzkrājējiem, vēja ģeneratoram, fotoelektriskajam



ģeneratoram, slodzei, iekšdedzes ģeneratoram un spēka interfeisam. Šajā līmenī klašu struktūru var papildināt arī ar citu veidu spēka iekārtām. Abstraktās spēka iekārtu grupu klases paplašina divu grupu klases (skat. 2.24. att.). Klases 2.4. nodaļā apskatīto iekārtu imitāciju modeļiem ir 3. grupā, bet 4. grupā – klases 3.1. nodaļā apskatītajam līdzstrāvas kopnes fizikālā modeļa spēka interfeisiem “Buck1” un slodzes līmeņu pārslēgšanas relejiem “KR100”. Visām Simulink iekārtu imitācijas modeļu klasēm nosaukumā ir prefikss “E1”. Klases “E1UnidirectConverter“, “E1BidirectConverter“, “E1Inverter“, “E1Heater“ un “E1IdealAccumulator“ dod iespēju vadīt 2.2. nodaļā apskatītos spēka interfeisus, konstantas jaudas un pretestības slodzes un ideālo enerģijas uzkrājēju. Klases izvērstā veidā parādītas 2. pielikumā.



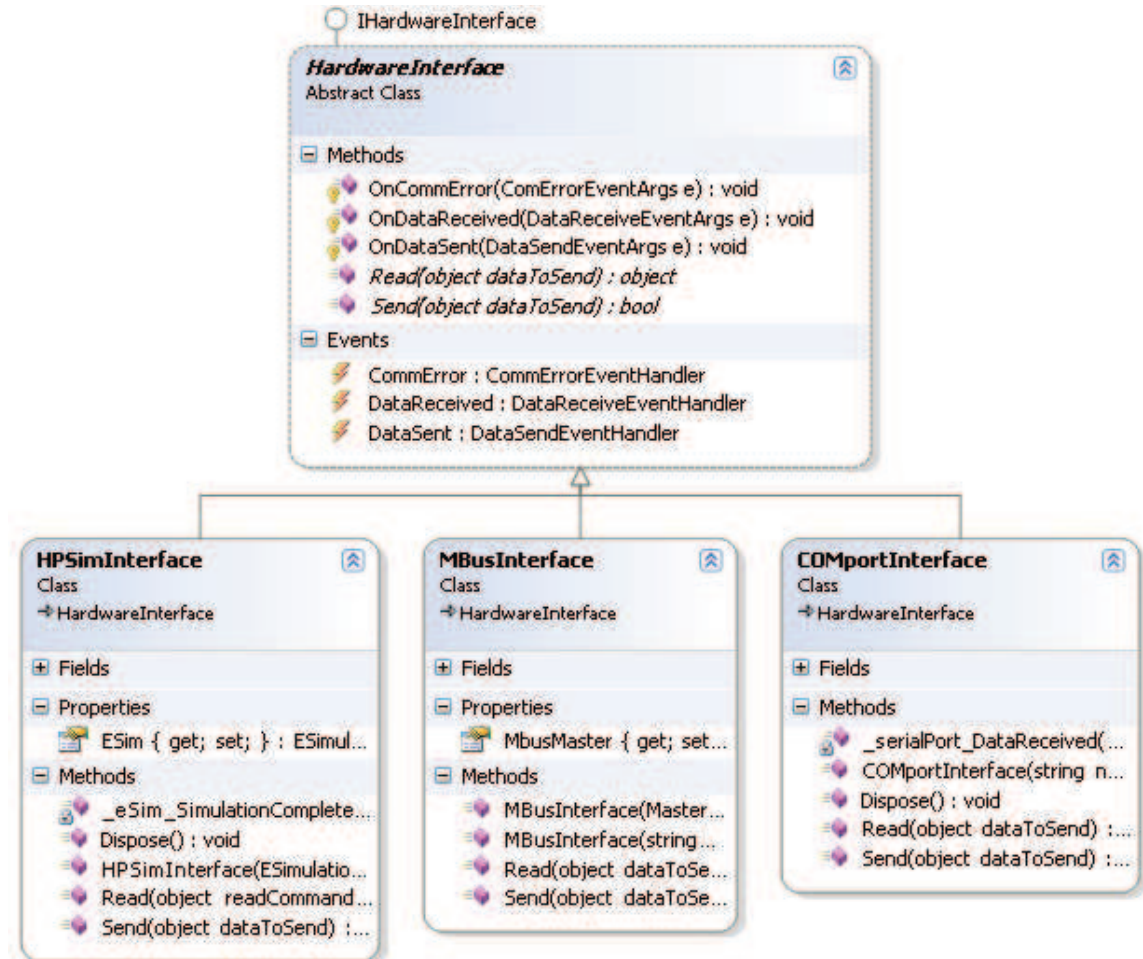
2.24. att. **Kombinētās elektroapgādes sistēmas iekārtu klašu semantiskas tīkls**

1 – kombinētās elektroapgādes sistēmas klases; 2 – sensoru klases; 3 – atsevišķu iekārtu imitācijas modeļu klases; 4 – atsevišķu iekārtu fizikālo modeļu klases; 5 – klases aparātūras interfeisa realizācijai

Sensori tiek realizēti izpildiekārtu klasēs atkarībā no to veida (strāvas/sprieguma sensori spēka interfeisos, anemometrs vēja ģeneratoram, degvielas līmeņa sensors dīzeļģeneratoram utt.). Šim nolūkam izmantots .NET vides programmatisko interfeisu mehānisms. Kā sensori var tikt izmantotas arī fiziski nodalītas iekārtas. Šajā gadījumā katram sensora veidam un modelim ir jāveido atbilstošas klases un agregācijas ar izpildiekārtām, kuras izmanto attiecīgos sensorus savā AVS kontūrā.

Klašu struktūra veidota, lai tā atbalstītu gan HIL un SIL simulācijas pieejas, gan arī būtu izmantojama ar reālām iekārtām. To nodrošina klase “HardwareInterface“ (skat. 2.25. att.). “HardwareInterface“ ir abstrakta klase, kura satur elementu prototipus informācijas apmaiņai ar AVS kontūra iekārtām: metodes Read, un Send attiecīgi datu saņemšanai/sūtīšanai, notikumus “DataReceived“ un “DataSent“ apziņošanai par saņemšanas/sūtīšanas operāciju beigām, kā arī notikumu “CommError“, kas paziņo par kļūdu komunikācijas laikā (iekārta neatbild, nepareizs komandas formāts utml.). “Read“, un “Send“ metodes saziņai ar iekārtām vispārīgā gadījumā izmanto “object“ datu tipu (pamata atsauces datu tips .NET vidē). Metodes “Send object“ tipa parametrs satur mērķa iekārtas vadības komandas un datus, kuri tiešā veidā tiek nosūtīti iekārtas programmatūras datu saņemšanas funkcijām. Metodes “Read object“ tipa atgrieztā vērtība tiešā veidā satur mērķa iekārtas atbildi. Attiecīgās iekārtas klasē “object“

mainīgais tiek apstrādāts atbilstoši iekārtā izmantotajam datu apmaiņas protokolam un komandu sistēmai. Līdz ar to “HardwareInterface” var tikt izmantota visām pie dotā datu apmaiņas interfeisa pieslēgtajām iekārtām, bet iekārtu klasēm nav svarīgi, kāds datu apmaiņas interfeiss pašlaik tiek izmantots. Asinhrona, notikumu balstīta komunikācija ar pieslēgtajām iekārtām nodrošina programmatūras klasēm pastāvīgu pieeju iekārtu datiem un vadības funkcionalitātei.



2.25. att. “HardwareInterface” abstraktā klase un tās realizācijas

“HPSimInterface” – SIL režīmam ar Simulink, “MbusInterface” – iekārtām, kas atbalsta IEC870 protokolu, “COMportInterface” – iekārtām, kas atbalsta vienkāršu bināru vai ASCII simbolu rindu datu apmaiņu caur virknes portu

Klase “HardwareInterface” kalpo kā unificēts datu apmaiņas interfeisa prototips un visiem tās elementiem jābūt realizētiem mantojošajās klasēs. Pašreizējā realizācijā “HardwareInterface” atbalsta vedējs-sekotājs arhitektūru. Datu apmaiņas process tiek uzsākts, kad vedējs (kādas iekārtas klases instance), izmantojot metodi “Send”, izsūta datus mērķa iekārtai (sekotājam), “HardwareInterface” ģenerē notikumu “DataSent”. Iekārta izpilda komandu un atbild ar apstiprinājumu par izpildi vai ar datu paketi pēc informācijas pieprasījuma. Atbilde tiek saglabāta izmantotajā “HardwareInterface” paplašinošās klases instancē, un tiek ģenerēts notikums “DataReceived”. Izsaucošā klase pēc notikuma var izmantot metodi Read, lai iegūtu sekotāja atbildi. Aprakstītā secība attiecas uz “HPSimInterface” un “MBusInterface”.

Dažādu datu apmaiņas interfeisu realizēšanai “HardwareInterface” manto (paplašina) klases: “HPSimInterface”, “MbusInterface” un “COMportInterface”.

“HPSimInterface” klase ir paredzēta savienojumam ar Simulink modeli un AVS programmas izmantošanai ar izpildiekārtu imitāciju modeļiem SIL režīmā. Šim nolūkam “HPSimInterface” caur agregāciju iekļauj klasi “ESimulation” (skat. 2.2. nodaļu). “HPSimInterface” metodes Read un Send izmanto vienkāršu uz simbolu rindām balstītu komandu sistēmu saziņai ar Simulink blokiem, skat. 2.4. tabulu. Šāda komandu sistēma izmantota kombinētās elektroapgādes iekārtu imitācijas modeļos 2.4. nodaļā. Visi mainīgo nosaukumi, iekārtu identifikatori, komandas un fizikālie lielumi datu apmaiņas procesā tiek uzdoti atbilstoši modelēto spēka interfeisu u.c. izpildiekārtu kopsavilkuma tabulām 2.2. un 2.10.

2.4. tabula

#### Komandu sistēma saziņai ar Simulink vidē modelētām iekārtām

Komanda	Metode	Piemērs sistēmai 2.18. att
Lasīt izeju	Read(“Out;x_y”), kur Out – norāde, ka tiek lasīta izeja x – bloka identifikators shēmā y – interesējošā izeja	Iegūst spēka interfeisa C1 pašreizējo izejas spriegumu: double voltage = (double)Read(“Out;C1_Uout”);
Lasīt parametru	Read(“Param;x_y”), kur Param – norāde, ka tiek lasīts parametrs x – bloka identifikators shēmā y – interesējošais parametrs	Iegūst spēka interfeisa C1 maksimālo izejas spriegumu: double voltageMax = (double)Read(“Param;C1_Uoutmax”);
Iestatīt ieeju	Send(“x_y;z”), kur x – bloka identifikators shēmā y – iestatāmā ieeja z – iestatāmā vērtība	Iestata spēka interfeisa C1 strāvas regulēšanas vērtību uz 10 A: Send(“C1_Ir;10”);

“COMportInterface” paredzēta vienkāršai datu apmaiņai bināri vai ar ASCII (*American Standart Code for Information Interchange*) simbolu rindu palīdzību caur datora virknes portu, sīkāk apskatīts (Osadčuks, 2007). “MbusInterface” nodrošina datu apmaiņu caur virknes portu, izmantojot IEC870 protokolu OSI (*Open Systems Interconnection*) datu posma slānim. “MbusInterface” satur “Master” klases agregāciju, kura savukārt satur “Slave” klases sarakstu. Master klase tiešā veidā piekļūst virknes portam, pie kura ir pieslēgtas IEC870 sekotājiem. Katrs “Slave” tipa objekts satur nepieciešamo adresācijas informāciju un dod iespēju piekļūt vienai no attiecīgā “Master” objekta pieslēgtajām sekotājiem.

“MbusInterface” metodei “Send” “object” tipa parametrā ir jānorāda mērķa iekārtas adrese, izpildāmās komandas un dati baitu masīva veidā. “Master” saņem pārsūtāmos datus un formē IEC870 transakcijas rindas datu struktūrā. Transakcija sastāv no pārsūtāmo un saņemamo datu buferiem, sūtīšanas mēģinājumu skaitītāja un transakcijas statusa karodziņiem (pabeigta, pabeigta veiksmīgi, pārsūtīšanas kļūda). “Master”, darbojoties atsevišķā plūsmā, bezgalīgajā ciklā pārbauda pārsūtīšanas rindā iekļautās transakcijas un izsūta uz portu kārtējās transakcijas sūtīšanas buferi un atbilstoši IEC870 protokola laika aizkavēm sagaida adresētā sekotāja atbildi. Atbildes nesaņemšanas gadījumā, sūtīšana tiek atkārtota norādīto reižu skaitu. Atkarībā no transakcijas rezultāta tiek iestatīti statusa karodziņi un ģenerēts izpildes notikums, kura apstrādē tiek ģenerēts arī “HardwareInterface” notikums “DataReceived”.

3.1. nodaļā ir apskatīts spēka interfeisa iekārtas fizikālais modelis AVS modeļa validācijai HIL režīmā, datu apmaiņai izmantoti IEC870 protokols un klase “MbusInterface”. Detalizēta klašu diagramma IEC870 vedējiem programmatūras realizācijai .NET vidē dota 3. pielikumā.

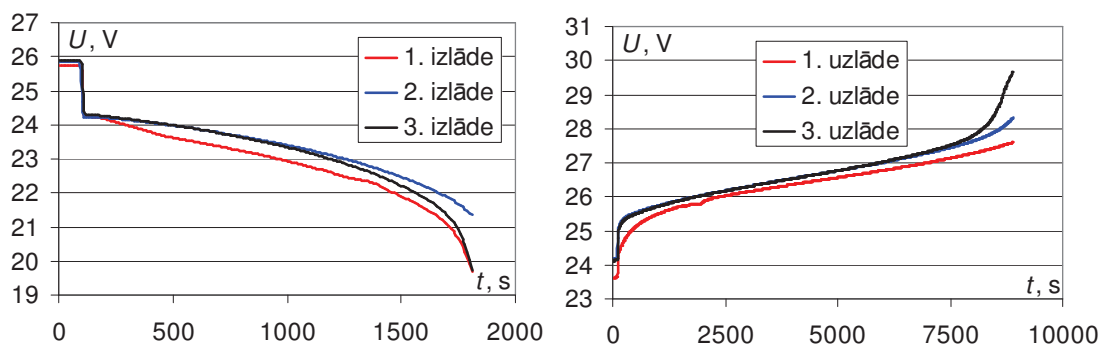
## 2.4. Galveno ģenerējošo un uzkrājošo iekārtu modeļi

Šajā nodaļā ir sīkāk pētīta uz atjaunojamajiem resursiem balstītās kombinētās elektroapgādes sistēmās biežāk lietoto iekārtu darbība, izstrādāti to imitāciju un objektu modeļi izmantošanai ar AVS vadības programmu. Visas šajā nodaļā apskatītās iekārtas, izņemot akumulatoru, ir pieslēdzamas centrālajai kopnei tikai caur spēka interfeisiem, tāpēc modeļu vienkāršošanai un simulācijas paātrināšanai nav modelēti elektriskie pārejas procesi ģenerējošajās iekārtās. Modelētās iekārtas ir: ķīmiskais akumulators (svina–skābes), ottomatora piedziņas ģenerators (ģenerators ar ierobežotu enerģijas resursu), fotoelektriskais ģenerators jeb saules baterija un vēja ģenerators. Iekārtu modelēšanā atkarībā no to sarežģītības pakāpes tika izmantoti gan matemātiskie, gan statistiskie modeļi. Iekārtu matemātiskie modeļi, tika validēti ar eksperimentāli iegūtajiem datiem. Modelēto iekārtu kopsavilkums dots 2.10. tabulā. 2.4.5. apakšnodaļā apskatīta modelēto iekārtu un līdzstrāvas kopnes spēka interfeisu slēguma darbība uz abstraktas kombinētas elektriskās sistēmas HPS1 piemēra.

### 2.4.1. Ķīmiskais akumulators

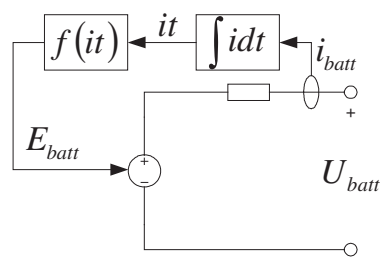
Ķīmiskie akumulatori ir vissarežģītāk modelējamie elementi (Jackey, 2007). Jāņem vērā, ka galvenie akumulatoru parametri (kapacitāte, iekšējās pretestības, EDS) ir atkarīgi no darba režīma (uzlādes/izlādes strāvas), apkārtējās vides temperatūras, darbības laika un nolietojuma pakāpes, un ir eksperimentāli jānosaka attiecīgie akumulatoru parametri ievietošanai ekvivalentajās shēmas.

Eksperimentāli tika uzņemtas slēgta tipa svina-skābes akumulatoru FIAMM FG20451, 12 V, 4.5 Ah uzlādes/izlādes raksturlīknes (skat. 2.26. att.), kuri lietoti modeļu kopas eksperimentālai validācijai 3.2. nodaļā. Izmantoti 2 virknē slēgti akumulatori. Trīs ciklu raksturlīkņu uzņemšana sāka ar tikko uzlādētu jauna akumulatora izlādi. Izlāde veikta ar konstantu 5.4 Ω pretestību, uzlāde – ar 0.788 A konstantu strāvu.



2.26. att. Akumulatora FIAMM FG20451 izlādes/uzlādes raksturlīknes

Svina-skābes akumulatora modelis veidots, ņemot par pamatu Matlab SimPower systems vispārīgo ķīmisko elementu modeli (Battery. Implement generic..., 2011). Dotā shēma tika pielāgota izmantošanai ar 2.2. nodaļā apskatīto līdzstrāvas kopni un spēka interfeisiem. Akumulatora modeļa parametru pieskaņošanai lietota (Jackey, 2007) dotā iteratīvā automātiskās parametru pieskaņošanas metodika. Ķīmiskā elementa funkcionālā shēma parādīta 2.27. att. Elementa elektrodzinējspēks  $E_{batt}$  tiek aprēķināts kā funkcija no pašreizējā uzlādes līmeņa ampērstundās un atšķiras katram elementu veidam (2.5). Izejas spriegums tiek iegūts, piemērojot elementa virknes pretestību.



2.27. att. Ķīmiskā akumulatora funkcionālā shēma (pēc Battery. Implement generic..., 2011)

$$E_{batt} = E_0 - K \left( \frac{Q}{Q - it} \right) + A_b e^{-B_b it}, \text{ kur} \quad (2.5)$$

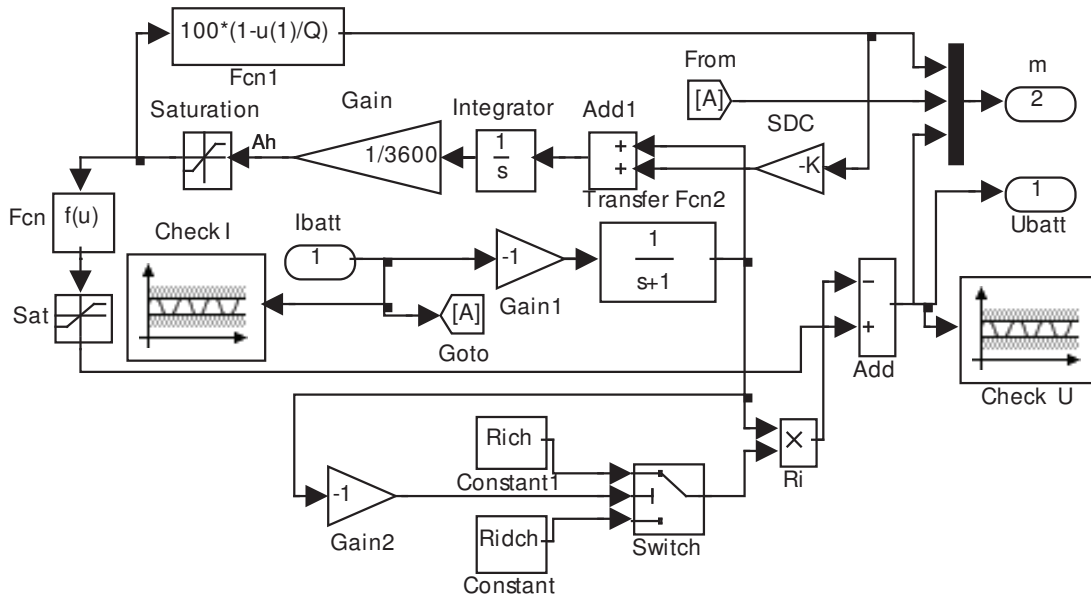
- kur  $i$  – akumulatora strāva, A;  
 $E_0$  – elementa nominālais spriegums, V;  
 $K$  – polarizācijas spriegums (sprieguma kritums pie slodzes), V;  
 $Q$  – kapacitāte, Ah;  
 $A_b$  – eksponenciālais sprieguma faktors (pilnās uzlādes spriegums), V;  
 $B_b$  – eksponenciālais strāvas faktors, (Ah)<sup>-1</sup>.

Akumulatora imitācijas modeļa pamatā (skat. 2.28. att.) ir akumulatora strāvu  $I_{batt}$  integrējošs elements. Integrētā kapacitātes vērtība ampērstundās tiek izmantota, lai aprēķinātu pašreizējo akumulatora izejas spriegumu. Akumulatora pašizlādi ietilpības procentos dienā modelē ar papildus atgriezenisko saiti ar pašizlādes koeficientu  $SDC$  (%) atkarībā no pašreizējās kapacitātes. Spriegumu uz akumulatora spailēm uzlādes un izlādes laikā aprēķina, ņemot vērā iekšējo pretestību  $R_i$  un akumulatora strāvu  $I_{batt}$ . Ieejas strāvas signālā ir ievietots inerciāls elements, kas modelē ar akumulatora iekšējiem ķīmiskajiem procesiem saistīto laika konstanti, kura ir pieņemta  $\tau = 1$  s. Pieņēmums izdarīts, balstoties uz grafisko salīdzinājumu ar eksperimentālajiem datiem slodzes pieslēgšanas jeb soļa iedarbes brīdī konkrētajam akumulatoram. Akumulatora dziļa izlāde zem uzdotā sprieguma  $U_{battmin}$ , pārlādēšana  $U_{battmax}$  un uzlādes/izlādes  $I_{chmax}/I_{dchmax}$  strāvu pārsniegšana, t.i. avārijas situācija, kuru vadības sistēma nedrīkst pieļaut realizēta ar signālu pārbaudes blokiem “Check I” un “Check U” bloku palīdzību. Pārsniedzot kādu no norādītajiem līmeņiem, simulācija tiek apturēta ar atbilstošu kļūdas ziņojumu.

Akumulatora modeļa vienkāršošanai ir izdarīti sekojoši pieņēmumi: akumulatora iekšējā pretestība ir konstants lielums un nav atkarīga no uzlādes pakāpes un izlādes strāvas; uzlādi un izlādi apraksta viena kapacitātes-izejas sprieguma sakarība; akumulatora kapacitāte ir konstanta un nav atkarīga no izlādes strāvas; akumulatoram netiek modelēts “atmiņas” efekts.

Modeļa parametri tika pieskaņoti 2.26. att. (b) izlādes/uzlādes raksturlīknēm. Pieskaņošanai tika izvēlēti stabilāko – 2. un 3. cikla vidējā vērtība. FIAMM FG20451 akumulatora kapacitāte dotajai izlādes strāvai tika noteikta pēc tehniskās pases datiem. Pie vidējās slodzes  $5.47 \Omega$  un nominālā sprieguma  $24 \text{ V}$   $I_{dch} = 4.39 \text{ A}$ , tas atbilst izlādei līdz  $9.6 \text{ V}$  30 minūtēs, t.i.  $Q \approx 2.18 \text{ Ah}$  pēc konstantas izlādes strāvas tabulas (skat. 4. pielikumu). Eksperimentālās un modelētās līknes ar pieskaņotajiem parametriem parādītas 2.29. att. Izlādes raksturlīkņu salīdzinājumam tika pievienota konstantas izlādes strāvas dati no akumulatora tehniskās dokumentācijas.

Ekspimentos izlādes strāva atkarībā no sprieguma visos atkārtojumos mainījās 4.4...3.5 A ar vidējo vērtību 4.2 A. Vistuvākā raksturlīkne no tehniskās dokumentācijas bija konstanta izlādes strāva 1.22 no kapacitātes (5.49 A pie nominālās akumulatora kapacitātes). No grafika var redzēt, ka raksturlīkņu forma sakrīt, bet spriegumi modelētajai un eksperimentāli uzņemtajai raksturlīknei dēļ akumulatora iekšējās pretestības atšķiras vidēji par 0.4 V jeb 1.7 % no nominālā sprieguma (2.29. att., c).



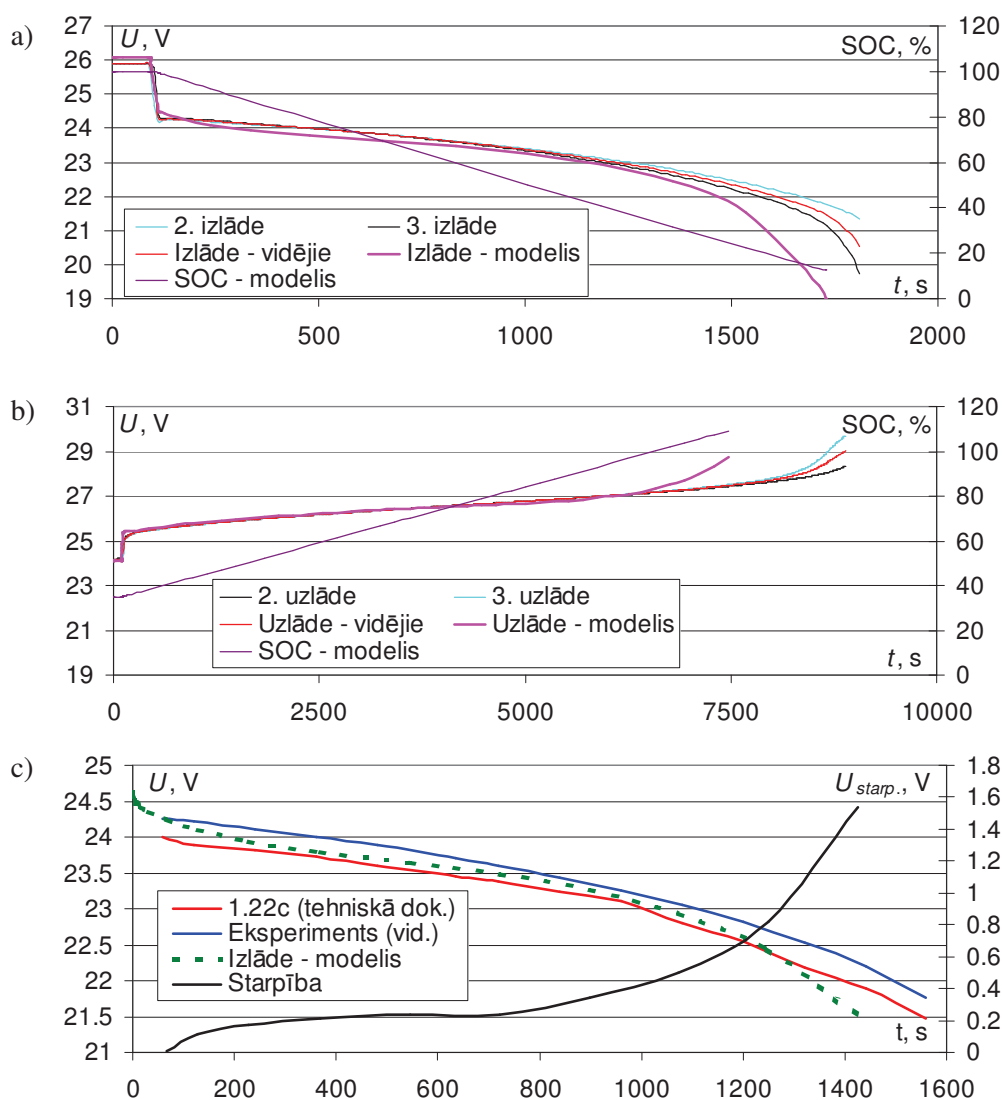
2.28. att. **Kīmiskā akumulatora modelis**

Pieskaņošanas rezultātā tika iegūti parametri:  $E_0 = 26.2$  V,  $K = 0.73$  V,  $A_b = 0.6$  V,  $B_b = 6$  (Ah)<sup>-1</sup>,  $R_i = 0.35$  Ω (izlādei),  $R_i = 1.5$  Ω (uzlādei),  $SOC = 100$  % (pirms izlādes),  $SOC = 25$  % (pirms uzlādes). Jāatzīmē, ka parametri ir iegūti, pieskaņojot tos maksimālai grafiskai sakritībai ar uzlādes/izlādes līknēm un var neatbilst reālajiem. Sakarā ar to, ka izmantotajā modelī ir pieņemts, ka iekšējā pretestība ir konstanta, pie tam, pieskaņojot parametrus, tika iegūti atšķirīgi lielumi uzlādei un izlādei, problēmas var radīt uzlādes līknes beigu eksponenciālais posms, kad akumulators sāk pārlādēties (uzlādes pakāpe  $SOC > 100$  %) un sprieguma eksponenciālais pieaugums ir nepietiekošs. Lai modeli precizētu tika ieviestas divas iekšējās pretestības uzlādei un izlādei attiecīgi  $R_{ich}$ ,  $R_{idch}$ .

Kombinētās elektroapgādes modelī akumulators tika piemērots izmantošanai divās konfigurācijās: ar tiešo pieslēgumu centrālai līdzstrāvas kopnei un ar spēka interfeisu (pilda līdzstrāvas pārveidotāja/lādētāja funkciju). Pirmajā gadījumā akumulators tiek izmantots kopnes strāvu summēšanai un sprieguma uzturēšanai, aizvietojot līdzstrāvas kopnes kapacitātes bloku (skat. 2.2. tabulu.) 2.28. att. dotajā slēgumā  $I_{batt}$  ieejā tiek padota kopnes summārā strāva (avoti – pozitīvi, patērētāji – negatīvi), no kuras tiek aprēķināta akumulatora kapacitāte un kopnes spriegums  $U_{batt}$  dotajā laika momentā. Kontroles signālu vektors ietver akumulatora strāvu, uzlādes pakāpi  $SOC$  un spriegumu. Modeļa parametros ir iekļauti (2.5) vienādojuma koeficienti, konstantā iekšējā pretestība  $R_i$  un  $U_{batt}/I_{batt}$  limitējošie lielumi.

Otrajā gadījumā (skat. 2.30. att.) akumulators ir apvienots ar divvirzienu darbības spēka interfeisu, kurš nodrošina akumulatora uzlādes/izlādes režīmu neatkarīgi no centrālās kopnes parametriem. Sasaiste ar centrālo kopni ir realizēta ar jaudas signāliem. Modelim ir viena ieeja – pievadītā jauda  $P_{in}$  un izejas: maksimālā pieejamā jauda  $P_G$ ,

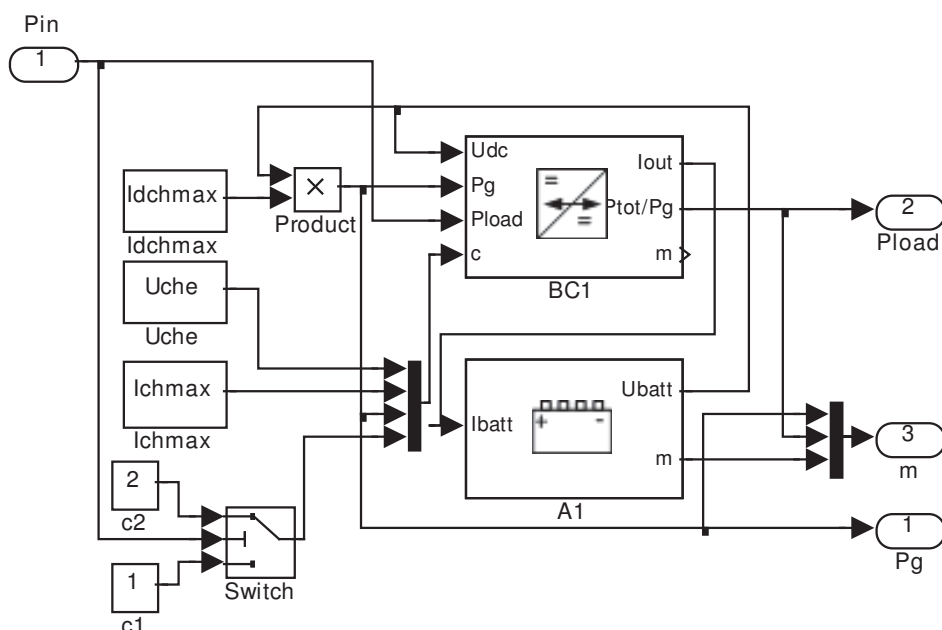
bloka jauda akumulatora lādēšanas laikā  $P_{load}$  un kontroles signālu vektors “m” (ietver jaudas un akumulatora kontroles signālus). Uzlādes/izlādes režīmu nosaka pievadītās un aizvadītās jaudas, kuru padod uz  $P_{in}$ , zīme:  $P_{in} \geq 0$  – izlāde (enerģijas plūsma uz centrālo kopni),  $P_{in} < 0$  – uzlāde (enerģijas plūsma no centrālās kopnes).



2.29. att. Akumulatora FIAMM FG20451 eksperimentāli uzņemtās un modelētās izlādes(a)/uzlādes(b) raksturlīknes un salīdzinājums ar tehniskās dokumentācijas datiem (c)

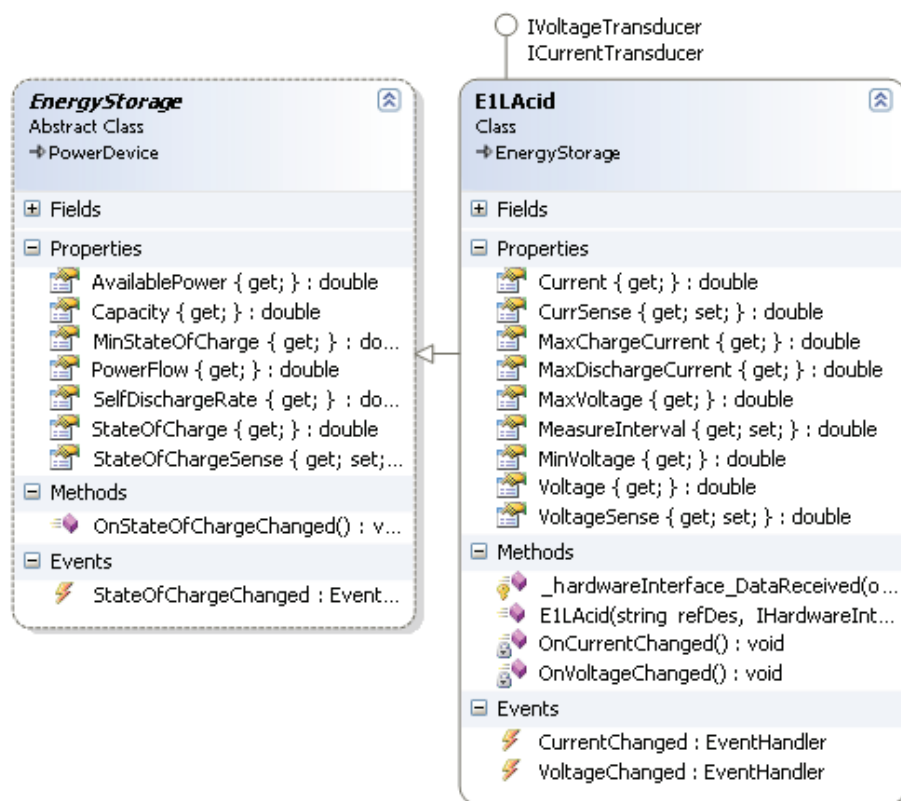
Atkarībā no zīmes caur “Switch” bloku tiek pārslēgts arī divvirzienu darbības spēka interfeisa BC1 darba režīms (1 – izlādē, 2 – uzlādē akumulatoru ar  $P_{in}$  signālā uzdoto jaudu). Izejā  $P_{load}$  tiek padota akumulatora uzlādei patērētā jeb no centrālās kopnes noņemtā jauda.

Ar konstantēm  $I_{dchmax}$ ,  $U_{che}$  (uzlādes beigu spriegums),  $I_{chmax}$  tiek norādīti BC1 parametri normālas akumulatora darbības nodrošināšanai. Līdz ir sasniegts  $U_{che}$  BC1 darbojas kā konstantas strāvas avots ar ierobežojumu  $I_{chmax}$ , pēc iestatītā sprieguma sasniegšanas BC1 lādē akumulatoru ar strāvu, kas nepieciešama uzdotā līmeņa uzturēšanai. Akumulatora blokam ar spēka interfeisu nav atsevišķu vadības ieeju.



2.30. att. Akumulatora modelis ar jaudas izeju pieslēgšanai līdzstrāvas kopnei caur divvirzienu darbības līdzstrāvas pārveidotāju

Akumulatora klase “E1Lacid” izmantošanai no AVS (2.31. att.) ir mantota no abstraktās klases “EnergyStorage” un realizē sprieguma/strāvas sensoru un enerģijas uzkrājēja interfeisus.



2.31. att. Svina-skābes akumulatora klase

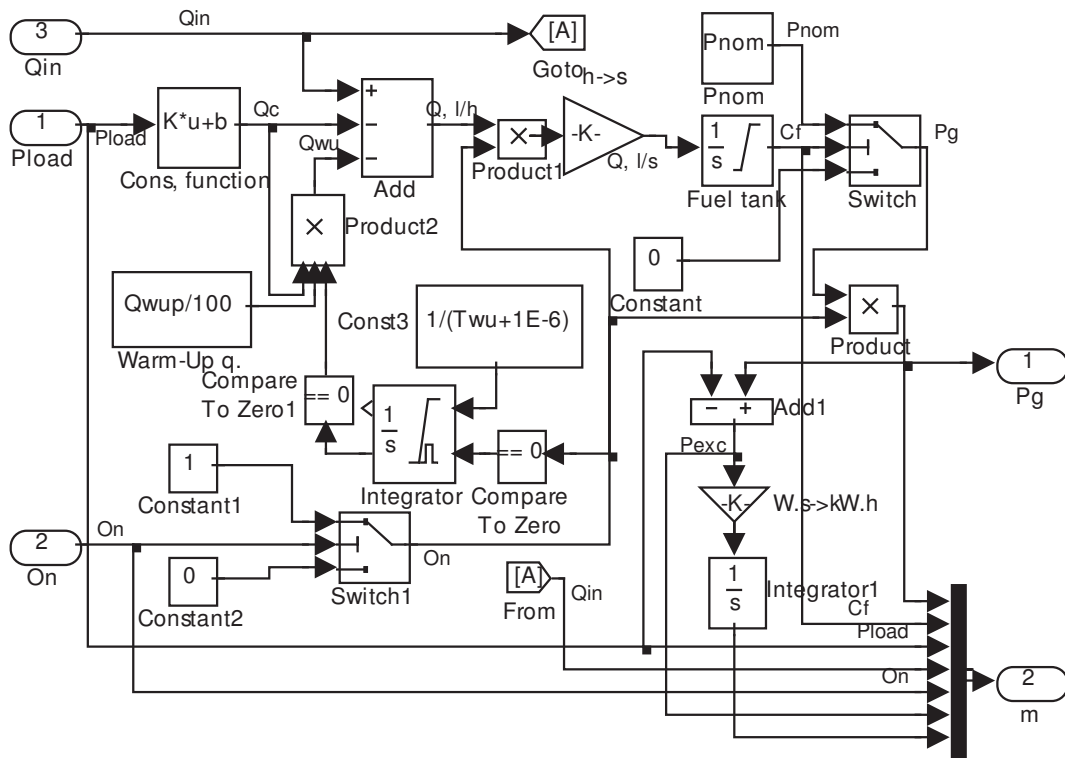
Tas dod iespēju lietotājam nolasīt spriegumu/strāvu aptuveno pašreizējo pieejamo enerģijas daudzumu (kWh aprēķina no uzlādes pakāpes, izlādes strāvas un sprieguma), pieejamo jaudu (aprēķina no maksimālās izlādes strāvas un sprieguma) un pašizlādes SDC lielumu, %·mēn<sup>-1</sup>. Nepieciešamo informāciju par uzlādes pakāpi no Simulink



modeļa var iegūt caur attiecīgo signālu. Praksē precīzas uzlādes pakāpes noteikšana ir komplekss uzdevums, jo tā ir atkarīga no apkārtējās vides faktoriem, akumulatora darba režīma un nolietojamības pakāpes, parasti to nosaka pēc akumulatora sprieguma, vai mērot elektrolīta blīvumu vai kontrolējot ķīmisko reakciju norisi, piemēram, nosakot ūdeņraža koncentrāciju, taču eksistē arī inteligēnti elektroniski risinājumi, kas uzlādes pakāpes aprēķinā ņem vērā iepriekš minētos faktorus. Kā piemēru var minēt AtonIC moduli Steca PR saules bateriju un akumulatoru uzlādes kontrolleros.

### 2.4.2. Iekšdedzes motora ģenerators

Iekšdedzes motora ģenerators modelis parādīts 2.32. att. Ģenerators modelēts kā bezinerces posms. Modelis pieslēdzams spēka interfeisam ar portiem: izeju  $P_G$ , kurš norāda pieejamo jaudu pārvadīšanai uz līdzstrāvas kopni (ierobežota līdz nominālajai jaudai  $P_{nom}$ ), un ieeju  $P_{load}$ , pie kuras atgriezeniskajā saitē pieslēdz spēka interfeisa kopējās patērētās jaudas izeju  $P_{tot}$ .  $P_{load}$  signāls (W) tālāk tiek izmantots darba režīma un degvielas patēriņa aprēķinos. Pie ieejas  $P_{load}$  nav uzlikts papildus maksimālās jaudas ierobežotājs, jo spēka interfeisa radītā slodze pie korekti saslēgtas modeļa shēmas nevar būt lielāka par ierobežoto līdz  $P_{nom}$  izeju.



2.32. att. Iekšdedzes motora ģenerators modelis

Iekšdedzes motora attālinātās palaišanas un apstādināšanas funkcija ir modelēta ar ieeju “On”. Ja ieejas vērtība ir 1, dzinējs tiek palaists, ja vērtību izmaina uz 0 – apturēts. Bloks “Switch1” nodrošina On signālu vērtības 0, ja ieeja ir 0 un 1, ja ieeja nav vienāda ar 0 (t.i.). Tāpat tiek izmantota ieeja “Q<sub>in</sub>” degvielas papildināšanai tvertnē un kontroles mērījumu vektors “m”, kas ietver pieejamo jaudu  $P_G$ , degvielas tilpums tvertnē  $C_f$ , ģenerators elektrisko slodzi  $P_{load}$ , degvielas padevi tvertnē  $Q_{in}$ , vadības signālu On un nepatērētās enerģijas daudzumu  $W_{exc}$ , kā pieejamās un izmantotās jaudas starpības integrālis simulācijas laika posmā. Ieejai  $Q_{in}$  var pievienot avota bloku no Simulink.

Modeļa parametri ir nominālā jauda  $P_{nom}$ , degvielas tilpums tvertnē simulācijas sākumā un maksimālais attiecīgi  $C_{finit}$ ,  $C_{fmax}$ , lineārās degvielas patēriņa funkcijas

parametri  $b$  un  $k$ , degvielas patēriņš iesilšanas laikā  $Q_{wup}$  (% no nominālā patēriņa  $Q_c$ ) un iesilšanas laiks  $T_{wu}$ , s.

Izejas jauda tiek uzdota ar ģenerators nominālo jaudu  $P_{nom}$ , kura tiek padota uz  $P_G$  izeju, kamēr degvielas tilpums tvertnē  $C_f > 0$ , to nodrošina nelineārais bloks "Switch". Degvielu tvertnē var papildināt ar ieejas signālu  $Q_{in}$  (plūsma,  $lh^{-1}$ ). Motora degvielas patēriņš tika modelēts diviem režīmiem: iesildīšanās un normāls darba režīms.  $C_f$  litros aprēķina pēc formulas:

$$C_f = \frac{1}{3600} \int_0^t (Q_{in} - Q_c - Q_{cwu}) dt, \quad (2.6)$$

kur  $Q_{in}$  – degvielas piegāde tvertnē,  $lh^{-1}$ ;  
 $Q_c$  – motora degvielas patēriņš normālā darba režīmā,  $lh^{-1}$ ;  
 $Q_{cwu}$  – motora degvielas patēriņš motora iesilšanas laikā,  $lh^{-1}$ .

Degvielas patēriņu normālā darba režīmā aprēķina kā funkciju no slodzes  $P_{load}$ . Izmantota lineāra sakarība (2.7) ar katram ģeneratoram raksturīgiem koeficientiem, kuru noteikšanas metodika atsevišķiem ģeneratoru modeļiem dota turpmāk šajā nodaļā. Sakarība realizēta "Cons. function" blokā (2.32. att.).

$$Q_c = kP_{load} + b. \quad (2.7)$$

Palielinātais degvielas patēriņš procentos no normālā režīma patēriņa  $Q_c$  aprēķināts kā konstants lielums un motoram iesildoties tiek piemērots tikai laika intervālā  $T_{wu}$  kopš motora palaišanas signāla ( $On = 1$ ):

$$Q_{wu} = \frac{Q_{wup}}{100} \cdot Q_c \cdot On, \quad (2.8)$$

kur  $Q_{wup}$  – palielinātais degvielas patēriņš, % no  $Q_c$ .

Degvielas tilpumu (integrējošais bloks "Fuel tank") ierobežo integratora maksimālās un minimālās piesātināšanās vērtība  $C_f \in [0; C_{fmax}]$ .

Lai iegūtu degvielas patēriņa funkcijas koeficientus  $k$  un  $b$  sakarībai (2.7) un konstatētu degvielas patēriņa izmaiņas, slogojot neiesildītu motoru, tika veikts degvielas patēriņa eksperiments ar 3 ģeneratoriem (skat. 2.33. att.).



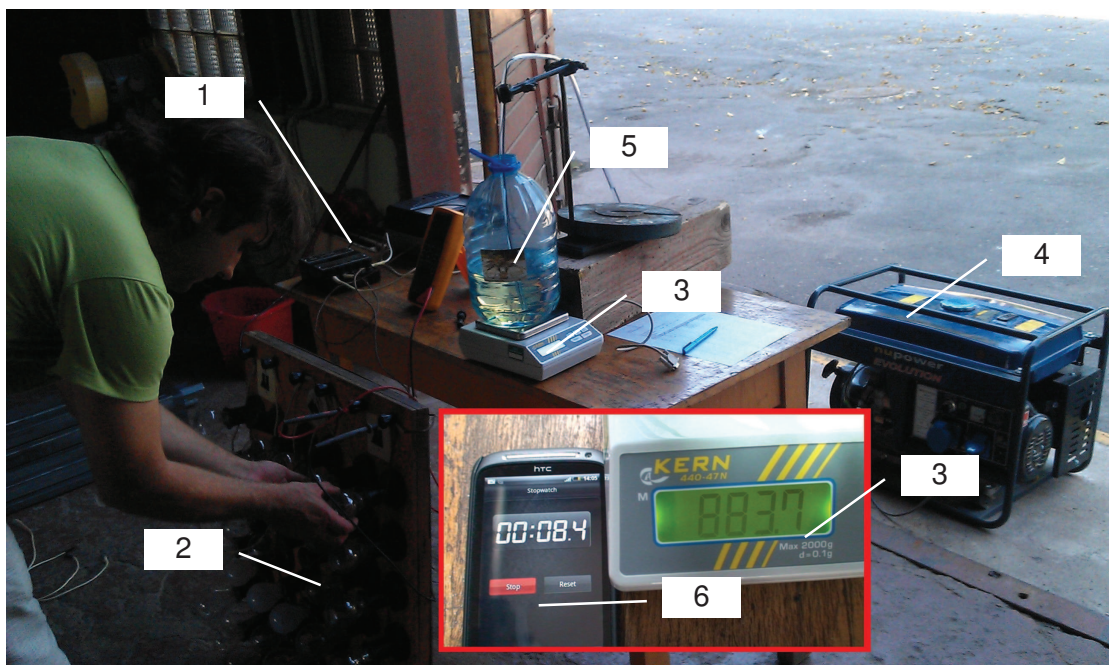
2.33. att. Degvielas patēriņa eksperimentā izmantotie ģeneratori

1 – "Nupower" NPEGG5200; 2 – "Berlan BSTE2700"; 3 – "Euro Craft HH950"

NPEGG5200 ir 4-taktu ottomatora piedziņas pastāvīgo magnētu sinhronais ģenerators ar nominālo jaudu 4.5 kW un 1 fāzi; BSTE2700 – 4-taktu ottomotors, 2 kW; HH950 – 2-taktu ottomotors ar 1:50 motoreļļas piejaukumu, 0.65 kW (pases dati). Eksperimenta mērķis: noteikt iekšdedzes ģeneratoru degvielas patēriņu pie dažādām slodzēm, uzņemot raksturlielni  $Q_c = f(P_{load})$ , sastādīt lineāro modeli un iegūt regresijas koeficientus. Eksperimentos izmantots benzīns E95 (Eiropas norma EN 228).

Degvielas patēriņa noteikšanā tika izmantota degvielas masu diferences metode, t.i. ģenerators tika darbināts noteiktu laika intervālu – 30 s ar konstantu slodzi, un tika uzņemta degvielas masa intervāla sākumā un beigās un nomērīta elektriskā slodze. No iegūtās masu starpības izrēķināts degvielas patēriņš ar doto slodzi. Kontrolēts ģenerators izejas spriegums un frekvence, lai pārslodzes rezultātā frekvence nekristos zem 48 Hz, bet sprieguma efektīvā vērtība – 200 V.

Degvielas svēršanai izmantoti svāri Kern 440-47N ar precizitāti  $d = 0.1$  g, kombinētā mērīšanas iekārta K505 un strāvmainis slodzes jaudas noteikšanai, taimeris un multimetrs Fluke 287 izejas sprieguma un frekvences kontrolei. Vatmetra pilna skala 150 iedaļas, diapazoni 9 kW, 3 kW un 1.5 kW attiecīgās jaudas ģeneratoriem. Svaru rādījums nolasīts vizuāli, jo elektroniskais interfeiss nosūta mērījumu uz virknes portu tikai pie nemainīgas masas, bet, ģeneratoram darbojoties, degvielas masas izmaiņa atkarībā no ģenerators modeļa un slodzes bija  $1.4-17.2 \text{ g} \cdot (30 \text{ s})^{-1}$ . 30 s laika intervāls mērīts ar taimeri, maksimālā kļūda 0.1 s, mērījuma sākums tika fiksēts uz taimera ar roku, bet beigu laiks un degvielas masas sinhroni nolasītas ar videoieraksta palīdzību, lai no kļūdas izslēgtu cilvēka reakcijas faktoru. Kā slodze izmantots kvēlspuldžu stends ar kopējo spuldžu nominālo jaudu 3.5 kW. Degvielas patēriņa aprēķinam nepieciešamais benzīna blīvums noteikts ar tilpuma un svēršanas metodi (svaru kļūda 0.1 g, mērtrauka – 50 ml pie tilpuma 1 litrs), noteiktais blīvums  $\rho_f = 750 \pm 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Eksperimentālais stends parādīts 2.34. att.



2.34. att. Eksperimentālais stends

1 – elektriskie mērinstrumenti; 2 – regulējama elektriskā slodze; 3 – svāri; 4 – testējamais ģenerators; 5 – degvielas tvertne; 6 – taimeris

Ģeneratoriem tika uzņemtas  $Q_c=f(P_{el})$  raksturlīknes ar 3 atkārtojumiem. Katrs atkārtojums sākts ar tukšgaitas patēriņa uzņemšanu, pēc tam slodze pa soļiem palielināta līdz 3.5 kW vai līdz ģeneratora nominālajai jaudai. Atkārtojuma beigās visa slodze atslēgta un mērīšana sākta no jauna. Katram ģeneratoram 1. atkārtojums uzņemts pie neiesildīta motora, pārējie – pēc 30 min darbināšanas. Degvielas patēriņš aprēķināts pēc sakarības:

$$Q_c = \frac{(m_0 - m_1)}{T_{30}} \cdot \frac{3600}{\rho_f}, \quad (2.9)$$

kur  $Q_c$  – degvielas patēriņš,  $l \cdot h^{-1}$ ;  
 $T_{30}$  – ģeneratora darbības laika intervāls, 30 s;  
 $m_0$  – degvielas masa laika intervāla sākumā, g;  
 $m_1$  – degvielas masa laika intervāla beigās, g;  
 $\rho_f$  – degvielas blīvums,  $kg \cdot m^{-3}$ .

Eksperimentu rezultāti grafiski parādīti 2.35. att. 4-taktu motora ģeneratoriem ir izteikta lineāra sakarība starp slodzi un degvielas patēriņu, kaut arī jaudu diapazona viduspunktā ir novērojams nenozīmīgs pārlikums. 2-taktu ģeneratoram šī sakarība ir potenciāli lineāra tikai iesilšanas laikā, bet pārējos divos atkārtojumos, patēriņš samazinās, palielinoties slodzei līdz 140 W (22 % no nominālā), tālāk vērojams patēriņa pieaugums.

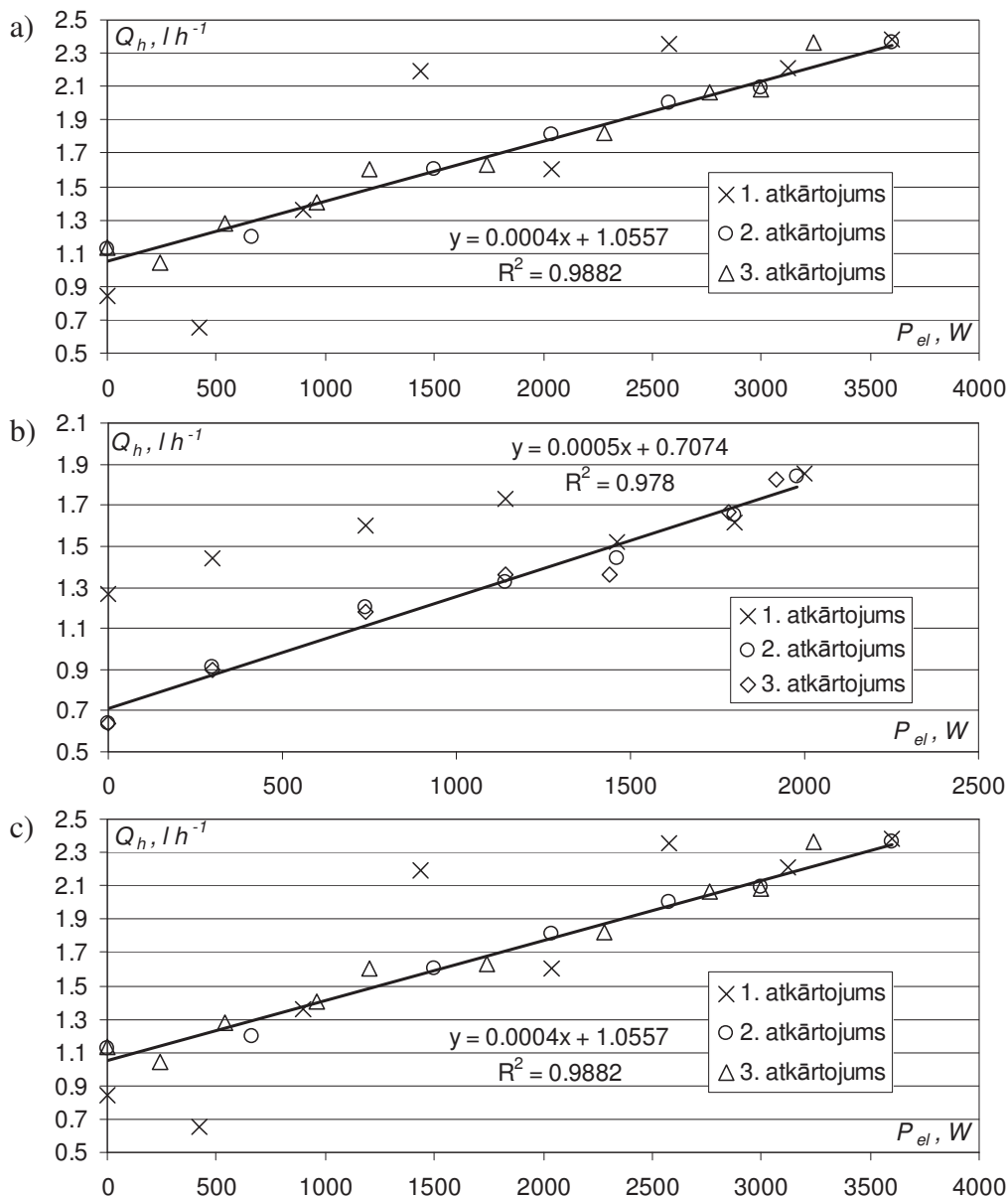
Grafikos pa atkārtojumiem var redzēt patēriņa izmaiņu, iesilstot motoriem. 1. atkārtojumā katram ģeneratoram pie neiesildīta motora ir neregulārs degvielas patēriņš, kas ir īpaši izteikts 2 kW ģeneratoram BSTE2700, kur patēriņš ir konsekventi lielāks nekā pie līdzvērtīgām slodzēm pēc motora iesildīšanas.

Iesilšanas laika attiecība pret kopējo darbības laiku reālos darba apstākļos ir salīdzinoši neliela (0.5 h iesilšana pret 10 – 20 h darbināšanas laiku akumulatoru uzlādei), taču motora iesilšanas dinamika potenciāli var atstāt iespaidu uz kopējo degvielas patēriņu, ja pēc kombinētās elektroapgādes sistēmas vadības algoritma ir nepieciešama biežāka ģeneratora ieslēgšana. Līdz ar to ģeneratora imitācijas modelis (skat. 2.32. att.) tika papildināts ar iespēju norādīt parametrus “iesilšanas laiks”  $T_{wu}$  un “patēriņa izmaiņa”  $Q_{cwup}$ , procentos no nominālā patēriņa. Lai precīzāk raksturotu modelī motora iesilšanas dinamiku, to ir nepieciešams uzdot ar funkciju vai tabulas bloku, taču tad nepieciešami papildus pētījumi ar neiesildītu iekšdedzes dzinēja ģeneratoru.

Visiem mērījumiem tika veikts kļūdu aprēķins. Jaudas  $P_{el}$  mērījuma kļūda ir puse no vatmetra skalas iedaļas: 30 W, 10 W un 5 W attiecīgi NPEGG5200, BSTE2700 un HH950 ģeneratoriem. Patēriņam  $Q_c$  ir tikai 3 eksperimenta atkārtojumi ar netiešo mērīšanu, tāpēc tika rēķināta katra mērījuma parciālā kļūda pēc sakarībām (2.10).

Kļūdu aprēķini apkopoti 2.5. tabulā. Visiem atkārtojumiem visiem ģeneratoriem lielākā parciālā kļūda bija pirmajos mērījumos, jo, ģeneratoram darbojoties tukšgaitā, ir vismazākā  $m_0$ ,  $m_1$  starpība, kuru ietekmē svaru precizitāte  $\Delta m$ .

Eksperimentā iegūtajiem datiem tika veikta regresijas analīze ar lineāro modeli normālam darba režīmam pēc 30 min iesilšanas. 2.35. att. katram ģeneratoram parādīts lineārais modelis atkārtojumam ar maksimālo determinācijas koeficientu un minimālo standartkļūdu. Iegūtie regresijas koeficienti ir izmantojami iekšdedzes ģeneratora modelī (2.32. att.).



2.35. att. Degvielas patēriņa eksperimentu rezultāti

a – NPEGG5200; b – BSTE2700; c – HH950, regresijas taisnes parādītas mēģinājumiem ar augstāko  $R^2$

HH950 ir mazjaudas ģenerators, kura degvielas patēriņu ar doto metodi ir grūti noteikt pietiekoši precīzi (kļūda vidēji 8.1 %). HH950 testos tika ievietots tikai salīdzināšanai, kā arī normālā režīmā degvielas patēriņa lineārā modeļa determinācijas koeficients  $R^2 = 0.63$ , tāpēc turpmākajos pētījumos tas netika apskatīts.

2.5. tabula

Ottomotoru piedziņas ģeneratoru eksperimenta kļūdu aprēķinu rezultāti

Ģenerators	Maksimālā $K_{max}$ un % no attiecīgā mērījuma ( $l \cdot h^{-1}/\%$ )	Minimālā $K_{max}$ un % no attiecīgā mērījuma ( $l \cdot h^{-1}/\%$ )	Vidējā $K_{max}$ un vidējie kļūdas % ( $l \cdot h^{-1}/\%$ )
NPEGG5200	0.037/4.3	0.016/0.6	0.022/1.5
BSTE2700	0.040/3.1	0.020/1.1	0.024/2
HH950	0.036/14.9	0.033/5.0	0.035/8.1

$$\begin{aligned}
K_{m0} &= \pm |Q_c - Q_{c+\Delta m0}| = \left| Q_c - \frac{(m_0 + \Delta m_0 - m_1)}{T_{30}} \cdot \frac{3600}{\rho_{degv}} \right| \\
K_{m1} &= \pm |Q_c - Q_{c+\Delta m0}| = \left| Q_c - \frac{(m_0 - m_1 + \Delta m_1)}{T_{30}} \cdot \frac{3600}{\rho_{degv}} \right| \\
K_{T30} &= \pm |Q_c - Q_{c+\Delta T30}| = \left| Q_c - \frac{(m_0 - m_1)}{T_{30} + \Delta T_{30}} \cdot \frac{3600}{\rho_{degv}} \right|, \quad (2.10) \\
K_{\rho_{degv}} &= \pm |Q_c - Q_{c+\Delta \rho_{degv}}| = \left| Q_c - \frac{(m_0 - m_1)}{T_{30}} \cdot \frac{3600}{\rho_{degv} + \Delta \rho_{degv}} \right| \\
K_{max} &= \pm \left( |K_{m0}| + |K_{m1}| + |K_{T30}| + |K_{\rho_{degv}}| \right)
\end{aligned}$$

kur  $\Delta m_0, \Delta m_1$  – svaru kļūdas, 0.1 g;  
 $\Delta T_{30}$  – laika intervāla uzņemšanas kļūda, 0.1 s;  
 $\Delta \rho_{df}$  – degvielas blīvuma mērījuma kļūda, 2 kg·m<sup>-3</sup>;  
 $K_{m0}, K_{m1}, K_{T30}, K_{\rho_{degv}}$  – parciālās kļūdas;  
 $K_{max}$  – maksimālā kļūda.

Lineārajiem modeļiem tika novērtētas modeļu kļūdas (starpība starp eksperimenta datiem un modeli katrā punktā), lai noteiktu, vai kļūdām ir gadījuma raksturs. Pārbaudīts, vai kļūdu sadalījums atbilst normālajam pēc Jarque-Bera normalitātes testa (Jarque and Bera, 1980), kļūdu heteroskedasticitāte (vai kļūdām neatšķiras dispersijas) pēc White testa, kas ir speciālais gadījums Breusch-Pagan testam (Breusch, Pagan, 1979), un autokorelācija (vai kļūdas korelē viena ar otru, t.i. pastāv autokorelācija) pēc Durbin-Watson testa (Durbin, Fox, 1997). Modeļa kļūdu statistiskā analīze tika veikta programmpaketē R un ir apkopota 2.6. tabulā.

2.6. tabula

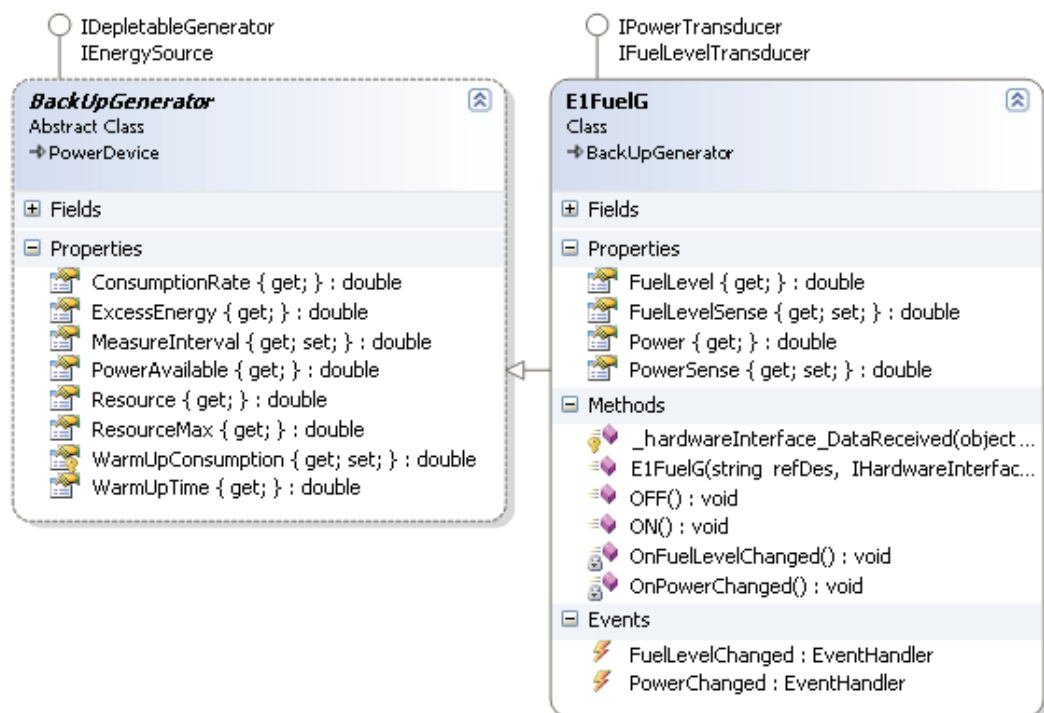
### Regresijas modeļu kļūdu statistiskā analīze

Generators	Atkārtojums	Lineārā modeļa parametri, determinācijas koeficients un standartkļūda				Jarque-Bera normalitātes tests		Durbin-Watson autokorelācijas tests			White heteroskedasticitātes tests	
		$k(\cdot 10^{-4})$ / p-vērtība	b/ p-vērtība	$R^2$	$\sigma$	Testa vērtība	p-vērtība	Auto-korelācij a	Testa vērtība	p-vērtība	Testa vērtība	p-vērtība
NPEG5200	1	4.68/ 0.008	0.875/ 0.004	0.771	0.357	0.909	0.635	-0.257	2.472	0.816	3.364	0.186
	2	<b>3.50/ &lt;0.001</b>	<b>1.056/ &lt;0.001</b>	<b>0.988</b>	<b>0.055</b>	<b>0.721</b>	<b>0.697</b>	<b>-0.035</b>	<b>1.807</b>	<b>0.392</b>	<b>1.905</b>	<b>0.386</b>
	3	4.01/ 0.001	0.989/ 0.002	0.880	0.205	0.550	0.760	-0.061	1.521	0.150	5.631	0.060
BSTE2700	1	2.08/ <0.001	1.353/ 0.026	0.664	0.122	0.826	0.662	-0.004	1.803	0.398	0.688	0.709
	2	<b>5.47/ &lt;0.001</b>	<b>0.707/ &lt;0.001</b>	<b>0.978</b>	<b>0.067</b>	<b>0.664</b>	<b>0.718</b>	<b>0.064</b>	<b>1.561</b>	<b>0.204</b>	<b>0.664</b>	<b>0.718</b>
	3	5.55/ <0.001	0.695/ <0.001	0.967	0.082	0.782	0.676	0.009	1.772	0.382	0.146	0.930

Visiem atkārtojumiem lineāro modeļu koeficienti ir statistiski ticami: ar 99 % varbūtību noraida 0-hipotēzi ( $p$ -vērtības  $< 0.01$ ). Jarque-Bera testa modeļa kļūdām  $p > 0.01$  un ar 99 % nevar noraidīt 0-hipotēzi, ka kļūdu sadalījums atbilst normālajam. Ar tādu pašu ticamību nevar noraidīt, ka starp kļūdām nepastāv autokorelācijas un kļūdu dispersijas ir vienādas. Līdz ar to var secināt, ka abiem ģeneratoriem lineārie modeļi ir statistiski ticami.

Pirmā ģenerators 3. atkārtojuma un otrā ģenerators 1. atkārtojuma regresijas modeļa parametri tika izmantoti iekšdedzes ģenerators imitācijas modeļa degvielas patēriņa funkcijā, bet ir jāņem vērā, ka pie citiem apstākļiem (degvielas parametri, apkārtējā vides temperatūra, gaisa spiediens, mitrums) parametri var atšķirties un būs nepieciešams to pārrēķins. Līdzīgā veidā var iegūt arī citu ģeneratoru degvielas patēriņa koeficientus izmantošanai piedāvātajā modelī.

Iekšdedzes motora ģenerators klase "E1FuelG" izmantošanai no AVS SIL režīmā parādīta 2.36. att.

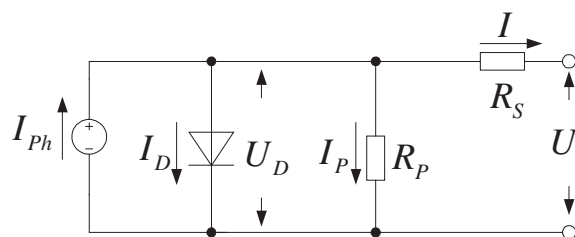


2.36. att. Iekšdedzes motora ģenerators klase

Klase satur metodes ģenerators ieslēgšanai un izslēgšanai, realizē jaudas un degvielas līmeņa sensorus, dodot iespēju nolasīt caur īpašībām attiecīgos lielumus, kā arī tiek mantoti visi elementi no "BackUpGenerator". Klase "BackUpGenerator" veidota vispārināti priekš visa veida ģeneratoriem, kuriem ir darbības laika ierobežojums atkarīgs no uzkrātā primārā resursa daudzuma, un ir realizētas īpašības "Resource", "ResourceMax" attiecīgi pašreiz pieejamajam resursu daudzumam un maksimāli iespējamajam. Īpašības ir izmantojamas augstākā līmeņa AVS algoritmā, lai varētu mainīt akumulatoru uzlādes vai slodzes elektrobarošanas stratēģijas atkarībā no pieejamā resursa daudzuma.

### 2.4.3. Fotoelektriskais ģenerators

Fotoelektriskā ģenerators jeb saules baterijas modelis tika veidots, izmantojot literatūrā biežāk apskatīto fotoelementa ekvivalento shēmu ar fotostrāvas avotu, paralēli slēgtu diodi, noplūžu un virknes pretestībām (Chu, Chen, 2009), skat. 2.37. att.



2.37. att. Fotoelementa ekvivalentā shēma (pēc Chu, Chen, 2009)

Strāvas avots rada apgaismojumam tieši proporcionālu strāvu  $I_{ph}$ . Caur fotoelementu formējošo diode vadāmības virzienā plūst strāva  $I_D$ , uz diodes krīt spriegums  $U_D$ . Pretestība  $R_p$  reprezentē noplūdes strāvas zudumus fotoelementā  $I_p$ , bet pretestība  $R_s$  – zudumus savienojumā ar elementa ārējiem kontaktiem.  $I$  ir ārējā ķēdē plūstoša strāva,  $U$  – spriegums uz fotoelementa spailēm. Šajā darbā modeļa vienkāršošanas nolūkos tika pieņemts, ka fotoelementā nav noplūžu strāvas ( $R_p = \infty$ ).

Fotoelektriskā ģenerators modelis balstīts uz (González-Longatt, 2005) un (Pandiarajan, Muthu, 2011) apskatītajām sakarībām. Tā kā praksē saules paneļu tehniskajā dokumentācijā parasti tiek doti parametri visam panelim kopā, tad matemātiskajos aprēķinos pie strāvas un sprieguma ir jānorāda attiecīgi paralēli un virknē slēgti fotoelementu skaits. Lai atšķirtu mainīgos un parametrus, apzīmējumos apostrofos tika lietoti “C” – fotoelementa mainīgajam un bez apostrofa moduļa mainīgajam.

Strāvas fotoelementā saista Kirhofa strāvu likums:

$$I^C = I_{ph}^C - I_D^C, \quad (2.11)$$

kur  $I^C$  – fotoelementa izejas strāva, A;

$I_{ph}^C$  – gaismas ietekmes rezultātā radītā fotostāva, A;

$I_D^C$  – fotoelementa diodes strāva stāva, A;

Gaismas ietekmes rezultātā radītā strāva ir atkarīga no apgaismojuma intensitātes, īsslēguma strāvas un apgaismojuma intensitātes standarta apstākļos, fotoelementa temperatūras un strāvas temperatūras koeficienta, sakarībā izmantoti kopējie fotoelementu moduļa parametri:

$$I_{ph}^M = I_{SCr}^M \frac{G_a}{G_{ar}} K_i (T - T_r), \quad (2.12)$$

kur  $I_{ph}^M$  – moduļa foto strāva, A;

$I_{SCr}^M$  – moduļa īsslēguma strāva standarta apstākļos, A;

$G_a$  – apgaismojuma intensitāte,  $W \cdot m^{-2}$ ;

$G_{ar}$  – apgaismojuma intensitāte standarta apstākļos,  $W \cdot m^{-2}$ ;

$K_i$  – strāvas temperatūras koeficients,  $A \cdot (K^\circ)^{-1}$ ;

$T$  – moduļa temperatūra,  $C^\circ$ ;

$T_r$  – moduļa temperatūra standarta apstākļos,  $C^\circ$ ;

Fotoelementu kopējo piestātinājuma strāvu aprēķina:



$$I_0^M = N_p \cdot I_0^C = N_p \cdot I_{rs}^C \cdot \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \exp\left(\frac{q \cdot E_{g0}}{Bk} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right)$$

$$I_{rs}^C = \frac{I_{scr}}{N_p} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{qU_{OCr}^M}{N_s kAT}\right) - 1}, \quad (2.13)$$

- kur  $I_0^M$  – moduļa piesātinājuma strāva, A;  
 $I_{rs}^C$  – fotoelementa diodes piesātinājuma strāva bloķēšanas virzienā, A;  
 $U_{OCr}^M$  – moduļa atvērtās ķēdes spriegums standarta apstākļos, V;  
 $N_p$  – paralēli slēgto fotoelementu skaits;  
 $N_s$  – virknē slēgto fotoelementu skaits;  
 $A, B$  – diožu parametri (idealitātes faktori);  
 $k$  –  $1.380658 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$  (Bolcmaņa konstante);  
 $q$  –  $1.60217733 \cdot 10^{-19} \text{ As}$  (elektrona lādiņš);  
 $E_{g0}$  – 1.1 eV (silīcija enerģijas sprauga, *band gap*).

Kopējo moduļa strāvu aprēķina, apvienojot formulas (2.11-2.13):

$$I_{PV}^M = I_{ph}^M - I_0^M \cdot \exp\left(\frac{q(U_{PV}^M I_{PV}^M \cdot R_s^M)}{AkT} - 1\right), \quad (2.14)$$

- kur  $I_{PV}^M$  – moduļa izejas strāva, A;  
 $U_{PV}^M$  – moduļa izejas spriegums, V;  
 $R_s^M$  – moduļa iekšējā pretestība,  $\Omega$ .

Moduļa Maksimālā izejas jauda  $P_{\max}^M = I_{\max}^M \cdot U_{\max}^M$  ir nelineārs mainīgs lielums atkarībā no pieliktās slodzes, no tā iegūstams lietderības koeficients:

$$\eta = \frac{P_{\max}^M}{P_{in}^M} = \frac{I_{\max}^M \cdot U_{\max}^M}{S \cdot G_a}, \quad (2.15)$$

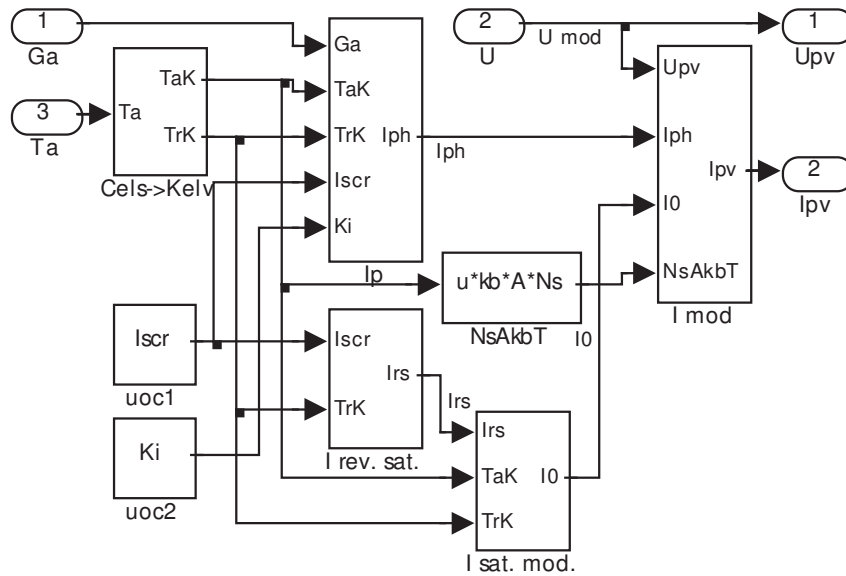
- kur  $S$  – fotoelementu moduļa virsmas laukums,  $\text{m}^2$ .

Piepildījuma faktors, kas ir attiecība starp maksimālo fotoelementa izejas jaudu un atvērtās ķēdes spriegumu un īsslēguma strāvu aprēķināts pēc sakarības:

$$FF = \frac{P_{\max}^M}{I_{SC}^M \cdot U_{OC}^M} = \frac{I_{\max}^M \cdot U_{\max}^M}{I_{SC}^M \cdot U_{OC}^M}. \quad (2.16)$$

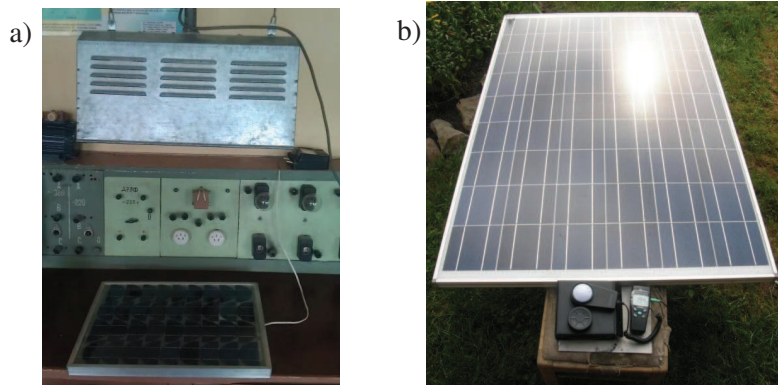
Piepildījuma faktors nosaka reālo saules bateriju efektivitāti, kvalitatīvām baterijām tas ir 0.7.  $FF$  samazinās, paaugstinoties fotoelementa temperatūrai.

Balstoties uz apskatītajiem vienādojumiem izveidots fotoelektriskā ģeneratora modelis (skat. 2.38. att.). Modeļa ieejās var norādīt virknē un paralēli slēgto elementu skaitu, starojuma līmeni un moduļa temperatūru, izejās tiek aprēķināts kopējais fotoelementu moduļa spriegums un strāva.



2.38. att. Fotoelektriskā ģeneratora modelis

Modeļa eksperimentālai validācijai tika izmantotas divas saules elementu baterijas: mazjaudas ( $\approx 1$  W) bez tehniskās pases (panelis “A”) un Kioto KPV195PE 195 W polikristāliska baterija (panelis “B”), skat. 2.39. att.



2.39. att. Eksperimentāls saules baterijas panelis ar jaudu 1 W (a) un saules baterijas panelis Kioto KPV 195 PE ar jaudu 195 W (b)

Paneļu tehniskie dati standarta testa apstākļos apkopoti 2.7. tabulā. Panelim “A” galvenie parametri tika uzņemti eksperimentāli laboratorijas apstākļos, kas atšķiras no standarta. Apgaismojums nodrošināts ar divām 200 W kvēlspuldzēm uz moduļa laukumu  $0.25 \text{ m}^2$ , kas atbilst  $G_{ar} \approx 1600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , apkārtējā temperatūra  $T_r = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

2.7. tabula

Eksperimentos izmantoto saules paneļu tehniskie dati

Parametrs	Panelis “A”	Panelis “B”
$P_{\max r}^M$	-	195 W
$U_{SCr}^M$	$17.2 \pm 0.035 \text{ V}$	3.42 V
$I_{SCr}^M$	$0.12 \pm 0.006 \text{ A}$	8.11 A
$K_i$	-	$0.0044 \text{ A} \cdot (\text{C}^\circ)^{-1}$
$N_s$	36	18
$N_p$	1	3

Paneļa “B” tehniskie dati ir doti tehniskajā dokumentācijā pie  $G_{ar} = 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $T_r = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , AM1.5 gaismas spektra. Jāatzīmē, ka pirmā paneļa laboratorijas eksperimentā kvēlspuldžu spektrs ir atšķirīgs no saules gaismas spektra.

Saules starojuma jauda, kas ir nepieciešama modeļa ieejā panelim “B” tika mērīta ar luksometru. Luksometra rādījuma pārrēķins tika veikts, izmantojot saules elektromagnētiskā starojuma spektra funkciju atkarībā no viļņa garuma un cilvēka acs relatīvās jutības sadalījuma pa viļņa garumiem. Pēc formulas (2.16) tika noteikts maksimālais redzamais starojums luksos.

$$G_{R\max} = 683 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} G_s(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (2.16)$$

kur  $\lambda$  – viļņa garums, nm;

$G_r$  – kopējais redzamais starojums,  $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2} = \text{lux}$ ;

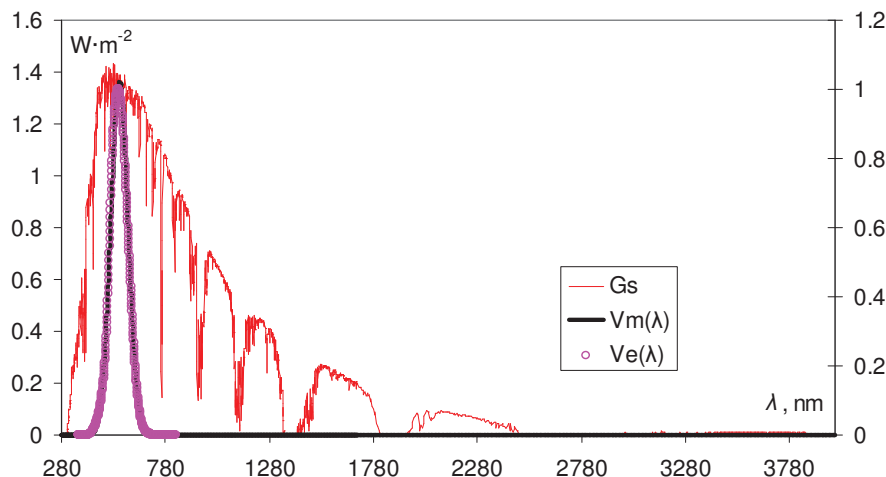
$G_s(\lambda)$  – elektromagnētiskais saules starojums kā funkcija no viļņa garuma,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ;

$V(\lambda)$  – cilvēka acs spektrālās jutības koeficients pie dotā viļņa garuma;

Pēc formulas (2.17) tika noteikts aptuvenā pārrēķina koeficients no redzamā starojuma uz pilno elektromagnētisko:

$$k_{\text{lux} \rightarrow \text{W/m}^2} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} G_s(\lambda) d\lambda}{G_{R\max}}. \quad (2.17)$$

Aprēķinos tika izmantots standarta saules spektrs uz horizontālas virsmas – ASTM G-173, pieejams tiešsaistē (Reference Solar Spectral..., 2011); un cilvēka acs spektrālās jutības empīriskais sadalījums  $V(\lambda)$  pēc starptautiskās apgaismojuma komisijas, CIE (Commission internationale de l'éclairage) datiem (Datatables 15..., 2004). Sadalījumi doti 2.40. att.



2.40. att. Elektromagnētiskais saules starojums uz horizontālas virsmas  $G_s$ , acs jutības empīriskais sadalījums  $V_e(\lambda)$  un aproksimācija ar Gausa funkciju  $V_m(\lambda)$

Aprēķinu vajadzībām spektrālās jutības koeficients tika aproksimēts ar Gausa funkciju (ar Matlab “Curve fitting” rīku), determinācijas koeficients ar 95 % statistisko ticamību ir  $R^2 = 0.9963$ . Iegūtais vienādojums un koeficienti:

$$V_m(\lambda) = 1.019 \cdot e^{\frac{-(\lambda-559.1)^2}{6987.9842}}. \quad (2.18)$$

Izmantojot sakarības (2.16–2.18), tika aprēķināts koeficients redzamā starojuma luksos un pilnā elektromagnētiskā starojuma  $W \cdot m^{-2}$  pārrēķināšanai ar pieņēmumu, ka, mainoties saules starojumam uz horizontālas virsmas atmosfēras stāvokļa, mākoņainuma, saules leņķa u.c. apstākļu dēļ, spektra sadalījuma funkcija paliek nemainīga un pārrēķina koeficients ir lineārs:

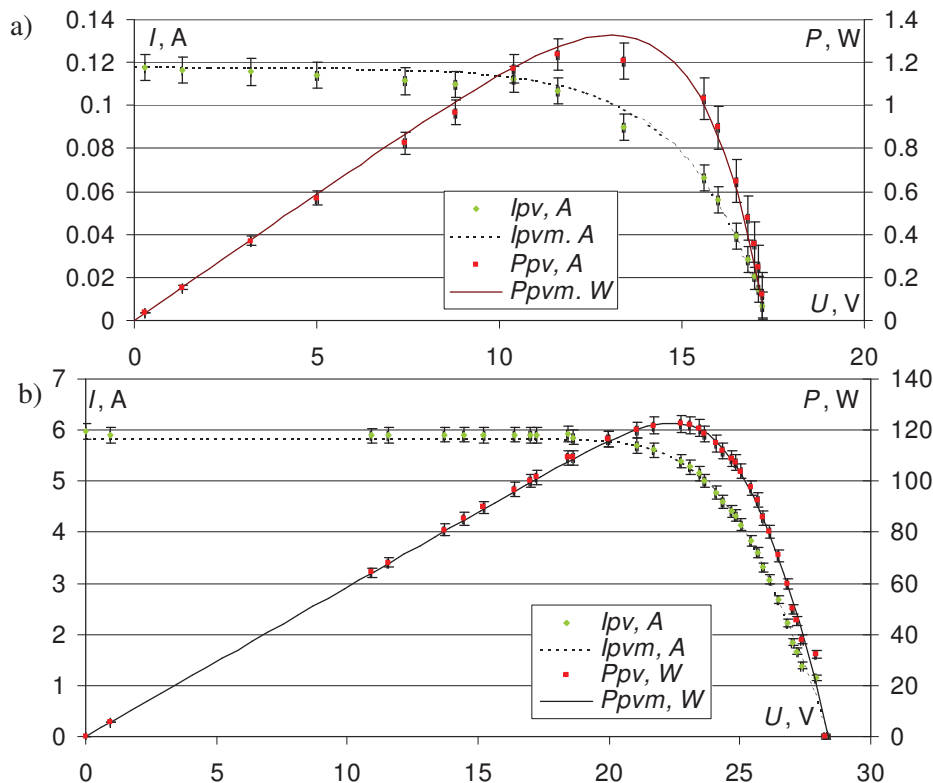
$$G_{R \max} = 683 \cdot 1.019 \int_{280}^{4000} G_s(\lambda) e^{\frac{-(\lambda-559.1)^2}{6987.9842}} d\lambda = 97240 \text{ lux}$$

$$\int_{280}^{4000} G_s(\lambda) d\lambda = 887.65 \text{ W} \cdot m^{-2} \quad (2.19)$$

$$k_{\text{lux} \rightarrow W/m^2} = 887.65/97240 = 0.009128 \frac{W \cdot m^{-2}}{\text{lux}}$$

Tā kā iepriekš norādītajā informācijas avotā  $G_s(\lambda)$  ir uzdots ar tabulu ar argumenta soli  $\lambda = 0.5 \text{ nm}$  diapazonā 280-4000 nm, tad integrēšanas vietā tika lietota summa, bet  $V_m(\lambda)$  rēķināta pa tiem pašiem soļiem.

Simulācijas un mērījumu rezultāti parādīti 2.14. att. Mērinstrumentu maksimālās kļūdas: spriegumam (multimetrs Fluke 185) atkarībā no diapazona 0.004-0.035 V, strāvai (multimetrs Meterman XR34) panelim “A” ar diapazonu 300 mA – 0.2...1.3 mA, bet panelim “B” ar diapazonu 10 A – 0.03...0.15 A. Jauda tika aprēķināta no  $U$ ,  $I$  mērījumiem. Katram  $P$  mērījuma punktam rēķinātas daļiņās kļūdas. Maksimālā jaudas kļūda panelim “A” – 0.02 W, panelim “B” – 3.32 W.



2.41. att. Saules bateriju simulācijas un eksperimentālo mērījumu salīdzinājums eksperimentālajam 1 W (a) un Kioto KPV 195 PE panelim (b)

$I_{PV}$  – eksperimentāli uzņemtā strāva;  $P_{PV}$  – aprēķinātā jauda no eksperimentāli uzņemtiem sprieguma un strāvas;  $I_{PVM}$  – modelētā strāva;  $P_{PVM}$  – modelētā jauda

Pirmā paneļa mērījumi uzņemti iepriekš aprakstītajos laboratorijas apstākļos. Mērījumu vides parametri tika izmantoti modeļa ieejās ( $G_a$ ,  $T_a$ , 2.38. att.), ieejā  $U$  padotas vērtības  $0..U_{OC}$ .

Kioto KPV 195 PE baterijas  $UI$  raksturlīknes uzņemtas dabiskajā saules gaismā. Panelis novietots horizontāli pret zemes virsmu, mērījumi tika veikti skaidrā laikā 20. jūlijā plkst.11:00-13:00. Starojuma intensitātes kontrolei izmantots luksometrs Tenmars TM-202 diapazonā  $2.0 \cdot 10^5$  lux ar precizitāti 6 %. Mērījumu ņemšanas laikā  $G_a$  mainījās robežās  $7.70 \cdot 10^4 \pm 4.62 \cdot 10^3 \dots 7.91 \cdot 10^4 \pm 4.75 \cdot 10^3$  lux, vidējā vērtība  $\overline{G_a} = 7.78 \cdot 10^4$  lux. Paneļa temperatūra bija  $47 \pm 0.5$  °C un svārstījās 2 °C robežās. Vidējā starojuma vērtība tika pārrēķināta pēc (2.19) koeficienta un iegūti  $710.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Temperatūras un starojuma vidējās vērtības, kā arī spriegums  $0..U_{OC}$  tika padoti modeļa ieejā tā validācijai.

Simulācijas modelī tika iekļauti fotoelektrisko ģeneratoru parametri – diožu idealitātes faktori  $A_D$ ,  $B_D$  un virknes pretestība  $R_s$  (paneļa “A” gadījumā arī strāvas temperatūras koeficients  $K_i$ ), kuru lielumi nav doti tehniskajā dokumentācijā. Lai panāktu precīzāku modeļa darbību atbilstoši eksperimentālajiem datiem, šie parametri tika optimizēti, izmantojot nelineāro regresiju. Minimālo modeļa kļūdu kvadrātu summa izmantota kā mērķa funkcija. Optimizācija veikta ar Matlab Simulink “Parameter estimator” rīku. 2.8. tabulā dotas optimizējamo parametru sākuma vērtības un rezultāti, kā arī optimizēto modeļu kļūdu novērtējums. Optimizācijas metode – nelineārie mazākie kvadrāti, maksimālais pārrēķinu skaits – 1000, maksimālais iterāciju skaits – 100, optimizācijas beigu kritērijs – mērķa funkcijas izmaiņa mazāka par  $1.0 \cdot 10^{-6}$ . Kļūdu standartnovirzes rēķinātas pēc formulas:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (I_{pvm} - I_{pv})^2}{n - p}}, \quad (2.20)$$

kur  $\sigma$  – kļūdu standartnovirze;  
 $n$  – novērojumu skaits;  
 $p$  – optimizējamo parametru skaits.

Tā kā modelis nav lineārs un nav korekti izmantot determinācijas koeficientu, nelineārā modeļa atbilstība novērtēta pēc reālā mērījuma un modelētā lieluma absolūtās starpības, kuru salīdzina ar instrumentu kļūdu. Vidējā modeļa kļūda abiem paneļiem nepārsniedz ampērimetra kļūdas. Modeļa kļūda pārsniedz ampērimetra kļūdu panelim “A” tikai 9. novērojumā pārlietuma zonā, kas ir arī redzams 2.41. att. (a), līdz ar to nesakrīt arī aprēķinātā un modelētā jauda. Kļūda var būt saistīta ar to, ka eksperimentā tika izmantoti divi dažādas jaudas reostati raksturlīknes konstantas strāvas un konstanta sprieguma daļām vai arī ar kļūdaiņu mērījumu nolasīšanu.

Tāpat validācijai ar tehniskās pasas datiem tika salīdzinātas paneļa “B” pie standarta apstākļiem modelētās izejas vērtības. Šajā salīdzinājumā (skat. 2.9. tabulu) netieši tiek iekļauts arī redzamās gaismas un pilnā saules starojuma pārrēķina koeficienta novērtējums, jo raksturlīkne uzņemta un koeficienti optimizēti pie cita apgaismojuma un temperatūras, bet starojums eksperimentāli mērīts tikai redzamās gaismas diapazonā. Tabulā jaudai iekavās dota no sprieguma un strāvas aprēķinātā vērtība, bez iekavām – nominālā. No salīdzinājuma tabulas var redzēt, ka modeļa kļūda nepārsniedz 1.5 %. Jāievēro, ka (2.19) iegūtais koeficients ir pieskaņots pie globālā saules radiācijas spektra (2.40. att.), kas Latvijā var atšķirties. Līdz ar to var rasties nepieciešamība līdz ar koeficienta precizēšanu pārrēķināt arī fotoelektriskā ģeneratora modeļa parametrus.

Fotoelektriskā ģeneratora modeļa parametru optimizācija

Panelis	Parametrs	Sākuma vērtība/ optimizācijas robežas	Iterāciju skaits	Optimizētā vērtība	Mērķa funkcijas vērtība	Modeļa kļūdu standartno virze	Modeļa kļūda, mA (maks/min/vid)
A	$A_D$	1/[0..∞]	6	2.3178	0.00025	0.00458	8.76/0.49/ 3.36
	$B_D$	1/[0..∞]		1.0000			
	$R_s$	0.1/[0.1..1]		0.1000			
	$K_i$	0.0044/ [0..∞]		0.0044			
B	$A_D$	1/[0..∞]	14	2.6686	0.31809	0.09970	420.00/0.48/ 60.75
	$B_D$	1/[0..∞]		0.6895			
	$R_s$	0.1/[0.1..1]		0.4210			

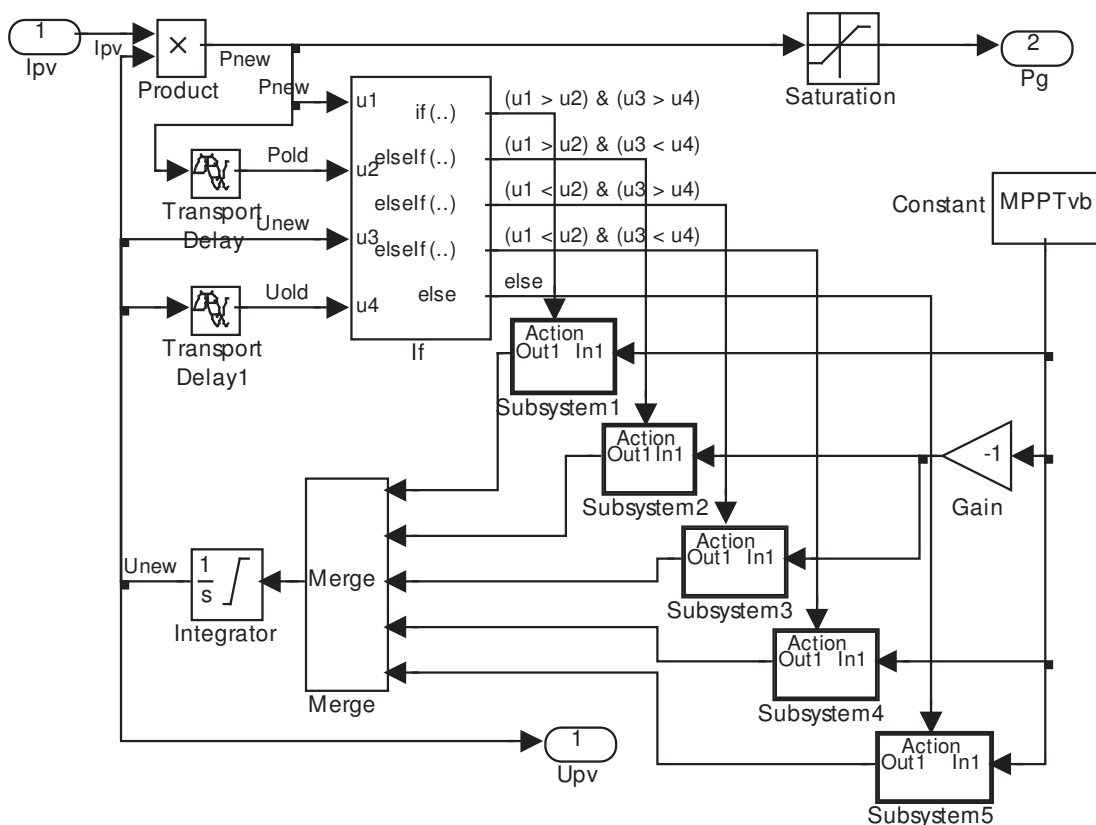
Fotoelektriskā ģeneratora izejas jaudas raksturlīkne atkarībā no sprieguma ir nelineāra ar izteiktu maksimuma punktu, kuru sauc par saules baterijas maksimālās jaudas punktu. Saules baterija tiks darbināta ar visaugstāko efektivitāti tieši šajā punktā. Atbilstošo darba režīmu nodrošina ar pusvadītāju pārveidotāja palīdzību, kas realizē kādu no maksimālās jaudas sekošanas (MPPT) algoritmiem. Eksistē vairāki MPPT algoritmi, šajā darbā, lai realizētu saules baterijas modeļa interfeisu ar modelēto līdzstrāvas kopni līdzīgi pārējām ģenerējošām iekārtām ar pieejamās jaudas izeju  $P_G$ , tika pielietots modificēts perturbāciju un novērojumu (P&O) algoritms (Jiang et.al., 2005). P&O algoritma pamatā ir saules baterijas moduļa sprieguma izmaiņa pirmajā ciklā (perturbācija) un iepriekšējās un nākamās izejas jaudas vērtību salīdzināšana nākamajā ciklā (novērojums). Atkarībā no jaudas izmaiņas tiek padots spriegums nākamajā ciklā. Sprieguma perturbācija praktiski var tikt realizēta ar impulsa platuma metodi.

Kioto KPV 195 PE pases datu un modeļa izeju salīdzināšana raksturīgajos  $UI$  un  $P$  līknes punktos

Mainīgais	Pases dati	Modeļa izeja	Kļūda/% no pases datiem
$U_{PV}$ pie $P_{max}$ , V	25.80	25.54	0.26/1.0
$I_{PV}$ pie $P_{max}$ , A	7.59	7.69	0.10/1.3
$P_{max}(U \cdot I)$ , W	195 (159.8)	196.4	1.4 (0.6)/0.7 (0.4)

Darba ietvaros P&O algoritms tika realizēts Simulink vidē (skat. 2.42. att.). MPPT kontrollera bloka ieejā ir saules baterijas strāva, bet izejā – baterijai pieliktais spriegums un rezultātā iegūtā jauda  $P_G$ .

Perturbācijas virziens –  $U_{PV}$  palielināšana vai samazināšana – tiek noteikts nosacījuma blokā “If”, kas ņem vērā pašreizējās un iepriekšējās  $P_{PV}$  un  $U_{PV}$  vērtības.  $U_{PV}$  tiek izmainīts atkarībā no izpildījušās loģiskās izteiksmes. Intervāls starp lēmuma pieņemšanas soļiem  $MPPT_{st}$ , t.i., MPPT kontrollera diskretizācijas periods ir realizēts ar transporta kavējuma bloku, un “If” bloka aprēķinu periodu.

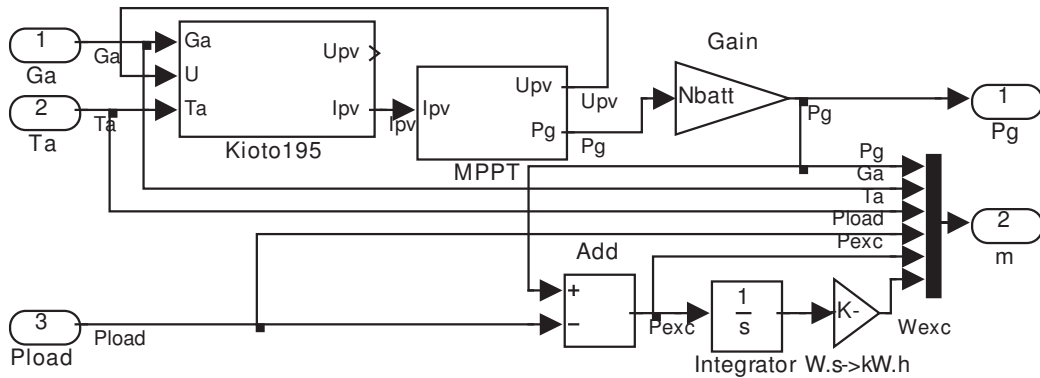


2.42. att. Perturbāciju un novērojumu algoritms MPPT kontrollera blokā

Baterijas spriegums tiek integrēts un pieauguma (vai samazinājuma) ātrumu nosaka konstante  $MPPT_{vb}$ . Integratora sākuma vērtība  $MPPT_{vi}$  vienāda ar baterijas spriegumu maksimālajā jaudas punktā pie standarta apstākļiem no pases datiem, lai pēc kontrollera ieslēgšanas (simulācijas sākuma) pie mazākām  $MPPT_{vb}$  vērtībām panāktu ātrāku integrēšanos līdz optimālai  $U_{PV}$  vērtībai. Pieskaņojot  $MPPT_{st}$  un  $MPPT_{vb}$  var panākt nosacīti stabilu maksimālās jaudas punkta atrašanu. Pie  $MPPT_{st} = 1$  s un  $MPPT_{vb} = 0.1$  V simulācijas standarta apstākļos MPPT kontrolleris noslogoja bateriju vidēji ar 196.26 W (ar svārstībām 195.56-196.28 W, kas ir 0.5-0.7 % vairāk par  $P_{maxr}$  no pases datiem). Jāatzīmē, ka apskatītajā modelī nav realizēta saules baterijas darbība pie daļēja apgaismojuma vai tumsā, kad samazinās un maina zīmi tās elektrodzinējspēks un baterija sāk patērēt strāvu no kopnes. Praksē, lai to novērstu izmanto bloķējošās diodes vai nodrošina vadību ar saules bateriju uzlādes kontrolleri.

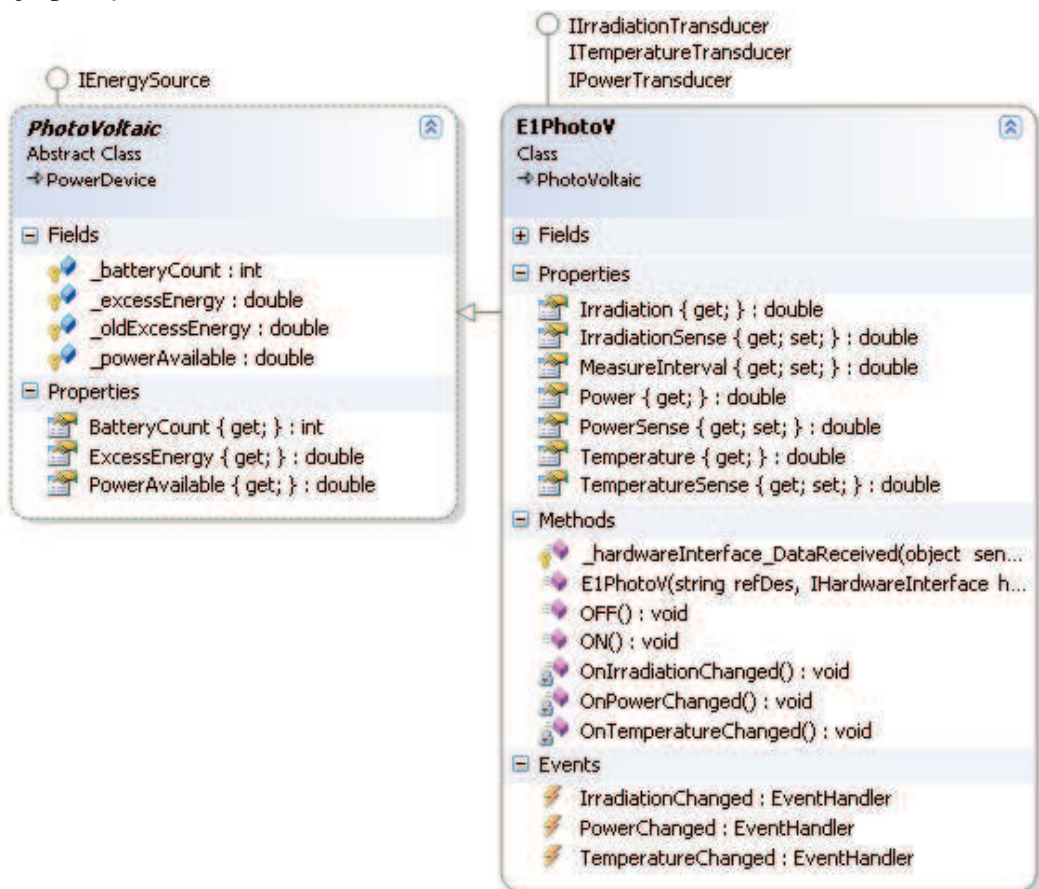
2.43. att. parādīts saules baterijas un MPPT kontrollera savstarpējais savienojums, kas veido vienotu saules baterijas bloku un var tikt izmantots kā pie spēka interfeisa pieslēdzams jaudas avots līdzstrāvas kopnes modelī. Bloka ieejās ir paneļa temperatūra, starojums un spēka interfeisa patērētās jaudas atgriezeniskā saite, izejā pieejamā jauda un kontroles mērījumu vektors “m”, kas ietver baterijas spriegumu, strāvu, jaudu, kā arī ieejas lielumu un vadības signālu. Bloka parametri ietver visus saules baterijas parametrus standarta apstākļiem, pašu standarta apstākļu lielumi (temperatūra un apgaismojums), baterijā paralēli un virknē ieslēgto elementu skaitu. Bez tam tika pievienots parametrs  $N_{batt}$ , ar kura palīdzību var norādīt paneļu skaitu, pieņemot, ka visi paneļi ir ar vienādiem parametriem un darbojas identiskos temperatūras un apgaismojuma apstākļos. Ar MPPT kontrollera palīdzību iegūtais maksimālās jaudas signāls tiek sareizināts ar  $N_{batt}$ , pie tam, tā kā tiek lietots tieši jaudas signāls, nav svarīgs paneļu kopējais slēgums, un ar vienu simulācijas bloku ir iespējams modelēt dažādu mērogu saules bateriju instalācijas.

Saules baterijas modelim jaudas signāls atgriezeniskajā saitē no spēka interfeisa tiek izmantots tikai, lai aprēķinātu neiztērēto saražoto saules enerģiju. Jaudas atgriezeniskā saite tieši neietekmē saules baterijas modeļa darbību, jo slogošanu vada MPPT kontrollelis, kas šajā modelī ir daļa no saules baterijas instalācijas. Jāatzīmē, ka praktiskā realizācijā MPPT kontrollelis var būt apvienots arī ar centrālās kopnes spēka interfeisu.



2.43. att. Fotoelektriskā ģeneratora imitāciju modelis ar jaudas izeju

Tika izstrādāta arī saules baterijas klase izmantošanai no AVS programmas (skat. 2.44. att.). Abstraktā klase “PhotoVoltaic” tiek mantota no kopējās jaudas iekārtu klases “PowerDevice” un realizē enerģijas avota interfeisu, t.i. satur īpašību “PowerAvailable” pieejamās jaudas noteikšanai. “PhotoVoltaic” paredzēta saules bateriju instalācijas vadībai, kas var sastāvēt no vienas vai vairākām baterijām, tāpēc ir īpašība, kas norāda kopējo paneļu skaitu.



2.44. att. Fotoelektriskā ģeneratora klase

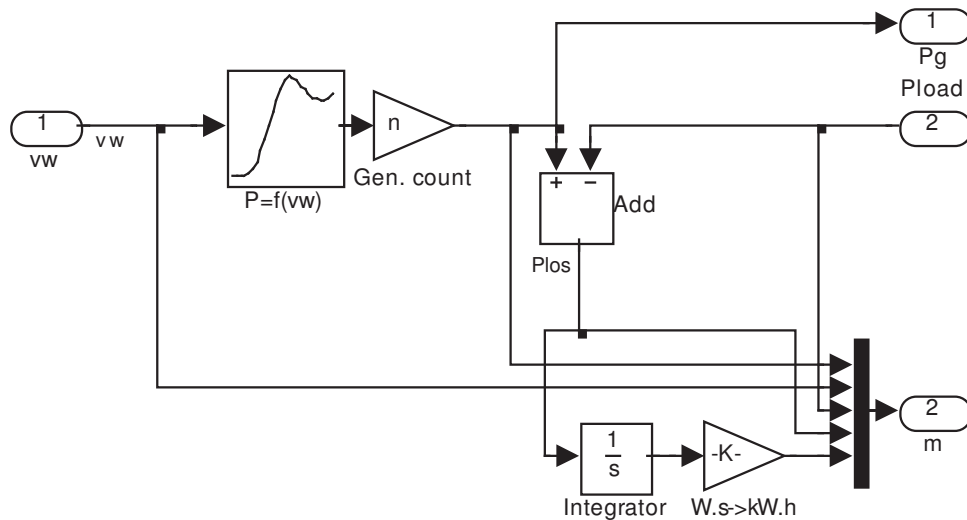


Reālā klase “E1PhotoV” paplašina “PhotoVoltaic”, pievienotas metodes saules bateriju instalācijas pieslēgšanai/atslēgšanai no spēka interfeisa, jaudas, apgaismojuma un temperatūras sensoru funkcionalitāte un privātās metodes notikumu bāzētajai starpklašu informācijas apmaiņai.

#### 2.4.4. Vēja ģenerators

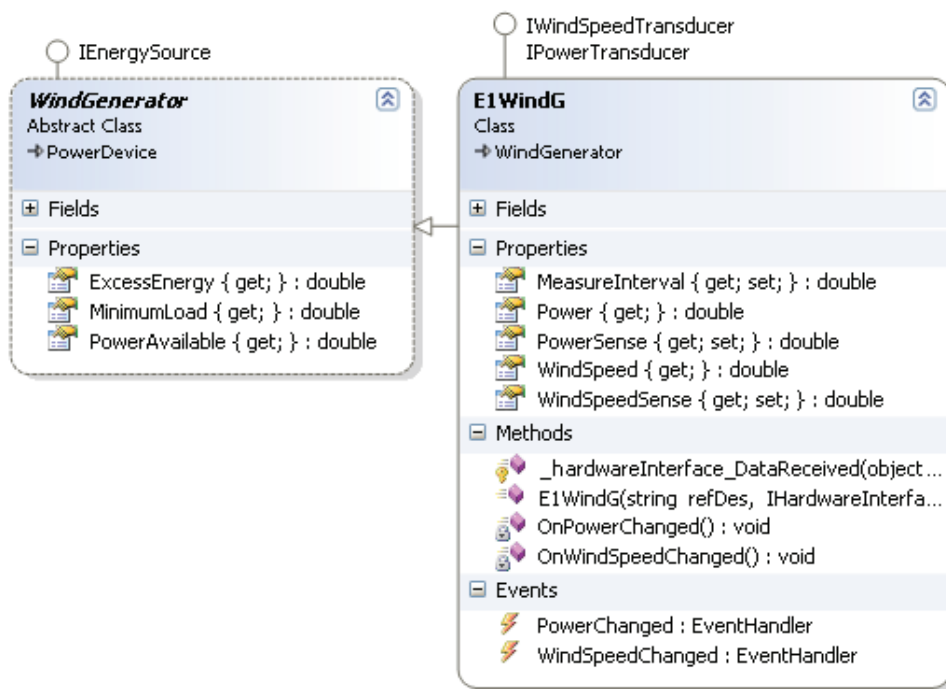
Neskatoties uz kopīgajiem darbības principiem, vēja ģeneratoriem ir liela konstruktīvā izpildījuma dažādība saistībā ar rotora konfigurāciju, gaisa plūsmu šķeļošo laukumu, aerodinamiku, mehāniskā pārvadu, izmantoto elektrisko mašīnu, optimālās slodzes algoritmu u.c. īpašībām. Līdz ar to šī darba ietvaros vēja ģeneratora imitāciju modeļa bloks ir veidots, izmantojot esošās vēja ģeneratoru jaudas raksturlīknes, kuras parāda sakarību starp vēja ātrumu un maksimāli no vēja ģeneratora pieejamo jaudu. Jaudas raksturlīknes konkrētiem ģeneratoriem tiek norādītas tehniskajā dokumentācijā un ietver elektriskos un mehāniskos lietderības koeficientus, maksimālās jaudas sekošanas un bremzēšanas sistēmas darbību.

2.45. att. dots modelis Simulink, kurš izmanto ar tabulu uzdotu vēja ģeneratora jaudas raksturlīkni, trūkstošie punkti tiek interpolēti. Modeļa izejā ir pieejamā elektriskā jauda ( $P_G$  pieslēgšanai spēka interfeisa ieejā) un visu darbības signālu vektors analogisks iepriekš apskatītajām iekārtām. Ieejā ir pašreizējais vēja ātrums un elektriskā slodze. Modelī tiek pieņemts, ka vēja turbīna tiek darbināta optimālā režīmā, ko nodrošina vēja ģeneratora iekārtas controlleris. Modeļa parametros Matlab vides masīva veidā tiek norādīta izvēlētā ģeneratora jaudas raksturlīkne  $P_c$  un nominālais vēja ātrums  $V_{nom}$ .



2.45. att. Vēja ģeneratora modelis ar vēja ātruma-izejas jaudas sakarību

Vēja ģeneratora “E1WindG” klase Simulink modeļa izmantošanai AVS .NET vidē parādīta 2.46. att. Klase tiek mantota no vispārīgā vēja ģeneratora un realizē enerģijas avota, jaudas sensora un vēja ātruma sensora (anemometra) interfeisus, t.i. ļauj austākā līmeņa vadības programmai nolasīt pašreizējo vēja ātrumu.



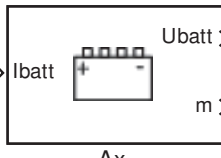
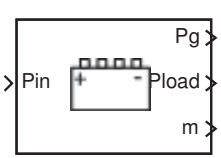
2.46. att. Vēja ģeneratora klase

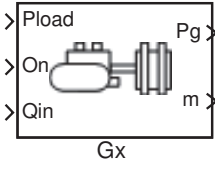
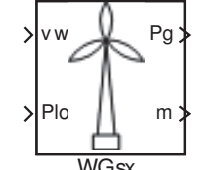
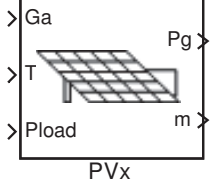
### 2.4.5. Iekārtu modeļu kopskats

Modelēto iekārtu ieeju, izeju un konstanto parametru kopsavilkums dots 2.10. tabulā. Visas šajā nodaļā apskatītās, kā arī 2.3. nodaļā modelētie spēka interfeisi apkopoti atsevišķā Simulink bloku bibliotēkā “HPSlib”.

2.10. tabula

### Modelēto iekārtu kopsavilkums

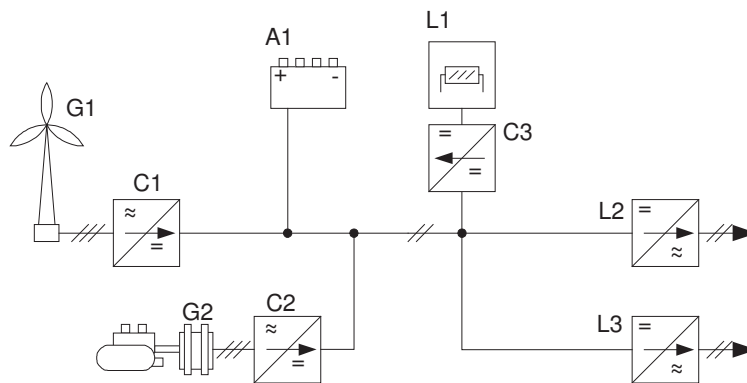
Iekārta	Ieejas*	Izejas*	Parametri*	Apzīmējums
Ķīmiskais akumulators ar tiešu pieslēgšanu līdzstrāvas kopnei	<u>Modeļa signāli:</u> $I_{batt}$ .	<u>Modeļa signāli:</u> $U_{batt}$ . <u>Kontroles signāli:</u> $SOC$ (% no pieejamās kapacitātes mēnesī); $I_{batt}$ ; $U_{batt}$ .	$E_0$ ; $K$ ; $Q$ (Ah); $A_b$ (V); $B_b$ ((Ah) <sup>-1</sup> ); $R_{iuzl}$ ; $R_{iuzl}$ ; $SOC_{init}$ ; $SDC$ (% no $SOC$ ); $I_{chmax}$ ; $I_{dchmax}$ ; $U_{battmax}$ ; $U_{battmin}$ .	
Ķīmiskais akumulators ar spēka interfeisu	<u>Modeļa signāli:</u> $P_{in}$ .	<u>Modeļa signāli:</u> $P_g$ ; $P_{load}$ . <u>Kontroles signāli:</u> $P_g$ ; $P_{load}$ un akumulatora kontroles signālu vektors	$U_{che}$ un ķīmiskā akumulatora parametri	

Iekārta	Ieejas*	Izejas*	Parametri*	Apzīmējums
Iekšdedzes motora ģenerators	<u>Modeļa signāli:</u> $Q_{in} (l \cdot h^{-1})$ ; $P_{load}$ . Vadības signāli: $On$ (0 – izslēgts, 1 – ieslēgts).	<u>Modeļa signāli:</u> $P_g$ . <u>Kontroles signāli:</u> $P_g$ ; $C_f (l)$ ; $P_{load}$ ; $Q_{in} (l \cdot h^{-1})$ ; $On$ ; $P_{exc}$ ; $W_{exc} (kWh)$	$P_{nom}$ ; $C_{finit}$ , $C_{fmax}$ (l); $b$ ; $k$ , $Q_{wup}$ (% no nominālā patēriņa $Q_c$ ), $T_{wu}$ .	
Vēja ģenerators	<u>Modeļa signāli:</u> $v_w$ ; $P_{load}$ .	<u>Modeļa signāli:</u> $P_g$ . <u>Kontroles signāli:</u> $P_g$ ; $v_w$ ; $P_{load}$ ; $P_{exc}$ ; $W_{exc} (kWh)$ .	$v_{nom}$ ; $P_c$ .	
Fotoelektriskais ģenerators	<u>Modeļa signāli:</u> $G_a$ ; $T_g (^\circ C)$ ; $P_{load}$ .	<u>Modeļa signāli:</u> $P_g$ . <u>Kontroles signāli:</u> $P_g$ ; $G_a$ ; $T_g (^\circ C)$ ; $P_{load}$ ; $P_{exc}$ ; $W_{exc} (kWh)$ .	$P_{maxr}$ ; $N_{batt}$ ; $MPPT_{ts}$ ; $MPPT_{vb}$ ; $MPPT_{vi}$ ; $I_{Scr}$ ; $U_{OCr}$ ; $N_s$ ; $N_p$ ; $G_{ar}$ ; $T_r$ ; $K_i$ ; $R_s$ ; $A_D$ ; $B_D$ .	

\*Visas mērvienības SI sistēmā, ja nav norādīts citādi

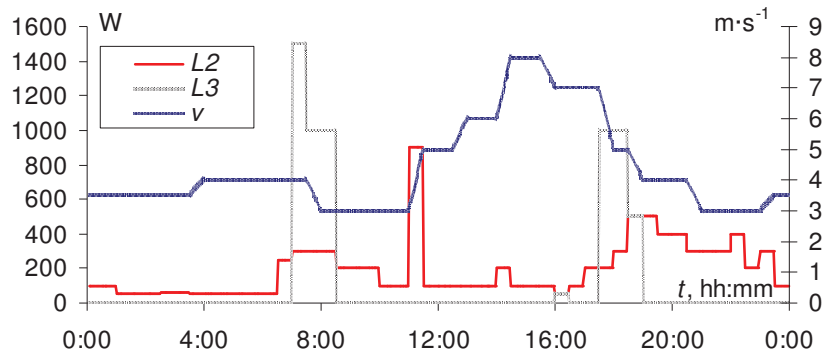
Simulink bloku bibliotēkas un AVS objektu modeļa izmantošana simulācijai SIL režīmā ir apskatīta ar mikro mēroga vēja un benzīna ģenerators autonomās kombinētās sistēmas (turpmāk HPS1) piemēru.

Kombinētās sistēmas iekārtu slēgums dots 2.47. att. Izmantota 24 V centrālā līdzstrāvas kopne, kura ar spēka interfeisa palīdzību apvieno 3 kW ECO-3000W markas vēja ģenerators (izejas jaudas raksturlīkni skat. 5. pielikumā), 5 kW benzīna ģenerators (izmantots NPEGG5200 lineārais modelis skat. 2.4.2. nodaļu) un kopnē tieši slēgtu stabilizējošo akumulatoru 24 V, 500 Ah. Tāpat kopnē ir atslēdzama konstantas jaudas slodze L1 ar jaudu 2 kW (sildītājs liekās vēja enerģijas izmantošanu) un neatslēdzamas slodzes L2 un L3, uzdotas ar diennakts elektroenerģijas patēriņa profilu. Visu spēka interfeisu lietderības koeficients ir 90 %.



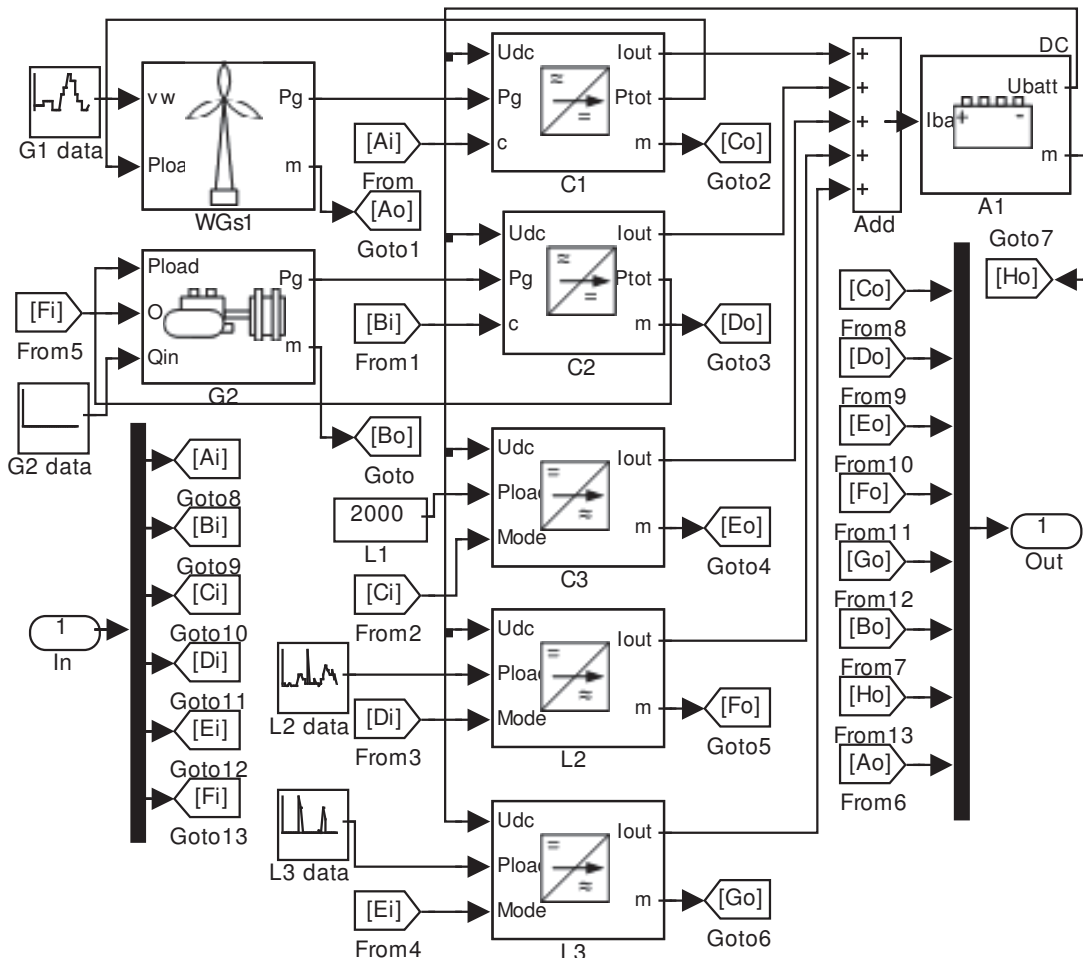
2.47. att. HPS1 iekārtu slēgums

Modeļu ieejās ir izmantoti sintētiski slodžu L2, L3 un vēja ātruma grafiki (skat. 2.48. att.). Slodzes grafiki ietver gan pastāvīgi pieslēgtu 100 W slodzi, gan arī lēcienus līdz 1.5 kW un reprezentē individuālas mājsaimniecības sadzīves elektroenerģijas patēriņtāju izmantošanu. Ieejas datu rindas neuzdod attiecīgos lielumus katrā simulācijas punktā un ir interpolēti. Vēja dati simulācijā interpolēti lineāri, bet slodzes datiem līdz nākamajai izmaiņai izmantots vecākais punkts uz laika ass.



2.48. att. Slodžu un vēja ātruma grafiki

2.49. att. parādīts HPS1 ekvivalentais Simulink modelis ar AVS interfeisu, kurš veidots no “HPSlib” bibliotēkas blokiem (2.2. un 2.10. tabulas). Visi iekārtu apzīmējumi modelī ir atbilstoši izmantotajiem elektriskajām shēmām.



2.49. att. HPS1 slēgumam ekvivalentais Simulink modelis

Interfeiss ar AVS programmu .NET vidē realizēts ar ieejas/izejas portiem, uz kuriem tiek padoti visi sistēmas mainīgie, tādējādi nodrošinot spēka interfeisā iebūvēto mēriekārtu, kontrolera regulējošās iedarbes u.c. sistēmas darbības signālu plūsmu starp AVS modeli un elektroapgādes sistēmas imitāciju modeli. Vadības programma .NET vidē nolasa sistēmas mainīgos un padod regulējošās iedarbes ar periodu 60 simulācijas sekundes.

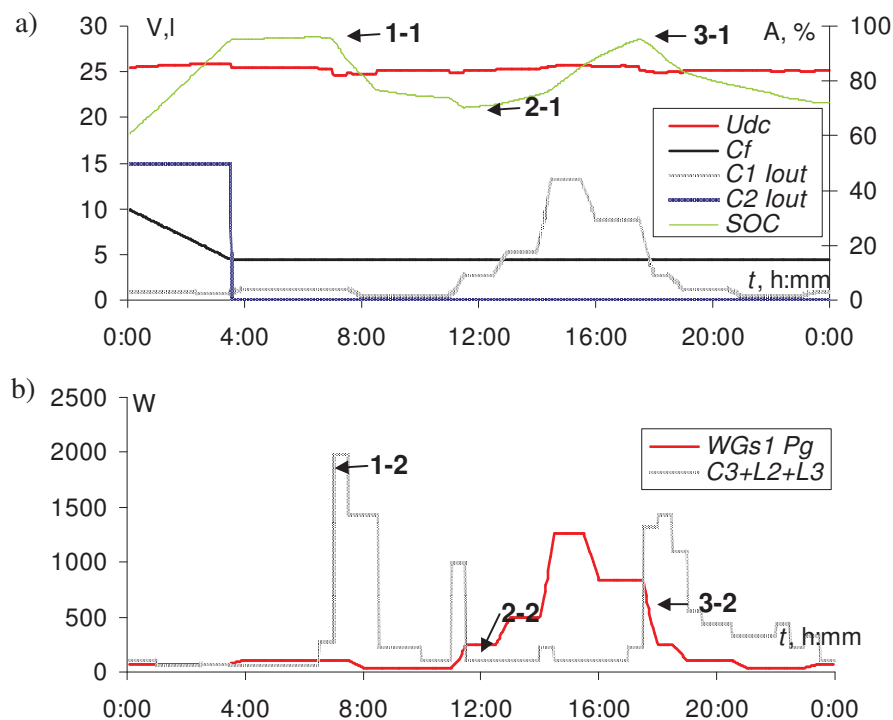
Tika izpildīts sekojošs sistēmas darbības scenārijs. Akumulatora sākuma uzlādes līmenis – 60 %, degvielas daudzums ģenerators tvertnē – 10 l. Vēja ģenerators spēka interfeiss C1 ir pastāvīgi ieslēgts un darbojas ar sprieguma ierobežojumu 28 V un strāvas ierobežojumu 150 A lādējot akumulatoru un nodrošinot elektrisko slodzi. Benzīna ģenerators G2 tiek ieslēgts, ja akumulatora SOC ir zem 70 %, un ģeneratoram pieslēgtais spēka interfeiss C2 darbojas ar 28 V sprieguma ierobežojumu un ar izejas strāvas ierobežojumu aprēķinātu pēc formulas:

$$i_r^{C2} = 50 + I^{L1} + I^{L2} + I^{C3} - I^{C1}, \quad (2.20)$$

kur  $i_r^{C2}$  – C2 strāvas ierobežojums;

$I^{L2}, I^{L1}, I^{C3}, I^{C1}$  – slodžu un spēka interfeisu strāvu absolūtās vērtības.

Tādējādi tiek nodrošināta akumulatora uzlāde ar 50 A un slodzes kompensēšana nepietiekamas vēja ģenerators jaudas gadījumā. G2 tiek izslēgts, ja A1 uzlādes līmenis sasniedz 95 %. Simulācijas rezultāti ir redzami 2.50. att. (kopnes spriegums, spēka interfeisu strāvas, akumulatora uzlādes līmenis un patērētā degviela) un 2.51. att. (pieejamā vēja jauda ar atskaitītiem pārveidošanas zudumiem un kopējā elektriskā slodze).



2.50. att. HPS1 simulācijas rezultāti

(a)  $U_{dc}$  – kopnes spriegums,  $C1 I_{out}$ ,  $C2 I_{out}$  – attiecīgo spēka interfeisu strāvas, SOC – akumulatora uzlādes līmenis,  $C_f$  – atlikušais degvielas daudzums; (b)  $WGs1 P_g$  – no vēja ģenerators pieejamā jauda,  $C3+L2+L3$  – slodžu summārā jauda

Grafikos var redzēt akumulatora SOC izmaiņas atkarībā no slodzes un ģenerējošo jaudu attiecības. Akumulators punktā 1-1 sāk izlādēties dēļ slodzes lēciena punktā 1-2.

Punktā 2-2 ir samazinājusies slodze un palielinājusies WG<sub>s1</sub> jauda, līdz ar to akumulators sāk lādēties, skat. punktu 2-1. 3-1 akumulators no jauna sāk izlādēties dēļ otra slodzes lēciena.

### Nodaļas kopsavilkums un secinājumi

1. Izpētīta modelēšanas pieeja, kur controlleris ir reāla iekārta vai atsevišķa datorprogramma, un vadības objekts ir virtuāls vai fizikāls modelis. Pamatojoties uz šo pieeju, tika izstrādāta metodika autonomu kombinēto elektroapgādes sistēmu segmentu un kompleksa līmeņa vadības algoritmu pētījumiem. Metodika ļauj veikt mikro mēroga autonomas kombinētas elektroapgādes sistēmas darbības simulācijas atsevišķi vadības objektam un vadības iekārtas programmatūrai, kura funkcionāli darbojas maksimāli pietuvināti reāliem apstākļiem.
2. Piedāvātās metodikas priekšrocība ir iespēja vispusīgi pārbaudīt vadības iekārtas programmatūras atbilstību funkcionālajām prasībām, kā arī pieskaņot vadības algoritmus un stratēģijas optimālai enerģijas plūsmas dalīšanai starp atjaunojamo un fosilo resursu ģeneratoriem, uzkrājējiem un patērētājiem pie dotās iekārtu konfigurācijas un pieejamo resursu un slodzes grafika. Simulācijās pilnveidotā un funkcionāli testētā programmatūra ar minimālām izmaiņām var tikt izmantota reālā vadības iekārtā.
3. Pamatojoties uz aprakstīto modelēšanas pieeju, ir izstrādāta modeļu kopa, kas sastāv no objektorientētas vadības iekārtas programmas Microsoft .NET vidē un atjaunojamās enerģētikas iekārtu imitācijas modeļiem Matlab Simulink vidē. Vadības iekārtas programmatūras un Simulink modeļa sasaistei izmantota .NET programmas tieša piekļuve Matlab darba vides komandām un Simulink vadībai, kas ļauj veikt iteratīvas simulācijas, atsevišķos soļos modificējot modeļu parametrus abās vidēs.
4. Vadības iekārtas programmatūras objektorientētais modelis paredz iespēju paplašināt to ar perspektīvu atjaunojamās enerģētikas iekārtu klasēm.
5. Izstrādātie vienvirziena un divvirzīnu darbības enerģijas plūsmas spēka interfeisu, konstantas pretestības un jaudas slodzes, ķīmiskā akumulatora, vēja, fotoelektriskā un iekšdedzes motora ģeneratora Simulink imitāciju modeļi ļauj veikt dažādu konfigurāciju mikro mēroga centralizētās līdzstrāvas kopnes autonomu kombinētu elektroapgādes sistēmu darbības simulāciju.
6. Vadības programmatūras modeļa un atjaunojamās enerģētikas iekārtu imitāciju modeļu izstrādē nav lietotas funkcijas, koda bibliotēkas un gatavi tipveida modeļi, kas ir specifiski izmantotajiem programmatūras izstrādes un modelēšanas rīkiem. Līdz ar to aprakstītā pieeja ir lietojama arī ar alternatīviem risinājumiem. Piemēram, Java vai Mono vadības programmatūras izstrādei un Scilab Xos imitāciju modelēšanai.
7. Izstrādātais ķīmiskā akumulatora imitāciju modelis validēts ar FIAMM FG20451 svina-skābes akumulatora izlādes eksperimentālajiem datiem, kuriem ir pieskaņoti modeļa parametri, izmantojot automatisko iteratīvo metodi. Modelētā akumulatora izlādes raksturlīkne atbilst eksperimentālajiem datiem ar precizitāti vidēji 1.7 % no nominālā sprieguma, tomēr jāņem vērā, ka modelī ir izmantota konstanta iekšējā pretestība, tāpēc pie pilnas izlādes modeļa precizitāte samazinās un kļūda sasniedz 6 %.
8. Fotoelektriskā ģeneratora modeļa parametri ir optimizēti Kioto KPV195PE paneļa eksperimentālajiem datiem, kas tika uzņemti reālos apstākļos. Modeļa kļūda salīdzinājumā ar paneļa pases datiem, kas ir uzdoti saules paneļu testa standarta apstākļiem, nepārsniedza 1.5 %.

9. Eksperimentu veikšanai ar fotoelektrisko paneli ir izstrādāta metode kopējā saules starojuma jaudas noteikšanai, izmantojot luksometru, kas darbojas cilvēka acs jutības elektromagnētisko viļņu spektra zonā, pieņemot, ka, mainoties saules starojumam, tā spektrs nemainās. Ir nepieciešami papildus pētījumi metodes kvantitatīvai novērtēšanai mainīga spektra apstākļos, taču tās efektivitāte apstiprinājās netieši, caur saules paneļa modeļa parametru pieskaņošanu un salīdzināšanu ar tā pases datiem.
10. Iekšdedzes motora ģenerators elektriskās slodzes un degvielas patēriņa sakarība ir lineāra. Ir izveidots uz NPEGG5200 ottomatora ģenerators eksperimentāliem datiem balstīts statistisks modelis ar koeficientu ticamību 95 %. Eksperimentos apstiprinājās pieņēmums, ka degvielas patēriņš ir palielināts attiecībā pret nominālo motora iesilšanas laikā, kas būtu jāņem vērā, izstrādājot un novērtējot ģenerators izmantošanas stratēģijas kombinētās elektroapgādes sistēmās. Līdz ar to iesilšanas dinamikas parametri tika iestrādāti imitāciju modelī un atbilstošajā programmatūras klasē.
11. Svina-skābes akumulatora un fotoelektriskā saules paneļa imitāciju modeļu darbības precizitātes paaugstināšanai, izmantojot reālu iekārtu eksperimentālos datus, tika lietota parametru optimizēšanas metode. Metode paredz, iteratīvi mainot parametru vērtības, minimizēt modeļa un eksperimenta kļūdu kvadrātu summu. Līdz ar to izstrādātie parametrizētie modeļi, izmantojot šo metodi, var tikt pieskaņoti arī citu modeļu un ražotāju iekārtām.

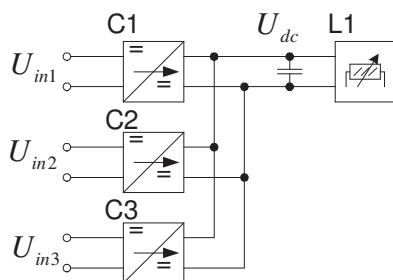
### 3. MODEĻU KOPAS EKSPERIMENTĀLA VALIDĀCIJA

Autonomās kombinētās elektroapgādes modeļu kopa tika eksperimentāli validēta divos soļos: ar fizikālo modeli sastāvošu no reālu spēka interfeisa iekārtu mērogā samazinātām kopijām un ar reālām iekārtām – saules paneli, uzlādes kontrolleri, svina-skābes akumulatoriem un konstantas pretestības slodzi.

#### 3.1. Teorētisko modeļu salīdzināšana ar līdzstrāvas kopnes fizikālo modeli

Mērķis teorētisko modeļu salīdzināšanai ar līdzstrāvas kopnes fizikālo modeli ir demonstrēt vienas un tās pašas AVS programmas izmantošanas iespējas HIL režīmā reāllaikā un salīdzināt rezultātus ar tās pašas konfigurācijas SIL modeli. HIL simulācija veikta ar fizikālajiem iekārtu modeļiem, kas ir maksimāli pietuvināti reālajām iekārtām, bet SIL – ar imitāciju modeļiem Simulink vidē (Osadčuks u.c., 2011). Fizikālais modelis ir mērogā samazināts (tajā skaitā elektriski) reālas iekārtas modelis ar lokālu kontrolleri izejas parametru regulēšanai un datu apmaiņas interfeisu. Augstākā līmeņa AVS realizēta, izmantojot 2.3. nodaļā apskatīto objektu modeli.

Automātiskās vadības objekts ir centralizētā līdzstrāvas kopne ar kapacitāti, kurā ir ieslēgta maināma slodze un 3 spēka interfeisi (skat. 3.1. att.). C1-C3 ir līdzsprieguma pārveidotāji un darbojas kā regulējami strāvas vai sprieguma avoti. Slodze L1 ir pa soļiem maināma konstantas pretestības slodze. Augstākā līmeņa AVS ir nepieciešams reaģēt uz izmaiņām slodzē R1 un noturēt kopnē uzdoto spriegumu, iestatot spēka interfeisu izejas regulējošos signālus.



3.1. att. Līdzstrāvas kopnes fizikālā modeļa shēma

Modeļa un AVS interfeisa darbība tika pārbaudīta SIL un HIL režīmos, veicot paralēli slēgto līdzstrāvas pārveidotāju automātisko vadību, izmantojot vienu un to pašu slodzes pārslēgšanas scenāriju un algoritmu. Šai vajadzībai tika praktiski izveidota eksperimentāla pazeminošā līdzstrāvas pārveidotāja iekārta ar attālinātās vadības iespēju “Buck1” (simulācijai HIL režīmā). SIL režīmam izveidots šīs iekārtas teorētiskais modelis, ņemot par pamatu ciparu PID kontrollera un 2.2. nodaļā apskatītos līdzstrāvas spēka interfeisu modeļus.

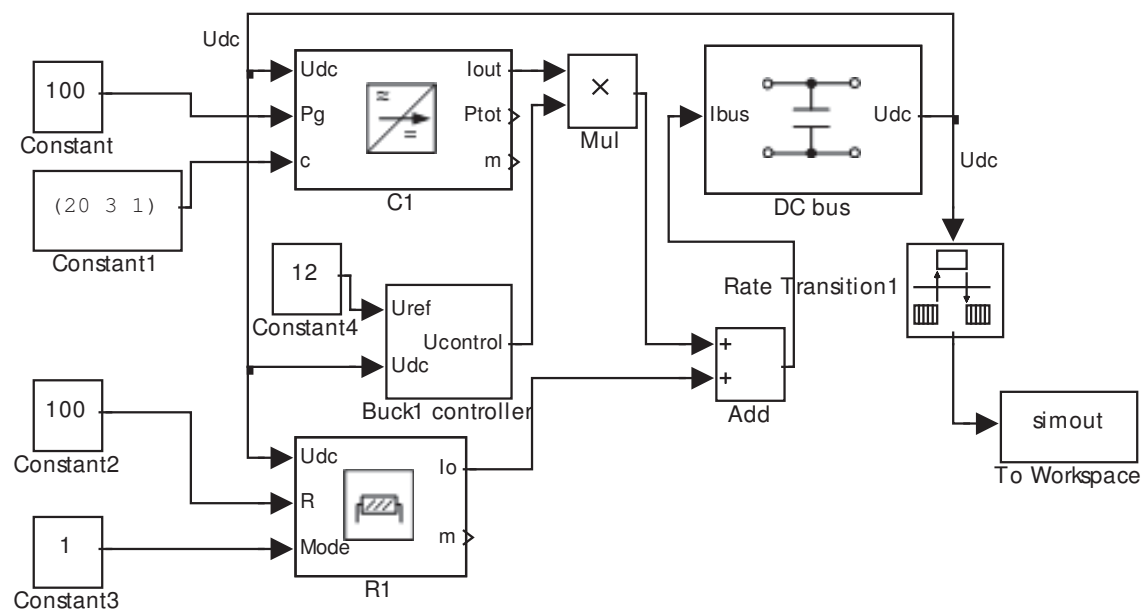
#### 3.1.1. Spriegumu pazeminošā līdzstrāvas pārveidotāja un tā kontrollera teorētiskais modelis

Līdzstrāvas pārveidotāja teorētiskais modelis (skat. 3.2. att.) sastāv no divām daļām: elektroenerģijas avota (spēka interfeiss C1) un kontrollera. Ar konstantu 100 Ω pretestību R1 tika modelēta elektriskā slodze. Iekārtas ir apvienotas līdzstrāvas kopnē ar filtrējošo kondensatoru 2200 μF. 2.2. nodaļā apskatītie sprieguma izejas un strāvas izejas spēka interfeisi ir idealizēti, t.i. to reakcijas laiks uz mainīgas slodzes radītām sprieguma izmaiņām kopnē ir atkarīgs tikai no maksimālās izejas strāvas ierobežojuma,



pie tam iestatītais līmenis tiek sasniegts bez pārregulējuma. Šāds spēka interfeiss teorētiskajā modelī tika izmantots kā elektriskās enerģijas avots, kura spriegums ir augstāks par kopnes nominālo. Kontroleris (“Buck1 controller” bloks 3.2. att.) ieejā saņem kopnes spriegumu un sprieguma regulējošo signālu, ģenerē vadības signālu intervālā [0...1], kurš blokā “Mul” tiek sareizināts ar C1 strāvas izeju. Tādējādi reizinājuma bloks darbojas kā nepārtraukti regulējams spēka slēdzis. Jāatzīmē, ka šajā gadījumā spēka interfeiss nav tieši pieslēgts kopnei, un, C1 darbojoties tikai kā enerģijas avotam, izejā “m” aprēķinātā jauda un enerģija neatbilsti kopnē reāli patērētajai. C1 cenšas noturēt kopnē tā ieejā uzdoto  $U_{dc}$ , bet Buck1 neatkarīgi samazina izejas strāvu atbilstoši savam uzdotajam regulējošam signālam  $u_r$ .

Izejā tiek uzņemts kopnes spriegums  $U_{dc}$ . Bloks “Rate Transition” nodrošina modelētā kopnes sprieguma signāla pierakstīšanu ar diskretizācijas frekvenci 25 kHz, lai modelētos datus varētu salīdzināt ar eksperimentālajiem mērījumiem uz vienas laika ass (skat. 3.1.2. nodaļu).



### 3.2. att. Kontrolera savienojums ar enerģijas avotu un līdzstrāvas kopni

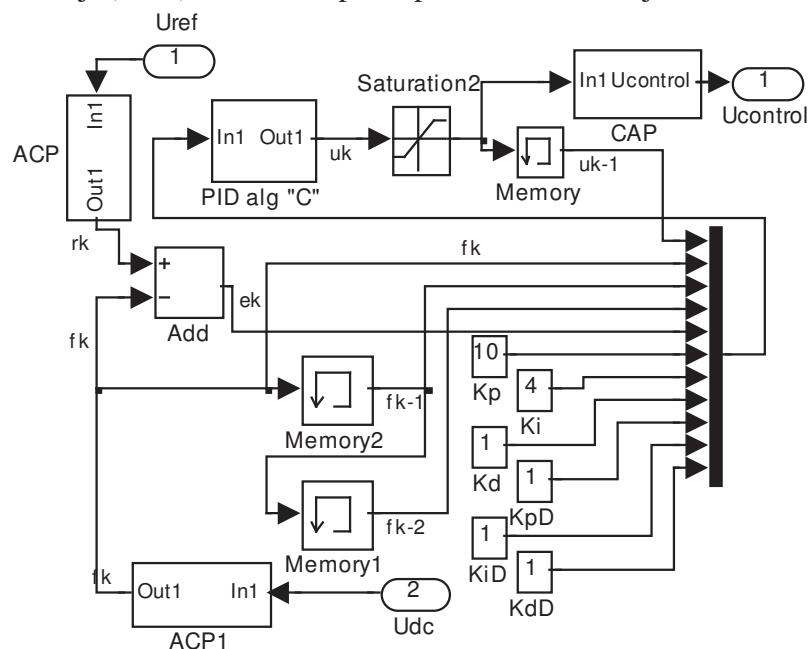
Buck1 realizācijā izmantots Microchip ražotais vispārīgas nozīmes mikrokontroleris PIC24F16KA101 ar 16 bitu datu arhitektūru. Vadības algoritma imitācijas modelis tika veidots, ņemot vērā izmantotā mikrokontrolera arhitektūras un iebūvēto perifērijas moduļu īpašības (skat. 3.3. att.).

Izmantots programmatiskais C tipa ciparu PID kontroleris, kur procesa regulēšanas kļūda tiek pierēzināta tikai integrālajam saskaitāmajam. Proporcionālais un diferenciālais saskaitāmais tiek sareizināti tikai ar pašreizējā un iepriekšējā laika momenta procesa mainīgā vērtību starpību. PIC24F sērijas mikrokontrolerim nav aparātiskā peldošā punkta aritmētikas atbalsta. Lai taupītu programmu atmiņu un skaitļošanas laiku, visi signāli un PID koeficienti tika aprēķināti ar veseliem 16 bitu skaitļiem (kontrolerim ir aparātiskie veselu skaitļu reizināšanas un dalīšanas moduļi). Veselo skaitļu datu tips tika izmantots arī Simulink modelī, lai maksimāli tuvinātu to reālajai iekārtai. Izmantotā PID izteiksme veselajiem skaitļiem dota (3.1).

$$u_k = u_{k-1} - \frac{K_p}{K_{pD}}(f_k - f_{k-1}) + \frac{K_i}{K_{iD}}e_k + \frac{K_d}{K_{dD}}(f_k - 2f_{k-1} + f_{k-2}), \quad (3.1)$$

kur  $f_k$  – procesa mainīgais k-tajā ciklā;  
 $e_k$  – procesa regulēšanas kļūda;  
 $u_k$  – vadības iedarbe k-tajā ciklā;  
 $K_p, K_i, K_d$  – proporcionālā, integrālā un diferenciālā koeficienta skaitītājs;  
 $K_{pD}, K_{iD}, K_{dD}$  – proporcionālā, integrālā un diferenciālā koeficienta saucējs;  
 $u, f, e, K_p, K_i, K_d, K_{pD}, K_{iD}, K_{dD} \in \mathbb{Z}[-32768...32767]$ .

Kontrollera teorētiskajā modelī tika iekļauti arī ciparanalogie un analogciparu signālu pārveidotāji (ACP): 10 bitu impulsa platuma modulācijas un ACP moduļi.

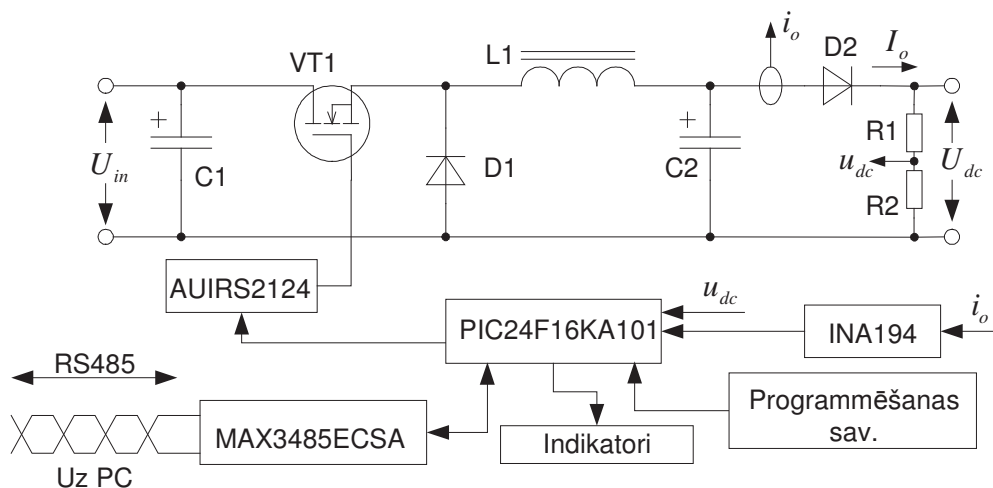


3.3. att. Spriegumu pazeminošā pārveidotāja ciparu kontrollera teorētiskais modelis – bloks “Buck1 controller”

### 3.1.2. Spriegumu pazeminošā līdzstrāvas pārveidotāja un tā kontrollera fizikālais modelis

Tika izstrādāts līdzstrāvas pārveidotāja fizikālais modelis “Buck1”. Iekārtas pamatā ir pazeminošais līdzsprieguma pārveidotājs ar kopējo masas vadu un vienu spoli L1, tranzistora slēdzi VT1, ķēdi noslēdzošo diodi D1 un ieejas un izejas kondensatoriem C1 un C2. Izejā papildus slēgta diode D2, lai vienkāršotu vairāku līdzstrāvas pārveidotāju paralēlo darbību vienā līdzstrāvas kopnē. Maksimālais ieejas spriegums ir 30V, izejas regulēšanas intervāls ir 3...28 V un 40...500 mA. Buck1 funkcionālā bloks shēma parādīta 3.4. att. Pilnā elektriskā shēma dota 6. pielikumā.

Mikrokontroleris regulē spriegumu ar n-kanāla lauktranzistoru ar iztecē slēgtu spoli, izmantojot draivera mikroshēmu AUIRS2124. Atgriezeniskā saite spriegumam veidota caur sprieguma dalītāju R1, R2, strāvai – caur šuntu un strāvas monitoringa mikroshēmu INA194. Iekārtas pieslēgums augstākā līmeņa AVS (datoram) realizēta caur tīklu RS485 un interfeisa mikroshēmu MAX3485. Iekārta ir programmējama un atklūdojama caur iekšshēmas virknes programmēšanas savienojumu ICSP (*In-Circuit Serial Programming*).



3.4. att. Līdzstrāvas pārveidotāja “Buck1” funkcionālā blokskāme

Datu posma līmenis organizēts pēc vedēja-sekotāja principa, atbilstoši IEC870 protokolam. Atbalsta vērtības, darba režīmu, kontrolera konfigurāciju un sensoru kalibrēšanas vērtības var iestatīt attālināti no datora, izmantojot virknes interfeisu. Izmantots 115300 bodu datu apmaiņas ātrums. Kontrolera veiktspēja nodrošina paralēlu izejas regulēšanas PID algoritma, vedējiekārtas komandu apstrādi, elektrisko mērījumu un statusa informācijas izsūtīšanu ar periodu 20 ms. Attālinātās vadības komandu kopsavilkums dots 3.1. tabulā.

3.1. tabula

Līdzstrāvas pārveidotāja “Buck1” komandu kopsavilkums

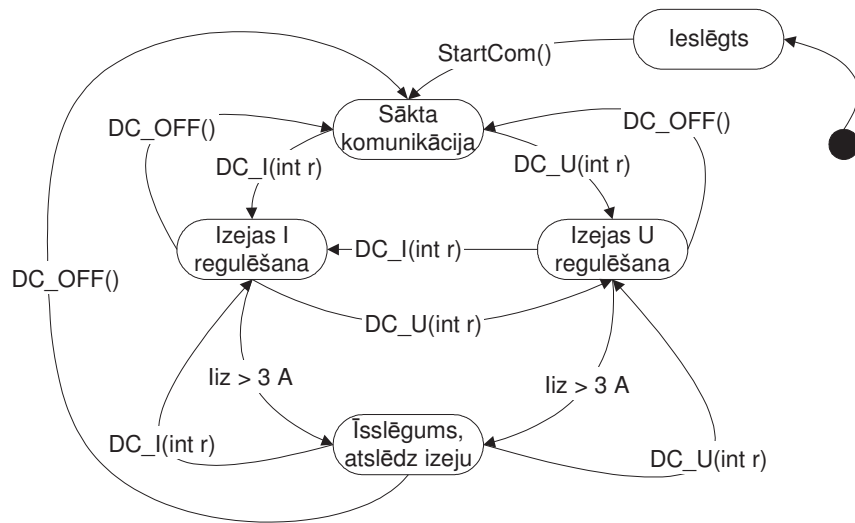
Nosaukums	Atbilde	Apraksts
StartCom()	IEC870 apstiprinājums	Uzsāk komunikāciju ar Buck1.
DC_U(int r)	IEC870 apstiprinājums	Ieslēdz Buck1 sprieguma izejas režīmā ar uzdoto regulējošo vērtību
DC_I(int r)	IEC870 apstiprinājums	Ieslēdz Buck1 strāvas izejas režīmā ar uzdoto regulējošo vērtību
DC_OFF()	IEC870 apstiprinājums	Pārlēdz Buck1 izeju augstās pretestības režīmā
SetPID(int Kp, int Ki, int Kd)	IEC870 apstiprinājums	Iestata PID algoritma parametrus
ReadStatus()	int status	Atgriež Buck1 statusu (atbilstoši stāvokļu diagrammai)
ReadUI()	int Uval, int Ival	Atgriež sprieguma un strāvas vērtības
Ucalibrate(int corr)	IEC870 apstiprinājums	Iestata sprieguma mērīšanas kalibrācijas vērtību

Iekārtas vadības stāvokļu diagramma atbilstoši komandu sarakstam parādīta 3.5. att. Ieslēdzot “Buck1”, iekārta gaida komunikācijas uzsākšanas komandu “StartCom”, pie kuras saņemšanas izmaina stāvokli uz “Sākta komunikācija”. Formāli iekārtas darbībā nenotiek nekādas izmaiņas, elektriskā izeja ir atslēgta, komanda paredzēta sakaru pārbaudei.

Iestatīt regulēšanas režīmu (konstanta strāvas, sprieguma izeja vai izeja ir atslēgta no ieejas enerģijas avota), PID algoritma koeficientus un kalibrēšanas vērtības, kā arī nolasīt iekārtas sensoru mērījumus un statusu var jebkurā brīdī pēc komunikācijas uzsākšanas. Iekārtā paredzēta īsslēguma aizsardzība, pārsniedzot strāvu 3 A, momentāni (nākamajā regulēšanas ciklā) izeja tiek atslēgta.

Darbojoties konstanta sprieguma izejas režīmā, strāva tiek ierobežota tikai īsslēguma strāvas līmenī, bet strāvas izejas režīmā spriegums netiek ierobežots un

konstantas strāvas noturēšanai pie lielām slodzēm maksimālais izejas spriegums sakrīt ar ieejas avota spriegumu.



3.5. att. “Buck1” kontrollera stāvokļu diagramma

Izmantošanai AVS objektu modelī (skat. 2.3. nodaļu) tika izstrādāta “Buck1” klase, kas manto no “PowerInterface”, satur vispārīgās iekārtas “Device” funkcionalitāti un atbalsta datu apmaiņu ar vedējiem, izmantojot “HardwareInterface” definētos elementus. Klase izvērstā veidā parādīta diagrammā 7. pielikumā.

“Buck1” galveno elektrisko īpašību, vadības un kontroles funkcionalitātes kopsavilkums dots 3.2. tabulā. Ir iespējams saslēgt paralēli vairākas Buck1 iekārtas, tādā veidā modelējot līdzstrāvas kopni ar vairākiem paralēli slēgtiem ģeneratoriem.

3.2. tabula

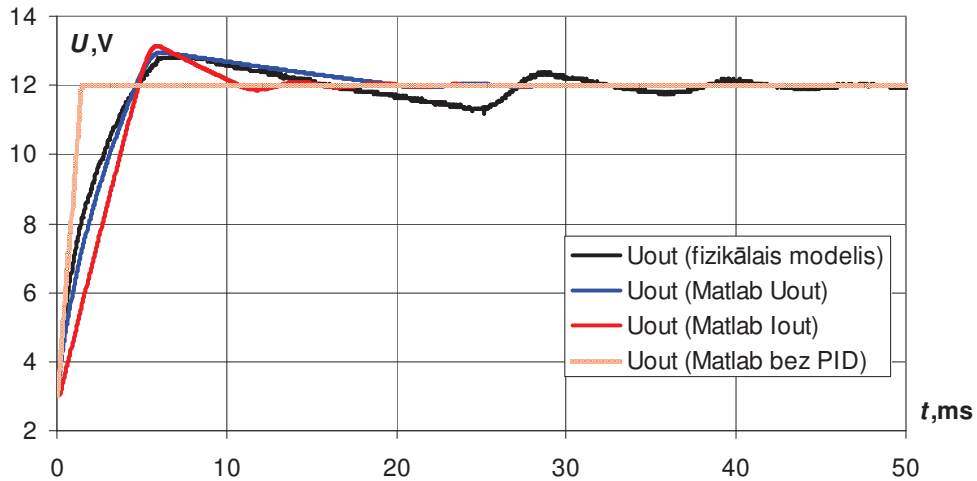
### Galvenās “Buck1” īpašības un funkcijas

Īpašība/funkcija	Vērtība			Mērvienība
	Min.	Tip.	Maks.	
Ieejas spriegums	12	-	25	V
Ieejas pārveidošanas strāva	0	-	0.5	A
Barošanas spriegums	11	-	20	V
Barošanas strāva	40	50	100	mA
Pārveidotais izejas spriegums	0	-	20	V
Ilgstoša izejas strāva	0	-	0.5	A
Izejas impulsu frekvence	-	15.4	-	kHz
Kontrollera regulēšanas cikla frekvence	-	1	-	kHz
Soļa iedarbes reakcija	-	-	5	ms
Arhitektūra	Pazeminošais DC/DC (buck)			
Darba režīmi	Konstants $U$ , konstanta $I$ ar PID regulatoru, īsslēguma izejas atslēgšana			
Mērījumi	Momentānie izejas spriegums un strāva			
Datu apmaiņas interfeiss	Datu posms: IEC870-5, fizikālais līmenis – RS485			
Vedējiem aptaujāšanas frekvence	-	-	50	Hz

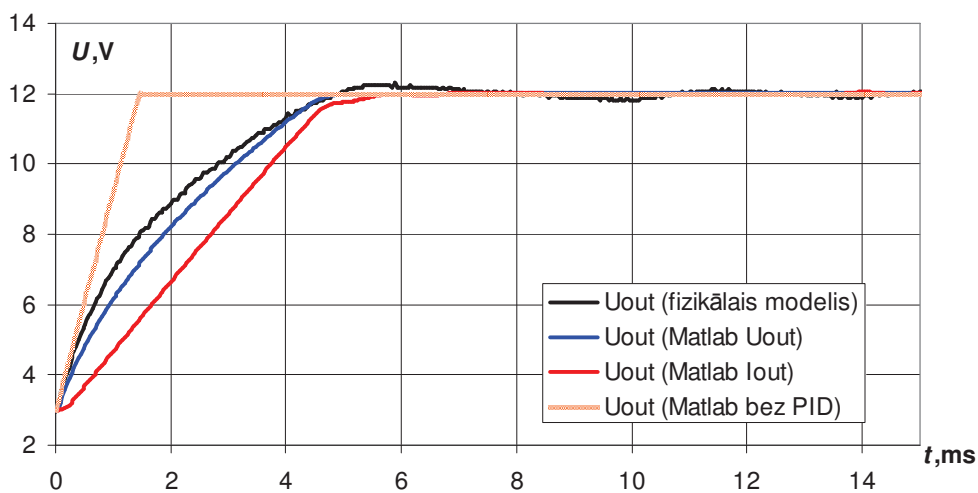
“Buck1” iekārtas, tās teorētiskā modeļa (3.5. att.) un idealizētu SI ar sprieguma un sprieguma regulēta strāvas avota izeju (skat. 2.2. nodaļu) darbība tika salīdzināta grafiski regulēšanas pārejas procesā pie lēcienveida regulējošā signāla izmaiņas. Kopnes sākuma spriegums ir 3 V, kopējā “Buck1” izejas un kopnes kapacitāte ir 470  $\mu\text{F}$ , slodze – 100  $\Omega$ . Pārveidotāja ieejā pieslēgtā enerģijas avota maksimālais spriegums – 20 V, strāva – 3 A. Reālajai iekārtai ieejā ir PSU3030 barošanas avots ar attiecīgiem

$U$ ,  $I$  ierobežojumiem, tāpat tika ierobežotas spēka interfeisu izejas teorētiskajiem modeļiem.

PID regulatora koeficienti tika pieskaņoti iteratīvi eksperimentālā veidā ar mērķi panākt ātrāku reakciju uz regulējošā signāla soļa izmaiņu no 3 uz 12 V. 3.6.-3.7. att. parādīti pārejas procesi sākuma koeficientu vērtībām un pieskaņotajām vērtībām.



3.6. att. “Buck1” un dažādu SI modeļu izejas regulēšanas pārejas process,  $K_p, K_i, K_d, K_{pD}, K_{iD}, K_{dD} = 1$



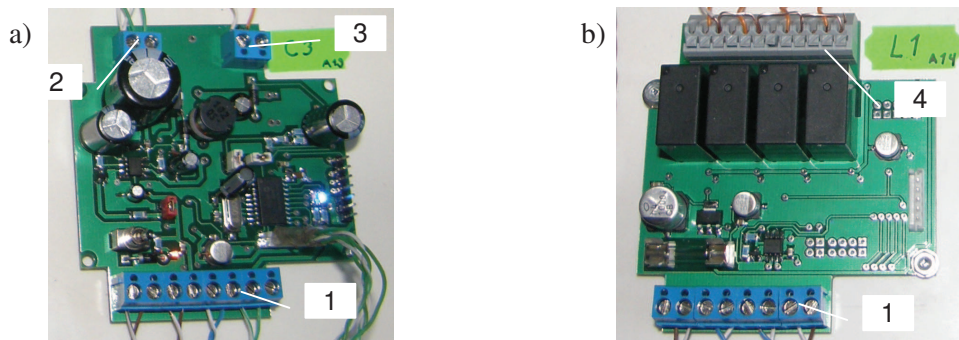
3.7. att. “Buck1” un dažādu SI modeļu izejas regulēšanas pārejas process,  $K_p = 10, K_i = 4, K_d, K_{pD}, K_{iD}, K_{dD} = 1$

Grafikos iekļauti:  $U_{out}$  – fizikālais modelis, Matlab  $U_{out}$  – sprieguma izejas spēka interfeiss ar PID, Matlab  $I_{out}$  – sprieguma regulētas strāvas izejas spēka interfeiss ar PID, Matlab bez PID – idealizēts sprieguma regulētas strāvas izejas spēka interfeiss. Dati uzņemti ar Velleman PCSU1000 ciparu oscilogrāfu mērīapazonā 16 V ar 8 bitu izšķirtspēju.

Visātrāk izeja nostabilizējās idealizētajam spēka interfeisa modelim ar sprieguma regulētu strāvas izeju. Fizikālajam modelim “Buck1”, pieskaņojot PID koeficientus, reakcijas laiks izejas sprieguma vērtības izmaiņai līdz precizitātei  $\pm 1\%$  tika sasniegts 6.6 ms, maksimālais pārregulējums – 2.6%. Svārstības ap nostabilizēto vērtību bija  $\pm 0.5\%$  jeb 62.5 mV robežās, kas sakrīt ar oscilogrāfa izšķirtspēju. Vistuvāk reālās iekārtas dinamiskajai raksturlīknei ir teorētiskais modelis ar PID un sprieguma izejas spēka interfeisu.

### 3.1.3. Eksperimentālais stends un eksperimenta veikšanas metodika

Līdzstrāvas kopnes fizikālā modeļa eksperimentālais stends sastāv no 3 “Buck1” līdzstrāvas pārveidotājiem un pārslēdzamas 5 līmeņu rezistīvas slodzes, kuri slēgti vienotā kopnē ar pieslēgtu 2200  $\mu\text{F}$  kondensatoru un atbilst shēmai 3.8. att. Slodzes līmeņi tiek pārslēgti ar releju palīdzību saslēdzot paralēli 100  $\Omega$  pretētības. Releju vadību veic attālināti ar speciāliizveidota kontrolera “KR100” palīdzību. “KR100” tāpat kā “Buck1” izmanto RS485 līniju un IEC-870 datu posma protokolu un speciālu komandu sistēmu releju ieslēgšanai/atslēgšanai un pašreizējā stāvokļa lasīšanai.

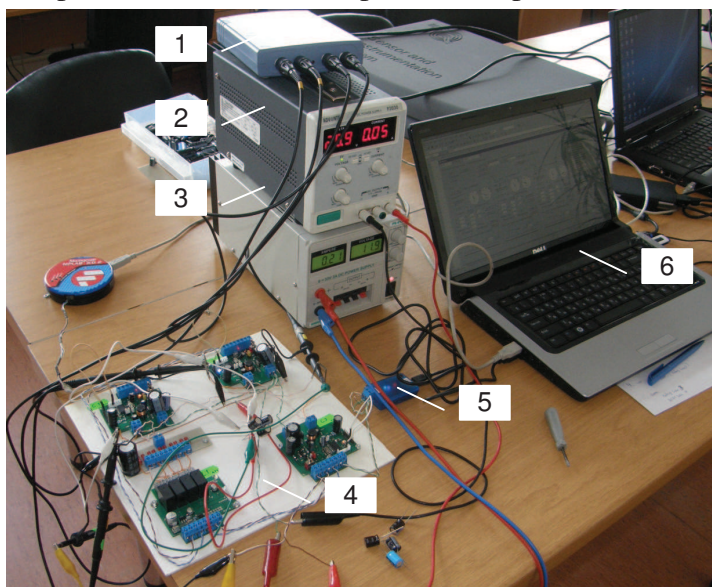


3.8. att. “Buck1” līdzstrāvas pārveidotājs (a) un releju bloks slodzes pakāpju regulēšanai (b)

1 – barošanas un RS485 pieslēgvietas; 2 – pārveidotāja ieejas pieslēgvietas; 3 – pārveidotāja izejas pieslēgvietas; 4 – releju pieslēgvietas;

Visas iekārtas ir saslēgtas vienā datu apmaiņas tīklā un savienotas ar vedējkārtu – datoru jeb augstākā līmeņa AVS, kas darbojas ar 2.3. nodaļā apskatītās statistiskās kļāšu struktūras vadības programmu.

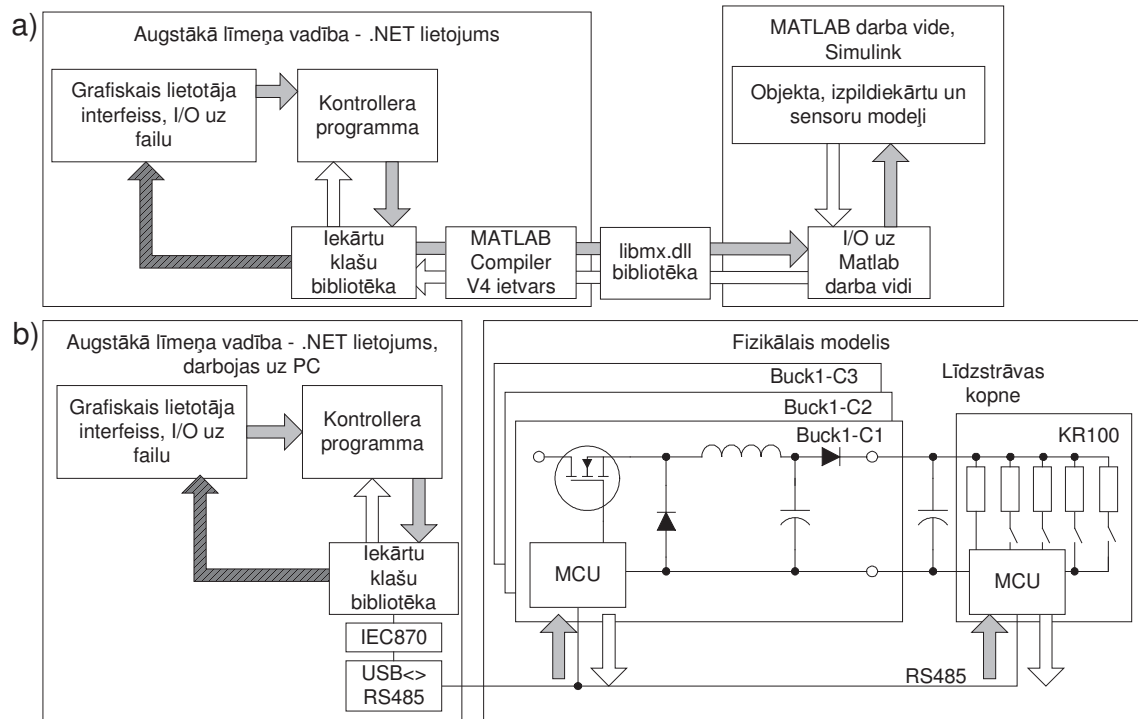
Augstākā līmeņa AVS spēj aptaujāt visas 4 pieslēgtās iekārtas ar vidējo periodu 50 ms. Dati tika uzkrāti gan vadības programmā, gan neatkarīgi ar oscilogrāfu PicoScope3000 vienlaicīgi 4 kanālos (kopnes spriegums un katra pārveidotāja izejas strāva) ar mērījumu periodu 22 ms. 3.9. att. parādīts eksperimentālās iekārtas kopskats.



3.9. att. Eksperimentālais stends

1 – oscilogrāfs; 2 – barošanas bloks “Buck1” un “KR100” vadības elektronikai; 3 – barošanas bloks “Buck1” ieejās; 4 – līdzstrāvas kopne; 5 – USB-RS485 signālu pārveidotājs; 6 – dators augstākā līmeņa AVS programmatūrai un datu uzkrāšanai

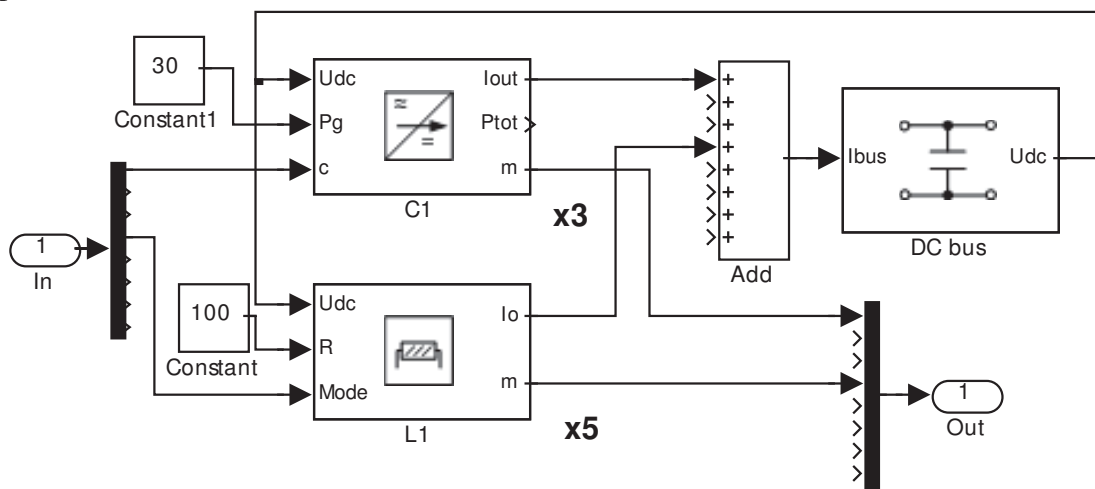
Ekspiermeta metodika un datu plūsmas shematiski parādīta 3.10. att. Ekspiermeta mērķis ir demonstrēt kombinētās elektroapgādes AVS, izpildiekārtu un līdzstrāvas kopnes SIL un HIL simulācijas pieeju. Tāpēc atbilstošais Simulink modelis veidots no idealizētajiem spēka interfeisiem (skat. 3.11. att.), kuru darbība tika salīdzināta ar līdzstrāvas kopnes fizikālo modeli.



3.10. att. SIL – (a) un HIL – (b) ekspiermeta funkcionālā blokskhēma un datu plūsmas

← – vadības un perturbāciju signāli; ← – atgriezeniskās saites signāli;  
 ← – simulācijas rezultāts

Tā kā augstākā līmeņa AVS realizācijā tiek izmantota viena un tā pati .NET klašu bibliotēka ar unificētiem iekārtu vadības programmatiskajiem interfeisiem, ir iespējams bez izmaiņām izmantot vienu vadības algoritmu SIL un HIL simulācijas režīmiem. Abu simulācijas shēmu darbība tika salīdzināta pie noteikta slodžu ieslēgšanas scenārija un spēka interfeisu vadības secības.

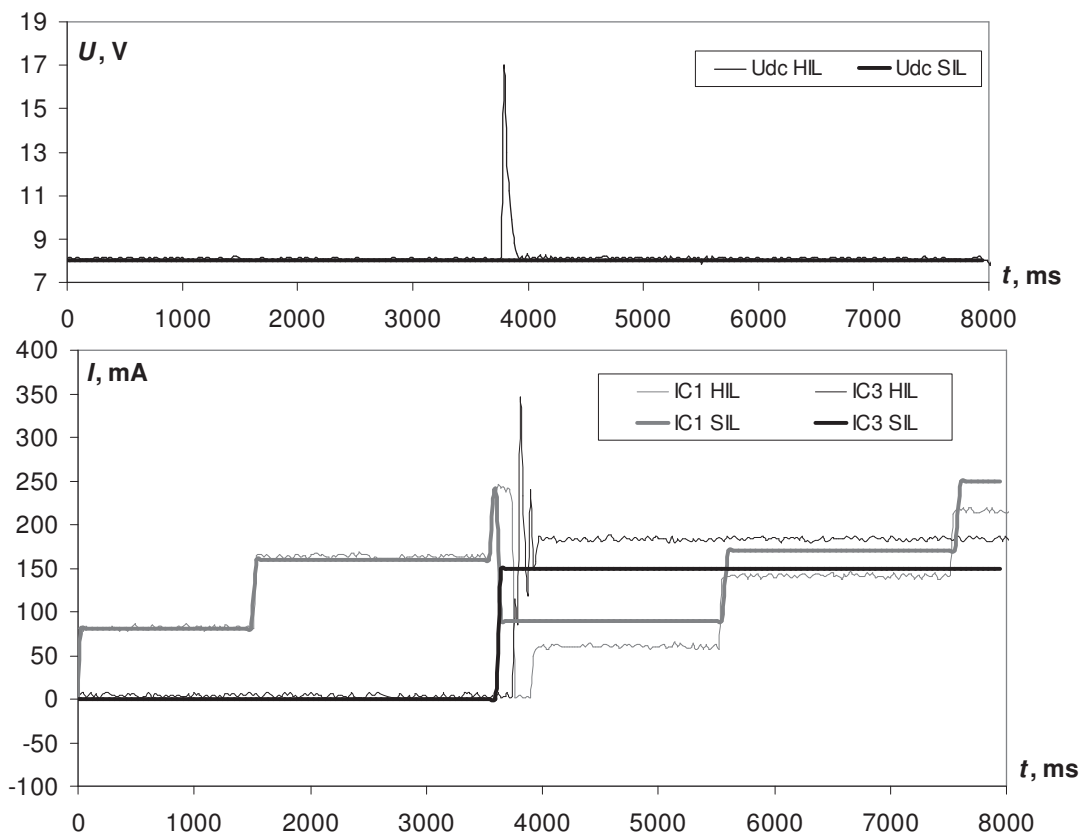


3.11. att. Ekspiermentālā stenda Simulink modelis ar idealizētajiem spēka interfeisiem

Pirms eksperimenta scenārija izpildes fizikālajā modelī visām “Buck1” iekārtām tika iestatīti regulatora koeficienti. Augstākā līmeņa AVS programma darbināta 2 atsevišķās plūsmās: spēka interfeisu vadības algoritms un slodzes ieslēgšanas scenārija izpilde. Autora izstrādātās fizikālā modeļa eksperimentālā stenda vadības programmas logs parādīts 8. pielikumā.

### 3.1.4. Automātiskās vadības kontūra darbības rezultāti SIL un HIL režīmā

SIL un HIL simulācijas rezultāti tika salīdzināti, eksperimentāli, izpildot dažādus slodžu pieslēgšanas un regulēšanas scenārijus. Simulācijas rezultāts 3.12. att. parādīts sekojošam sistēmas darbības scenārijam. Sprieguma avots C1 notur kopnē pastāvīgu līdzspriegumu  $U_{dc} = 8$  V, bet strāvas avots C3 sāk dot kopnē strāvu  $I_{C3} = 150$  mA, ja sprieguma avota izejas strāva pieaug  $I_{C1} \geq 170$  mA. Sākuma stāvoklī līdzstrāvas kopnē ir  $100 \Omega$  slodze, 4 soļos tā tiek palielināta līdz  $20 \Omega$ , katrā solī pieslēdzot paralēli papildus  $100 \Omega$ .



3.12. att. Fizikālā modeļa simulācijas rezultāti

Grafikā var redzēt, ka C1 pamatā stabili notur uzdoto kopnes spriegumu abos simulācijas režīmos, taču fizikālajā modelī pie svārstībām  $\pm 0.1$  V lielāko eksperimenta daļu parādās sprieguma lēciens līdz 16.8 V brīdī, kad papildus kopnē konstantas strāvas režīmā sāk darboties avots C3. Tas ir izskaidrojams ar to, ka C3 uzlādē kopnes kondensatoru un šajā brīdī spriegumu regulējošais pārveidotājs atslēdz izejas strāvu  $I_{C1}$  atbilstoši PID regulatora iestatījumiem, bet nespēj samazināt kopnes spriegumu, jo kondensatoram ir nepieciešams laiks, lai izlādētos caur slodzi. Problēma ir risināma, pieskaņojot PID regulatora parametrus un paaugstinot regulēšanas frekvenci, vai papildus saskaņojot C3 pieslēgšanu ar C1 izejas strāvas samazināšanu caur augstākā līmeņa AVS. Lēciens nav novērojams Simulink modelī, jo līdzstrāvas pārveidotāji tiek



modelēti kā idealizēti neinerčiāli sprieguma un strāvas avoti. Šādus sprieguma lēcienus var filtrēt arī ar līdzstrāvas kopnē ieslēgtu akumulatoru.

Pie 100 un 50  $\Omega$  slodzēm, kad darbojas tikai C1, rezultāti abās metodēs atšķiras nenozīmīgi, attiecīgi:  $I_{C1}^{SIL} = 80$  mA, vidējais  $I_{C1}^{HIL} = 82.1$  mA un  $I_{C1}^{SIL} = 160$  mA, vidējais  $I_{C1}^{HIL} = 162.9$  mA. Atšķirība statistiskajā režīmā parādās, kad tiek pieslēgts C3 pie slodzes 33.3 un 25  $\Omega$  attiecīgi:  $I_{C1}^{SIL} = 90$  mA, vidējais  $I_{C1}^{HIL} = 59.5$  mA un  $I_{C1}^{SIL} = 170$  mA, vidējais  $I_{C1}^{HIL} = 138.7$  mA, bet  $I_{C3}^{SIL} = 150$  mA un vidējais  $I_{C3}^{HIL} = 182.6$  mA. Tas ir izskaidrojams ar “Buck1” pārveidotāja strāvas atgriezeniskās saites nelinearitāti. Pārveidotājs tika kalibrēts pie strāvas režīma izejas 100 mA, taču, palielinoties strāvas regulējošam signālam, palielinājās arī pārveidotāja izejas strāvas kļūda (šajā gadījumā – 32.6 mA). C3 HIL simulācijā deva kopnē lielāku strāvu par uzdoto, tāpēc atšķiras arī C1 strāvas.

Jāatzīmē, ka apskatītā testēšanas vide, kurā vadības algoritms realizēts kā .NET lietojums nav stingra reāllaika sistēma, regulēšanas periods ir 50 ms, un ir jāreķinās ar kontrollera reakcijas laika aizturēm. Ņemot vērā līdzstrāvas kopnes zemo dinamiku, ja tiek izmantoti filtrējošie kondensatori vai kopnē tieši slēgts akumulators, šāda pieeja ir izmantojama augstākā līmeņa vadības sistēmas testēšanai spēka HIL režīmā ar nolūku pārbaudīt programmatūras funkcionalitāti reālos apstākļos. Turpretī SIL režīmā, pateicoties tam, ka modelis Simulink vidē tiek darbināts pa stingri noteiktiem laika intervāliem, .NET programmā realizētajam kontrollerim nav laika ierobežojumu reakcijas ģenerēšanai uz sensoru rādījumu izmaiņām un attiecībā pret Simulink modeli tas darbojas reāllaikā.

### 3.2. Teorētisko modeļu salīdzināšana ar saules baterijas uzlādes kontrollera eksperimentālajiem mērījumiem

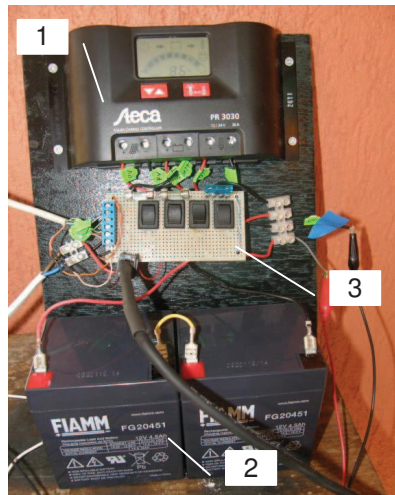
Autonomās kombinētas elektroapgādes sistēmas modeļa eksperimentālā validācija ar reālām izpildiekārtām tika veikta uz saules baterijas uzlādes kontrollera Steca PR3030, saules baterijas Kioto KPV 195 PE un divu slēgta tipa svina-skābes akumulatoru FIAMM FG20451 bāzes. Kā slodze tika izmantots rezistoru masīvs ar divām konstantas pretestības pakāpēm: 20.8  $\Omega$  un 5.4  $\Omega$  pie 25  $^{\circ}\text{C}$ .

Eksperimenta mērķis ir salīdzināt ar reālām iekārtām un novērtēt 2.2. un 2.4. nodaļās apskatīto spēka interfeisu un fotoelektriskā ģeneratora Simulink bloku simulācijas rezultātus. Augstākā līmeņa AVS šajā eksperimentā netika izmantota.

#### 3.2.1. Eksperimentālais stends un eksperimentu veikšanas metodika

Tika izveidots eksperimentālais stends (skat. 3.13. att.), izmantota tipveida PR3030 slēguma shēma ar slodzes pieslēgšanu pie attiecīgās kontrollera izejas. Ņemot vērā, ka iepriekšējās nodaļās apskatītā kombinētās sistēmas koncepcijā, kur avoti un patērētāji slēgti pie vienas līdzstrāvas kopnes ar sprieguma svārstības kompensējošu akumulatoru, tika iestrādāta papildus iespēja pieslēgt slodzi tieši pie akumulatora spailēm. Līdz ar to enerģijas patēriņš kļūst neatkarīgs no uzlādes kontrollera, kurš šādā slēgumā pilda vienkārša spēka interfeisa funkciju starp saules bateriju un līdzstrāvas kopni.

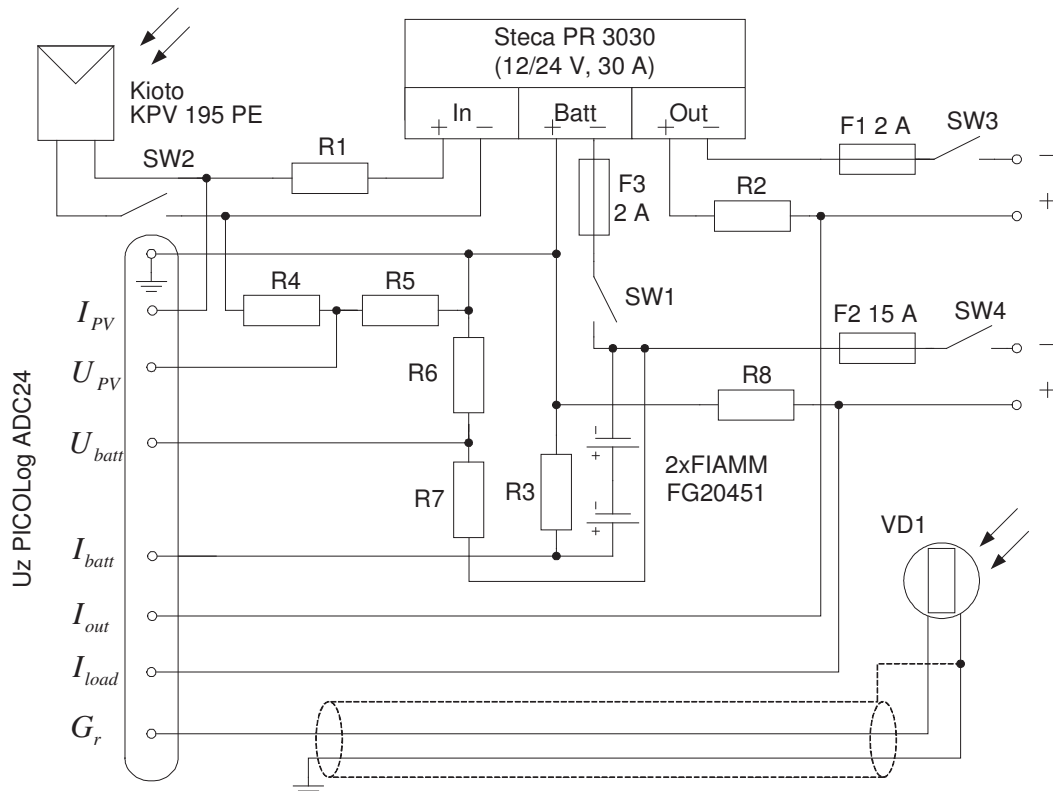
Ar stenda palīdzību iespējams eksperimentāli uzņemt sekojošus sistēmas mainīgos: saules baterijas strāvu  $I_{PV}$  un spriegumu  $U_{PV}$ , akumulatoru strāvu  $I_{batt}$  un spriegumu  $U_{batt}$ , uzlādes kontrollera slodzes pieslēgvietas strāvu  $I_{out}$ , akumulatoriem tieši pieslēgtās slodzes strāvu  $I_{load}$  un apgaismojuma līmeni  $G_s$ .



3.13. att. Saules bateriju uzlādes kontrollera un akumulatora eksperimentālais stends

1 – uzlādes kontrolleris Steca PR3030; 2 – slēgta tipa svina-skābes akumulatori FIAMM FG20451;  
3 – sadales un mērpārveidotāju plāksnīte

Eksperimentālā stenda elektriskā shēma parādīta 3.14. att. Lai netiktu apietas uzlādes kontrollera aizsardzības ķēdes, “+” tika izmantots kā kopējais spēka un mērīšanas ķēžu vads. Līdz ar to strāvas šunti izvietoti pozitīvajā vadā, bet sprieguma dalītāji mēra negatīvo spriegumu attiecībā pret kopējo “+” vadu. Pie saules baterijas un akumulatora spriegumiem tika atņemti attiecīgie šuntu spriegumi. Ņemot vērā strāvu virzienus, šunta spriegums tiek pieskaitīts  $U_{PV}$ , bet  $U_{batt}$  pieskaitīts pie izlādes un atņemts pie uzlādes. Spriegumu dalītāju strāvas ir vairāk kā 100 reizes mazākas nekā darba strāvas pie eksperimentā izvēlētajām slodzēm un nav ņemtas vērā.



3.14. att. Saules baterijas uzlādes kontrollera eksperimentālā stenda slēguma shēma

Izmantojot apskatīto iekārtu, tika veikta mērinstrumentu salāgošana un eksperimentāli mēģinājumi ar dažādiem saules starojuma un slodzes scenārijiem, kopā veikti 9 eksperimenti. Rezultāti 3 raksturīgiem scenārijiem grafiski parādīti 3.16.–3.18. att. Mēģinājumi veikti Jelgavas novadā laikā no 2011. gada 3. līdz 23. augustam.

Elektriskie lielumi shēmā tika mērīti netieši un dati uzkrāti ar PICOLog ADC-24 datu uzkrājēju ar 1 s soli, izmantotas sekojošas sakarības:

$$\begin{aligned} U_{PV} &= \frac{U_{R5}(R4 + R5)}{R5} - U_{R1}, U_{batt} = \frac{U_{R5}(R7 + R6)}{R6} - U_{R3}, \\ I_{PV} &= \frac{U_{R1}}{R1}, I_{batt} = \frac{U_{R3}}{R3}, I_{out} = \frac{U_{R2}}{R2}, I_{load} = \frac{U_{R8}}{R8} \end{aligned} \quad (3.2)$$

kur  $R4 - 10.006 \text{ k}\Omega \pm 7 \text{ }\Omega$ ;  
 $R5 - 0.7993 \text{ k}\Omega \pm 0.6 \text{ }\Omega$ ;  
 $R6 - 0.7994 \text{ k}\Omega \pm 0.6 \text{ }\Omega$ ;  
 $R7 - 10.008 \text{ k}\Omega \pm 7 \text{ }\Omega$ ;  
 $R1, R2, R3, R8 - 0.1 \pm 0.001 \text{ }\Omega$ .

Sprieguma dalītāju pretestības mērītas ar multimetru Fluke 287. Šunta pretestību precizitāte ņemta no pases datiem. Šuntu jauda – 3 W. Pretestības izmaiņa temperatūras ietekmē netika ņemta vērā.  $U_{batt}$  un  $U_{PV}$  sprieguma dalītāji mērīti ar ADC-24 diapazonā  $\pm 2.5 \text{ V}$ , kas atbilst  $\pm 33.8 \text{ V}$  ieejā, bet strāvu  $I_{batt}$ ,  $I_{PV}$ ,  $I_{load}$  un  $I_{out}$  šuntu sprieguma kritums mērīts diapazonā  $\pm 0.625 \text{ V}$ , kas atbilst  $\pm 6.25 \text{ A}$  ieejā. Mērījumu dati visiem sināliem vienlaicīgi reģistrēti ar 1 s intervālu. Mērījumu kļūdas aprēķinātas parciāli katram lielumam, jo mērāmie lielumi ir mainīgi laikā. Izmantotas sekojošas sakarības:

$$\begin{aligned} K(U_{PV}) &= \pm(|K_{R4}| + |K_{R5}| + 2(|K_{GE}| + |K_{OE}|)) \\ K(U_{batt}) &= \pm(|K_{R6}| + |K_{R7}| + 2(|K_{GE}| + |K_{OE}|)) \\ K(I_{PV}) &= \pm(|K_{R1}| + |K_{GE}| + |K_{OE}|), K(I_{batt}) = \pm(|K_{R3}| + |K_{GE}| + |K_{OE}|), \\ K(I_{out}) &= \pm(|K_{R2}| + |K_{GE}| + |K_{OE}|), K(I_{load}) = \pm(|K_{R8}| + |K_{GE}| + |K_{OE}|) \end{aligned} \quad (3.3)$$

kur  $K_{Rn}$  – attiecīgo pretestību vērtības kļūdas;  
 $K_{GE}$  – ADC-24 datu uzkrājēja sprieguma mērījuma kļūda (atkarīga no diapazona);  
 $K_{OE}$  – ADC-24 datu uzkrājēja nulles nobīdes kļūda (atkarīga no diapazona).

Spriegumu kļūdu aprēķinos  $K_{GE}$  un  $K_{OE}$  ir iekļauti divreiz, jo izteiksmē tiek izmantots gan sprieguma dalītāja, gan šunta sprieguma kritumi.

Saules redzamais starojums  $G_r$  tika mērīts ar ADC-24 uzkrājēju no Tenmars TM-202 luksometra sprieguma izejas. Luksometra diapazons  $2.0 \cdot 10^5 \text{ lux}$  ar precizitāti 6 % no mērījuma, bet sprieguma izejā 1 lux atbilst 0.001 mV, jeb kopējais diapazons – 0...200 mV. ADC-24 mērījuma diapazons izvēlēts  $\pm 1.25 \text{ V}$ , kļūda aprēķināta pēc sakarības:

$$K(G_r) = \pm(|K_{TM-202}| + |K_{GE}| + |K_{OE}|), \quad (3.4)$$

kur  $K_{TM-202}$  – luksometra mērījuma kļūda.

Iegūtie redzamā starojuma dati tika pārrēķināti uz pilno saules elektromagnētiskā starojuma jaudu, izmantojot 2.4.3. nodaļā apskatīto metodiku. Signālu kļūdu aprēķinu rezultāti doti 3.3. tabulā. Apkopojums tika veikts 3.17. att. parādītajam mēģinājumam,

kurš ir ilgstošākais (2 h) un ietver vairākkārtēju slodzes un saules starojuma intensitātes izmaiņu.

Kļūdu aprēķins parādīja precizitātes problēmas, kas saistās ar to, ka strāvas ievērojamu eksperimenta laika daļu, kad nav pieslēgta slodze un akumulators ir uzlādēts līdz noteiktajam spriegumam, bija ļoti mazas un tuvojās  $K_{max}$  robežai pie izvēlētajā strāvas mēr diapazona  $\pm 6.25$  A. Līdz ar to relatīvās mērījumu kļūdas pārsniedza 50 %. Tāpēc kļūdu apkopojumā 3.3. tabulā strāvas signāliem tika pieņemts, ka strāva vadā neplūst, ja tā samazinās līdz 0.3 A, kas atbilst 5 % relatīvajai kļūdai. Atbilstošie mērījumi netika iekļauti relatīvo kļūdu vidējās vērtības aprēķinā.

3.3. tabula

**Stenda mērījumu kļūdu aprēķina rezultāti**

Signāls	Mērv.	Mēr diap.	$K_{max}$	$K_{min}$	$K_{vid}$	$R_{vid}\%$
$I_{pv}$	A	$\pm 6.25$	0.06	0.01	0.026	1.409
$U_{pv}$	V	$\pm 33.8$	0.997	0.074	0.252	1.864
$U_{batt}$	V	$\pm 33.8$	0.515	0.076	0.11	0.394
$I_{batt}$	A	$\pm 6.25$	0.043	0.017	0.019	4.08
$I_{load}$	A	$\pm 6.25$	0.046	0.007	0.021	1.122
$G_s$	$W \cdot m^{-2}$	0..1826	49.749	18.436	41.864	8.58

Apskatītā eksperimentālā stenda ekvivalentā kombinētās elektroapgādes imitācijas modeļa shēma parādīta 3.15. att. Simulācija tika veikta, padodot modeļa ieejās eksperimentu laikā fiksētos sistēmu ietekmējošos faktoros – slodzes lielumu un pieejamo saules starojumu – un salīdzinot modeļa izeju ar eksperimentāli uzņemtajiem datiem. Tā kā nav precīzi zināms izmantotā uzlādes kontrollera darbības algoritms, salīdzinājums ir orientējošs un tika veikts, lai noskaidrotu vai modelis adekvāti reaģē uz saules starojuma un slodzes lieluma izmaiņām.

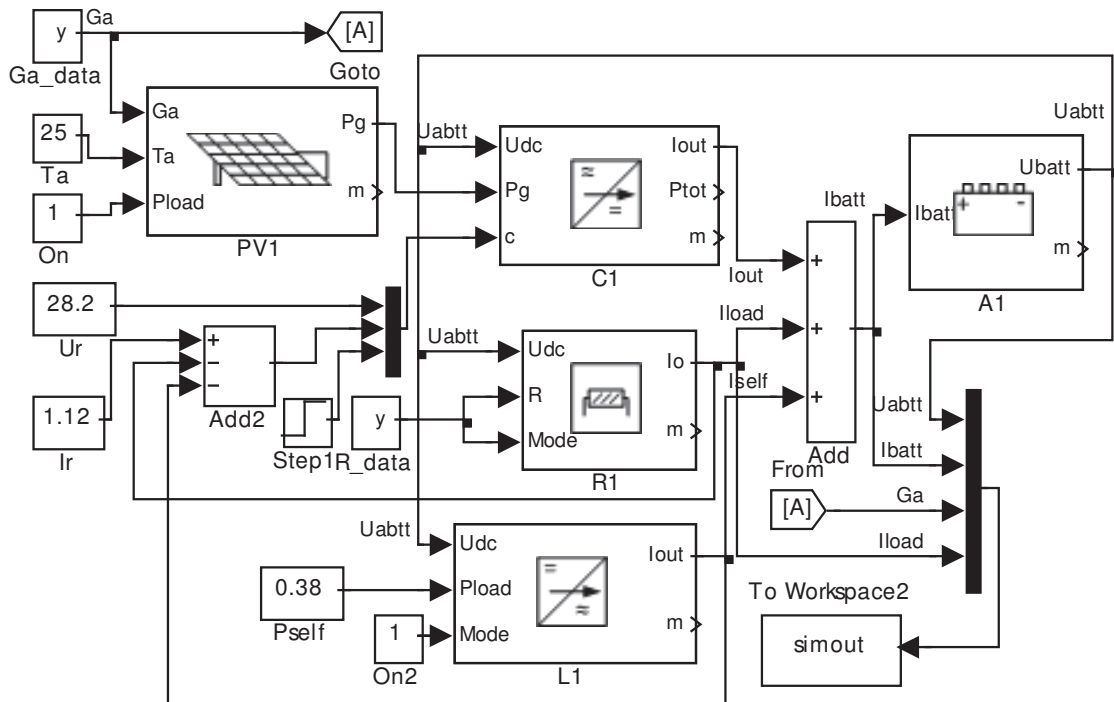
Modelis sastāv no saules baterijas PV1, spēka interfeisa C1, slodzes R1 un kopnes akumulatora A1. Atbilstoši uzlādes kontrollera PR3030 tehniskajai specifikācijai (skat. 9. pielikumu) tā pašpatēriņš pie 24 V ir  $\approx 0.38$  W neatkarīgi no barošanas avota (līdzstrāvas kopne vai saules baterija). Tā kā modelētie spēka interfeisi paredz pašpatēriņu tikai no pieslēgtā ģenerators, tad modelī papildus tika pievienota konstantas jaudas slodze L1, bet C1 pašpatēriņš iestatīts uz 0 W.

Modeļa ieejās ir divas ārējo datu laikrindas: saules elektromagnētiskais starojums (bloks “Ga\_data”) un slodzes pretestība (bloks “R\_data”). Eksperimentu laikā pie ilgstošas pieslēgtas slodzes paaugstinājās izmantotā rezistoru masīva temperatūra, kas varēja ietekmēt pretestību. Tāpēc konstanta lieluma vietā slodzes dati katrā laika punktā tika aprēķināti no eksperimentāli uzņemtajām  $U_{batt}$  un  $I_{load}$  līknēm. “R\_data” laikrinda pieslēgta arī pie R1 režīma (Mode) ieejas, nodrošinot slodzes pieslēgšanu attiecīgajā laika momentā (skat. režīma ieejas aprakstu 2.2.2. nodaļā). Aprēķinātās pretestības vērtības vidējie lielumi atšķīrās no nomērītajām pie 25 °C, attiecīgi  $\approx 21 \Omega$  un  $\approx 7 \Omega$ .

Mērījumu datu rindas tika uzņemtas ar soli 1 s, bet modeļa simulācijā izmantots Simulink algoritms ar mainīgu soli ar automātisku minimālā soļa iestatījumu, tāpēc fiksētā soļa ieejas datus ir jāinterpolē. Ieejas datu interpolācijai laika intervālā izmantota vecākā signāla vērtība.

Saules baterijas temperatūras izmaiņas raksturlīkne netika uzņemta eksperimentāli, tāpēc modeļa ieejā padota vidējā gaisa temperatūra eksperimentu laikā  $T_a = 25 \text{ °C}$ .

Spēka interfeiss C1 modelī reprezentē Steca PR3030 akumulatora uzlādes kontrolleri. Kontrollera akumulatora lādēšanas režīms tika nokonfigurēts uz lādēšanu pēc sprieguma. Lādēšanas sprieguma regulēšanas vērtība  $u_r$  C1 modelī ņemta no PR3030 tehniskās dokumentācijas, kur 28.2 V ir akumulatora beigu uzlādes spriegums peldošā lādēšanas režīmā. Strāvas regulēšanas iestatītā vērtība  $i_r$  tiek aprēķināta kā summa no PR3030 pašpatēriņa, slodzes (strāvas ir negatīvas, tāpēc summatorā tiek atņemtas) un pieļaujamās akumulatora uzlādes strāvas 1.12 A, tādējādi C1 modelī nodrošina normālu akumulatora uzlādes režīmu un kompensē kopējās slodzes izmaiņas kopnē.

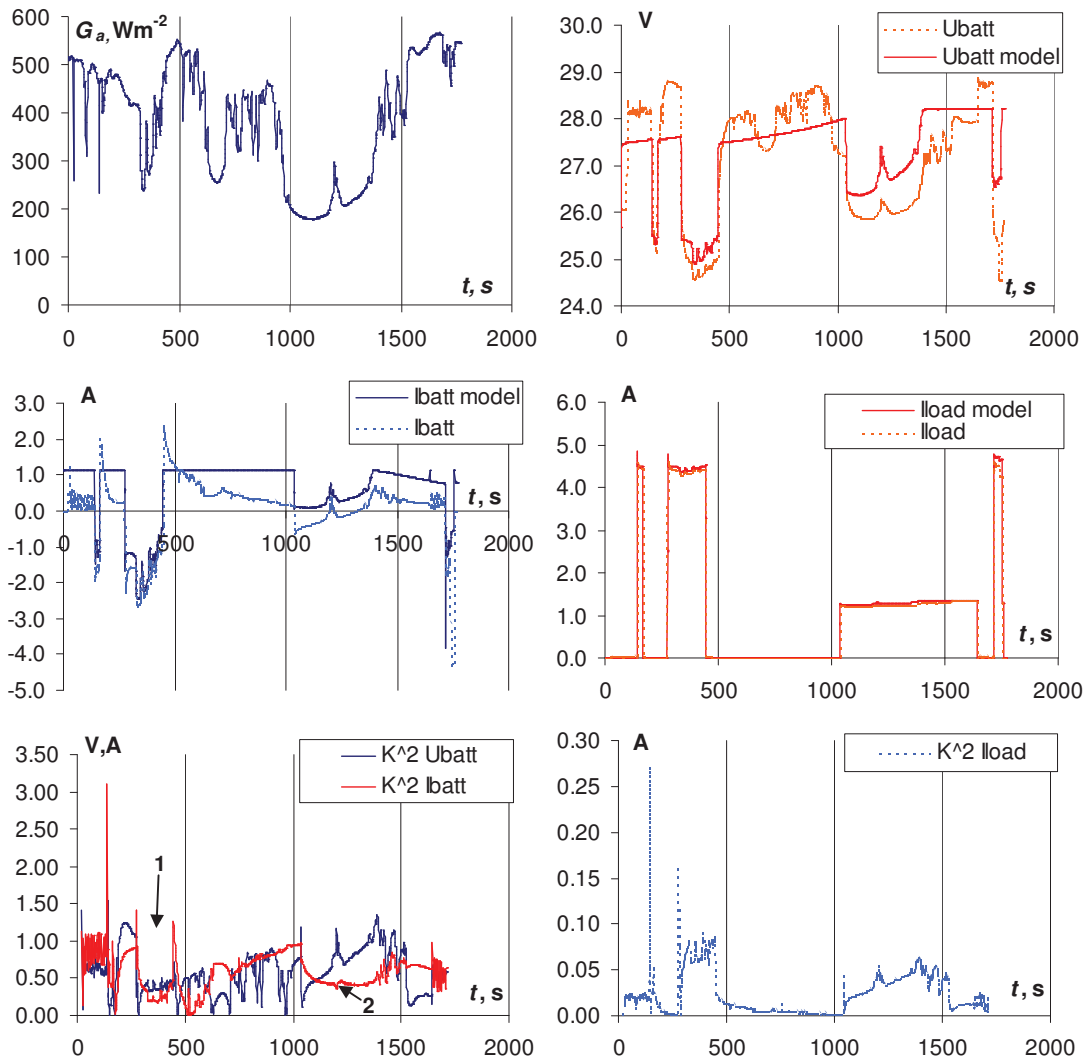


3.15. att. PR3030 uzlādes kontrollera, saules baterijas, akumulatora un slodzes ekvivalentā modeļa shēma

### 3.2.2. Rezultātu analīze un novērtējums

Eksperimentālie dati, simulācijas rezultāti 3 mēģinājumiem ar atšķirīgiem slodžu un saules starojuma scenārijiem apkopoti 3.16.-3.18. att. Pirms katra mēģinājuma akumulatori tika uzlādēti līdz  $26 \pm 0.2$  V (EDS). Eksperimentu datu pieraksts sāks jau pie ieslēgta uzlādes kontrollera, kurš ir uzsācis akumulatoru uzlādi, tāpēc visos eksperimentos un modeļa simulācijās sākuma spriegums ir 27.5 – 28.0 V. Visām simulācijām akumulatora sākuma uzlādes pakāpe iestatīta uz 95%. Rezultātu salīdzinājums veikts grafiski un ar eksperimentālo datu un modeļa kvadrātiskās kļūdas metodi, kā arī tika pētīta mērīto un modelēto signālu izmaiņas dinamika.

Mēģinājums 3.16. att. veikts 4. augustā 15:35-16:05 ar  $\approx 21 \Omega$  un  $\approx 7 \Omega$  slodzes pakāpēm ieslēgtām uz dažādiem laika intervāliem (0:30-10:00 min). Mēģinājumā parādīta akumulatora uzlāde mainīgas saules baterijas jaudas apstākļos dienas laikā ar mainīgu mākoņu daudzumu.

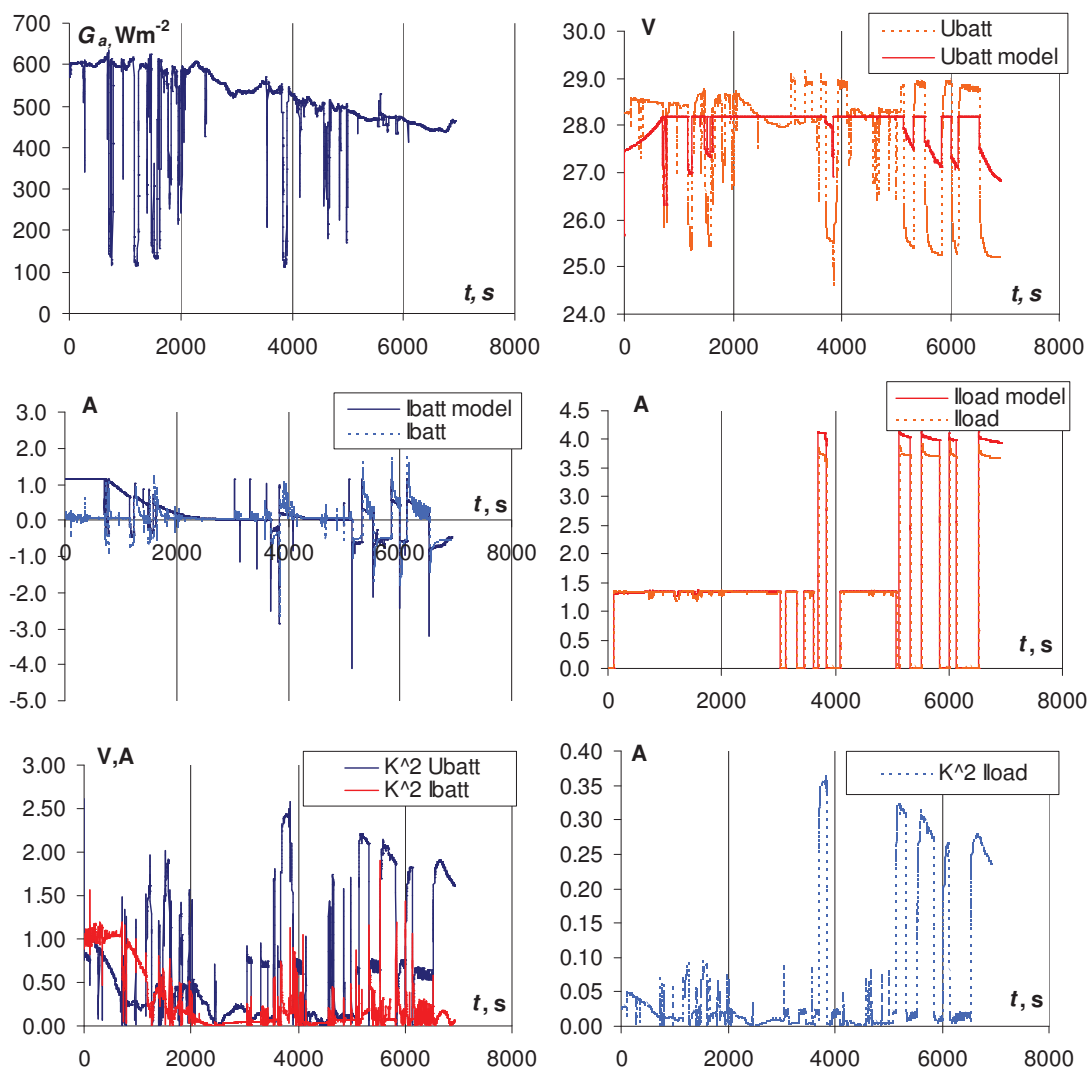


3.16. att. Eksperimentāli uzņemtie, modelētie sistēmas mainīgie un kvadrātiskās kļūdas (diena, mainīgs mākoņu daudzums)

Reālā un modelētā uzlādes kontrolera darbība pie pietiekama saules baterijas apgaismojuma pēc  $U_{batt}$  signāla pamatā sakrīta (kvadrātiskā kļūda vidēji 0.65 V jeb 2.7% no akumulatora nominālā sprieguma). Modeļa kļūda pieauga, apgaismojumam samazinoties līdz  $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  eksperimenta 15. līdz 24. min, kas ir saistāms ar akumulatora modelī izmantoto konstanto iekšējo pretestību.

Modeļa slodzes strāvas kvadrātiskā kļūda vidēji nepārsniedza 0.03 A, kas ir eksperimentālo mērījumu kļūdas robežās. Vislielākā modeļa kļūda bija novērojama akumulatora strāvai – vidēji 0.6 A, kas varētu būt saistīts ar kontrolera PR3030 uzlādes algoritma īpatnībām pie augstiem akumulatora uzlādes līmeņiem un saules paneļa jaudai pārsniedzot slodzes jaudu. Grafikā var redzēt, ka strāvas kļūda samazinās, kad slodze ir ieslēgta.

Mēģinājums 3.17. att. veikts 7. augustā 14:33-16:28 ar  $\approx 21 \Omega$  slodzi atsevišķos laika momentos uz 2:00...50:00 min un  $\approx 7 \Omega$  slodzi uz 2:00...6:00. Eksperimenta lielāko daļu saules starojums bija pietiekošs, lai nosegtu slodzes strāvas patēriņu.

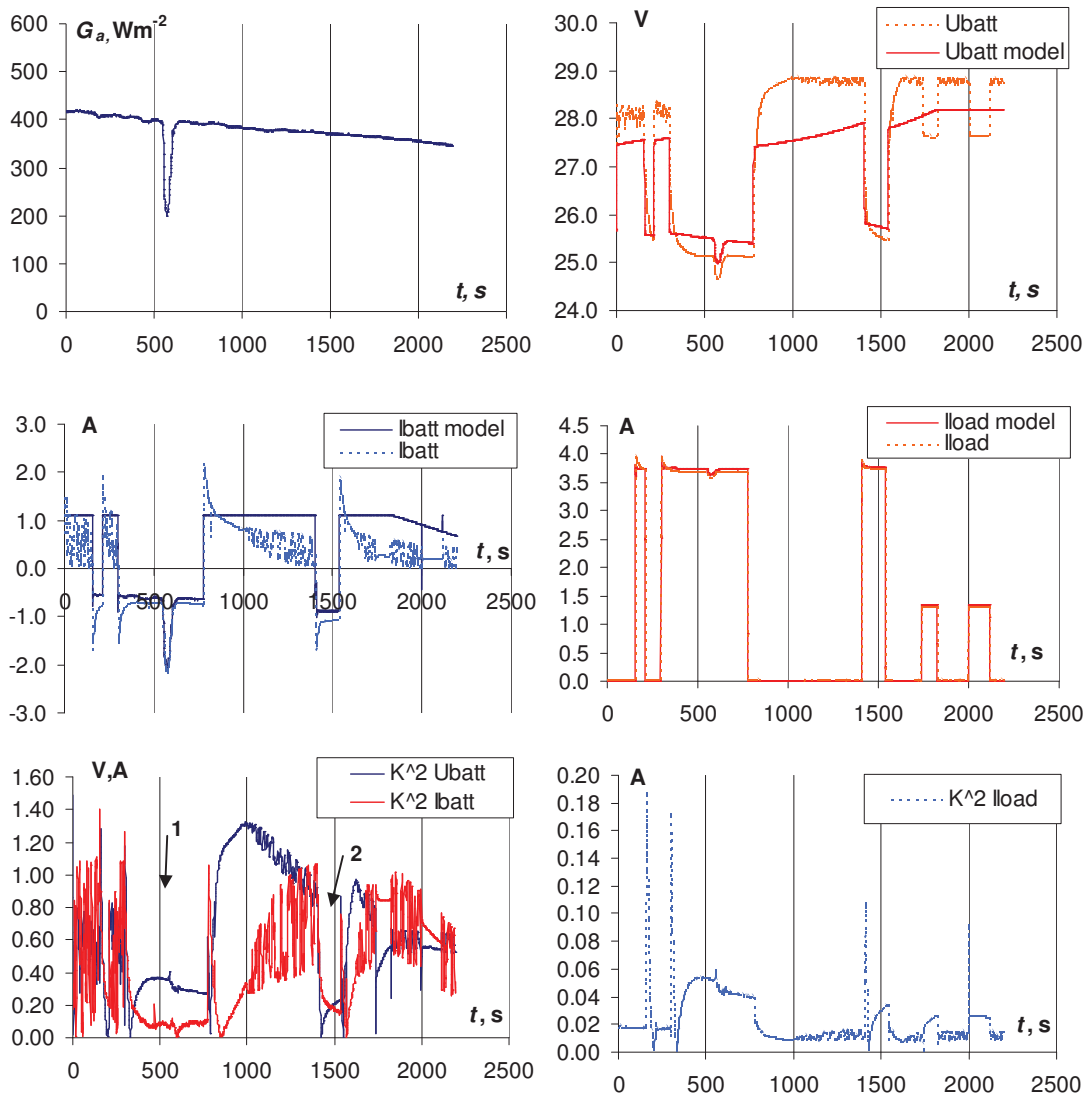


3.17. att. Eksperimentāli uzņemtie, modelētie sistēmas mainīgie un kvadrātiskās kļūdas (saulriets, mainīgs mākoņu daudzums)

Eksperimenta sākumā pie apgaismojuma virs  $600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  akumulators tika uzlādēts līdz  $28.2 \text{ V}$ . Pirmajās 15 min akumulatora uzlādes laikā ir vērojama salīdzinoši liela modelētā un eksperimentāli uzņemtā  $I_{batt}$  kvadrātiskā kļūda: vidēji  $0.9 \text{ A}$  laika posmā  $0 \dots 12 \text{ min}$ . Līdzīgi kā mēģinājumā 3.16. att var izskaidrot ar PR3030 kontrolera akumulatora lādēšanas algoritma īpatnībām.

Mēģinājums 3.18. att. veikts 23. augustā 16:59-17:36 salīdzinoši skaidrā laikā ar dažādu slodzes pakāpju akumulatoru izlādi. Kvadrātisko kļūdu grafikā var redzēt, ka līdzīgi iepriekšējam mēģinājumam  $I_{batt}$  modelētā kļūda palielinās, kad akumulators pilnībā uzlādējas. Akumulatora sprieguma  $U_{batt}$  mērījumu un modeļa kvadrātiskā kļūdas parāda, ka modeļa neprecizitātes rodas akumulatora uzlādes laikā bez ieslēgtas slodzes 14. – 24. min, kad  $U_{batt}$  kļūda sasniedza  $1.3 \text{ V}$  ( $5.4 \%$  no nominālā EDS).

Visos mēģinājumos lielākā modeļa kļūda ir akumulatora strāvai, kas saistās ar akumulatora modeļa darbību pie augstām uzlādes pakāpēm. Tas var būt saistīts ar neatbilstoši uzdotu akumulatora sākuma uzlādes līmeni modelī (visos mēģinājumos modeļa sākuma līmenis –  $95 \%$ ) vai PR3030 uzlādes kontrolera akumulatora lādēšanas algoritmu.

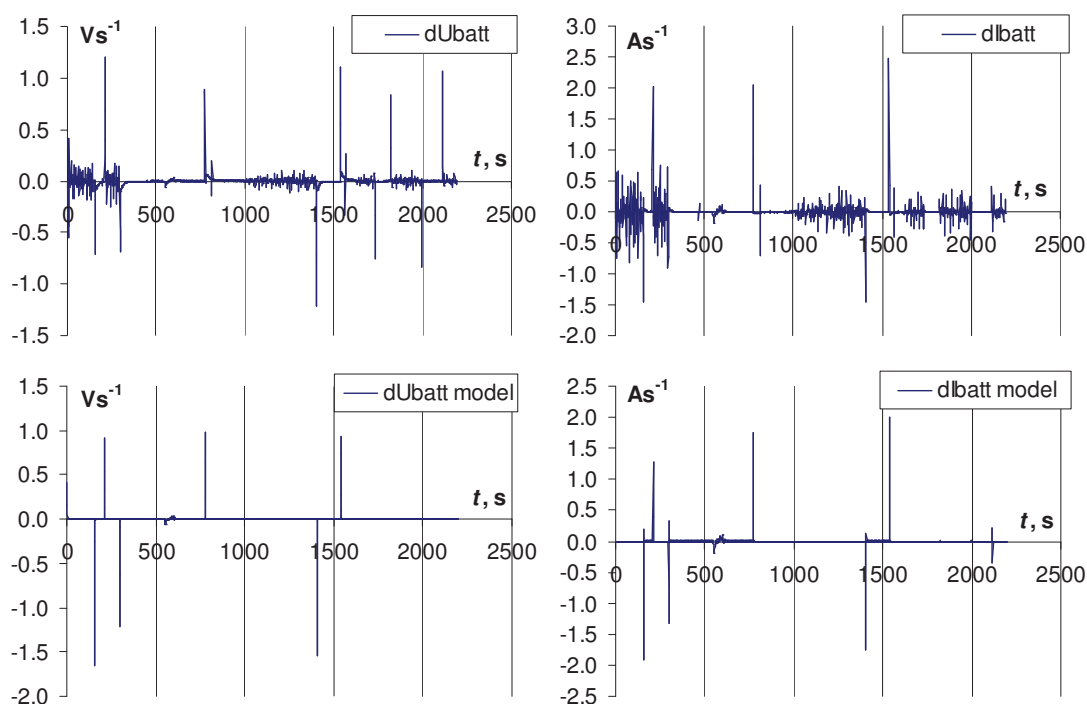


3.18. att. Eksperimentāli uzņemtie, modelētie sistēmas mainīgie un kvadrātiskās kļūdas (saulriets, skaidrs laiks)

Modelētās slodzes kvadrātiskā kļūda nevienā mēģinājumā vidēji nepārsniedza 0.034 A, t.i. 2.9 % pie akumulatoru nominālā sprieguma 24 V un slodzes pakāpes 21  $\Omega$  un 0.8 % pie 24 V un 7  $\Omega$  slodzes pakāpes. Līdz ar to var secināt, ka statistiskajā režīmā modelētais spēka interfeiss, saules baterija un slodze atbilst reālajām iekārtām, taču akumulatora modelim pie augstiem uzlādes līmeņiem un bez slodzes precizitāte samazinās. Tāpat strāvas kļūdu raksturlīknēs var redzēt, ka modeļa kļūda samazinās pie akumulatora izlādes, kad no fotoelektriskā ģenerators pieejamā strāva nav pietiekoša slodzes nodrošināšanai, piemēram, 3.16. un 3.18. att. norādītajos punktos.

Papildus  $U_{batt}$  un  $I_{batt}$  signāliem tika grafiski salīdzināta arī izmaiņas dinamika kā blakus esošo laika rindas punktu starpība jeb signāla izmaiņa 1 s laikā (skat. 3.19. att.). Salīdzinājums dots 3.18. att. mēģinājumam. No grafikiem var secināt, ka ar slodzes pieslēgšanu un atslēgšanu un saules starojuma izmaiņu (570. sekundē) saistītie pārejas procesi tiek simulēti korekti, bet svārstības <0.5 V saistās ar specifisku PR3030 uzlādes kontrolera akumulatora lēnās lādēšanas algoritmu, kad kopnē nav pieslēgta slodze un akumulators ir uzlādēts (laika intervāli 0..200. s, 800...1400. s utt.).





3.19. att.  $U_{batt}$  un  $I_{batt}$  signālu dinamikas salīdzinājums

No eksperimentiem var secināt arī, ka PR3030 uzlādes kontroleris gadījumā, ja saules baterija saražo vairāk enerģijas nekā tiek patērēts kopnē, samazina baterijas spriegumu jeb saslēdz to īsslēgumā.

### Nodaļas kopsavilkums un secinājumi

1. Eksperimentāli un ar virtuāliem modeļiem pārbaudīta vienas un tā pašas segmentu līmeņa automātiskās vadības kontrolera programmatūras darbība, kas apstiprina teorētiskajos pētījumos izstrādātā autonomo kombinēto elektroapgādes sistēmu modelēšanas pieejas galvenās priekšrocības. Izmantots Simulink līdzstrāvas kopnes modelis un ekvivalenta sistēma, sastāvoša no speciāli izstrādātiem elektriskā mērogā samazinātiem reālo iekārtu fizikālajiem modeļiem.
2. Segmentu līmeņa vadības sistēmas modeļa darbība reāllaikā demonstrēta, izmantojot līdzstrāvas kopnes un spēka interfeisu fizikālos modeļus. Eksperimentā no vadības sistēmas modeļa, kas tika darbināts uz personālā datora ar diskretizācijas periodu 50 ms, tika vadītas 4 iekārtas ar lokālu mikrokontroleru vadību. Kopā regulēti 4 sistēmas mainīgie: 3 avotu strāvas un kopnes spriegums. Eksperimentā segmentu līmeņa vadības sistēmas modelis atbilstoši uzdotajam scenārijam veica paralēli slēgtu spēka interfeisu darba režīma iestatīšanu mainīgas slodzes apstākļos.
3. Saules baterijas, akumulatora un līdzstrāvas kopnes spēka interfeisa Simulink modeļu validācijai ar reālām iekārtām tika izmantots eksperimentālais stends, kas sastāv no saules bateriju un akumulatoru uzlādes kontrolera Steca PR3030, Kioto saules baterijas KPV 195 PE un divu virknē slēgtu slēgta tipa svina skābes akumulatoriem FIAMM FG20451.
4. Reālā un modelētā uzlādes kontrolera darbība pēc  $U_{batt}$  signāla pamatā sakrita: kvadrātiskā kļūda vidēji  $<0.65$  V jeb  $2.7$  % no akumulatora nominālā sprieguma. Lielākā modeļa kļūda ir akumulatora strāvai, kas var būt saistīts ar neatbilstoši uzdotu akumulatora sākuma uzlādes līmeni modelī simulācijas sākumā vai PR3030

uzlādes kontrollera akumulatora lādēšanas algoritmu. Vidējā kļūda sasniedza 0.9 A. Strāvas kvadrātisko kļūdu raksturlīknes parādīja, ka modeļa kļūda samazinās pie akumulatora izlādes, kad no fotoelektriskā ģeneratora pieejamā strāva nav pietiekoša slodzes nodrošināšanai.

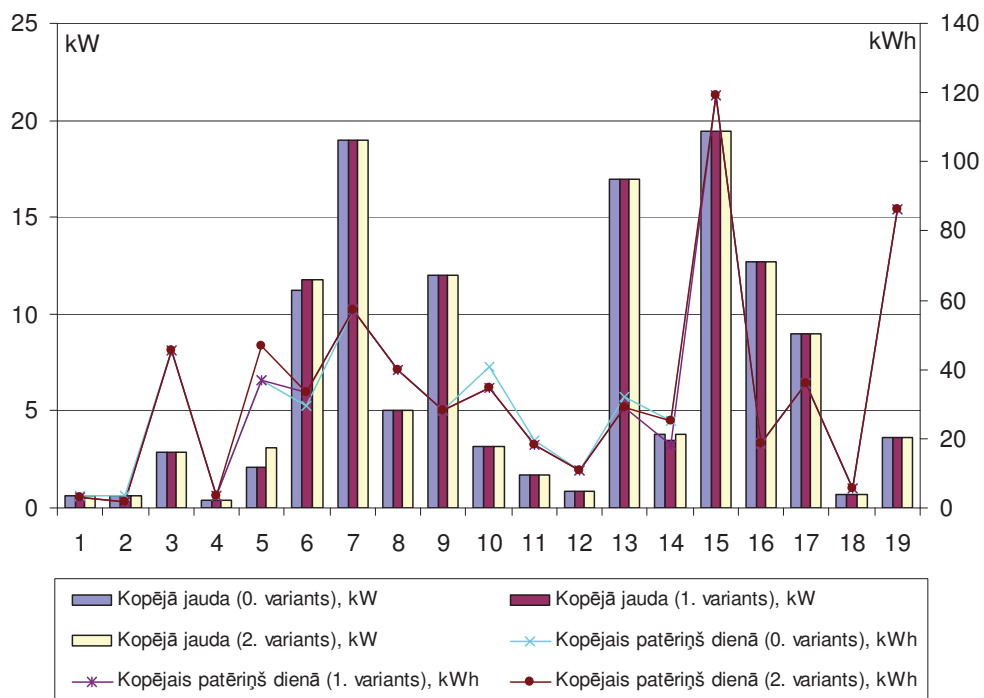
5. Modelētās slodzes strāvas kvadrātiskā kļūda nevienā mēģinājumā vidēji nepārsniedza 0.034 A, t.i. 2.9 % pie akumulatoru nominālā sprieguma 24 V un slodzes pakāpes 21  $\Omega$  un 0.8 % pie 24 V un 7  $\Omega$  slodzes pakāpes.
6. Modelētā spēka interfeisa un saules bateriju un akumulatora uzlādes kontrollera darbības dinamikas salīdzināšana parādīja, ka modelis atbilstoši reaģē uz slodzes izmaiņām kopnē, atšķirības parādās pie uzlādēta akumulatora, kad kontrolleris Steca PR3030 ierobežo akumulatora lādēšanas strāvu, regulējot to impulsu režīmā.

## 4. AUTONOMĀS KOMBINĒTAS ELEKTROAPGĀDES SISTĒMAS UN AVS MODEĻU APROBĀCIJA

Šajā nodaļā apskatīta autonomās kombinētas elektroapgādes sistēmas un AVS modeļu aprobācija ar reāliem elektriskās slodzes datiem no neliela izmēra liellopu fermas elektriskajiem patērētājiem un vietējiem meteoroloģiskiem datiem. Simulācija veikta, izmantojot 2007. gada meteoroloģisko informāciju un datus par elektroenerģijas patērētājiem LLU Mācību un Pētījumu saimniecības (MPS) “Vecauce” liellopu fermā, kura ir projektēta 530 govīm.

### 4.1. Ieejas laika rindu apraksts

Tika izmantoti dati par elektroenerģijas patērētājiem, to skaitu, jaudu un īpašām atzīmēm (piemēram, darbojas tikai tumšajā diennakts laikā vai temperatūrā zem 0 °C) no MPS “Vecauce”. Visi liellopu fermas elektroenerģijas patērētāji tika apkopoti datu bāzē un sagrupēti pa korpusiem un atsevišķiem kompleksa objektiem, tāpat atstāta iespēja papildus sadalījumam pa slodzes grupām (kolonna “Slodzes grupa”). Elektroenerģijas patēriņš dots 3 variantos: 0. – normālais, 1. – ekonomiskais, 2. – maksimālais. Maksimālās jaudas pie visām ieslēgtām elektroiekārtām un diennakts elektroenerģijas patēriņa kopsavilkums grafiski parādīts 4.1. att. Iekārtu uzskaitījums pa objektiem pievienots pielikumā. Kopējā maksimālā jauda un diennakts patēriņš visam kompleksam dots 4.1. tabulā. Iekārtu datu bāzes fragments normālajam patēriņam dots 10. pielikumā.



4.1. att. **Kopējā iekārtu jauda un elektroenerģijas patēriņš dienā 3 elektroapgādes variantiem, sagrupēts pa MPS “Vecauce” liellopu fermas objektiem**

1 – 1. korpus; 2 – 2. korpus; 3 – apkures sistēma; 4 – ārējais apgaismojums; 5 – teļu automātiskā ēdināšanas sistēma; 6 – dzemdību telpa; 7 – dzirnavas; 8 – kompresora telpa; 9 – kūtmēsļu nojume; 10 – mehāniķa darbnīca; 11 – novietne; 12 – pagrabs; 13 – piena baseina telpa; 14 – 1. robotu apkalpošanas zona; 15 – 2. robotu apkalpošanas zona; 16 – slaukšanas zāle; 17 – starpkrātuve; 18 – uzgaidāmais laukums; 19 – jaunā korpusa telpa

Pamatojoties uz patērētāju tipu, lomu liellopu fermas tehnoloģiskajā procesā un kopējo elektroenerģijas patēriņu diennakts laikā, tika izstrādāts aptuvens katras patērētāja vienības slodzes profils pa stundām. Katra stunda tika iekļauta datu bāzē kā atsevišķa kolonna. Ierakstos izmantotas vērtības intervālā [0...1], kuras parāda, ar kādu daļu no kopējās jaudas strādā dotā patērētāja vienība dotajā stundā. Tabulā 10. pielikumā dotie slodzes profili ir izstrādāti maksimālajam patēriņam neatkarīgi no sezonu maiņas ietekmētām temperatūras un dabīgā apgaismojuma svārstībām.

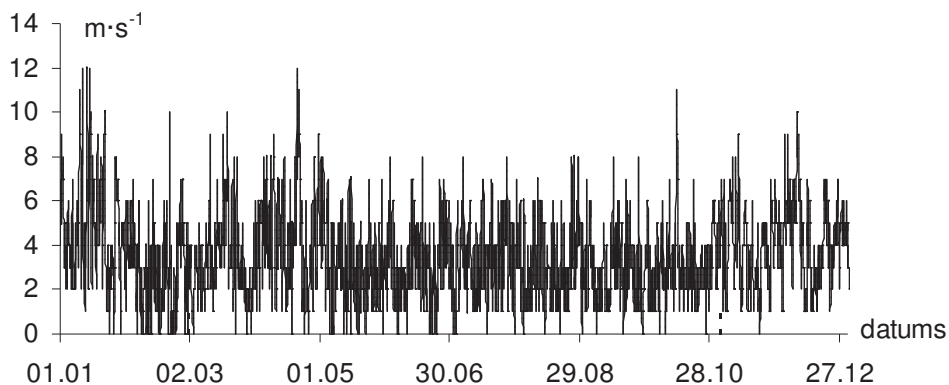
Lai ievērtētu elektriskās apsildes iekārtu (infrasarkanās lampas un apsildāmās dzirdnes) sezonālo darbību, veidojot slodzes laika rindas simulācijas ieejai, datu bāzē tika ieviesta speciāla kolonna, kas attiecīgajam patērētājam norāda, vai tas tiek darbināts temperatūrā zem 0 °C. Līdzīgā veidā atkarībā no dabīgā apgaismojuma līmeņa var tikt ievērtēta arī apgaismes patērētāju racionāla izmantošana, taču šajā gadījumā ir nepieciešams ņemt vērā tehnoloģiskā procesa īpatnības un fermas iekštelpu izkārtojumu, tāpēc šī darba ietvaros tas netika apskatīts. Turpmāk simulācijas tika izmantoti normālā patēriņa (0. varianta) elektriskās slodzes dati.

4.1. tabula

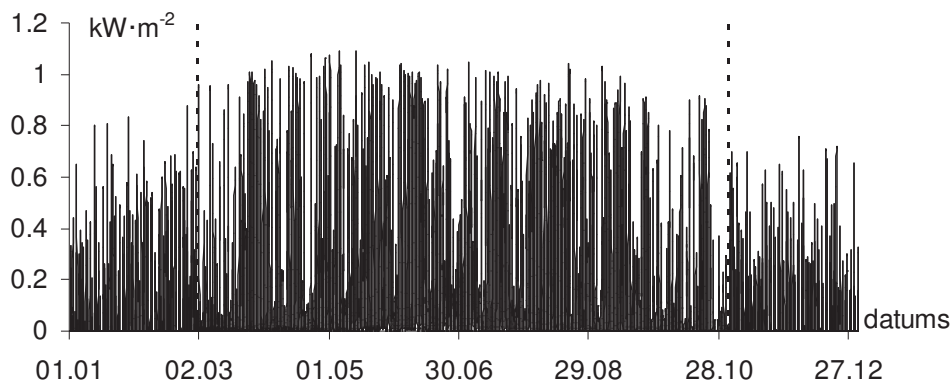
**Kopējā maksimālā jauda vidējais diennakts elektroenerģijas patēriņš**

	0. variants	1. variants	2. variants
Visu patērētāju maksimālā jauda, kW	125.75	126.05	127.35
Patēriņš dienā, kWh	642.11	625.61	642.81
Patēriņš mēnesī, kWh	7705.32	7507.32	7713.72

Atjaunojamās enerģijas ģeneratoru darbības simulēšanai ieejas datiem izmantotas meteoroloģisko datu laika rindas 2007. gadam Dobelē (4.2–4.4. att.): vēja stiprums 10 m augstumā un temperatūra (Meteoroloģiskā informācija, 2007) un saules intensitāte uz stacionāri novietotas virsmas ar 37° leņķi pret horizontu un 0° azimutu (Jesko, 2007). Saules starojuma intensitātes dati ir mērīti Ulbrokā. Vēja un gaisa temperatūras dati bija pieejami tikai ar 3 h periodu, tāpēc trūkstošie punkti tika lineāri interpolēti, iegūstot laikrindu ar stundas periodu. Saules starojuma intensitātes mērījumi 2007. gadā bija pieejami tikai no 1. marta līdz 2. novembrim. Iztrūkstošie dati tika aprēķināti no teorētiskā saules starojuma pēc (Jesko, 2007) dotās metodikas, papildus atņemot no katras stundas saules intensitātes normāli sadalītu gadījuma skaitli reizinātu ar koeficientu 1.4 ar vidējo vērtību 0.5 un standartnovirzi 0.2. Iegūtie dati 4.3. att. izcelti ar divām vertikālām raustītām līnijām.

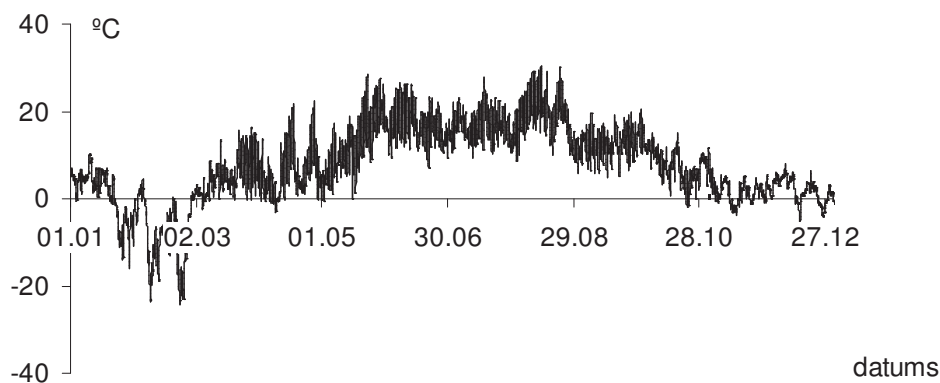


4.2. att. Vēja ātruma izmaiņas 2007. gada laikā Dobelē



4.3. att. **Saules starojuma jaudas izmaiņas 2007. gada laikā Dobeļē**

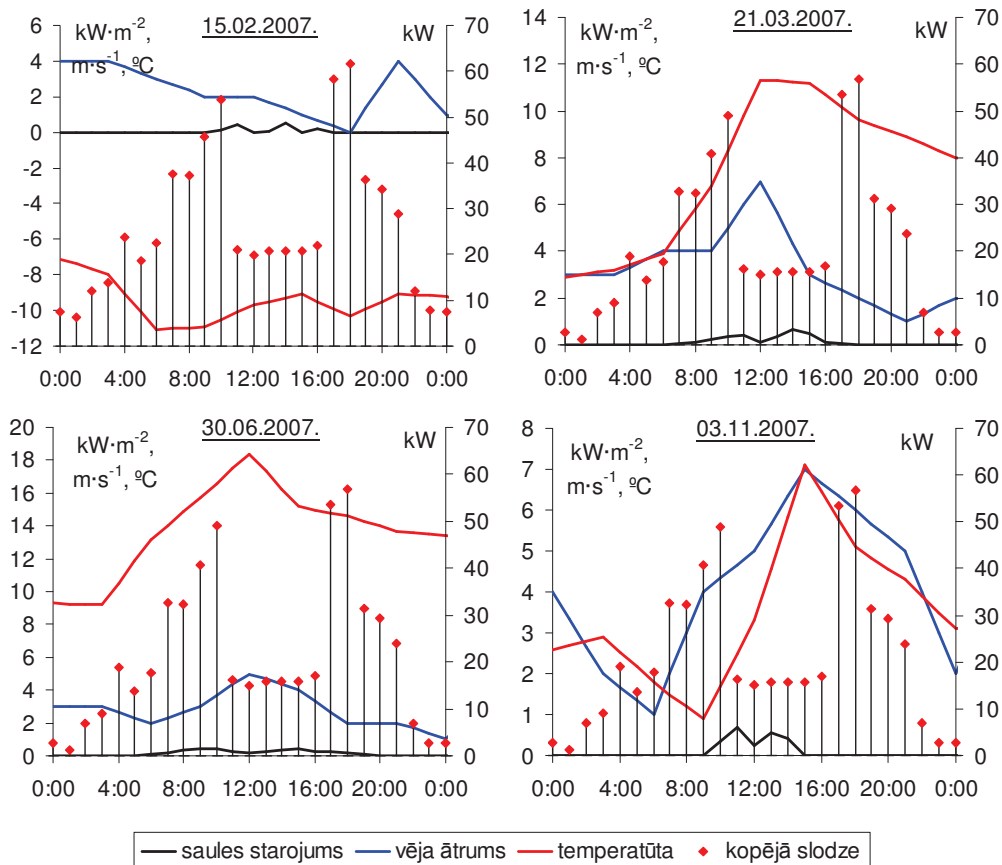
Izmantojot elektroenerģijas patērētāju datu bāzi un meteoroloģiskos datus, tika sastādīta slodzes laika rinda gada griezumā. Tika rēķinātas vidējās slodzes pa stundas intervāliem. Aprēķinos tika ņemta vērā gaisa temperatūra, t.i. summārās katras stundas slodzes aprēķinā nav iekļautas tās iekārtas, kuras netiek darbinātas pie temperatūras virs  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (skat. 10. pielikumu). Maksimālā vienlaicīgā elektriskā slodze pēc diennakts patēriņa grafika pie mīnuss grādiem ir  $61.63\text{ kW}$ .



4.4. att. **Temperatūra 2007. gada laikā Dobeļē**

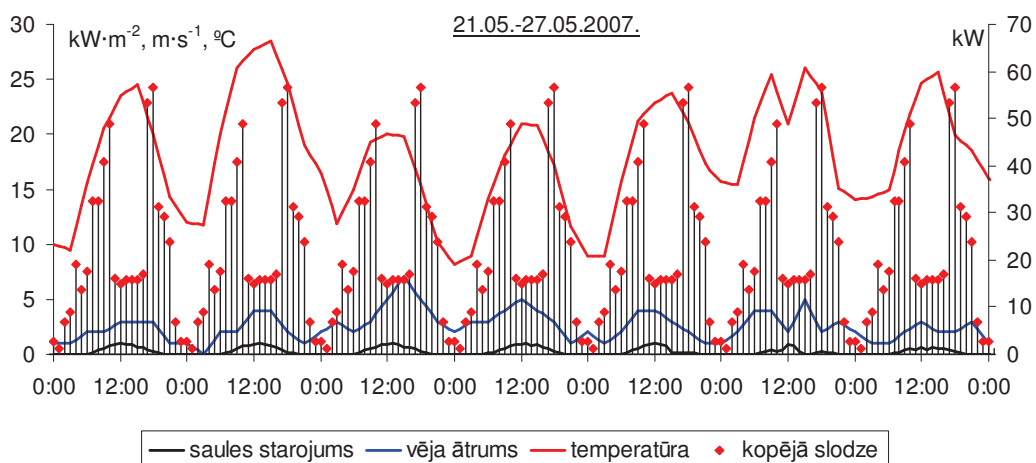
4.5. att. doti slodzes profili un meteoroloģiskie dati atsevišķām dienām raksturīgos ieejas laika rindu periodos.

15. februāris ir apskatīts kā diena ar lielāko elektrisko slodzi, t.i. ziemas apstākļos pie mīnuss grādiem, un minimālu saules un vēja resursu pieejamību:  $1.28\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$  saules enerģija stacionārai virsmai ar  $37^{\circ}$  leņķi pret horizontu un  $0^{\circ}$  azimutu pret dienvidiem un vidējais vēja ātrums  $2.32\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Šajā dienā var prognozēt saražotās elektroenerģijas iztrūkumu. Pavasarī un rudenī pie pozitīvas gaisa temperatūras un vidēju atjaunojamo resursu pieejamību apskatīti 21. marts ( $3.03\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $3.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) un 3. novembris ( $2.25\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $4.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ). Hipotētiski var pieņemt, ka šajās dienās ir vidēja atjaunojamo resursu pieejamība. 30. jūnijs apskatīts kā diena ar salīdzinoši lielāku saules enerģijas daudzumu un minimālu vēju ( $3.85\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $2.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ).

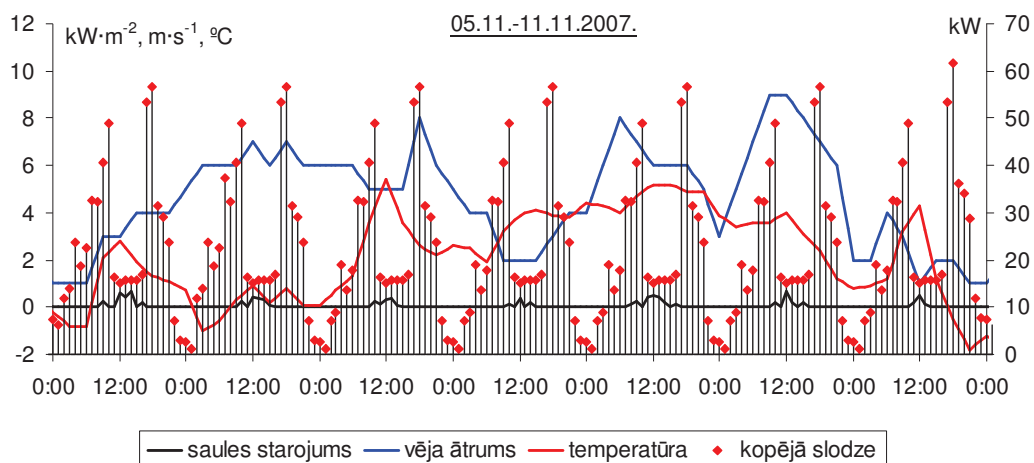


4.5. att. Meteoroloģisko datu laika rindas un slodzes profili atsevišķām dienām

Dažādas atjaunojamo resursu pieejamības salīdzināšanai tika apskatīti 7 dienu periodi pavasarī un rudenī (skat. 4.6–4.7. att.). 21-27. maijā kopējā saules enerģija –  $46.4 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ , vidējais vēja ātrums –  $1.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , bet 5-11. novembrī attiecīgi  $9.63 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$  un  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Vidējās vēja ātruma vērtības būtiski neatšķiras, taču jāņem vērā, ka novembrī vēja ātrums ir nepastāvīgs un atsevišķās dienās vidēji sasniedza  $5.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , maksimāli –  $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Līdz ar to šajos laikos ir iespējams saražotās enerģijas pārpalikums.



4.6. att. Meteoroloģiskie dati un slodzes profili laika periodā 21.05. līdz 27.05.2007.



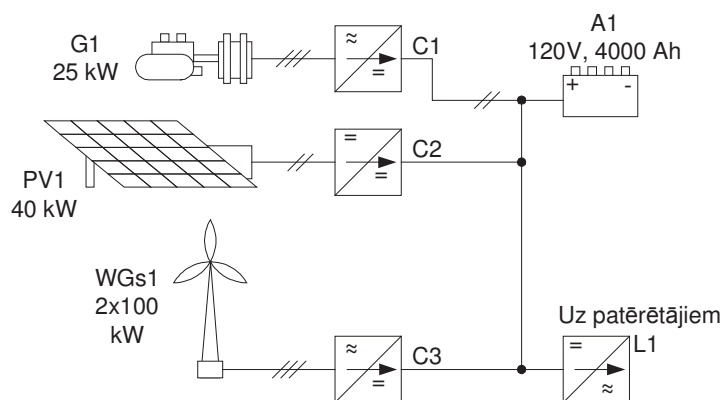
4.7. att. Meteoroloģiskie dati un slodzes profili laika periodā 05.11. līdz 11.11.2007.

#### 4.2. Simulācija ar līdzstrāvas kopnes un AVS modeli

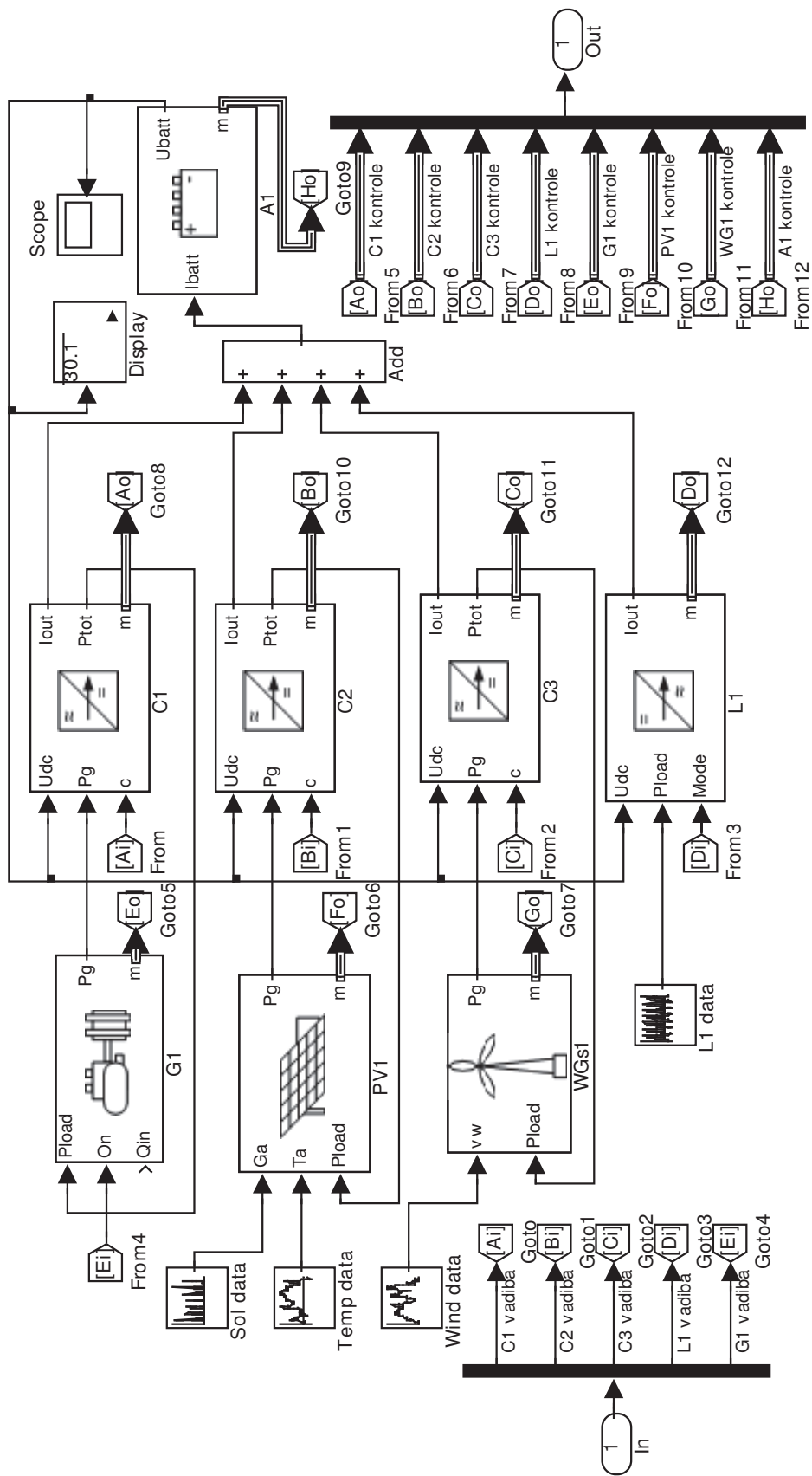
Kombinēto elektroapgādes sistēmu iekārtu konfigurācijas optimizācijas programmā “HOMER” tika atrasts autonomās kombinētas elektroapgādes sistēmas (turpmāk HPS2) variants atbilstoši pieejamajiem resursiem un slodzei (skat. 4.8. att.).

Sistēmas elektroenerģijas avoti ir divi Fuhrländer 100 kW vēja ģeneratori WG1, 40 kW saules bateriju masīvs ar optimālu stacionāro novietojumu PV1, kurš sastāv no 200 Kioto 195 paneļiem un 25 kW iekšdedzes ģeneratora G1, kas var darboties ar fosilo vai biodeģvielu. Vēja ģeneratora modelī izmantota Fuhrländer 100 kW jaudas raksturlīkne (skat. 11. pielikumu). Iekšdedzes ģeneratora patēriņš modelēts kā lineāra sakarība (skat. 2.4.2. nodaļu). HPS2 ģeneratora degvielas patēriņš modelēts ar empīriski iegūto sakarību benzīna ģeneratoram  $Q = 3.6 \cdot 10^{-4} \cdot P_{el} + 1.06 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ , t.i.  $10.06 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$  pie jaudas 25 kW jeb  $0.4 \text{ l} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ . Rādītāji aptuveni atbilst tirgū pieejamajiem 20-30 kW dīzeļģeneratoriem (Approximate Diesel Fuel..., 2011).

Iekārtu apvienošanai paredzēta 120 V centrālā līdzstrāvas kopne ar tieši pieslēgtu 4000 Ah dziļizlādes svina-skābes akumulatoru A1, maksimālā uzlādes strāva ir 10 % nokapacitātes  $I_{chmax} = 400 \text{ A}$ . Spēka interfeisu C1-C3, kā arī slodzes invertora L1 lietderības koeficients  $\eta = 90 \%$ . Ekvivalentais HPS2 imitāciju modelis ar AVS interfeisu Simulink vidē parādīts 4.9. att.



4.8. att. Liellopu fermas autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas iekārtu slēgums



4.9. att. Liellopu fermas autonomās kombinētās elektroapgādes imitāciju modelis ar AVS interfeisu



Modeļa ieejās ir norādītas saules starojuma, gaisa temperatūras, vēja ātruma laika rindas un attiecīgā perioda slodzes profils, kā arī iekšdedzes ģenerators un spēka interfeisu vadības signāli. Atgriezeniskās saites kontroles signāli izejā tiek uzņemti no visām sistēmas iekārtām. Simulācijas algoritms: mainīga soļa ode23tb ar automātiskiem soļa garuma un simulācijas precizitātes iestatījumiem.

Modelim tika pieslēgta AVS un tika veiktas simulācijas ar iepriekš apskatītajiem ieejas datiem. Lai salīdzinātu modelēto iekārtu darbību dažādos režīmos un demonstrētu dažādu automātiskās vadības algoritmu veiktspēju, pieslēgtajā AVS tika realizēti divi vadības algoritmi. Vadības algoritmu sastādīšanā izmantotas iekšdedzes ģenerators ieslēgšanas pamatstratēģijas: cikliskā akumulatora uzlāde un slodzes jaudas sekošana (Barley et. al., 1995).

Pēc cikliskās uzlādes algoritma iekšdedzes ģenerators tiek ieslēgts pie noteikta zemākā akumulatora uzlādes līmeņa un atslēgts tikai sasniedzot uzdoto augsto uzlādes līmeni. Tādējādi ģenerators enerģija pamatā tiek izmantota akumulatora lādēšanai un papildus kompensē slodzi, ja pieejamā jauda no atjaunojamajiem resursiem nav pietiekama. Slodzes sekošana paredz ģenerators ieslēgšanu, ja slodzes jauda pārsniedz atjaunojamo resursu jaudu, bet akumulatora uzlādes līmenis netiek ņemts vērā.

Pirmajā vadības algoritmā (skat. 4.10. att.) izmantota cikliskās uzlādes pieeja ar ģenerators ieslēgšanu pie akumulatora 50 % līmeņa un atslēgšanu pie 90 %. Pie tam proporcionāli tiek regulēta akumulatora uzlādes strāva, pieskaņojot katra atjaunojamā avotā spēka interfeisa strāvas regulējošo vērtību atkarībā no avotu, patērētāju un pieļaujamās maksimālās akumulatora uzlādes summas un pašreizējās spēka interfeisa strāvas pēc sakarībām:

$$\begin{aligned} i_r^{C2} &= I^{C2} - C_2 \cdot (I^{L1} + I^{C1} + I^{C2} + I^{C3} - C_A \cdot I_{chmax}^{A1}) = I^{C2} - C_2 \cdot (I^{A1} - C_A \cdot I_{chmax}^{A1}) \\ i_r^{C3} &= I^{C3} - C_3 \cdot (I^{L1} + I^{C1} + I^{C2} + I^{C3} - C_A \cdot I_{chmax}^{A1}) = I^{C3} - C_3 \cdot (I^{A1} - C_A \cdot I_{chmax}^{A1}), \end{aligned} \quad (4.1)$$

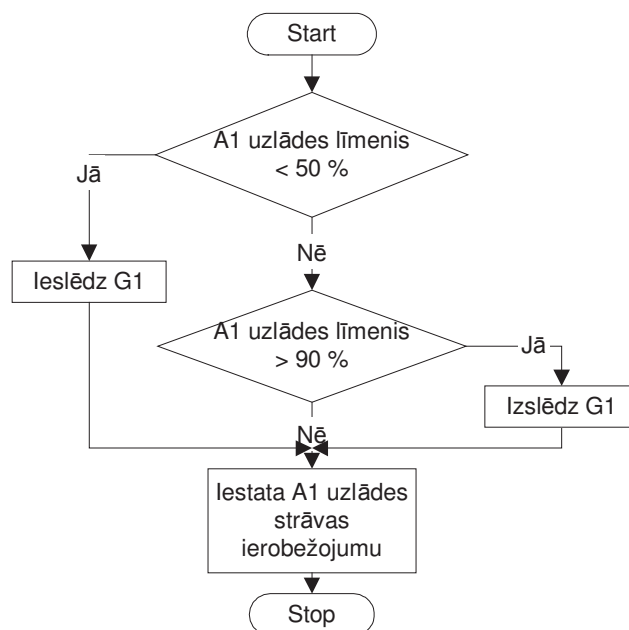
kur  $i_r^{Cn}$  – attiecīgā spēka interfeisa strāvas regulējošā iedarbe, A;  
 $I^{Li}, I^{Ci}$  – attiecīgās iekārtas pašreizējā strāva (elektroenerģijas avotiem >0, slodzēm <0), A;  
 $I^{A1}$  – pašreizējā akumulatora strāva;  
 $I_{chmax}^{A1}$  – pieļaujamā akumulatora uzlādes strāva, A;  
 $C_2, C_3$  – attiecīgo avotu regulēšanas koeficienti,  $C_2 + C_3 \leq 1$ ;  
 $C_A$  – akumulatora maksimālās uzlādes strāvas koeficients.

Vai vispārīgā gadījumā:

$$i_r^{Cn} = I^{Cn} - C_n \cdot (\sum I^{Mi} - C_A \cdot I_{chmax}^A) = I^{Cn} - C_n \cdot (I^{A1} - C_A \cdot I_{chmax}^A), \quad (4.2)$$

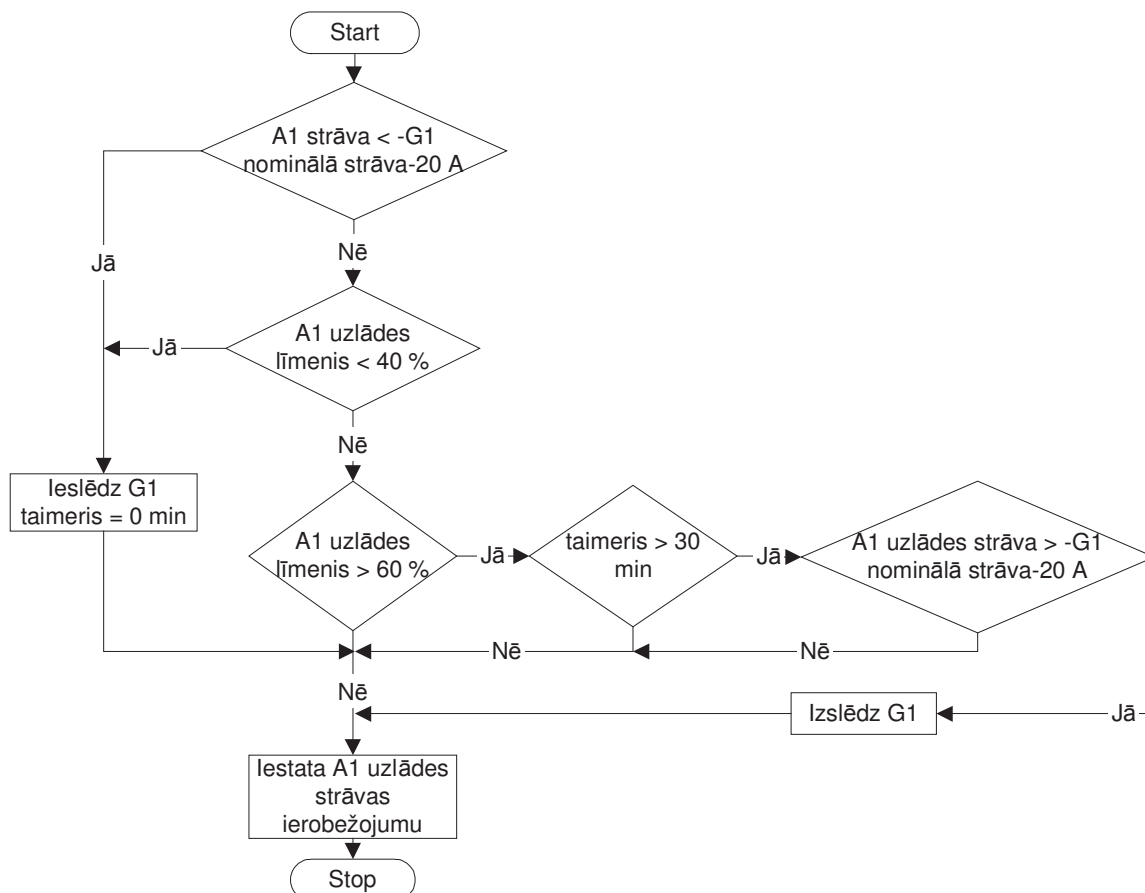
kur  $\sum I^{Mn} - C_A \cdot I_{chmax}^A$  – sistēmas strāvas bilance, negatīvās vērtības parāda, cik lielu strāvu papildus jāpievada, lai nodrošinātu slodzes darbību un akumulatora lādēšanu, pozitīvās – par cik ir pārsniegta  $I_{chmax}$ .

Visās simulācijās saules un vēja regulēšanas koeficienti tika pieņemti  $C_2 = 0.65$  un  $C_3 = 0.35$ , t.i. katrs avots nosedz attiecīgo daļu no sistēmā nepieciešamās strāvas, bet  $C_A = 0.9$ , lai nepieļautu  $I_{chmax}$  pārsniegšanu.  $C1$  strāva atsevišķi netika ierobežota, jo maksimālā strāva no iekšdedzes ģenerators pie sistēmas sprieguma 120 V nepārsniedz  $I_{chmax}$ . Lietojot šādu strāvas regulējošā signāla vērtības aprēķinu, panākts, ka ieslēgts iekšdedzes ģenerators tiek noslogots prioritāri attiecībā pret atjaunojamajiem resursiem un tāpēc strādā ar augstāko lietderības koeficientu.



4.10. att. Akumulatora cikliskās uzlādes algoritms

Otrajā algoritmā (skat. 4.11. att.) tika izmantota modificēta slodzes sekošanas stratēģija. Ideālā gadījumā pie slodzes sekošanas ģeneratoram būtu jākompensē slodzes jaudu, kuru nenodrošina atjaunojamie avoti, taču šī starpība var būt mazāka par pieejamo jaudu no ģeneratora, HPS2 gadījumā – 25 kW.



4.11. att. Modificētais slodzes sekošanas – cikliskās uzlādes algoritms

Lai panāktu maksimāli lietderīgu degvielas patēriņu, iekšdedzes ģenerators tiek ieslēgts tikai, ja akumulatora izlādes strāva pārsniedz no spēka interfeisa C1 pieejamo strāvu par 20 A pie nominālās ģenerators G1 jaudas un nominālā sistēmas sprieguma 120 V. Tādā veidā tiek panākts, ka ģenerators tiek darbināts ar jaudu tuvu nominālai un kompensē atjaunojamo resursu jaudas iztrūkumu un nelādējot akumulatoru. Lai pasargātu akumulatoru no pārāk dziļas izlādes, slodzes sekošana papildus kombinēta ar ciklisko akumulatora uzlādi ar šauru histerēzi: ģenerators tiek ieslēgts arī pie 40 % akumulatora uzlādes līmeņa, bet atslēgts – pie 60 %. Līdz ar to atbilstoši slodzes sekošanas stratēģijai akumulatora uzlāde līdz maksimālai kapacitātei tiek veikta tikai ar atjaunojamo resursu palīdzību.

Ģenerators minimālais darbības laiks iestatīts uz 30 min, kas novērš pārāk biežu ģenerators ieslēgšanu un atslēgšanu pie  $I^{A1}$  svārstībām ap iestatīto ieslēgšanas strāvas robežu. HPS2 AVS programmas koda fragmenti, ietverot sistēmas objektu konfigurāciju un abu vadības algoritmu realizāciju, doti 12. pielikumā.

Abi vadības algoritmi un kombinētā elektroapgādes modeļa darbība ar AVS interfeisu tika novērtēti, veicot HPS2 simulācijas pie visām ieejas datu laika rindām. Modeļa simulācijā spēka interfeisu C1-C3 sprieguma regulējošā iedarbe iestatīta uz  $u_r = 136$  V akumulatoru lādēšanai, C1 strāva netiek ierobežota, C2, C3 strāvas ierobežo atbilstoši formulai (4.1). Iekšdedzes ģenerators G1 degvielas daudzums nav ierobežots. Svina-skābes akumulatora sākuma uzlādes līmenis iestatīts  $SOC_{init} = 100$  %. Algoritmu novērtēšanas kritēriji: atjaunojamo resursu izlietojums un no tā izrietošie akumulatora uzlādes līmenis un iekšdedzes motora ģenerators darbības laiks un degvielas patēriņš.

AVS regulēšanas periods ir 60 s, t.i. .NET vide aprēķina vadības iedarbes, iestata nepieciešamos Matlab vides ieejas un inerciālo bloku stāvokļu vērtības un uzsāk Simulink modeļa simulāciju 60 s periodā, pēc kura nolasa rezultātos no Matlab vides mainīgajiem.

### 4.3. Rezultātu analīze un novērtējums

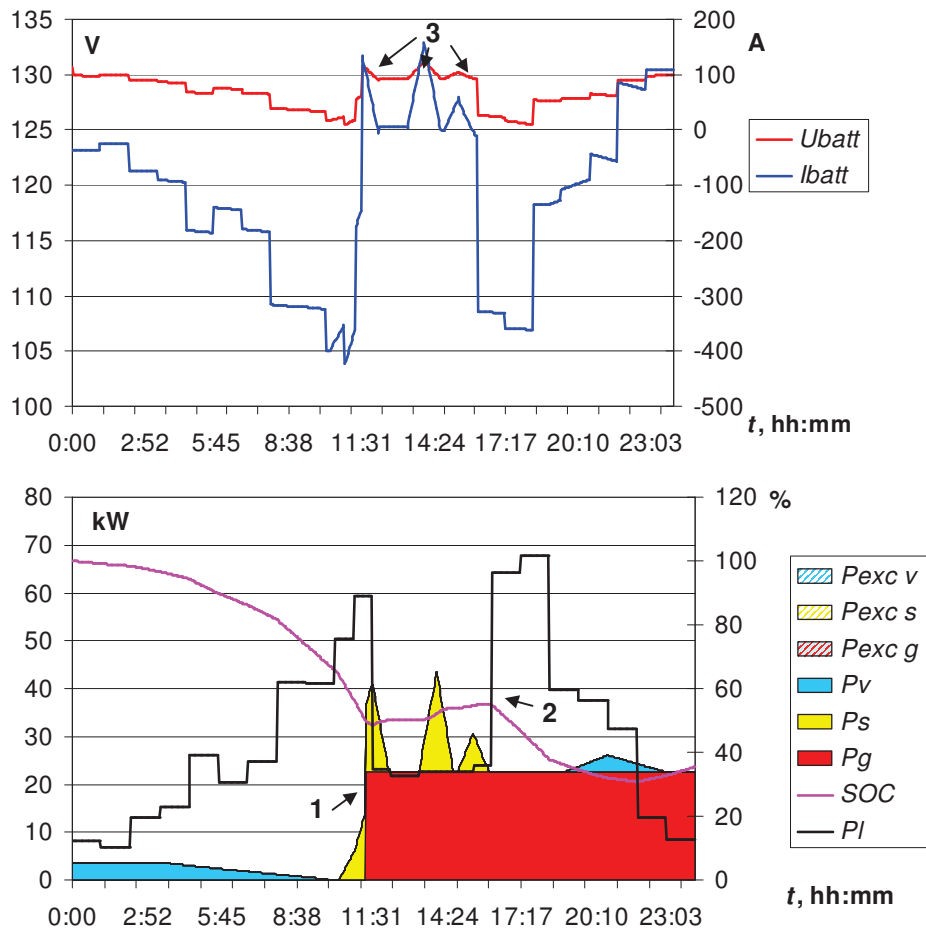
Modeļa darbības ātrums attiecībā pret reāllaiku atkarībā no pārejas procesu intensitātes apskatītajā HPS2 modeļa konfigurācijā vidēji ir 150:1, t.i. sistēmas darbības simulācija 7 dienu periodam tiek veikta 67 minūtēs.

Simulācijas rezultāti diennakts scenārijiem grafiski parādīti 4.12–4.19. att. Katra perioda simulācijas grafikos ir iekļauti slodzes jauda  $P_l$ , kW un sistēmā patērētā atjaunojamo un fosilo resursu elektriskā jauda kilovatās (bet ne kopējā ģenerētā, 10 % zudumi spēka interfeisos ir atskaitīti):  $P_S$  saulei,  $P_V$  vējam,  $P_G$  iekšdedzes ģeneratoram. Tāpat doti akumulatora uzlādes līmenis  $SOC$ , % un neizmantotā jauda kilovatās iekšdedzes ģeneratoram, saules baterijai un vēja ģeneratoriem attiecīgi  $P_{excG}$ ,  $P_{excS}$ ,  $P_{excV}$ . Lai grafiski uzskatāmi parādītu atjaunojamo un fosilo resursu daļu slodzes nodrošināšanā, tika izmantoti grafiki ar vertikāli summēto laukumu (*stacked area*). Līdzstrāvas kopnē paralēli slēgtā akumulatora spriegums  $U_{batt}$  un akumulatora strāva  $I_{batt}$ , ( $I_{batt} > 0$  – uzlāde,  $I_{batt} < 0$  – izlāde) iekļauti 4.12. un 4.13. att.

Simulācijas rezultātu statistika skaitliski ir apkopota tabulā 4.2. atsevišķām dienām un tabulā 4.3. nedēļas simulācijām.

15. februāra simulācijā (skat. 4.12. att.), AVS darbojoties pēc cikliskās uzlādes algoritma, iekšdedzes ģenerators tika ieslēgts, kad akumulatora  $SOC$  nokritās līdz 49 % plkst. 11:35 pēc akumulatora izlādes strāvas pieauguma punktā 1 (skat. att.). Turpmāko dienas daļu atjaunojamo resursu pieejamība, salīdzinot ar patēriņu, ir minimāla (51.5 kWh no PV1, vēja ģeneratori elektroenerģiju sāk ražot tikai 19:00). Patērētā jauda turpretī laikā no 11:00 līdz 17:00 ir vidēji 22.8 kW (136.8 kWh enerģijas izteiksmē šajā

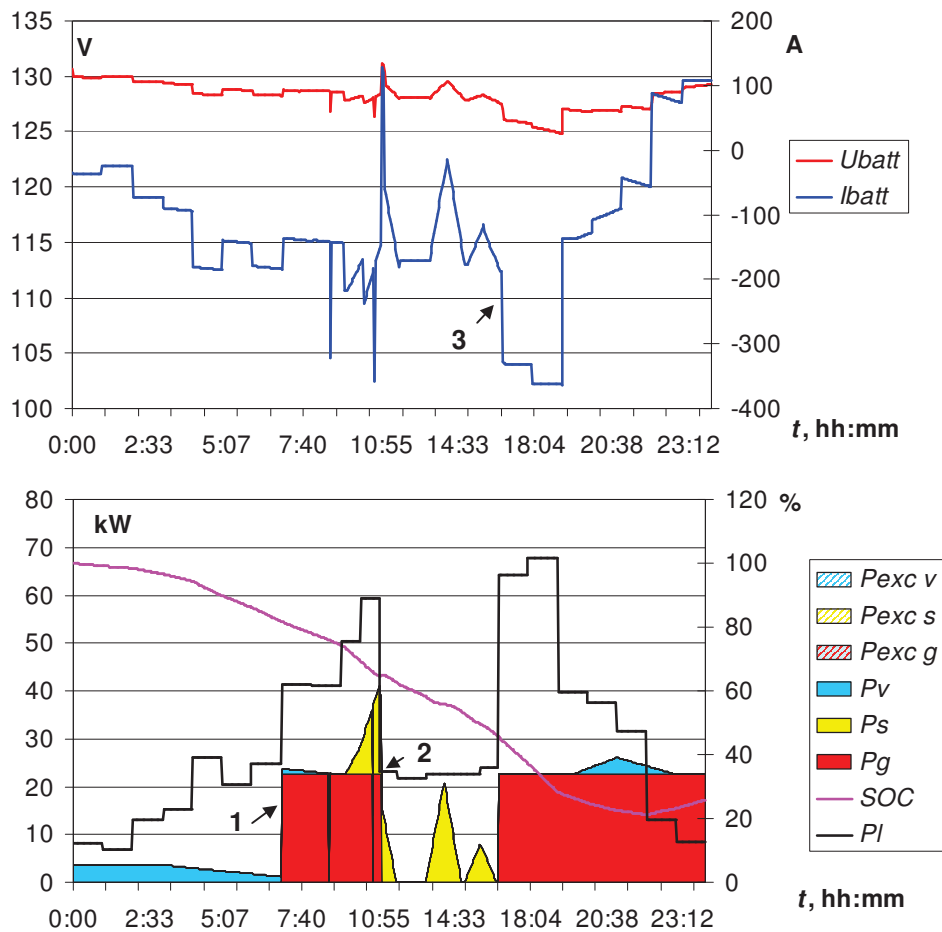
laika periodā), kas praktiski sakrīt ar G1 pieejamo jaudu, tāpēc līdz nākamajam slodzes lēcienam punktā 2 akumulatora uzlādes līmenis ir tikai 55 %. Simulācijas periodā tika izmantota visa no atjaunojamajiem avotiem un no ieslēgta iekšdedzes ģenerators pieejamā jauda, tāpēc atbilstoši laukumi grafikā neparādās Akumulatora uzlāde bija iespējama tikai pateicoties PV1 pieejamās jaudas lēcieniem punktos, ko var redzēt kā pozitīvas strāvas lēcienus punktos 3. Grafikā var uzskatāmi redzēt akumulatora uzlādes līmeņa dinamiku. Kad elektriskās slodzes  $P_l$  līnijas ierobežotas laukums tiek nosegts ar visu summāro resursu pieejamo enerģiju, notiek akumulatora uzlāde, pretējā gadījumā akumulators tiek izlādēts.



4.12. att. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 15.02.2007. akumulatora cikliskās uzlādes algoritmam

AVS darbojoties pēc 2. algoritma (skat. 4.13. att.), G1 ieslēgšana sakrīt ar slodzes pieaugumu līdz plkst. 6.59 punktā 1. Akumulatora izlādes strāva pieauga līdz  $-290$  A viena 60 s vadības perioda laikā un nākamajā periodā tā tika kompensēta ar G1 ieslēgšanu. Lielā laika ass mēroga dēļ šis regulēšanas pārejas process nav redzams grafikā. No plkst. 7:00 līdz 8:30 ir pieejama  $P_v$  robežās 0.5...1 kW, un pie ieslēgta G1 akumulatora izlādes strāva aptuveni ir  $I_{batt} = -140$  A, tāpēc ģenerators pēc slodzes sekošanas algoritma tiek atslēgts pēc 30 min. darba. Atslēdzot ģeneratoru, pieaug izlādes strāva un nākamajā regulēšanas ciklā tas tiek ieslēgts no jauna. Palielinātās slodzes laikā 7:00-8:30 G1 tika ieslēgts un izslēgts 3 reizes. G1 paliek ieslēgts līdz punktam 2, kompensējot patēriņa slodzi. Punktā 3 iekšdedzes ģenerators tika ieslēgts no jauna, jo palielinājās akumulatora izlādes strāva  $I_{batt} = -331$  A. Akumulatora uzlāde sākās tikai pēc slodzes samazināšanās un  $P_v$  palielināšanās pēc 22:00. Tāpat kā pie

cikliskās uzlādes algoritma simulācijas periodā tika izmantota visa no atjaunojamajiem avotiem un no ieslēgta iekšdedzes ģenerators pieejamā jauda.

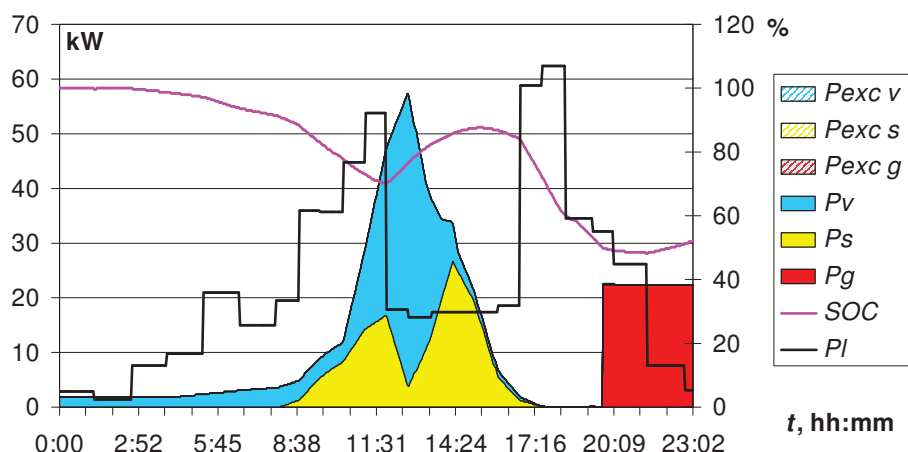


4.13. att. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 15.02.2007. modificētajam slodzes sekošanas algoritmam

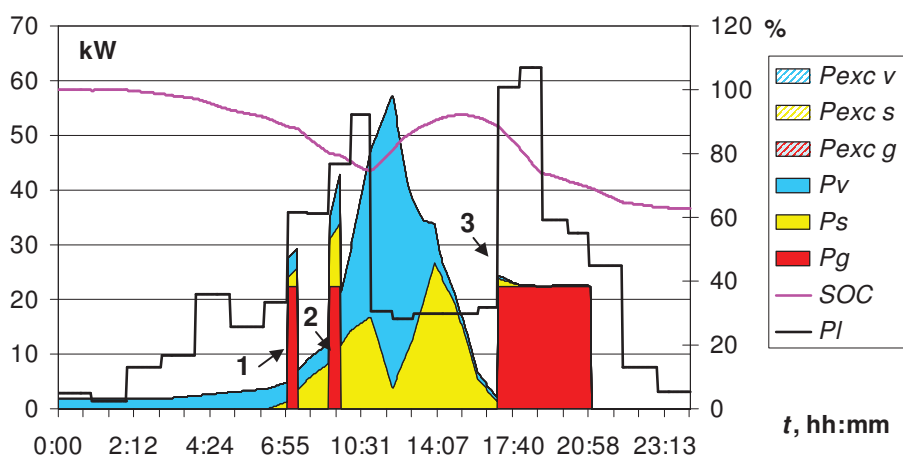
Rezultātā, AVS darbojoties pēc 2. algoritma, G1 darbības laiks samazinājās par 2 h, bet patērētais degvielas daudzums par 23 l, taču uz tā rēķina samazinājās arī akumulatora uzlādes līmenis: SOC 2. algoritma darbības beigās bija 25.9 %, kas ir par 9.6 % mazāks nekā cikliskās uzlādes algoritmam, kur ģenerators darbojās ilgāk (skat. 4.2. tabulu).

21. marta simulācijā (skat. 4.14–4.15. att.) pieejamā vēja enerģija bija 158.3 kWh, bet saules – 115.6 kWh, kopējais enerģijas patēriņš – 577.0 kWh.

Atjaunojamo resursu pieejamība šajā simulācijā, salīdzinot ar 15. februāri ir lielāka, tāpēc akumulatori pie slodzes minimuma dienas laikā tika uzlādēti un pie cikliskās uzlādes algoritma ģenerators G1 tika ieslēgts vēlāk. Savukārt slodzes sekošanas algoritms ieslēdz G1, sekojot pārejas procesam dēļ slodzes izmaiņām, jau pie pirmā akumulatora izlādes strāvas lēciena punktā 1 (4.15. att.) un darbinā to 30 min, kad pēc 2. algoritma G1 tiek izslēgts, jo slodzes strāvas un no saules un vēja ģeneratoriem pieejamo strāvu starpība pārsniedz G1 nominālo strāvu.



4.14. att. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 21.03.2007. akumulatora cikliskās uzlādes algoritmam

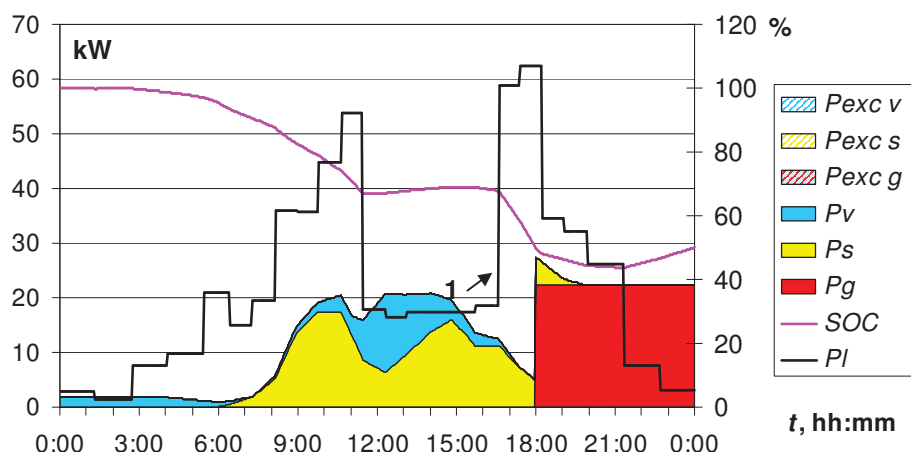


4.15. att. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 21.03.2007. modificētajam slodzes sekošanas algoritmam

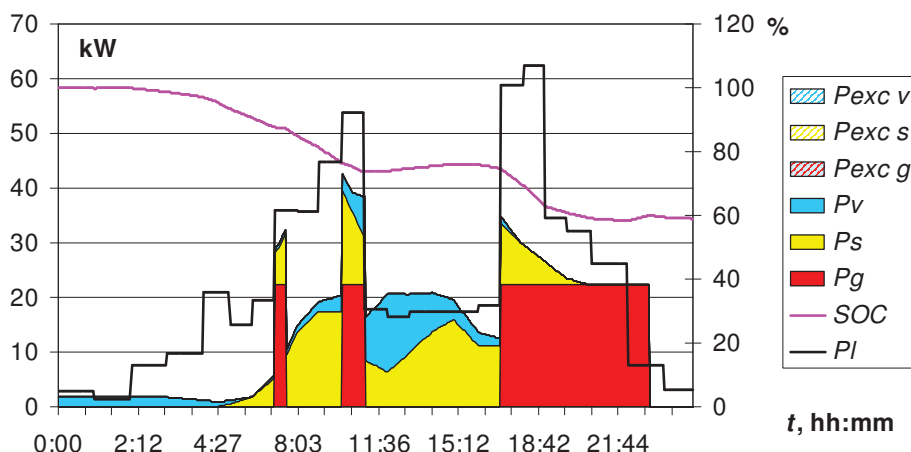
Otra ģenerators ieslēgšana uz 30 min notiek punktā 2, realizējot slodzes sekošanu pie otra slodzes lēciena. Trešā ieslēgšana notiek punktā 3 un G1 tiek darbināts 3 h līdz slodzes samazinājumam, jo samazinājusies atjaunojamo resursu pieejamība.

Sakarā ar slodzes sekošanu pirmajā dienas pusē kopējais ģenerators darbības laiks 2. algoritmam salīdzinājumā ar ciklisko uzlādi ir pieaudzis par 1:30 h, bet degvielas patēriņš – par 16 l. Sekojoši akumulatora beigu uzlādes līmenis 2. algoritmam arī ir pieaudzis: 62.7 % pret 54.8 % pirmajam algoritmam.

30. jūnija simulācijā (skat. 4.16–4.17. att.) abu AVS algoritmu darbība ir līdzīga iepriekšējam periodam. Akumulators dienas laikā tiek lādēts no atjaunojamajiem resursiem, un cikliskās uzlādes algoritms ieslēdz ģenerators tikai otrā slodzes lēciena laikā punktā 1 (4.16. att.). Slodzes sekošanas algoritms savukārt ieslēdz ģenerators elektriskā pārejas procesa laikā jau pirmajā slodzes lēcienā punktā. Rezultātā kopējais G1 darbības laiks 1. algoritmam ir par 1:50 h īsāks, bet degvielas patēriņš samazinās par 18.5 l, atšķirās arī akumulatora beigu uzlādes līmenis: 1. algoritmam – 50.2 %, 2. algoritmam – 59.0 % (skat. 4.2. tabulu). Līdzīgi kā iepriekšējos scenārijos simulācijas laikā tika izmantota visa no atjaunojamajiem resursiem pieejamā jauda.



4.16. att. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 30.06.2007. akumulatora cikliskās uzlādes algoritmam

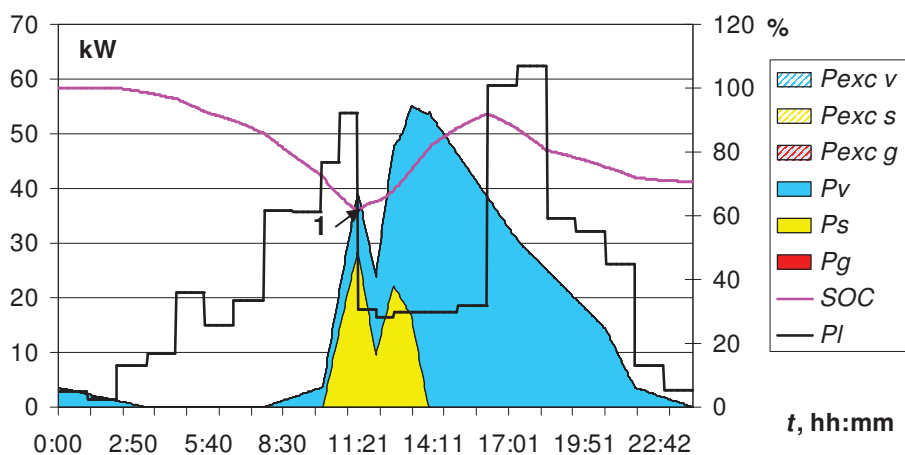


4.17. att. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 30.06.2007. modificētajam slodzes sekošanas algoritmam

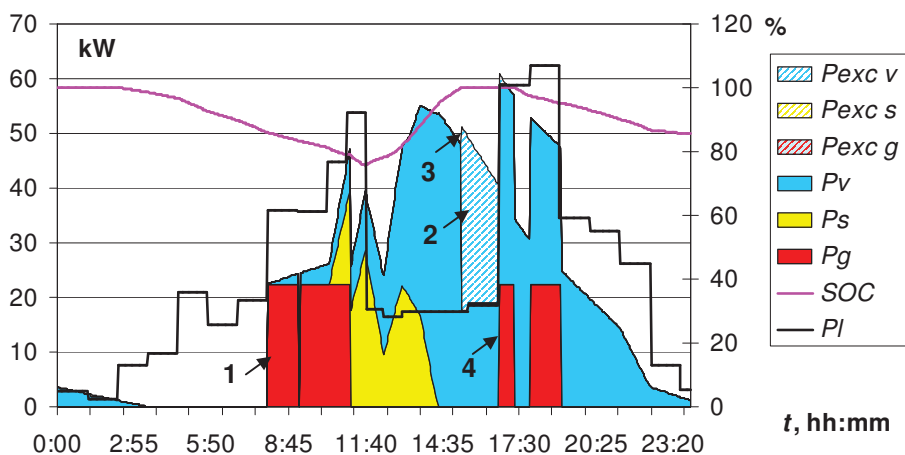
3. novembra simulācija (skat. 4.18–4.19. att.) atšķiras ar to, ka bija palielināts vēja ātrums, salīdzinot ar iepriekš apskatītajām dienām: vidēji  $4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  pie maksimuma  $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  plkst. 15:00. Pie AVS 1. algoritma dienas garumā akumulators neizlādējās zem  $\text{SOC} = 50 \%$ , tāpēc iekšdedzes ģenerators netika ieslēgts. Uzlādes līmeņa minimums  $61.8 \%$  bija pēc slodzes atslēgšanas punktā 1 (4.18. att.). Simulācijās ar cikliskās uzlādes algoritmu tika izmantota visa pieejamā atjaunojamo resursu jauda.

Modificētais slodzes sekošanas algoritms ieslēdz ģeneratoru slodzes sekošanai punktā 1 (4.19. att.) un pirmā slodzes lēciena laikā kompensē akumulatora izlādes strāvu. Slodzes samazināšanās laikā dienas vidū akumulatori uzlādējas no vēja un laika periodā 11:00-17:00 ir pilnībā uzlādēti, kopnes spriegums sasniedz  $136 \text{ V}$ , un 1:12 h garumā no punkta 2 rodas WG<sub>s1</sub> saražotās jaudas pārpalikums. Jāievēro, ka punktā 3, summējot patērēto  $P_V$  un nepatērēto  $P_{excV}$  jaudu ir vēja ģeneratora jaudas līnijas pārrāvums, jo  $P_V$  jaudā jau ir ierēķināti  $10 \%$  zudumu spēka interfeisa iekārtā. Rezultātā 2. algoritma simulācijas laikā kopējā nepatērētā vēja ģeneratoru enerģija bija  $27.4 \text{ kWh}$ . Atbilstoši simulācijas pirmajā grafikā parādās izmantotās jaudas kritums punktā (3-2).

G1 ieslēgšana 16:45 otra slodzes lēciena laikā punktā 4 summāri deva 4:39 h kopējo G1 darbības laiku un  $46.8 \text{ l}$  degvielas patēriņu.



4.18. att. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 03.11.2007. akumulatora cikliskās uzlādes algoritmam



4.19. att. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 03.11.2007. modificētajam slodzes sekošanas algoritmam

No atsevišķu dienu simulācijas analīzes abiem algoritmiem var secināt, ka slodzes sekošanas algoritms kopumā biežāk ieslēdz iekšdedzes ģeneratoru, sekojot slodzes lēcieniem, līdz ar to tiek noturēts stabilāks sistēmas spriegums un akumulatoru uzlādes līmenis. Trūkums ir tas, ka pastāv iespēja nepatērēt elektriskā sistēmā visu pieejamo jaudu no atjaunojamajiem resursiem, kuru tādā gadījumā ir nepieciešams plānot novadīt uz vadāmu slodzi, piemēram, akumulēšanai siltuma veidā karstā ūdens sagatavošanai, ķīmiskā veidā, ražojot ūdeņradi, mehāniski sparnatā vai citā veidā (4.19. att). Efektīvāk slodzes sekošanas algoritms darbojas tieši atjaunojamo resursu nepietiekamības gadījumā, ko var redzēt 15. februāra simulācijā.

4.2. tabula

**HPS2 sistēmas simulācijas rezultātu kopsavilkums atsevišķām dienām**

Lielums	15.02.2007		21.03.2007		30.06.2007		03.11.2007	
	Alg. 1	Alg. 2	Alg. 1	Alg. 2	Alg. 1	Alg. 2	Alg. 1	Alg. 2
Patērētā enerģija, kWh	706.3	706.3	577.0	577.0	577.0	577.0	577.0	577.0
Enerģija no PV1, kWh	51.5	51.5	115.6	115.6	145.1	145.1	91.3	91.3
Enerģija no WGsl, kWh	27.9	27.9	158.2	158.2	60.7	60.7	340.2	309.6



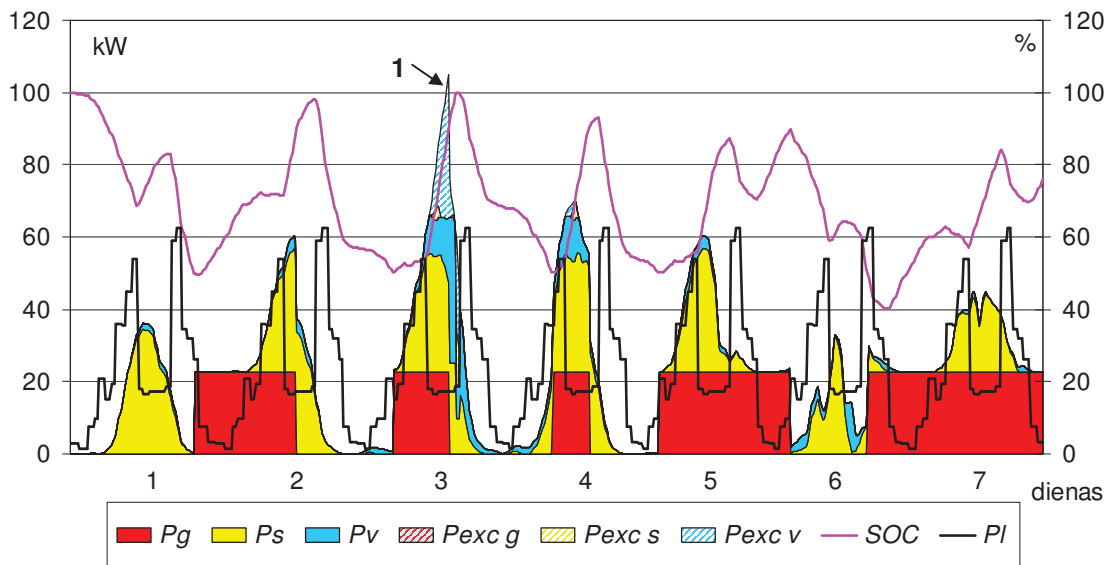
## 4.2. tabulas nobeigums

Lielums	15.02.2007		21.03.2007		30.06.2007		03.11.2007	
	Alg. 1	Alg. 2	Alg. 1	Alg. 2	Alg. 1	Alg. 2	Alg. 1	Alg. 2
Enerģija no G1, kWh	300.3	248.9	77.9	114.4	118.4	159.7	0.0	104.6
Generators kopējais darbības laiks, hh:mm	13:19	11:03	03:27	05:04	05:15	07:06	00:00	04:39
Patērētā degviela, l	134.2	111.3	34.8	51.1	52.9	71.4	0.0	46.8
Neiztērētā PV1 enerģija, kWh	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Neiztērētā WGs1 enerģija, kWh	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.5
Neiztērētā G1 enerģija, kWh	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Akumulatora sākuma uzlādes līmenis, %	100.0							
Akumulatora beigu uzlādes līmenis, %	35.4	25.9	54.8	62.7	50.2	59.0	70.5	85.7

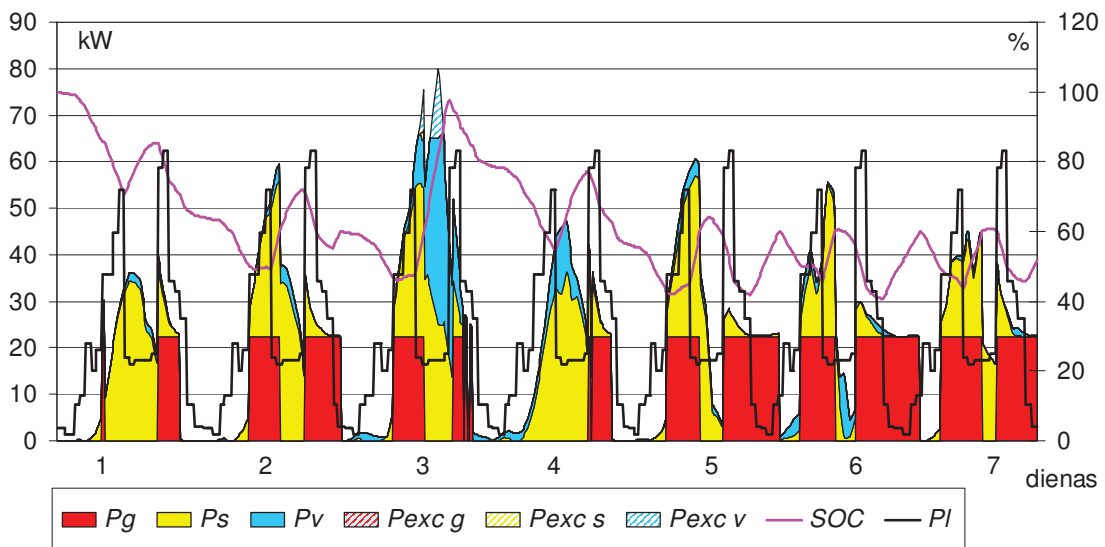
Cikliskās uzlādes algoritma pilnīgākai darbības novērtēšanai ir nepieciešams veikt simulāciju vairāku uzlādes un izlādes ciklu garumā. Simulācijas rezultāti nedēļas griezumā 21-27. maijā parādīti 4.20. att. (cikliskās uzlādes algoritmam) un 4.21. att. (slodzes sekošanai). Pirmā algoritma grafikā ir izteikta cikliska akumulatora darbība. Apskatītajā periodā saules enerģijas daudzums ir tuvu maksimumam: dienā vidēji  $6.6 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$  optimālā novietojuma panelim. Salīdzinoši zema ir vēja resursu pieejamība – vidējais vēja ātrums ir  $2.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , taču 3. dienā ir vērojams maksimums  $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ar vidējo vērtību dienā  $3.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Maksimuma laikā akumulators bija praktiski uzlādēts no G1 un PV1, līdz ar to vēja ātruma lēciena rezultātā šajā punktā netiek patērēta atjaunojamo resursu enerģija. Neizmantotās jaudas maksimums 1. punktā (4.20. att.)  $P_{exc \text{ v.}} = 39.7 \text{ kW}$  (67 % no pieejamās WGs1 elektriskās jaudas šajā momentā). Jaudas pārpalikums radās dēļ samazinātās slodzes un akumulatora uzlādes strāvas ierobežojuma  $I_{chmax} = 400 \text{ A}$ , bet kopnes spriegums tiek ierobežots līdz 136 V.

Slodzes sekošanas algoritma darbības rezultātā šim pašam periodam akumulatora darbības cikliskums parādās tikai robežās  $SOC = 40..60 \%$ , kad G1 tiek darbināts, lai pasargātu akumulatoru no pārāk dziļas izlādes. Visu pārējo laiku iekšdedzes ģenerators tiek izmantots tikai slodzes kompensēšanai, kad pietrūkst atjaunojamo resursu jaudas. Līdz ar to paaugstinās ģenerators ieslēgšanas frekvence. Abiem algoritmiem lielāko daļu laika  $SOC$  cikliski mainās ap vidējo vērtību, rezultātā datiem veidojas normālais sadalījums, tāpēc tika piemēroti statistiskie parametriskie testi  $SOC$  vidējo vērtību un dispersiju salīdzināšanai. 1. algoritmam vidējā  $\overline{SOC} = 68.7 \%$ , standartnovirze  $\sigma = 14.5 \%$ , 2. algoritmam akumulatora  $\overline{SOC} = 61.7 \%$ , standartnovirze  $\sigma = 14.4 \%$ . Pēc Stjudenta t-testa 1. algoritmam vidējā  $\overline{SOC}$  ar 99 % ticamību ir būtiski lielāka nekā slodzes sekošanas algoritmam. Līdz ar to var pieņemt, ka 2. algoritmā pazeminātas atjaunojamo resursu pieejamības gadījumā palielināsies varbūtība resursu pieejamības lēcieni sakrišanai ar zemāku akumulatora uzlādes līmeni, un pieejamie atjaunojamie resursi tiks iztērēti pilnīgāk. Tas arī apstiprinās abu algoritmu simulācijās: nepatērētās enerģijas daudzumi 2. algoritmam samazinās 18.7 kWh (nepatērētā saules enerģija), 78.8 kWh (vēja enerģija), G1 jauda tika izmantota pilnībā visā simulācijas garumā (skat.

4.3. tabulu). Sakarā ar zemāku vidējo akumulatora uzlādes līmeni 2. algoritma darbības laikā par 10 h samazinājās iekšdedzes ģenerators kopējais darbības laiks, degvielas ietaupījums: 103.5 l. Kopumā iekšdedzes ģenerators pēc 1. algoritma darbojās 52 % no visa simulācijas laika, bet pēc 2. algoritma – 46 %.



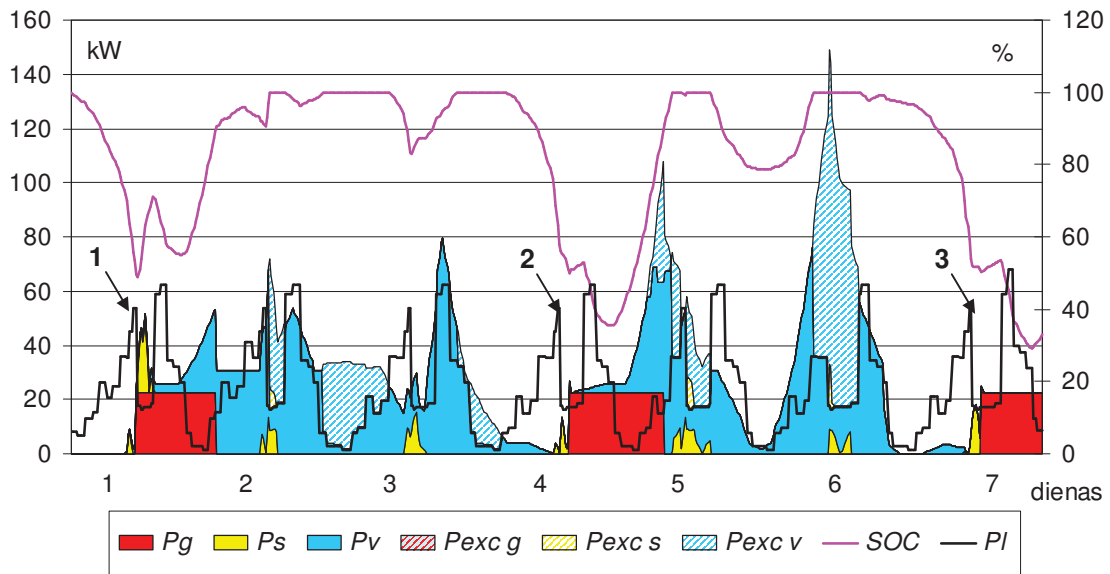
4.20. att. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 21.05.2007. – 27.05.2007. akumulatora cikliskās uzlādes algoritmam



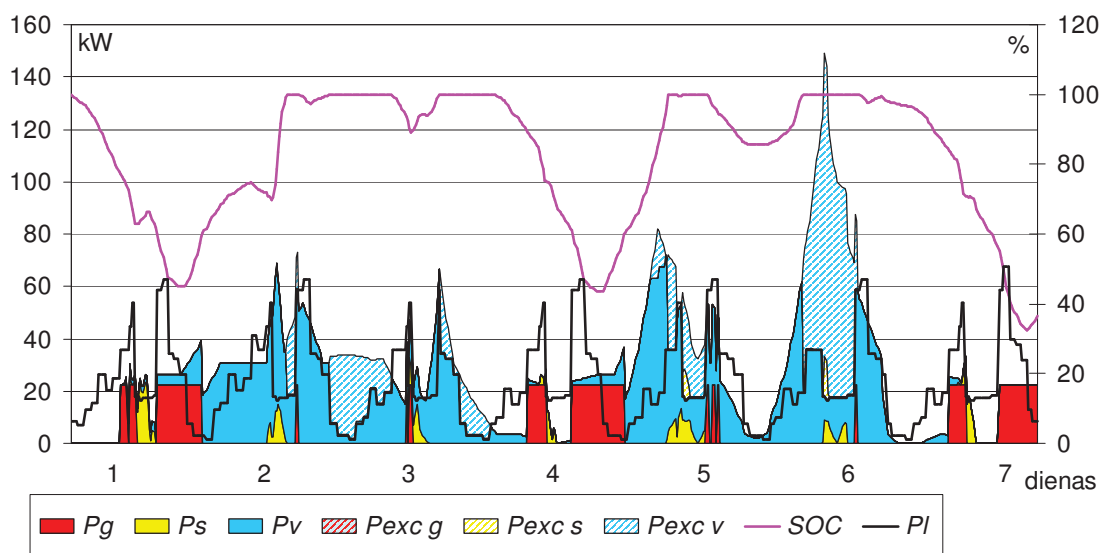
4.21. att. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 21.05.2007. – 27.05.2007. modificētajam slodzes sekošanas algoritmam

Simulācijas rezultāti 5-11. novembrim parādīti 4.22. att. (cikliskās uzlādes algoritmam) un 4.23. att. (slodzes sekošanai). Palielinātās vēja resursu pieejamības ietekmē pēc cikliskās uzlādes algoritma iekšdedzes ģenerators darbojās tikai 26 % no kopējā simulācijas laika, ieslēdzoties trīs punktos, kur sakrita atjaunojamo resursu pieejamības kritumi un slodzes lēcieni (1, 2, 3, skat. 4.22. att.), bet 63 % no kopējā laika akumulatora SOC bija augstāks par 80 %. Slodzes sekošanas algoritmam šīs daļas ir attiecīgi 23 % un 55 %. Pie tam līdzīgi kā iepriekš apskatītajās simulācijās G1 ieslēgšana sakrita ar slodzes strāvas lēcieniem. SOC varbūtību sadalījums nav normāls un ir izteikti asimetrisks, un vidējais aritmētiskais un parametriskie testi vidējo un

dispersijas salīdzināšanai nav piemērojami, taču tā kā abās simulācijās lielāko daļu laika akumulators bija gandrīz pilnībā uzlādējies no atjaunojamajiem resursiem, grafiski SOC līknes izmaiņas atkārtojas. No tā var secināt, ka pietiekamas atjaunojamo resursu pieejamības apstākļos atšķirība abu algoritmu darbībā samazinās. Līdzīgi 21-27. maija simulācijai 2. algoritmam samazinājās kopējais iekšdedzes ģenerators darbības laiks un nepatērētā atjaunojamo resursu enerģija: 10.5 kWh (nepatērētā saules enerģija), 71.0 kWh (vēja enerģija) (skat. 4.3. tabulu). Simulācijas grafikā var uzskatāmi redzēt, ka pie abiem algoritmiem 6. dienā ir vēja enerģijas pārpalikums, bet 7. ir radies atjaunojamo resursu iztrūkums, kā dēļ ir jādarbina dīzeļģenerators un strauji krītas akumulatora SOC.



4.22. att. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 05.11.2007. – 11.11.2007. akumulatora cikliskās uzlādes algoritmam



4.23. att. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti 05.11.2007. – 11.11.2007. modificētajam slodzes sekošanas algoritmam

Ir jāatzīmē, ka HPS2 modelī izmantotais 25 kW ģenerators ir ar vairāk nekā 2 reizes mazāku jaudu nekā maksimālā elektriskā slodze (61.6 kW), tomēr maija un

novembra nedēļu simulācijās var redzēt, ka pie dažādiem atjaunojamo resursu pieejamības līmeņiem akumulatora SOC nenokritās zem 30 %.

4.3. tabula

### HPS2 sistēmas nedēļas simulācijas rezultātu kopsavilkums

Lielums	21.05.2007. – 27.05.2007.		05.11.2007. – 11.11.2007.	
	Alg. 1	Alg. 2	Alg. 1	Alg. 2
Patērētā enerģija, kWh	4038.7	4038.7	4140.6	4140.6
Enerģija no PV1, kWh	1661.0	1677.8	327.9	337.3
Enerģija no WG1, kWh	355.1	426.1	2562.2	2626.1
Enerģija no G1, kWh	1952.9	1721.4	963.0	889.3
Ģenerators kopējais darbības laiks, hh:mm	86:48	76:51	43:07	39:18
Patērētā degviela, l	872.8	769.4	430.4	397.4
Neiztērētā PV1 enerģija, kWh	19.9	1.2	52.9	42.4
Neiztērētā WG1 enerģija, kWh	99.9	21.1	1436.3	1365.4
Neiztērētā G1 enerģija, kWh	0.0	0.0	0.0	0.0
Akumulatora sākuma uzlādes līmenis, %	100.0			
Akumulatora beigu uzlādes līmenis, %	76.3	52.3	33.5	36.5

### Nodaļas kopsavilkums un secinājumi

1. Teorētiskajā daļā izstrādātā modelēšanas pieeja izmantota liellopu fermas, kura projektētai 530 govīm, autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas simulācijai un enerģijas plūsmas vadības algoritmu novērtēšanai. Maksimālā vienlaicīgā elektrisko slodze pēc diennakts patēriņa grafika ir aprēķināta 61.6 kW, bet mēneša elektroenerģijas patēriņš ir 4140 kWh. Optimālais kombinētās sistēmas variants ir atrasts programmā HOMER. Elektroenerģijas avoti ir divi 100 kW vēja ģeneratori, 40 kW saules bateriju masīvs un 25 kW iekšdedzes ģenerators. Iekārtu apvienošanai izmantota 120 V centrālā līdzstrāvas kopne ar tieši pieslēgtu 4000 Ah dziļizlādes svina-skābes akumulatoru bateriju.
2. Ir veiktas nedēļu ilgas sistēmas darbības simulācijas pie dažādiem atjaunojamo resursu pieejamības scenārijiem un enerģijas plūsmas vadības algoritmiem. Simulācijas ieejā atjaunojamo resursu pieejamības noteikšanai izmantoti reāli meteoroloģiskie dati 2007. gadā Dobelē Apstiprinājās, ka izvēlētā autonomās elektroapgādes sistēmas konfigurācija ir atbilstoša slodzei, akumulatoru uzlādes līmenis nenokritās zem 30 %.
3. Modeļa darbības ātrums attiecībā pret reāllaiku atkarībā no pārejas procesu daudzuma un intensitātes vidēji ir 150:1.

4. Sistēmas darbības simulācija parādīja, ka gan pie dīzeļģeneratora ieslēgšanas pēc cikliskās akumulatora uzlādes algoritma, gan pie slodzes sekošanas netiek pilnībā patērēta visa pieejamā atjaunojamo resursu enerģija. Cikliskās uzlādes algoritmam tie ir 20 kWh saulei un 100 kWh nedēļas simulācijai maijā ar maksimālu saules starojuma jaudu un 52.9 kWh saulei un 1436 kWh vējam pie vēja ātruma lēcieniem novembrī. Tas apstiprināja pieņēmumu par iespējamo neregulāri pieejamo atjaunojamo resursu zemo izmantošanas efektivitāti pie mainīgas slodzes. Pie tam nākamajās dienās samazinās atjaunojamo resursu pieejamība, tāpēc tiek izmantots dīzeļģenerators un akumulatoros uzkrātā enerģija.
5. Simulācija parāda, ka pie neregulāras vēja pieejamības novembrī abiem apskatītajiem algoritmiem 6. dienā ir vēja enerģijas pārpalikums, bet 7. ir radies atjaunojamo resursu iztrūkums, kā dēļ ir jādarbina dīzeļģenerators un krītas akumulatora uzlādes līmenis.
6. Neiztērētās enerģijas daudzumu var samazināt modificējot enerģijas vadības plūsmas algoritmus. Simulācijas rezultātos noskaidrots, ka, nomainot akumulatora cikliskās uzlādes algoritmu uz slodzes sekošanu, var panākt labāku atjaunojamo resursu apguvi un līdz ar to samazināt fosilās degvielas patēriņu: nedēļas periodā par 12 % saulainā laikā maijā un par 7 % vējainā laikā novembrī.
7. Eksperimenti ar līdzstrāvas kopnes fizikālo modeli un aprobācija simulācijā ar liellopu fermas autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas piemēru parāda, ka izstrādātā modelēšanas metodika un imitāciju modeļu kopa dod iespēju novērtēt un pilnveidot mikro mēroga kombinēto elektroapgādes sistēmu vadības algoritmu darbību funkcionāli kontrolētā virtuālās simulācijas vidē un ar fizikāliem modeļiem.

## SECINĀJUMI

1. Alternatīvo atjaunojamo enerģijas avotu kombinētā lietošana un optimāla enerģijas plūsmas sadale starp elektroenerģijas ražošanas un uzkrāšanas iekārtām un patērētāju var kompensēt pieaugošo elektroenerģijas patēriņu lauksaimniecības objektu energoapgādē un mazināt energoatkarību.
2. Izmantojot darbā izstrādāto modelēšanas metodiku konkrēta lauksaimniecības objekta kombinētās autonomās elektroapgādes sistēmas simulācijā, var secināt, ka literatūrā piedāvātās enerģijas plūsmas vadības stratēģijas, kuras izmanto slodzes atgriezenisko saiti, meteoroloģiskās prognozes atjaunojamo resursu ģeneratoru pieejamās jaudas paredzēšanu, intelektuālo aģentu pieeju utt., var uzlabot atjaunojamo resursu apguvi un samazināt neefektīvu fosilo resursu ģeneratoru darbināšanas laiku un uzkrājēju izmantošanu.
3. Galvenā priekšrocība atsevišķu vadības kontūra daļu modelēšanai kompleksa un segmentu līmeņa kombinētās elektroapgādes vadības sistēmu novērtēšanā un pilnveidošanā, salīdzinot ar pašlaik pieejamām simulācijas vidēm, ir iespēja brīvi veidot un modificēt vadības algoritmus standarta augsta līmeņa programmēšanas valodās. Tas dod iespēju izmantot modeļu vadītu arhitektūru programmatūras izstrādē un ar minimālām izmaiņām implementēt vadības programmu gala iekārtā.
4. Darbā piedāvāto vadības iekārtas programmatūras Microsoft .NET vadības sistēmas objektu modeļi var realizēt arī citās virtuālajās izpildes vidēs (Java, Mono) un objektorientētās programmēšanas valodās. Iekārtu imitāciju modeļu izstrādē nav izmantotas Matlab Simulink specifiskas komponentes, līdz ar to modeļi ir realizējami arī alternatīvās dinamiskās modelēšanas vidēs.
5. Segmentu līmeņa vadības sistēmas modeļa darbība reāllaikā demonstrēta, regulējot līdzstrāvas kopnes spriegumu, izmantojot spēka interfeisu fizikālos modeļus ar diskretizācijas periodu 50 ms, kas ir pietiekams, lai noturētu stabilu spriegumu līdzstrāvas kopnē ar mainīgu slodzi un kopnē tieši ieslēgtu kondensatoru vai akumulatoru.
6. Izstrādāti un eksperimentāli validēti galveno izpildiekārtu imitāciju modeļi, kas dod iespēju izmantot tos kombinēto sistēmu virtuālajās simulācijās: mazjaudas ottomatora piedziņas ģeneratoriem – lineārais modelis ar koeficientu ticamību 95 %, saules baterijai – matemātiskais modelis (ar precizitāti 1.5 % robežās), svina-skābes akumulatoram – matemātiskais modelis ar konstantu iekšējo pretestību (precizitāte 1.7 % no nominālā sprieguma vidējā uzlādes/izlādes raksturlīknes posmā).
7. Pētījumu rezultāti, kuri iegūti, veicot vadības iekārtas un sistēmas simulāciju MPS “Vecauce” tipa liellopu fermas autonomai elektroapgādei ar 200 kW vēja staciju, 40 kW saules baterijām, 25 kW dīzeļģeneratora un 120 V 4000 Ah akumulatoru, parāda, ka, salīdzinot ar cikliskās uzlādes algoritmu, pilnīgāk atjaunojamie resursi tiek izmantoti pie slodzes sekošanas: par 81 % saulainā laikā maijā un par 5 % vējainā laikā novembrī. Pie tam samazinās arī dīzeļdegvielas patēriņš par 12 % nedēļas periodā maijā un par 8 % novembrī.
8. Darba ietvaros izstrādātās modeļu kopas simulācijas ātrums attiecībā pret reālo laiku atkarībā no vadības objekta pārejas procesu daudzuma un intensitātes ir vidēji 150:1. Simulācijas ātrumu var palielināt, izmantojot dinamisko Simulink modeļi kompilētas bibliotēkas veidā.

## INFORMĀCIJAS AVOTI

1. Agostini M.N., Decker I.C., Silva A.S. (2007) A new approach for the design of electric power system software using object oriented modeling. *Electrical Power and Energy Systems*, No. 29, pp. 505-513.
2. Agrawal A., Wies R., Johnson R. (2007) *Hybrid Electric Power Systems: Modelling, Optimization and Control*. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller, 2007. 196 p.
3. Amadora J., Dominguez J. (2006) Spatial analysis methodology applied to rural electrification. *Renewable Energy*, No. 31, pp. 1505-1520.
4. *Approximate Diesel Fuel Consumption Chart*. (2010) [online] Diesel Service & Supply [cited 23.10.2010.]. Available: [http://www.dieselserviceandsupply.com/diesel\\_fuel\\_consumption.aspx](http://www.dieselserviceandsupply.com/diesel_fuel_consumption.aspx).
5. Asharia M., Nayara C., Keerthipalaa W. (2001) Optimum operation strategy and economic analysis of a photovoltaic-diesel-battery-mains hybrid uninterruptible power supply. *Renewable Energy*, No. 22, pp. 247-254.
6. Awerbuch S., Preston A. (1997) *The virtual utility: Accounting, technology & competitive aspects of the emerging industry*. Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1997. 432 p.
7. Barley C., Winn C., Flowers L., Green H. (1995) Optimal control of remote hybrid power systems. Part I: simplified model. **In:** *25. annual conference and exhibition on wind power, Washington*.
8. Barley C.D., Winn C.B., Flowers L., Green H.J. (1996) Optimal dispatch strategy in remote hybrid power systems. *Solar Energy*, No. 58, pp. 165-179.
9. *Battery. Implement generic battery model*. (2011) [online] Mathworks Inc. [cited 23.10.2011]. Available: <http://www.mathworks.se/help/toolbox/phymod/powersys/ref/battery.html>.
10. Bayod-Rujula A.A. (2009) Future development of the electricity systems with distributed generation. *Energy*, No. 34, pp. 377-383.
11. Bernal-Agustin J.L., Dufo-Lopez R. (2009) Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 13(8), pp. 2111-2118.
12. *Best research-cell efficiencies*. (S.a.) [online] NREL [cited 03.08.2010.]. Available: [http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg).
13. Bolund B., Bernhoff H., Leijon M. (2007) Flywheel energy and power storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 11, pp. 235-258.
14. Bouscayrol A., Guillaud X., Teodorescu R., Delarue P., Lhomme W. (2006) Hardware-in-the-loop simulation of different wind turbines using Energetic Macroscopic Representation. **In:** *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006*, Paris, France. pp. 5338 - 5343.
15. Breusch T., Pagan A. (1979) A Simple Test for Heteroscedasticity and Random Coefficient Variation. *Econometrica*, No. 47, pp. 1287-1294.
16. Burke A. (2000) Ultracapacitors: why, how, and where is the technology. *Journal of Power Sources*, No. 91, pp. 37-50.
17. Celik A.N. (2002) Optimisation and techno-economic analysis of autonomous photovoltaic-wind hybrid energy systems in comparison to single photovoltaic and wind systems. *Energy Conversion and Management*, No. 43, pp. 2453-2468.
18. Chakraborty S., Kramer B., Kroposki B. (2009) A review of power electronics interfaces for distributed energy systems towards achieving low-cost modular

- design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 13/9, pp. 2323-2335.
19. Cheng C.-H., Cheng P.-J., Xie M.-J. (2010) Current sharing of paralleled DC–DC converters using GA-based PID controllers. *Expert Systems with Applications*, No. 32, pp. 733–740.
  20. Chicco G., Mancarella P. (2009) Distributed multi-generation: A comprehensive view. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 13, pp. 535-551.
  21. Chu C.-C., Chen C.-L. (2009) Robust maximum power point tracking method for photovoltaic cells: A sliding mode control approach. *Solar Energy*, No. 83, pp. 1370–1378.
  22. Dam K.H., Houwing M., Lukszo Z., Bouwmans I. (2008) Agent-based control of distributed electricity generation with micro combined heat and power—Cross-sectoral learning for process and infrastructure engineers. *Computers and Chemical Engineering*, No. 32, pp. 205-217.
  23. *Datatables15 2004*. (2004) [online] Commission internationale de l'éclairage [cited 09.09.2011.]. Available: [http://www.cie.co.at/publ/abst/datatables15\\_2004/y2.txt](http://www.cie.co.at/publ/abst/datatables15_2004/y2.txt).
  24. Dickens M. *Faster Prototyping, Simulation*. (2005) [cited 16.10.2011.]. Available: [http://www.controleng.com/index.php?id=483&cHash=081010&tx\\_ttnews\[tt\\_news\]=6314](http://www.controleng.com/index.php?id=483&cHash=081010&tx_ttnews[tt_news]=6314).
  25. Douglass B.P. (2007) *Real-Time UML Workshop for Embedded Systems*. Burlington, USA: Elsevier, 2007. 408 p.
  26. Dounis A., Caraiscos C. (2009) Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 13, pp. 1246-1261.
  27. Dugan R., Thomas S., Rizey D. (1984) Integrating dispersed storage and generation (DSG) with an automated distribution system. *IEEE Trans Power Apparatus Syst*, No. 103(6), pp. 1142–1146.
  28. Durbin J., Watson G. (1971) Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression III. *Biometrika*, No. 58, pp. 1–19.
  29. *Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva 2004/8/EK par tādas koģenerācijas veicināšanu, kas balstīta uz lietderīgā siltuma pieprasījumu iekšējā enerģijas tirgū, un ar kuru groza Direktīvu 92/42/EEK*. (2004) [tiešsaiste] Eiropas Parlaments [skatīts 05.03.2009.]. Pieejams: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32004L0008:LV:NOT>.
  30. Ekren B.Y., Ekren O. (2009) Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions. *Applied Energy*, No. 86, pp. 1387-1394.
  31. Fakham H., Lu D., Francois B. (2011) Power Control Design of a battery charger in a Hybrid Active PV generator for loadfollowing applications. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, No. 58(1), pp. 85-94.
  32. Galiņš A., Kanceviča L., Laizāns A. (2008) *Alternatīvās enerģētikas iekārtas*. Jelgava: LLU, Tehniskā fakultāte, 2008. 316 lpp.
  33. Galiņš A., Leščevics P. (2004) Pastāvīgās ierosmes sinhronās mašīnas izmantošana alternatīvās enerģijas iekārtās. **In:** *Starptautiskās zinātniskās konferences "Modernas tehnoloģijas enerģijas ieguvei un efektīvai izmantošanai" rakstu krājums*, 28.-29. jūnijs. 67-71 lpp.
  34. Georgilakis P.S., Katsigiannis Y.A. (2009) Reliability and economic evaluation of small autonomous power systems containing only renewable energy sources. *Renewable Energy*, No. 34, 65-70.
  35. *Glossary of Environmental Terms*. (2007) [online] NRDC [cited 20.09.2009.].



- Available: <http://www.nrdc.org/reference/glossary/a.asp>.
36. Gomez M. *Hardware-in-the-Loop Simulation, Embedded System Design*. (2001) [cited 20.09.2009.]. Available: <http://www.embedded.com/showArticle.jhtml?articleID=15201692>.
  37. González-Longatt F.M. (2005) Model of Photovoltaic Module in Matlab. **In:** *2Do Congreso Iberoamericano De Estudiantes De Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación (Ii Cibelec 2005)*.
  38. Green T., Prodanovic M. (2007) Control of inverter-based micro-grids. *Control of inverter-based micro-grids*, No. 77, 1204-1213.
  39. Hadjipaschalis I., Poullikkas A., Efthimiou V. (2009) Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 13, pp. 1513-1522.
  40. Hatziargyrio N., Jenkins N., Strbac G., Lopes J.P., Ruela J., Engler A., Oyarzabal J., Kariniotakis G., Amorim A. (2006) Microgrids - Large Scale Integration of Microgeneration to Low Voltage Grids. **In:** *21, rue d'Artois, F-75008 PARIS, CIGRE 2006*.
  41. Hawkes A., Leach M. (2009) Modelling high level system design and unit commitment for a microgrid. *Applied Energy*, No. 86, pp. 1253-1265.
  42. Huang Y., Tse C.K. (2007) Circuit Theoretic Classification of Parallel Connected DC-DC Converters. *IEEE transactions on circuits and systems—I: regular papers*, No. 54, pp. 1099-1108.
  43. Huang Y., Wu J. (2007) Technological system and renewable energy policy: a case study of solar photovoltaic in Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 11, pp. 345–356.
  44. *Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system*. (1999) CIGRE working group 37-23. : CIGRE, 1999.
  45. Iqbal M.T. (2003) Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system. *Renewable Energy*, No. 28, pp. 223-237.
  46. Irving B.T., Jovanović M.M. (2000) Analysis, design, and performance evaluation of droop current-sharing method. **In:** *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000*.
  47. Jarque C., Bera A. (1980) Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals. *Econometric Letters*, No. 6, pp. 255-259.
  48. Jesko Ž. (2007) *Saules starojuma jaudas pētījumi kolektoru konstrukciju attīstīšanai: zinātniskais darbs maģistra grāda ieguvei*. Latvijas Lauksaimniecības universitātes Mehānikas institūts. zin. vad. I. Ziemeļis. Jelgava. 88 lpp.
  49. Jiang J.-A., Huang T.-L., Hsiao Y.-T., Chen C.-H. (2005) Maximum Power Tracking for Photovoltaic Power Systems. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, No. 8, 2, pp. 147-153.
  50. Jiayi H., Chuanwen J., Rong X. (2008) A review on distributed energy resources and MicroGrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 12, pp. 2472-2483.
  51. Karlsson P., Svensson J. (2003) Voltage Control and Load Sharing in DC Distribution Systems. **In:** *EPE 2003*, September 2-4, Toulouse, France.
  52. Kaundinya D.P., Balachandra P., Ravindranath N. (2009) Grid-connected versus stand-alone energy systems for decentralized power—A review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 13, pp. 2041-2050.
  53. Khan M.J., Iqbal M.T. (2009) Analysis of a small wind-hydrogen stand-alone hybrid energy system. *Applied Energy*, No. 86, pp. 2429-2442.

54. Kirkham H., Nightingale D., Koerner T. (1981) Energy management system design with dispersed storage and generation. *IEEE Trans Power Apparatus Syst*, No. 100(7), pp. 3432-3440.
55. Kirubakaran A., Jain S., Nema R. (2009) A review on fuel cell technologies and power electronic interface. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 13, pp. 2430–2440.
56. Klemen M.A. *Perfect turbine performance*. (2001) [cited 08.05.2007]. Available: [http://www.ndsu.nodak.edu/ndsu/klemen/Perfect\\_Turbine.htm](http://www.ndsu.nodak.edu/ndsu/klemen/Perfect_Turbine.htm).
57. Koutroulis E., Kalaitzakis K. (2006) Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications. *IEEE Transactions on industrial electronics*, No. 53, pp. 486-494.
58. Lagorse J., Paire D., Miraoui A. (2010) A multi-agent system for energy management of distributed power sources. *Renewable Energy*, No. 35(1), pp. 174–182.
59. Lambert T., Gilman P., Lilienthal P. (2006) *Micropower system modeling with HOMER, Integration of Alternative Sources of Energy*. Published Online: John Wiley & Sons, Inc, 2006. pp. 379-418
60. *Latvijas enerģētika skaitļos*. (2009) [tiešsaiste] Latvijas Republikas Ekonomikas ministrija [skatīts 05.10.2010.]. Pieejams: [http://www.em.gov.lv/images/modules/items/les\\_2009\\_.pdf](http://www.em.gov.lv/images/modules/items/les_2009_.pdf).
61. *Latvijas ilgtspējīgas attīstības stratēģija līdz 2030. gadam*. (2010) [tiešsaiste] Latvijas Republikas Saeima [skatīts 23.10.2011.]. Pieejams: [http://www.nap.lv/upload/latvija2030\\_lv.pdf](http://www.nap.lv/upload/latvija2030_lv.pdf).
62. *Latvijas vēja enerģijas rokasgrāmata*. (2001) [tiešsaiste] Phare [skatīts 01.10.2010]. Pieejams: [http://www.windenergy.lv/DOC/wind\\_energy\\_lv\\_final.pdf](http://www.windenergy.lv/DOC/wind_energy_lv_final.pdf).
63. Ledin J.A. (1999) Hardware-in-the-Loop Simulation. *Embedded Systems Programming*, No. 2, pp. 42-60.
64. Lilienthal P., Lambert T., Gilman P. (2004) Computer Modeling of Renewable Power Systems. *Encyclopedia of Energy*, pp. 633–647.
65. Lopes J.P., Hatziargyriou N., Mutale J., Djapic P., Jenkins N. (2007) Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities. *Electric Power Systems Research*, No. 77, pp. 1189-1203.
66. Lu B., Wu X., Figueroa H., Monti A. (2007) A Low-Cost Real-Time Hardware-in-the-Loop Testing Approach of Power Electronics Controls. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, No. 54, pp. 919-931.
67. Manwell J.F., Rogers A., Hayman G., Avelar C.T., McGowan J.G., Abdulwahid U., Wu K. *HYBRID2 - a hybrid system simulation model*. (2006) [online] Renewable Energy Research Laboratory, University of Massachusetts [cited 22.03.2007.]. Available: [http://www.ceere.org/rerl/projects/software/hybrid2/Hy2\\_theory\\_manual.pdf](http://www.ceere.org/rerl/projects/software/hybrid2/Hy2_theory_manual.pdf).
68. Markvart T., L.C. (2005) *Solar Cells. Materials, Manufacture and Operation*: Elsevier, 2005. 556 p.
69. Mauri M. (2009) *Hardware in the Loop Simulation of Renewable Distributed Generation Systems*. *Renewable energy*. : InTech, 2009. pp. 133-152
70. Mroź T.M. (2006) Thermodynamic and economic performance of the LiBr–H<sub>2</sub>O single stage absorption water chiller. *Applied Thermal Engineering*, No. 26, pp. 2103–2109.
71. Nfah E., Ngundam J., Tchinda R. (2007) Modelling of solar/diesel/battery hybrid power systems for far-north Cameroon. *Renewable Energy*, No. 32, pp. 832–844.

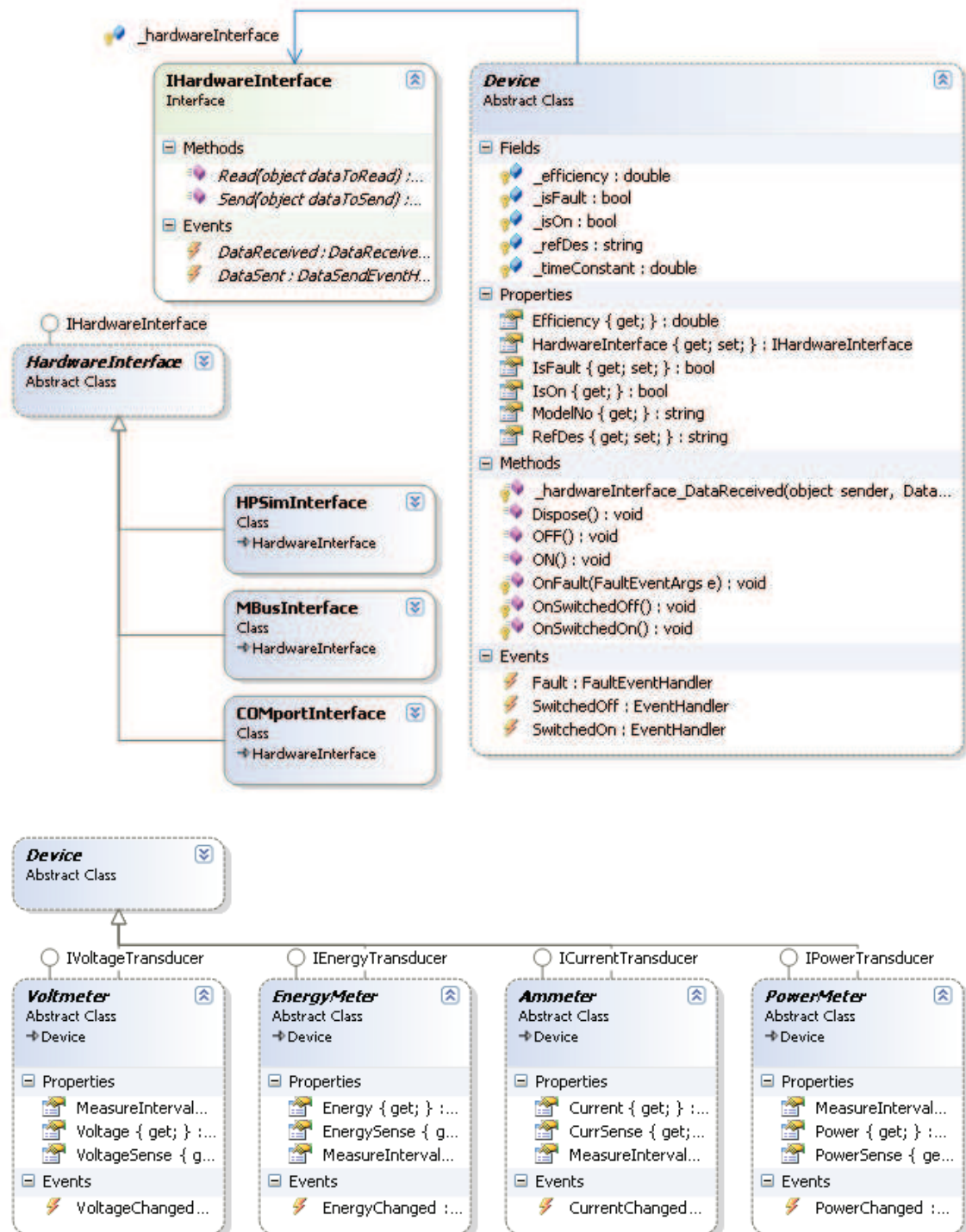
72. Noroozian R., Abedi M., Gharehpetian G., Hosseini S. (2009) Combined operation of DC isolated distribution and PV systems for supplying unbalanced AC loads. *Renewable Energy*, No. 34, pp. 899-908.
73. Noroozian R., Abedi M., Gharehpetian G., Hosseini S. (2010) Distributed resources and DC distribution system combination for high power quality. *Electrical Power and Energy Systems*, No. 32, pp. 769-781.
74. Omari O., Ortjohann E., Saiju R., Hamsich N., Morton D. (2003) A Simulation Model for Expandable Hybrid Power Systems. **In:** *2nd European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference*, September 25–26, Kassel, Germany.
75. Onar O.C., Uzunoglu M., Alam M.S. (2008) Modeling, control and simulation of an autonomous wind turbine/photovoltaic/fuel cell/ultra-capacitor hybrid power system. *Journal of Power Sources*, No. 185, pp. 1273-1283.
76. Ortjohann E., Mohd A., Schmelter A., Hamsic N., Lingemann M. (2007) Simulation and Implementation of an Expandable Hybrid Power System. **In:** *Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on*, 4-7 June 2007. pp. 377-382.
77. Osadcuks V., Pecka A., Lojans A. (2011) Hardware and software environment for evaluation of control algorithms and strategies of hybrid power systems. **In:** *10th International Scientific Conference "Engeneering for rural development"*, May 26-27, Jelgava, Latvia. pp. 311-316.
78. Osadčuks V., Galiņš A., Šmigins R. (2008) Modernization of a combustion engine test bench. **In:** *7th International Scientific Conference "Engeneering for rural development"*. pp. 103-107.
79. Osadčuks V., Galiņš A. (2007) Application of the object oriented approach in the research of autonomous power supply systems. **In:** *6th International Scientific Conference "Engeneering for rural development"*, May 24-25, Jelgava, Latvia. pp. 64-69.
80. Osadčuks V., Galiņš A. (2009) Review of industrial communication networks in the control of small-scale autonomous power supply systems. **In:** *Research for rural development 2009*. pp. 332-337.
81. Osadčuks V., Galiņš A. (2010) GIS based evaluation of renewable energy sources for small-scale electrical power grids. **In:** *Proceedings of the IEEESE-5*.
82. Osadčuks V. (2007) *Autonoma patērētāja elektroenerģijas plūsmas vadības sistēmas izstrāde un analīze: zinātniskais darbs maģistra grāda ieguvei*. Latvijas Lauksaimniecības universitātes Informācijas Tehnoloģiju fakultāte. zin. vad. A. Galiņš. Jelgava. 89 lpp.
83. Oyarzabal J., Jimeno J., Engler A., Hardt C., Ruela J. (2005) Agent based Micro Grid Management System. **In:** *International Conference on Future Power Systems*, Amsterdam. pp. 6-10.
84. Pandiarajan N., Muthu R. (2011) Mathematical modeling of photovoltaic module with Simulink. **In:** *Electrical Energy Systems (ICEES), 2011 1st International Conference*, 3-5 Jan. pp. 258 - 263.
85. Paska J., Biczal P., Klos M. (2009) Hybrid power systems - An effective way of utilising primary energy sources. *Renewable Energy*, No. 34, pp. 2414-2421.
86. Pernia A.M., Arias J., Prieto M.J., Martinez J.A. (2009) A modular strategy for isolated photovoltaic systems based on microcontroller. *Renewable Energy*, No. 34, pp. 1825-1832.
87. Phan J. (2004) *MATLAB C Book*. : LePhan Publishing, 2004. 151 p.
88. Pica C., Bojoi R., Griva G., Tenconi A. (2007) Series-Connected DC-DC Power

- Converters for Low-Voltage DC Source in Distributed Generation. **In:** *9th International Conference. Electrical Power, Quality and Utilisation, Barcelona, 9 - 11 October, 2007.*
89. Plummer A. (2006) Model-in-the-Loop Testing. **In:** *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering.* pp. 183-199.
  90. *Reference Solar Spectral Irradiance: ASTM G-173.* (2011) [online] National Renewable Energy Laboratory [cited 09.09.2011.]. Available: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/ASTMG173/ASTMG173.html>.
  91. Schmidt P.B., Gasperi M.L., Ray G., Wijenayake A.H. (1997) Initial Rotor Angle Detection Of A Non-Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Machine. **In:** *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, October 5-9, New Orleans, Louisiana.
  92. *Scilab. Free Open Source Software for Numerical Computation.* (2011) [online] Digiteo [cited 15.10.2010.]. Available: <http://www.scilab.org/products/scilab>.
  93. *Share of renewable energy in gross final energy consumption.* (2011) [online] Eurostat [cited 23.10.2011]. Available: [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=t2020\\_31&plugin=1](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=t2020_31&plugin=1).
  94. Shenkman A.L. (2005) *Transient Analysis of Electric Power Circuits Handbook.* : Springer, Dordrecht, 2005. 569 pp.
  95. *Simple, Effective Lead-Acid Battery Modeling Process for Electrical System Component Selection.* (2007) Robyn A. Jackey. : Mathworks Inc., 2007.
  96. Skretas S.B., Papadopoulos D.P. (2009) Efficient design and simulation of an expandable hybrid (wind-photovoltaic) power system with MPPT and inverter input voltage regulation features in compliance with electric grid requirements. *Electric Power Systems Research*, No. 79, pp. 1271-1285.
  97. *Solar Photovoltaic Roadmap.* (2010) [online] IEA [cited 15.10.2011.]. Available: [http://www.iea.org/papers/2010/pv\\_roadmap\\_foldout.pdf](http://www.iea.org/papers/2010/pv_roadmap_foldout.pdf).
  98. *State of the environment report No 1/2010.* (2010) [online] European Environment Agency [cited 01.03.2011.]. Available: [http://www.eea.europa.eu/soer/synthesis/translations/vid-eiropa-2010-2013-stavoklis/at\\_download/file](http://www.eea.europa.eu/soer/synthesis/translations/vid-eiropa-2010-2013-stavoklis/at_download/file).
  99. Steurer M., Bogdan F., Ren W., Sloderbeck M., Woodruff S. (2007) Controller and Power Hardware-In-Loop Methods for Accelerating Renewable Energy Integration. **In:** *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, June 24-28, Tampa, USA.
  100. Steurer M., Li H., Woodruff S., Shi K., Zhang D. (2004) Development of a unified design, test, and research platform for wind energy systems based on hardware-in-the-loop real time simulation. **In:** *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, November 15, Aachen, Germany.
  101. *Technology Update: Process control simulations adapt to growing complexities.* (2010) [online] Gutierrez [cited 20.05.2011]. Available: <http://www.controleng.com/search/search-single-display/technology-update-process-control-simulations-adapt-to-growing-complexities/e5b5bf4786.html>.
  102. *Thomson Nelson glossary.* (2007) [online] Nelson Education [cited 08.05.2007.]. Available: <http://www.environment.nelson.com/0176169040/glossary.html>.
  103. Tiwari G.N., Dubey S. (2010) *Fundamentals of photovoltaic modules and their applications.* Cambridge, UK: RSCPublishing, 2010. 402 p.

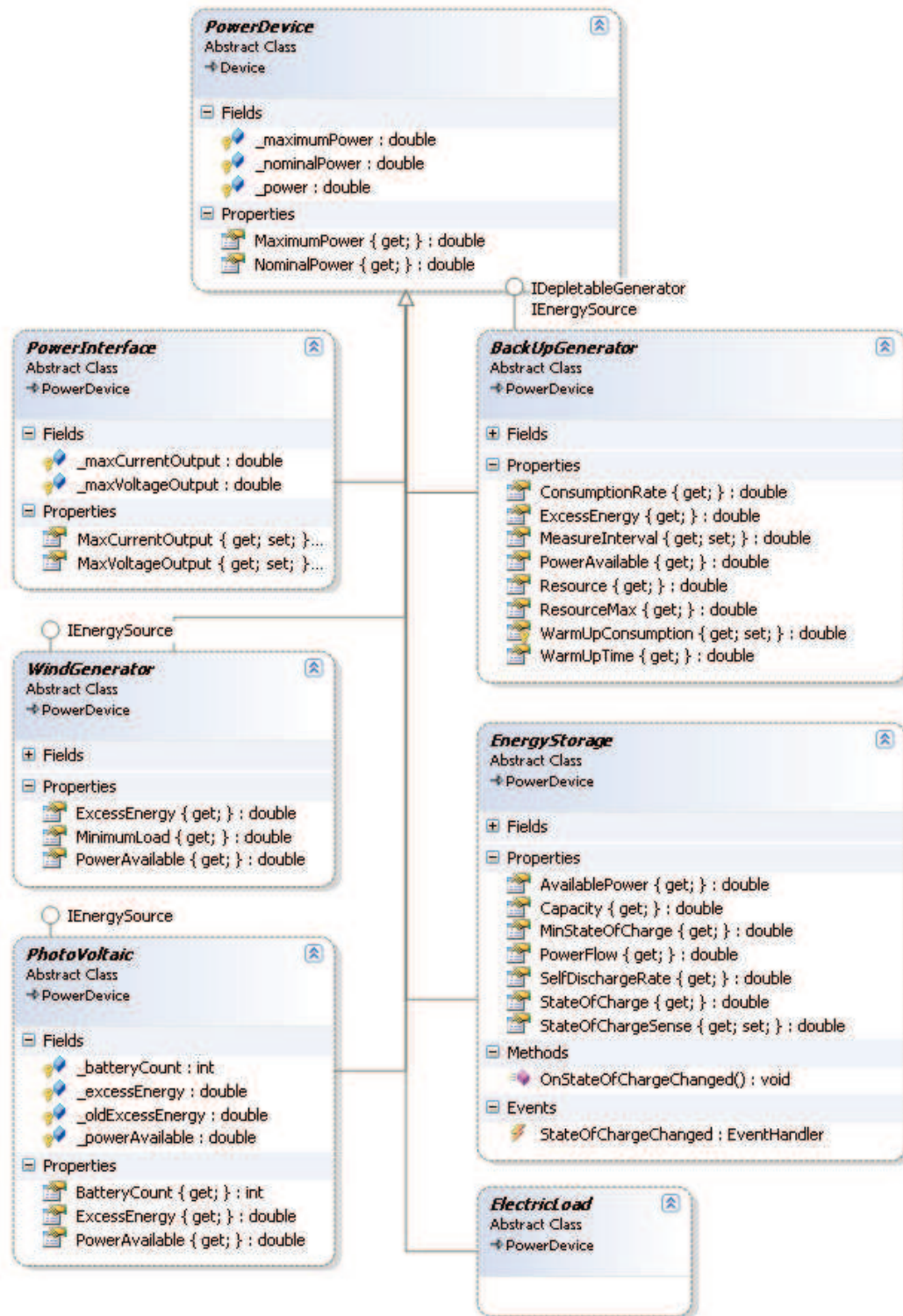
104. Trichakis P., Taylor P.C., Coates G., Cipcigan L.M. (2008) Distributed control approach for small-scale energy zones. **In: *Proceedings IMechE***. pp. 137-147.
105. Uzunoglu M., Onar O.C., Alam M.S. (2009) Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications. *Renewable Energy*, No. 34, pp. 509-520.
106. Vanags A. (2002) *Elektriskie tīkli un sistēmas I*. Rīga: Rīgas Tehniskā Universitāte, 2002. 480 lpp.
107. *Version 4.0 (R14) MATLAB Compiler Software*. (S.a.) [online] Mathworks Inc. [cited 21.02.2010.]. Available: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/compiler/rn/bqnylfk-1.html>.
108. Weiss G. (1999) *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Modern Approach to Artificial Intelligence*. London: The MIT Press, 1999. 619 p.
109. Wooldridge M., Jennings N. (1995) Intelligent agents: theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, No. 10, pp. 115-152.
110. *xPC Target. Perform hardware-in-the-loop simulation and real-time rapid control prototyping*. (2010) [online] Mathworks Inc. [cited 01.10.2010]. Available: <http://www.mathworks.se/products/xpctarget/>.
111. Youn J., Ma J., Sunwoo M., Lee W. (2007) Software-in-the-Loop Simulation Environment Realization Using Matlab/Simulink. *SAE Transactions*, No. 115, pp. 857-863.
112. Zervos A., Kjaer C. *About Wind Energy - The Facts. Scenarios and targets. Costs and benefits of wind development in the EU-27*. (2009) [online] EWEA [cited 15.10.2011.]. Available: <http://www.wind-energy-the-facts.org/en/scenarios-and-targets/chapter-4-costs-and-benefits-of-wind-development-in-the-eu27/>.
113. Zhang Y., Zane R., Maksimovic D. (2005) Current Sharing in Digitally Controlled Masterless Multi-Phase DC-DC Converters. **In: *Power Electronics Specialists Conference. PESC '05***.
114. Zhenhua J. (2008) Agent-based power sharing scheme for active hybrid power sources. *Journal of Power Sources*, No. 117, pp. 231-238.
115. Zhou T., François B. (2011) Energy Management and Power Control of a Hybrid Active Wind Generator for Distributed Power Generation and Grid Integration. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, No. 58, pp. 95-104.
116. Zhu J., Lubkeman D.L. (1997) Object-oriented development of software systems for power system simulations. *IEEE transactions on power systems*, No. 12, pp. 1002-1007.
117. *.NET Framework Conceptual Overview*. (2011) [online] Microsoft [cited 15.10.2011.]. Available: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/zw4w595w.aspx>.
118. *2006. gada sadales sistēmas būvdarbu vidējās izmaksas pieslēguma maksas aprēķinam*. (2006) [tiešsaiste] AS “Latvenergo” [skatīts 01.05.2010]. Pieejams: <http://www.latvenergo.lv/pls/portal/docs/PAGE/LATVIAN/FILES/izmaksas.pdf>.
119. *2010. gada sadales sistēmas būvdarbu vidējās faktiskās izmaksas pieslēguma maksas aprēķinam*. (2010) [tiešsaiste] AS “Sadales tīkls” [skatīts 15.10.2011.]. Pieejams: [http://www.latvenergo.lv/pls/portal/docs/PAGE/LATVIAN/FILES/vid\\_izm\\_300311.pdf](http://www.latvenergo.lv/pls/portal/docs/PAGE/LATVIAN/FILES/vid_izm_300311.pdf).
120. Коуд П., Норт Д., Мейфилд М. (1999) *Объектные модели, стратегии, шаблоны, приложения*. Москва: ЛОРИ, 1999. 434 стр.
121. Кругляк К. (2002) Промышленные сети: цели и средства. *СТА*, No. 4, ст. 6-17.

# Pielikumi

### Autonomās kombinētās elektroapgādes vadības programmatūras klašu diagramma

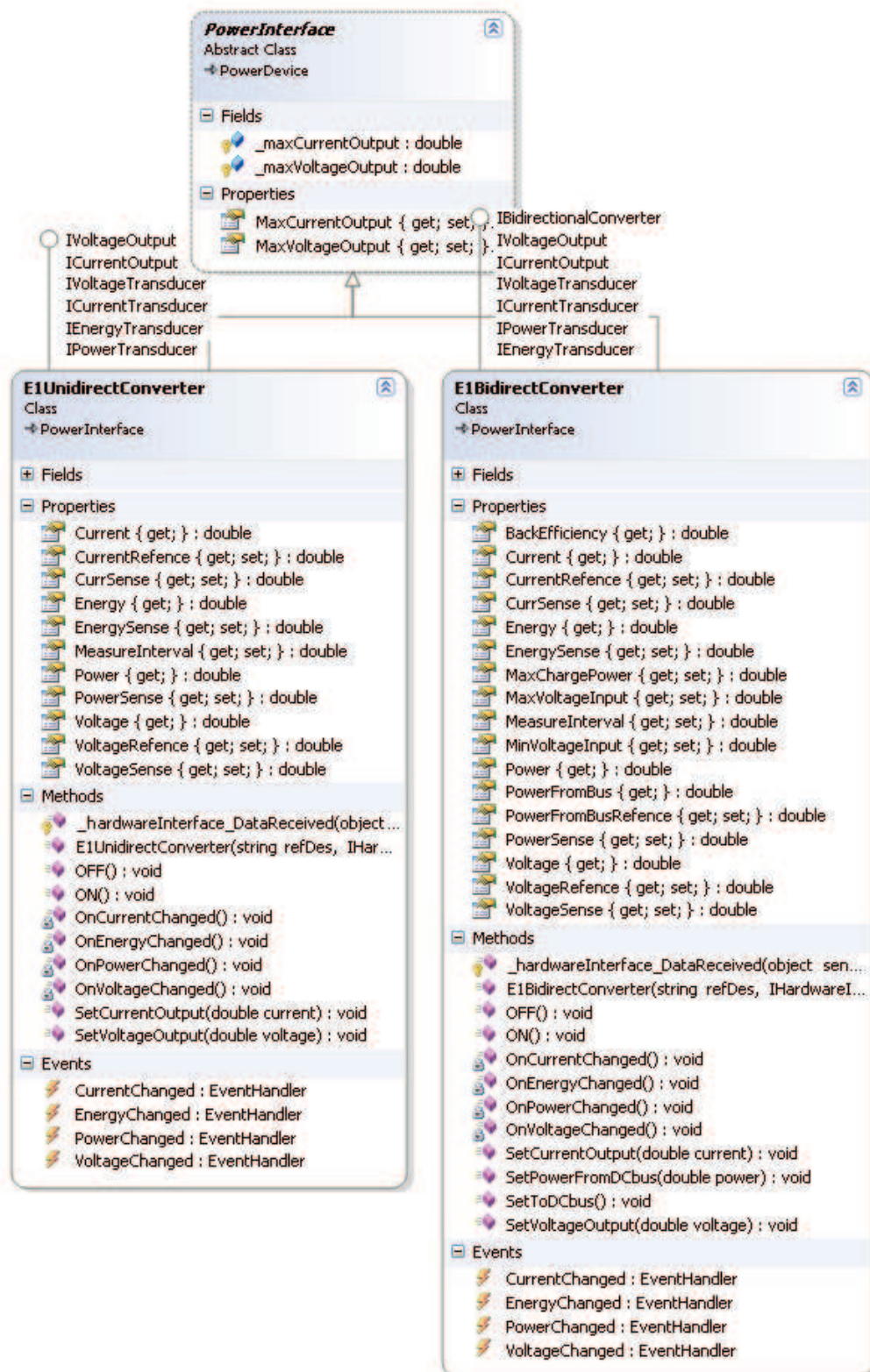


# 1. pielikuma nobeigums

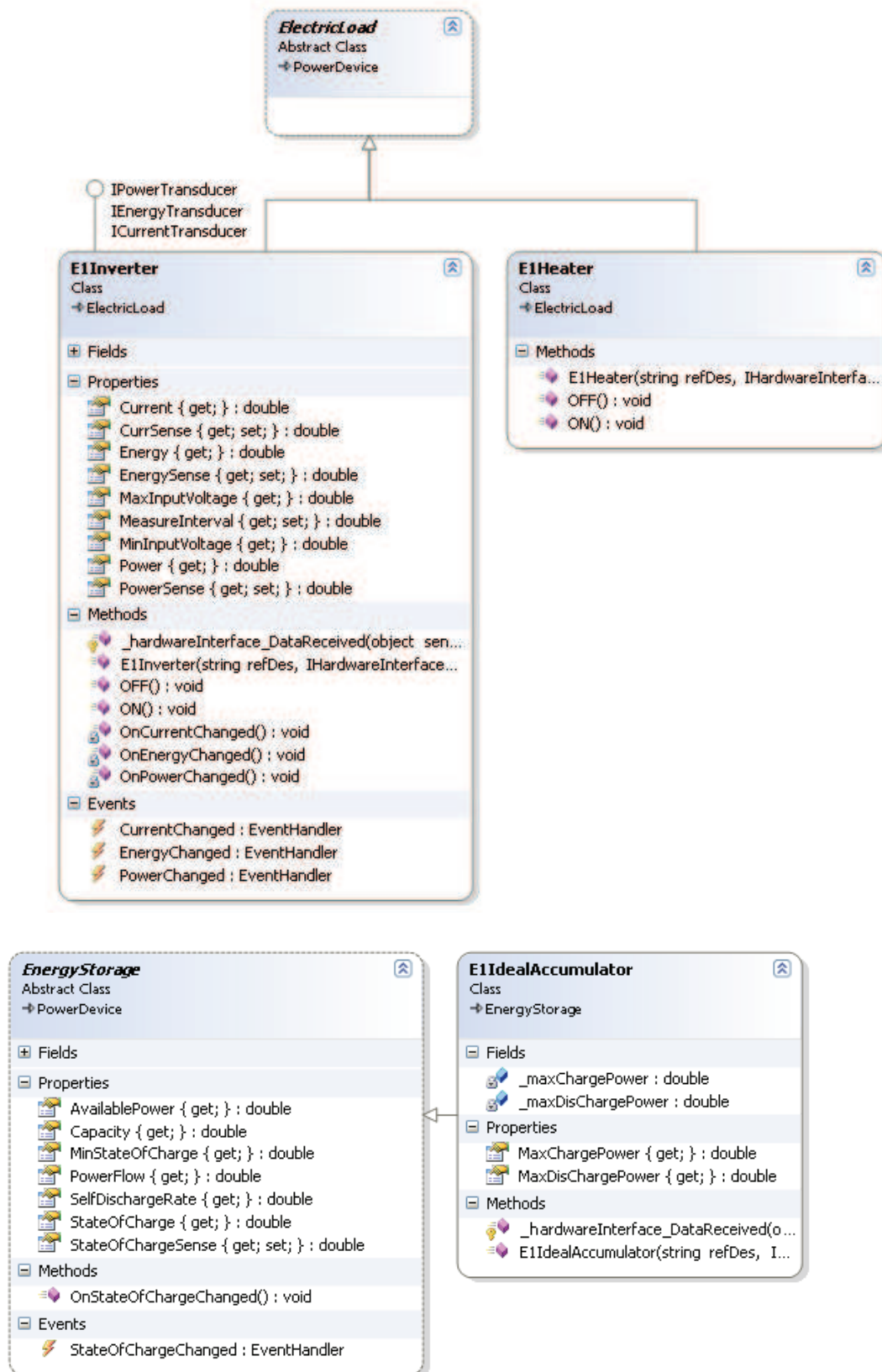




Programmatūras klases “E1UnidirectConverter“, “E1BidirectConverter“, “E1Inverter“, “E1Heater“ un “E1IdealAccumulator“



## 2. pielikuma nobeigums

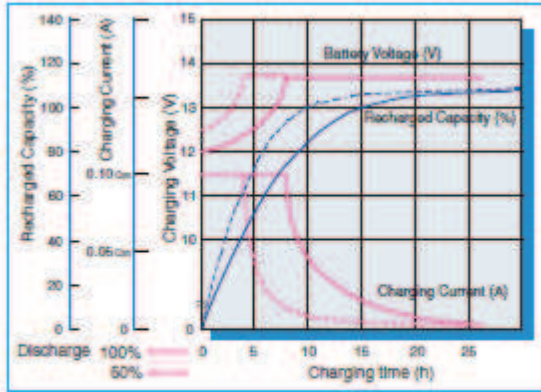


## IEC870 vedējkārtas programmatūras klašu diagramma

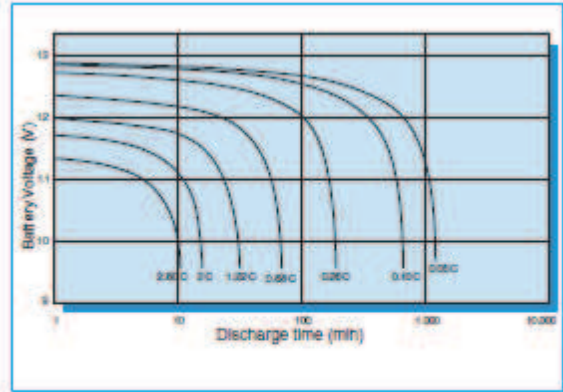


**Akumulatora FIAMM FG20451 izlādes tabulas**

Battery Voltage and Charge Time for Standby Use (at 25°C)



Discharge curves at different current / final voltage (at 25°C)



Constant Current discharge table (Amperes)

end voltage	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	1 hour	2 hour	3 hour	5 hour	10 hour	20 hour
09.60	14.6	10.2	7.66	6.17	4.36	3.16	2.51	1.50	1.11	0.75	0.42	0.23
09.90	14.4	10.1	7.61	6.13	4.33	3.15	2.50	1.50	1.10	0.74	0.42	0.23
10.02	14.2	9.99	7.53	6.07	4.31	3.14	2.49	1.49	1.10	0.74	0.42	0.23
10.20	13.7	9.70	7.38	5.95	4.27	3.12	2.48	1.48	1.09	0.74	0.42	0.23
10.50	12.7	9.11	7.05	5.72	4.19	3.07	2.44	1.46	1.08	0.72	0.41	0.23
10.80	11.8	8.53	6.64	5.40	4.01	2.88	2.30	1.34	0.99	0.68	0.39	0.22

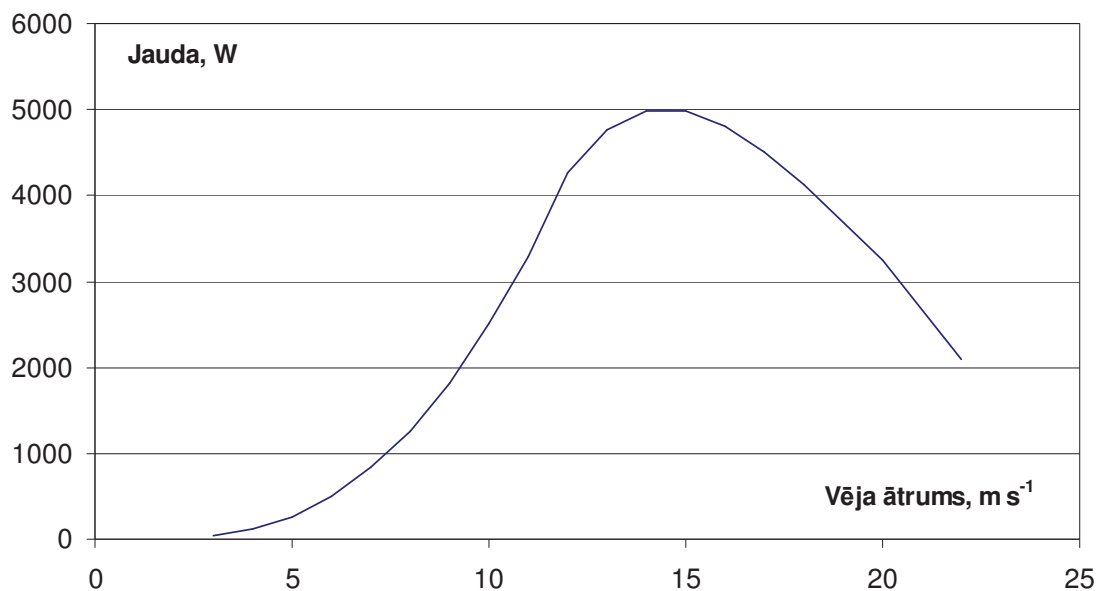
Constant Power discharge table (Watts per bloc)

end voltage	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	1 hour	2 hour	3 hour	5 hour	10 hour	20 hour
09.60	147	106	81.2	66.3	47.6	35.2	28.2	17.1	12.8	8.65	4.91	2.71
09.90	145	106	80.8	66.1	47.5	35.2	28.2	17.1	12.7	8.65	4.90	2.71
10.02	143	104	80.1	65.5	47.3	35.1	28.2	17.1	12.7	8.61	4.89	2.71
10.20	138	101	78.6	64.3	46.9	34.8	28.0	17.0	12.6	8.56	4.86	2.70
10.50	129	95.4	75.5	62.0	46.2	34.5	27.7	16.9	12.5	8.48	4.83	2.68
10.80	120	89.9	71.5	59.0	44.6	32.5	26.2	15.5	11.6	7.99	4.66	2.63

### Vēja ģenerators ECO-3000W izejas jaudas raksturliktne

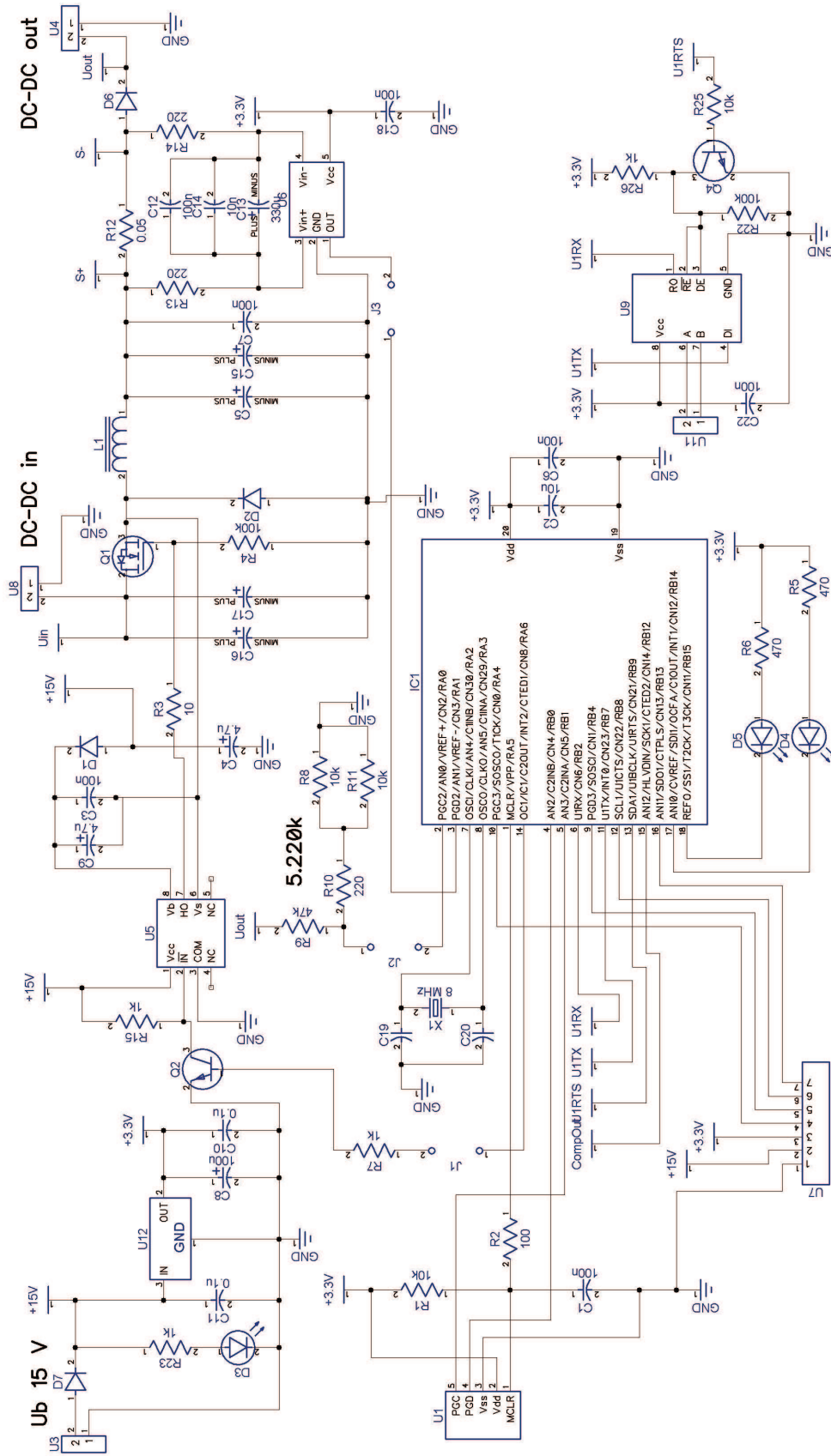
Avots skatīts 05.10.2011. Pieejams:

<http://www.small-windturbine.com/Horizontal-Wind-Turbine-Generators-ECO-3000W-ECO-3KW.htm>

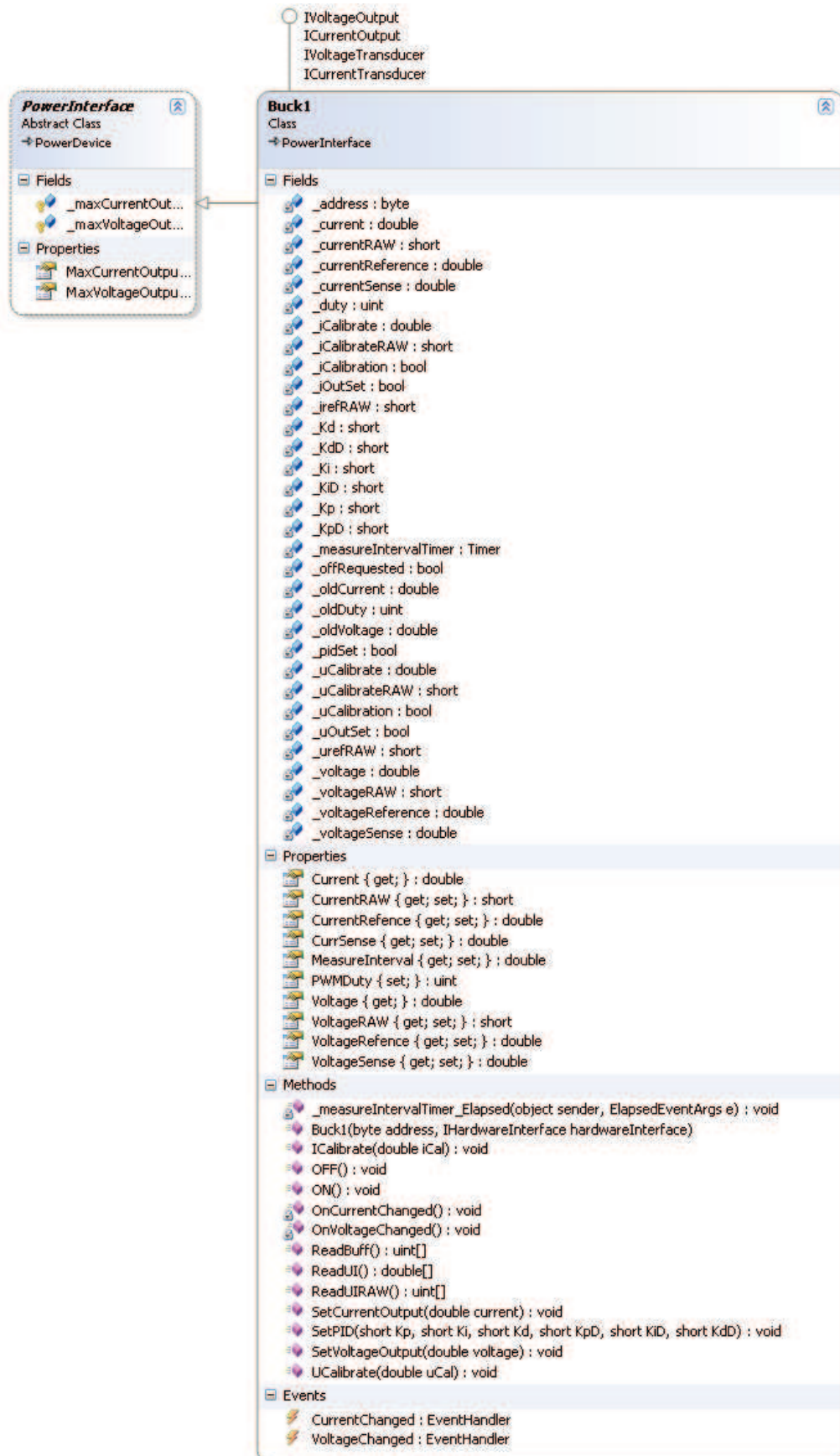


<b>vēja ātrums, m·s<sup>-1</sup></b>	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>elektriskā jauda, W</b>	40	110	250	500	840	1260	1820	2520	3280
<b>vēja ātrums, m·s<sup>-1</sup></b>	12	13	14	15	16	17	18	20	22
<b>elektriskā jauda, W</b>	4260	4770	4980	4980	4800	4500	4120	3250	2100

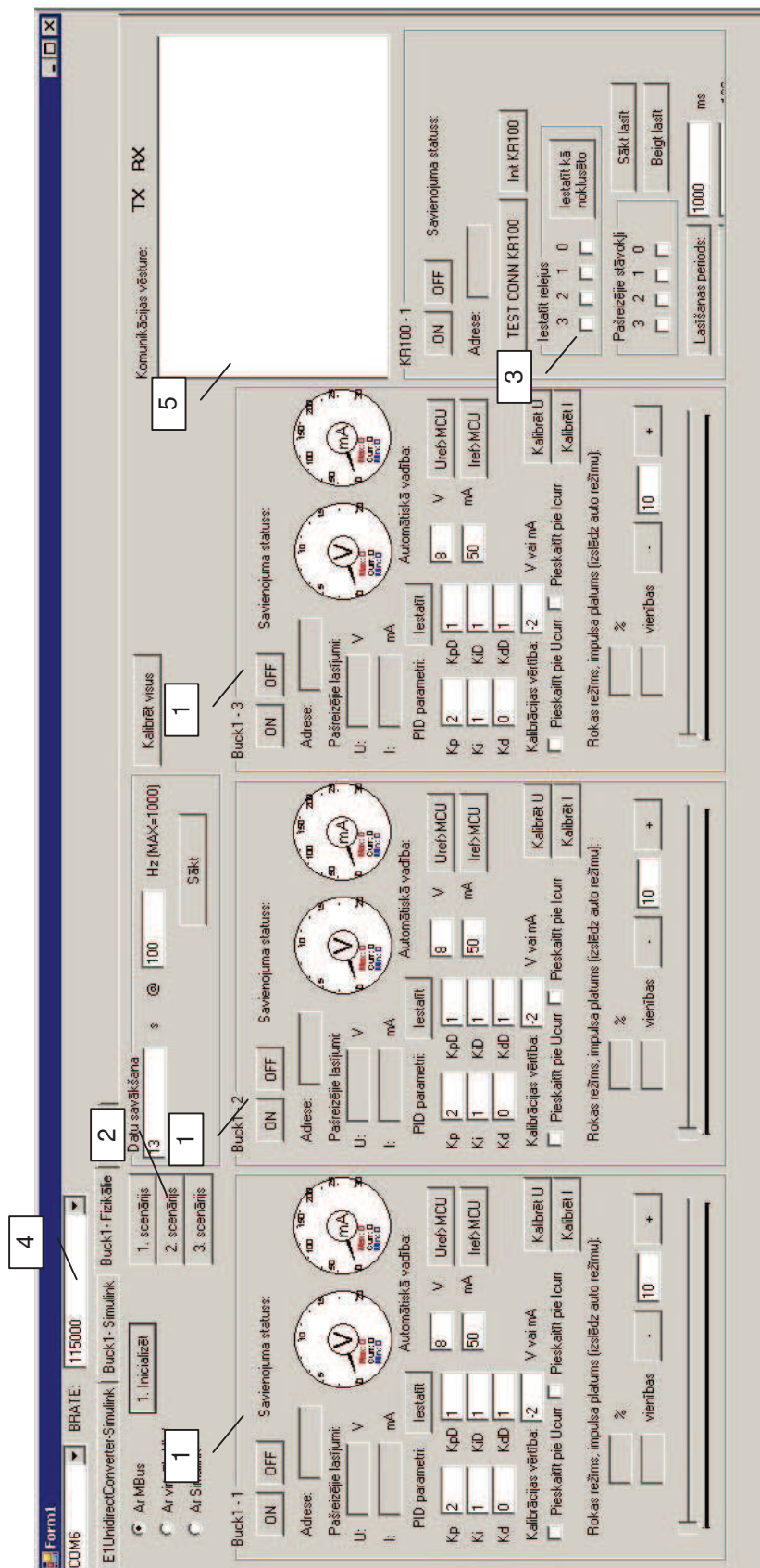
Līdzstrāvas pārveidotāja “Buck1” elektriskā shēma



## Programmatūras klase “Buck1”



## Vadības programmas logs līdzstrāvas kopnes fizikālajam modelim



1 – "Buck1" līdzstrāvas pārveidotāju vadības paneli; 2 – slodzes ieslēgšanas scenāriju izvēle;  
 3 – releju vadība; 4 – komunikācijas porta iestatījumi; 5 – komunikācijas vēsture



## Saules bateriju un akumulatora uzlādes kontrolēra Steca PR3030 tehniskie dati

### 9. Technical Data

The technical data is subject to alterations by the manufacture.

Elektrical Data	
Operating voltage	12 V or 24 V; automatic recognition
Voltage range 12 V	6.9 V – 17.2 V
Voltage range 24 V	17.3 V – 43.0 V
Permitted operating temperature range	-10 °C to +50 °C
Permitted storage temperature range	-20 °C to +80 °C
Power consumption mA	12,5 mA @ 12 V; 15,8 mA @ 24 V
PWM-Frequency	30 Hz
Maximum input voltage	45 V
Minimum battery voltage	6.9 V

Currents				
	PR 1010	PR 1515	PR 2020	PR 3030
Max. continuous module current at 25 °C	10 A	15 A	20 A	30 A
Max. continuous load current at 25 °C	10 A	15 A	20 A	30 A

Excess Temperature Protection	
Disconnect load	>85 °C
Reconnect load	<75 °C

Data for final charging voltage		
Depends on set battery type	Gel – storage battery (GEL)	Liquid electrolyte (Li)
Float charge	14.1 V / 28.2 V	13.9 V / 27.8 V
Boost charge; for 2:00 h	14.4 V / 28.8 V	14.4 V / 28.8 V
Equalization charging; for 2:00 h	---	14.7 V / 29.4V
30 day maintenance charge, if necessary	14.4 V (28.8 V) (for 2:00 h)	14.7 V (28.8 V) (for 2:00 h)
Temperature compensation	-4 mV per °K and cells (internal sensor present, optional external sensor possible)	

Charge controller activation		
Activation threshold of the charge type	SOC Control	Voltage control
Float charge	SOC >=70 %	>=12.7 V resp. >= 25.4 V
Boost charge	SOC 40 % - 69 %	11.7 V - 12.4 V; resp. 23.4 V - 24.8 V
Equalization charge	SOC < 40 %	< 11.7 V resp. 23.4 V
30 day maintenance charge	if within 30 days no equalization or boost charge was active.	
Load disconnection		
	SOC Control	Voltage control
Early warning load disconnection	SOC <40 %	< 11.7 V / 23.4 V
Load disconnection	SOC <30 %	< 11.1 V / 22.2 V
Load reconnection	SOC >50 %	> 12.6 V / 25.2 V
Mechanical Data		
Protection type	IP 22	
Installation	wall installation	
Weight	350 g	
Housing	recyclable, plastic housing	
Dimensions L x B x H	187 x 44 x 96 mm	
Fastening hole clearance	vertical 60 mm; horizontal 177 mm	
Terminals (fine / strand)	16 mm <sup>2</sup> / 25 mm <sup>2</sup> / AWG: 6 / 4 mm <sup>2</sup>	

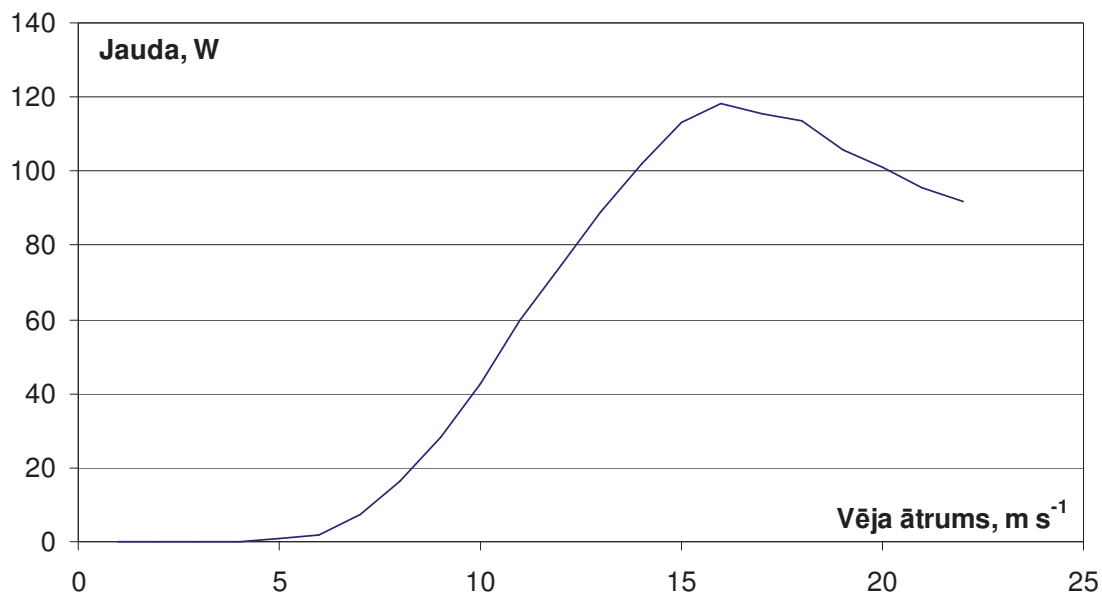




### Vēja ģeneratora Fuhrländer 100 kW izejas jaudas raksturlīkne

Avots skatīts 05.10.2011. Pieejams:

[http://www.masstech.org/Project%20Deliverables/GB\\_GSI\\_FeasibilityStudy\\_Natick\\_Att.pdf](http://www.masstech.org/Project%20Deliverables/GB_GSI_FeasibilityStudy_Natick_Att.pdf)



<b>vēja ātrums, m·s<sup>-1</sup></b>	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>elektriskā jauda, W</b>	1	2	8	16	28	43	60	75	89
<b>vēja ātrums, m·s<sup>-1</sup></b>	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<b>elektriskā jauda, W</b>	102	113	118	115	113	106	101	96	92

## Liellopu fermas autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas simulācijas vadības programmas koda fragmenti

```

public void Simulate1(object param)
{
    object[] paramArr = (object[])param;
    ProgressBar pb = (ProgressBar)paramArr[0];
    Label pl = (Label)paramArr[1];
    string modelPath = (string)paramArr[2];
    string[] columnsToLog = (string[])paramArr[3];
    string resultFile = (string)paramArr[4];
    double simulatePeriod = Convert.ToDouble(paramArr[5]);

    //Inicializē simulācijas objektu un MATLAB vidi
    EnergySimulation.ESimulation eSimulation = new ESimulation();
    eSimulation.SimulationError+=new
    SimCompleteEventHandler(eSimulation_SimulationError);

    //Aparatūras intereiss simulācijai
    HPS.HardwareInterfaces.HPSimInterface aHPSimInterface = new
    HPS.HardwareInterfaces.HPSimInterface(eSimulation);
    eSimulation.LoadModel(modelPath);

    //Atver norādīto modeli
    eSimulation.InitModel();

    //Kombinētās elektroapgādes sistēmas objekts
    HybridPowerSystem HPS2 = new HybridPowerSystem();

    //Iekārtu objekti
    ElUnidirectConverter C1 = new ElUnidirectConverter("C1",
    aHPSimInterface);
    ElUnidirectConverter C2 = new ElUnidirectConverter("C2",
    aHPSimInterface);
    ElUnidirectConverter C3 = new ElUnidirectConverter("C3",
    aHPSimInterface);
    ElFuelG G1 = new ElFuelG("G1", aHPSimInterface);
    ElInverter L1 = new ElInverter("L1", aHPSimInterface);
    ElPhotoV PV1 = new ElPhotoV("PV1", aHPSimInterface);
    ElWindG WGsl = new ElWindG("WGsl", aHPSimInterface);
    ElLAcid A1 = new ElLAcid("A1", aHPSimInterface);

    //Iekārtu pievienošana kombinētās elektroapgādes sistēmai
    HPS2.Devices.Add(C1);
    HPS2.Devices.Add(C2);
    HPS2.Devices.Add(C3);
    HPS2.Devices.Add(G1);
    HPS2.Devices.Add(L1);
    HPS2.Devices.Add(PV1);
    HPS2.Devices.Add(WGsl);
    HPS2.Devices.Add(A1);

    try
    {
        //Ieslēdz iekārtas
        L1.ON();
        G1.OFF();
        C1.ON();
        C2.ON();
        C3.ON();
    }
}

```

## 12. pielikuma nobeigums

```
//Maksimālāsprieguma un strāvas ierobežojumi
C1.VoltageReference = C2.VoltageReference = C3.VoltageReference = 136.5;
C1.CurrentReference = C2.CurrentReference = C3.CurrentReference = 400;

double simProgress = 0;
double Idiff = 0;

//Pilnais simulācijas cikls
for (int i = 0; i < simulatePeriod; i++)
{
    //Vadības iedarbes diskretizācijas periods - 60 s
    eSimulation.Run(60);

    //Sistēmas vadība pēc akumulatora cikliskās uzlādes algoritma
    if (A1.StateOfCharge < 50) G1.ON();
    if (A1.StateOfCharge > 90) G1.OFF();
    Idiff = L1.Current + C1.Current + C2.Current + C3.Current - 0.9
        * A1.MaxChargeCurrent;
    C2.CurrentReference = C2.Current - 0.65 * Idiff;
    C3.CurrentReference = C3.Current - 0.35 * Idiff;

    //Simulācijas progressa vizualizācija
    simProgress = (double)(i + 1) / (simulatePeriod) * 100;
    pb.Value = (int)simProgress;
    pl.Text = "Simulation progress: " + Math.Round(simProgress, 3) +
        " %";
}
eSimulation.SaveResult(resultFile, columnsToLog);
MessageBox.Show("Sim OK un saglabāts!");
}
catch (ThreadAbortException ex)
{
    eSimulation.SaveResult(resultFile, columnsToLog);
    MessageBox.Show("Sim ABORT un saglabāts!");
}
}
```